

ISBN 978-966-981-519-4



9 789666 815194 >

ДНЕПР / ЛИРА  
2021

**ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ  
СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

Ф. В. НОВИКОВ, В. А. ЖОВТЮБРЮХ,  
В. С. ГУСАРЕВ, В. Б. НАДДАЧИН,  
А. А. ЯКИМОВ, А. А. АНДИЛАХАЙ,  
А. С. СЕРГЕЕВ, Д. Ф. НОВИКОВ

ДНЕПР  
ЛИРА  
2021

Ф. В. НОВИКОВ, В. А. ЖОВТЮБРЮХ  
В. С. ГУСАРЕВ, В. Б. НАДДАЧИН  
А. А. ЯКИМОВ, А. А. АНДИЛАХАЙ  
А. С. СЕРГЕЕВ, Д. Ф. НОВИКОВ

# ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ



*Новиков Ф. В.  
Жовтобрюх В. А.  
Гусарев В. С.  
Наддачин В. Б.  
Якимов А. А.  
Андилахай А. А.  
Сергеев А. С.  
Новиков Д. Ф.*

# **ИННОВАЦИОННОЕ РАЗВИТИЕ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

**Монография**

Днепр / **ЛИРА** / 2021

УДК 621.01(02.064)

Н 73

Рецензенты: докт. техн. наук, профессор, профессор кафедры "Технология машиностроения" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" *Клочко А. А.*; докт. техн. наук, профессор, профессор кафедры "Мехатроника и детали машин" Харьковского национального технического университета сельского хозяйства имени Петра Василенко *Коломиец В. В.*; канд. техн. наук, заместитель главного инженера ПАО "Свет шахтера" (г. Харьков) *Нежебовский В. В.*

**Авторский коллектив:** докт. техн. наук, профессор Новиков Ф. В. – введение, раздел 3, общие выводы; канд. техн. наук Жовтобрюх В. А. – раздел 2; канд. техн. наук, профессор Гусарев В. С. – раздел 1; канд. техн. наук, доцент Наддачин В. Б. – раздел 4; докт. техн. наук, профессор Якимов А. А. – раздел 5; докт. техн. наук, профессор Андилахай А. А. – раздел 6; аспирант Сергеев А. С. – раздел 7; доктор философии (PhD) Новиков Д. Ф. – раздел 8.

Н 73    **Инновационное развитие современных технологий : монография /**  
Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, В. С. Гусарев, В. Б. Наддачин,  
А. А. Якимов, А. А. Андилахай, А. С. Сергеев, Д. Ф. Новиков. –  
Днепр : ЛИРА, 2021. – 480 с.  
ISBN 978-966-981-519-4

Рассмотрены этапы становления технологических знаний и проблемы инновационного развития технологий в современных условиях. Обобщен опыт применения на предприятиях Украины современных металлорежущих станков с ЧПУ и высокоэффективных режущих лезвийных твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями. Приведены новые теоретические и практические решения технологических задач, связанные с лезвийной и абразивной обработками. Значительное внимание уделено дальнейшему развитию прогрессивного метода прерывистого шлифования. Определены перспективы развития промышленных предприятий на основе создания конкурентоспособной продукции с обеспечением принципов социально-ответственного маркетинга. Даны практические рекомендации.

Рекомендовано для студентов, аспирантов и преподавателей инженерных и экономических специальностей высших учебных заведений, а также для специалистов и руководителей предприятий, повышающих свою квалификацию.

УДК 621.01(02.064)

© Новиков Ф. В., Жовтобрюх В. А., Гусарев В. С.,  
Наддачин В. Б., Якимов А. А., Андилахай А. А.,  
Сергеев А. С., Новиков Д. Ф., 2021

ISBN 978-966-981-519-4

© ЛИРА, 2021

## Введение

Современное развитие общества невозможно представить без развития науки, техники и технологий. В этом мы ежедневно убеждаемся, пользуясь компьютером, телефоном, автомобилем и многими другими чудесными технологическими творениями человеческого разума. За прошедшие 200 лет технологии претерпели значительные изменения. Из простых технологий они превратились в сложный комплекс знаний ноу-хау, включая наукоемкие высокие технологии: нанотехнологии, информационные технологии, робототехнику, искусственный интеллект, 3D-принтеры, процессоры, социальные технологии и др. Они стали инновационными, опережающими время, непрерывно обновляющимися по мере развития науки и техники, охватывающими производственную и социальную сферу. Поэтому знание тенденций развития современных технологий открывает широкие возможности подготовки высококвалифицированных специалистов для различных сфер деятельности, особенно для сферы организации и ведения бизнеса, в том числе стартапов. Появляется возможность специалистам среди известных новейших инновационных технологий увидеть направления для создания опережающих технологий, которые помогут создать новую конкурентоспособную продукцию и принести значительную прибыль предприятию. В значительной мере это относится и к производственной сфере, поскольку в настоящее время на промышленные предприятия Украины поставляется современное зарубежное технологическое оборудование, в особенности металлообрабатывающее оборудование, позволяющее повысить производительность труда в 10 и более раз при обеспечении высокого качества обрабатываемых поверхностей деталей машин. В результате выпускаемая промышленная продукция становится конкурентоспособной на мировых рынках и предприятия получают новое развитие.

Большое значение для машиностроительного производства имеют технологии абразивной обработки и, в особенности, разработанный профессором Якимовым А. В. высокоэффективный метод прерывистого шлифования. Его практическое применение обеспечивает высокое качество обработки ответственных деталей машин, в частности, авиационно-космического назначения, изготовленных из высоко-



прочных и труднообрабатываемых материалов [183 – 185, 222, 223, 249]. Поэтому в настоящей монографии значительное внимание уделено дальнейшему развитию этого прогрессивного метода абразивной обработки.

Следует отметить, что своими научными работами профессор Якимов А. В. внес большой вклад в развитие технологии машиностроения. Под его руководством разработана фундаментальная физико-математическая теория технологии машиностроения и процессов механической обработки. Он подготовил более 60 кандидатов и докторов технических наук, создал всемирно известную научную технологическую школу, которая и сейчас верна традициям своего Учителя, активно участвует в создании новых инновационных технологий и их применении в производстве.

В настоящей монографии приведены результаты научных исследований в области технологий производства и инженерного образования, выполненные учениками профессора Якимова А. В., его коллегами по работе и единомышленниками. Основное внимание в монографии уделено этапам становления технологических знаний и инновационному развитию технологий в современных условиях. Рассмотрены проблемы технологии машиностроения и результаты их успешного решения в настоящее время. Обобщен опыт применения на предприятиях Украины прогрессивных технологий механической обработки с использованием высокооборотных металлорежущих станков с ЧПУ типа "обрабатывающий центр" и высокоэффективных режущих лезвийных твердосплавных и керамических инструментов с износостойкими покрытиями зарубежного производства. Приведены новые теоретические и практические решения технологических задач, связанные с созданием новых более эффективных процессов лезвийной обработки, шлифования и финишной абразивной обработки. Раскрыты закономерности и технологические возможности чрезвычайно перспективного метода финишной абразивной обработки деталей затопленными струями.

Приведены результаты научных исследований перспектив развития промышленных предприятий на основе создания конкурентоспособной продукции с обеспечением принципов социально-ответственного маркетинга. Это новое направление в деятельности предприятий позволяет вывести их из кризисного состояния и добиться получения прибыли.

# Раздел 1

## Инженерное образование и развитие технологий

### 1.1. Современное инженерное образование

#### 1.1.1. Проблема инженерного образования XXI века

Современный научный подход к высшему инженерному образованию требует реализации парадигмы, содержащей установку на информацию, знание и понимание [49].

Процесс освоения информации содержит ряд этапов, которые активно формируют знания. Вот эти этапы:

запоминание фактов, восприятие ситуации, выделение из нее информационного образа (понятия);

усвоение новой информации на основе старой;

обучение – приобретение устойчивых знаний для формирования целесообразного поведения (принятия решения).

Полученная в результате обучения информация требует упорядочения на основе идентификационных признаков, классификации по иерархическим уровням, организации информации в слоты и фреймы на основе тезауруса. Тезаурус – совокупность упорядоченных знаний, накопленных человеком или коллективом. В английском языке semantic dictionary – смысловой словарь, отображающий знание, являющийся его информационным ресурсом. Тезаурус позволяет гносеологической системе моделировать среду и самого себя, определять возможность роста информационного потока, развития, обучения, экспертизы знаний с целью дальнейшего использования. В основе этих процессов лежит механизм генерирования новой информации о последовательном преобразовании и присоединении слотов и фреймов из базы знаний для получения и репродукции нового знания (тезауруса).

Следующим актом обучения в высшей школе является понимание ситуации, явления, процесса на основе физических принципов их математического отображения. Однако надо иметь в виду, что слова и символы не всегда выражают знания (содержание тезауруса). Иногда они просто звуки, мел на доске, машинопись без смысла, нередко математические уравнения, которые выражают некую связь между зна-

ками (символами) и неверны или лишены физического, экономического, технического содержания. Все это свидетельствует о том, что знать – это еще не всегда означает понимать. Дж. Диксон [60] приводит пример такой ситуации из практики экзаменов у студентов. Студенты часто говорят профессорам: "Я все понимаю, я три, пять дней готовился, знаю формулировки всех принципов и теорем, знаю все формулы, но задачу решить не могу". Они обманывают только самих себя, а не своих профессоров, которым известно, что эти студенты знают уравнения и теоремы, но не понимают принципов реальных явлений, принципов ситуаций. Научение понимания (увеличивает тезаурус) происходит через изучение проблемных методов [61].

Аксиоматический метод позволяет получить результат из условия задачи и априорного набора аксиом. Этот формальный метод содержит следующие приемы: алгоритмический, диспозиционный, интуитивно-вероятностный.

Эмпирический метод содержит набор эмпирических правил решения и предполагает следующие приемы: выделение, распознавание, применение эмпирических процедур, поиск решений и оценок.

Ассоциативный метод предполагает абстрагирование задачи, ассоциативный поиск, использующий толерантность абстрагированных форм, поиск порождающих операторов на основании аналогий и ассоциаций.

Предлагаемые методы касаются одной основной проблемы – установления понимания физических, технических, экономических принципов при концептуальном решении задач, относящихся к разным областям знания: разработке общей методологии исследования проблем и формализации категорий, ситуаций, взаимодействий; развития количественно представленных факторов, категорий и проблем; решений крупноразмерных задач техники, исследований операций. Предполагаем, что рассмотренные проблемы позволят решить стоящие перед высшей школой задачи подготовки инженерных кадров XXI века.

### **1.1.2. Концепция инженерного образования XXI века**

Удивительные достижения в области науки и техники стран большой семерки в XX веке определяются главным образом политикой этих государств в сфере образования. Стартовой основой этой по-

литики было введение всеобщего среднего образования, а в некоторых из них – обязательного. Далее происходило социально-общественное стимулирование высшего образования, что сопровождалось открытием большого количества ВУЗов в конце XIX – начале XX веков.

Огромный всплеск расширения высшего образования, в том числе инженерного, произошел в исторический период после второй мировой войны. Он приобрел престижное направление как в индустриально развитых, так и в развивающихся странах. По данным ЮНЕСКО наибольшее число студентов приходилось на 1980-е годы.

Основная концепция технического образования строилась по сценарию десятилетия апробированной и определенным образом заимствованной из общеобразовательной школьной системы. Эта парадигма образовалась на трехуровневой схеме обучения, результатом которой должны быть сформулированы: навыки, умения, знания. Перенесение этой парадигмы из средней школы в высшую не решило главной задачи высшего образования – выработки понимания существа (явления, проблемы и т.п.). На этот недостаток высшего образования указывали выдающиеся ученые и педагоги разных стран: Виннер Н., Глушко В. М., Диксон Дж., Капица П. Л., Моисеев Н. Н., Пойя Д., Тимошенко С. П. и др. Компенсацией этого недостатка выступала практика как в период учебного процесса, так и после окончания курса.

Последнее десятилетие XX века характеризуется проникновением в учебный процесс электронных средств обучения: спутникового телевидения, всемирной информационной сети телекоммуникаций. Передовая страна большой семерки – Япония – объявила программу всеобщего высшего образования: 94 % выпускников средних учебных заведений идут в ВУЗы Японии или выезжают в зарубежные страны для продолжения образования.

Информационный взрыв, о котором предупреждали Рассел Б., Виннер Н., Моисеев Н., Ляпунов А. и др., произошел. Метод обучения, результатом которого стало формирование навыков, умений и знаний, перестал удовлетворять общественные потребности. Необходима новая концепция общего и особенно инженерного образования.

Новая концепция обучения потребовала создания новой парадигмы, состоящей из трех актов: информационного, аналитического и синтетического.

Первый – информационный акт – ставит и отвечает на вопросы: что, где, когда, сколько? – традиционный набор вопросов дисциплин гуманитарного профиля.

Второй акт знаний и анализов ставит и отвечает на вопрос: как? – традиционный вопрос инженерно-технологических дисциплин.

Третий акт синтеза информации требует понимания сути, смысла действия, ставит и отвечает на вопрос: почему? Это традиционный подход для науки.

Таким образом, современный научный подход к высшему образованию требует реализации парадигмы, содержащей установку на информацию, знание и понимание.

Некоторые исследователи в области научно-технологического прогресса и высшего образования предложили ранжировку этих актов по шкале IQ: информационный 1 – 2; знаний 15 – 20; понимания 170 – 190.

Исходя из этих предпосылок, встречая бурный рост наукоемких технологий XXI века, центр тяжести в подготовке специалистов в Высшей школе должен сместиться в сторону понимания существа задач и проблем научно-технологического прогресса. В этом состоит главное направление инженерного образования в настоящее время.

### **1.1.3. Виртуальное обучение – новый стиль инженерного образования XXI века**

Самым существенным достижением инженерного образования является подготовка специалистов для решения задач, которые не известны на момент обучения [45, 49]. Обучение – это приобретение знаний на основе изучения "прошлого опыта", теоретических и практических установок, наработанных предыдущими поколениями ученых, инженеров и педагогов. На изучение "прошлого опыта" в ВУЗах тратится до 80 % учебного времени. В учебном процессе из года в год излагается одна и та же информация, решаются одни и те же задачи и упражнения, по так называемым базовым дисциплинам. Это стимулирует формирование "базы прошлых знаний".

Как же на основе прошлого или даже настоящего приобрести знания, пригодные для решения задач будущего?

Известно, что инженерная деятельность требует участия специалиста в трех сферах информационно-практического процесса: конструирования, производства и исполнения (эксплуатации) изделий.

В настоящее время во все эти сферы проник мощный инструмент переработки информации – ЭВМ, в его современном виде ПК и "сети мировой паутины".

Сформировались САПР конструкций, техпроцессов, АСУ производства и эксплуатации. Все это успешно реализуется в соответствующих технических сферах. А как это применяется в сфере образования инженеров?

Единственная возможность – перейти от традиционных методов обучения к обучению с помощью виртуальных моделей, содержащих богатый формационный тезаурус, который позволит моделировать техническую (и не только техническую) среду и самого себя.

Виртуальное моделирование (иногда называемое виртуальной реальностью) – это замена оригинала условной моделью (представляющей его) на экране дисплея ПК благодаря определенной семантической договоренности о смысле, приписанной этой модели.

Виртуальные модели впервые были применены для обучения пилотов морской авиации навыкам в проведении операций взлета и посадки самолетов на подвижные палубы авианосцев. Для этой цели были построены компьютерные тренажеры, имитирующие этот операционный процесс.

Таким образом, виртуальные способы обучения впервые применены в сфере эксплуатации объекта. Указанный опыт в дальнейшем перенесен на обучение вождению автомобилем, поездом метро, на планирование транспортных перевозок с помощью роботов-тележек в гибких производствах.

Сложные задачи САПР конструкций и технологий формируют виртуальное структурное (морфологическое) и функциональное моделирование. Оно применяется при конструировании самолетов, ракет, турбин, функциональных зданий, многооперационных процессов обработки и сборки изделий машиностроения.

Достижение высоких результатов в инженерной сфере возможно только благодаря широкому использованию информации, сосредоточенной на сайтах Интернета, и применению виртуального моделиро-

вания на развитой базе наглядного динамического представления заданной функции (functional visualization).

Достаточно представить, например, на экране дисплея Виртуальное изображение подвижной конструкции с наблюдаемыми напряжениями нагруженных частей. Эти напряжения (если они изучаются) могут варьироваться по желанию студента, преподавателя.

Другой пример из ряда технологических задач – виртуальное изображение процесса обработки детали. Варьируются режимы резания, на дисплее ПК наблюдается течение стружки: непрерывное или ячеестное (прерывистое). Изменяются параметры (изменяется динамика резания), изменяется виртуальный образ процесса. Исследование и обучение совмещаются в своем единстве. Такой процесс перехода от статического представления к кинематическому будет способствовать пониманию сути процесса или явления, окажется мощным стимулом к познанию и новым идеям инженерной реальности.

В связи с такой организацией обучения специалистов возникает вопрос: "Кем при этом является преподаватель?". Он водитель (driver) по виртуальной среде или ее организатор (organizer), а может просто учитель (teacher), с помощью которого мы пытаемся заглянуть в будущее и найти пути для решения еще неизвестных нам задач. Именно обучение на базе виртуального подхода, использующего мощную базу тезауруса интернета – есть новый стиль в инженерном образовании XXI века.

#### **1.1.4. Глобализация и инженерное образование XXI века**

Глобализация, как понятие, появилась на слуху в 1960–1970 гг. после опубликования прогноза мирового развития, сделанного "Римским клубом". Содержательно это понятие неоднократно преобразовывалось [45, 46].

Первоначально глобальные проблемы ассоциировались с проблемами мировой энергетики. В прогнозах считалось, что к 2000 – 2010 году будут исчерпаны мировые ресурсы основного топлива: газа и нефти. Поэтому предлагалось сделать основной упор в развитии энергетики на строительство АЭС. На этом пути настаивали и убеждали ученые, а правительства высокоразвитых стран финансировали такие программы.

Экономисты дали экономическое обоснование этих программ, объясняя мировой общественности, что АЭС – это та же тепловая станция, но с другим видом котла (взамен парового – атомный). По предварительным расчетам строительство АЭС было проще гидростанции, поскольку не требовалось делать плотину, обводной канал и производить массу земляных работ. АЭС строилась как промышленное сооружение "по-сухому". Учитывая стоимость постройки и 25-летний срок эксплуатации, расчетная стоимость электроэнергии, оказывалась ничтожно мала. Привлекало внимание и видимое отсутствие отходов. Однако после начала эксплуатации выяснилось, что АЭС "отходы" имеют и с их переработкой весьма большие заботы и крупные затраты на их транспортировку, переработку, хранение и т.д. С учетом этого действительная стоимость энергии, вырабатываемая на АЭС, оказалась значительно отличной от предполагаемой.

Почему это произошло? Простой ответ: инженерам не хватало экономических знаний, а экономистам – инженерных. Отсутствовало необходимое "двойное знание" – двойное образование.

Бум АЭС закончился в Странах Европы и Америки в связи с рядом экологических катастроф, таких как Чернобыльская. Глобальный характер приобрела экологическая напряженность в мире. Она возникла из-за использования АЭС, как носителя энергии, различных продуктопроводов протяженностью в тысячи километров. Сложность их эксплуатации, аварийные ситуации, частые разрывы трубопроводов и загрязнение среды – опять-таки из-за недостаточного двойного образования. Необходимо "двойное знание" – инженера-эколога.

Экологические проблемы "грязной индустрии" подтолкнули транснациональные корпорации (ТНК) перенести обрабатывающие производства ближе к источникам ресурсов (людских и сырьевых), что привело к экспорту прямых инвестиций в третьи страны в процентах мирового ВВП:

1980	1996	2001
8,4	14,5	19,9

В настоящее время ТНК контролирует:

- 0,3 ... 0,5 мирового промышленного производства;
- более 0,5 международной торговли;
- 0,8 мировых информационных потоков, патентов и лицензий и т.п.



Перенос сложных индустриальных процессов в развивающиеся страны, которые проводят ТНК, ускоренное внедрение новой продукции и технологий в страны с низким образовательным уровнем требует глобализации образовательного процесса.

Следующей сферой глобализации является мировая сеть телекоммуникаций. Использование компьютеров для этих целей было в:

1991 году – 3 миллиона,  
1996 году – 60 миллионов,  
2001 году – 300 миллионов.

Связь без границ (Интернет) позволяет получать информацию, которая является по своей сути глобальной, взамен региональной или локальной. Появляется возможность получить высшее образование, находясь вдали от лучших университетов и обучающих центров мира. Такое дистанционное образование стало доступным населению развивающихся стран. В связи с распространением "образования без границ" возникает проблема языка общения, в том числе инженерного.

Проблему языка общения в образовательном процессе пытается решить ЮНЕСКО, предлагая использовать для этой цели основные языки: китайский, русский, французский и английский.

В глобализации инженерного образования проблема языка имеет первостепенное значение. Весьма интенсивно осуществляется продвижение английского языка (американской версии) через пользователей Интернета. Использование английского языка, как всеобщего, имеет свои как положительные, так и отрицательные стороны. К положительным следует отнести "малобуквенность" слов, что приводит к экономному использованию компьютерной памяти. К отрицательным – следует отнести неоднозначность понятий, что вызывает трудности перевода, требующего изучения контекста, что в свою очередь увеличивает содержание памяти и затрудняет построение глобального тезауруса инженерной направленности.

Вот несколько примеров:

File – напильник (1); шеренга, колонна (2); штырь для накалывания чеков (3); регистратор (для бумаг) (4); компьютерно-информационный термин (5);

grind – молотить (1); править, точить (2); шлифовать (3); вертеть ручку (4); работать усердно, учиться (5); репетировать, зубрить (6); измучивать, угнетать (обучением) (7);

put – ставить (1); класть (2); бросать (3); приводить (4); направлять (5); снабжать (6); выражать (7); оценивать (8).

Создание всеобщего инженерного языка (инженерного тезауруса) – обязательное условие глобализации инженерного образования.

В программе международной комиссии по инженерному образованию предписывается инженеру обязательное владение предметом своей специальности на двух основных языках. При выполнении этого условия Европейская организация (Евроинженер) гарантирует конвертацию диплома о высшем образовании и допускает к выполнению инженерных функций в странах Европейского Союза.

Чрезвычайно важным является унификация образования по математике, физике, химии, как фундаментальной основы глобального инженерного образования.

Здесь основой являются знания, получаемые учащимся в рамках довузовского образования. Ибо даже весьма унифицированные (в международном смысле) программы по школьной математике могут сформировать разный результат. Академик В. И. Арнольд приводит пример ответа французского старшеклассника (1) – на вопрос: – Чему равно  $3+2$  ? Ответ:  $3+2 = 2+3$ , т.к. сумма чисел коммутативна. А американский школьник не может ответить без компьютера на вопрос: "Делится ли 111 на 3?". Оставим эти интересные примеры без комментариев, хотя от абитуриентов-иностранцев из развивающихся стран, на вопросы по математике, физике и химии можно услышать еще более оригинальные ответы. Настало время для того, чтобы научная и педагогическая общественность, обсуждая недостатки и достоинства глобализации в культурном, экономическом и общественном ключе, подвергла хотя бы изучению (!) проблему глобального образования и инженерного в частности.

### **1.1.5. Дистанционное обучение – путь в инженерное образование XXI века**

Одним из модных образовательных процессов в последние годы становится, так называемое, "дистанционное обучение". Правительства многих государств объявили такой процесс приоритетным в своей образовательной политике, регулярно выделяют весьма большие бюджетные средства на ее проведение.

Многие университеты и институты Америки и Западной Европы создали и реализуют "дистанционные" учебные программы для первичного и, особенно, вторичного образования с получением соответствующего диплома.

Дистанционное обучение оказалось весьма популярным у лиц, получающих вторичное образование, особенно в-третьих странах. На территории стран СНГ особую популярность приобрели программы британского Open University и ESEC (Европейская школа корреспондентского обучения – ЕШКО), по широкому кругу гуманитарных, в первую очередь, и инженерных, во-вторых, специальностей.

Так что такое дистанционное образование – дань модному течению или хорошо забытое, а может и не забытое, старое? На этот вопрос в большинстве случаев можно получить такой ответ: это заочная форма обучения с применением технических средств. В определенном смысле этому возразить трудно, однако сам ответ содержит два ключевых определения:

- обучение без непосредственного контакта с преподавателем (заочная форма);

- обучение на основе использования технических средств (аудио- и видеопособий), в развитом виде использование Интернет.

Поскольку речь идет о заочном обучении, то в этом процессе должна быть четкая цель и программа, которой необходимо следовать, хотя ВУЗ может находиться в Европе или Америке, а обучаемый – в странах СНГ.

Цель определяется выбранной специальностью или специализацией. Программа документирует рекомендации по изучению предметов, решению задач и выполнению упражнений – получению знаний в изучаемой области. Поскольку отсутствует "очный" контроль, студент должен иметь программу контроля, которая предлагает задачи после их решения, разрешает перейти к следующему этапу обучения.

В инженерных дисциплинах (точных науках) процесс контроля решается достаточно просто: решил задачу, не решил и т.п.

Деление процесса обучения на микроэтапы с соответствующим контролем реализуется учебными программами, упомянутыми ранее BroU и ESEC.

Использование Интернет и виртуального обучения предусматривает следующую возможность:

– учебные материалы вкладываются через сервер в сайт студента, после их проработки и решения контрольных задач пересылают на сервер ВУЗа;

– после получения информации от обучаемого и ее проверки на сайт студента направляется следующий блок учебных материалов и т.д.;

– курсовые работы выполняются аналогично: после получения файла-задания с помощью графических программ выполняется курсовой проект.

Здесь возникает два вопроса:

– Как проводить практические занятия?

– Каково место преподавателя в воспитании специалиста с творческими способностями?

Первое решается внедрением виртуального обучения [45], что касается второго, то тут возникает огромная проблема – отсутствие контакта между студентом и преподавателем, который особенно ценили выдающиеся педагоги Капица П. Л. [82], Космодемьянский А. А. [91], Минаков А. П., Тимошенко С. П. и др.

Из выступления Капицы П. Д. на вечере выпускников МФТИ [82]: "... с точки зрения воспитания молодежи очень важно, чтобы основы знаний давались крупными учеными, которые закладывали бы фундамент, сообщали то, что нужно для построения научного здания. Если фундамент будет недостаточно надежным, то все здание будет некрепко стоять на ногах".

Как исправить дело, как обеспечить, чтобы в ВУЗе читали курс лучшие профессора, лучшие преподаватели, лучшие ученые?

Казалось бы, можно использовать современную технику, скажем, сделать кинофильм, в котором лектор, самый крупный ученый в данной области, будет рассказывать студентам физику, или химию, или математику. Администрация института будет приветствовать такое начинание – сократится число штатных единиц и не будет необходимости привлекать и подыскивать педагогические кадры высшей квалификации.

Некоторые студенты были бы рады (!), поскольку все-таки в темных киноаудиториях комфортабельнее спать, чем в светлых. В институте, вместо профессуры стоят киноаппараты и ходят только студенты и киномеханики.

Такая система нелепа?

Все это сказано в то время, когда TV делало первые шаги, выпускающая образовательные программы, когда об Интернете никто и не мог подумать, его не было. Но как соединить образовательный и воспитательный процесс, особенно при его "дистанционности"?

Естественный выход в этих условиях – проведение Интернет-конференций как вид зачета или экзамена. Такую Инконф можно проводить в два этапа: открытая лекция, консультация с ответами на вопросы студентов в интерактивном режиме через сервер ВУЗа непосредственно на файл студента и т.д.

Открытая дискуссия перед экзаменом поможет профессору убедиться в знаниях студента, а последнему – приобрести знания и одновременно понимание правильности и объективности их оценки со стороны преподавателя. При этом преподаватель выполняет свою миссию поставщика знаний и воспитателя творческой личности специалиста. Это весьма важный психологический аспект – в связи с международным принципом, положенным в основу дистанционного образования.

#### **1.1.6. Ступени образования и квалификации инженеров в XXI веке**

Идеи международного сотрудничества в области инженерного образования привели к стандартизации требования к квалификации специалистов в области техники, в частности, машиностроения. Следуя принятому в Англии и США образцу, специалисты в области культуры, науки и техники приобрели два уровня квалификации: бакалавр и магистр [46, 161].

В области культуры и гуманитарных наук: Bachelor of Arts (BA), Master of ARTS (MA);

в области естественных и прикладных наук: Bachelor of Science (BS), Master of Science (MS);

в области инженерных наук: Bachelor of Engineer (BE), Master of Engineer (ME).

Несколько особняком научно-исследовательская деятельность доктора наук (SD) и доктора философии (PhD): первая присуждается в прикладных и технических науках, вторая – в естественных и гуманитарных науках.

Дипломы бакалавра в странах ЕС и США обычно получают выпускники колледжей, которые организационно и методически подчинены университетам.

Самыми известными в США вузами, имеющими инженерные колледжи в своем составе, являются: Иллинойский университет (ИУ), Массачусетский Технологический институт (МНТ) и Ренсселеровский политехнический институт (РПИ).

Квалификация бакалавра (BE) примерно соответствует квалификации инженера, которая принята стандартами ВУЗов стран СНГ. Особенностью квалификации бакалавра является ориентация специалиста на работу в области эксплуатации технических средств, организации производства и экономической деятельности в сфере реализации (продажи) техники. Срок обучения (BE) четыре года.

Диплом магистра (ME) получают выпускники институтов, университетов, которые уже имеют аттестат бакалавра (BE), прошедшие дополнительный курс обучения в аспирантуре вуза.

Квалификация магистра (ME) предусматривает ориентацию специалиста в области проектирования, конструирования, исследований новой техники, поэтому его подготовка ведется по индивидуальному плану. Такой план обучения аспиранта обычно учитывает его интересы и склонности, а также характер и глубину предыдущей подготовки. Срок обучения (ME) два года.

Таким образом, базовым образованием инженера является обучение по программе бакалавра, бакалавра-технолога и т.п. Сравним программы подготовки бакалавра-технолога по общей специальности машиностроения в США и Украине. В связи с тем, что в США планирование ведется в так называемых учебных единицах (1 у. е. = 15 ауд. час.), а в Украине в академических часах, приведем данные в обеих единицах (табл. 1.1).

Как видно из итоговых данных таблицы, оба плана идентичны, хотя при подробном рассмотрении различаются. Так, например, обязательными дисциплинами являются статистика и риторика (США), которые должны сформировать у специалиста работу с фактами (уметь собирать, анализировать исходную информацию и после обобщения достаточно убедительно объяснить задачи, требования, условия и т.п. в устной форме). Эти дисциплины отсутствуют в планах подготовки инженеров (Украина).

Таблица 1.1. – Типовые учебные планы инженера-технолога, бакалавра машиностроения

США Украина у.е. а.ч. у.е. а.ч.	Математика 2 180 15,6 234	Физика 10 150 9,6 144	Информатика 3 45 3,6 54	Статистика 3 45 – –	Риторика 9 135 – –
Английский яз. 12 180 9,6 144	Гуманитарные 9 135 11,3 170	Экономика 3 45 4,8 72	Орган. и управление 6 90 2,4 36	Пром. психология 3 45 2,0 30	Нетехн. выбор 3 45 – –
Матер. и обработка 2 30 7,2 108	Проект. и черчение 11 165 12,0 180	Мастерские 2 30 6,6 10	Статистика и сопромат 6 90 10,8 162	Энерго- система 3 45 2,0 30	Инструмент и оснастка 3 45 9,0 136
Термодинамика 3 45 3,6 54	Гидравлика (привод) 6 90 3,6 54	Электротехника, электроника 8 120 4,8 72	Проектирование 3 45 6,0 90	Техн. предметы по выбору 21 315 18,0 270	Прочее 141 2115 142,5 2140

В американских планах существует целый пласт дисциплин по выбору технологического и нетехнологического профиля (24 у.е. = 360 ауд. час.), в наших планах выбор отсутствует, но упомянутое число часов предусматривается на углубленную специализацию в рамках технологических дисциплин. Тематика дисциплин по выбору нетехнологического направления весьма далека от специальности. Например, домоводство выбирают девушки, а навыки спасателей в быту, на водах и т.д. – выбор юношей.

Проблема мотивации выбора основной специальности, уровня образования, сроков обучения зависит от многих факторов, которые влияют на поведение "среднего" студента. К таким факторам относят:

исключительно высокая стоимость образования, различие в материальном и социальном положении, в возможности получить престижную работу по окончании колледжа или университета.

Существенное влияние на выбор специальности и уровня образования оказывают бюджетная и социальная политика государства.

Государственные расходы (средние) на образование развитых стран 1990 – 2000 годы в % ВВП: Франция 6,0; Германия 4,9; Италия 4,9; В. Британия 5,3; США 5,4.

По мнению аналитиков ЮНЕСКО, наиболее престижными являются специальности по так называемым критическим (для общества) технологиям: энергосберегающим; информационным; транспортным; биотехническим; экологическим, а также в целом машиностроения и приборостроения.

Ориентация общественности на современные особенности образования и квалификации специалистов, по нашему мнению, в ближайшие годы позволит преодолеть кризисные явления глобализации.

### **1.1.7. О профессоре Добровольском Викторе Афанасьевиче**

#### **Лектор**

Виктор Афанасьевич Добровольский обладал оригинальной манерой чтения лекций. По звонку, точно (без скидок на свой статус) заходил в аудиторию, вынимал из кармана свой неизменный кондуит, медленно перелистывал, находил нужное место, делал паузу, отправлял блокнот в карман, объявлял тему лекции и начинал монолог.

Для того чтобы хоть отдаленно представить это действие, надо вспомнить выдающиеся, блистательные выступления Ираклия Андроникова на ТВ. Надеюсь, старшее поколение помнит. Различие в том, что лекторы виртуозно разворачивали сюжет повествования, но в первом случае на техническом поле, а в другом – на гуманитарном.

Начинался рассказ всегда нетривиальным сюжетом, где могли случиться: авария, полная драматизма, или курьезный смешной случай. Это были истории, которые развивались в изложении автора, как детектив с участием технического эксперта (исследователя). Сначала в технических терминах описывалось событие: что? где? когда? Затем ставились вопросы: как? возможно? почему? И вот шаг за шагом распутывается ситуация, при этом изложение сопровождается четкими



чертежами, необходимыми расчетами, обязательно доведенными до числа. При исследовании задачи часто рассматриваются альтернативные варианты решения, они тут же оцениваются, принимаются или отвергаются. В обсуждение альтернатив вовлекается студенческая аудитория. Самое интересное: все это действие соответствует заявленной теме лекции.



Добровольский Виктор Афанасьевич –  
директор Одесского политехнического института (1945 – 1957),  
Заслуженный деятель науки и техники РСФСР,  
доктор технических наук, профессор [44]

Лекции В. А. Добровольского пересказывали студенты города, они превращались в легенды, где иногда выхолащивалась техническая сторона, но передавался ее удивительный колорит действия. Его лекции никто не пропускал, на них часто бывали студенты даже из других вузов. В Одессе всегда было несколько технических вузов, где читался курс "Деталей машин", все учились по его учебникам. Понятен интерес к автору, ведь он был рядом, да еще читал лекции, которые превращались в легенды.

– Некую легенду рассказывают, как однажды, идя на лекцию, он завернул в буфет и одолжил стопку глубоких тарелок. Предстояла лекция о пружинах, сначала речь шла о пружинах растяжения, с примером пружинных весов – с помощью которых на одесском привозе взвешивают камбалу. Это всем понятно. Потом рассказ о рессорах, пружинах сжатия, которые применяются в качестве амортизаторов в транспортных машинах.

Наступает очередь тарелок, которые иллюстрируют возможности изменения жесткости (пакета или блока) тарельчатых пружин, французского инженера Бельвилля, в зависимости от их соединения. Это тут же демонстрировалось: если вкладывать тарелку одна в одну (в пакет), жесткость большая, если собирать в (блок) башню жесткость понижается, но ход пружины увеличивается.

**Тарельчатые пружины.** Как правило, тарельчатые пружины используются в качестве модульных (сборных) компонентов. Для совместной работы тарельчатые пружины укладывают друг на друга лицевыми сторонами, такой способ компоновки называется пружинный пакет. Отдельные пружины или пакеты, сложенные другими способами, называются пружинным блоком (узлом) (рис. 1.1 и рис. 1.2).



Рисунок 1.1 – Пакет тарельчатых пружин



Рисунок 1.2 – Блок тарельчатых пружин

Когда пружины уложены друг на друга лицевыми сторонами, ход пакета равен ходу одной пружины. Нагрузка при таком прогибе пропорциональна числу отдельных пружин, используемых в пакете. Когда пружины собраны альтернативными способами, общий ход блока равен сумме ходов отдельных пружин.

Дальше давалось объяснение о применении тарельчатых пружин в механизме подвески автомобиля, откатных системах артиллерийских орудий или в качестве технологической оснастки.

Коллеги порой неодобрительно относились к таким приемам ведения лекций. Дескать, фиглярствует профессор!

Он же в своих действиях стремился к пробуждению у студента свободного мышления, не связанного с догмами единственного книжного варианта. Главная цель – добиться понимания, а не зазубривания материала.

В лекциях, бывало, он приводил примеры, в книжках о которых не прочесть. Здесь были рассказы об инженерных просчетах, приводящих к неработоспособным конструкциям. О столь заумных решениях, что порой при современных способах производства конструкцию невозможно было бы воплотить в жизнь. Он часто повторял: "Простота решения – залог успеха".

## **Экзаменатор**

Оригинален у него был метод приема экзаменов. На экзамене можно было пользоваться книгами, справочниками, конспектами, методичками, т.е., чем угодно. Но должно выполняться одно условие: нельзя списывать из-под стола, со шпаргалки. Все делать надо открыто! На двух столах всегда лежали горой учебники, разных годов издания, и всевозможные справочники, до известного с давних времен, справочника "Хютте". Студент, получив билет, мог подойти к столу с книгами, найти нужную, и дальше садиться за стол, готовиться к ответу.

Чаще всего студенты списывали текст, перерисовывали чертежи. Далее студент подходил к экзаменатору и тут-то, все начиналось. Сыпались вопросы: как? почему? зачем? каким образом? для чего?...

Его многочисленные студенты вспоминают:

– "после ответа по билету, где один из вопросов относился к подшипникам качения, последовали вопросы: почему одни подшипники имеют сепаратор, а другие нет, зачем он применяется, каким образом его изготавливают, как он влияет на надежность и долговечность? и т.п. Пришлось соображать, может даже фантазировать... Получил пятерку";

– "вопрос достался пустяковый о резьбовых соединениях, "ну, думаю, покажу класс, говорил долго, заговорил "деда", мне даже показалось, что он спит с открытыми глазами".

– И это вся классификация гаек! А теперь расскажите, что вам известно о висячих гайках?

Едва спасся на тройку, стипендия рухнула".

**Висячие гайки.** Задача состоит в обеспечении равномерного распределения нагрузки по виткам резьбы стержня и гайки. Решение заключается в том, чтобы заставить гайку деформироваться в том же направлении, в каком деформируется стержень. На эту возможность в 1903 году указал Н.Е. Жуковский в своем мемуаре "О нагрузке в витках резьбы". Достигается это переносом опорной поверхности гайки выше последнего витка (рис. 1.4, II). Расположенное под опорной поверхностью тело гайки ("юбка") в этом случае подвергается деформации растяжения; смещение витков гайки и стержня направлено в одну сторону, что обеспечивает более равномерное распределение нагрузки по виткам.

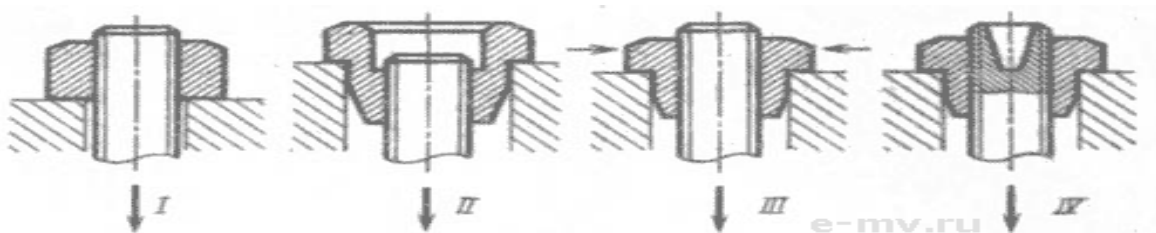


Рисунок 1.4 – Гайки: I – сжатия; II – растяжения; III – растяжения–сжатия; IV – растяжения–сжатия, в стержне – разгружающая выборка

Подобные гайки, получившие название "висячих гаек" или гаек растяжения (в отличие от обычных гаек (рис. 1.4, I) которые называют гайками сжатия). Для получения еще большей равномерности распределения нагрузки по виткам резьбы в некоторых случаях делают выборку на торце стержня (рис. 1.4, IV).

В институте метод приема экзаменов "по Добровольскому" был всем известен, однако, им никто не пользовался, и отношение к нему было разное. Одни были абсолютно против: "как можно допустить на экзамене пользование книгами, справочниками? – студенты все спишут, что после этого делать? ". Другие – "что позволено Юпитеру, то не дозволено быку", намекая на ректорский статус профессора.

Как объяснял свой прием автор:

"Настоящая работа инженера – это творчество, которое требует знания и понимания предмета. А что такое знание – это память и еще раз понимание. Что в результате: память и понимание в квадрате. Вот такая формула получается. Память у всех разная. Одни лучше запоминают тексты, другие рисунки, чертежи, третьи – формулы. Память – явление нестабильное, так почему не разрешить пользование книгой?"

В производственных условиях у инженера будут под рукой книги, справочники, нормативные документы – пусть привыкает ими пользоваться. Конечно, беда, когда студент только вызубрит материал без понимания. Хорошая память – это необходимое, но не достаточное условие для понимания предмета. Только на экзамене лектор "тет-а-тет", может выяснить уровень понимания студента, да и на себя оглянуться, на свои собственные прорехи. Экзамен – это не столько контроль успеваемости, сколько продолжение учебного процесса".

От автора:

Будучи в Болгарии в 1974 году на лекции об особенностях технического образования в СССР, я рассказал о Добровольском В. А. и его методе. Последовал вопрос:

– Не понятна формула творчества?

Соображаю, как объяснить формулу Добровольского В. А. иностранной аудитории.

– Формулу можно представить примерно так:  $E = mC_1C_2$ ,  
где  $E$  – *eruditio* (эрудиция – творчество),

$m$  – *memory* (мемори – память),

$C_1$  – *competentia* (компетенция – понимание),

$C_2$  – *competentia* (понимание – умение), т.е.

$$E = mC^2.$$

Конечная формула вызвала улыбку и понимание. Тогда ведь Интернет и прочего не было, куда теперь можно заглянуть.

**Из Википедии:**

Частные употребления термина:

• **Профессиональная компетенция** – способность успешно действовать на основе практического опыта, умения и знаний при решении профессиональных задач;

- **Общие компетенции** – универсальные способы деятельности, инвариантные для всех (большинства) профессий и специальностей, направленные на решение профессионально-трудовых задач и являющиеся фактором интеграции выпускника в социально-трудовые отношения на рынке труда.

### **1.1.8. Конкуренция в инженерном образовании**

Рыночная формула развития общества предусматривает представление потребителю товаров, продуктов и услуг соответствующего качества. Количество продуктов и услуг, присутствующих на рынке, определяется спросом и предложением, а также рыночной ценой. Их качество регламентируется соглашениями сторон и обычно зафиксированы аттестатами, сертификатами и стандартами. Продвижение производимых продуктов и услуг на различные рынки при глобализации, их производство и потребление осуществляется разными способами. Одним из самых эффективных способов рыночных отношений является конкуренция. Следствие конкуренции – организация производства продукции и обеспечение таких услуг, которые удовлетворяли бы двум условиям: высокому качеству и низкой цене. Такие продукты и услуги называют конкурентоспособными.

В настоящее время производство конкурентоспособных продуктов и услуг является прямой экономической функцией любого государства. Глобализация приводит к ожесточенной конкуренции в сфере промышленного производства, торговли, а также в сфере культуры и спорта.

Не обходится без конкуренции сфера науки и образования. Как известно, образование имеет две функции: воспитание и обучение. Функцию воспитания (как общественное достижение) исторически наиболее четко осуществляла церковь и армия. Обучение обеспечивалось непрерывным процессом в средней и высшей школе через формирование знаний и умений у учащихся. Знания представляют своеобразный продукт, имеющий частный (приватный) характер, так как носителем его является индивидум, но одновременно имеющий и общественный характер, т.е. принадлежит всему обществу. Государство должно выполнять функцию формирования общественного знания и гарантировать его защиту (например, авторские права).

Знания имеют ряд особенностей, которые отличают их от произведенного обществом материального продукта:

1. Знания имеют дискретный характер, так как они либо есть (1), либо их нет (0), дробными они быть не могут.

2. Знания, будучи созданными, принадлежат всему обществу (они доступны всем без исключения, было бы желание).

3. Знание – информационный продукт; после использования потребителем не исчезает, как например, материальный продукт.

4. Носителем знания является индивидуум, который оплачивает их своей квалификацией, имея определенный рыночный ресурс. Его ценность характеризуется репутацией специалиста. Формально научная квалификация определяется юридическими документами, присвоенными званиями (степенями) бакалавра, магистра, доктора наук.

5. Знания, кроме индивидуальной характеристики, имеют коллективную особенность, так как заключены в научных, вузовских коллективах. Разрушение таких коллективных знаний приносит убытки государству и обществу в миллиарды долларов.

6. Знания в обществе с рыночными отношениями измеряют по затратам на их производство. По-видимому, разные по характеру знания (и умения) имеют свою рыночную стоимость. Затраты на производство знаний, естественно, включают расходы на исследования и разработки, на высшее образование и его программное обеспечение. Значимость знаний в различной сфере общественного производства оценивается общественной полезностью и степенью практического использования. Например, по данным Организации Экономического Сотрудничества и Развития (ОЭСД) степень использования "знаний" Интернета в % от общего числа жителей по странам и по континентам распределилась следующим образом (табл. 1.2, табл. 1.3).

Таблица 1.2. – Распределение пользователей по странам (в % от числа жителей)

США	Швеция, Норвегия, Исландия	Италия, Германия	Эстония	Франция
53	> 50	25	22	15
Испания	Польша	Россия	Украина	Таджикистан
14	7,5	6,0	0,5	0,08

Таблица 1.3. – Распределение пользователей по континентам  
(в % от числа жителей)

Северная Америка	Европа	Азиатско-Тихоокеанский регион
41	27	26

Экономическая наука говорит нам, что затраты на обучение, получение знаний – это инвестиции в обеспечение работой, жизненным комфортом и обеспеченной старостью.

Среди ближайших целей образования, сформулированных на Болонском саммите министров образования и науки стран Европейского Союза, как раз декларировалась забота по обеспечению престижной работой специалистов, получивших образование в разных странах ЕС. Исследуя эту возможность, выяснилось, что в разных странах ЕС существуют серьезные различия в подготовке специалистов, их аттестации. Так, например, во Франции существуют 10 разновидностей дипломов о высшем образовании. В Великобритании: бакалавр, магистр, как и доктор, являются учеными степенями. В Германии степень бакалавра и магистра имеет хождение у закончивших университеты по гуманитарным наукам, а по инженерным – квалификация инженер, обучаемый прошел полный курс и сдал выпускные экзамены, и дипломированный инженер – обучаемый прошел полный курс сдал выпускные экзамены и выполнил дипломную работу, проект.

Много различий при определении квалификации специалистов в других странах. Существенно различаются программы подготовки и определения рейтинговой (оценочной) характеристики выпускников ВУЗов. Например, во Франции принято 20-ти бальная система оценки знаний, в Англии – 100 бальная, а в странах Восточной Европы – 5-ти бальная. Собственно, все эти соображения привели к принятию так называемой Болонской декларации, подписанной 19 июня 1999 года представителями департаментов образования стран ЕС.

Прошло пять лет, и вдруг наступил "бум присоединения" разных стран, не входящих в ЕС, к Болонскому образовательному процессу. К таким странам в первую очередь относятся страны СНГ: Казахстан, Киргизия, Россия, Украина и ряд Закавказских республик. Чем же объясняют законодатели и правительственные чиновники желание присоединиться к образовательным стандартам ЕС? Прежде всего,



заботой о выпускниках ВУЗов с целью нострификации их дипломов и аттестатов в странах Европы. Как известно, в настоящее время они там не признаны. Естественно, такая забота о своих гражданах, получивших высшее образование в странах СНГ, заслуживает одобрения. Однако высказываются опасения, что стандартизация программ, оценочных характеристик и т. п. потребует значительных вложений в сферу образования, иначе перестроить систему в 1, 2, 3 года просто невозможно. Нынешние государственные вложения (расходы) на образование сопоставимы с затратами в высокотехнологические отрасли промышленности и телекоммуникации [36], табл.1.5.

Таблица 1.5. – Вклад отраслей повышенного спроса в знания в % ВВП

Страна	Высокотехнологические отрасли	Телекоммуникации	Образование и здравоохранение
США	8,5	3,4	11,6
Франция	10,7	1,9	11,7
Германия	11,7	2,4	10,3
Италия	7,2	2,1	9,5
Испания	6,4	2,7	10,1
Португалия	4,4	2,9	11,9
Великобритания	8,1	2,8	11,6
Страны ЕС <sup>1</sup>	8,4	2,4	10,9
Россия	5,0	1,6	5,0
Страны ОЕСД <sup>2</sup>	8,8	2,7	–

1. ЕС – данные по 15-ти странам, без 10 новых.

2. В ОЕСД – входят 30 стран, от Австралии до Японии, без стран СНГ и развивающихся стран Азии и Африки.

Приведенные данные говорят о том, что суммарный вклад в отрасли повышенного спроса примерно равен затратам на общегосударственные образовательные проблемы. Эти данные сохраняют свое значение и для стран СНГ. Естественно, если наиболее мощная в экономическом отношении страна – Россия – тратит 5 % своего ВВП на поддержку образования, то другие страны СНГ имеют более низкие возможности.

Таблица 1.6. – Данные Всемирного Экономического Форума (ВЭФ). Место страны рассчитано по 145 критериям

Страна	ВВП	Место (из 59 стран)
США	33934	1
Люксембург	44206	3
Финляндия	25633	6
Великобритания	24633	9
Швейцария	36254	10
Германия	25782	15
Израиль	15584	19
Япония	34402	21
Франция	24594	22
Италия	20734	30
Чехия	5181	32
Польша	3978	35
Турция	2890	40
Китай	791	41
Россия	1240	55
Украина	628	57

Однако существуют значительные преимущества, получаемые Украиной и Россией от присоединения к Европейским стандартам образования. Это преимущество заключено в высокой конкурентоспособности образования, получаемого в Украине и России. Напомним, конкурентоспособный продукт – это высокое качество и низкая цена. Переход на Европейские стандарты образования – это гарантия высокого качества, как следствие признание аттестатов и дипломов этих стран в ЕС. Качество образования обеспечивается научными и педагогическими кадрами высокой квалификации, которыми располагают Украина и Россия. Подтверждением этого тезиса может служить то, что Аттестационная комиссия Минобразования Украины утвердила в звании "профессор" [190]: в 2001 – 850, в 2002 – 829, в 2003 – 664 человека. Учитывая большое число профессорских кадров в ВУЗах Украины, первая часть требований, обеспечивающих конкурентоспособность образования, будет выполнена без больших затрат.

Вторая часть – низкая цена обеспечивается как бы сама собой, за счет низких ставок оплаты на прохождение курса обучения. Характерно, что коммерческая (контрактная) стоимость годового курса обучения по странам мирового сообщества сопоставима с ВВП соответствующей страны. Ниже приводятся данные ВЭФ (Всемирного Экономического Форума) на 2000 год; данные в долларах США, место страны рассчитано по 145 показателям [227], табл. 1.6.

Анализ данных позволяет сделать вывод, что коммерческая цена образования в Украине самая низкая из условно взятых 59 стран мира, а поэтому само образование весьма конкурентоспособно.

Конкурентоспособное образование украинских ВУЗов обеспечит приток обучаемых из многих стран, и естественно, не только из развивающихся. Приток обучаемых из разных стран мира поможет снизить ценовое давление образования на граждан Украины.

Естественно, этими соображениями не исчерпываются возможности конкуренции с лучшими ВУЗами стран мира. Однако бесспорно существуют положительные стороны этой ситуации.

## **1.2. Новые направления развития науки о технологии машиностроения**

### **1.2.1. Энергетические проблемы современной технологии машиностроения**

Технология машиностроения содержит большой спектр физических процессов, начиная от обработки металлов давлением (ОМД) и резанием (ОМР), до физических процессов (ФХОМ) воздействия на вещество (материал) [18, 47, 52, 55, 151, 159, 174, 193].

Основным показателем этих процессов, несмотря на их физическое разнообразие, является время  $t$  или обратная величина – производительность  $t^{-1}$ . Как физическая категория время – длительность (период) протекания процессов, а производительность – частота, с которой производится продукт технологического процесса, иначе скорость выпуска технологической продукции.

Время, как основной технологический показатель, является необходимым для анализа и синтеза процессов, но не достаточным его показателем.

Любой физический (химический) процесс, положенный в основу технологического процесса (операции) для выполнения технологического воздействия требует затраты работы и его носителя энергии.

Работа и ее эквивалент – энергия – является необходимым и достаточным показателем технологического процесса (операции) вне зависимости от физического содержания.

**1. Удельная работа** (энергия) процесса  $a$  – это энергия (Дж), необходимая для выполнения работы над объемом материала (в  $1 \text{ см}^3$ ). Удельная энергия процесса характеризует технологический процесс по расходу энергоресурса. Основные классы технологических процессов существенно различаются по удельной энергии (Дж/см<sup>3</sup>): процессы ОМД –  $(5 \dots 5,5) \cdot 10^2$ ; ОМР –  $2 \cdot 10^3 \dots 1,5 \cdot 10^4$ ; ФХОМ –  $3 \cdot 10^4 \dots 5 \cdot 10^7$ .

Как видно из приведенных данных, наиболее экономичные процессы ОМД – холодная гибка листов (производство кузовов автомобилей), штамповка взрывом (производство емкостей бытовой техники). Достаточно экономные процессы ОМР в традиционных операциях точения (обработка тел вращения) и фрезерования (обработка плоскостей корпусов). Совершенно неэкономичные процессы ФХОМ – ультразвуковая и лазерная обработка. Эти процессы специального назначения, необходимые для обработки сверхтвердых материалов.

Удельная работа (энергия) физического процесса (операции) определена интервалом значений, которые зависят от обобщенных физико-механических характеристик обрабатываемых материалов в данном конкретном процессе. Нижняя граница интервала соответствует менее, а верхняя – более высоким характеристикам материалов. Так, например, холодная гибка на роликах труб из алюминия  $a_{ал} = 20$ , а из стали  $a_{ст} = 40$ , что приводит к двукратной экономии энергии на производство изделий при одинаковом их функциональном применении. Здесь не учитываются затраты (стоимость) на различные материалы, а иллюстрируются энергетические особенности одного и того же процесса в определении интервала удельных энергетических затрат. Это лишь один из многих примеров того, что на производство алюминия в последнее время обращено чрезвычайное внимание.

Удельный показатель работы (энергии) в технологическом процессе можно использовать при определении общей работы (энергии) на выполнение технологической операции.

**2. Работа технологической операции (процесса).** Эта работа затрачивается на преобразование заготовки в изделие (в объемах, определенных геометрическими величинами):

$$A = a \cdot V$$

– для процессов ОМД, т.к. соблюдается принцип постоянства объема заготовки изделия, т.е.  $V_3 = V_д = V$ ;  $A = a \cdot \Delta V$ ;

– для процессов ОМР и ФХОМ, т.к. воздействию подвергается не весь объем, а его часть  $\Delta V = V_3 - V_д$ .

Используя условие одинакового объема преобразования для различных по технологическому (и физическому) содержанию процессов можно произвести их сравнение энергетическим затратам.

Сравним финишную обработку изделия, выполненного из одного и того же материала, имеющего определенный припуск на обработку двумя альтернативными методами (процессами) – круглым шлифованием и тонким точением:

$$A_{ш} = a_{ш} \cdot \Delta V_{ш}; \quad A_{Т} = a_{Т} \cdot \Delta V_{Т}.$$

Из условия равных объемов  $\Delta V_{ш} = \Delta V_{Т}$  после элементарных преобразований получено:

$$\frac{A_{ш}}{a_{ш}} = \frac{A_{Т}}{a_{Т}} \quad \text{или} \quad \frac{A_{ш}}{A_{Т}} = \frac{a_{ш}}{a_{Т}},$$

но,  $a_{ш} = (5,5 \dots 7,5) \cdot 10^4$ ;  $a_{Т} = (1,7 \dots 2,5) \cdot 10^3$ , т.е.

$$\frac{A_{ш}}{A_{Т}} = \frac{(5,5 \dots 7,5) \cdot 10^4}{(1,7 \dots 2,5) \cdot 10^3} = 30.$$

Таким образом, процесс тонкого точения в 30 раз менее энергоемок, чем процесс шлифования, при снятии одинакового припуска. Возможно, столь большая величина энергозатрат при шлифовании вызовет удивление?

Однако напомним, что удельная энергия зависит от соотношения процессов трения, царапания и резания, являющихся составными элементами процесса шлифования. Сравнение этих двух процессов в технологической практике (литературе) не анализировалось и обсуждению не подвергалось.

**3. Закон сохранения работы (энергии) в одинаковом (одноименном) процессе.** При выборе технологического процесса (операции), выполняемого на оборудовании (станках) с различной степенью

концентрации инструментов, привыкли отдавать предпочтение тому, который имеет более высокую производительность (меньше времени рабочего процесса).

Рассмотрим операции механической обработки в двух вариантах: точение на универсальном станке одним инструментом и на многорезцовом станке с максимальной концентрацией инструментов, и определим работу технологического процесса (операции).

Как известно, механическая работа, а это большинство технологических процессов, определяется произведением пути  $l$  на усилие  $F$ , т.е.

$$A = l \cdot F.$$

Пусть необходимо обработать (точением) валик, имеющий  $n$  одинаковых ступеней (длины  $l$ ). Его можно обработать на универсальном станке одним инструментом, тогда путь будет равен  $n \cdot l$ , при усилнии  $F$ . Можно обработать на многорезцовом станке  $n$ -инструментами (каждая ступень своим инструментом). Инструменты обеспечивают одновременную обработку с усилием  $n \cdot F$  при ходе  $l$ .

Работа в первом случае равна  $A_1 = F \cdot nl$ , во втором случае –  $A_2 = nF \cdot l$ , т.е.  $A_1 = A_2$ .

**Закон сохранения работы (энергии) при обработке изделия в одинаковом (одноименном) технологическом процессе (операции).** Вместе с тем, хорошо известно, что концентрация инструментов в операции (процесса) ведет к сокращению времени операции и повышению производительности:

$$t_{m1} = \frac{nl}{S_{m1}^*} \quad \text{и} \quad t_{m2} = \frac{l}{S_{m2}^*}.$$

Здесь  $nl > l$  и  $t_{m1} > t_{m2}$  или  $\frac{t_{m1}}{t_{m2}} = n$ .

Однако, как было показано выше,  $A_1 = A_2$ . Рассмотрим другие составляющие затраты энергии  $A$ , определяемые временем и мощностью процесса:

$$A_1 = P_1 \cdot t_{m1}; \quad A_2 = P_2 \cdot t_{m2},$$

но, т.к.  $A_1 = A_2$ , получим:  $P_1 \cdot t_{m1} = P_2 \cdot t_{m2}$  или  $\frac{t_{m1}}{t_{m2}} = \frac{P_2}{P_1}$ .

Таким образом, уменьшение времени обработки в  $n$  раз требует увеличения используемой мощности в  $n$  раз. Выигрыш в производи-

тельности оборачивается проигрышем в мощности оборудования при концентрации инструмента.

Здесь следует отметить, что мощность оборудования, принятого для осуществления процесса, имеет нижнее и верхнее ограничения:

$$[P_{\min}] < P_1 < [P_{\max}].$$

Нижнее ограничение  $P_{\min}$  наименьшая величина мощности, при которой может протекать процесс, преодолевая тепловые и упругие межмолекулярные связи, а также в процессах ОМД и ОМР затраты на трение.  $P_{\max}$  – наибольшая величина мощности, после которой наступает физическое разрушение системы: оборудования, инструмента, изделия.

**4. Общее уравнение "идеального" технологического процесса.** Исходя из изложенного, можно сделать вывод, что, исключив действующие в процессе возмущения (потери внешней работы на трение, тепло, межмолекулярные связи), можно представить "идеальный" технологический процесс (операцию) следующими уравнениями:

$$A = aV;$$

$$A = Pt,$$

которые после объединения дают общее уравнение идеального технологического процесса преобразования материала (вещества):

$$aV = Pt,$$

где  $a$  – удельная работа (энергия), Дж/см<sup>3</sup>;  $V$  – объем преобразования, см<sup>3</sup>;  $P$  – мощность преобразования, Вт;  $t$  – время преобразования, с.

Из этого уравнения производим все необходимые для исследования расчеты и сравнение энергетической эффективности:

– удельная (работа) энергия преобразования вещества (материала):

$$a = \frac{Pt}{V};$$

– мощность, которая необходима для реализации процесса в заданный период времени:  $P = \frac{aV}{t};$

– время длительности конкретного процесса при принятой его мощности:

$$t = \frac{aV}{P};$$

– объем (припуск) преобразования на определенном оборудовании при заданном процессе:  $V = \frac{Pt}{a}$ .

Первое выражение позволяет сделать выбор физического процесса при заданных условиях: мощности, времени и объеме преобразования.

Второе, третье и четвертое выражения устанавливают связи между этими параметрами в заданном (принятом) физическом процессе.

**5. Общее уравнение "реального" технологического процесса.** Экспериментальные исследования технологических процессов, в которых определялась затрачиваемая на процесс энергия, указывает на соотношение:  $aV < Pt$ .

Это соотношение было применено для определения коэффициента технологического использования (КТИ) процесса:

$$\text{КТИ} = \frac{aV}{Pt} < 1.$$

Выяснение обстоятельств, при которых подводимая энергия больше используемой энергии на протекание физического процесса, побудило исследователей искать объяснение данному фактору. Различные авторы выдвигали следующие предложения, которые сводились к затратам энергии: на холостой ход; на трение (механическое, электрическое, тепловое и т.п.); на фазовый переход.

Рассмотрение реальных технологических процессов обработки различными физическими методами (табл. 1.7) позволило предложить следующую интерпретацию энергетического баланса:

для "холодных" процессов (ОМД):  $A_x = aV + \frac{mv^2}{2}$ . Второе слагаемое определяет кинетическую составляющую, реализуемую технологической системой;

для "горячих" процессов (ФХОМ):  $A_r = a \cdot V + \Delta T \cdot s$ . Второе слагаемое определяет энтропийную составляющую технологического процесса;

для "реальных" смешанных процессов (ОМР):

$$A = aV + \frac{mv^2}{2} + \Delta T \cdot s.$$

Соответственно, второе и третье слагаемые определяют кинетическую и энтропийную составляющие технологического процесса.



Таблица 1.7. – Удельная работа (энергия) технологической операции

№	Наименование операции	Удельная работа, а, Дж/см <sup>3</sup>
1	Холодная листовая гибка	5 ... 10
2	Холодная гибка проф. (труб) на роликах	20 ... 40
3	Штамповка на гидравлических прессах	20 ... 60
4	Штамповка взрывом	20 ... 76
5	Горячая штамповка без учета нагрева	60 ... 80
6	Волочение проволоки	66 ... 70
7	Волочение труб без оправки	(2,1 ... 2,7)·10 <sup>2</sup>
8	Волочение труб с оправкой	(5 ... 6)·10 <sup>2</sup>
9	Холодная резка на ножницах	(4 ... 5)·10 <sup>2</sup>
10	Обдирка однопроходная	(4 ... 5,5)·10 <sup>2</sup>
11	Выдавливание холодное	(5,5 ... 8,5)·10 <sup>2</sup>
12	Высадка холодная	(5,6 ... 14)·10 <sup>2</sup>
13	Резание баллистическое	(1,0 ... 1,3)·10 <sup>3</sup>
14	Точение	(1,7 ... 2,5)·10 <sup>3</sup>
15	Протягивание	(2,5 ... 4,0)·10 <sup>3</sup>
16	Зенкерование	(3,0 ... 4,8)·10 <sup>3</sup>
17	Сверление	(1,0 ... 6,2)·10 <sup>3</sup>
18	Фрезерование	(5,0 ... 7,5)·10 <sup>3</sup>
19	Развертывание	(1,2 ... 3,0)·10 <sup>4</sup>
20	Шлифование	(5,1 ... 7,5)·10 <sup>4</sup>
21	Электроконтактная обработка	(0,3 ... 1,2)·10 <sup>4</sup>
22	Электрохимическое шлифование	(1,4 ... 5,8)·10 <sup>5</sup>
23	Электрохимическое полирование	(2,2 ... 4,3)·10 <sup>5</sup>
24	Электронно-лучевая обработка	(2,4 ... 5,8)·10 <sup>5</sup>
25	Электроимпульсная обработка	(3,5 ... 7,0)·10 <sup>5</sup>
26	Ультразвуковая обработка	(0,6 ... 3,6)·10 <sup>6</sup>
27	Электроискровая обработка	(0,4 ... 5,5)·10 <sup>6</sup>
28	Лазерная обработка	(2,8 ... 4,7)·10 <sup>7</sup>

Таким образом, общее уравнение технологического процесса примет вид:

$$P_t = aV + \frac{mv^2}{2} + \Delta T \cdot s.$$

Анализ этого уравнения энергозатрат на технологический процесс позволяет:

– показать доминирование отдельных составляющих в "реальных" процессах;

- предложить возможные пути совершенствования как процессов, так и технологических систем, предназначенных для их реализации;
- использовать в качестве всеобщего показателя технических средств, технологических процессов, производимой продукции – энергоёмкость, т.к. он наиболее соответствует экономическим функциям эффективности.

### **1.2.2. Энергетическая эффективность технологических процессов**

Технология машиностроения, как практическая наука, впитала в себя методы организации, планирования и экономики производства. На протяжении всего XX века она сохранила консервативные производственные традиции. Многие из этих традиций устарели и потеряли свое первоначальное значение – превратились в парадоксы. Самым удивительным парадоксом является использование времени, как универсального измерения (критерия) для оценки технологических процессов (операций). Различие физической природы процессов технологии машиностроения, начиная от обработки металлов давлением (ОМД), и обработки металлов резанием (ОМР) до физико-химической обработки (ФХО), логически предопределяло эксклюзивный критерий, которым выступает энергия процесса или его эквивалент – работа.

Как известно, механическая работа, а это большинство технологических процессов, определяется произведением пути  $L$  на силу  $F$ :  $A = L \cdot F$ . Если путь инструмента всегда известен (задан) или измерим (оборудование имеет для этого инструментарий), то усилие (если известно, то расчетное) не измеряется, поскольку ни кузнечно-штамповочное, ни металлорежущее и др. оборудование таких измерений не имеет. Конечно время  $t_{\text{п}}$  определенным образом характеризует эту работу, но не прямо, а через затрачиваемую на процесс мощность  $P$ :  $A = P \cdot t_{\text{п}}$ .

Таким образом, имея два фактора: время  $t_{\text{п}}$  и мощность  $P$  можно определить работу  $A$  технологического процесса (операции). В производственных условиях  $t_{\text{п}}$  определяют либо экспериментально – хронометражем, либо расчетом  $t_{\text{п}} = L(\dot{s})^{-1}$  (путь  $L$  деленный на скорость  $\dot{s}$ ). Скорость почти всегда фиксирована, мощность не определена, следо-

вательно, не определена работа. Время, как определитель работы, не дает полной картины процесса.

Специалисты по технологии и организации производства хорошо знают, что есть "выгодная" и "невыгодная" работа. За этими производственными понятиями скрывается различие в мощности, затрачиваемой для выполнения работы. Напомним: меньшее время требует большей мощности  $P$ :  $t_{\Pi} = A \cdot P^{-1}$ .

Технологи, доказывая полезность и необходимость концентрации переходов (операций), в качестве аргумента выдвигают очевидный факт – уменьшение времени протекания процесса. Рассмотрим этот случай.

Обработке точением подвергается заготовка, имеющая  $n$  ступеней длины  $L$ .

Первый вариант: однорезцовая обработка, общий путь ( $n \cdot L$ ), сила резания  $F$ . Работа  $A_{(1)} = F(nL)$ .

Второй вариант: концентрированная обработка  $n$ -резцами. Общий путь  $L$ , сила резания ( $nF$ ), работа  $A_{(2)} = (nF)L$ .

В обоих вариантах работа одинакова  $A_{(1)} = A_{(2)}$ . Однако второй вариант существенно в  $n$ -раз сокращает время процесса  $t_{\Pi(2)} = t_{\Pi(1)}/n$  за счет увеличения в  $n$  раз мощности:  $P_{(2)} = nP_{(1)}$ , т.к.

$$A_{(1)} = A_{(2)}; \quad t_{\Pi(1)} \cdot P_{(1)} = t_{\Pi(2)} \cdot P_{(2)}; \quad t_{\Pi(2)} \cdot P_{(2)} = (nt_{\Pi(2)}) \cdot P_{(1)}.$$

Это подтверждает закон сохранения работы (энергии) в технологических процессах (операциях) одной физической природы. Работа (энергия) в одних и тех же процессах (например, ОМР) остается постоянной. За энергию (работу) надо платить!

Экономические неприятности конца века возникли из-за необходимости оплачивать энергию, а не время. Раннее стремились сократить производственное время, не заботясь о том, сколько для этого потребуется использовать мощности.

Сбережение такого ресурса, как энергия, требует существенно изменить подходы к оценке действующих и проектируемых процессов в технологии машиностроения. Обратимся к рассмотрению физической сущности технологии процесса (операции). В рабочем процессе выполняется физическое (химическое) воздействие на объект (материал, вещество). В процессах ОМД – это деформирование, в процессах ОМР – деформирование и релаксация, в физических процессах –

релаксация, диффузия, адгезия, в химических – молекулярный, ионный, атомный перенос и т.п. Все эти процессы разнообразны, может казаться, что в них нет ничего общего, но это не так. Общим является затрата энергии на процесс, которая измеряется для каждого материала (вещества) и процесса единой по физическому смыслу характеристикой – удельной энергией (работой) процесса. Единица измерения определяется энергией (Дж), приходящейся на объем вещества ( $\text{см}^3$ ), т.е.  $a$  [Дж/ $\text{см}^3$ ]. Удельная энергия (работа) процесса тем больше, чем сложнее (в физическом смысле) процесс.

В исследованиях известных технологов: Алексеева Ю. Н. [4], Евстратова В. А. [64], Дикушина В. И., Коваленко В. С. [87], Попилова Л. Я. [174], Рыжова Э. В. [193], Сулова А. Г., Якимова А. В. [245], Ящерицина П. И. [255] и их учеников определена величина  $a$  для многих технологических процессов (операций).

На рис. 1.5 приведены обобщенные данные по 25 видам процессов с указанием удельной энергии (работы). Используя эти данные, можно определить энергию (работу), затрачиваемую на процесс по формуле:

$$A = a \cdot V,$$

где  $A$  – работа в технологическом процессе, Дж;  $a$  – удельная работа (энергия), Дж/ $\text{см}^3$ ;  $V$  – объем вещества (материала), на который направлено технологическое воздействие,  $\text{см}^3$ .

Сравним два распространенных в технологии машиностроения процесса механической обработки (ОМР).

Первый процесс – шлифование, второй – тонкое точение:

$$A_{\text{ш}} = a_{\text{ш}} \cdot \Delta V_{\text{ш}}; \quad A_{\text{т}} = a_{\text{т}} \cdot \Delta V_{\text{т}}.$$

Условие сравнения: одинаковый припуск на обработку, т.е.  $V_{\text{ш}} = V_{\text{т}}$  равных объемов  $\Delta V_{\text{ш}} = \Delta V_{\text{т}}$ , приравнивая эти выражения, получено:

$$\frac{A_{\text{ш}}}{a_{\text{ш}}} = V_{\text{ш}} = V_{\text{т}} = \frac{A_{\text{т}}}{a_{\text{т}}}.$$

Из рис. 1.5:  $a_{\text{ш}} = (5,5 \dots 7,5) \cdot 10^4$ ;  $a_{\text{т}} = (1,7 \dots 2,5) \cdot 10^3$ , т.е.

$$\frac{A_{\text{ш}}}{A_{\text{т}}} = \frac{(5,5 \dots 7,5) \cdot 10^4}{(1,7 \dots 2,5) \cdot 10^3} = 30.$$

Затраты энергии на тонкое точение в 30 раз меньше, чем на шлифование.

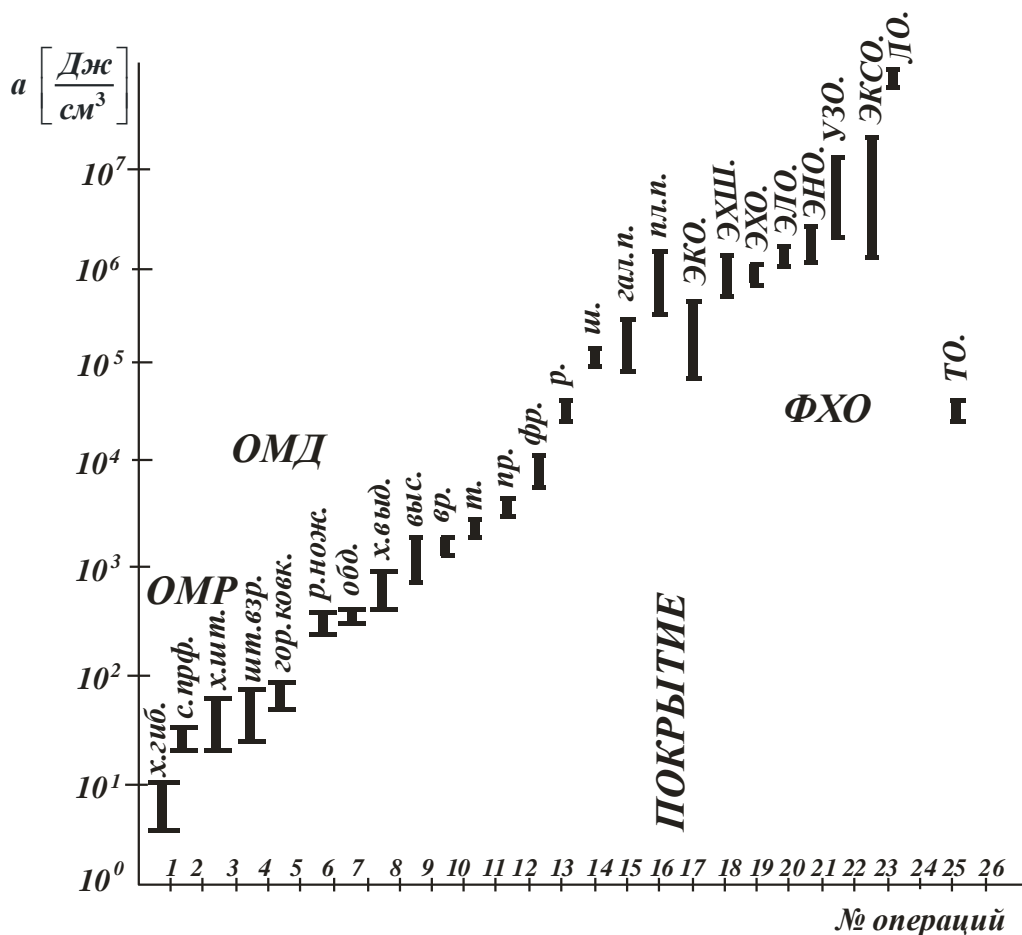


Рисунок 1.5 – Удельная энергия технологической операции

Анализ удельной энергии (работы) различных процессов (операций) позволяет сделать вывод: сокращение затрат энергии (работы) в технологии машиностроения возможно при переходе от энергоемких процессов ХО, к ОМР и далее к ОМД, если это позволяют:

- а) конструкция изделия;
- б) характеристика материала (вещества) изделия;
- в) характеристика качества.

Вывод: эффективным технологическим процессом является процесс с более низким значением  $a$ . Эффективность достигается за счет энергосбережения ресурса рабочего процесса.

### 1.2.3. Технологическая энергоэкономика

Одной из актуальных проблем технологии является определение затрат (расхода ресурсов) на производство изделия. Обычно в таких расчетах экономического характера не говорится о каких затратах на

производство продукта (товара или услуги) идет речь, подразумеваются основные и оборотные средства, как всеобщие экономические категории. Единицей измерения таких затрат являются "условные денежные единицы", которые не являются физической категорией.

В производственной практике универсальным "физическим" измерителем продукта (товара) является масса (кг), а технологической операции (технологической услуги) – время (с или мин).

Общей технологической категорией (физической) является энергия, затраченная на производство изделия:

$$\varepsilon_{и} = \varepsilon_{м} + \varepsilon_{т} + \varepsilon_{п},$$

где  $\varepsilon_{и}$  – энергозатраты на производство изделия;  $\varepsilon_{м}$  – энергозатраты на производство вещества (материала);  $\varepsilon_{т}$  – энергозатраты технологические;  $\varepsilon_{п}$  – энергозатраты бесполезные.

В этой формуле

$$\varepsilon_{т} = m_{м} \cdot C_{м},$$

где  $m_{м}$  – масса материала, затрачиваемого на изделие, кг;  $C_{м}$  – энергозатраты материала, мДж/кг (табл. 1.8 [253]);

$$\varepsilon_{т} = p_{р} \cdot t_{р} + p_{о} \cdot t_{о} + \frac{t_{об}}{t_{м}} \cdot m_{об} \cdot C_{м_{об}},$$

$p_{р}$  – удельная энергия рабочего (человека), кДж/мин (табл. 1.9 [6]);

$t_{р}$  – время на вспомогательные переходы, мин;

$$p_{о} \cdot t_{о} = p_{м} \cdot t_{м} + a \cdot V,$$

$p_{о}$  и  $t_{о}$  – мощность и время основное, кВт и мин;  $p_{м}$  и  $t_{м}$  – мощность и время машинное, кВт и мин;  $m_{об}$  и  $C_{м_{об}}$  – масса машины (станка) и аккумулируемая им энергия, кг и мДж/кг;  $t_{об}$  – материальный ("моральный") ресурс машины, мин;  $a$  – удельная работа (энергия) процесса, приходящаяся на 1 см<sup>3</sup> удельного материала, вещества, кДж/см<sup>3</sup>;  $V$  – объем удаляемого (преобразуемого) материала, вещества, см<sup>3</sup>.

Таким образом, общие энергозатраты  $\varepsilon_{и}$  (кДж) на производство штучного изделия определяются:

$$\varepsilon_{и} = m_{м} \cdot C_{м} + p_{р} \cdot t_{р} + p_{м} \cdot t_{м} + a \cdot V + \frac{V_{об}}{t_{м}} \cdot m_{об} \cdot C_{м_{об}}.$$

Рассмотрение этой формулы позволяет сравнить изделия, производимые:

– из разных материалов:

$$\Delta\varepsilon_T = \varepsilon_M^{(1)} - \varepsilon_M^{(2)} = m_M \cdot (C_M^{(1)} - C_M^{(2)});$$

– с разным участием весовых характеристик, но из одного и того же материала:

$$\Delta\varepsilon_T = \varepsilon_M^{(1)} - \varepsilon_M^{(2)} = C_M \cdot (m_M^{(1)} - m_M^{(2)});$$

– с разным участием энергии рабочего:

$$\Delta\varepsilon_p = \varepsilon_p^{(1)} - \varepsilon_p^{(2)} = t_p \cdot (p_p^{(1)} - p_p^{(2)});$$

– с разным временем работы рабочего:

$$\Delta\varepsilon_p = \varepsilon_p^{(1)} - \varepsilon_p^{(2)} = p_p \cdot (t_p^{(1)} - t_p^{(2)});$$

– с различным технологическим процессом:

$$\Delta\varepsilon_T = \varepsilon_T^{(1)} - \varepsilon_T^{(2)} = V \cdot (a^{(1)} - a^{(2)}) + p_M \cdot t_M;$$

– на различном по мощности и габаритам технологическом оборудовании:

$$\Delta\varepsilon_{об} = \varepsilon_{об}^{(1)} - \varepsilon_{об}^{(2)} = \left( \frac{V_{об}}{t_M} \cdot m_{об} \cdot C_{моб} \right)^{(1)} - \left( \frac{V_{об}}{t_M} \cdot m_{об} \cdot C_{моб} \right)^{(2)}.$$

Определение энергоэкономических возможностей технологических процессов и изделий на основе приведенных формул могут интерпретироваться как энергоэкономический эффект (ЭЭЭ). А отношение его к базовой величине сравнения будет интерпретироваться как энергоэкономическая эффективность (ЭЭЭФ). Таким образом, можно сопоставить производимый продукт как по критерию ЭЭЭ в абсолютных величинах, так и по ЭЭЭФ в относительных величинах (табл. 1.10 [55]).

Таблица 1.8 – Энергосодержание, мДж/кг [253]

Энергосодержание, мДж/кг	
Нефть	3,6
Цемент	7,5
Чугун	18,0
Стекло	32,0
Сталь (лист)	57,0
Медь (лист)	150,0
Алюминий	300,0
Титан	1100,0

Таблица 1.9 – Энергозатраты на деятельность человека, кДж/мин [6]

Энергозатраты на деятельность человека, кДж/мин	
Машиностроение и механообработка	10,5 – 19,3
Станочные работы	10,5 – 15,1
Слесарные работы	21,4 – 23,1
Электротехническая промышленность	21,4 – 24,0
Металлургическая промышленность	19,3 – 52,0
Строительные работы	17,2 – 17,8
Чтение лекций в аудитории	9,6 – 18,8
Печатание на механической машинке	5,9 – 8,8
Игра на скрипке или фортепьяно	9,2 – 11,2
Игра в баскетбол	37,6 – 40,0
Игра в теннис	29,8
Бег	90,0 – 95,0
Отдых лежа	3,8 – 5,5
Отдых сидя	5,9 – 7,2

Таблица 1.10 – Удельная работа (энергия) в технологической операции, Дж/см<sup>3</sup> [55]

Удельная работа (энергия) в технологической операции, Дж/см <sup>3</sup>	
Штамповочно-гибочные	5 – 50
Волочение, прокатка, выдавливание	$(2,4 – 6,0) \cdot 10^2$
Механическая обработка:	
- лезвийным инструментом	$(1,7 – 7,5) \cdot 10^3$
- абразивным инструментом	$(5,1 – 7,5) \cdot 10^4$
Электрические методы обработки	$(0,3 – 7,0) \cdot 10^5$
Лучевая обработка	$(0,6 – 47,0) \cdot 10^6$

#### 1.2.4. О классификации технологических процессов и физических закономерностях

Технологический процесс представляет собой контактное взаимодействие двух (как минимум) объектов, один из них обрабатываемый, второй – обрабатывающий. Контактное взаимодействие твердых тел изучалось великими исследователями прошлого: Д’Аламбером Ж. Л. (в механике), Кориолисом Г. (в теории удара), Герцем Г. Р. (в задачах трения). Первая классификация контактного взаимодействия, естественно, была геометрической:



1 класс – точечный контакт (шар: – с шаром, – с образующей цилиндра, – с плоскостью со скрещающимися цилиндрами и т.п.);

2 класс – линейный контакт (цилиндра: – с цилиндром по образующим, – с плоскостью и т.п.);

3 класс – поверхностный контакт (плоскость с плоскостью т.п.);

4 класс – (появился позже) пространственный (обволакивающий) контакт.

Геометрическая классификация была интерпретирована Кошкиным Л. Н. [94], как технологическая: обработка детали резцом на проход (1 кл.); обработка – врезанием по образующей (2 кл.); штамповка с образованием поверхностей (3 кл.); отливка в форму (4 кл.). Геометрическая классификация, дополненная характерными движениями для металлорежущего оборудования, позволила Грановскому Г. И. [42] классифицировать технологические процессы образования поверхностей как обрабатываемых деталей, так и обрабатывающих инструментов. Основным признаком геометрической классификации является расстояние  $L$ . Тогда вся классификация сводится к ряду: 1 класс –  $[L0]$ , 2 класс –  $[L1]$ ; 3 класс –  $[L2]$ ; 4 класс –  $[L3]$ .

Известно, что в практике использования различных технологических процессов применяют так называемую "кинематическую" характеристику процесса – производительность [86]. Производительность, как мера, представляет собой отношение изменяемой величины (параметра пространства) ко времени этого изменения.

Используя производительность как классификационный признак, получаем ряд:

1 класс –  $[L0 \cdot T^{-1}]$ , 2 класс –  $[L1 \cdot T^{-1}]$ ; 3 класс –  $[L2 \cdot T^{-1}]$ ; 4 класс –  $[L3 \cdot T^{-1}]$ .

Эти размерные величины-признаки представляют "кинематическую классификацию" технологических процессов. Как физические категории здесь выступают  $[L0 \cdot T^{-1}]$  – частота,  $[L1 \cdot T^{-1}]$  – линейная скорость;  $[L2 \cdot T^{-1}]$  – "площадная" скорость;  $[L3 \cdot T^{-1}]$  – "объемная" скорость.

"Кинематическая" классификация технологических процессов, характеризуемая физическими категориями, органически связана с известными физическими закономерностями, выраженными через размерности  $[L; T]$ , т.е. параметры пространства и времени.

Для получения классификации физических закономерностей следует основные физические единицы системы СИ записать в размерностях  $[L; T]$ .

Таблица 1.11 – Основные единицы СИ (размерность)

Длина $l$ (метр) [L]	Температура $T$ (Кельвин) [L <sup>5</sup> T <sup>-4</sup> ]
Масса $m$ (килограмм) [L <sup>3</sup> T <sup>-2</sup> ]	Сила тока $I$ (Ампер) [L <sup>3</sup> T <sup>-3</sup> ]
Время $t$ (секунда) [T]	Сила света $J$ (кандела) [L <sup>5</sup> T <sup>-5</sup> ]

Производные единицы физических величин, отражающие закономерности реального мира, сводятся в "кинематическую классификацию", представленную таблицей Ди Бартини [59]. Рассмотрение "кинематической классификации" позволяет обнаружить общность физических величин для различных явлений и процессов реального мира. В табл. 1.11 приведены многие известные физические инварианты, позволяющие описывать различные "технологические процессы" взаимодействия: механические, электрические, магнитные и даже экологические (биологические). Например, рост живого существа определяется единицей скорости изменения массы [L<sup>3</sup> T<sup>-3</sup>], эта же величина соответствует силе тока [59]. Одинаковые значения физических величин, отображающие различные процессы, являются описательной основой природных явлений.

Рассматривая "кинематическую классификацию", обратим внимание на величины, находящиеся в главной диагонали таблицы, это  $[L \ T] \cdot n = Vn$ . Если далее ввести "базовую переменную"  $[L \ T^{-1}]$  – скорость, относя эту переменную не к механической скорости, а к скорости изменения процесса, расстояние – к метрике системы, время – к локальному времени, то можно построить "кинематическую систему", в которой изменяется два измеряемых параметра  $[V]$  и  $[L]$ . Симметрично преобразовывая табл. 1.11 относительно безразмерной величины  $[L \cdot T^{-1}]_0$ , получаем формальные структуры "виртуального мира", которые могут оказаться рациональными.

### 1.2.5. Энергетические критерии в технологии машиностроения

**Энергетический критерий – удельная работа (энергия) процесса.** Технология машиностроения содержит большой спектр физических процессов, начиная от обработки металлов давлением (ОМД), резанием (ОМР), до физических (ФОМ), электронных и светолучевых (ЭФОМ) процессов воздействия на вещество (материал).

Основным показателем этих процессов, несмотря на их физическое разнообразие, является время  $t$  или обратная величина – производительность  $t^{-1}$ . Как физическая категория в технологии, время – длительность (период) протекания процесса, а производительность – частота, с которой осуществляется технологическое воздействие. Время, как основной показатель, является необходимым для анализа и синтеза технологических процессов, но не достаточным его показателем. Это положение продемонстрируем примером технологической операции – сверления, которая выполняется с разной степенью концентрации инструмента (рис. 1.6). Время обработки  $t$  во всех трех случаях одинаково.

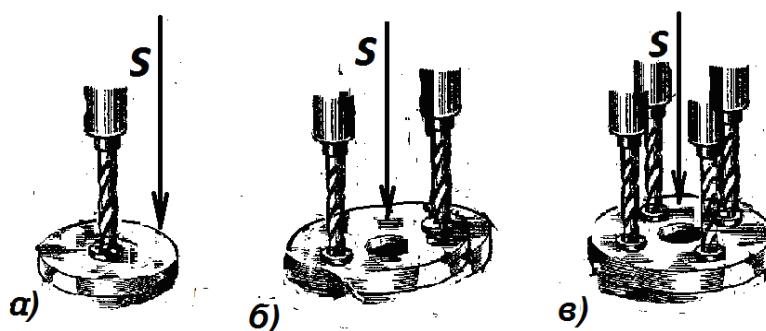


Рисунок 1.6 – Обрабатываются разные детали

Любой механик скажет: "Здесь требуется разная мощность  $P$ ".

Технолог скажет: "Здесь снимается разный объем стружки  $V$ ".

Любой физический (химический) процесс, положенный в основу технологического процесса, требует затраты энергии  $E$  для выполнения технологического воздействия, т.е. работы  $A$ . Если известно время протекания процесса  $t$  и затрачиваемая мощность  $P$ , то можно определить энергию по известной формуле  $E = P \cdot t$ . Это и есть работа  $A$ , затрачиваемая на процесс пластического деформирования объема  $V$ . Обобщенный критерий технологического процесса обработки – удельная работа:  $a = A/V$ .

В силу разнообразия процессов ОМД, ОМР, ФОМ и (ЭФОМ), производить сравнение их между собой для оценки и выбора с целью дальнейшего применения не корректно, из-за того, что в этом случае неизвестна база сравнения. Такой базой сравнения является количество работы (энергии), отнесенное к единице объема выполненной работы:

$$a = A/V,$$

где  $a$  – удельная работа (энергия), Дж/см<sup>3</sup>;  $A$  – работа, Дж;  $V$  – объем, см<sup>3</sup>.

Впервые показатель удельной работы, как характеристика технологической операции, была приведена докт. техн. наук Швецом В. В. еще в 1967 году в статье [233], а затем более подробно в его же книге [232]. В этих работах предлагалось рассматривать идеальные технологические процессы, исходя из атомно-молекулярного подхода к скорости процессов разрушения вещества, и оценивать эти процессы по показателю удельной работы. В настоящее время в новых взглядах на технологические процессы (операции) и их классификацию удельная работа приобретает новое значение.

**Классификация технологических процессов.** Технологические процессы по назначению делятся на: обрабатывающие, в основе процесса разрушения (subtraction) – обработка с уменьшением массы или объема материала изделия; создающие в основе процесса объединение (addetivction) – процесс увеличения массы или объема изделия. Эти процессы следует рассматривать отдельно. Следуя классификации академика Кошкина Л. Н. [94], который рассматривал различные процессы механической обработки (резанием – ОМР и давлением – ОМД), укажем на четыре класса процессов в зависимости от типа физического воздействия на (материал):

- 1 класс – воздействие точечное (0D),
- 2 класс – воздействие линейное (1D),
- 3 класс – воздействие поверхностное (2D),
- 4 класс – воздействие пространственное (3D).

Технологические процессы по технической реализации делятся на машинные (процессы ОМД и ОМР) и аппаратные (процессы ФОМ и ЭФОМ).

**Основные уравнения, использующие критерий удельной работы.** Наш интерес к удельной работе технологических процессов и рабочих операций позволяет рассмотреть проблему в связи с классификацией операции с нескольких направлений.

1. Энергия, отнесенная к единице деформированного объема, характеризует удельную работу деформации без разрушения объекта в процессах ОМД. Она определяет внешнее воздействие на физический объект (изделие) и выражается через напряжение и деформацию:

$$a = (\sigma_1 \varepsilon_1),$$

где  $\sigma_1$  – напряжение, Н/см<sup>2</sup>;  $\varepsilon_1$  – деформация, см/см.

2. Энергия, отнесенная к единице деформированного объема, характеризует удельную работу деформации с разрушением части объекта (отрыв стружки) в процессах ОМР и выражается формулой:

$$a = P/(s \cdot t \cdot v),$$

где  $P$  – мощность, Вт;  $s$  – подача, см;  $t$  – глубина, см;  $v$  – скорость, см/с.

3. Энергия, отнесенная к единице объема, характеризует удельную работу в процессах ЭФОМ, и выражается следующей формулой:

$$a = (P/f) \cdot (1/v),$$

где  $P$  – мощность, Вт;  $f$  – площадь потока энергии, см<sup>2</sup>;  $v$  – скорость, см/с.

4. Энергия, отнесенная к единице объема, характеризует удельную работу ФОМ в термических процессах. В этих процессах энергия расходуется на фазовые переходы из твердого состояния в жидкое (литье) или из жидкого – в газообразное (плазма). Удельная работа определяется следующей формулой:

$$a = c \cdot \rho \cdot T,$$

где  $c$  – теплоемкость [Дж/кг·К];  $\rho$  – плотность [кг/см<sup>3</sup>];  $T$  – температура [К].

Энергия, отнесенная к единице объема, или иначе удельная работа – удобная мера производимой работы, является необходимым и достаточным показателем технологического процесса (операции) вне зависимости от физического содержания. Итак, это энергия (Дж), необходимая для выполнения работы над объемом материала (см<sup>3</sup>), есть удельная работа – ( $a$ ) (удельная энергия), характеризует технологический процесс по расходу энергоресурса. Основные классы технологических процессов существенно различаются по удельной энергии (Дж/см<sup>3</sup>). Процессы: ОМД  $5 \cdot 10^0 \dots 5,5 \cdot 10^2$ ; ОМР  $2 \cdot 10^3 \dots 1,5 \cdot 10^4$ ; ЭФОМ  $2 \cdot 10^5 \dots 1,4 \cdot 10^6$ ; ФОМ  $3 \cdot 10^4 \dots 5 \cdot 10^7$ .

Как видно, наиболее экономичные процессы ОМД – холодная гибка и формовка листов (производство кузовов автомобилей), штамповка взрывом (производство емкостей "бытовой" техники). Достаточно экономичные процессы ОМР в традиционных операциях точения (обработка тел вращения) и фрезерования (обработка плоскостей). Весьма энергоемкие процессы электрофизической обработки (ЭФОМ). Совершенно неэкономичные процессы ФОМ – ультразвуковая и лазерная обработка. Эти процессы специального назначения, необходимые для обработки сверхтвердых материалов.

### Особенности применения критерия удельная работа.

Рассмотрим предыдущий пример с практической стороны. Деталь требует обработки нескольких одинаковых отверстий. Сравним два варианта обработки. Первый – последовательная обработка  $n$ -отверстий в детали на одноинструментном станке с механизмом перемещения детали для следующего отверстия. Вторым вариантом обработки, где в качестве альтернативы, на многоинструментном станке все отверстия обрабатываются одновременно. Понятно, что в обоих вариантах удельная работа одинакова:  $a_1 = a_2$ . На рис. 1.7 представлены эти два варианта. Обработка в первом варианте из-за необходимости перемещать деталь для следующей обработки, требует дополнительной затраты энергии:  $P_p \cdot t_p$ .

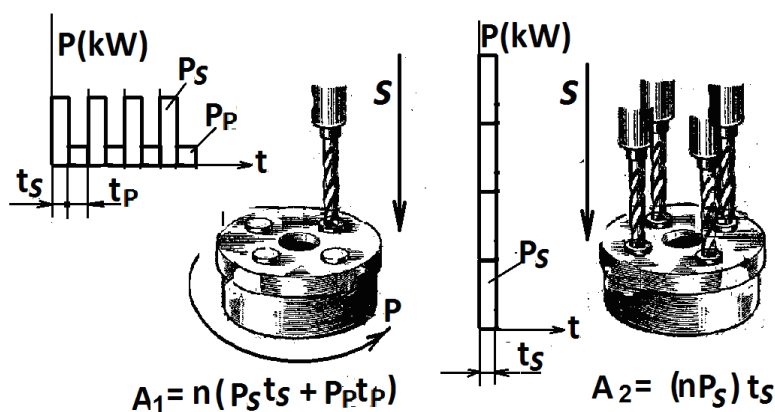


Рисунок 1.7 – Обрабатываются одинаковые детали (варианты обработки)

Во втором варианте при максимальной концентрации инструментов, которые работают одновременно, затрата энергии уменьшается, как и время обработки на станке  $t_1 > t_2$ , соответственно  $A_1 > A_2$ . Здесь следует еще раз отметить, что удельная работа процесса обработки одинакова  $a_1 = a_2$ . А вот время  $t_1 > t_2$  и энергия,  $A_1 > A_2$  технологической операции различны. Оснащение станков дополнительными механизмами, которые для своей работы требуют энергетического обеспечения, увеличивают оба показателя. Может показаться, зачем эти рассуждения, когда удельная работа, о которой много написано выше, равна. О чем это?

Автор работ [232, 233] сосредоточил внимание на двух скоростных зонах предельного состояния деформированного вещества. Пер-

вая зона с предельной скоростью деформации, равной скорости звука, вторая – с предельной скоростью деформации, равной скорости света. Далее автор предложил двухкоординатную таблицу "удельная энергия – скорость процесса", которая, к сожалению, не стала "таблицей Менделеева". В заключении автор сформулировал основные требования к идеальным процессам обработки:

"1. В основу процесса должны быть положены электрические или световые явления, т. к. только они обладают способностью создавать сверхзвуковые скорости.

2. Энергия, необходимая для процесса обработки, должна вводиться непосредственно в рабочую зону, минуя всевозможные передаточные звенья и преобразования.

3. Энергия должна направляться на нарушение и ослабление минимально необходимого количества связей, не затрагивая ближайших слоев обрабатываемого материала".

**Закон сохранения удельной работы (энергии) в одинаковом процессе.** При выборе технологического процесса (операции), выполняемого на станках, прессах и другом оборудовании с различной степенью концентрации инструментов, привыкли отдавать предпочтение технологическому процессу, имеющему более высокую производительность, т.е. меньшее время технологической операции или процесса. Здесь не надо путать с рабочей операцией или рабочим процессом.

**В одинаковых процессах удельная работа постоянна – это есть закон сохранения работы (энергии) во всех формах ее применения.**

Возникает вопрос, для чего нужно знать и рассчитывать удельную работу? Ведь всегда обходились без нее. И, вроде, и знать ее ни к чему, раз ее знание не влияет на производительность – самый главный и важный в производстве из всех показателей.

**Удельная работа – это технологическая константа операции**

Подробно изучая [51, 53, 55, 56] проблему оценки операций физико-механического воздействия на объект в разных технологических процессах, приходим к выводу, что характеристики удельной работы, предложенные докт. техн. наук Швецом В. В. (табл. 1.12), являются константами этих процессов.

Таблица 1.12 – Значения удельной работы (константы), Дж/см<sup>3</sup>

№	Наименование операции	Удельная работа (константа), Дж/см <sup>3</sup>
1	Холодная листовая гибка	5...10
2	Холодная гибка профилей	20...40
3	Холодная гибка труб на роликах	20 ...100
4	Штамповка на гидравлических прессах	20...65
5	Штамповка взрывом	22...76
6	Волочение труб без оправки	$(4,0...5,1) \cdot 10^2$
7	Волочение труб с оправкой	$(5,5...8,5) \cdot 10^2$
8	Волочение проволоки	$(5,0 ... 6,0) \cdot 10^2$
9	Холодная резка на ножницах	$(5,5...8,5) \cdot 10^2$
10	Обдирка однопроходная	$(5,6 ... 14) \cdot 10^2$
11	Выдавливание холодное	$(5,5...8,5) \cdot 10^2$
12	Высадка холодная	$(5,6 ... 14) \cdot 10^2$
13	Резание баллистическое	$(1,0...1,3) \cdot 10^3$
14	Точение	$(1,7...2,5) \cdot 10^3$
15	Протягивание	$(2,5...4,0) \cdot 10^3$
16	Зенкерование	$(3,0...4,8) \cdot 10^3$
17	Сверление	$(1,0...6,2) \cdot 10^3$
18	Фрезерование	$(5,0...7,5) \cdot 10^3$
19	Развертывание	$(1,2...3,0) \cdot 10^4$
20	Шлифование	$(5,1...7,5) \cdot 10^4$
21	Электрохимическое шлифование	$(1,4...5,8) \cdot 10^5$
22	Электроконтактная обработка	$(2,3...4,6) \cdot 10^5$
23	Электрохимическое полирование	$(4,25...4,5) \cdot 10^5$
24	Электронно-лучевая обработка	$(2,4...5,8) \cdot 10^5$
25	Электроимпульсная обработка	$(3,5...7,0) \cdot 10^5$
26	Ультразвуковая	$(0,6...3,6) \cdot 10^6$
27	Электроискровая обработка	$(1,1...2,9) \cdot 10^6$
28	Лазерная (светолучевая)	$(2,8...4,7) \cdot 10^7$

Примечание: по данным докт. техн. наук Швеца В. В. [232, 233] с уточнением автора.

**Сравнение разнородных операций по критерию удельной работы.** Используя условие одинакового объема преобразования для различных по технологическому (физическому) содержанию процессов, можно произвести их сравнение по энергетическим затратам.



Сравним финишную обработку изделия, выполненного из одного и того же материала, имеющего определенный припуск на обработку, двумя альтернативными методами (процессами) – круглым шлифованием и тонким точением (рис. 1.8):

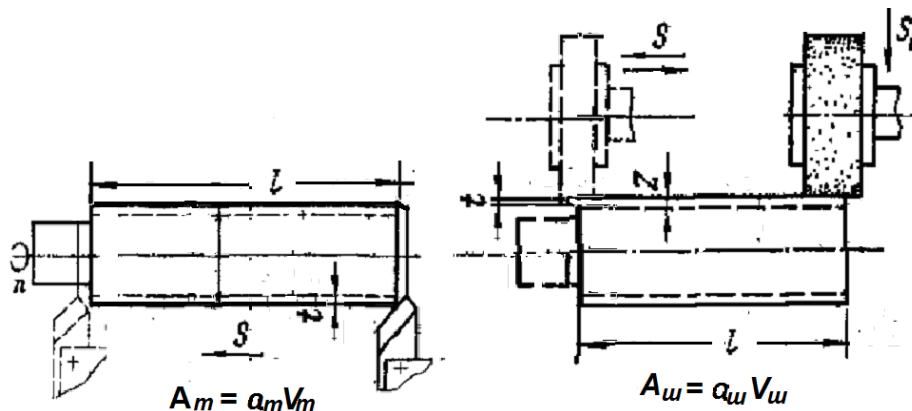


Рисунок 1.8 – Операции тонкого точения и шлифования

Из условия равных объемов  $\Delta V_{ш} = \Delta V_{т}$  после элементарных преобразований имеем:

$$\frac{A_{ш}}{A_{т}} = \frac{a_{ш}}{a_{т}}$$

Отношение работ равно отношению констант:

$$a_{ш} = (5,5 \dots 7,5) \cdot 10^4; \quad a_{т} = (1,7 \dots 2,5) \cdot 10^3,$$

или

$$\frac{A_{ш}}{A_{т}} = \frac{(5,5 \dots 7,5) \cdot 10^4}{(1,7 \dots 2,5) \cdot 10^3} = 30.$$

Таким образом, процесс тонкого точения в 30 раз менее энергоемок, чем процесс шлифования, при снятии одинакового припуска. Возможно, столь большая величина энергозатрат при шлифовании вызовет удивление? Однако напомним, что "удельная" энергия зависит от соотношения процесса трения, царапания и резания, являющихся составными элементами шлифования. Сравнение этих двух процессов в технологической практике (литературе) не анализировалось и обсуждению не подвергалось.

Рассмотрим другой пример. Обработка зубчатых венцов колес обычно выполняется в две операции ОМР: первая – фрезерование, вторая – шлифование (рис. 1.9). Если использовать вместо традиционного процесса технологический процесс на основе операции ОМД,

т.е. производить накатку зубьев роликами, например, по методу фирмы GRJB, при обеспечении качества предыдущего варианта, то при сравнении вариантов по технологическим константам получим возможность выбора технологического процесса с минимальной затратой энергии.

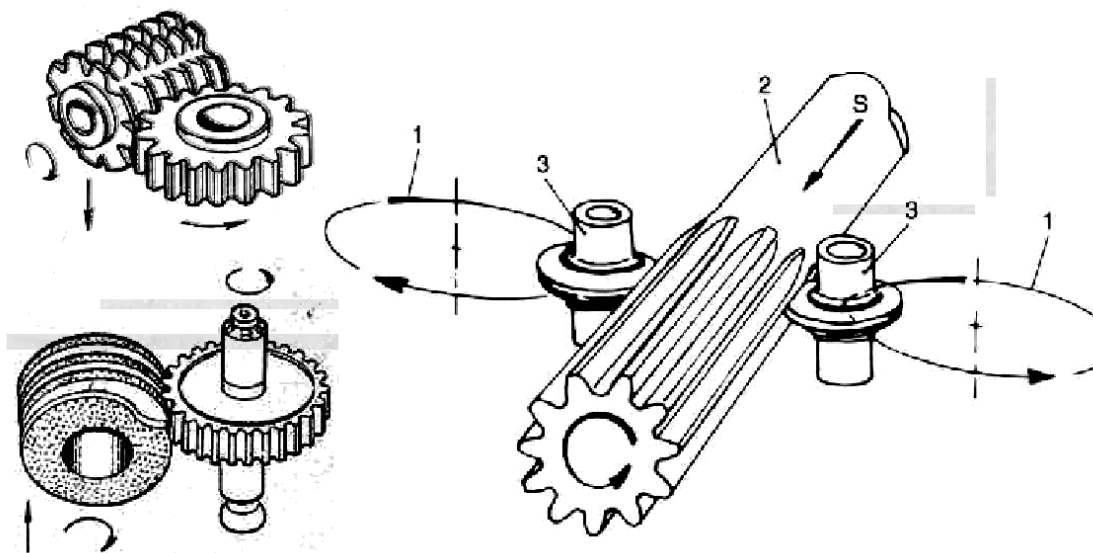


Рисунок 1.9 – Операции ОМР и ОМД при обработке зубчатого колеса:

$$a_{\phi} = (5,0 \dots 7,5) \cdot 10^3; \quad a_{\psi} = (5,1 \dots 7,5) \cdot 10^4; \quad a_{\text{омд}} = (5,5 \dots 8,5) \cdot 10^2;$$

$$\frac{A_{\phi+\psi}}{A_{\text{омд}}} = \frac{(5,0 \dots 7,5) \cdot 10^3 + (5,1 \dots 7,5) \cdot 10^4}{(5,5 \dots 8,5) \cdot 10^2} = 110 \dots 90.$$

Таким образом, получено стократное различие в затратах энергии. Естественно, эти расчеты приблизительные, но все же указывают направление работы ученых-исследователей и технологов-практиков. Аналогичным приемом можно сравнивать сложные многооперационные процессы – варианты.

### 1.2.6. Исследование структуры процессов в машиностроении

Первой (необходимой) характеристикой технологического процесса является взаимодействие субъекта (инструмента) и объекта (изделия) действия [48].

Второй (достаточной) характеристикой технологического процесса является воздействие субъекта на пространственный объект, определяемый объемом в координатах 3D.

В процессе обработки резанием в настоящее время наиболее широко используется характеристика, определяемая отношением:

$$K = Q_m/Q,$$

где  $Q_m$  – объем металла, который надлежит снять, т.е. припуск;  $Q$  – объем металла снимаемый, как физически возможный за единицу движения.

Тогда  $K$  выражает число необходимых движений для обработки объекта заданного объема, поскольку движение в технологии интерпретируется числом единиц времени (ЕВ). В свою очередь, ЕВ имеет для разных процессов масштаб (с, мин, час и т.д.).

Технологи выработали объединенную характеристику – скорость его протекания. В размерностях  $(L^3/t)$  – называемый интенсивностью съема объема металла [101];  $(L^2/t)$  – интенсивность съема в координатах 2D, характерная для операций врезного шлифования и резки (отрезки) заготовки [221];  $(L/t)$  – для лучевого воздействия многие авторы определяют интенсивность съема в координатах 1D. Последние две характеристики соответствуют технологическим процессам по классификации Кошкина Л. Н. [94], однако для ряда процессов они требуют уточнения.

Известно определение возможности протекания процесса резания (съема металла припуска с заготовки), при обработке с условием, при котором напряжение резания  $\sigma_p$  должно быть больше напряжения сопротивления  $[\sigma]$ , т.е.  $\sigma_p \geq [\sigma]$ . Напряжения в металле при нагружении определяются отношением силы ( $F$ ) к поперечному сечению  $(L^2)$ , т.е.  $(F/L^2)$ , соответственно, условное напряжение резания будет иметь эту размерность.

Поскольку действие съема металла определялось  $(L^3/t)$ , то интегральная характеристика:

$$KI = (L^3/t) \cdot (F/L^2) = (F L)/t.$$

В числителе выражения  $F L$  – сила на путь, т.е. работа (энергия) процесса, а в знаменателе время  $t$ , то отношение  $KI$  представит собой затрачиваемую на процесс съема металла мощность  $KI = P$ .

Весьма удобно принять в качестве критерия оптимизации величину мощности  $P$ , которая интегрально характеризует процесс. Из этого следует вывод: оптимальным будет считаться процесс, а с ним и оборудование, который имеет наименьшее значение мощности, т.е.  $P \rightarrow \min$ . Этот вывод следует принять осторожно.

Рассмотрим токарную обработку: операция выполняется на станке одиночным резцом (вариант первый). Работа в этом процессе:

$$A_1 = F_1 L_1,$$

где  $F$  – сила резания, Н;  $L$  – длина обработки, м.

Операция выполняется на многорезцовом станке (вариант второй), здесь обработка ведется  $n$ -резцами, поэтому общая длина обработки сокращается, а сила возрастает в  $n$ -раз:

$$A_2 = (nF_1) \cdot (L_1/n),$$

отсюда следует  $A_1 = A_2$ . Работа в обоих вариантах равна, как и затрачиваемая энергия  $B$  в первом случае:  $A_1 = P_1 t_1$ , во втором случае

$$A_2 = P_2 t_2 \quad \text{или} \quad P_1 t_1 = P_2 t_2,$$

а также

$$(t_1 / t_2) = (P_2 / P_1) = \text{idem}.$$

Из приведенного следует, что в процессах одинаковой гомогенной (однородной) физической структуры работа (энергия), затрачиваемая на эти процессы, при прочих равных условиях остается постоянной (принцип равенства работы); и как следствие – выигрываем во времени, проигрываем в мощности. В любых технологических процессах механической обработки кинетическая энергия переходит в потенциальную, совершает работу по пути  $L$  при действии силы  $F$ :

$$F = 0,5 (mv^2) / L,$$

где  $m$  – масса, кг;  $V$  – скорость деформации, м/с;  $L$  – путь, м.

Отнесем деформирующую силу к единице поверхности:

$$\sigma = (mv^2) / (\underline{L} \cdot L^2).$$

Если далее обозначить  $E$  модуль упругости, то можно записать:

$$\underline{L} = (\sigma L) / E.$$

Подставив это выражение в предыдущее, получим:

$$\sigma = (mv^2)E / (L^3 \sigma).$$

В сравниваемых процессах, согласно принципу постоянства работы (энергии),  $(m_1 v_1^2 E_1) / (L_1^3 \sigma_1^2) = (m_2 v_2^2 E_2) / (L_2^3 \sigma_2^2)$ .

Далее, обозначая  $C = m / L^3$ , получим:

$$(C_1 v_1^2 E_1) / \sigma_1^2 = (C_2 v_2^2 E_2) / \sigma_2^2.$$

Окончательно имеем:

$$v_1 / v_2 = (\sigma_1 / \sigma_2) \cdot [(C_2 E_2 / C_1 E_1)]^{0,5}.$$

Если при сравнении конкурирующих процессов материал (припуск) и вид обработки одинаковы, то преобладание одного варианта процесса над другим возможно при изменении скорости его протекания.

### 1.2.7. Обоснование и выбор финишных операций механообработки по энергетическому критерию

Финишные технологические операции должны обеспечивать все технические требования, зафиксированные конструкторским документом (чертежом). Назначения финишных операций выполняются по таблицам  $R_a$ –IT, которые содержат экспериментальные данные, накопленные многолетним опытом технологов-производственников [209, 215]. На рис. 1.10 представлены области рационального применения технологических операций. Анализируя диаграмму  $R_a$ –IT, технолог назначает финишную операцию для обработки заданной поверхности, обосновывая возможность получения заданных параметров и качества этой поверхности по требованиям конструктора.

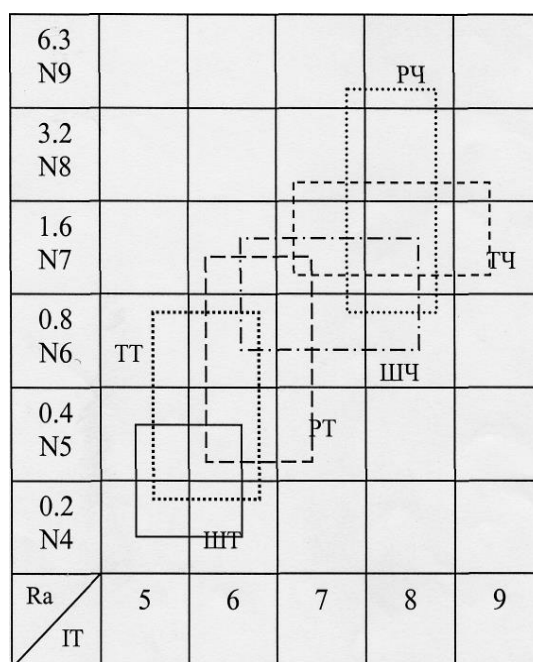


Рисунок 1.10 – Области рационального применения (финишных) технологических операций  $ТОН = f(R_a, IT)$

Выбор технологической операции по двум параметрам может оказаться недостаточным, поэтому ряд исследователей: Суслов А. Г., Якимов А. В., Ящерицын П. И. обратили внимание на необходимость учета дополнительных параметров, связанных с изменяющимися в процессе обработки свойствами поверхностных слоев детали (изделия). К таким параметрам, кроме  $R_a$  и IT, относят волнистость, микротвердость, напряжения в поверхностных слоях и др.

Параметры, характеризующие функциональные (конструкторские) требования изделия, делятся на две категории: геометрические и физико-механические. К геометрическим обычно относят размеры, допуски и положение поверхностей, а также элементарные свойства: максимальная высота шероховатости  $H_{\max}$ , глубина нивелирования волнистости  $W_p$ , шаг неровностей волнистости  $S_m$ , среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$  ( $R_z$ ), максимальная амплитуда шероховатости  $R_{\max}$ , глубина нивелирования шероховатости  $R_p$ , шаг неровностей шероховатости  $S_m$ , средний шаг неровностей по вершинам  $S$ , относительная опорная длина профиля  $t_p$ .

К физико-механическим относят параметры, связанные со свойствами поверхностных слоев  $H_{M0}$ ,  $h_{M0}$ ,  $\sigma_{\text{ост}}$ ,  $B$ ,  $h_{\sigma}$ , а также свойств материала изделия  $E$ ,  $\mu$ ,  $\sigma_T$ .

Важнейшими из этих параметров являются  $H_p$ ,  $W_p$ ,  $R_p$ ,  $S_m$ ,  $H_{M0}$ , которые, по мнению профессора Сулова А. Г. [218], могут определять обобщенную характеристику "комплексный показатель" метода механической обработки  $C_x$  – "Комплексный показатель"  $C_x$  [218] представляет собой сложную функциональную зависимость параметров поверхностного слоя:

$$C_x = f(R_p, W_p, H_{M0}, S_m, t_m);$$

$$C_x = f(E, \mu, a, n).$$

Поскольку поверхностный слой и его параметры формируются в процессе технологических операций, Сулов А. Г. определил пределы изменения  $C_x$  для различных финишных методов обработки [218]. На рис. 1.11 изображены пределы изменения "комплексного показателя" для различных методов обработки. На рис. 1.10 – рис. 1.12 приведены следующие технологические методы (операции):

РЧ, РТ, ТЧ, ТТ – растачивание и точение (чистовое и тонкое);

ВШЧ, ВШТ, КШЧ, КШТ, ПШЧ, ПШТ – шлифование: внутренне, круговое плоское (чистовое и тонкое);

Х, Р, СФ, П, Н, ПН – хонингование, раскатка, суперфиниш, притирка, накатка, плоская накатка;

ТФЧ, ТФТ – торцевое фрезерование (чистовое и тонкое).

После сравнения параметров  $C_x$  и ранее приведенной диаграммы  $R_a$ -IT, можно обнаружить частичное совпадение и подтверждение теоретических соображений Сулова А. Г. и экспериментальных данных наработанных опытом технологов-машиностроителей.

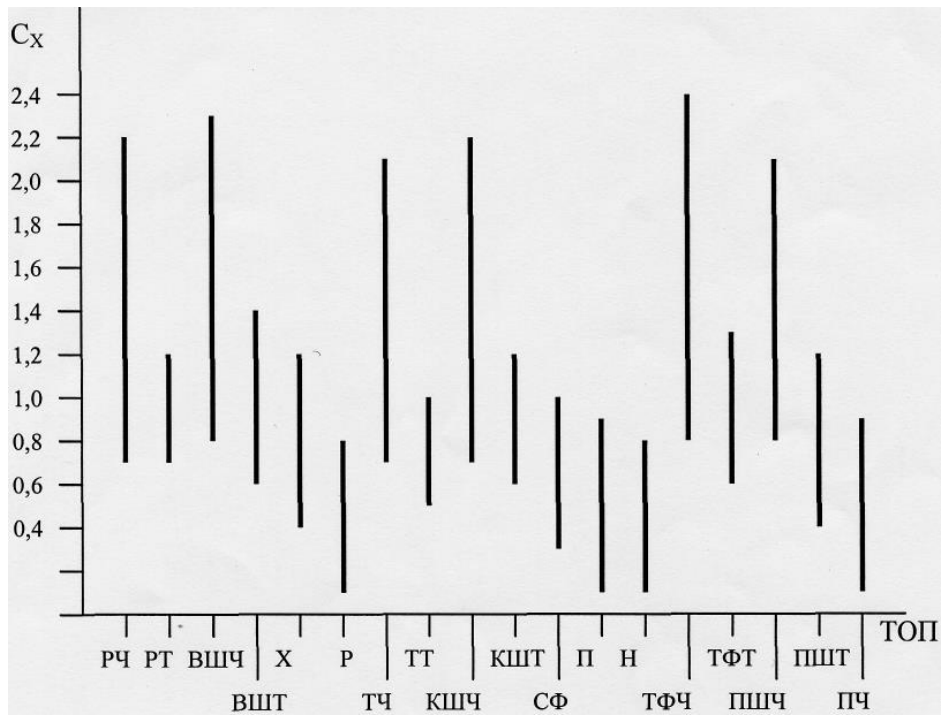


Рисунок 1.11 – Пределы изменения "комплексного параметра"  $C_x$  в зависимости от вида обрабатываемой поверхности и метода обработки

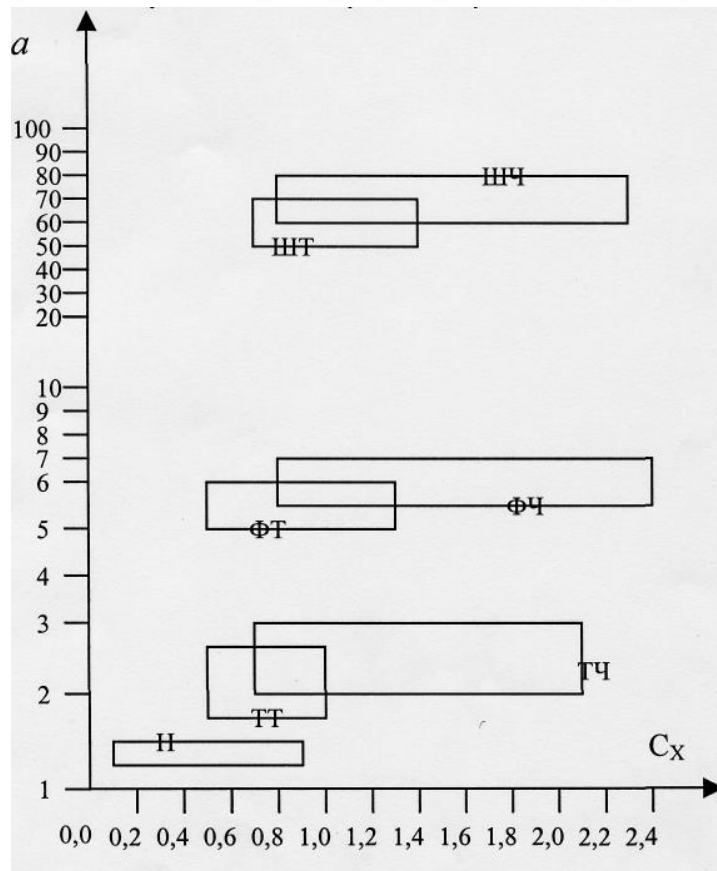


Рисунок 1.12 – Области рационального применения (финишных) технологических операций  $ТОН = f(C_x, a)$

Выбор финишных операций: тонкого растачивания, шлифования, точения и др., базирующихся на функциональных (конструкторских) требованиях, будет недостаточно полным, так как эти операции могут быть конкурирующими. Для окончательного решения по выбору технологических операций среди конкурирующих можно воспользоваться критерием технологической энергоемкости [50, 54, 224]. Таким критерием может выступать "удельная энергоемкость" технологической операции  $a$  (кДж/см), представленная совместно с "комплексным показателем"  $C_x$  для рассматриваемых финишных операций на рис. 1.12.

## Выводы

1. Проведен анализ основных проблем инженерного образования и развития технологий XXI века. Показано, что с учетом бурного роста наукоемких технологий центр тяжести в подготовке специалистов в Высшей школе должен сместиться в сторону понимания существа задач и проблем научно-технологического прогресса. В этом состоит главное направление инженерного образования в настоящее время. Показано, что достижение высоких результатов в инженерной сфере возможно только благодаря широкому использованию информации, сосредоточенной на сайтах Интернета, и применению виртуального моделирования на развитой базе наглядного динамического представления заданной функции (functional visualization). Исходя из сказанного, виртуальное обучение – новый стиль инженерного образования XXI века, а дистанционное обучение – путь в инженерное образование XXI века.

2. Анализ финишных технологических операций механообработки показывает существенные преимущества фрезерования и точения (растачивания) по сравнению со шлифованием в отношении энергозатрат. Поверхность детали, образуемая лезвийным инструментом, в отличие от абразивного инструмента имеет регулярный характер. Если необходимо получить хаотический характер поверхности, то после лезвийной обработки применяют накатку, т.е. процесс микропластической обработки. Суммарная затрата энергии на лезвийную и микропластическую обработку будет, по нашему мнению, значительно ниже, чем на шлифование.



## **Раздел 2**

### **Современные металлообрабатывающие станки с ЧПУ и их технологические возможности**

В настоящее время на промышленных предприятиях Украины все шире используются современные высокооборотные металлообрабатывающие станки с ЧПУ типа "обрабатывающий центр" производства ведущих мировых станкостроительных компаний. Как показывает практика, эти станки располагают значительными технологическими возможностями с точки зрения повышения качества, точности, производительности и экономичности механической обработки. В работах [67-73, 131, 133, 135] приведены основные технические характеристики этих станков и условия их эффективного применения в производстве. В настоящей работе представлены новые перспективные модели металлообрабатывающих станков с ЧПУ, что позволяет научно обоснованно подходить к их выбору и рациональной эксплуатации на промышленных предприятиях Украины.

#### **2.1. Высокоэффективный станок для аэрокосмической промышленности**

Горизонтально-фрезерный обрабатывающий центр HFP 1540 позволяет поднять уровень производства на новые высоты уже после первой изготовленной детали (рис. 2.1). Концептуально новый горизонтальный 5-осевой станок DOOSAN предназначен для быстрой обработки самых крупных алюминиевых изделий, которые только можно представить.

Новое оборудование HFP 1540 DOOSAN станет локомотивом для предприятий, готовых разнообразить номенклатуру выпускаемых для аэрокосмической промышленности деталей и приступить к изготовлению крупнейших узлов.

Что касается габаритов и мощности обрабатывающего центра HFP 1540 для профильной обработки, то крупногабаритные детали (до 4x1,5 м; максимум 3 000 кг) легко устанавливаются и обрабатываются благодаря впечатляющим перемещениям по осям X/Y/Z – 4200 мм / 1600 мм / 550 мм – и ускоренным перемещениям шпинделя

станка 60 м/мин. В результате, несмотря на большие размеры обрабатываемых деталей, достигается отличное время цикла.



Рисунок 2.1 – Обрабатывающий центр HFP 1540

Как правило, станки такого класса состоят из двух или трех элементов, что приводит к уменьшению прочности конструкции. Но не в случае HFP 1540: цельный корпус станка DOOSAN обеспечивает непревзойденную стабильность и жесткость обработки.

Потрясающее сочетание скоростных и мощностных характеристик станка, а также готовность данной модели к автоматизации производства, говорят сами за себя. Высокоскоростной универсальный шпиндель с частотой вращения 30 000 об/мин оснащен двигателем мощностью 75 кВт. Именно такие характеристики станка позволяют производительным удалять большие объемы материала при обработке алюминиевых изделий (рис. 2.2).

Кроме того, благодаря возможностям 5-осевой универсальной фрезерной головы, ОЦ HFP 1540 способен обрабатывать детали под различными углами, не доступными при использовании обычного горизонтального станка (рис. 2.3). А для еще большей производительности модель оснащена линейным сменщиком паллет с подводом паллет в рабочую зону станка при помощи рычагов с сервоприводом.

Высокая скорость удаления металла в модели HFP 1540 поддерживается и высокоскоростным транспортером стружки скребкового типа, с производительностью 7000 см<sup>3</sup>/мин и баком для охлаждающей жидкости емкостью 1500 литров. Опция подачи охлаждающей жидкости (70 бар) через шпиндель входит в стандартную комплектацию,

обеспечивая отличный вывод стружки, терморегуляцию процесса резания и повышает стойкость инструмента.

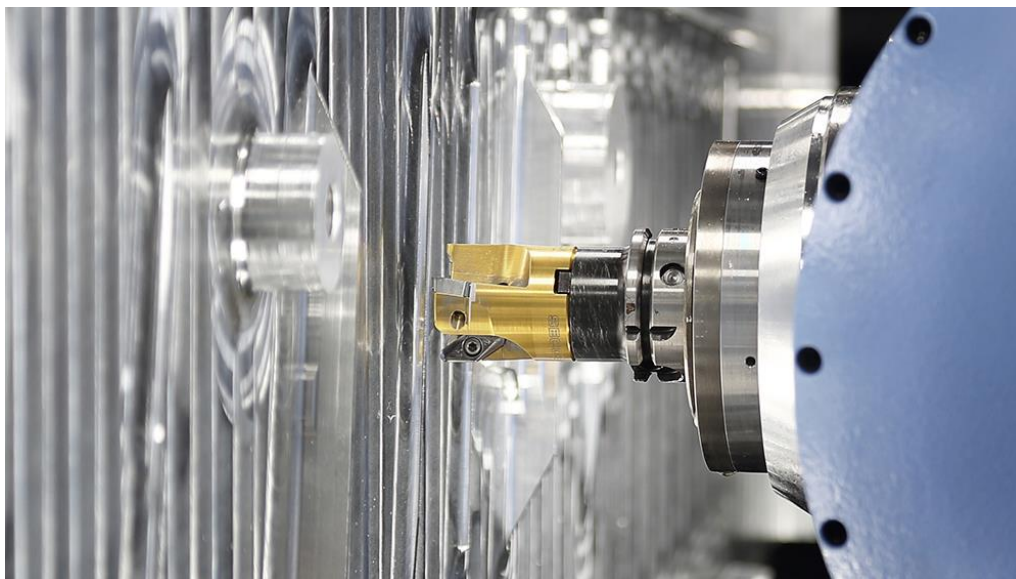


Рисунок 2.2 – Производительное удаление больших объемов материала при обработке алюминиевых изделий

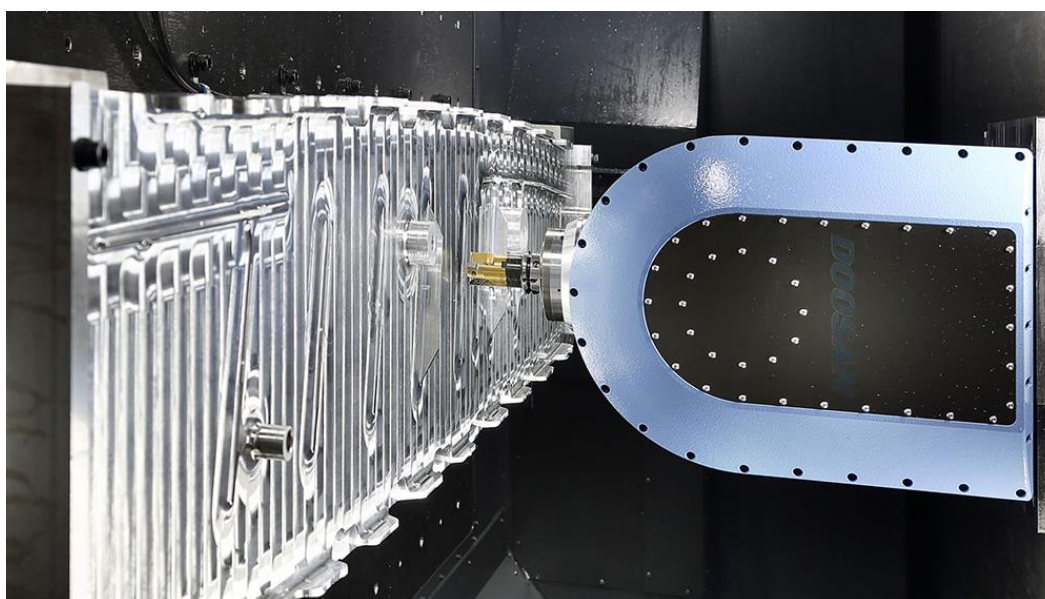


Рисунок 2.3 – Обработка проводится под различными углами

Таким образом показано, что для существенного подъема производства в аэрокосмической отрасли необходимо использовать горизонтально-фрезерный обрабатывающий центр HFP 1540 для контурной и профильной обработки изделий авиационно-космического назначения!

## 2.2. Использование оборудования DOOSAN по максимуму: важность постпроцессирования в ЧПУ



Одним из движущих факторов программ исследований и разработок компании DOOSAN, включая инвестиции в разработку постпроцессоров, является стремление сделать производственный процесс более быстрым, эффективным и легким.

Как думаете, почему траектория движения инструмента выглядит великолепно в среде САМ-системы, но после запуска цикла на 5-осевом фрезерном станке (рис. 2.4) снова и снова поступают сообщения об ошибках (или, что еще хуже, – о столкновениях)? Как и в жизни, к подобным ошибкам приводит недостаток информации. С этого момента и начинается разработка постпроцессора, позволяющая создать цельный производственный процесс от САМ до готового продукта.



Рисунок 2.4 – 5-осевой горизонтальный обрабатывающий центр DHF 8000

## От общего к частному

В 5-осевых программных комплексах единственное, что разделяет среду САМ-системы и работу на станках, это постпроцессор. Однако большинство постпроцессоров не учитывает сложное нелинейное движение, уникальное для каждого типа металлорежущего оборудования. Это приводит к непредсказуемой траектории перемещения инструмента и значительным изменениям условий резания, оставляя некачественную и неоднородную чистоту поверхности, ступеньки, повышенный износ инструмента и неточные результаты.

ESPRIT производства DP TechnologyCorp (США) – популярная САМ-система для металлорежущего оборудования с ЧПУ, позволяющая разрабатывать управляющие программы (УП) для фрезерной, токарной (токарно-фрезерной) и электроэрозионной обработки.

Сотрудничество украинского дилера DOOSAN – компании Вари-Тек – с программным продуктом ESPRIT на протяжении вот уже десяти лет позволило создать базу постпроцессоров и цифровых станков с детальной проработкой тонкостей каждой модели для комплексной точности и функциональности. Каждая конкретная модель станка DOOSAN работает в ESPRIT для максимально точной обработки (рис. 2.5).

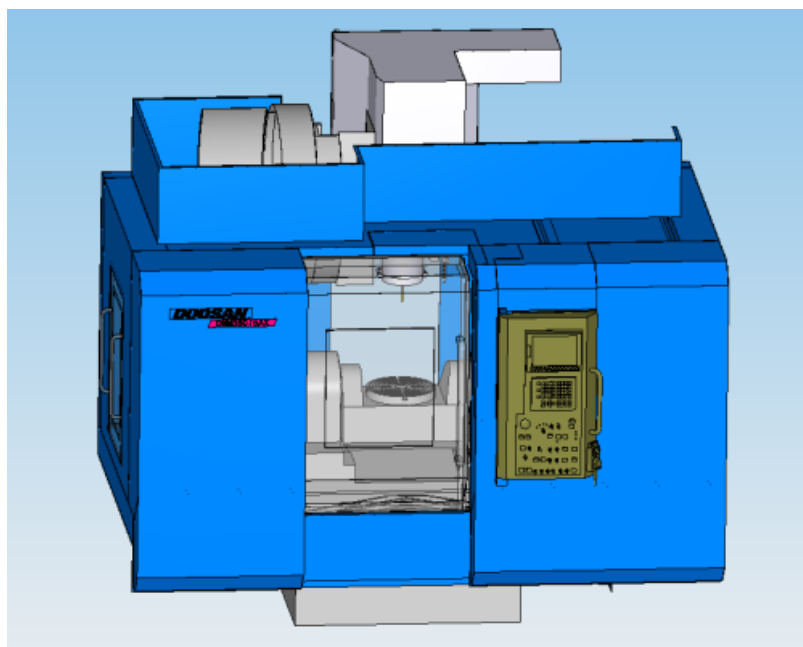


Рисунок 2.5 – САМ-система ESPRIT в работе

ESPRIT работает со всеми станками ЧПУ и предоставляет все необходимое для создания траектории, анализа, проверки на столкновения и соответствия исходной модели детали в трехмерной среде



разработки. Использование программного обеспечения ESPRIT для моделирования, проверки и последующей обработки экономит время и деньги пользователей при работе на станках DOOSAN.

### **Симуляция и верификация**

Программное обеспечение для разработки УП предоставляет необходимые опции для симуляции и проверки траектории инструмента. В ESPRIT возможно отображение всей среды обработки: стол, шпиндель, приспособление. Во время симуляции система отслеживает столкновения и проверку на зарезы. Это позволяет определить проблемные участки и исправить их, прежде чем отправлять программу на станок. Одним словом, полное моделирование циклов работы станков и смены инструмента позволяет учитывать все самые необходимые для работы данные.

Система имитирует удаление материала для безопасности и эффективности каждой запущенной строки кода. Возможность обнаружения столкновений, основанная на трехмерных CAD-моделях, обеспечивает максимальную точность. С минимальными усилиями программа позволяет добавить или изменить оснастку, а также геометрию готовой детали.

### **Мощность и возможности постпроцессирования**

Программа позволяет легко переключаться между тремя режимами: фрезерный, токарный или электроэрозия. Дальше на открытой модели детали нужно указать участки для обработки, параметры инструмента и назначить необходимый цикл обработки. Симуляция и верификация проверяют правильность траектории. Заключительным этапом является вывод УП, за который и отвечает постпроцессор.

Таким образом, постпроцессор является заключительным и наиболее важным звеном в цепи создания УП, поскольку именно он описывает правила преобразования виртуального процесса моделирования в код, понятный станку (рис. 2.6). И ни одна система, в том числе и ESPRIT, не будет эффективна без правильно настроенного и отлаженного постпроцессора.

С ESPRIT можно легко создавать и редактировать неограниченное количество циклов обработки и применять их к любому проекту (рис. 2.7).

Для ускорения процесса постпроцессирования поставляются стандартные / универсальные постпроцессоры.



Рисунок 2.6 – 5-осевой вертикальный обрабатывающий центр DNM 200/5AX

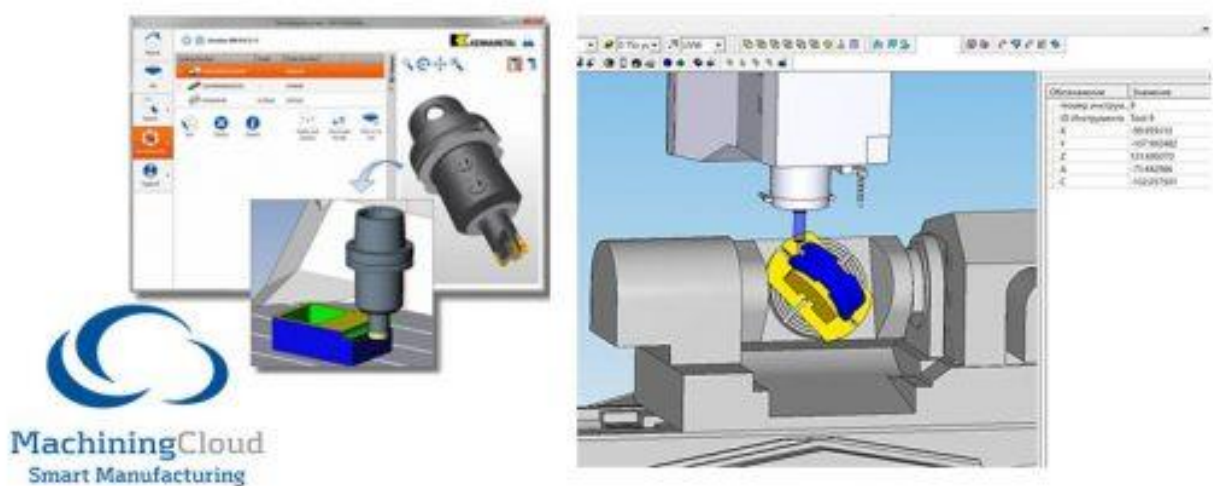


Рисунок 2.7 – CAM-система ESPRIT создает и редактирует циклы обработки

Украинские инженеры ESPRIT совместно с DOOSAN разрабатывают постпроцессоры и поставляют, при желании, вместе со станком. Однако пользователь может и сам настроить постпроцессор для своего станка. Постпроцессоры для вывода УП имеют открытую архитектуру и полную справку для самостоятельной работы. Несмотря на отсут-

ствие генератора, синтаксис файла постпроцессора и его структура относительно просты и позволяют настроить необходимый формат УП, выходя за пределы шаблонного создания постпроцессора.

ESPRIT поддерживает всю линейку станков DOOSAN, включая 3-, 4- и 5-осевые станки, мультизадачные обрабатывающие центры, станки с осью В и автоматы продольного точения.

Наличие библиотеки станков, постпроцессоров, приспособлений и режущего инструмента доступно как в самой программе, так и в облачном хранилище MachiningCloud – бесплатном сервисе, где поставщики оснастки и инструмента выкладывают модели своих продуктов с последующей возможностью использования их в ESPRIT.

### **Резюмируя**

Партнерство DOOSAN и ESPRIT позволяет сосредоточиться на изготовлении качественных деталей, а не на устранении неполадок программного обеспечения. При этом не имеет значения модель станка (рис. 2.8): ESPRIT получает все необходимые данные для их дальнейшего беспрепятственного перевода на станки DOOSAN путем правильного постпроцессора.



Рисунок 2.8 – Пример обработки на 5-осевом фрезерном обрабатывающем центре DNM 5AX

Итак, можно получить полноценную симуляцию технологического процесса обработки детали. Ошибки перемещений, столкновений и многое другое обнаруживается практически до запуска оборудования.

Если комбинация постобработки с ЧПУ, проверки G-кода и непревзойденной линейки станков DOOSAN вам подходит, обратитесь в



Представительство и Сервисный Центр DOOSAN в Украине: компанию "ВариТек" – для получения подробной информации о настройке оборудования. В результате можно достигнуть максимум эффективности от решений DOOSAN уже на данном этапе!

### 2.3. Эффективное применение современных обрабатывающих центров с ЧПУ – 8 бонусов украинским пользователям оборудования DOOSAN



- Tool Advisor
- DOOSAN Varitec



- Machining Power
- СМЭИО ГК "ВариУс"
- ESPRIT



- Machining Cloud



- Сеть ETHERNET
- Easy Operation Package

Современные обрабатывающие центры с ЧПУ визуально могут выглядеть почти так же, как и универсальное оборудование без программного управления. Поэтому, на первый взгляд, цена станков, оснащенных даже стандартными опциями автоматизации, может показаться неоправданно высокой. Но высокая производительность современного оборудования довольно быстро перекрывает все затраты на приобретение и установку при соответствующих объемах производства и грамотном использовании. Вот почему приобретение современного станка с ЧПУ – это не просто "инвестиции в более современную механику", а ввод в эксплуатацию высокотехнологичной экосистемы, включающей в себя, кроме собственно оборудования, средства автоматизации, интеграции и контроля производства. Важно лишь не ошибиться в выборе действительно современного производителя такого оборудования и обслуживающего сервисного Центра.

Автоматизированное управление станком с помощью современной системы ЧПУ позволяет не только повысить производственную гибкость, производительность и качество изделий, снижая вероятность

ошибок персонала в процессе обработки, но и постоянно совершенствовать уже отлаженные процессы, расширяя возможности оборудования без дополнительных затрат.

Улучшения, о которых далее пойдет речь, достигаются за счет внедрения новых, более современных приложений к системе Управления, которая, по сути, является промышленным исполнением современного компьютера. А это значит, что вполне реально повышать функциональность и эффективность станков, подбирая и устанавливая комплекты приложений и опций, которые предлагает своим пользователям или сам разрабатывает локальный (украинский) представитель производителя станков.

Эффект от внедрения таких разработок заметен как на уровне обслуживающего оборудование персонала, так и Топ-менеджментом промышленных предприятий. Для собственника же предприятия эффект заключается в том, что без каких-либо дополнительных инвестиций в производственные площадки, где уже работает оборудование DOOSAN/FANUC, происходит постоянное развитие предприятия, благодаря:

- улучшению условий труда обслуживающего станки персонала;
- увеличению коэффициента эффективности текущего процесса обработки за счет интерактивных подсказок от самого оборудования;
- повышению производительности операций путем простого выбора (а не расчета) оптимальных режимов обработки в специальном приложении;
- упрощению процесса выбора режущего инструмента из наличия, а также автоматизации процесса заказа с учетом информации о выпущенных новинках;
- ускорению задач по выводу станка из незначительных сбоев без обращения в Сервисный центр;
- возможности контроля над работой участка станков для всей иерархии сотрудников производства: от цеховых служб до руководства предприятия.

Ниже приведены приложения и опции, разработанные в последнее время либо компанией-производителем станков DOOSAN (Республика Корея), либо производителем инструмента и оснастки TaeguTec (Республика Корея), а также разработчиками программного обеспечения САМ-системы ESPRIT (США), и, кроме того, собственны-

ми силами программистов и сервисных инженеров компаний ИТЦ ВариУс и ВариТек (Украина) по просьбам украинских клиентов, длительное время использующих оборудование DOOSAN.

Итак, представляем незаменимых помощников в работе с оборудованием DOOSAN:

### **1. Объединение станков в процессе их установки в локальную вычислительную сеть ETHERNET**

Объединение станков, оснащенных СЧПУ, в локальную вычислительную сеть (ЛВС) либо включение их в уже существующую ЛВС может качественно повысить уровень организации производства, увеличив эффективность работы и прибыль предприятия (рис. 2.9).



Рисунок 2.9 – Повышайте уровень организации своего производства!

Современные станки компании DOOSAN оснащаются функцией подключения к сети [ETHERNET](#) с помощью встроенного адаптера, поддерживающего стандарты FastEthernet.

Опция входит в стоимость станка вместе с пусконаладочными работами, выполняемыми инженерами Сервисного центра DOOSAN в Украине. В случае необходимости инженеры СЦ могут помочь подобрать топологию сети, дать рекомендации по выбору физического канала ЛВС (Ethernet/Wi-Fi), настроить обмен управляющими программами.

## 2. Система подсказок технологу и оператору от фрезерных станков DOOSAN – EasyOperationPackage



Рисунок 2.10 – EOP – воспользуйтесь возможностью облегчить себе работу!



Эксклюзивная разработка DOOSAN, выполненная в виде удобного меню, позволит не только сократить время настройки, но и упростить общие задачи, а также снизить вероятность ошибок.

Программное обеспечение EOP (рис. 2.10) включает функции, позволяющие сократить время работы, защитить оборудование и инструмент, улучшить качество обработки и ускорить техническое обслуживание. Кроме того, с EOP легко обучать менее опытных операторов работать со станками ЧПУ, ускорив процесс обучения, как никогда ранее. Важное преимущество при создании неразрывной цепочки передачи опыта среди операторов станков.

### 3. Автоматизированный советник по выбору инструмента и режимов обработки от TaeguTec: онлайн-программа ToolAdvisor



Рисунок 2.11 – Подбирайте металлорежущий инструмент в два клика !

"Карманный" советник ToolAdvisor (рис. 2.11) разработан в помощь инженерам-технологам при выборе оптимального инструментального решения для выполнения поставленной задачи. Это удобное приложение позволяет улучшить и ускорить процесс подбора режущего инструмента в зависимости от введенных в специальную форму исходных данных (обрабатываемый материал, тип операции, тип заготовки, энергосиловые параметры станка и др.).

Советник разработан таким образом, что использовать его можно как в предварительной разработке технологических процессов, так и непосредственно на участке производства.

#### 4. Система автоматического программирования ESPRIT

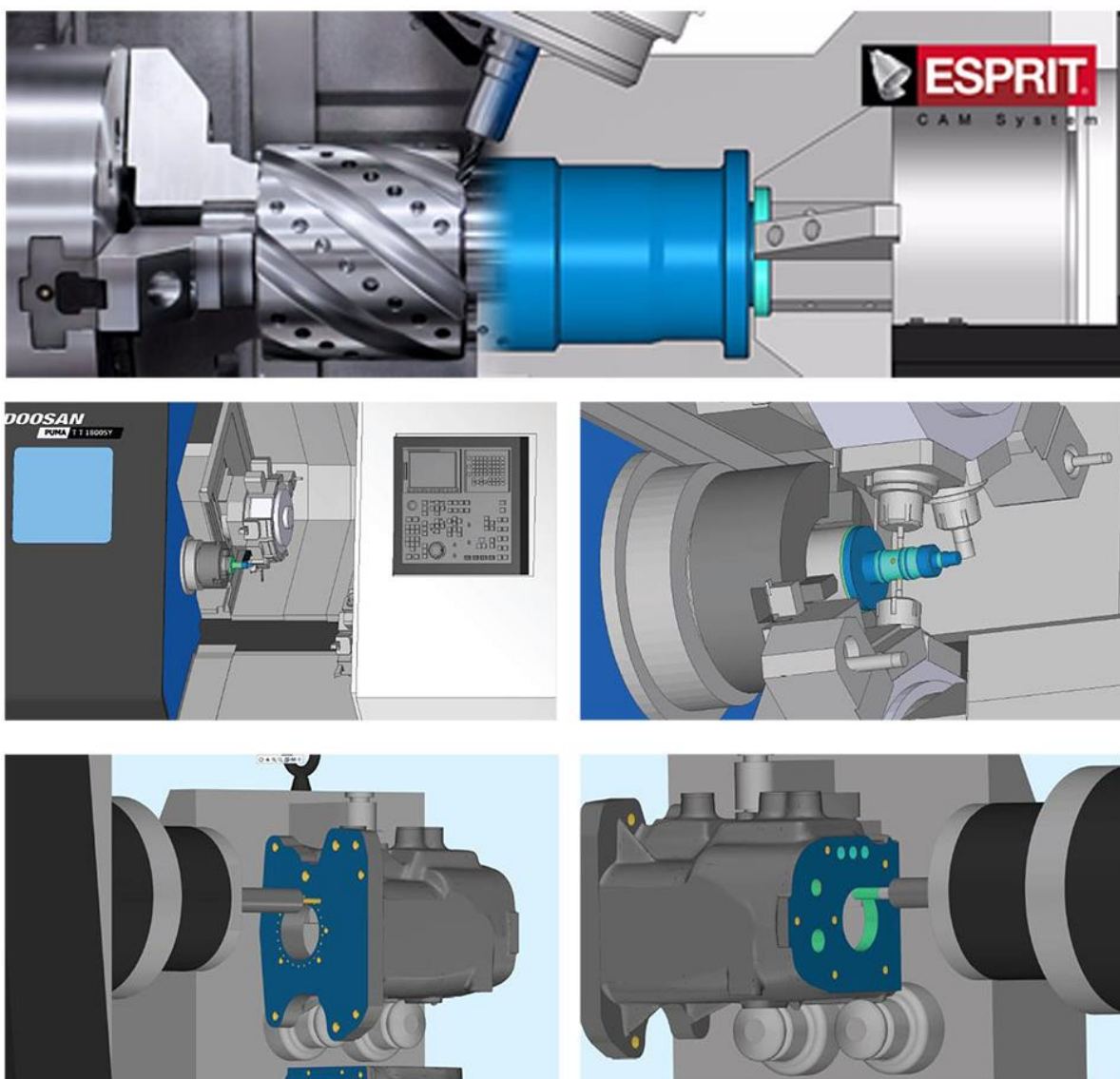


Рисунок 2.12 – Программируйте все виды механической обработки металлов!

ESPRIT® – мощная, полнофункциональная САМ-система для программирования, оптимизации и симуляции обработки на станках с ЧПУ, полностью поддерживающая производственный процесс (рис. 2.12). Средствами ESPRIT эффективно программируются все виды обработки, которые востребованы современным машиностроительным производством. Сертифицированные постпроцессоры обеспечивают получение оптимального G-кода, а программный интерфейс приложения открывает широкие возможности для автоматизации труда технолога-программиста. По желанию пользователя в стоимость станка DOOSAN может входить коммерческая (постоянная) лицензия программного обеспечения ESPRIT, позволяющая использовать базовые циклы токарной или фрезерной обработки, а также временная полная многоосевая версия и бесплатное обучение работе с комплексом в процессе пусконаладочных работ.

**5. Онлайн-библиотека TaeguTec в среде MachiningCloud: быстрый и эффективный подбор режущих инструментов и оснастки**



Рисунок 2.13 – Используйте облачные технологии для поиска наиболее подходящего режущего инструмента!

Онлайн-библиотека TaeguTec позволяет повысить производительность и обеспечить высокую точность обработки благодаря быстрой и легкой загрузке всей необходимой технической информации непосредственно в программное обеспечение рабочего места технолога-программиста (рис. 2.13). Например, при моделировании в среде САМ-системы ESPRIT. Ресурс **MachiningCloud** предоставляет обновленные данные о продукции практически для любого программного обеспечения или системы производства.

## 6. Программный помощник технологу **MachiningPower**



Рисунок 2.14 – Надежный помощник всегда под рукой!

Приложение **MachiningPower** (Расчет мощности) поможет технологу рассчитать нагрузку на станок в случае оценки принципиальной возможности применения новой стратегии обработки на существующем оборудовании (рис. 2.14). Этот простой и удобный в использова-



нии инструмент позволит оценить требуемую полезную мощность, удельный съем металла, усилия резания и необходимый крутящий момент для различных операций механической обработки металлов.

## 7. Программа DOOSAN Varitec для оперативного выяснения причины сбоя оборудования

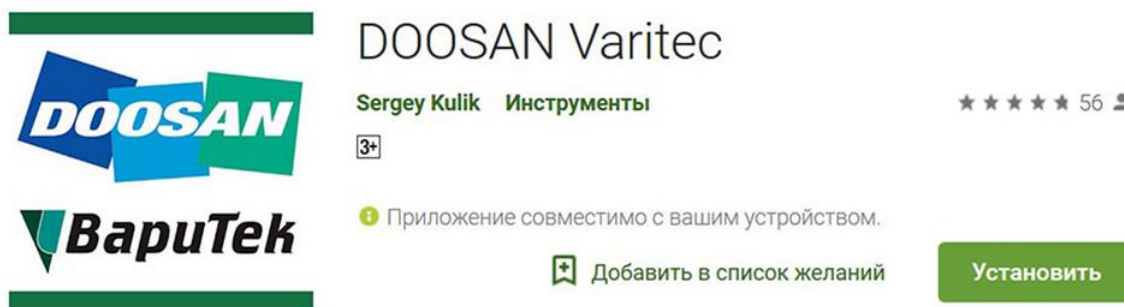


Рисунок 2.15 – Оперативно получайте справочную информацию из одного источника!

Программа **DOOSAN Varitec** позволяет специалистам любого предприятия, использующего оборудование DOOSAN, быстро и самостоятельно найти описание кода сервисного сообщения, описание G-, M- кода, получить примеры программирования и инструкции по настройке (рис. 2.15). Для своевременной и точной реакции на конкретную ситуацию обслуживающему персоналу понадобится только личный смартфон либо планшет.

Приложение устанавливается работающему с оборудованием персоналу на мобильные устройства [Android](#) инженерами Сервисного центра ВариТек в процессе пусконаладочных работ.

## 8. Контроль эффективности использования оборудования Заказчика при помощи Системы Мониторинга Эффективности Исполнения Оборудования "ГК ВариУс"

### Приложение мониторинга

#### Отчет по коэффициенту загрузки оборудования

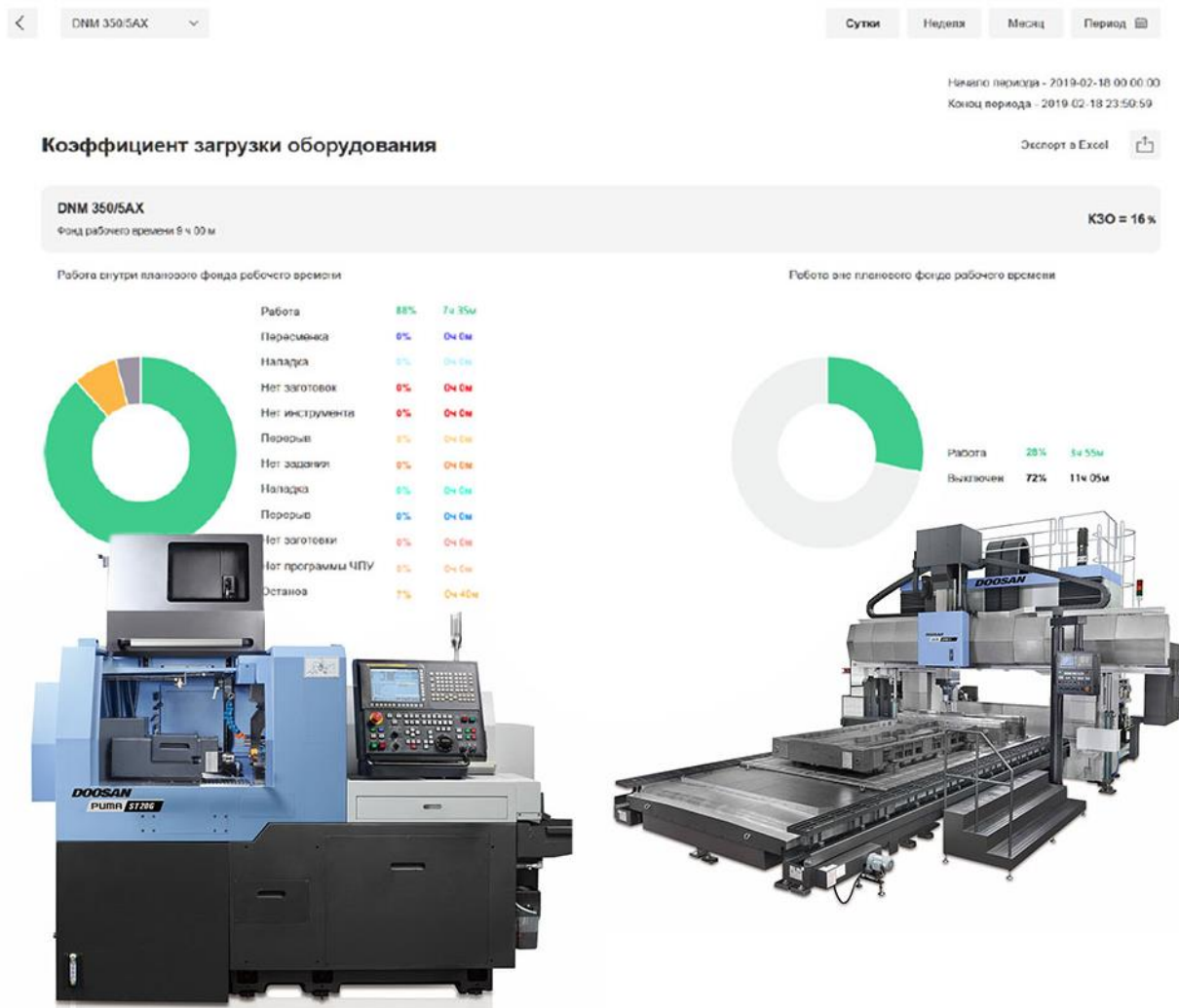


Рисунок 2.16 – Анализируйте эффективность использования и уровня загрузки станков из любой точки мира!

Программно-аппаратный комплекс мониторинга эффективности использования оборудования (ПАК СМЭИО) использует возможность объединения станков в ЛВС, накапливая и обрабатывая данные, полученные от станков, формируя аналитическую информацию о работе оборудования и персонала в разрезе времени и режимов работы оборудования, а также времени работы персонала и регистрируемых причин простоя оборудования (рис. 216).

При соответствующей настройке доступа к системе у собственника предприятия появляется возможность в реальном времени видеть работу оборудования и получать сводные отчеты даже на экране своего мобильного телефона.

## **2.4. Оборудование для 5-осевой обработки: изготавливаем сложные детали за один установ**



Рисунок 2.17 – Изготовление сложных деталей за один установ на оборудовании для 5-осевой обработки

Изготовление сложных и ответственных деталей для таких отраслей, как авиастроение, автомобилестроение, медицина и ВПК, приносит неплохую прибыль. Как правило, такие производственные планы приводят менеджмент машиностроительных предприятий к необходимости инвестирования в высокотехнологичное 5-осевое оборудование. Часто это единственный способ эффективно обрабатывать изделия сложной формы, не переключаясь между станками для выполнения различных операций технологического процесса (рис. 2.17).

Процесс выбора наиболее оптимальной модели и введение ее в эксплуатацию основывается на экономических факторах и выборе оптимальной компоновки станка.

Компания DOOSAN предлагает достаточное разнообразие в линейке 5-осевых станков, чтобы иметь возможность соответствовать требованиям каждого пользователя. Для этого проведем анализ оборудования DOOSAN с возможностью 5-осевой обработки.

## Что было до 5 осей

Чего только не придумывали в цехах механической обработки, пытаясь несколько повысить производительность сложных изделий. Например, решением было дооснащение 3-осевого фрезерного станка поворотным столом с задней бабкой или наклонно-поворотным столом. Таким образом оператору предоставлялся доступ к большему количеству поверхностей детали. Этот постепенный переход к 5-осевым возможностям, очевидно, сопровождался некоторыми неудобствами, такими как уменьшение максимального веса заготовки, ограничение длины инструмента (поскольку наклонно-поворотный стол сокращал перемещения), накопление погрешности от сложенных перемещений осей и т.п. В конечном итоге для эффективной обработки изделий сложной формы пришло время внедрения серийных, специализированных под решение самых разных задач, моделей от DOOSAN.

### **Серия DNM/VC/5AX: базовая модель для отличного старта**

Серия DNM 200/5AX – это современное компактное решение в сравнении со стандартным 3-осевым вертикальным обрабатывающим центром, дооснащенным наклонно-поворотным столом (рис. 2.18).



Рисунок 2.18 – Вертикально-фрезерный 5-координатный станок DOOSAN серии DNM 200/5AX



Данная модель разработана на базе обрабатывающего центра DNM с привычными показателями надежности и стабильности, с прямым приводом 12 000 об/мин и шпинделем мощностью 18,5 кВт.

Преимуществом 5-осевой модели DNM является комплектация встроенным заводским поворотным столом Ø 200 мм, который был специально разработан для данного станка. В результате исключены ограничения по вылету инструмента. Конструкция предлагает достаточные перемещения по осям, что позволяет применять режущий инструмент стандартной длины для обработки ваших деталей. При этом зона обработки поворотного стола может быть задействована по максимуму, включая боковые участки.

Серия DNM/5AX поставляется со стойкой ЧПУ FANUC 0i-MF для работы с пятью осями.

Станок VC630/5AX предлагает комплексные решения для силовой и одновременно скоростной обработки сложных изделий из различных металлов. Характеристики модели (стол Ø 630 мм, шпиндель мощностью 22 кВт при 12 000 об/мин) удовлетворяют самые сложные запросы и требования к обработке. Емкость магазина на 40 инструментов (опционально – 60/81/101/121) обеспечивает еще большую гибкость в сравнении с большинством аналогов ближайших конкурентов.

### **Серия DVF: станки для работы во всех плоскостях**

Требуется еще больше многозадачности? Серия DVF полностью укомплектована для работы с разнообразными 5-сторонними и одновременно 5-осевыми операциями (рис. 2.19).

Стол станка теперь представляет собой интегрированный 5-осевой стол консольного типа, позволяющий обрабатывать детали под углами, недоступными для серии DNM.

В настоящее время предлагается стол диаметром 500 мм (модель DVF 5000). Далее запланирован запуск моделей серии DVF с габаритами столов: Ø 650 мм для DVF 6500 и Ø 800 мм для DVF 8000 (рис. 2.20). Такой размерный ряд позволяет выбрать комплектацию станка, максимально подходящую для ваших производственных задач.

Обрабатывающий центр DVF 5000 может оснащаться встроенным мотор-шпинделем 18,5/22 кВт (постоянный/кратковременный) со скоростью 18 000 об/мин, что позволяет производительно снимать значительные массивы металла. В стандартную комплектацию входит магазин на 30 инструментов. Опционально доступно увеличить ем-

кость магазина до 40/60/90/120 позиций при обработке сложных деталей без необходимости каждый раз переоснащать станок.



Рисунок 2.19 – Компактные вертикальные обрабатывающие центры DOOSAN серии DVF



Рисунок 2.20 – 5-осевой вертикальный обрабатывающий центр DVF 8000

Еще одним преимуществом DVF 5000 является дополнительное устройство автоматической смены паллет, которое обеспечивает значительные возможности для автоматизации обработки. Его можно заказать с различным количеством паллет: 4/6/8/10/16 и т. д.

### **Серия VCF: многофункциональность и производительность**

VCF 850LSR – большой многофункциональный вертикальный обрабатывающий центр, оснащенный вращающейся шпиндельной головкой по В-оси с конусом BT40, скоростью вращения шпинделя 18 000 об./мин и перемещением по оси X 3000 мм (рис. 2.21).

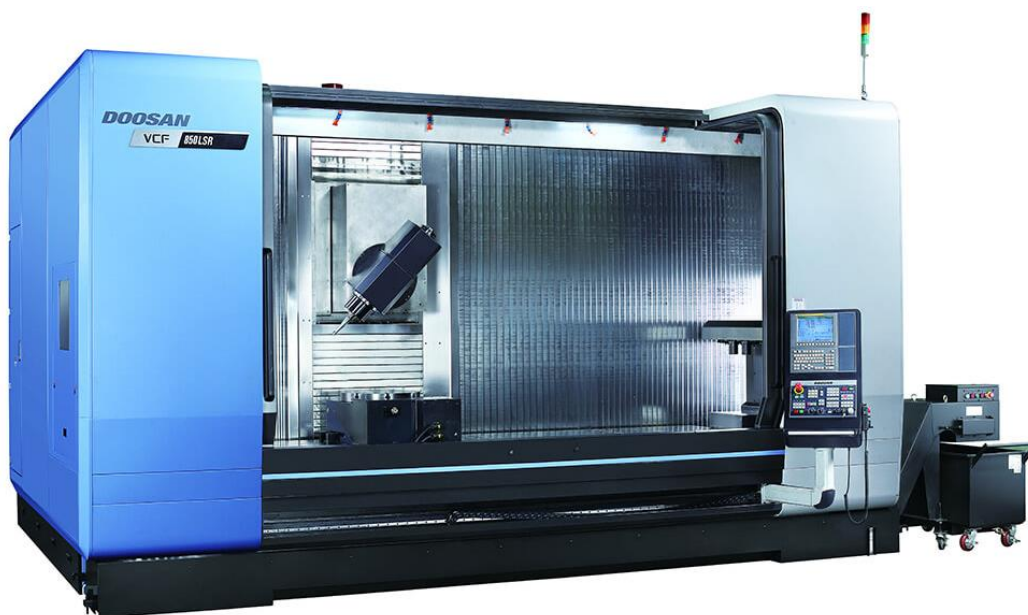


Рисунок 2.21 – Многофункциональный вертикальный обрабатывающий центр VCF 850LSR

На этом станке предлагается два варианта выбора типа оси С:

- установленный поворотный стол Ø 500 мм;
- встроенный поворотный стол Ø 800 мм.

Со столом длиной 3500 мм и стандартной перегородкой по центру (которая легко снимается для особо длинных заготовок) можно создать несколько рабочих зон и удерживать шпиндель, обрабатывая материал в одной зоне, в то время как в другой зоне устанавливается другая деталь. Например, может быть зона, оборудованная столом с осью С для 5-осевой обработки, и еще одна область для работы с 3 – 4 осями. Таким образом обеспечивается максимально полезное время работы оборудования.

Серия VCF – отличный выбор при поиске гибкой модели станка для 5-осевой обработки изделий широкого спектра.

### **DHF 8000: для действительно больших деталей**

Пятиосевые станки DOOSAN – это не только вертикальные обрабатывающие центры с конусом шпинделя ISO #40. Представляем модель DHF 8000 – 5-осевой станок с наклонным шпинделем и конусом ISO #50, изготовленный на базе высокопроизводительных горизонтальных обрабатывающих центров NHP (рис. 2.22).

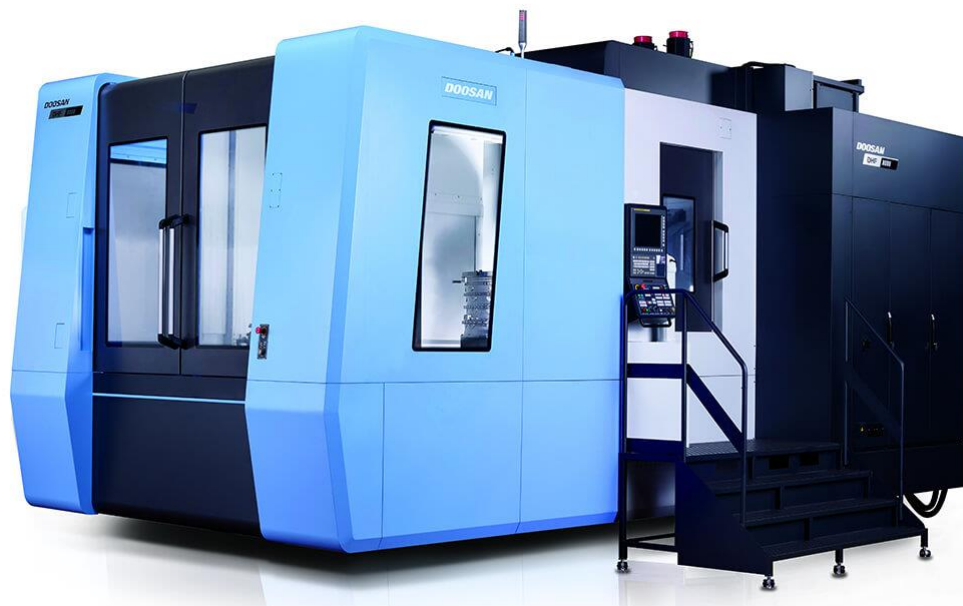


Рисунок 2.22 – 5-осевой горизонтальный центр DHF 8000 с высокой жесткостью конструкции станка

В дополнение к полной оси В ( $360^\circ$  и шаг  $0,001^\circ$ ) в паллете 800 мм, ось А в шпинделе имеет диапазон наклона от  $+60^\circ$  до  $-100^\circ$ , обеспечивая 5-координатную обработку на горизонтально-фрезерном станке. Двойные шарико-винтовые пары по осям Y и Z придают станку еще большую жесткость. Шпиндель со скоростью вращения 6000 об/мин обеспечивает надежную обработку различных профильных деталей из труднообрабатываемых материалов. Линейные и поворотные оптические линейки по всем осям входят в стандартную комплектацию!

### **HFP 1540: назначение – авиакосмическая промышленность**

И последнее предложение в рамках "DOOSAN 5-axis" – горизонтальный 5-осевой станок HFP 1540 для контурной габаритной и профильной обработки (рис. 2.1). В настоящее время это лучшее решение для высокоскоростной обработки таких ответственных узлов авиакосмической промышленности, как ребро жесткости, консоль крыла и др.

Цельная конструкция корпуса вмещает в себе все оси XYZ, оптимизируя синхронность быстрых перемещений со скоростью 60 м/мин.



Горизонтально-фрезерный обрабатывающий центр укомплектован большим съемным столом 4000x1500 мм с сервоуправляемым сменщиком столов для повышенной производительности.

Благодаря универсальному шпинделю HSK63A со скоростью вращения 30 000 об/мин, модель нового поколения HFP 1540 получила дополнительные оси A и C и заняла почетное место в списке 5-осевого оборудования DOOSAN, ломая все шаблоны.

Так выглядит 5-осевая линейка оборудования компании DOOSAN: каждый станок, при грамотном подходе, станет идеальным помощником в успешном и прибыльном бизнесе. А с выбором соответствующей модели и технологии обработки, включая просчет циклограммы выпуска детали, поможет Официальный представитель в Украине – компания ВариТек.

### **С датчиками Renishaw станки DOOSAN способны на большее!**

Приборы для контактного измерения и размерной настройки инструментов экономят ресурсы металлообрабатывающих предприятий (рис. 2.23).



Рисунок 2.23 – Применение пробора Renishaw для контактного измерения параметров обработанного отверстия

Крепкие деловые отношения между компаниями Renishaw и DOOSAN начались еще 8 лет назад. Цель данного сотрудничества – выход за рамки стандартной продукции Renishaw на оборудовании DOOSAN и смещение акцентов:

- продвижение встроенных функций для датчиков измерения, устанавливаемых в шпиндель, и наладки инструмента;

- разработка наиболее подходящего продукта Renishaw для соответствующего оборудования DOOSAN и его практическое применение.

В настоящее время стандартная комплектация большинства фрезерных центров DOOSAN предусматривает наличие датчиков Renishaw. При этом металлорежущее оборудование уже оснащено встроенным программным обеспечением Renishaw для обмера и наладки инструмента. Проводя аналогию с системой безопасности здания, это равносильно заранее продуманной и реализованной инфраструктуре, когда проводка уже вмонтирована в стены, мониторы установлены, а вызов экстренных служб настроен автоматически. Другими словами – непосредственная экономия времени и расходов заказчика.

### **Устройство автоматической размерной привязки инструмента**



Рисунок 2.24 – Устройство для автоматической размерной привязки инструмента

На оборудовании DOOSAN устанавливаются устройства для автоматической размерной привязки инструмента (как сенсорные, так и бесконтактные, рис. 2.24). Это позволяет с легкостью выполнять такие функции, как автоматическая наладка инструмента на станке, контроль неисправного инструмента или его износа во время обработки.

#### **Измерительный датчик в шпинделе**

Измерительный датчик, устанавливаемый в шпиндель, в зависимости от требуемой точности предлагается в двух вариантах (рис. 2.25). Станки DOOSAN оснащаются как оптическими датчиками, так и датчиками с радиоприемниками, и могут использовать высоко-

точные системы обмера детали в шпинделе Renishaw. Это позволяет настраивать и измерять деталь непосредственно в рабочей зоне станка, а также получать абсолютно точные координаты и позиции.

Кроме того, прибор может регистрировать возможные проблемы, такие как тепловое расширение, деформация детали или инструмента.



Рисунок 2.25 – Измерительный датчик, устанавливаемый в шпиндель

### **Специальное предложение DOOSAN**

Половина технических средств бренда Renishaw установлена на некоторых станках DOOSAN, включая:

Фрезерные станки с возможностью обмера деталей:

- вертикальные обрабатывающие центры серии DNM;
- горизонтальный обрабатывающий центр NHP 4000.

Токарные станки с устройством автоматической размерной привязки инструмента:

- горизонтальные токарные центры серии Lynx;
- многофункциональные токарно-фрезерные центры серии PUMA SMX2600ST.

Каждому датчику и устройству привязки инструментов Renishaw требуется приемник OMI или RMI, который устанавливается рядом с рабочей зоной станка. При этом на металлорежущем оборудовании DOOSAN данный приемник (предварительно подключенный к электрощиту) оптически или посредством радиосвязи взаимодействует с датчиком или устройством привязки инструмента.

**Ощутимый бонус от Renishaw:** если у вас есть и устройство привязки, и система обмера, вам не потребуется два приемника. Один приемник может управлять несколькими устройствами.

Обладателям 5-координатного оборудования важно знать, что 5-осевые станки DOOSAN оснащены собственной программой калибровки DOOSAN IKS. Данная система калибровки, специально разработанная для многоосевых станков с поворотными столами, контролирует ошибки точек поворота и может автоматически устанавливать смещения в нескольких плоскостях и проверять точность каждой оси. Кроме того, к 5-осевым станкам DOOSAN опционально поставляются устройства Renishaw для сферической калибровки.

### **Готовьтесь к мгновенному росту производительности!**

В дополнение к выбору подходящего для конкретной модели станка устройства Renishaw, компании DOOSAN и Renishaw работали в тесном контакте, чтобы ускорить цикл обмера. Так была оптимизирована скорость обмера при сохранении точности измерений. В результате, некоторые циклы обмера были ускорены на 60 %.

## **2.5. Удваиваем производство с новыми двухшпindelными токарными станками PUMA!**

### **Удваиваем ставки?**

Представляем новые модели PUMA TT1300SYU (патрон 135 и 170 мм) и PUMA TT2100SYU (патрон 210 и 255 мм) – двухшпindelные горизонтальные токарные центры с двумя револьверными головами по осям Y, повышающими производительность за счет оптимизации процесса обработки (рис. 2.26).



Рисунок 2.26 – Двухшпindelные горизонтальные токарные центры с двумя револьверными головами по осям Y

Данные станки идеально подходят как для крупных многоотраслевых промышленных и автомобильных рынков, так и для универсальных цехов, желающих значительно превзойти показатели окупаемости одношпиндельных станков с одной револьверной головой.

**Больше инструмента и возможностей обработки на той же площади**

Благодаря удвоенному функционалу данные модели PUMA TT обеспечивают гибкость, ограниченную только вашим воображением. Токарные центры оснащены правым и левым шпинделями мощностью до 25 кВт с угловой скоростью до 6000 об./мин и максимальным крутящим моментом 225 Нм.



Рисунок 2.27 – Конструкция рабочей части станка

Револьверные головки на 12 станций и 24 позиции обеспечивают доступность 48 единиц инструмента. Неплохие стартовые позиции? Не говоря уже о вращающемся инструменте на обеих револьверных головках для полноценного фрезерования. Такая конструкция дает оператору максимальную гибкость при настройке сложных параметров или при необходимости использования избыточных инструментов – для управления сроком его службы (рис. 2.27).

Двойная ось Y на верхней и нижней револьверных головках позволяет проводить обработку вне оси вращения детали. При этом выполнять параллельную обработку деталей на каждой револьверной головке. Дополнительные возможности PUMA TT1300SYU и PUMA TT2100SYU не требуют увеличения габаритов станка. Обе модели занимают ту же монтажную площадь, что и версии с одной револьверной головкой. А это значит, что вы можете значительно увеличить объем производства без перепланировки цеха.

Новые модели также оснащены дополнительными зонами термокомпенсации – их теперь на две больше, чем в предыдущих версиях. "Пассивная" конструкция станков сменилась активным дизайном: чем больше зон контролируется, тем выше точность при более длительных производственных циклах.

### **Все для непрерывной обработки**

Каждая из моделей PUMA TT1300SYU и PUMA TT2100SYU укомплектована Набором Инструментальной Оправки, который включает шесть держателей для приводного инструмента (по три на каждую револьверную голову) и девять резцедержателей для каждой револьверной головы. Остается только установить требуемые пластины и сверла – и станок готов к работе! Стандартный пакет автоматизации содержит улавливатель деталей на левом главном шпинделе и устройство выгрузки деталей с конвейерной системой на правом контр-шпинделе. Эти простые функции автоматизации идеально подходят для токарной обработки с подачей прутка.

### **А как насчет альтернативы "швейцарцам"?**

Если вы рассматриваете возможность покупки токарного станка швейцарского типа для запуска в производство небольших (150 мм и менее) круглых деталей, модель PUMA TT1300SYU (рис. 2.28) может стать экономически выгодной альтернативой. Станки швейцарского типа требуют сверхвысокой серийности. Время технологического перехода на "швейцарце" для очередного установа обычно занимает гораздо больше времени.

Альтернатива от PUMA уменьшает количество переходов и позволяет экономически эффективно изготавливать меньшие партии. Кроме того, благодаря гибким 24-позиционным индивидуальным револьверным головкам – с серией PUMA TT у вас гораздо больше универсальности.





Рисунок 2.28 – Токарный станок PUMA TT1300SY (патрон 135 и 170 мм)

### **Будьте на чеку**

Возможно ли увеличить объем производства при меньших затратах? Конечно! Именно для этого и предназначено высокопроизводительное оборудование DOOSAN. С любой из представленных моделей PUMA TT обработка деталей потребует меньшего количества настроек и времени от оператора.

## **2.6. Самый популярный токарный центр DOOSAN LYNX 2100 расширяет свои возможности!**



Рисунок 2.29 – Обновленная версия LYNX с расширенным функционалом

Компактный станок серии LYNX является самым востребованным высокопроизводительным токарным центром продольного точения на рынке из линейки экономичных станков DOOSAN (рис. 2.29). Во всем мире продано уже 30 тысяч единиц оборудования данной серии благодаря многочисленным техническим преимуществам перед "одноклассниками" от других производителей. Но инженеры компании DOOSAN не планируют останавливаться на достигнутом. Учитывая пожелания клиентов, DOOSAN создал третье поколение *модельного ряда Lynx* с расширенными функциональными возможностями. Результатом стала серия LYNX 2100.

Обновленная версия сохранила лучшие характеристики предыдущих поколений токарных центров для производительной обработки: компактность и превосходное соотношение цены и качества. Набор энергосиловых и кинематических характеристик пополнился технологическими решениями, которым просто нет равных на современном рынке металлорежущего оборудования. Результат: повышенная жесткость конструкции и высочайшая производственная мощность.

Расширяете производство и запланировали переход на высокотехнологичное оборудование? Или, возможно, ваш бюджет рассчитан только на подержанные станки с числовым управлением? Не спешите с решением и обратите внимание на данный токарный центр от компании DOOSAN. В этой статье мы расскажем, почему обновленная версия и без того фантастической "кошачьей линейки" (имеется ввиду символ компании – голова Пумы) может стать лучшей инвестицией.

### **Новинки и улучшения в конструкции**

Имея наибольшую в своем классе рабочую зону, серия LYNX 2100 также укомплектована более широкими направляющими для осей X, Z и задней бабки. К тому же оси X и Z оснащены роликовыми направляющими качения, что обеспечивает повышенную жесткость конструкции и высокую скорость обработки одновременно. Новая программируемая задняя бабка, управляемая с помощью устройства ЧПУ, и револьверная голова с надежным сервоприводом позволяют значительно ускорить настройку и сократить время обработки (рис. 2.30).

Кроме того, улучшена конструкция защиты направляющих, которая упрощает удаление стружки и сокращает температурные деформации станка. Серия LYNX 2100 может комплектоваться правосторонним либо задним конвейером стружки.





Рисунок 2.30 – Возможна обработка с перехватом детали

Экологически безопасная система консистентной смазки для роликовых направляющих заменила прежний аналог на масляной основе. Такое решение обеспечивает чистоту охлаждающей жидкости и снижает затраты на техническое обслуживание на 75 %.

Стойка управления FANUC теперь включают в себя пакет EasyOperation от DOOSAN, максимально упрощающий выполнение повседневных задач на станке. Отображение позиции инструмента и выбранной оси перемещения помогает в настройке и отлично подходит для операторов, которые выполняют несколько производственных заданий в течение дня. Эти и другие конструктивные улучшения третьего поколения скомпонованы аналогично более ранним версиям станка, поэтому габариты LYNX 2100 не изменились. Он по-прежнему идеально впишется даже в цех с дефицитом пространства.

### **Сила и скорость**

Мощный (15 кВт) двигатель главного шпинделя обеспечивает широкие возможности для всех необходимых токарных операций. В том числе, для прецизионного точения без усилий – со скоростью вращения шпинделя до 6000 об/мин с размерами патрона от 170 мм до 210 мм. Наличие опционального вспомогательного шпинделя со скоростью вращения 6000 об/мин позволяет выполнять обработку с перехватом детали и сокращать количество технологических операций. Кроме того, для оптимизации возможностей станка добавлена полноценная ось C с дискретностью поворота 0,001°.

Сложно рассказать обо всех моделях и вариантах серии LYNX. Поэтому рассмотрим две самые популярные конфигурации.

### **Функция фрезерования**

Модель LYNX 2100M (с функцией фрезерования) предлагает удобство, точность и производительность, которые обеспечивает обработка с одним установом. Она оснащена 12-позиционной револьверной головкой DOOSAN BMT 45P и демонстрирует превосходные характеристики при фрезеровании. В револьвере используется система воздушного/масляного охлаждения, которая эффективно сокращает тепловое воздействие.

По словам Шейна Ричардса (ShaneRichards), заместителя генерального директора DOOSAN, этот прочный, компактный и мощный станок идеально подходит для обработки клапанов, валов, зубчатых колес, фланцев, различных корпусов, болтов и других изделий с максимальным диаметром точения 350 мм и длиной до 550 мм.

### **Новые возможности с третьей осью**

Весьма популярная модель LYNX 2100LSYB укомплектована 8-дюймовым патроном, контршпинделем и функцией фрезерования с полноценной осью Y. Для более быстрой настройки оборудования данная версия может быть укомплектована интерфейсом для устройства подачи прутка, улавливателем деталей и устройством Renishaw для автоматической размерной привязки инструмента (рис. 2.31).



Рисунок 2.31 – Компактный горизонтальный токарный центр LYNX 2100

Благодаря такому функционалу можно значительно сэкономить производственное время, сократить трудозатраты и получить высоко-точные готовые детали с непревзойденной производительностью! Ведь на одном таком станке возможно выполнять такие операции, как фрезерная обработка карманов, сверление и нарезание резьбы вне оси детали. Недорогой способ увеличения производительности до 25 % за счет новых возможностей станка.

Если очень коротко, то горизонтальные токарные центры серии LYNX 2100 с расширенными функциональными возможностями объединяют в себе компактность, универсальность и чрезвычайную производительность при доступной цене оборудования. Эти небольшие станки готовы выполнять для вас серьезную работу!

Компания DOOSAN MACHINE TOOLS CO., LTD (Республика Корея) является одним из пяти ведущих производителей станков в мире. Компания имеет огромный опыт в области производства металлообрабатывающего оборудования, а ее деятельность основывается на традиции превосходного качества продукции.

Штат DOOSAN MACHINE TOOLS CO насчитывает 1530 человек, из которых 438 – отдел R&D (рис. 2.32). Производственные мощности DOOSAN MACHINE TOOLS CO (семь заводов в Республике Корея): **16 800** станков в год.



Рисунок 2.32 – Сотрудники компании DOOSAN MACHINE TOOLS CO

Лучшее оборудование может быть создано на базе лучших технологий. Вот почему компания DOOSAN MACHINE TOOLS CO всегда делает все возможное для внедрения современных технологий в каждый свой продукт, начиная с высокоточных обрабатывающих центров и заканчивая сложными производственными комплексами.

Производственная программа DOOSAN – это целый мир токарных и фрезерных обрабатывающих центров различной степени сложности для решения практически любых технологических задач (рис. 2.33):

1. Многоосевые токарные и токарно-фрезерные станки с ЧПУ.
2. Прутковые автоматы.
3. Вертикальные и горизонтальные обрабатывающие центры.
4. Станки для обработки колесных дисков.
5. Сверлильно-расточные станки.
6. Портальные обрабатывающие центры для 5-сторонней обработки крупногабаритных деталей.



Рисунок 2.33 – Станки с ЧПУ компании DOOSAN MACHINE TOOLS CO

Продукция DOOSAN – это также уникальные решения для автоматизации сложных производственных процессов, включая оснастку, разработанную специально для обработки необходимой детали Заказчика, выбор оптимального инструмента и технологии обработки с целью минимизации затрат на производство.

Компания ВариТек – уникальное предприятие технологического сервиса в области металлообработки с собственным инженерным штатом высококлассных технологов, программистов и инженеров-наладчиков. Свой оперативный склад оборудования (не менее 15 станков с ЧПУ в г. Днепр), запасных частей и режущего инструмента в Украине, а также налаженная логистика поставок исключают длительные простои оборудования, что избавляет наших Заказчиков от производственных потерь.





Компания **ВариТек** предлагает широкий спектр современного сертифицированного металлообрабатывающего оборудования для машиностроительных и металлургических предприятий, включая обеспечение инструментом и технологический сервис.

Вместе с поставкой станков ВариТек выполняет обслуживание оборудования в гарантийный и послегарантийный период и обеспечивает полный инжиниринг, который включает:

1. Разработку технологии производства, начиная от чертежа детали Клиента.
2. Совместную работу технологов предприятия-заказчика с технологами и программистами компании ВариТек для правильного выбора оборудования.
3. Выбор или разработку оснастки, необходимой для выполнения задачи.
4. Подбор и комплектацию производства эффективным инструментом. Отработку режимов резания в соответствии с планируемой программой выпуска.
5. Поставку CAD/CAM-программ и необходимых постпроцессоров. Обучение операторов и программистов.
6. Сопровождение технологического процесса во время и после ввода станков в эксплуатацию.



Важным преимуществом компании ВариТек является наличие собственного лицензированного Сервисного Центра – лучшего во всей Украине! Его основная задача – поддержание в рабочем состоянии и увеличение срока безотказной работы оборудования DOOSAN.

Квалификация наших наладчиков и работа с инструментами высокого качества позволяют проводить сложные и трудоемкие пусконаладочные и ремонтные работы в сжатые сроки и с высоким качеством. Во время пусконаладочных работ инженеры Сервисного Центра проводят обучение персонала Заказчика по вопросам правильной эксплуатации и своевременного технического обслуживания станков DOOSAN.



Руководитель Инженерно-технического центра группы компаний "ВариУс", кандидат технических наук Жовтобрюх В. А. (слева)

Высокий уровень технических знаний наших инженеров обеспечивается накопленным опытом в ходе регулярного обучения и тренингов, а также консультаций с ведущими специалистами DOOSAN.

Итак, выбирая металлорежущее оборудование, почему стоит доверить весь процесс компании ВариТек?

1. Лучшее техническое обслуживание силами собственного Сервисного Центра (9 сервис-инженеров) – 4 бригады одновременно обеспечивают сервис в течение 24 часов в любой точке Украины.

2. Поставка уникальных запчастей из Германии в течение 3–4 рабочих дней.

3. Склад оборудования и запчастей в г. Днепр.

4. Оснащение специальным режущим инструментом. Поставка программного обеспечения (CAM-система ESPRIT, постпроцессор).

5. Обучение работе на станках с ЧПУ.

6. Сдача оборудования на тестовой детали Заказчика.

7. Специальные условия финансирования.

Предлагая лучшие технологические решения, компания ВариТек зарекомендовала себя на украинском рынке как предприятие, которое берется за сложнейшие задачи в области металлообработки и всегда выполняет взятые на себя обязательства. Поэтому оборудование, оснастка, инструмент и режимы будут подобраны для каждого проекта таким образом, чтобы обеспечить максимальную программу выпуска деталей при минимальных затратах.



Офис компании





Обучающий центр



Выставочный зал оборудования DOOSAN





Команда Сервисного Центра

В настоящее время специалисты компании ВариТек реализовали более 230 комплексных технологических проектов "под ключ", в рамках которых машиностроительным предприятиям Украины поставлено более 450 единиц оборудования с ЧПУ различной степени сложности.

**Оборудование + инструмент + технология + CAD/CAM + обучение + первоклассный сервис: от одной компании!**

## Выводы

Представленные новые модели современных металлообрабатывающих станков с ЧПУ типа "обрабатывающий центр" открывают широкие перспективы их практического использования на предприятиях Украины, в особенности в аэрокосмической промышленности. Показана эффективность постпроцессирования в системах ЧПУ с применением программного продукта ESPRIT. Даны практические рекомендации по работе с металлообрабатывающими станками с ЧПУ производства компании DOOSAN. Приведены характеристики металлообрабатывающего оборудования для 5-осевой обработки при изготовлении сложных деталей за один установ.

### **Раздел 3**

## **Теоретическое обоснование основных направлений уменьшения энергоемкости и повышения качества, точности и производительности механической обработки**

Современный уровень развития машиностроительного производства открывает новые технологические возможности изготовления конкурентоспособной машиностроительной продукции и выхода на мировые рынки. Особенно это касается финишных операций механической обработки, наиболее ответственных за окончательное формирование параметров точности и качества изготавливаемых изделий. Однако эти операции достаточно трудоемкие и резко снижают эффективность производства. Поэтому совершенствование финишных операций механической обработки является важной и актуальной задачей. Перспективным направлением решения этой задачи является применение режущих инструментов с износостойкими покрытиями, а также инструментов, изготовленных из инструментальных материалов с повышенными физико-механическими свойствами, например, синтетических сверхтвердых материалов. Вместе с тем, высокие потенциальные возможности указанных инструментов на практике используются не полностью. Это не позволяет в конечном итоге произвести научно обоснованный выбор рациональных методов и условий обработки, обеспечивающих снижение энергоемкости и повышение точности и качества обрабатываемых поверхностей при одновременном увеличении производительности. Поэтому данная работа направлена на решение актуальной научно-практической задачи повышения эффективности процессов финишной механической обработки и обеспечения научно обоснованного выбора наилучших вариантов обработки.

Решение задач повышения точности и качества обрабатываемых поверхностей неразрывно связано с проблемой оптимизации параметров обработки, создания глубоких математических моделей различных методов резания лезвийными и абразивными инструментами. В настоящее время накоплен значительный опыт решения оптимизационных задач в технологии машиностроения [108, 110, 147, 193]. Однако полу-

ченые решения разнородные, фактически отсутствуют обобщенные уравнения и зависимости, описывающие целевые функции (параметры точности и качества обработки) и технологические ограничения. Это сужает возможности оптимального проектирования технологических процессов. Поэтому важно с единых позиций провести оптимизацию параметров лезвийной и абразивной обработки и получить оптимальные решения, разработать методики расчета оптимальных параметров режимов резания и других условий обработки, а также разработать практические рекомендации по выявлению и реализации новых резервов обработки. Такой подход позволит научно обоснованно подойти к раскрытию (уточнению) физической сущности процессов обработки и установлению их технологических возможностей с целью снижения энергоемкости, повышения качества, точности и производительности обработки, теоретического обобщения основных результатов обработки, достигнутых различными методами финишной обработки.

### 3.1. Аналитическое описание и анализ энергоемкости обработки при шлифовании

Как известно, шлифование является наиболее эффективным методом окончательной механической обработки, обеспечивающим высокие показатели точности и шероховатости [63, 89, 147, 245]. Вместе с тем, достижение этих показателей характеризуется относительно высокой трудоемкостью обработки. Поэтому вопросы повышения производительности обработки на финишных операциях шлифования представляются весьма актуальными. Для их решения важно первоначально рассмотреть схему шлифования прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга с постоянной скоростью  $V_{рез}$  (рис. 3.1) [144]. Тангенциальную и радиальную оставляющие силы резания  $P_z$  и  $P_y$  следует представить в виде:

$$P_z = P_{zрез} + P_{zтр}; \quad (3.1)$$

$$P_y = P_{yрез} + P_{yтр}, \quad (3.2)$$

где  $P_{zрез}$ ,  $P_{yрез}$ ,  $P_{zтр}$ ,  $P_{yтр}$  – составляющие силы резания, возникающие в процессах резания и трения связки шлифовального круга с обрабатываемым материалом, Н.

Соответственно

$$P_z = \sigma \cdot S_{\text{сум}} = \sigma \cdot \frac{Q}{V_{\text{кр}}} ; \quad (3.3)$$

$$P_{z_{\text{рез}}} = \sigma_{\text{рез}} \cdot S_{\text{сум}} = \sigma_{\text{рез}} \cdot \frac{Q}{V_{\text{кр}}} ; \quad (3.4)$$

$$P_{z_{\text{тр}}} = P_{y_{\text{тр}}} \cdot f = c \cdot y_{\text{тр}} \cdot f ; \quad (3.5)$$

$$P_{y_{\text{рез}}} = \frac{P_{z_{\text{рез}}}}{K_{\text{шрез}}} = c \cdot y_{\text{рез}} , \quad (3.6)$$

где  $S_{\text{сум}} = Q/V_{\text{кр}}$  – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга,  $\text{м}^2$ ;  $Q$  – производительность обработки,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $\sigma_{\text{рез}}$  – условное напряжение резания (учитывает резания зернами круга, но не учитывает трение связки круга с материалом),  $\text{Н}/\text{м}^2$ ;  $f$  – коэффициент трения связки круга с материалом;  $c$  – приведенная жесткость технологической системы,  $\text{Н}/\text{м}$ ;  $y_{\text{тр}} = (V_{\text{рез}} - V_{\text{рез}_0}) \cdot \tau$  – упругое перемещение, возникающее в технологической системе вследствие неполного съема подводимого в зону резания обрабатываемого материала,  $\text{м}$ ;  $V_{\text{рез}_0}$  – линейная скорость съема материала,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\tau$  – время обработки,  $\text{с}$ ;  $K_{\text{шрез}} = P_{z_{\text{рез}}} / P_{y_{\text{рез}}}$ ;  $y_{\text{рез}}$  – упругое перемещение, возникающее в технологической системе вследствие внедрения режущих зерен в обрабатываемый материал,  $\text{м}$ .

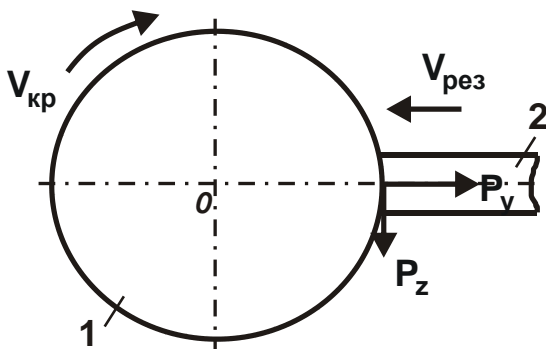


Рисунок 3.1 – Расчетная схема параметров процесса шлифования: 1 – круг; 2 – обрабатываемый образец

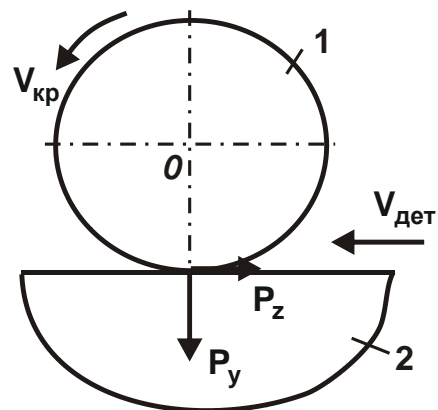


Рисунок 3.2 – Расчетная схема параметров процесса плоского шлифования: 1 – круг; 2 – деталь

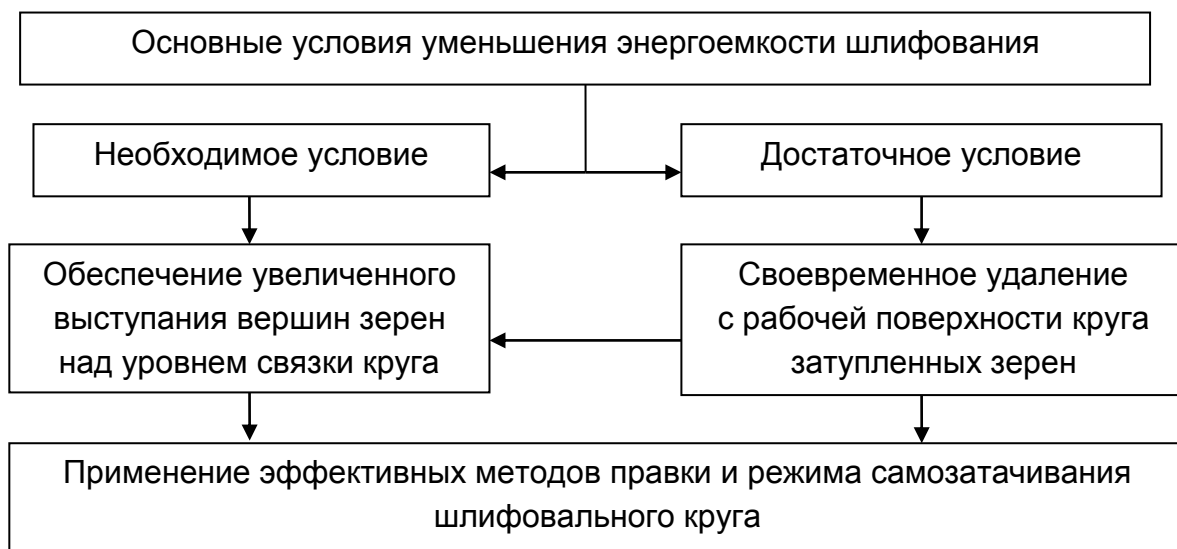


Рисунок 3.3 – Структурная схема условий уменьшения энергоемкости шлифования

Зависимость (3.1) с учетом соотношения  $Q = V_{рез0} \cdot S$  принимает вид:

$$\sigma = \sigma_{рез} + \left( \frac{V_{рез}}{V_{рез0}} - 1 \right) \cdot \frac{c \cdot f \cdot \tau \cdot V_{кр}}{S}, \quad (3.7)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения обрабатываемого образца,  $m^2$ .

Из зависимости (3.7) следует, что при условии  $V_{рез} = V_{рез0}$ , т.е. когда происходит полный съем подводимого в зону резания материала, второе слагаемое равно нулю и условное напряжение резания  $\sigma$  вызвано лишь процессом резания. Если же круг не обеспечивает полный съем подводимого в зону резания обрабатываемого материала, то  $V_{рез} > V_{рез0}$  и в контакт с материалом вступает связка. В результате второе слагаемое зависимости (3.7) принимает значение, отличное от нуля, и условное напряжение резания  $\sigma$  определяется суммой двух слагаемых. Причем, с течением времени обработки  $\tau$  второе слагаемое увеличивается (в том числе и при постоянной скорости  $V_{рез0}$ ), что приводит к увеличению условного напряжения резания  $\sigma$  и необходимости прекращения процесса шлифования.

Даже при небольшом отличии величин  $V_{рез}$  и  $V_{рез0}$  второе слагаемое зависимости (3.7) с течением времени обработки  $\tau$  принимает относительно большие значения, осуществить процесс шлифования

при которых невозможно. Например, при  $V_{рез} / V_{рез0} = 2$ ;  $c = 10^7$  Н/м;  $\tau = 60$  с;  $f = 0,5$ ;  $V_{кр} = 30$  м/с;  $S = 20$  мм<sup>2</sup> второе слагаемое зависимости (3.7) равно  $15 \cdot 10^7$  МПа. Как видно, данная величина многократно (в тысячи раз) превышает предел прочности на сжатие обрабатываемого материала и соответственно первое слагаемое зависимости (3.7), что свидетельствует о невозможности осуществления процесса шлифования в таких условиях. Из этого вытекает, что при шлифовании необходимо обеспечить равенство скоростей  $V_{рез}$  и  $V_{рез0}$  за счет применения кругов с повышенной режущей способностью, фактически исключающих контакт связки с обрабатываемым материалом. Для этого круг должен обеспечивать увеличенное выступание режущих зерен над уровнем связки и свободное размещение продуктов обработки в его межзеренном пространстве при шлифовании. Важно также в процессе шлифования поддерживать высокую режущую способность круга, не допуская уменьшения  $V_{рез0}$  в связи с износом и затуплением режущих зерен. В противном случае отношение  $V_{рез} / V_{рез0}$  с течением времени обработки увеличивается, вызывая увеличение условного напряжения резания  $\sigma$ .

С физической точки зрения существенное увеличение второго слагаемого зависимости (3.7) с течением времени  $\tau$  связано с увеличением упругого перемещения  $y_{тр} = (V_{рез} - V_{рез0}) \cdot \tau$ . При условии  $V_{рез} = V_{рез0}$  данная величина равна нулю. В этом случае, как показано выше, условное напряжение резания  $\sigma$  зависит от силовой напряженности процесса резания зернами круга и не зависит от интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом.

При условии  $V_{рез} > V_{рез0}$  условное напряжение резания  $\sigma$  определяется, главным образом, вторым слагаемым зависимости (3.7). Уменьшить его можно уменьшением параметров  $c$ ,  $f$ ,  $\tau$ ,  $V_{кр}$  и увеличением  $S$ . Следовательно, с точки зрения уменьшения условного напряжения резания  $\sigma$  целесообразно скорость круга  $V_{кр}$  уменьшать. Однако это справедливо при условии  $V_{рез} > V_{рез0}$ . При условии  $V_{рез} = V_{рез0}$  из-за отсутствия второго слагаемого зависимости (3.7) скорость круга  $V_{кр}$  не влияет на условное напряжение резания  $\sigma$ .

Необходимо отметить, что в процессе шлифования всегда будет иметь место упругое перемещение  $y_{рез}$ , вызванное вдавливанием режущих зерен в обрабатываемый материал. Однако данная величина связана с первым слагаемым зависимости (3.7) и не оказывает влияния на второе слагаемое, поскольку описывается зависимостью:

$$y_{рез} = \frac{P_{zрез}}{c \cdot K_{шрез}} = \frac{\sigma_{рез}}{c \cdot K_{шрез}} \cdot \frac{Q}{V_{кр}}. \quad (3.8)$$

Как видно, величина  $y_{рез}$  определяется, главным образом, отношением  $\sigma_{рез}/K_{шрез}$  и производительностью обработки  $Q$ : чем больше эти параметры, тем больше  $y_{рез}$ . Этим показано, что при выполнении условия  $V_{рез} = V_{рез0}$  фактически исключается трение связки круга с материалом, составляющие силы резания  $P_{zтр}$ ,  $P_{yтр}$  равны нулю, а условное напряжение резания  $\sigma$  обусловлено лишь процессом резания зернами круга, что резко снижает энергоемкость шлифования.

Традиционно считается, что увеличение параметров  $P_z$ ,  $P_y$  и  $\sigma$  при шлифовании вызвано в основном затуплением зерен круга. В действительности, как показано выше, это связано с невыполнением условия  $V_{рез} = V_{рез0}$  даже при работе острым кругом. В результате второе слагаемое зависимости (3.7) с течением времени обработки  $\tau$  непрерывно увеличивается, вызывая увеличение условного напряжения резания  $\sigma$  и, соответственно, тангенциальной и радиальной составляющих силы резания  $P_z$ ,  $P_y$ .

Из зависимости (3.8) вытекает, что уменьшить параметры  $\sigma$ ,  $P_z$ ,  $P_y$  можно путем уменьшения коэффициента трения  $f$  связки круга с обрабатываемым материалом. Однако этим можно лишь уменьшить второе слагаемое зависимости (3.7), тогда как выполнением условия  $V_{рез} = V_{рез0}$  можно его исключить.

Для определения условного напряжения резания  $\sigma$  при плоском шлифовании (рис. 3.2) следует воспользоваться зависимостями (3.1) и (3.2) с учетом зависимостей [140]:

$$Q = B \cdot V_{дет} \cdot t_{ф}; \quad (3.9)$$

$$y_{тр} = (t - t_{ф}) \cdot n, \quad (3.10)$$

где  $B$  – ширина шлифования, м;  $V_{дет}$  – скорость детали, м/с;  $t$  и  $t_{ф}$  – номинальная и фактическая глубины шлифования, м;  $n$  – количество проходов круга.

Подставляя зависимости (3.10) в зависимость (3.7), имеем:

$$\sigma = \sigma_{рез} + \left( \frac{t}{t_{ф}} - 1 \right) \cdot \frac{c \cdot f \cdot n \cdot V_{кр}}{B \cdot V_{дет}}. \quad (3.11)$$

Как видно, по структуре зависимость (3.11) идентична зависимости (3.7) с тем отличием, что во втором слагаемом содержатся новые параметры:  $n$  и  $t/t_{ф}$ . Чем они больше, тем больше условное напряжение резания  $\sigma$ . Поэтому все выводы, сделанные при анализе зависимости (3.7) применительно к схеме шлифования прямолинейного образца, движущегося по нормали к кругу с постоянной скоростью  $V_{рез}$ , остаются справедливыми и для плоского шлифования.

Исключить второе слагаемое в зависимости (3.11) и таким образом уменьшить условное напряжение резания  $\sigma$  можно при условии  $t = t_{ф}$ . Это достигается увеличением высот выступания вершин зерен над уровнем связки круга и исключением контакта связки круга с обрабатываемым материалом. Следовательно, необходимым условием снижения энергоемкости шлифования следует рассматривать обеспечение увеличенного выступания вершин зерен над уровнем связки круга (рис. 3.3). Достаточным условием – своевременное удаление с рабочей поверхности круга затупившихся зерен за счет применения эффективных методов правки круга или осуществления работы круга в режиме самозатачивания. Это позволит, во-первых, поддерживать в процессе шлифования на заданном уровне величину  $\sigma_{рез}$ , а во-вторых, обеспечит увеличенное выступание вершин зерен над уровнем связки круга.

Произведено количественную оценку второго слагаемого зависимости (3.11) для исходных данных:  $t/t_{ф} = 2$ ;  $c = 10^7$  Н/м;  $\tau = 60$  с;  $f = 0,5$ ;  $V_{кр} = 30$  м/с;  $B = 20$  мм;  $V_{дет} = 30$  м/мин. В результате установлено, что оно равно  $30 \cdot 10^4$  МПа. Как видно, это значение существенно меньше аналогичного значения ( $15 \cdot 10^7$  МПа), полученного для случая шлифования прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга (рис. 3.1). Следовательно, применение схемы



плоского шлифования позволяет уменьшить условное напряжение резания  $\sigma$ , т.е. целесообразно от схемы шлифования, показанной на рис. 3.1, перейти к схеме плоского шлифования (рис. 3.2). Это связано с более высокой производительностью плоского шлифования и меньшими значениями величины  $u_{тр}$ .

### 3.2. Аналитическое описание и анализ энергоёмкости обработки лезвийным инструментом

Для аналитического описания энергоёмкости обработки лезвийным инструментом первоначально следует рассмотреть расчетную схему параметров стружкообразования при резании для нулевого переднего угла режущего инструмента (рис. 3.4 [145]). Как известно, при резании материала с толщиной среза  $a$  образование стружки происходит в результате периодических сдвигов элементов обрабатываемого материала вдоль условной плоскости сдвига  $OA$ , расположенной под условным углом сдвига материала  $\beta$ , определяемым из условия достижения в плоскости сдвига наибольшего касательного напряжения  $\tau$ :

$$\tau = \frac{P \cdot \cos(\beta + \psi)}{a \cdot b} \cdot \sin \beta, \quad (3.12)$$

где  $P$  – равнодействующая силы резания, Н;  $\psi$  – условный угол трения стружки с передней поверхностью инструмента;  $\operatorname{tg} \psi = f$  – коэффициент трения обрабатываемого и инструментального материалов;  $a$ ,  $b$  – толщина и ширина среза, м.

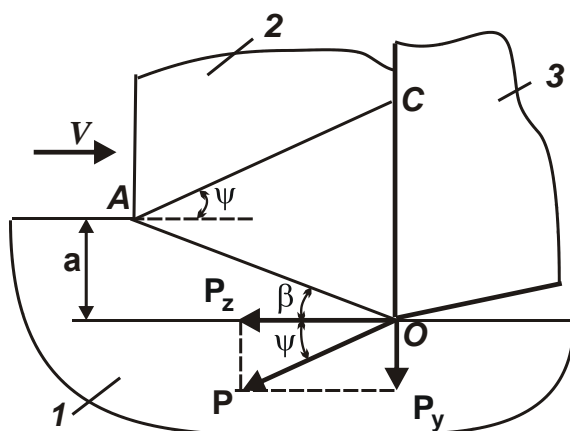


Рисунок 3.4 – Расчетная схема параметров стружкообразования при резании: 1 – обрабатываемый материал; 2 – образующаяся стружка; 3 – режущий инструмент

Подчиняя зависимость (3.12) необходимому условию экстремума  $\tau'_\beta = 0$ , получено:

$$\beta = 45^\circ - \frac{\psi}{2}. \quad (3.13)$$

При значении  $\psi = 0$  условный угол сдвига материала  $\beta = 45^\circ$ . Это соответствует напряженному состоянию прямолинейного образца при его одноосном сжатии силой  $P$ . С увеличением угла  $\psi$  угол  $\beta$  уменьшается и принимает значения меньше  $45^\circ$ . Подставляя зависимость (3.13) в (3.12) и принимая значение  $\tau$  равным пределу прочности на сдвиг обрабатываемого материала  $\tau_{сдв}$ , определены сила резания  $P$  и ее составляющие:  $P_z$  и  $P_y = f \cdot P_z$ :

$$P = \frac{a \cdot b \cdot \tau_{сдв}}{\sin^2 \beta} = \frac{2 \cdot a \cdot b \cdot \tau_{сдв}}{(1 - \sin \psi)}; \quad (3.14)$$

$$P_z = P \cdot \cos \psi = \frac{2 \cdot a \cdot b \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{2 \cdot a \cdot b \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\psi}{2} \right)}; \quad (3.15)$$

$$P_y = P \cdot \sin \psi = \frac{2 \cdot a \cdot b \cdot \tau_{сдв} \cdot \sin \psi}{(1 - \sin \psi)}. \quad (3.16)$$

Как видно, значения параметров  $P$ ,  $P_z$  и  $P_y$  тем меньше, чем меньше значения  $a$ ,  $b$ ,  $\tau_{сдв}$  и  $\psi$  (или больше условный угол сдвига материала  $\beta$ ). При этом справедливо условия  $P_z > P_y$ , поскольку

$$\frac{P_z}{P_y} = \frac{1}{\operatorname{tg} \psi} > 1. \quad (3.17)$$

Из зависимости (3.15) определена величина  $\sigma_{рез} = \sigma = P_z / (a \cdot b)$ :

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg} \left( 45^\circ - \frac{\psi}{2} \right)}. \quad (3.18)$$

С увеличением условного угла сдвига материала  $\beta$  условное напряжение резания  $\sigma$  уменьшается, асимптотически приближаясь к значению  $\sigma_{сж} \approx 2\tau_{сдв}$ , где  $\sigma_{сж}$  – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м<sup>2</sup> (рис. 3.5). В пределе (при условии  $\sigma \rightarrow \sigma_{сж}$ ) напряженное состояние процесса резания соответствует условию разрушения прямолинейного образца при его одноосном сжатии.

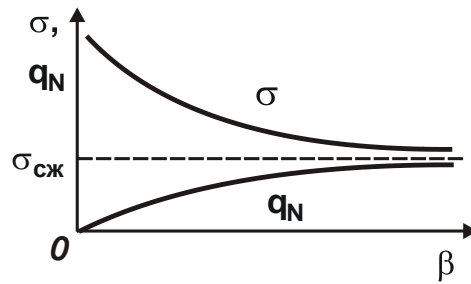


Рисунок 3.5 – Зависимости условного напряжения резания  $\sigma$  и нормального контактного напряжения  $q_N$ , возникающего на передней поверхности инструмента, от условного угла сдвига материала  $\beta$

Для установления связи условного напряжения резания  $\sigma$  с коэффициентом резания  $P_z/P_y = K_{рез}$  следует преобразовать зависимость (3.18) к виду:

$$\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{\psi}{2}\right) = \frac{\sin(90^\circ - \psi)}{1 + \cos(90^\circ - \psi)} = \frac{\cos \psi}{1 + \sin \psi} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\cos \psi} + \operatorname{tg} \psi\right)}, \quad (3.19)$$

тогда

$$\sigma = 2 \cdot \tau_{сдв} \cdot \left(\frac{1}{\cos \psi} + \operatorname{tg} \psi\right). \quad (3.20)$$

Согласно зависимости (3.17), функция  $\operatorname{tg} \psi = 1/K_{рез}$ , а отношение  $1/\cos \psi$  выражается через коэффициент резания  $K_{рез} = 1/\operatorname{tg} \psi$ :

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\sin \psi}{\cos \psi} = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \psi}}{\cos \psi}, \text{ откуда } \frac{1}{\cos \psi} = \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \psi} = \sqrt{1 + \frac{1}{K_{рез}^2}}.$$

После преобразований зависимость (3.20) принимает вид:

$$\sigma = 2 \cdot \tau_{сдв} \cdot \frac{\left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right)}{K_{рез}}. \quad (3.21)$$

В итоге получено зависимость, приведенную в работе [229]. Как следует из табл. 3.1, с увеличением коэффициента резания  $K_{рез}$  условное напряжение резания  $\sigma$  уменьшается. При  $K_{рез} \gg 1$  справедливо условие  $\sigma \rightarrow 2 \cdot \tau_{сдв} \approx \sigma_{сж}$ . При  $K_{рез} < 1$ , что имеет место при абразивной обработке, зависимость (3.21) может быть упрощена:

$$\sigma = \frac{4 \cdot \tau_{сдв}}{K_{рез}}. \quad (3.22)$$

Таблица 3.1 – Значения функции  $\sigma/2 \cdot \tau_{сдв}$ , рассчитанные по зависимости (3.21)

$K_{рез}$	0	0,5	1	2	4	8
$\sigma/2 \cdot \tau_{сдв}$	$\infty$	4,236	2,414	1,618	1,28	1,132

Таблица 3.2 – Расчетные значения  $l/a$

$\psi$ , град	0	10	20	30	40	50	60
$\beta$ , град	45	40	35	30	25	20	15
$l/a$	1	1,21	1,52	2,0	2,8	4,3	7,4

Из рис. 3.5 видно, что условное напряжение резания  $\sigma$  всегда больше значения  $\sigma_{сж}$ . С физической точки зрения данное условие невыполнимо, поскольку  $\sigma_{сж}$  – это наибольшее напряжение для рассматриваемого материала и поэтому условное напряжение резания  $\sigma$  не может превышать значение  $\sigma_{сж}$ . В связи с этим возникает вопрос, что собой представляет условное напряжение резания  $\sigma$ , в чем его физическая сущность?

Данное напряжение и названо условным, поскольку в реальной действительности оно не существует. Превышение условного напряжения резания  $\sigma$  над значением  $\sigma_{сж}$  означает, что оно должно действовать на площади, превышающей площадь поперечного сечения среза  $a \cdot b$ , т. е. на площади контакта стружки с передней поверхностью инструмента, которая, как правило, в несколько раз больше площади поперечного сечения среза  $a \cdot b$ . Поэтому важно определить истинные значения напряжения, действующего на передней поверхности инструмента. Для этого на рис. 3.4 следует провести линию AC, параллельную направлению равнодействующей силы резания  $P$ , и очерчивающую границу контакта образующейся стружки с передней поверхностью инструмента. Исходя из такого представления процесса стружкообразования при резании, длина контакта образующейся стружки с передней поверхностью инструмента  $l$  равна длине отрезка OC и определяется на основе теоремы синусов для косоугольного треугольника OAC:

$$\frac{OC}{\sin \angle A} = \frac{OA}{\sin \angle C}, \quad (3.23)$$

где  $OA = \frac{a}{\sin\beta}$ ;  $\angle A = \beta + \psi = 45^\circ + \frac{\psi}{2}$ ;

$$\angle C = 180^\circ - \angle A - \angle O = 180^\circ - \left(45^\circ + \frac{\psi}{2}\right) - (90^\circ - \beta) = 90^\circ - \psi.$$

После преобразований зависимости (3.23), имеем:

$$l = a \cdot \frac{\operatorname{tg}\left(45^\circ + \frac{\psi}{2}\right)}{\cos\psi}. \quad (3.24)$$

В табл. 3.2 приведены рассчитанные по зависимости (3.24) значения  $l/a$  для различных значений условного угла трения материала с передней поверхностью инструмента  $\psi$  и, соответственно, условного угла сдвига материала  $\beta$ . Как видно, отношение  $l/a$  может изменяться в пределах от 1 до 7,4 при изменении условного угла трения материала с передней поверхностью инструмента  $\psi$  от 0 до  $60^\circ$ , т.е. в диапазоне реальных значений. Чем больше угол  $\psi$ , тем больше длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента  $l$ .

Полученное теоретическое решение согласуется с известными экспериментальными данными, приведенными в работе [5]. Зная параметр  $l$ , не сложно определить нормальное контактное напряжение  $q_N$ , возникающее на передней поверхности инструмента:

$$q_N = \sigma \cdot \frac{a}{l} \approx \sigma_{сж} \cdot \cos\psi = \sigma_{сж} \cdot \sin 2\beta. \quad (3.25)$$

Из зависимости (3.25) следует, что нормальное контактное напряжение  $q_N$  меньше предела прочности на сжатие обрабатываемого материала  $\sigma_{сж}$ . Для сравнения на рис. 3.5 показан характер изменения параметров  $q_N$  и  $\sigma$  в зависимости от угла  $\beta$ . Как видно, параметры  $q_N$  и  $\sigma$  с увеличением угла  $\beta$  асимптотически приближаются к значению  $\sigma_{сж}$ . При этом условное напряжение резания  $\sigma$  (или энергоемкость обработки) принимает значения больше  $\sigma_{сж}$ , а нормальное контактное напряжение  $q_N$ , наоборот, меньше  $\sigma_{сж}$ .

Кроме нормального контактного напряжения  $q_N$ , на передней поверхности инструмента действует касательное контактное напряжение  $q_\tau$ , определяемое отношением радиальной составляющей силы резания  $P_y$  к площади контакта стружки с передней поверхностью инстру-

мента. Исходя из рис. 3.4, оно может быть выражено через нормальное контактное напряжение  $q_N$ :

$$q_\tau = q_N \cdot \operatorname{tg} \psi = \sigma_{\text{сж}} \cdot \sin \psi. \quad (3.26)$$

Очевидно,  $q_\tau < q_N$ , поскольку справедливо условие  $\operatorname{tg} \psi < 1$ . Равнодействующая контактного напряжения  $q$ , возникающего на передней поверхности инструмента, равна:

$$q = \sqrt{q_N^2 + q_\tau^2} = \sigma_{\text{сж}}. \quad (3.27)$$

Тогда на передней поверхности инструмента действует равномерно распределенная нагрузка с плотностью  $q = \sqrt{q_N^2 + q_\tau^2} = \sigma_{\text{сж}}$ .

Полученные решения справедливы при резании инструментом с передним углом  $\gamma = 0$ . Поэтому важно установить решение, охватывающее весь диапазон изменения переднего угла инструмента, т.е.  $\gamma < 0$ ,  $\gamma = 0$  и  $\gamma > 0$ . Для этого следует рассмотреть расчетную схему (рис. 3.6), справедливую для условия  $\gamma > 0$ .

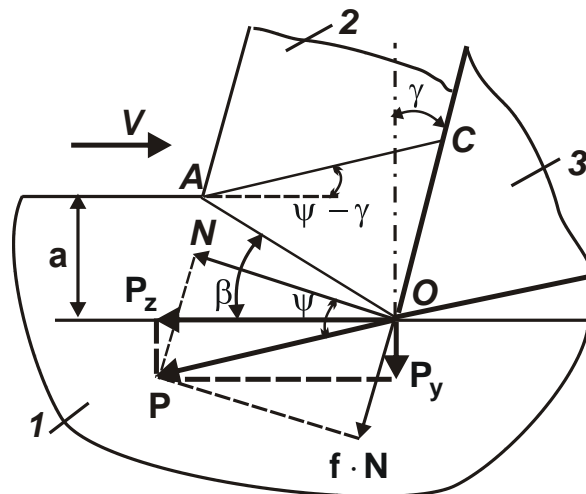


Рисунок 3.6 – Расчетная схема параметров стружкообразования при резании: 1 – обрабатываемый материал; 2 – образующаяся стружка; 3 – режущий инструмент

Здесь функцию угла  $\psi$  выполняет угол  $(\psi - \gamma)$ . Для отрицательного переднего угла вместо угла  $\psi$  необходимо рассматривать угол  $(\psi + \gamma)$ . Для положительного переднего угла инструмента  $\gamma$  зависимости (3.13) – (3.18) примут вид:

$$\beta = 45^\circ - \frac{(\psi - \gamma)}{2}; \quad (3.28)$$

$$P = \frac{a \cdot v \cdot \tau_{сдв}}{\sin^2 \beta} = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{сдв}}{[1 - \sin(\psi - \gamma)]}; \quad (3.29)$$

$$P_z = P \cdot \cos(\psi - \gamma) = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{(\psi - \gamma)}{2}\right)}; \quad (3.30)$$

$$P_y = P \cdot \sin(\psi - \gamma) = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{сдв} \cdot \sin(\psi - \gamma)}{[1 - \sin(\psi - \gamma)]}; \quad (3.31)$$

$$\frac{P_z}{P_y} = \frac{1}{\operatorname{tg}(\psi - \gamma)}, \quad (3.32)$$

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{(\psi - \gamma)}{2}\right)}. \quad (3.33)$$

Полученная зависимость (3.28) совпадает с известной зависимостью проф. Зворыкина К. А. [75], из которой следует, что с увеличением переднего угла инструмента  $\gamma$  угол  $\beta$  увеличивается, а это приводит к уменьшению силы резания. Следовательно, увеличение переднего угла инструмента  $\gamma$  как бы нивелирует отрицательное влияние угла  $\psi$  на силовую напряженность резания. Это согласуется с экспериментальными данными, приведенными на рис. 3.7 [27] и рис. 3.8 [27].

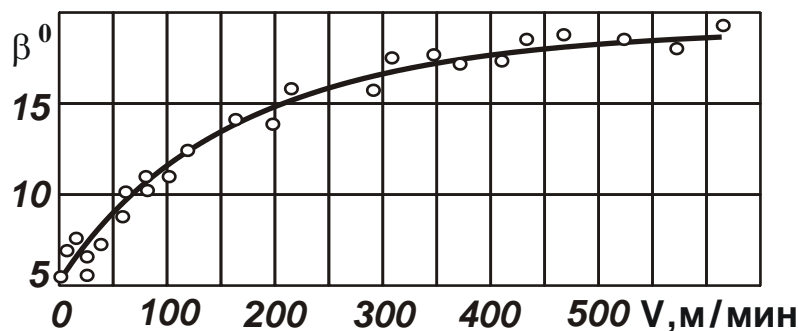


Рисунок 3.7 – Влияние скорости резания  $V$  на угол сдвига  $\beta$  [27]

При условии  $\gamma < 0$  в зависимости (3.13) – (3.18) необходимо подставить вместо угла  $\psi$  угол  $(\psi + \gamma)$ :

$$\beta = 45^\circ - \frac{(\psi + \gamma)}{2}; \quad (3.34)$$

$$P = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{сдв}}{[1 - \sin(\psi + \gamma)]}; \quad (3.35)$$



$$P_z = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{(\psi + \gamma)}{2}\right)}; \quad (3.36)$$

$$P_y = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{сдв} \cdot \sin(\psi + \gamma)}{[1 - \sin(\psi + \gamma)]}; \quad (3.37)$$

$$\frac{P_z}{P_y} = \frac{1}{\operatorname{tg}(\psi + \gamma)}; \quad (3.38)$$

$$\sigma = \frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{\operatorname{tg}\left(45^\circ - \frac{(\psi + \gamma)}{2}\right)}. \quad (3.39)$$

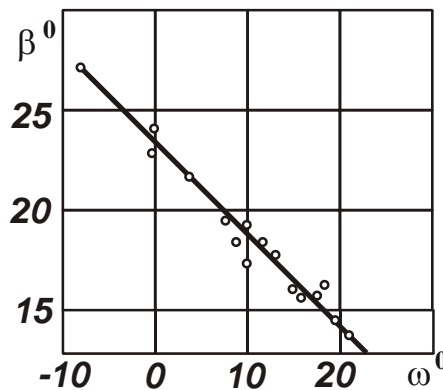


Рисунок 3.8 – Влияние угла действия  $\omega = \psi - \gamma$  на угол сдвига  $\beta$  [27].

Как видно, с увеличением отрицательного переднего угла  $\gamma$  величины  $\beta$ ,  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $P$  и  $\sigma$  увеличиваются, т.е. процесс резания протекает с более высокой силовой напряженностью, чем в случае  $\gamma > 0$ . Отношение  $P_z / P_y$  в этом случае может быть как больше, так и меньше единицы. Известно, например, что при абразивной обработке, характеризующейся отрицательными передними углами режущих кромок инструмента, отношение  $P_z / P_y$  меньше единицы, а при лезвийной обработке, осуществляемой инструментами с положительными передними углами, больше единицы. Необходимо отметить, что зависимость (3.25) справедлива как для положительного, так и отрицательного переднего угла инструмента  $\gamma$ , рассматривая коэффициент резания  $K_{рез} = P_z / P_y$  в виде, описываемом зависимостями (3.32) и (3.38).

Для определения длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента  $l$  для случая  $\gamma > 0$  следует воспользоваться расчет-

ной схемой, приведенной на рис. 3.6. Аналогично рис. 3.4 (для случая  $\gamma = 0$ ), длина  $l$  равна отрезку  $OC$ . Отрезок  $AC$  должен быть параллельным равнодействующей силы резания  $P$ . Длина  $l$  определяется исходя из теоремы синусов для косоугольного треугольника  $OAC$ :

$$\frac{OC}{\sin \angle A} = \frac{OA}{\sin \angle C}, \quad (3.40)$$

где  $OA = \frac{a}{\sin \beta}$ ;  $\angle A = \beta + (\psi - \gamma) = 45^\circ + \frac{(\psi - \gamma)}{2}$ ;

$$\angle C = 180^\circ - \angle A - \angle O = 180^\circ - [\beta + (\psi - \gamma)] - [(90^\circ - \beta) + \gamma] = 90^\circ - \psi.$$

После преобразований зависимости (3.40), имеем:

$$l = a \cdot \frac{\operatorname{tg}\left(45^\circ + \frac{(\psi - \gamma)}{2}\right)}{\cos \psi}. \quad (3.41)$$

Из зависимости (3.41) следует, что с увеличением переднего угла инструмента  $\gamma$  длина контакта стружки с передней поверхностью инструмента  $l$  уменьшается.

Для определения нормального  $q_N$  и касательного  $q_\tau$  контактных напряжений, возникающих на передней поверхности инструмента, следует установить нормальную составляющую силы резания  $N$  (рис. 3.6), действующую на передней поверхности инструмента:

$$P_z = N \cdot \cos \gamma + f \cdot N \cdot \sin \gamma, \quad (3.42)$$

откуда

$$N = \frac{P_z}{\cos \gamma + f \cdot \sin \gamma}. \quad (3.43)$$

Тогда нормальное контактное напряжение  $q_N = N/v \cdot l$ , возникающее на передней поверхности инструмента, с учетом  $\operatorname{tg} \psi = f$  примет вид:

$$q_N = \sigma_{сж} \cdot \frac{\cos^2 \psi}{\cos(\psi - \gamma)}. \quad (3.44)$$

Касательное контактное напряжение  $q_\tau = q_N \cdot \operatorname{tg} \psi$  опишется:

$$q_\tau = \sigma_{сж} \cdot \frac{\cos \psi \cdot \sin \psi}{\cos(\psi - \gamma)}. \quad (3.45)$$

Равнодействующая контактного напряжения  $q$  равна:

$$q = \sqrt{q_N^2 + q_\tau^2} = \sigma_{сж} \cdot \frac{\cos \psi}{\cos(\psi - \gamma)} = \frac{\sigma_{сж}}{\cos \gamma + f \cdot \sin \gamma}. \quad (3.46)$$

Как следует из табл. 3.3, с увеличением переднего угла инструмента  $\gamma$  отношение  $q/\sigma_{сж}$  уменьшается, однако несущественно. Следовательно, на передней поверхности инструмента фактически действует равномерно распределенная нагрузка с плотностью, приблизительно равной пределу прочности на сжатие материала, т.е.  $q = \sqrt{q_N^2 + q_\tau^2} = \sigma_{сж}$ .

Таблица 3.3 – Значения  $q/\sigma_{сж}$ , рассчитанные по зависимости (3.46) для случая  $\psi = 30^\circ$

$\gamma$ , град	0	10	20	30
$q/\sigma_{сж}$	1	0,92	0,88	0,87

### 3.3. Уточненный анализ коэффициента шлифования и условного напряжения резания

Коэффициент шлифования  $K_{ш}$  аналитически определяется зависимостью [112, 126]:

$$K_{ш} = \frac{P_z}{P_y} = \frac{P_{zp} + P_{zmp}}{P_{yp} + P_{ymp}}, \quad (3.47)$$

где  $P_{zp}$ ,  $P_{yp}$  – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания в зоне стружкообразования, Н;  $P_{zmp}$ ,  $P_{ymp}$  – тангенциальная и радиальная составляющие силы трения обрабатываемого материала со связкой круга, Н.

Тангенциальную составляющую силы резания  $P_z = P_{zp} + P_{zmp}$  следует представить в виде:

$$K_{ш} \cdot P_y = K_{цр} \cdot P_{yp} + f \cdot P_{утр}, \quad (3.48)$$

где  $K_{цр} = P_{zp}/P_{yp}$ ;  $f = P_{zmp}/P_{ymp}$  – коэффициент трения обрабатываемого материала со связкой круга.

С учетом  $P_{утр} = P_y - P_{yp}$  зависимость (3.48) принимает вид:

$$\frac{(K_{цр} - K_{ш})}{(K_{цр} - f)} = \frac{P_{ymp}}{P_{yp}}. \quad (3.49)$$

В итоге получена достаточно сложная зависимость, увязывающая четыре неизвестных параметра:  $K_{ш}$ ,  $K_{шр}$ ,  $f$  и  $P_{ymp}$  с одним известным параметром  $P_{yp}$ .

Важно провести анализ данной зависимости для двух случаев:  $P_{ymp}/P_y = 0$  и  $P_{ymp}/P_y < 1$ . Первый случай предполагает отсутствие трения связки круга с обрабатываемым материалом, в результате чего выполняется условие  $K_{ш} = K_{шр}$ . Во втором случае справедливо условие:  $K_{шр} - K_{ш} < K_{шр} - f$  или  $K_{ш} > f$ . Причем, с увеличением отношения  $P_{ymp}/P_y$  расхождение параметров  $K_{ш}$  и  $K_{шр}$  усиливается, однако, до определенного предела  $K_{ш} \rightarrow f$ , поскольку при условии  $K_{ш} < f$  числитель зависимости (3.49) становится больше знаменателя, что теряет физический смысл. Следовательно, при  $P_{ymp}/P_y \rightarrow 1$  справедливо условие  $K_{ш} \rightarrow f$ . Характер зависимости коэффициента шлифования  $K_{ш}$  от  $P_{ymp}/P_y$  при одинаковом значении  $K_{шр}$  показан на рис. 3.9,а.

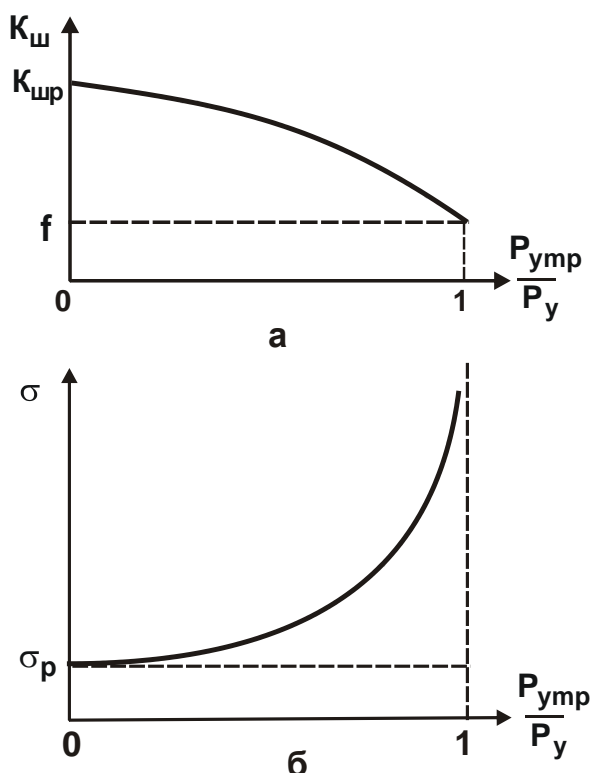


Рисунок 3.9 – Общий вид зависимостей  $K_{ш}$  (а) и  $\sigma$  (б) от  $P_{ymp}/P_y$

Как видно, увеличение коэффициента шлифования  $K_{ш}$  предполагает уменьшение отношения  $P_{ymp}/P_y$ , что соответствует уменьшению доли энергии трения связки круга с обрабатываемым материалом

в общем энергетическом балансе процесса шлифования и повышению эффективности обработки.

Для удобства анализа зависимость (3.47) можно представить:

$$K_{\text{ш}} = K_{\text{шр}} \cdot \left( 1 - \frac{P_{\text{утр}}}{P_y} \right) + f \cdot \frac{P_{\text{ymp}}}{P_y}. \quad (3.50)$$

При  $P_{\text{ymp}}/P_y = 0$  справедливо условие:  $K_{\text{ш}} = K_{\text{шр}}$ . При увеличении отношения  $P_{\text{ymp}}/P_y \rightarrow 1$  первое слагаемое зависимости (3.50) уменьшается до нуля, а второе увеличивается до значения  $f$ . Следовательно, имеет место экстремальная зависимость коэффициента шлифования  $K_{\text{ш}}$  от отношения  $P_{\text{ymp}}/P_y$ . Для определения экстремума функции  $K_{\text{ш}}$  подчиним ее необходимому условию экстремума. Для этого возьмем первую производную от функции  $K_{\text{ш}}$  по переменной величине  $P_{\text{ymp}}/P_y$  и полученное выражение приравняем нулю. В результате установлено:  $K_{\text{ш}} = f$ .

Вторая производная от функции  $K_{\text{ш}}$  по переменной  $P_{\text{ymp}}/P_y$  равна нулю. Следовательно, экстремум функции  $K_{\text{ш}}$  по переменной  $P_{\text{ymp}}/P_y$  отсутствует. Поэтому коэффициент шлифования  $K_{\text{ш}}$  с увеличением отношения  $P_{\text{ymp}}/P_y$  (от 0 до 1) будет непрерывно уменьшаться от значения  $K_{\text{шр}}$  до значения  $f$ , т.е. при  $P_{\text{ymp}}/P_y \rightarrow 1$  выполняется условие  $K_{\text{ш}} \rightarrow f$ , что соответствует графику, приведенному на рис. 3.9,а.

Условное напряжение резания (энергоемкость обработки)  $\sigma$  можно описать следующей аналитической зависимостью  $\sigma = P_z/S_{\text{сум}}$ . Тогда с учетом  $P_z = P_{\text{зр}} + P_{\text{зтр}}$ , имеем:

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_{\text{тр}}, \quad (3.51)$$

где  $\sigma_p = P_{\text{зр}}/S_{\text{сум}}$ ;  $\sigma_{\text{тр}} = P_{\text{зтр}}/S_{\text{сум}}$ ;  $S_{\text{сум}}$  – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга,  $\text{м}^2$ .

Выражая

$$P_{\text{зтр}} = f \cdot P_{\text{утр}} = f \cdot (P_y - P_{\text{ур}}) = f \cdot \left( \frac{P_z}{K_{\text{ш}}} - \frac{P_{\text{зр}}}{K_{\text{шр}}} \right) \quad (3.52)$$

и подставляя зависимость (3.52) в зависимость (3.17), получено уравнение относительно условного напряжения резания  $\sigma$ :

$$\sigma = \sigma_p + f \cdot \left( \frac{\sigma}{K_{\text{ш}}} - \frac{\sigma_p}{K_{\text{шр}}} \right). \quad (3.53)$$

Разрешая полученное уравнение (3.53) относительно условного напряжения резания  $\sigma$ , имеем:

$$\sigma = \sigma_p \cdot \frac{\left( 1 - \frac{f}{K_{\text{шр}}} \right)}{\left( 1 - \frac{f}{K_{\text{ш}}} \right)}. \quad (3.54)$$

Таким образом получена аналитическая зависимость для определения условного напряжения резания (энергоёмкости обработки) при шлифовании. Переменным параметром здесь является коэффициент шлифования  $K_{\text{ш}}$ . Нетрудно видеть, что с уменьшением коэффициента шлифования  $K_{\text{ш}}$  условное напряжение резания  $\sigma$  увеличивается.

Зависимость (3.54) следует подчинить расчетным значениям, приведенным на рис. 3.9,а, согласно которым  $K_{\text{ш}}$  изменяется в пределах от значения  $K_{\text{шр}}$  до значения  $f$ . Поэтому при условии  $K_{\text{ш}} = K_{\text{шр}}$ , имеем  $\sigma = \sigma_p$ , а при условии  $K_{\text{ш}} \rightarrow f$ , соответственно,  $\sigma \rightarrow \infty$  (рис. 3.9,б). Следовательно, с увеличением отношения  $P_{\text{ymp}}/P_y$  (т.е. с переходом от процесса резания к процессу трения связки круга с обрабатываемым материалом) условное напряжение резания  $\sigma$  неограниченно увеличивается. Этим объясняется высокая силовая и тепловая напряженность процесса шлифования и возникающие на обрабатываемых поверхностях прижоги и другие температурные дефекты. Поэтому уменьшить условное напряжение резания  $\sigma$  при шлифовании можно, прежде всего, за счет снижения интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом, т.е. за счет уменьшения в зависимости (3.54) второго слагаемого  $\sigma_{\text{тр}}$ . Представляя зависимость (3.54) в виде суммы двух слагаемых ( $\sigma = \sigma_p + \sigma_{\text{тр}}$ ), вызванных процессами резания и трения связки круга с материалом, имеем:

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_p \cdot \frac{\left( 1 - \frac{f}{K_{\text{шр}}} \right)}{\left( 1 - \frac{f}{K_{\text{ш}}} \right)} - \sigma_p = \sigma_p + \sigma_p \cdot \frac{\left( \frac{1}{K_{\text{ш}}} - \frac{1}{K_{\text{шр}}} \right)}{\left( \frac{1}{f} - \frac{1}{K_{\text{ш}}} \right)} = \sigma_p + \sigma_p \cdot \frac{f}{K_{\text{шр}}} \cdot \frac{(K_{\text{шр}} - K_{\text{ш}})}{(K_{\text{ш}} - f)}. \quad (3.55)$$

В результате получена зависимость, в которой первое и второе слагаемые связаны между собой. Очевидно, второе слагаемое больше первого, поскольку изменяется от значения  $\sigma_p$  (при  $K_{\text{ш}} = K_{\text{шр}}$ ) до бесконечности (при  $K_{\text{ш}} = f$ ).

Выражая  $K_{\text{ш}}$  через отношение  $P_{\text{ymp}}/P_y$ , определяемое зависимостью (3.50), получено:

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_p \cdot \frac{f}{K_{\text{шр}}} \cdot \frac{\left(\frac{P_{\text{утр}}}{P_y}\right)}{\left(1 - \frac{P_{\text{утр}}}{P_y}\right)} = \sigma_p + \sigma_p \cdot \frac{f}{K_{\text{шр}}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{P_y}{P_{\text{утр}}} - 1\right)}. \quad (3.56)$$

Как видно, при условии  $P_{\text{ymp}}/P_y = 0$ , имеем  $\sigma = \sigma_p$ , а при условии  $P_{\text{ymp}}/P_y = 1$ , соответственно,  $\sigma \rightarrow \infty$ . Аналогичный результат был получен ранее на основе анализа зависимости (3.53), графически представленной на рис. 3.9,б.

Таким образом, из зависимости (3.56) следует, что уменьшить условное напряжение резания  $\sigma$  можно путем уменьшения параметров  $P_{\text{ymp}}/P_y$ ,  $\sigma_p$ ,  $f$  и увеличения  $K_{\text{шр}}$ . Это согласуется с практикой алмазного и абразивного шлифования.

Учитывая то, что отношение  $f/K_{\text{ш}}$  может изменяться приблизительно в пределах 0,3 ... 1,0, первое и второе слагаемые зависимости будут равны между собой при условии  $P_{\text{ymp}}/P_y \approx 0,5 \dots 0,75$ . При превышении данных значений  $P_{\text{ymp}}/P_y$  второе слагаемое зависимости больше первого и условное напряжение резания  $\sigma$  неограниченно увеличивается.

Таким образом показано, что условное напряжение резания при шлифовании  $\sigma$  вполне однозначно определяется отношением  $P_{\text{ymp}}/P_y$ . С увеличением отношения  $P_{\text{ymp}}/P_y$  условное напряжение резания  $\sigma$  неограниченно увеличивается, что обусловлено преобладанием энергии трения связки шлифовального круга с материалом над энергией "чистого" резания в общем энергетическом балансе процесса шлифования.

С учетом зависимостей (3.50) и (3.56) можно определить отношение  $\sigma/K_{\text{ш}}$ :



$$\frac{\sigma}{K_{\text{ш}}} = \frac{\sigma_p \cdot \left[ 1 + \frac{f}{K_{\text{шр}}} \cdot \frac{\left( \frac{P_{\text{утр}}}{P_y} \right)}{\left( 1 - \frac{P_{\text{утр}}}{P_y} \right)} \right]}{\left[ K_{\text{шр}} \cdot \left( 1 - \frac{P_{\text{утр}}}{P_y} \right) + f \cdot \frac{P_{\text{утр}}}{P_y} \right]} = \frac{\sigma_p}{K_{\text{шр}}} \cdot \frac{1}{\left( 1 - \frac{P_{\text{утр}}}{P_y} \right)}. \quad (3.57)$$

Графически зависимость (3.57) показана на рис. 3.10, из которого следует, что с увеличением отношения  $P_{\text{умр}}/P_y$  от 0 до 1 отношение  $\sigma/K_{\text{ш}}$  увеличивается от значения  $\sigma_p/K_{\text{шр}}$  до бесконечности. Следовательно, наличие трения связки круга с обрабатываемым материалом при шлифовании приводит к существенному увеличению отношения  $\sigma/K_{\text{ш}}$  и, соответственно, силовой и тепловой напряженностей процесса шлифования. Поэтому основным путем уменьшения отношения  $\sigma/K_{\text{ш}}$  является уменьшение  $P_{\text{умр}}/P_y \rightarrow 0$  (табл. 3.4), поскольку уменьшение  $\sigma_p/K_{\text{шр}}$  (за счет повышения остроты режущих зерен круга) не приводит к столь существенному уменьшению  $\sigma/K_{\text{ш}}$ .

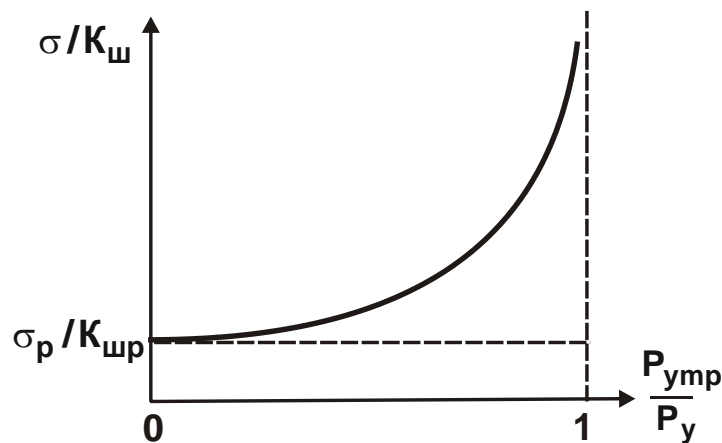


Рисунок 3.10 – Зависимость  $\sigma/K_{\text{ш}}$  от  $P_{\text{умр}}/P_y$

В отличие от зависимостей (3.50) и (3.56) зависимость (3.57) не содержит параметра  $f$ , что позволяет более просто и однозначно оценить энергетический уровень процесса шлифования. Располагая экспериментальными значениями  $\sigma_p/K_{\text{шр}}$  и  $\sigma/K_{\text{ш}}$  в начальный и текущий моменты шлифования, на основе зависимости (3.57) несложно определить отношение  $P_{\text{умр}}/P_y$  и таким образом оценить долю энергии

трения связки круга с обрабатываемым материалом в общем энергетическом балансе процесса шлифования.

Таблица 3.4 – Расчетные значения безразмерной величины  $1/\left(1 - \frac{P_{\text{утр}}}{P_y}\right)$

$\frac{P_{\text{утр}}}{P_y}$	0	0,25	0,5	0,75	1,0
$1/\left(1 - \frac{P_{\text{утр}}}{P_y}\right)$	1	1,33	2,0	4,0	$\infty$

Преобразуя зависимость (3.56) с учетом выражений:  $P_y = P_{\text{ур}} + P_{\text{утр}} = c \cdot y_1 + c \cdot y_2$ ;  $y_1 = t - t_{\text{ф}}$ ;  $y_2 = n \cdot (t - t_{\text{ф}})$ , получено

$$\frac{1}{\left(\frac{P_{\text{утр}}}{P_y} - 1\right)} = \frac{1}{\left(\frac{y_1 + y_2}{y_2} - 1\right)} = \frac{y_2}{y_1} = n, \quad (3.58)$$

$$\sigma = \sigma_p + \sigma_p \cdot \frac{f}{K_{\text{щр}}} \cdot n, \quad (3.59)$$

где  $y_1, y_2$  – соответственно упругие перемещения, возникающие в технологической системе от действия сил  $P_{\text{ур}}$ ;  $P_{\text{утр}}$ ;  $t_{\text{ф}}$  – фактическая глубина шлифования;  $n$  – количество проходов круга.

В зависимости (3.59) функцию безразмерной величины  $\alpha_3$  выполняет параметр  $n$ : с его увеличением условное напряжение резания  $\sigma$  неограниченно увеличивается. При условии  $n > K_{\text{щр}} / f$  второе слагаемое зависимости (3.56), вызванное трением связки круга с обрабатываемым материалом, больше первого слагаемого.

Представляя величину  $\sigma_p$  в виде:

$$\sigma_p = \frac{P_{\text{зр}} \cdot V_{\text{кр}}}{Q_{\text{ф}}} = \frac{K_{\text{щр}} \cdot P_{\text{ур}} \cdot V_{\text{кр}}}{B \cdot V_{\text{дет}} \cdot t_{\text{ф}}} = \frac{K_{\text{щр}} \cdot c \cdot y \cdot V_{\text{кр}}}{B \cdot V_{\text{дет}} \cdot t_{\text{ф}}} = \frac{K_{\text{щр}} \cdot c \cdot (t - t_{\text{ф}}) \cdot V_{\text{кр}}}{B \cdot V_{\text{дет}} \cdot t_{\text{ф}}} = \frac{K_{\text{щр}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}}}{B \cdot V_{\text{дет}}} \cdot \left(\frac{t}{t_{\text{ф}}} - 1\right), \quad (3.60)$$

и подставляя зависимость (3.60) в (3.59), имеем:

$$\sigma = \sigma_p + \frac{c \cdot f \cdot V_{\text{кр}}}{B \cdot V_{\text{дет}}} \cdot n \cdot \left(\frac{t}{t_{\text{ф}}} - 1\right). \quad (3.61)$$

Второе слагаемое зависимости (3.61) равно величине  $\sigma_{тр}$ . Таким образом показано, что с физической точки зрения условное напряжение резания (энергоёмкость обработки) обусловлено различием фактической и номинальной глубин шлифования  $t_{ф}/t$ , а также количеством проходов круга  $n$ . При условии  $t_{ф} \rightarrow t$  (что достигается при шлифовании кругом, обладающим высокой режущей способностью) условное напряжение резания уменьшается.

### **3.4. Повышение производительности шлифования при низкой жесткости технологической системы**

Как известно, низкая жесткость технологической системы при шлифовании приводит к снижению производительности обработки. В значительной степени это проявляется при внутреннем шлифовании, характеризующемся весьма низкими показателями жесткости и производительности обработки, в особенности по мере износа и затупления круга. В связи с этим важно знать основные закономерности образования упругих перемещений в технологической системе и условия управления ими в процессе шлифования. Это позволит снизить или даже исключить отрицательную роль упругих перемещений при шлифовании и повысить производительность обработки.

Необходимо отметить, что проблеме шлифования при относительно низкой жесткости технологической системы в научно-технической литературе уделено большое внимание [20, 88]. Разработаны эффективные автоматизированные циклы шлифования, позволяющие управлять упругими перемещениями в технологической системе и, следовательно, интенсифицировать процесс обработки [101]. Однако до настоящего времени фактически отсутствуют теоретические решения, позволяющие научно обоснованно подойти к выбору оптимальных вариантов шлифования при относительно низкой жесткости технологической системы, что ограничивает возможности повышения производительности и качества обработки. Поэтому целью работы является определение путей повышения производительности обработки при внутреннем шлифовании, характеризующемся низкой жесткостью технологической системы. Для решения поставленной задачи произведена экспериментальная оценка силовой напряженности

процесса внутреннего шлифования отверстий в кольцах из высоко-твердого магнитного сплава АНКО-3А (HRC 62–63) и на основе полученных результатов определены оптимальные условия обработки.

Одним из основных отличий процессов шлифования и лезвийной обработки является наличие трения связки круга с обрабатываемым материалом, что приводит к увеличению силы и температуры резания и снижению качества и производительности обработки. Для количественного анализа данного явления следует воспользоваться зависимостью (3.57).

Величина упругого перемещения при установившемся во времени процессе шлифования с учетом зависимости (3.8) определяется:

$$y_{уст} = \frac{\sigma_p}{K_{щр}} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{P_{yтр}}{P_y}\right)} \cdot \frac{Q}{c \cdot V_{кр}}, \quad (3.62)$$

где  $Q$  – производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;  $V_{кр}$  – скорость круга, м/с;  $c$  – жесткость технологической системы, Н/м.

По мере износа и затупления зерен круга отношение  $\sigma_p/K_{щр}$  увеличивается вследствие увеличения  $\sigma_p$  и уменьшения  $K_{щр}$ , а высоты выступания зерен над связкой круга будут уменьшаться, что приведет к контакту обрабатываемого материала со связкой круга. В итоге в энергетическом балансе шлифования появится составляющая, обусловленная силой трения связки круга с обрабатываемым материалом  $P_{yтр}$ , что вызовет увеличение  $P_{yтр}/P_y$ , а в соответствии с зависимостью (3.62) – увеличение  $y_{уст}$ . Преобразуя зависимость (3.60) с учетом отношения  $P_y = c \cdot y_{уст}$ , имеем:

$$y_{уст} = \frac{P_{yтр}}{c} + \frac{\sigma_p}{K_{щр}} \cdot \frac{Q}{c \cdot V_{кр}}. \quad (3.63)$$

В данном случае величина  $y_{уст}$  состоит из двух слагаемых, первое из которых вызвано трением связки круга с обрабатываемым материалом, а второе – процессом резания. Как следует из зависимости (3.63), с увеличением составляющей силы  $P_{yтр}$  величина упругого перемещения (начального натяга в технологической системе)  $y_{уст}$  увеличивается при заданной производительности обработки  $Q$ . Следова-

тельно, наличие трения связки круга с обрабатываемым материалом приводит к существенному увеличению  $u_{уст}$  и, соответственно, нарушению нормального протекания процесса шлифования. Поэтому необходимо стремиться к полному устранению из процесса шлифования (или хотя бы к частичному) уменьшению величины  $P_{y_{тр}}$ .

Из зависимости (3.63) также следует, что при заданном значении  $P_y$  (соответственно  $u_{уст}$ ) увеличение  $P_{y_{тр}}$  приводит к уменьшению производительности  $Q$ . Зависимость (3.63) в этом случае после преобразований принимает вид:

$$Q = \frac{K_{шр}}{\sigma_p} \cdot V_{кр} \cdot (P_y - P_{y_{тр}}). \quad (3.64)$$

При условии  $P_{y_{тр}} \rightarrow P_y$  производительность обработки  $Q \rightarrow 0$ , т.е. увеличить  $Q$  можно увеличением  $(P_y - P_{y_{тр}})$  за счет уменьшения  $P_{y_{тр}}$ . Полученная зависимость (3.64) согласуется с известными экспериментальными данными [129]. С физической точки зрения зависимость (3.64) описывает производительность шлифования по упругой схеме. Из этого можно сделать вывод, что процесс шлифования по жесткой схеме (при недостаточной жесткости технологической системы) аналитически описывается теми же зависимостями (3.63) и (3.64), что и процесс шлифования по упругой схеме. Чем больше величина  $(P_y - P_{y_{тр}})$ , тем больше производительность обработки. В связи с этим следует провести анализ процесса шлифования по упругой схеме.

Очевидно, с увеличением составляющей силы резания  $P_y$  первоначально сила  $P_{y_{тр}}$  будет незначительна, а производительность обработки  $Q$  будет определяться значением  $P_y$ : чем оно больше, тем больше  $Q$ . При достижении определенного значения  $P_y$  в связи с недостаточной режущей способностью круга в контакт с обрабатываемым материалом вступит связка, что вызовет увеличение величины  $P_{y_{тр}}$ . В результате производительность обработки  $Q$  будет оставаться постоянной с увеличением  $P_y$  или уменьшаться.

Используя приведенные выше решения, произведена экспериментальная оценка силовой напряженности процесса внутреннего шлифования отверстий в кольцах из высокотвердого магнитного спла-

ва АНКО-3А (HRC 62 ... 63) и на основе полученных результатов определены оптимальные условия обработки.

Экспериментальные исследования проводились на внутришлифовальном станке модели WOUMARD-55 с использованием абразивного круга ПП 8×20×3 25А 25Н СТ 7К5 35 м/с. Шлифование осуществлялось по жесткой схеме с режимом резания: скорость вращения круга –  $V_{кр} = 16,7$  м/с (частота вращения круга – 40000 об./мин), продольная подача  $S_{прод} = 2$  м/мин, частота вращения обрабатываемой детали –  $n = 600$  об./мин, глубина шлифования  $t = 0,05$  мм (на двойной ход стола), через 5 – 10 проходов производится выхаживание.

Величина упругого перемещения  $y$ , возникающего в технологической системе, определена из условия разности подводимого в зону резания и снятого материала.

Как следует из рис. 3.11, величина упругого перемещения  $y$  увеличивается фактически по линейной зависимости с увеличением количества проходов круга  $n$ . Это связано со значительным расхождением фактической и номинальной глубин шлифования. Их отношение  $t_{ф} / t$  приблизительно равно 0,07 (рис. 3.11), т.е. номинальная глубина шлифования  $t$  превышает фактическую глубину шлифования  $t_{ф}$  в 14,3 раз. Причиной этому является высокая твердость обрабатываемого материала и быстрая потеря режущей способности абразивного круга, в результате чего происходит интенсивное трение связки круга с обрабатываемым материалом. Достаточно отметить, что производительность обработки при этом ничтожно мала и составляет всего  $Q = 0,4$  мм<sup>3</sup>/мин (рис. 3.12).

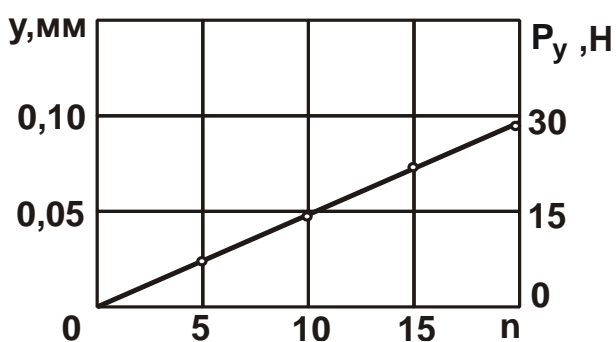


Рисунок 3.11 – Зависимость  $y$  и  $P_y$  от количества проходов круга

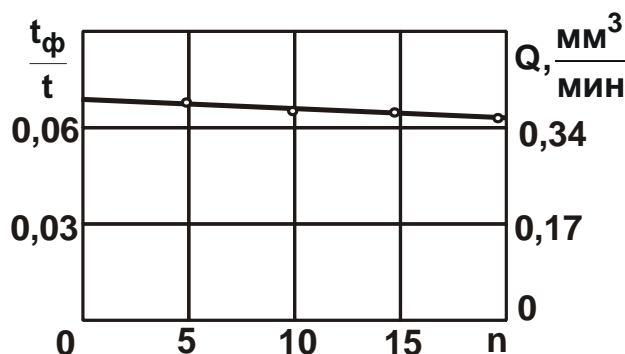


Рисунок 3.12 – Зависимости  $t_{ф} / t$  и  $Q$  от количества проходов круга

Исходя из зависимости (3.62), это связано с тем, что фактически выполняется условие  $P_{y_{тр}} \rightarrow P_y$  и производительность обработки  $Q \rightarrow 0$ . Низкий уровень производительности обработки обусловлен также низкой жесткостью системы шлифовального круга в поперечном направлении ( $c = 300$  Н/мм). Радиальная составляющая силы резания  $P_y = c \cdot y$ , исходя из рис. 3.11, с увеличением количества проходов круга  $n$  изменяется по закону изменения величины упругого перемещения  $y$  и при  $n = 20$  равна  $P_y = 30$  Н.

Естественно, осуществление процесса шлифования в этих условиях малоэффективно, особенно если учесть, что величина упругого перемещения  $y$  не может увеличиваться беспредельно с увеличением  $n$ . Как установлено экспериментально, она может изменяться лишь в пределах  $0,05 \dots 0,1$  мм, исходя из прочности и жесткости станка. Поэтому в данных условиях жесткую схему шлифования использовать нецелесообразно. Следует перейти к упругой схеме шлифования, создавая в технологической системе периодические натяги и осуществляя обработку, по сути, по схеме выхаживания. Данная схема является наиболее оптимальной при шлифовании с низкой жесткостью технологической системы, поскольку обеспечивает наибольшую производительность при заданной точности обработки.

Экспериментально установлено, что для нормального протекания процесса внутреннего шлифования эффективно в технологической системе создавать начальный натяг на уровне  $0,05$  мм. Тогда съём припуска величиной  $0,8$  мм может быть произведен за 16 этапов создания в технологической системе начальных натягов (рис. 3.13). Продолжительность каждого этапа составляет приблизительно  $\tau = 7,5$  мин, в результате чего припуск величиной  $0,8$  мм удаляется за 120 минут (2 часа).

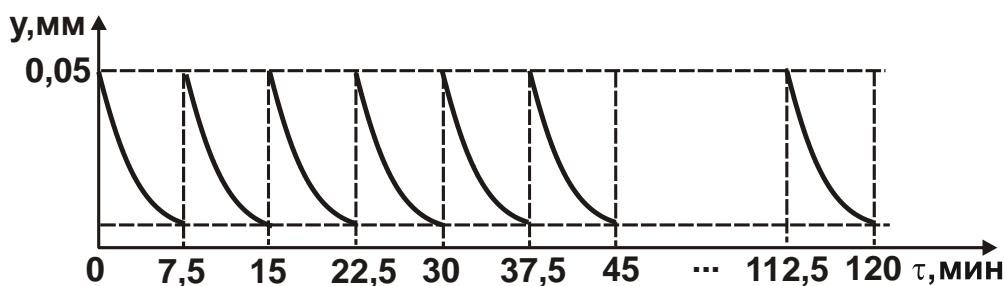


Рисунок 3.13 – Характер изменения величины  $y$  с течением времени обработки  $\tau$

По действующей технологии внутреннего шлифования (по жесткой схеме), продолжительность обработки составляет 3,2 часа. Таким образом показано, что переход от жесткой схемы шлифования к упругой схеме позволяет сократить время обработки более чем в 1,5 раза.

### **3.5. Определение условий осуществления процессов резания и пластического деформирования**

Процессы резания материалов, характеризующиеся относительно низкой энергоемкостью обработки, получили широкое применение при формообразовании поверхностей деталей, изготовленных из различных материалов. Вместе с тем, при обработке пластичных материалов, в особенности на финишных операциях, применение процессов резания не всегда эффективно, поскольку обрабатываемые материалы фактически не поддаются резанию. В этом случае целесообразно использовать методы поверхностного пластического деформирования, что позволяет получить высокую точность обработки и одновременно произвести упрочнение поверхностного слоя. В особой мере это относится к обработке деталей гидроаппаратуры авиационного назначения, изготовленных из высокопрочных пластичных материалов, которые плохо обрабатываются резанием. В связи с этим актуальна проблема определения условий эффективного перехода от процессов резания к процессам пластического деформирования.

В работах [210, 245] приведены результаты экспериментальных исследований по определению условий осуществления процессов резания и пластического деформирования материалов. Однако полученные решения носят частный характер и справедливы лишь для вполне конкретных условий обработки. Поэтому важно установить обобщенные аналитические решения, справедливые для широких диапазонов изменения варьируемых параметров, что позволит более полно научно обосновать технологические возможности механической обработки.

Целью работы является определение условий повышения эффективности механической обработки деталей из высокопрочных пластичных материалов на основе установления границ осуществления процессов резания и пластического деформирования.

Из зависимостей (3.29) – (3.31) следует, что с увеличением отрицательного переднего угла  $\gamma$  величины  $P$ ,  $P_z$  и  $P_y$  неограниченно уве-



личиваются. Это свидетельствует о невозможности осуществления в данных условиях процесса резания. Поэтому возникает необходимость определения границ, при которых реализуется процесс резания. Иными словами, необходимо установить предельные значения отрицательного переднего угла  $\gamma$ , при которых процесс резания переходит в процесс пластического деформирования металла без образования стружки.

Исходя из рис. 3.14, на передней поверхности инструмента действует сила резания  $P$ , которую, с одной стороны, можно разложить на две составляющие  $P_z$  и  $P_y$ , а с другой стороны, – на две составляющие  $N$  и  $f \cdot N$ , действующие, соответственно, перпендикулярно и параллельно передней поверхности инструмента. Между составляющими силы резания  $P_z$ ,  $P_y$  и  $N$ ,  $f \cdot N$  существуют связи:

$$\begin{cases} P_z = N \cdot \frac{\cos(\gamma + \psi)}{\cos \psi}; \\ P_y = N \cdot \frac{\sin(\gamma + \psi)}{\cos \psi}. \end{cases} \quad (3.65)$$

Составляющую силы резания  $N$  (для единичной ширины среза) в первом приближении можно представить в виде  $N = HV \cdot l$ , где  $HV$  – твердость обрабатываемого материала (по Виккерсу),  $H/m^2$ ;  $l = OA = a_1 / \cos \gamma$  – длина контакта передней поверхности инструмента с обрабатываемым материалом, м.

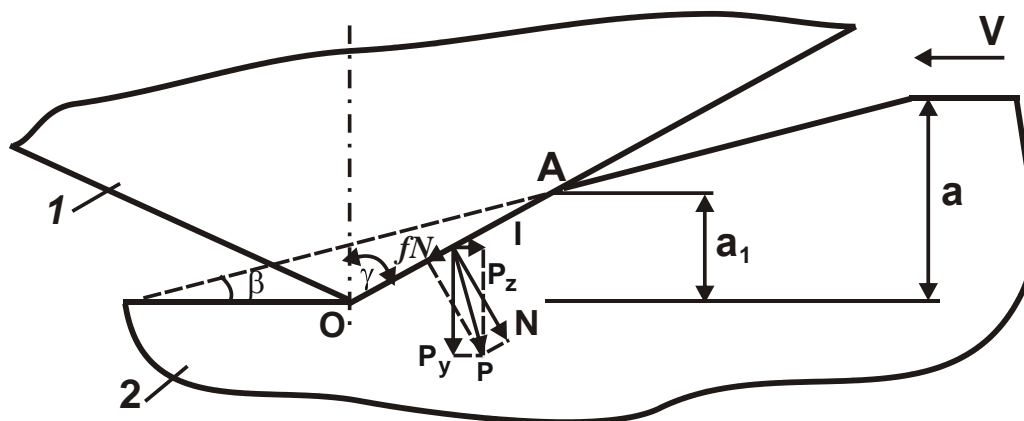


Рисунок 3.14 – Расчетная схема процесса резания:  
1 – резец; 2 – обрабатываемый материал

Сравнивая значения радиальной составляющей силы резания  $P_y$  по приведенным зависимостям, установлена связь  $a_1/a$  с углом  $\gamma$ :

$$\frac{a_1}{a} = \frac{2 \cdot \tau_{сдв}}{HV} \cdot \frac{\cos \gamma \cdot \cos \psi}{[1 - \sin(\gamma + \psi)]} \quad (3.66)$$

С увеличением угла  $\gamma$  отношение  $a_1/a$  непрерывно увеличивается – до бесконечности при значении  $\gamma = 90^\circ - \psi$ . Очевидно, при условии  $a_1/a > 1$  процесс резания неосуществим, а возможен лишь процесс пластического деформирования обрабатываемого материала. Следовательно, существует предельное значение угла  $\gamma$ , при котором процесс резания переходит в процесс пластического деформирования. Исходя из зависимости (3.66), предельный угол  $\gamma$  зависит от угла  $\psi$ : чем больше угол  $\psi$ , тем меньше угол  $\gamma$ . Поэтому основным условием расширения границы осуществления процесса резания является уменьшение угла  $\psi$ .

Отношение  $a_1/a$  во многом зависит от отношения  $2 \cdot \tau_{сдв}/HV \approx \sigma_{вр}/HV$  (где  $\sigma_{вр}$  – временное сопротивление, Н/м<sup>2</sup>). Чем больше данное отношение, тем больше  $a_1/a$  и, соответственно, меньше предельный угол  $\gamma$ , при котором возможен процесс резания. Отношение  $\sigma_{вр}/HV$  для разных обрабатываемых материалов принимает различные значения: для сталей – 0,33, для твердого сплава ВК8 – 0,09, а для цветных металлов (например, меди) – больше 0,5 [83].

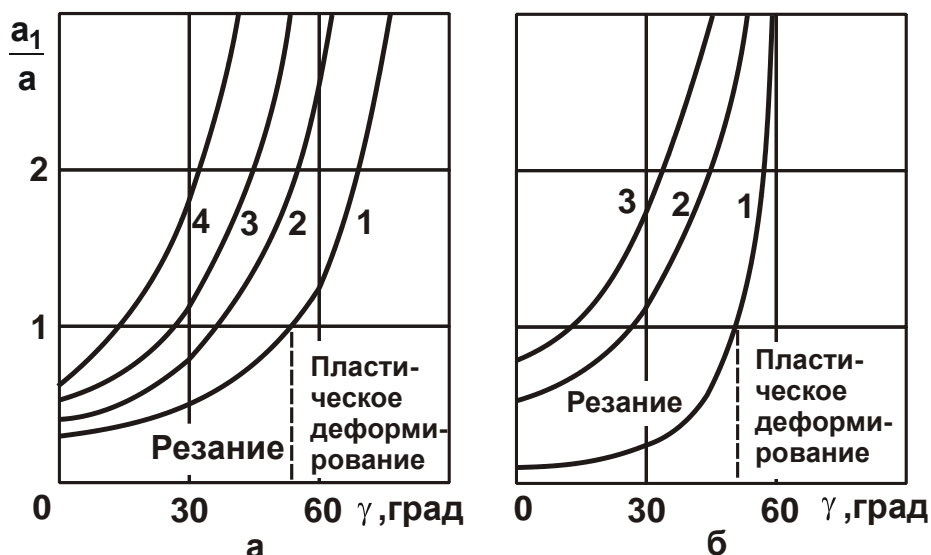


Рисунок 3.15 – Зависимости  $a_1/a$  от угла  $\gamma$ : а – обрабатываемый материал – быстрорежущая сталь Р12Ф5М (1 –  $\psi = 0^\circ$ ; 2 –  $\psi = 10^\circ$ ; 3 –  $\psi = 20^\circ$ ; 4 –  $\psi = 30^\circ$ ); б – твердый сплав ВК8 (1); быстрорежущая сталь Р12Ф5М (2); медь (3) для  $\psi = 20^\circ$

На рис. 3.15,а приведены рассчитанные по зависимости (3.66) значения  $a_1/a$  при обработке быстрорежущей стали Р12Ф5М ( $2 \cdot \tau_{сдв} / HV = 0,3$ ) для различных значений угла  $\psi$ . С увеличением угла  $\psi$  отношение  $a_1/a$  увеличивается, а граничные значения угла  $\gamma$  (при которых выполняется условие  $a_1/a = 1$ ) уменьшаются, принимая значения, близкие к нулю. Поэтому уменьшение интенсивности трения инструментального и обрабатываемого материалов является важным условием увеличения предельных значений угла  $\gamma$  и, соответственно, расширения границ осуществления процесса резания.

На рис. 3.15,б приведены рассчитанные по зависимости (3.66) значения  $a_1/a$  для стали, твердого сплава ВК8 и меди. Условие  $a_1/a = 1$  для меди выполняется при меньших значениях угла  $\gamma$ , чем для стали и твердого сплава ВК8. Следовательно, стружкообразование при резании пластичных материалов затруднено. В этом случае необходимо уменьшать отрицательный передний угол инструмента  $\gamma$  (вплоть до положительного значения). В противном случае процесс резания неосуществим, возможен лишь процесс пластического деформирования. Из этого вытекает, например, что процесс резания пластичных материалов абразивными инструментами фактически неосуществим, а хрупких материалов, наоборот, достаточно эффективен (за счет увеличенного отношения  $HV / \tau_{сдв}$ ).

На рис. 3.16 приведена структурная схема эффективных методов обработки материалов, исходя из которой обработку пластичных материалов (в особенности цветных металлов) целесообразно производить резанием лезвийными инструментами или пластическим деформированием (на финишных операциях).

В результате износа режущего инструмента на его вершине, как правило, образуется криволинейная (радиусная) поверхность. Это приводит к тому, что фактический передний угол становится отличным от номинального переднего угла инструмента  $\gamma$  и принимает отрицательные значения. Поэтому важно установить связь между фактическим передним углом инструмента  $\gamma$  и радиусом округления его вершины  $R$  на примере микрорезания единичным абразивным зерном.

На рис. 3.17 приведена расчетная схема процесса микрорезания единичным зерном, исходя из которой установлена зависимость

$l = 2R \cdot \cos \gamma$ , где  $l=OA$  – длина контакта передней поверхности инструмента с обрабатываемым материалом, м.

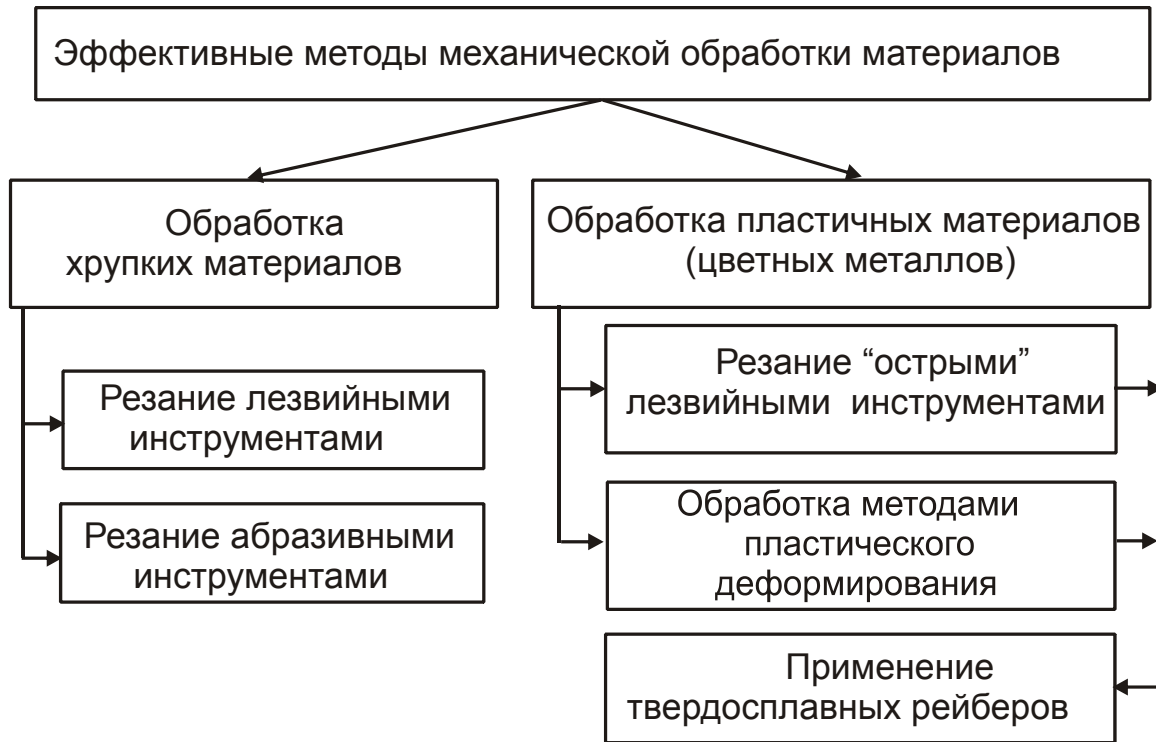


Рисунок 3.16 – Структурная схема эффективных методов обработки материалов

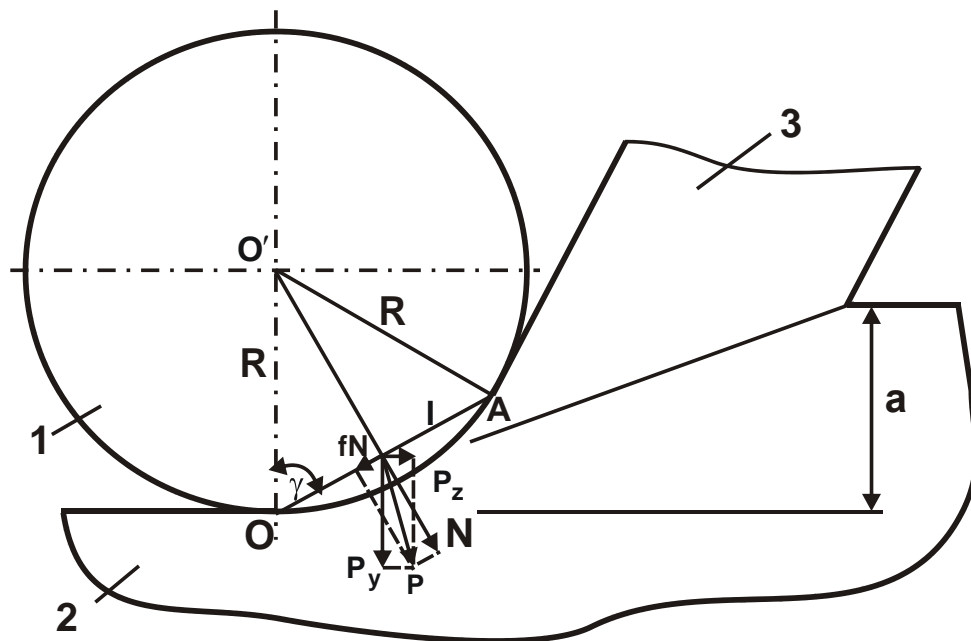


Рисунок 3.17 – Расчетная схема процесса микрорезания единичным зерном: 1 – режущее зерно; 2 – обрабатываемый материал; 3 – образующаяся стружка

Преобразуя зависимости (3.65) и (3.66) для определения радиальной составляющей силы резания  $P_y$ , с учетом отношения  $l = 2R \cdot \cos \gamma$ , имеем:

$$\frac{a}{R} = \frac{HV}{\tau_{сдв}} \cdot \frac{\cos \gamma}{\cos \psi} \cdot [1 - \sin(\gamma + \psi)]. \quad (3.67)$$

Как видно, с увеличением угла  $\gamma$  отношение  $a/R$  однозначно уменьшается. Очевидно, это ухудшает условия стружкообразования при резании. Угол  $\psi$  оказывает на  $a/R$  неоднозначное влияние. Однако, учитывая то, что угол  $\psi$  изменяется в пределах  $0 \dots 45^\circ$ , функция  $1 - \sin(\gamma + \psi)$  подвержена большему изменению, чем функция  $\cos \psi$ . В результате отношение  $a/R$  с увеличением угла  $\psi$  будет уменьшаться, что приведет к ухудшению условий стружкообразования.

Из зависимости (3.67) следует, что чем меньше отношение  $HV / \tau_{сдв}$ , тем меньше отношение  $a/R$ . Следовательно, стружкообразование при резании пластичных материалов затруднено. В этом случае необходимо уменьшать отрицательный передний угол инструмента  $\gamma$ . В противном случае процесс резания неосуществим, а возможно лишь пластическое деформирование обрабатываемого материала. Из этого вытекает, например, что процесс резания пластичных материалов абразивными инструментами практически неосуществим, тогда как хрупких материалов, наоборот, достаточно эффективен (за счет увеличенного отношения  $HV / \tau_{сдв}$ ). Поэтому обработку пластичных материалов целесообразно производить резанием лезвийными инструментами или методами пластического деформирования.

Обозначим  $\alpha = \frac{a}{R} \cdot \frac{\tau_{сдв}}{HV}$ , тогда зависимость (3.67) примет вид:

$$\alpha = \frac{\cos \gamma}{\cos \psi} \cdot [1 - \sin(\gamma + \psi)]. \quad (3.68)$$

В табл. 3.5 приведены расчетные значения безразмерной величины  $\alpha$ . С увеличением  $\gamma$  величина  $\alpha$  уменьшается до нуля. С увеличением угла  $\psi$  нулевое значение  $\alpha$  достигается при меньших значениях  $\gamma$ .

Проведем анализ изменения отношения  $a/R$  для стали (рассматривая  $HV / \tau_{сдв} = 6$ ) в соответствии с зависимостью  $a/R = 6 \cdot \alpha$ , по-

лученной на основе зависимости (3.68). Как известно, процесс пластического деформирования материала переходит в процесс стружкообразования (резания) при отношениях  $a/R > 0,04$ . Исходя из приведенных данных  $a/R$ , это достигается при разных значениях отрицательного переднего угла инструмента  $\gamma$  (в зависимости от условного угла трения  $\psi$ ). При  $\psi > 10^0$  это условие выполняется при  $\gamma < 70^0$ .

Таблица 3.5 – Расчетные значения безразмерной величины  $\alpha$

$\gamma$ , град	30	45	60	70	80	90
для $\psi = 0^0$	0,433	0,207	0,067	0,02	0,0026	0
для $\psi = 10^0$	0,314	0,13	0,031	0,0053	0	
для $\psi = 20^0$	0,2156	0,0705	0,008	0		
для $\psi = 30^0$	0,134	0,0278	0			

Полученные результаты были использованы при обработке высокоточных отверстий во втулках из бронзы Бр 010С2Н3 твердостью  $HB \geq 75$ . Как показывает практика, обработка характеризуется чрезвычайно высокой трудоемкостью в связи с низкой эффективностью процесса растачивания твердосплавными резцами – низким качеством обрабатываемой поверхности. Низкие показатели качества обработки требуют применения дополнительной финишной операции рейберования, позволяющей обеспечить необходимые показатели точности и шероховатости поверхности. Однако процесс рейберования характеризуется высокой трудоемкостью обработки, поскольку производится за 4 достаточно продолжительные прохода рейбера. Естественно, это требует изыскания новых технологических решений, повышающих эффективность обработки отверстий в бронзовых втулках.

Одним из таких решений стало применение высокоскоростного растачивания отверстий, которое позволяет существенно уменьшить толщину среза и силы резания без снижения производительности обработки. В связи с этим был проведен комплекс экспериментальных исследований процесса высокоскоростного растачивания отверстий в бронзовых втулках на современном высокооборотном обрабатывающем центре с ЧПУ модели "Picomax-60M". Деталь была неподвижна, вращался резец. Режимы резания: частота вращения  $n = 8000$  об./мин; продольная подача  $S = 0,02$  мм/об. В результате проведенных экспе-

риментов установлено, что процесс высокоскоростного растачивания отверстий обеспечивает повышение параметров качества обработки: шероховатость поверхности находится на уровне  $R_a = 0,63$  мкм, а погрешность обработки – в пределах 5 мкм. Производительность обработки увеличена более чем в 3 раза. Это позволило уменьшить трудоемкость последующей операции рейберования более чем в 2 раза, поскольку требуемые параметры качества обработки (шероховатость поверхности  $R_a = 0,16$  мкм, отклонение от цилиндричности 3 мкм, бочкообразность 3 мкм и разноразмерность 9-ти обработанных поршневых отверстий 3 мкм) формируются всего за 2 прохода рейбера (вместо 4-х проходов по действующей технологии). Операция рейберования выполняется двумя рейберами. Предварительное рейберование осуществляется аналогично процессу точного зенкерования. Рейбер имеет 6 режущих кромок и снимает припуск 0,015 мм. Окончательное рейберование с обеспечением требуемых параметров качества обработки отверстия диаметром 10 мм (шероховатость поверхности  $R_a = 0,16$  мкм) производится методом пластического деформирования аналогично выглаживанию. Припуск составляет 0,0025 мм, в результате осуществляется процесс пластического упрочнения обрабатываемого материала (бронзы). Рейбер изготавливается из твердого сплава BK8 или из материала UF10 фирмы "TAEGUTEC". Режимы обработки при рейберовании: частота вращения  $n = 260$  об./мин; продольная подача  $S = 0,015$  мм/об.; СОТС – АМГ10.

### **3.6. Определение условий уменьшения силовой напряженности процесса шлифования**

При шлифовании материалов повышенной твердости возникают значительные силы резания, которые резко снижают производительность обработки и ухудшают качество обрабатываемых поверхностей. Это относится к шлифованию твердых сплавов, высокотвердых керамик, наплавочных материалов и т.д. Так, при шлифовании контактных (рабочих) поверхностей крупногабаритных изделий металлургического назначения с износостойкими наплавочными материалами высокой твердости, вследствие повышенной силовой напряженности процесса абразивный круг интенсивно изнашивается, и производительность обработки принимает весьма малые значения. Применение алмазных

кругов на высокопрочных металлических связках взамен абразивных кругов позволяет снизить силовую напряженность процесса. Однако при этом алмазный круг интенсивно засаливается и теряет режущую способность, что требует его постоянной электроэрозионной правки, реализовать которую при высокопроизводительном шлифовании сложно. Все это предполагает изыскания новых технологических возможностей повышения эффективности шлифования материалов повышенной твердости.

В работах [106, 175] обоснованы основные направления интенсификации процесса шлифования. Однако они основаны на результатах экспериментальных исследований, полученных для частных условий обработки, что не позволяет установить общие решения, справедливые для широких диапазонов изменения параметров режимов шлифования, характеристик кругов и т.д. Поэтому необходимо получить аналитические решения, которые лишены указанных недостатков. Научной предпосылкой получения таких решений следует рассматривать теоретический подход к определению параметров силовой напряженности шлифования, приведенный в работе [136].

Целью исследования является теоретическое обоснование условий снижения силовой напряженности процесса шлифования материалов повышенной твердости. Для решения этой задачи важно теоретически оценить возможности уменьшения радиальной составляющей силы резания, которая определяет условия внедрения режущего зерна в обрабатываемый материал при микрорезании. Важно также сравнить силы, возникающие в процессе микрорезания единичным зерном и при вдавливании зерна в обрабатываемый материал, что позволит более полно раскрыть возможности снижения силовой напряженности процесса шлифования. Располагая аналитическим решением для определения радиальной составляющей силы резания, можно будет определить фактическую толщину среза при шлифовании, в том числе с учетом упругих перемещений в технологической системе, и ее расхождение с номинальной толщиной среза.

Радиальная составляющая силы резания  $P_y$  при шлифовании, рассматривая отрицательным передний угол режущего абразивного зерна  $\gamma$ , описывается преобразованной аналитической зависимостью (3.31):



$$P_y = \frac{2 \cdot \tau_{сдв} \cdot S \cdot \sin(\gamma + \psi)}{[1 - \sin(\gamma + \psi)]}, \quad (3.69)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения среза,  $m^2$ .

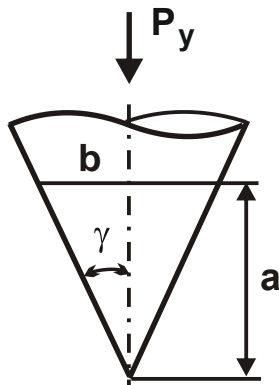


Рисунок 3.18 – Расчетная схема площади поперечного сечения среза

Рассматривая зерно в форме конуса с углом при вершине  $2\gamma$  (рис. 3.18), площадь поперечного сечения среза  $S$  с учетом  $b = 2a \cdot \operatorname{tg}\gamma$  выразится:

$$S = 2a^2 \cdot \operatorname{tg}\gamma, \quad (3.70)$$

где  $a, b$  – толщина и ширина среза,  $m$ .

Тогда зависимость (3.69) с учетом известных выражений  $\tau_{сдв} \approx 0,5 \cdot \sigma_{сж}$  и  $HV \approx 3 \cdot \sigma_{сж}$  (для стали) примет вид:

$$P_y = \frac{0,67 \cdot HV \cdot a^2 \cdot \sin(\gamma + \psi) \cdot \operatorname{tg}\gamma}{[1 - \sin(\gamma + \psi)]}, \quad (3.71)$$

где  $\sigma_{сж}$  – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала,  $H/m^2$ ;  $HV$  – твердость обрабатываемого материала (по Виккерсу),  $H/m^2$ .

Исходя из зависимости (3.71), радиальная составляющая силы резания  $P_y$  определяется, главным образом, суммой углов  $(\gamma + \psi)$ . С их увеличением величина  $P_y$  увеличивается, причем, при  $(\gamma + \psi) \rightarrow 90^\circ$  – до бесконечности ( $P_y \rightarrow \infty$ ), что связано с прекращением процесса резания (стружкообразования) и осуществлением лишь пластического деформирования обрабатываемого материала. Следовательно, уменьшить величину  $P_y$  можно уменьшением углов  $\gamma$  и  $\psi$ , обеспечивая в процессе шлифования высокую остроту режущих зерен.

Важно сравнить радиальную составляющую силы резания  $P_y$  с силой  $P$ , возникающей при вдавливании зерна в обрабатываемый материал на глубину  $a$ :

$$P = \pi \cdot a^2 \cdot \operatorname{tg}^2\gamma \cdot HV. \quad (3.72)$$

В табл. 3.6 приведены значения относительных величин  $\frac{P_y}{HV \cdot a^2}$  (перед чертой) и  $\frac{P}{HV \cdot a^2}$  (после черты), рассчитанных, соответственно, по зависимостям (3.71) и (3.72). Как видно, для значений  $\gamma > 30^\circ$  и

$\psi > 10^0$  справедливо условие  $\frac{P_y}{HV \cdot a^2} > \frac{P}{HV \cdot a^2}$ . Следовательно, процесс микрорезания с фиксированной толщиной среза  $a$  характеризуется большей силовой напряженностью, чем процесс вдавливания зерна в обрабатываемый материал на глубину  $a$ . Этим объясняется то, что процесс шлифования происходит с высокой силовой напряженностью, интенсивным износом зерен и низкой производительностью обработки. Кроме того, под действием силы  $P_y$  (вследствие возникновения в технологической системе упругого перемещения) зерно вытесняется из обрабатываемого материала и процесс резания практически не происходит, поскольку фактическая толщина среза стремится к нулю.

Таблица 3.6 – Расчетные значения относительных величин

$$\frac{P_y}{HV \cdot a^2} \text{ и } \frac{P}{HV \cdot a^2}$$

$\psi^0$	$\gamma^0$			
	30	45	60	70
10	0,7 / 1,05	3,0 / 3,14	18,2 / 9,41	119 / 23,7
20	1,26 / 1,05	6,48 / 3,14	75,2 / 9,41	$\infty$ / 23,7
30	10,9 / 1,05	19 / 3,14	$\infty$ / 9,41	$\infty$ / 23,7

Теоретические результаты подтверждаются экспериментальными данными, приведенными в работе [210] (рис. 3.19). Как следует из рисунка, при микрорезании единичным зерном толщина среза меньше глубины внедрения зерна в обрабатываемый металл в момент прекращения процесса микрорезания. Это соответствует теоретическому решению, согласно которому при одинаковом значении величин  $P_y$  и  $P$  толщина среза при микрорезании меньше глубины внедрения зерна в обрабатываемый металл при его вдавливании.

Таким образом, теоретически обоснованы принципиальные отличия процессов микрорезания и вдавливания неподвижного зерна в обрабатываемый металл. Следовательно, по твердости обрабатываемого материала сложно судить о его обрабатываемости, поскольку зависимости для определения величин  $P_y$  и  $P$  существенно отличаются. Так, радиальная составляющая силы резания  $P_y$  определяется суммой углов  $(\gamma + \psi)$ , а сила  $P$  – лишь углом  $\gamma$ .

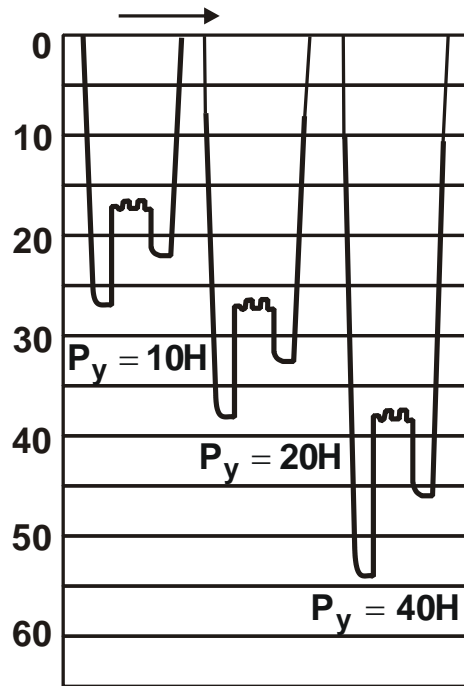


Рисунок 3.19 – Глубина внедрения (в мкм) алмазного конуса  $2\gamma = 120^\circ$  в армо-железо (103 HV) при вдавливании, царапании и остановках

При микрорезании вследствие образования упругих перемещений в технологической системе фактическая толщина среза  $a_\phi$  всегда меньше номинальной толщины среза  $a$ . В связи с этим важно аналитически оценить степень их отличия на основе условия равенства радиальной составляющей силы резания  $P_y$  и упруго-восстанавливающей силы ( $c \cdot y$ ), где  $c$  – жесткость технологической системы, Н/м;  $y$  – упругое перемещение в системе, м.

С учетом зависимости (3.71), рассматривая в ней вместо  $a$  фактическую толщину среза  $a_\phi$ , получено:

$$c \cdot (a - a_\phi) = \frac{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot a_\phi^2 \cdot \sin(\gamma + \psi) \cdot \operatorname{tg} \gamma}{[1 - \sin(\gamma + \psi)]}. \quad (3.73)$$

Решая квадратное уравнение относительно величины  $a_\phi$ , имеем:

$$a_\phi = \left[ \frac{a}{\sqrt{0,25 + \frac{a \cdot A}{c}} + 0,5} \right], \quad (3.74)$$

где  $A = \frac{2 \cdot \sigma_{сж} \cdot \sin(\gamma + \psi) \cdot \operatorname{tg} \gamma}{[1 - \sin(\gamma + \psi)]}$ .

При условии  $c \rightarrow \infty$  фактическая толщина среза  $a_{\text{ф}} \rightarrow a$ , т.е. расчеты по определению величины  $a_{\text{ф}}$  выполнены правильно. С уменьшением величины  $A$  также  $a_{\text{ф}} \rightarrow a$ , что связано с уменьшением углов  $\gamma$  и  $\psi$  в результате повышения режущей способности круга.

Таким образом получены аналитические зависимости для определения радиальной составляющей силы резания при микрорезании единичным зерном и силы вдавливания неподвижного зерна в обрабатываемый металл. Показано, что при одинаковом значении этих сил толщина среза при микрорезании всегда меньше глубины внедрения зерна в металл при вдавливании. Установлено также, что повысить эффективность шлифования с точки зрения снижения силовой напряженности процесса можно главным образом за счет обеспечения высокой режущей способности круга.

### **3.7. Условия возникновения и пути устранения колебаний при шлифовании**

Общеизвестно, что возникающие при механической обработке колебания отрицательно влияют на качество, точность и производительность обработки [219, 226]. В особой мере это относится к операциям шлифования, на которых, как правило, окончательно формируются параметры качества и точности обработки. Поэтому проблема изучения условий возникновения колебаний и путей их устранения является актуальной и важной, несмотря на то, что в научно-технической литературе опубликовано достаточно большое количество работ в данном направлении. В связи с этим в работе проведен теоретический анализ поведения технологической системы с учетом силы инерции, возникающей вследствие взаимодействия шлифовального круга с обрабатываемым образцом, который движется по нормали к рабочей поверхности круга с заданной скоростью  $V_0$ . В расчетной схеме обрабатываемый образец (как наиболее слабое звено в технологической системе) представлен приведенной массой  $m$ , удерживаемой на пружинке жесткостью  $c$  (рис. 3.20).

Принято, что колебания приведенной массы  $m$  при шлифовании возникают от действия на нее трех сил: радиальной составляющей си-

лы резания  $P_y = \frac{\sigma \cdot F}{K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot V(\tau)$  [229], силы упругости системы –  $c \cdot y$  и силы сопротивления –  $k_1 \cdot \dot{y}$ , где  $\sigma$  – условное напряжение резания при шлифовании, Н/м<sup>2</sup>;  $K_{ш} = P_z / P_y$  – коэффициент шлифования;  $P_z$  – тангенциальная составляющая силы резания при шлифовании, Н;  $F$  – площадь поперечного сечения обрабатываемого образца, м<sup>2</sup>;  $V_{кр}$  – скорость круга, м/с;  $V(\tau)$  – фактическая скорость перемещения обрабатываемого образца по нормали к рабочей поверхности круга, м/с;  $\tau$  – время обработки, с;  $c$  – приведенная жесткость технологической системы в радиальном направлении, Н/м;  $k_1$  – коэффициент сопротивления;  $y, \dot{y}$  – величина упругого перемещения и скорость перемещения массы  $m$ .

Под действием этих сил приведенная масса  $m$  совершает движение, описываемое дифференциальным уравнением:

$$\frac{\sigma \cdot F}{K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot V(\tau) - c \cdot y - k_1 \cdot \dot{y} = m \cdot \ddot{y}, \quad (3.75)$$

где  $\ddot{y}$  – ускорение движения приведенной массы  $m$ .

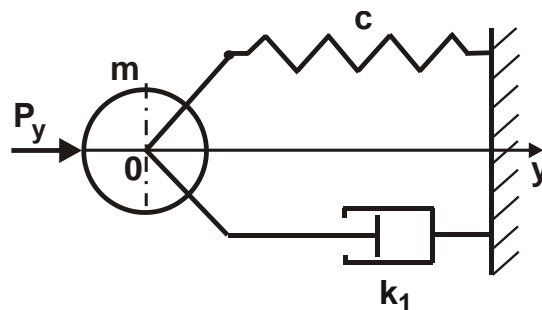


Рисунок 3.20 – Динамическая модель процесса шлифования

В данном случае, в отличие от статического равновесия элементов технологической системы, радиальная составляющая силы резания  $P_y$  не равна силе упругости системы –  $c \cdot y$  и, соответственно, не выполняется условие равновесия системы. Между величинами  $y$  и  $V(\tau)$  существует связь, выражаемая уравнением баланса перемещений в технологической системе:

$$V_0 \cdot \tau = \int_0^{\tau} V(\tau) \cdot d\tau + y, \quad (3.76)$$

где  $\int_0^{\tau} V(\tau) \cdot d\tau$  – величина снятого припуска за время  $\tau$ , м.

Дифференцируя все слагаемые уравнения (3.76) по времени  $\tau$ , имеем:

$$V(\tau) = V_0 - \dot{y}. \quad (3.77)$$

Подставляя данное соотношение в уравнение (3.75) с учетом принятого обозначения  $B = \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$ , получено:

$$\ddot{y} + \frac{(k_1 + c \cdot B)}{m} \cdot \dot{y} + \frac{c}{m} \cdot y = \frac{c}{m} \cdot B \cdot V_0. \quad (3.78)$$

Частное решение дифференциального уравнения:

$$y = A. \quad (3.79)$$

Подставляя зависимость (3.79) в (3.78), имеем

$$A = B \cdot V_0. \quad (3.80)$$

Решим однородное уравнение:

$$\ddot{y} + \frac{(k_1 + c \cdot B)}{m} \cdot \dot{y} + \frac{c}{m} \cdot y = 0. \quad (3.81)$$

Для этого следует составить его характеристическое уравнение:

$$r^2 + \frac{(k_1 + c \cdot B)}{m} \cdot r + \frac{c}{m} = 0. \quad (3.82)$$

Решение квадратного уравнения:

$$\begin{aligned} r &= -\frac{(k_1 + c \cdot B)}{2m} \pm \sqrt{\frac{(k_1 + c \cdot B)^2}{4m^2} - \frac{c}{m}} = \\ &= -\frac{k^2 \cdot \left( k_1 + \frac{\sigma \cdot F}{K_{ш} \cdot V_{кр}} \right)}{2c} \pm k \cdot \sqrt{\frac{k^2 \cdot \left( k_1 + \frac{\sigma \cdot F}{K_{ш} \cdot V_{кр}} \right)^2}{4c^2} - 1}, \end{aligned} \quad (3.83)$$

где  $k = \sqrt{\frac{c}{m}}$ .

Подкоренное выражение в зависимости (3.83) может быть как отрицательным, так и положительным. Все зависит от входящих параметров. При отрицательном значении подкоренного выражения зависимость (3.83) принимает вид:

$$r = -\alpha \pm i \cdot \beta, \quad (3.84)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  – действительная и мнимая части комплексного корня;

$$\alpha = \frac{(k_1 + c \cdot B)}{2m} = \frac{k^2 \cdot \left( k_1 + \frac{\sigma \cdot F}{K_{ш} \cdot V_{кр}} \right)}{2c};$$

$$\beta = \sqrt{\frac{c}{m} - \frac{(k_1 + c \cdot B)^2}{4m^2}} = k \cdot \sqrt{1 - \frac{k^2 \cdot \left( k_1 + \frac{\sigma \cdot F}{K_{ш} \cdot V_{кр}} \right)^2}{4c^2}}.$$

Здесь величина  $\beta$  определяет собственную частоту системы. В этом случае общее решение дифференциального уравнения (3.78) опишется зависимостью:

$$y = e^{-\alpha \cdot \tau} \cdot (C_1 \cdot \cos \beta \tau + C_2 \cdot \sin \beta \tau) + A, \quad (3.85)$$

где  $C_1, C_2$  – постоянные интегрирования, определяются из начальных условий:  $y(\tau = 0) = 0$ ;  $\dot{y}(\tau = 0) = V_0$ .

Определим величину  $\dot{y}$ :

$$\dot{y} = -\alpha \cdot e^{-\alpha \cdot \tau} (C_1 \cdot \cos \beta \tau + C_2 \cdot \sin \beta \tau) + \beta e^{-\alpha \cdot \tau} (-C_1 \cdot \sin \beta \tau + C_2 \cdot \cos \beta \tau). \quad (3.86)$$

Подчиняя зависимости (3.85) и (3.86) начальным условиям, имеем

$$C_1 = -B \cdot V_0; \quad C_2 = \frac{V_0}{\beta} \cdot (1 - \alpha \cdot B). \quad (3.87)$$

Подставляя постоянные  $C_1, C_2$  в зависимости (3.85) и (3.86), получим:

$$y = y_{уст} \cdot \left[ 1 - e^{-\alpha \cdot \tau} \cdot \left( \cos \beta \tau - \frac{(1 - \alpha \cdot B)}{\beta \cdot B} \cdot \sin \beta \tau \right) \right]; \quad (3.88)$$

$$\dot{y} = V_0 \cdot e^{-\alpha \cdot \tau} \cdot \left( \cos \beta \tau - \left( \frac{\alpha}{\beta} - \frac{\alpha^2}{\beta} \cdot B - \beta \cdot B \right) \cdot \sin \beta \tau \right), \quad (3.89)$$

где  $y_{уст} = B \cdot V_0$ .

Соответственно

$$V(\tau) = V_0 - \dot{y} = V_0 \cdot \left[ 1 - e^{-\alpha \cdot \tau} \cdot \left( \cos \beta \tau + \left( \frac{\alpha}{\beta} - \frac{\alpha^2}{\beta} \cdot B - \beta \cdot B \right) \cdot \sin \beta \tau \right) \right]. \quad (3.90)$$

Характер изменения величин  $y$  и  $V(\tau)$  с течением времени обработки  $\tau$  примерно одинаковый (рис. 3.21). Как видно, приведенная масса  $m$  совершает затухающие колебания. В начальный момент обработки величины  $y$  и  $V(\tau)$  могут существенно превышать соответ-

ственно значения  $y_{уст}$  и  $V_0$ . По мере затухания колебаний массы  $m$  величины  $y$  и  $V(\tau)$  стабилизируются и принимают соответственно значения  $y_{уст}$  и  $V_0$ .

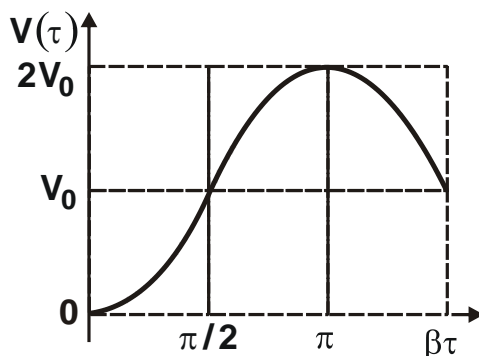


Рисунок 3.21 – Зависимость скорости  $V(\tau)$  перемещения массы  $m$  от времени обработки  $\tau$

Продолжительность колебаний зависит как от коэффициента сопротивления  $k_1$ , так и от условий обработки, обобщенно определяемых безразмерным параметром  $B$ .

Необходимо отметить, что при определенных условиях обработки подкоренное выражение, входящее в зависимость (3.83), может быть положительным. В этом случае колебания в технологической системе не будут возникать. Это вытекает из решения уравнения (3.78), которое принимает вид:

$$y = C_1 \cdot e^{r_1 \cdot \tau} + C_2 \cdot e^{r_2 \cdot \tau} + A, \quad (3.91)$$

где  $r_1, r_2$  – действительные (отрицательные) корни характеристического уравнения (3.82).

С течением времени обработки  $\tau$  первые два слагаемые зависимости (3.91) уменьшаются вплоть до нуля и величина  $y$  принимает значение  $y = A = B \cdot V_0 = y_{уст}$ . Поэтому, чтобы исключить возбуждение колебаний и тем самым обеспечить стабильное протекание процесса шлифования, необходимо добиться положительного значения подкоренного выражения в зависимости (3.83), т.е. выполнить условие:

$$\frac{(k_1 + c \cdot B)^2}{4m^2} \geq \frac{c}{m} \quad \text{или} \quad \left( k_1 + \frac{\sigma \cdot F}{K_{ш} \cdot V_{кр}} \right)^2 \geq 4 \cdot c \cdot m. \quad (3.92)$$



Это может быть достигнуто при увеличенных значениях параметра  $B$ , который, по сути, определяет постоянную часть радиальной составляющей силы резания  $P_y = c \cdot B \cdot V(\tau)$ . Переменной частью в данном случае является скорость перемещения обрабатываемого образца  $V(\tau)$ .

Таким образом показано, что при шлифовании появляется возможность устранения колебаний в технологической системе за счет увеличения радиальной составляющей силы резания  $P_y$ . Эффект обусловлен тем, что, исходя из уравнения (3.78), радиальная составляющая силы резания  $P_y$ , по сути, выполняет функцию силы сопротивления. В результате суммарная сила сопротивления увеличивается, а это при определенных условиях обработки может привести к устранению колебаний в системе.

Полученное решение расширяет традиционные подходы устранения колебаний в механических системах. Так, согласно расчетной схеме, представленной на рис. 3.20, свободные колебания в системе описываются уравнением:

$$m \cdot \ddot{y} + k_1 \cdot \dot{y} + c \cdot y = 0 \quad \text{или} \quad \ddot{y} + \frac{k_1}{m} \cdot \dot{y} + \frac{c}{m} \cdot y = 0. \quad (3.93)$$

Его характеристическое уравнение:

$$r^2 + \frac{k_1}{m} \cdot r + \frac{c}{m} = 0. \quad (3.94)$$

Решая уравнение (3.94), имеем:

$$r = -\frac{k_1}{2m} \pm \sqrt{\frac{k_1^2}{4m^2} - \frac{c}{m}} = -\frac{k_1}{2m} \pm k \cdot \sqrt{\frac{k_1^2}{4m \cdot c} - 1}. \quad (3.95)$$

Как видно, зависимость (3.95) отличается от аналогичной зависимости (3.83) тем, что не содержит слагаемое  $c \cdot B = \frac{\sigma \cdot F}{K_{ш} \cdot V_{кр}}$ . Согласно зависимости (3.95), устранить колебания можно при условии:

$$\frac{k_1^2}{4m \cdot c} \geq 1, \quad (3.96)$$

то есть за счет увеличения коэффициента сопротивления  $k_1$  и уменьшения приведенной массы системы  $m$  и ее жесткости  $c$ . Очевидно, рассмотренный выше случай шлифования, описываемый зависимостью (3.83), располагает большими возможностями в плане исключе-

ния колебаний, поскольку слагаемое  $c \cdot B = \frac{\sigma \cdot F}{K_{ш} \cdot V_{кр}}$  как бы увеличивает коэффициент сопротивления  $k_1$  и, соответственно, подкоренное выражение зависимости (3.83).

Для определения условия возникновения колебаний при плоском шлифовании следует воспользоваться расчетной схемой, приведенной на рис. 3.2. Динамическая модель шлифования представлена расчетной схемой, показанной на рис. 3.20. В этом случае на приведенную массу  $m$  действует радиальная составляющая силы резания  $P_y = \frac{\sigma \cdot Q}{K_{ш} \cdot V_{кр}}$ , сила упругости системы –  $c \cdot y$  и сила сопротивления –  $k_1 \cdot \dot{y}$ . Здесь  $Q = H \cdot V_{дет} \cdot t_{ф}$  – производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;  $H$  – ширина шлифования, м;  $V_{дет}$  – скорость детали, м/с;  $t_{ф}$  – фактическая глубина шлифования, м.

Под действием указанных сил приведенная масса  $m$  совершает колебания, описываемые дифференциальным уравнением:

$$P_y - c \cdot y - k_1 \cdot \dot{y} = m \cdot \ddot{y} \quad \text{или}$$

$$\ddot{y} + \frac{k_1}{m} \cdot \dot{y} + \frac{c}{m} \cdot y = \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дет} \cdot t_{ф}}{K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot m}. \quad (3.97)$$

С учетом соотношения  $t_{ф} = t - y$  (где  $t$  – номинальная глубина шлифования) уравнение (3.97) примет вид:

$$\ddot{y} + \frac{k_1}{m} \cdot \dot{y} + \left( \frac{c}{m} + \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}}{K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot m} \right) \cdot y = \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дет} \cdot t}{K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot m}. \quad (3.98)$$

В отличие от уравнения (3.78), в уравнении (3.98) не изменилась сила сопротивления, а изменилась сила упругости.

Частное решение уравнения (3.98):

$$y = D. \quad (3.99)$$

Подставляя зависимость (3.99) в уравнение (3.98), имеем

$$D = \frac{t}{\left( 1 + \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}} \right)}. \quad (3.100)$$

Рассмотрим однородное уравнение, вытекающее из уравнения (3.98):

$$\ddot{y} + \frac{k_1}{m} \cdot \dot{y} + \left( \frac{c}{m} + \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}}{K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot m} \right) \cdot y = 0. \quad (3.101)$$

Его характеристическое уравнение:

$$r^2 + \frac{k_1}{m} \cdot r + \left( \frac{c}{m} + \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}}{K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot m} \right) = 0. \quad (3.102)$$

Решение уравнения (3.102):

$$r = -\frac{k_1}{2m} \pm \sqrt{\frac{k_1^2}{4m^2} - \left( \frac{c}{m} + \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}}{K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot m} \right)}. \quad (3.103)$$

По сравнению с аналогичными зависимостями (3.83) и (3.95), в зависимости (3.103) подкоренное выражение содержит дополнительное отрицательное слагаемое. Это указывает на то, что для превращения подкоренного выражения в положительную величину необходимо увеличить первое (положительное) слагаемое  $\frac{k_1^2}{4m^2}$ , а это трудно реализовать. Поэтому при плоском шлифовании (также как и при круглом шлифовании) всегда будут возникать колебания. Причем их будет усиливать сила  $P_y$ , которая в случае шлифования прямолинейного обрабатываемого образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга (рис. 3.20), как показано выше, наоборот, будет способствовать снижению вероятности возникновения колебаний в системе. Таким образом установлено, что при перемещении обрабатываемого образца по нормали к рабочей поверхности круга вероятность устранения колебаний в технологической системе больше, чем при перемещении обрабатываемого образца по касательной к рабочей поверхности круга (рис. 3.2). Сделанный вывод может иметь большое значение при выборе оптимальной схемы шлифования с точки зрения обеспечения виброустойчивости технологической системы и повышения точности, качества и производительности обработки.

Зависимость (3.103) следует представить в виде:

$$r = -\alpha \pm i \cdot \beta, \quad (3.104)$$

где  $\alpha$ ,  $\beta$  – действительная и мнимая части комплексного корня;

$$\alpha = \frac{k_1}{2m}; \quad \beta = \sqrt{\left( \frac{c}{m} - \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}}{K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot m} \right) - \frac{k_1^2}{4m^2}}.$$

Здесь величина  $\beta$  определяет собственную частоту системы. Тогда общее решение дифференциального уравнения (3.98) выразится:

$$y = e^{-\alpha \cdot \tau} \cdot (C_1 \cdot \cos \beta \tau + C_2 \cdot \sin \beta \tau) + D, \quad (3.105)$$

где  $C_1, C_2$  – постоянные интегрирования, определяются из начальных условий:  $y(\tau = 0) = 0$ ;  $\dot{y}(\tau = 0) = 0$ .

Подчиняя решение (3.105) начальным условиям, имеем:

$$C_1 = -D; \quad C_2 = -\frac{\alpha}{\beta} \cdot D. \quad (3.106)$$

Подставляя постоянные  $C_1, C_2$  в зависимость (3.105), получено:

$$y = D \cdot \left[ 1 - e^{-\alpha \cdot \tau} \cdot \left( \cos \beta \tau - \frac{\alpha}{\beta} \cdot \sin \beta \tau \right) \right]. \quad (3.107)$$

Зависимость (3.107) описывает изменение во времени амплитуды затухающих колебаний, возникающих в технологической системе при плоском шлифовании. Очевидно, с течением времени обработки  $\tau$  экспоненциальная функция  $e^{-\alpha \cdot \tau} \rightarrow 0$  и второе слагаемое зависимости принимает весьма малые значения. В результате зависимость (3.107) упрощается:

$$y = D = \frac{t}{\left( 1 + \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}} \right)}. \quad (3.108)$$

В установившемся во времени процессе плоского шлифования величина упругого перемещения  $y$  всегда меньше номинальной глубины шлифования  $t$ . Чем больше знаменатель зависимости (3.108), тем меньше величина  $y$  и эффективнее процесс шлифования с точки зрения обеспечения точности обработки.

Необходимо отметить, что данное решение справедливо при условии  $t > t_{\phi}$ , т.е. на первых проходах круга. При выполнении условия  $t = t_{\phi}$ , т.е. на последующих проходах круга, уравнение (3.107) примет вид:

$$\ddot{y} + \frac{k_1}{m} \cdot \dot{y} + \frac{c}{m} \cdot y = \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дет} \cdot t}{K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot m}. \quad (3.109)$$

Частное решение уравнения (3.109):

$$y = D_1. \quad (3.110)$$

Подставляя зависимость (3.110) в уравнение (3.109), получено:

$$D = \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{\text{дет}} \cdot t}{c \cdot K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}}} \quad (3.111)$$

Характеристическое уравнение для однородного уравнения, вытекающего из (3.109), принимает вид:

$$r^2 + \frac{k_1}{m} \cdot r + \frac{c}{m} = 0. \quad (3.112)$$

Его решение:

$$r = -\frac{k_1}{2m} \pm \sqrt{\frac{k_1^2}{4m^2} - \frac{c}{m}}. \quad (3.113)$$

В данном случае решение соответствует решению характеристического уравнения (3.94), описывающего свободные колебания в системе. Его можно представить в виде:

$$r = -\alpha \pm i \cdot \beta, \quad (3.114)$$

где  $\alpha = \frac{k_1}{2m};$

$$\beta = \sqrt{\frac{c}{m} - \frac{k_1^2}{4m^2}}.$$

Величина  $\beta$  определяет собственную частоту колебаний системы.

В отличие от аналогичной зависимости (3.103), полученной для первых проходов круга при плоском шлифовании, подкоренное выражение зависимости (3.113) не содержит отрицательное слагаемое  $\frac{\sigma \cdot H \cdot V_{\text{дет}}}{K_{\text{ш}} \cdot V_{\text{кр}} \cdot m}$ . Это повышает вероятность исключения колебаний при шлифовании.

Необходимо отметить, что решение уравнения (3.98) без учета силы сопротивления было получено в работе [198] и на его основе сделан важный вывод о том, что амплитуда колебаний может в 2 раза превосходить статическое установившееся значение величины  $y$ . В результате при определенных условиях шлифования круг может периодически выходить из контакта с обрабатываемой деталью, что снижает точность и качество обработки. Чтобы исключить такое явление, необходимо, прежде всего, поддерживать в процессе шлифования высокую режущую способность круга, не допуская его значительного затупления.

### 3.8. Выбор оптимального варианта операции шлифования по критериям производительности и точности обработки

Для обоснования и выбора оптимального варианта операции шлифования по критериям производительности и точности обработки [198, 219, 226, 229] следует провести анализ закономерностей формирования погрешностей обработки, обусловленных возникновением упругих перемещений в технологической системе у при шлифовании прямолинейного образца, движущегося по нормали к рабочей поверхности круга с постоянной скоростью  $V_0$  (рис. 3.22). Баланс перемещений в технологической системе описывается уравнением [134]:

$$V_0 \cdot \tau = \int_0^{\tau} V(\tau) \cdot d\tau + y, \quad (3.115)$$

где  $V(\tau)$  – линейная скорость съема припуска, м/с;  $\tau$  – время обработки, с;  $y = \frac{P_y}{c} = B \cdot V(\tau)$  – величина упругого перемещения, м;

$B = \frac{\sigma}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$  – постоянная времени образования упругого перемещения в технологической системе, с;  $P_z$ ,  $P_y$  – тангенциальная и радиальная составляющие силы резания при шлифовании, Н;  $c$  – приведенная жесткость технологической системы, Н/м;  $K_{ш} = P_z / P_y$  – коэффициент шлифования;  $F$  – площадь поперечного сечения обрабатываемого образца, м<sup>2</sup>;  $V_{кр}$  – скорость круга, м/с.

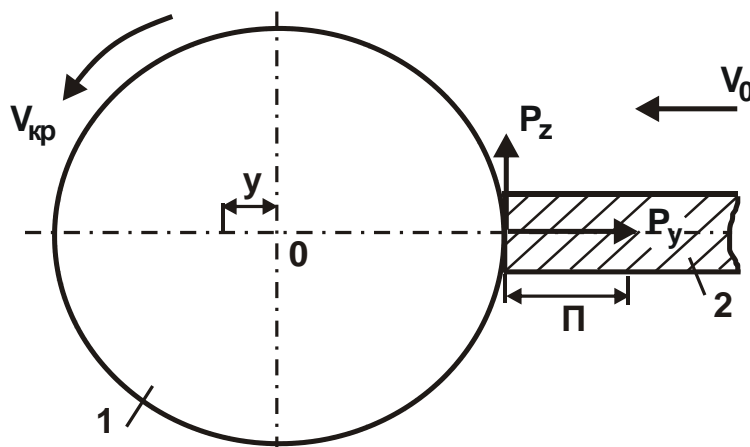


Рисунок 3.22 – Расчетная схема параметров процесса шлифования:  
1 – круг; 2 – обрабатываемый образец

Дифференцируя все слагаемые уравнения (3.115) по времени  $\tau$ , имеем

$$B \cdot \frac{dV(\tau)}{d\tau} + V(\tau) = V_0. \quad (3.116)$$

В результате получено линейное дифференциальное уравнение первого порядка с правой частью. Решение уравнения (3.116) общеизвестно. С учетом начального условия  $y(\tau = 0) = y_0$ , имеем:

$$y = y_{уст} + (y_0 - y_{уст}) \cdot e^{-\frac{1}{B} \cdot \tau}, \quad (3.117)$$

где  $y_0$  – начальный натяг в технологической системе, м;  $y_{уст} = B \cdot V_0$  – величина упругого перемещения, возникающего в технологической системе в установившемся во времени процессе шлифования, м.

С учетом  $\Pi = V_0 \cdot \tau$  ( $\Pi$  – текущее значение припуска) зависимость (3.117) выразится:

$$y = y_{уст} + (y_0 - y_{уст}) \cdot e^{-\frac{\Pi}{y_{уст}}}. \quad (3.118)$$

При условии  $y_{уст} = 0$ , т.е. при шлифовании с отключенной радиальной подачей (по схеме выхаживания), зависимость (3.118) упростится и примет вид:

$$y = y_0 \cdot e^{-\frac{\Pi}{y_{уст}}} = y_0 \cdot e^{-\frac{\tau}{B}}. \quad (3.119)$$

При условии  $y_0 = 0$  (т.е. при врезании круга) зависимость (3.118) опишется:

$$y = y_{уст} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\Pi}{y_{уст}}} \right) = y_{уст} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{B}} \right). \quad (3.120)$$

Сравнивая зависимости (3.119) и (3.120), видно, что при  $y_0 = y_{уст}$  они взаимно противоположны. За одинаковое время обработки  $\tau_0$  при врезании и выхаживании достигается одинаковая степень приближения величины  $y$  к асимптотам ( $y = y_0$  и  $y = 0$ ).

Важно произвести упрощенный расчет наименьшего основного времени обработки с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности. Для этого следует принять, что с обрабатываемого образца (при его постоянном контакте с кругом) необходимо

удалить припуск величиной  $\Pi$  за два перехода, осуществляемые с разными скоростями радиальной подачи  $V_1$  и  $V_2$ , и обеспечить заданную погрешность обработки  $y_2$ . В этом случае величина упругого перемещения  $y_1$  на первом переходе будет определяться зависимостью (3.120), а на втором переходе – зависимостью (3.118). Будем первоначально считать, что на втором переходе  $y_{уст} = 0$ , т.е.  $V_2 = 0$  и шлифование выполняется с отключенной радиальной подачей по схеме выхаживания. Тогда величина упругого перемещения  $y$  определяется упрощенной зависимостью (3.119). Исходя из этого условия, номинальная величина снимаемого припуска на первом переходе равна  $\Pi$ , а на втором переходе равна  $y_0 = y_1$ . Задача состоит в определении наименьшего основного времени обработки на двух переходах  $\tau = \tau_1 + \tau_2$ , где  $\tau_1 = \Pi / V_1 = B \cdot \Pi / y_{уст1}$  – время обработки на первом переходе, с;  $V_1$  – скорость радиальной подачи образца на первом переходе, м/с;  $y_{уст1} = B \cdot V_1$ .

Время обработки на 2 переходе  $\tau_2$  определяется из зависимости (3.119), рассматривая  $y_0 = y_1$ :

$$\frac{\tau_2}{B} = \ln \frac{y_1}{y_2}. \quad (3.121)$$

Как видно, для определения основного времени обработки  $\tau$  необходимо знать величины  $y_{уст1}$  и  $y_1$ . Принимая исходные данные  $\Pi = 1$  мм и  $y_2 = 0,186$  мм, ниже рассмотрено методику расчета времени обработки  $\tau$ . В начале задается значение  $y_1 / y_{уст1}$  и устанавливается значение  $\Pi / y_{уст1}$ . Для заданной величины  $\Pi = 1$  мм, определяются значения  $y_{уст1}$ ,  $y_1$  и, соответственно,  $\tau_1 = B \cdot \Pi / y_{уст1}$ . Далее, по зависимости (3.121) определяется время  $\tau_2$ .

В табл. 3.7 приведены рассчитанные по приведенной методике значения указанных величин и основного времени обработки  $\tau$  для различных значений  $y_1 / y_{уст1}$ . Как видно, с уменьшением  $y_1 / y_{уст1}$  и увеличением величин  $y_{уст1}$  и  $y_1$  основное время обработки  $\tau$  уменьшается, достигая наименьшего значения при  $y_1 = \Pi = 1$  мм. В этом случае время обработки на первом переходе  $\tau_1 \rightarrow 0$ , т.е. фактически съем



припуска происходит на втором переходе. Следовательно, оптимальным вариантом операции шлифования является операция, на которой на первом переходе происходит ускоренное врезание круга в обрабатываемый материал на всю глубину снимаемого припуска  $\Pi$ , на втором переходе по схеме выхаживания (т.е. без радиальной подачи образца) происходит удаление всего припуска и формирование заданной точности размера обрабатываемой поверхности, определяемой величиной  $y_2$ .

Таблица 3.7 – Расчетные значения параметров

$y_1/y_{уст1}$	$\Pi/y_{уст1}$	$y_{уст1}$ , мм	$y_1$ , мм	$\tau_1/V$	$\tau_2/V$	$\tau/V$
0,95	3,0	0,333	0,316	3,0	0,53	3,53
0,632	1,0	1,0	0,632	1,0	1,22	2,22
0,393	0,5	2,0	0,786	0,5	1,44	1,94
0,095	0,1	10,0	0,95	0,1	1,63	1,73
0,01	0,01	100,0	1,0	0,01	1,68	1,69

Для сравнения рассмотрен упрощенный вариант расчета, используя вместо зависимости (3.120) упрощенную зависимость  $y_1 = y_{уст1}$ .

В табл. 3.8 приведены расчетные значения параметров  $\tau_1/V$ ,  $\tau_2/V$  и  $\tau/V$ . Как следует из табл. 3.8, с увеличением величины  $y_1$  основное время обработки  $\tau/V$  уменьшается, принимая наименьшее значение при  $y_1 = \Pi = 1$  мм, т.е. как и в выше приведенном уточненном расчете. При этом величина  $\tau_2/V$  принимает одинаковое значение, а величина  $\tau/V$  – большее значение. Это указывает на возможность уменьшения  $\tau_1 \rightarrow 0$  за счет увеличения скорости радиальной подачи образца на первом переходе  $V_1$ , поскольку первый переход выполняет, как бы подготовительную функцию – обеспечивает создание начального натяга в технологической системе  $y_1 = \Pi = 1$  мм и на нем не происходит удаление припуска. В результате может быть достигнуто значение  $\tau = \tau_2$ , как и в выше приведенном уточненном расчете. В данном случае  $\tau$  описывается зависимостью:

$$\tau = V \cdot \left( \frac{\Pi}{y_1} + \ln \frac{y_1}{y_2} \right). \quad (3.122)$$

Как видно, функция  $\tau$  изменяется по экстремальной зависимости с изменением  $y_1$ . Поэтому определим экстремум функции  $\tau$  из условия  $\tau'_{y_1} = 0$ . После преобразований, получено:  $y_1 = \Pi$ . Вторая производная функции  $\tau$  от величины  $y_1$  в точке экстремума положительна. Следовательно, имеет место минимум функции  $\tau$ :

$$\tau_{\min} = B \cdot \left( 1 + \ln \frac{\Pi}{y_2} \right). \quad (3.123)$$

Таблица 3.8 – Расчетные значения параметров  $\tau_1/B$ ,  $\tau_2/B$  и  $\tau/B$

$y_{уст1}$ , мм	$y_1$ , мм	$\tau_1/B$	$\tau_2/B$	$\tau/B$
0,333	0,333	3,0	0,58	3,58
1,0	1,0	1,0	1,68	2,68

Этим показано, что наименьшее значение  $\tau$  достигается при условии  $y_1 = \Pi$ , т.е. при создании в технологической системе на первом переходе натяга  $y_1$ , равного величине снимаемого припуска  $\Pi$ . Данное решение согласуется с результатами численных расчетов, приведенных в табл. 3.8.

Важно произвести уточненный расчет наименьшего основного времени обработки с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности.

Это позволит получить общее аналитическое решение для определения основного времени обработки  $\tau$  на операции шлифования в два перехода (рис. 3.23). Для этого время обработки  $\tau$  необходимо представить в виде:

$$\tau = B \cdot \left( \frac{\Pi_1}{y_{уст1}} + \frac{\Pi_2}{y_{уст2}} \right). \quad (3.124)$$

Далее следует разрешить зависимость (3.124) относительно параметра  $y_{уст1}$ :

$$y_{уст1} = \frac{\Pi_1}{\left( \frac{\tau}{B} + \frac{\Pi_2}{y_{уст2}} \right)}. \quad (3.125)$$

Подставляя полученную зависимость (3.125) в (3.120), рассматривая в ней  $y = y_1$ , получено:

$$y_1 = \frac{\Pi_1}{\left(\frac{\tau}{B} + \frac{\Pi_2}{y_{уст2}}\right)} \cdot \left[ 1 - e^{-\left(\frac{\tau}{B} + \frac{\Pi_2}{y_{уст2}}\right)} \right]. \quad (3.126)$$

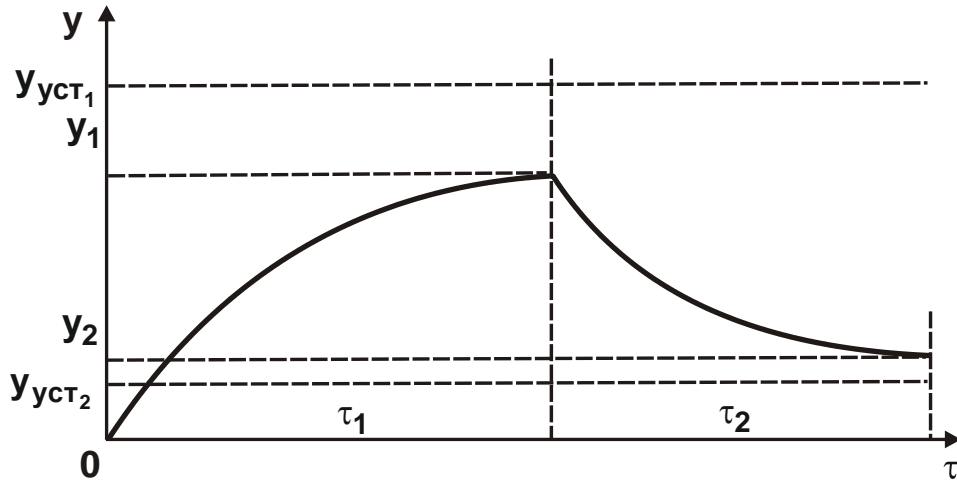


Рисунок 3.23 – Зависимость величины  $y$  от  $\tau$  на операции шлифования в два перехода

Затем, подставляя зависимость (3.126) в (3.118), рассматривая в ней  $y = y_2$ ,  $y_0 = y_1$ , имеем:

$$y_2 = y_{уст2} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\Pi_2}{y_{уст2}}} \right) + \frac{\Pi_1}{\left(\frac{\tau}{B} - \frac{\Pi_2}{y_{уст2}}\right)} \cdot \left[ 1 - e^{-\left(\frac{\tau}{B} - \frac{\Pi_2}{y_{уст2}}\right)} \right] \cdot e^{-\frac{\Pi_2}{y_{уст2}}}. \quad (3.127)$$

Задавая значения  $y_2$ ,  $\Pi$ ,  $\Pi_1$  и, соответственно  $\Pi_2 = \Pi - \Pi_1$ , на основе уравнения (3.127) можно численным расчетом определить основное время обработки  $\tau/B$  в зависимости от параметра  $y_{уст2}$ . Используя уравнение (3.127), рассмотрен предыдущий случай:  $\Pi_1 = \Pi$ ;  $\Pi_2 = 0$ ;

$$y_{уст2} = 0; \quad \frac{\Pi_2}{y_{уст2}} = \frac{\tau_2}{B}.$$

Тогда уравнение (3.127) упростится и примет вид:

$$y_2 = \frac{\Pi}{\left(\frac{\tau}{B} - \frac{\tau_2}{B}\right)} \cdot \left[ 1 - e^{-\left(\frac{\tau}{B} - \frac{\tau_2}{B}\right)} \right] \cdot e^{-\frac{\tau_2}{B}}. \quad (3.128)$$

Для исходных данных:  $y_2 = 0,186$  мм и  $\Pi = 1$  мм в табл. 3.9 приведены рассчитанные на основе уравнения (3.128) значения  $\tau/V$ . Как видно, полученные данные совпадают с аналогичными данными, приведенными в табл. 3.7. Следовательно, применение уравнения (3.128) позволяет упростить методику расчета времени обработки  $\tau$ .

Таблица 3.9 – Расчетные значения  $\tau/V$

$\tau_2/V$	0,53	1,22	1,44	1,63	1,68
$\tau/V$	3,53	2,22	1,94	1,73	1,69

Далее определим основное время обработки  $\tau$  при шлифовании в два перехода с  $V_2 > 0$ . Для этого зададим значения  $\Pi$ ,  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2 = \Pi - \Pi_1$ ,  $\Pi_1/y_{уст1}$  и, соответственно,  $y_{уст1}$  и определим значение  $y_1$ . Затем, из уравнения (3.118), рассматривая в нем  $y = y_2$ ,  $y_0 = y_1$ , определим  $y_{уст2}$  для известных значений  $y_2$  и  $y_1$ .

Принимая  $y_2 = 0,186$  мм и  $\Pi = 1$  мм, в табл. 3.10 приведены результаты расчетов параметров  $y_{уст1}$ ,  $y_1$ ,  $y_{уст2}$  и  $\tau/V$  (определяемого зависимостью (3.124)).

Таблица 3.10 – Расчетные значения параметров  $y_{уст1}$ ,  $y_1$ ,  $y_{уст2}$  и  $\tau/V$

$\frac{\Pi_1}{y_{уст1}}$	$\Pi_1 = 0,25$ мм; $\Pi_2 = 0,75$ мм				$\Pi_1 = \Pi_2 = 0,5$ мм			
	$y_{уст1}$ , мм	$y_1$ , мм	$y_{уст2}$ , мм	$\frac{\tau}{V}$	$y_{уст1}$ , мм	$y_1$ , мм	$y_{уст2}$ , мм	$\frac{\tau}{V}$
1,0	–	–	–	–	0,5	0,316	0,178	3,808
0,5	0,5	0,196	0,1858	4,536	1,0	0,393	0,174	3,373
0,1	2,5	0,237	0,185	4,154	5,0	0,475	0,17	3,041
0	$\infty$	0,25	0,1845	4,065	$\infty$	0,5	0,169	2,958
$\frac{\Pi_1}{y_{уст1}}$	$\Pi_1 = 0,75$ мм; $\Pi_2 = 0,25$ мм				$\Pi_1 = 0,95$ мм; $\Pi_2 = 0,05$ мм			
	$y_{уст1}$ , мм	$y_1$ , мм	$y_{уст2}$ , мм	$\frac{\tau}{V}$	$y_{уст1}$ , мм	$y_1$ , мм	$y_{уст2}$ , мм	$\frac{\tau}{V}$
1,0	0,75	0,474	0,134	2,865	0,95	0,6	0,0376	2,329
0,5	1,5	0,589	0,1245	2,508	1,9	0,746	0,0327	2,029
0,1	7,5	0,712	0,116	2,255	9,5	0,902	0,029	1,818
0	$\infty$	0,75	0,1145	2,183	$\infty$	0,95	0,0284	1,76

Как видно, с увеличением  $\Pi_1$  время  $\tau/V$  уменьшается, достигая наименьшего значения при условии  $\Pi_1 = \Pi$ , т.е. когда съем припуска и формирование точности происходит на втором переходе, осуществляемом по схеме выхаживания. Первый переход служит лишь для создания в системе натяга величиной  $y_1 = \Pi$ .

Следует отметить, что создание натяга, равного величине снимаемого припуска, не всегда реализуемо на станке. Поэтому припуск необходимо разбивать по переходам, обеспечивая предельно возможные значения натяга в технологической системе  $y_1$ . Например, при  $y_1 = \Pi_1 = \Pi = 1$  мм (табл. 3.7) наименьшее основное время обработки  $\tau/V = 1,69$ . При  $y_1 = \Pi_1 = 0,5$  мм (табл. 3.10) наименьшее основное время обработки  $\tau/V = 2,958$ . Следовательно, с уменьшением натяга  $y_1$  (создаваемого за счет ускоренного врезания круга в обрабатываемый материал) основное время обработки  $\tau/V$  увеличивается (рис. 3.24). Однако это связано лишь с невозможностью создания в технологической системе значительного натяга  $y_1$ , равного величине снимаемого припуска.

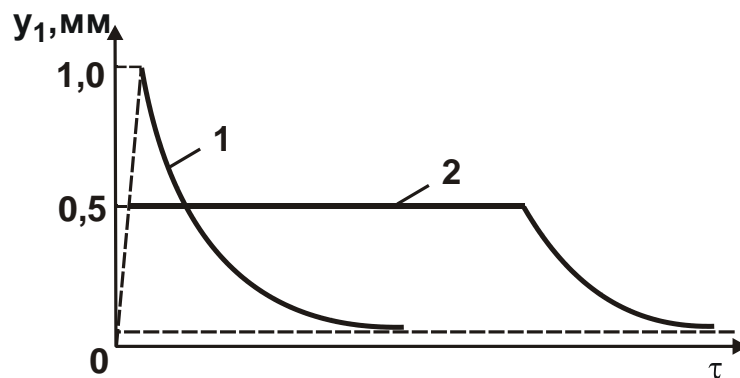


Рисунок 3.24 – Зависимость  $y$  от  $\tau$ :

1 –  $y_1 = \Pi_1 = \Pi = 1$  мм; 2 –  $y_1 = \Pi_1 = 0,5$  мм

Важно произвести выбор оптимальной схемы съема припуска с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности. Для этого следует определить условия уменьшения основного времени обработки в случае ограничения по величине начального натяга в технологической системе. Расчет произведен применительно к операции шлифования, выполняемой за несколько переходов, включающих поочередно переходы врезания круга в обрабатываемый ма-

териал с ускоренной радиальной подачей (с целью создания в технологической системе начального натяга), и переходы выхаживания (т.е. шлифование с отключенной радиальной подачей). Принято, что на первом переходе натяг в технологической системе равен  $y_0 = \Pi/n$ , а на всех последующих  $(n-1)$  переходах –  $y_0 = \Pi/n + y$ . Исходя из зависимости (3.119), основное время обработки на первом переходе определяется:

$$\frac{\tau_1}{B} = \ln \frac{\Pi}{n \cdot y} = \ln \frac{\varepsilon_{\text{сум}}}{n}, \quad (3.129)$$

где  $\varepsilon_{\text{сум}} = \Pi/y$  – суммарное уточнение.

Основное время обработки на всех последующих  $(n-1)$  переходах определится:

$$\frac{\tau_2}{B} = \frac{\tau_3}{B} = \dots = \frac{\tau_n}{B} = \ln \frac{\Pi + y}{y} = \ln \left( \frac{\varepsilon_{\text{сум}}}{n} + 1 \right). \quad (3.130)$$

Тогда суммарное основное время обработки  $\tau$  равно:

$$\frac{\tau}{B} = \frac{\tau_1}{B} + \dots + \frac{\tau_n}{B} = \ln \frac{\varepsilon_{\text{сум}}}{n} + (n-1) \cdot \ln \left( \frac{\varepsilon_{\text{сум}}}{n} + 1 \right). \quad (3.131)$$

В табл. 3.11 приведены рассчитанные по зависимости (3.131) значения  $\tau/B$  для  $\varepsilon_{\text{сум}} = 5,376$ .

Таблица 3.11 – Расчетные значения  $\tau/B$  для  $\varepsilon_{\text{сум}} = 5,376$

n	1	2	3	4	5
$\tau/B$	1,68	2,3	2,65	2,85	2,99

Как видно, с увеличением количества переходов  $n$  основное время обработки  $\tau$  увеличивается, т.е. эффективно съём припуска производить за один переход ( $\tau/B = 1,69$ ). Вместе с тем, при осуществлении этой схемы шлифования основное время обработки  $\tau$  всегда меньше, чем при шлифовании в два перехода, включающем врезание и выхаживание при условии  $\Pi_1 = 0,5\Pi$ . Например, как следует из табл. 3.10 в этом случае  $\tau/B = 2,958$ , тогда как исходя из табл. 3.11, при  $n=2$  (т.е. при  $\Pi_1 = 0,5\Pi$ ) отношение  $\tau/B = 2,3$ . Следовательно, в случае шлифования, когда невозможно в технологической системе создать натяг, равный величине снимаемого припуска, целесообразно

съем припуска осуществлять с применением пульсирующей подачи. Данная схема позволяет повысить производительность обработки при обеспечении заданной точности размера обрабатываемой поверхности. Здесь эффект достигается, во-первых, за счет ускоренного врезания круга в обрабатываемый материал, благодаря чему фактически исключаются потери времени на периодическое создание натягов в технологической системе. Во-вторых, за счет реализации начального участка зависимости  $y - \tau$  на переходе выхаживания, что способствует повышению производительности и точности обработки.

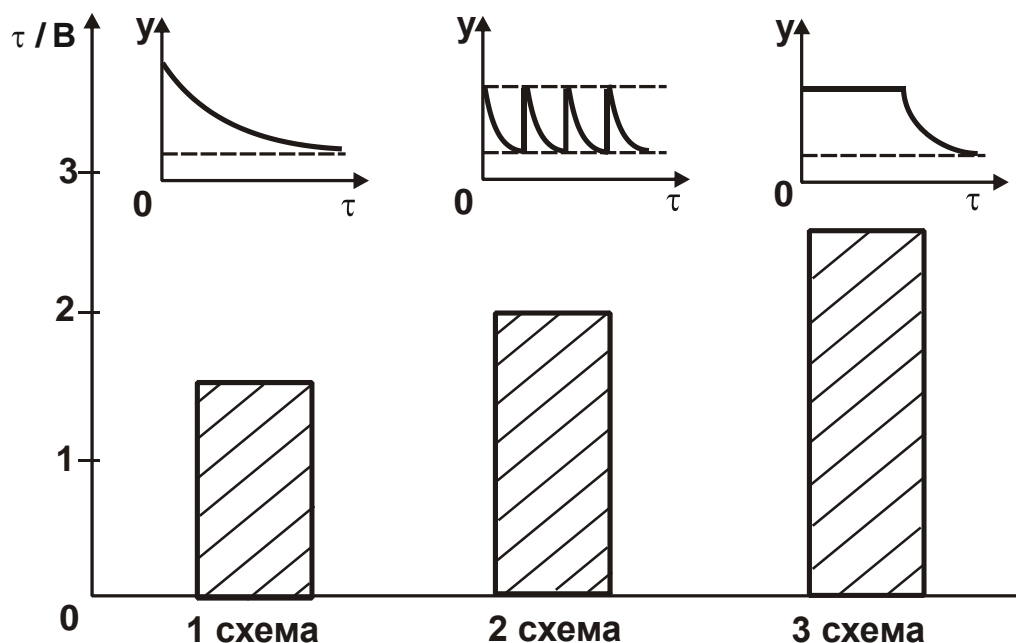


Рисунок 3.25 – Диаграмма изменения величины  $\tau/V$  для трех схем шлифования

Как следует из рис. 3.25, наименьшее основное время обработки достигается при шлифовании, включающем переход ускоренного врезания круга в обрабатываемую деталь на величину снимаемого припуска и переход выхаживания, т.е. по сути, при шлифовании по схеме выхаживания с начальным натягом в технологической системе, равным величине снимаемого припуска. Второй по эффективности является схема шлифования с пульсирующей подачей. При этом количество пульсаций должно быть минимальным, определяемым максимально возможным натягом, создаваемым в системе. Третья схема шлифования, включающая переходы врезания (чернового шлифования) и выхаживания, является наименее эффективной, поскольку характеризуется наибольшим основным временем обработки  $\tau$ .

### 3.9. Определение условий повышения производительности и качества обработки при шлифовании по температурному критерию

Температурный фактор значительно ограничивает повышение производительности обработки при шлифовании. Поэтому важно теоретически установить условия повышения производительности и качества обработки при шлифовании по температурному критерию, исходя из зависимости для определения температуры плоского шлифования  $\theta$ , приведенной в работе [132]:

$$\theta = \sigma \cdot t \cdot \sqrt{\frac{V_{\text{дет}}}{c_m \cdot \rho_m \cdot \lambda_m}} \cdot \sqrt{\frac{2}{t \cdot R_{\text{кр}}}}, \quad (3.132)$$

де  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $t$  – глубина шлифования, м;  $V_{\text{дет}}$  – скорость детали, м/с;  $R_{\text{кр}}$  – радиус круга, м;  $c_m$  – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К);  $\rho_m$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda_m$  – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К).

Исходя из зависимости (3.132), добиться увеличения производительности обработки  $Q = B \cdot V_{\text{дет}} \cdot t$  (где  $B$  – ширина шлифования, м) для заданного значения  $\theta$  можно за счет применения многопроходного шлифования, которое допускает увеличение  $V_{\text{дет}}$  и уменьшение  $t$ . Поэтому применение многопроходного шлифования более эффективно по сравнению с глубинным шлифованием. Однако при этом возникает задача определения предельной скорости детали  $V_{\text{дет}}$ , поскольку в соответствии с зависимостью (3.132), она может увеличиваться неограниченно, а глубина шлифования  $t$  уменьшаться до нуля.

Наиболее существенным ограничением увеличения скорости детали  $V_{\text{дет}}$  при многопроходном шлифовании является количество проходов круга  $n$ , поскольку с их увеличением увеличивается дополнительное время обработки, связанное с реверсированием стола станка. Исходя из этого, проведен анализ штучного времени обработки  $T_{\text{шт}}$ , равного сумме основного  $T_{\text{осн}}$  и вспомогательного  $T_{\text{всп}}$  времени обработки, на операции плоского шлифования. Представляя  $T_{\text{осн}} = n \cdot \tau_{\text{осн}}$  и  $T_{\text{всп}} = n \cdot \tau_{\text{всп}}$ , получена зависимость для определения штучного времени обработки [128]:



$$T_{шт} = T_{осн} + T_{всп} = n \cdot (\tau_{осн} + \tau_{всп}), \quad (3.133)$$

де  $n$  – количество проходов круга;  $\tau_{осн} = L_{рез} / V_{дет}$  – основное время обработки за один проход круга, с;  $\tau_{всп}$  – вспомогательное время обработки, затрачиваемое на реверсирование стола станка в пределах одного прохода круга, с.

Скорость детали  $V_{дет}$  определяется из преобразованной зависимости (3.132):

$$V_{дет} = \lambda_m \cdot c_m \cdot \rho_m \cdot \left( \frac{\theta}{\sigma \cdot t} \right)^2 \cdot \left( \frac{t}{2 \cdot \rho} \right)^{0,5}, \quad (3.134)$$

где  $t = \Pi / n$ ;  $\Pi$  – величина снимаемого припуска, м.

После подстановки зависимости (3.134) в (3.133), получено:

$$T_{шт} = \frac{L_{рез}}{c_m \cdot \rho_m \cdot \lambda_m} \cdot \left( \frac{\Pi}{\theta} \right)^2 \cdot \left( \frac{2}{n \cdot \Pi \cdot R_{кр}} \right)^{0,5} + n \cdot \tau_{всп}. \quad (3.135)$$

Как видно, количество проходов  $n$  неоднозначно влияет на штучное время обработки  $T_{шт}$ , т.е. существует экстремум функции  $T_{шт}$  от  $n$ . Для его определения функцию  $T_{шт}$  следует подчинить необходимому условию экстремума  $(T_{шт})'_n = 0$ . После преобразований получены выражения для определения экстремальных значений количества проходов круга и штучного времени обработки:

$$n_{экстр} = \frac{\Pi}{\theta} \cdot \sqrt[3]{\left( \frac{L_{рез}}{c_m \cdot \rho_m \cdot \lambda_m \cdot \tau_{всп}} \right)^2 \cdot \left( \frac{\rho}{\theta} \right)}; \quad (3.136)$$

$$T_{шт.экстр} = (1,26 + 0,63) \cdot \frac{\Pi}{\theta} \cdot \sqrt[3]{\left( \frac{L_{рез}}{c_m \cdot \rho_m \cdot \lambda_m} \right)^2 \cdot \left( \frac{2 \cdot \rho \cdot \tau_{всп}}{\theta} \right)}. \quad (3.137)$$

При этом установлено, что вторая производная  $(T_{шт})''_n$  в точке экстремума положительна, поэтому имеет место минимум функции  $T_{шт}$  от  $n$ .

Из зависимости (3.138) вытекает, что первое слагаемое (определяет основное время обработки в точке экстремума функции  $T_{шт}$ ) в 2 раза больше второго слагаемого (определяет вспомогательное время обработки), т.е.  $\tau_{всп} = 0,5 \cdot \tau_{осн}$ . Уменьшить  $T_{шт.экстр}$  можно уменьшением  $\Pi$ ,  $L_{рез}$  и  $\tau_{всп}$ , а также увеличением заданной температуры шлифо-

вания  $\theta$ . Параметры режима шлифования  $t$  и  $V_{дет}$  не влияют на параметр  $T_{шт.экстр}$ , также как не влияют и на  $n_{экстр}$ . Между параметрами  $T_{шт.экстр}$  и  $n_{экстр}$  существует взаимосвязь:

$$T_{шт.экстр} = 3 \cdot \tau_{всп} \cdot n_{экстр} \quad (3.138)$$

Как видно, отношение  $T_{шт.экстр}/n_{экстр}$  зависит лишь от величины  $\tau_{всп}$ . С учетом полученных выражений зависимость для определения штучного времени обработки  $T_{шт}$  можно представить в виде:

$$T_{шт} = \tau_{всп} \cdot \left( \frac{2 \cdot n_{экстр}^{1,5}}{n^{0,5}} + n \right) \quad (3.139)$$

На рис. 3.26 и в табл. 3.12 приведены рассчитанные по зависимости (3.139) значения безразмерной величины  $T_{шт}/\tau_{всп}$ . С увеличением количества проходов круга  $n$  безразмерная величина  $T_{шт}/\tau_{всп}$  изменяется по экстремальной зависимости, проходя точку минимума. Экстремум отсутствует лишь в случае  $n_{экстр} = 1$ . В этом случае с увеличением  $n_{экстр}$  минимум безразмерной величины  $T_{шт}/\tau_{всп}$  увеличивается и смещается в область больших значений  $n$ .

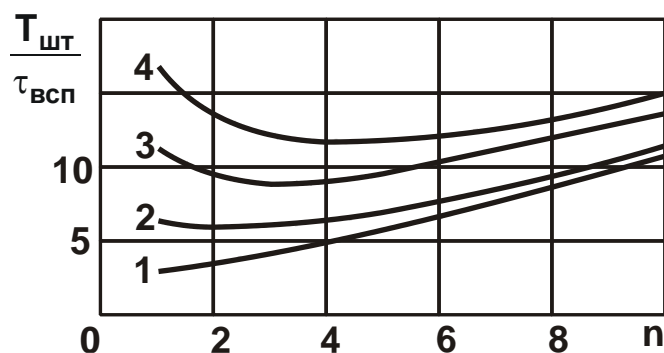


Рисунок 3.26 – Зависимость  $T_{шт}/\tau_{всп}$  от  $n$

Таблица 3.12 – Расчетные значения безразмерной величины  $T_{шт}/\tau_{всп}$

$n_{экстр}$	$n$					
	1	2	3	4	5	10
1	3	3,42	4,15	5	5,9	10,6
2	6,66	5,98	6,27	6,83	7,53	11,79
3	11,4	9,32	9	9,2	9,65	13,3
4	17	13,26	12,23	12	12,15	15

Зависимость (3.139) удобно использовать для анализа штучного времени обработки  $T_{шт}$  с учетом лишь основного времени обработки  $\tau_{осн} = L_{рез}/V_{дет}$ , т.е. без учета вспомогательного времени обработки (второго слагаемого зависимости). Это позволит с единых позиций оценивать влияние вспомогательного времени обработки  $\tau_{всп}$  на изменение штучного времени обработки  $T_{шт}$ . В этом случае зависимость (3.139) упростится и примет вид:

$$T_{шт} = \frac{2 \cdot n_{экстр}^{1,5}}{n^{0,5}} \cdot \tau_{всп} \quad (3.140)$$

В соответствии с зависимостью (3.140), штучное время обработки  $T_{шт}$  с увеличением количества проходов круга  $n$  непрерывно уменьшается. На рис. 3.27 и в табл. 3.13 приведены рассчитанные по зависимости (3.140) значения безразмерной величины  $T_{шт}/\tau_{всп}$ . Как видно, значения безразмерной величины  $T_{шт}/\tau_{всп}$ , рассчитанные по зависимости (3.140), всегда меньше значений, рассчитанных по зависимости (3.139).

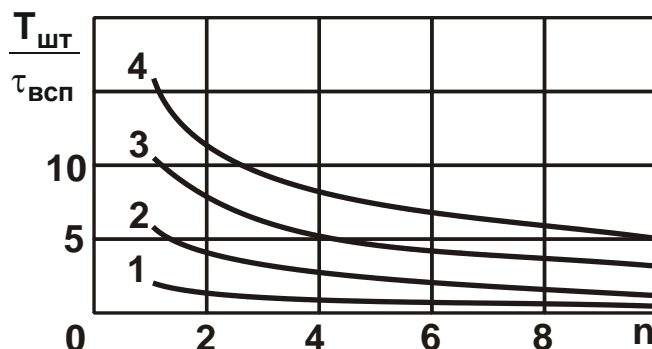


Рисунок 3.27 – Зависимость  $T_{шт}/\tau_{всп}$  от  $n$ : 1, ..., 4 –  $n_{экстр} = 1, \dots, 4$

Таблица 3.13 – Расчетные значения безразмерной величины  $T_{шт}/\tau_{всп}$

$n_{экстр}$	$n$					
	1	2	3	4	5	10
1	2	1,42	1,15	1	0,9	0,6
2	5,66	3,98	3,27	2,83	2,53	1,79
3	8,4	7,32	6	5,2	4,65	3,3
4	16	11,26	9,23	8	7,15	5

Для наглядности полученных решений на рис. 3.28 приведены рассчитанные по зависимостям (3.139) и (3.140) значения безразмерной величины  $T_{шт}/\tau_{всп}$  для случая  $n_{экстр} = 3$ . В точке экстремума значе-

ние  $T_{шт}/\tau_{всп}$ , рассчитанное по зависимости (3.139), в 1,5 раза больше значения  $T_{шт}/\tau_{всп}$ , рассчитанного по зависимости (3.140). Такой вывод вытекает также из зависимости (3.137), поскольку первое слагаемое, которое определяет основное время обработки, в два раза больше второго слагаемого, которое определяет вспомогательное время обработки. Такой же вывод вытекает и из зависимости (3.138), рассматривая в ней  $\tau_{всп} = 0,5 \cdot \tau_{осн}$ . Тогда зависимость (3.138) примет вид:

$$T_{шт.экстр} = 1,5 \cdot \tau_{осн} \cdot n_{экстр}. \quad (3.141)$$



Рисунок 3.28 – Зависимость  $T_{шт}/\tau_{всп}$  от  $n$ :

1 – расчет по зависимости (3.140); 2 – расчет по зависимости (3.139)

Как видно, при условии  $n = n_{экстр}$  параметр  $T_{шт.экстр}$  в 1,5 раза больше  $\tau_{осн}$ , т.е. за счет реверсирования стола станка оптимальное значение штучного времени обработки увеличивается в 1,5 раза.

Произведен расчет параметра  $n_{экстр}$  и соответствующих ему оптимальных параметров режима шлифования  $t$  и  $V_{дет}$  для плоского шлифования пластины из закаленной стали 18ХГН2МФБ твердостью HRC 57 ... 63 абразивным кругом 1А1 350×15×76 24А 40 СМ1 К6 со структурой 7 (без применения охлаждающей жидкости) для следующих исходных данных:  $L_{рез} = 100$  мм;  $\Pi = 0,4$  мм;  $R_{кр} = 0,15$  м;  $R_{дет} \rightarrow 0$ ;  $\rho = 6,67$  м<sup>-1</sup>;  $\tau_{всп} = 0,5$  с;  $\theta = 800$  °С;  $\lambda_M = 42$  Вт/(м·град);  $c_M \cdot \rho_M = 5 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·град). Экспериментально установлено, что для данных условий обработки условное напряжение резания равно  $\sigma = 15 \cdot 10^3$  Н/мм<sup>2</sup>.

После подстановки исходных данных в зависимость (3.136), получено  $n_{экстр} = 5,4$ , т.е. необходимо принять значение  $n_{экстр} = 6$ . Тогда  $t = \Pi/n_{экстр} = 0,067$  мм. Скорость детали  $V_{дет}$ , которая определяется зависимостью (3.134), равна  $V_{дет} = 17,9$  м/мин.

Для меньшей длины хода стола станка  $L_{рез} = 50$  мм, эти параметры, соответственно, принимают значения:  $n_{экстр} = 3,4$  (принято  $n_{экстр} = 4$ );  $t = 0,1$  мм;  $V_{дет} = 9,9$  м/мин. Как видно, с уменьшением  $L_{рез}$  количество проходов круга  $n_{экстр}$  и скорость детали  $V_{дет}$  уменьшаются, а глубина шлифования  $t$  – увеличивается, т.е. наблюдается тенденция перехода от многопроходного шлифования к глубинному шлифованию.

Таким образом установлено, что дополнительное время обработки, связанное с реверсированием стола станка, является существенным ограничивающим фактором увеличения скорости детали  $V_{дет}$  в условиях многопроходного шлифования. Этим объясняется тот факт, что на практике скорость детали изменяется в ограниченных пределах.

С учетом зависимостей  $\tau_{всп} = 0,5 \cdot \tau_{осн}$  и  $\tau_{осн} = L_{рез} / V_{дет}$  имеем:

$$V_{дет} = \frac{L_{рез}}{2 \cdot \tau_{всп}}. \quad (3.142)$$

В процессе плоского шлифования параметр  $L_{рез}$  определяет длину хода стола станка, а в процессе круглого продольного шлифования – длину развертки винтовой линии на цилиндрической детали. В процессе плоского шлифования параметр  $L_{рез}$  изменяется в незначительных пределах, как правило, до 0,5 м. Например, при условии  $\tau_{всп} = 0,5$  с – со скоростью детали  $V_{дет} = 30$  м/мин. Если вспомогательное время обработки  $\tau_{всп}$  больше, то скорость детали  $V_{дет}$  уменьшится. На практике в процессе плоского шлифования  $V_{дет}$  в основном не превышает 30 м/мин.

В условиях обработки детали небольшой длины, например, для  $L_{рез} = 0,05$  м, скорость детали  $V_{дет}$  при условии  $\tau_{всп} = 0,5$  с равна  $V_{дет} = 3$  м/мин, что фактически отвечает условиям глубинного шлифования. Глубина шлифования  $t$  при этом устанавливается на основе зависимости  $t = \Pi / n_{экстр}$ , а оптимальное количество проходов круга  $n$  в случае съема припуска  $\Pi$  – на основе зависимости (3.136). Для расчетов необходимо знать количественные значения входящих в зависимость (3.136) параметров:  $c_m$ ,  $\rho_m$ ,  $\lambda_m$ ,  $\sigma$ ,  $\Pi$ ,  $L_{рез}$ ,  $R_{кр}$ ,  $\theta$ ,  $\tau_{всп}$ .

Исходя из проведенного анализа, можно сделать вывод о том, что поскольку скорость детали  $V_{дет}$  устанавливается из зависимости

(3.142), то она зависит лишь от двух параметров:  $L_{рез}$  и  $\tau_{всп}$ . Глубина шлифования  $t$ , которая устанавливается зависимостью  $t = \Pi/n_{экстр}$ , определяется с учетом всех других параметров обработки:  $c_m, \rho_m, \lambda_m, \sigma, \Pi, L_{рез}, R_{кр}, \theta, \tau_{всп}$ . Поэтому изменение параметров (за исключением  $L_{рез}$  и  $\tau_{всп}$ ) допускает лишь изменение глубины шлифования и, соответственно, количества проходов круга  $n$ . Скорость детали  $V_{дет}$  в этом остается неизменной, зависящей лишь от  $L_{рез}$  и  $\tau_{всп}$ .

Таким образом показано, что скорость детали  $V_{дет}$  значительно ограничена величиной вспомогательного времени обработки  $\tau_{всп}$ . Чтобы исключить это ограничение, необходимо, например, плоское шлифование деталей осуществлять на плоскошлифовальном станке не с прямоугольным, а с вращающимся столом. Это позволит значительно увеличить скорость детали  $V_{дет}$  и количество проходов круга  $n$ , уменьшая глубину шлифования  $t$  и увеличивая производительность обработки для заданной температуры шлифования  $\theta$ .

Важно оценить возможности увеличения скорости детали  $V_{дет}$  в процессе круглого продольного многопроходного шлифования:

$$L_{рез} = \pi \cdot D_{дет} \cdot \frac{l_{дет}}{B}, \quad (3.143)$$

где  $D_{дет}, l_{дет}$  – диаметр и длина обрабатываемой детали, м.

Как вытекает из зависимости (3.143), параметр  $L_{рез}$  в процессе круглого продольного многопроходного шлифования может принимать значительно большие значения, чем в процессе плоского шлифования. Причем, с уменьшением параметра  $B$ , равного продольной подаче на оборот детали, длина  $L_{рез}$  увеличивается, достигая нескольких метров. Это, исходя из зависимости (3.142), допускает значительное увеличение скорости детали  $V_{дет}$ , например, до значений 200 – 500 м/мин и более. В этом случае, очевидно, потери времени  $\tau_{всп}$ , связанные с реверсированием стола станка, мало влияют на скорость детали  $V_{дет}$ , которая может устанавливаться достаточно большой, исходя из технических возможностей круглошлифовального станка.

В большинстве же случаев круглого продольного многопроходного шлифования, в соответствии с зависимостями (3.142) и (3.143), ско-

рость детали  $V_{дет}$  принимает относительно небольшие значения. Поэтому фактор потери времени вследствие реверсирования стола станка значительно ограничивает увеличение скорости детали  $V_{дет}$ . Чтобы его исключить, необходимо перейти от схемы продольного многопроходного шлифования к схеме шлифования последовательными врезаниями – с радиальной подачей уступами [84]. В этом случае в процессе шлифования одного уступа отсутствует необходимость реверсирования стола станка и поэтому отсутствует ограничение на увеличение скорости детали  $V_{дет}$ . Она может быть установлена максимально возможной для конкретного круглошлифовального станка, а глубина шлифования  $t$ , наоборот, – минимально возможной. В результате достигается максимально возможная производительность обработки при условии обеспечения заданной температуры шлифования, что исключает образование температурных дефектов на обработанной поверхности. В обобщенном виде условия повышения производительности обработки на основе полученных теоретических решений показаны на рис. 3.29.

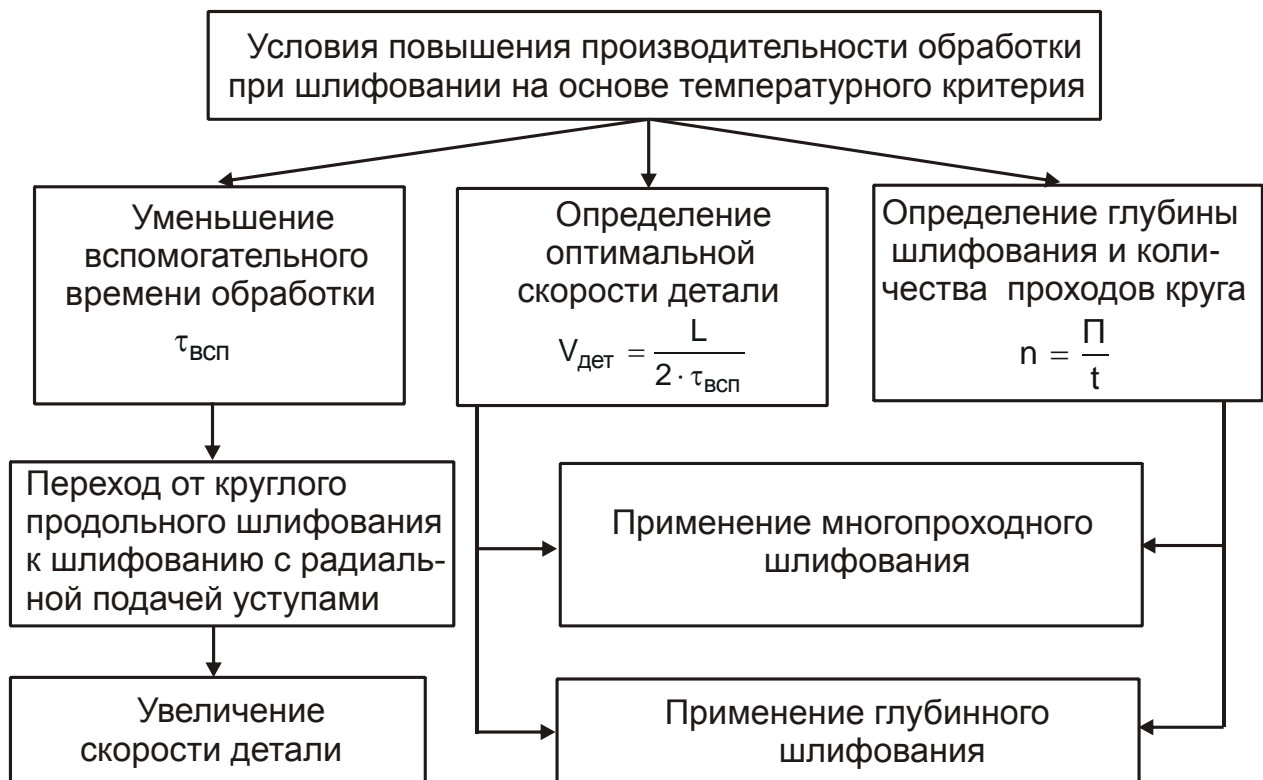


Рисунок 3.29 – Структурная схема условий повышения производительности обработки в процессе шлифования по температурному критерию

Установленные условия позволяют, во-первых, по-новому подойти к определению оптимальных параметров режима шлифования, а во-вторых, обосновать условия выбора вполне конкретных значений параметров режима шлифования, реализуемых на практике.

### 3.10. Технологическое обеспечение параметров точности и качества механической обработки материалов резанием

В процессе изготовления ответственных деталей машин чрезвычайно актуальна проблема обеспечения высокой точности обработки, особенно за счет управления упругими перемещениями элементов технологической системы, которые, как правило, определяют параметры точности обработки [100, 108, 47, 220]. В общем виде величина упругого перемещения определяется отношением радиальной составляющей силы резания  $P_y$  и жесткости технологической системы  $c$ .

В работе [133] получена аналитическая зависимость для определения радиальной составляющей силы резания:

$$P_y = v \cdot R \cdot \sqrt[3]{16 \cdot \tau_{сдв} \cdot HV^2 \cdot \alpha}, \quad (3.144)$$

где  $v$  – ширина резания, м;  $R$  – радиус округления вершины лезвия инструмента, м;  $\alpha = a/R$ ;  $a$  – толщина среза, м;  $HV$  – твердость обрабатываемого материала (по Виккерсу), Н/м<sup>2</sup>;  $\tau_{сдв}$  – предел прочности на сдвиг обрабатываемого материала, Н/м<sup>2</sup>.

Это позволило определить величину упругого перемещения, возникающего в технологической системе в процессе свободного резания лезвийным инструментом:

$$y = \frac{P_{y1}}{c} = \frac{v \cdot R}{c} \cdot \sqrt[3]{16 \cdot \tau_{сдв} \cdot HV^2 \cdot \alpha}. \quad (3.145)$$

Основными условиями уменьшения величины  $y$  и, соответственно, повышения точности обработки является уменьшение параметров  $v$ ,  $R$  и увеличение  $c$ , а также уменьшение отношения  $\alpha = a/R$  до значения, близкого к предельному, при котором возможен переход от процесса резания к процессу трения и пластического деформирования обрабатываемого материала (рис. 3.30). Однако отношение  $\alpha = a/R$  незначительно влияет на величину  $y$ , поскольку входит в зависимость (3.145) со степенью 0,33. Поэтому более эффективно уменьшать ве-



личину  $u$  путем уменьшения параметра  $R$ , обеспечивая высокую остроту режущего лезвия инструмента. Добиться существенного уменьшения параметра  $R$  можно в условиях абразивной обработки.

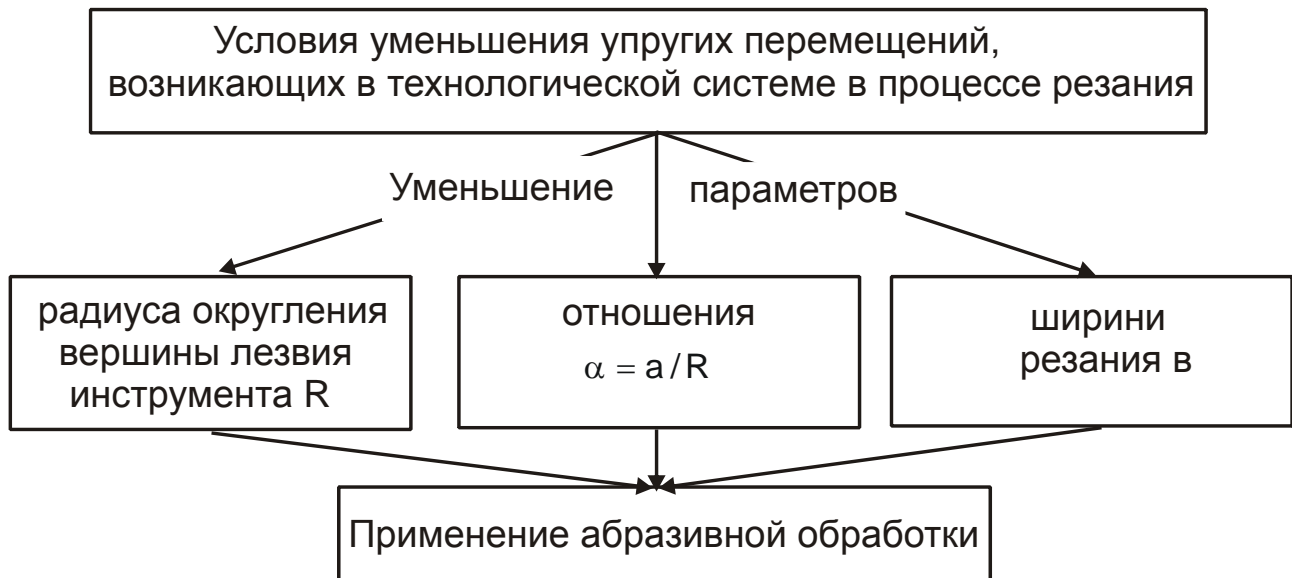


Рисунок 3.30 – Структурная схема условий уменьшения упругих перемещений, возникающих в технологической системе в процессе резания

В работе [133] приведены общие зависимости для определения тангенциальной  $P_z$  и радиальной  $P_y$  составляющих силы резания:

$$P_z = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{сдв}}{K_{рез}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right); \quad (3.146)$$

$$P_y = \frac{2 \cdot a \cdot v \cdot \tau_{сдв}}{K_{рез}^2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{рез}^2}\right), \quad (3.147)$$

где  $K_{рез} = P_z / P_y$  – коэффициент резания.

Используя зависимости (3.146), (3.147) и зависимость для определения суммарной мгновенной площади поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами круга  $S_{сум} = Q / V_{кр}$ , можно определить тангенциальную  $P_z$  и радиальную  $P_y$  составляющие силы резания при шлифовании (рис. 3.31):

$$P_z = \sigma \cdot S_{сум} = \sigma \cdot \frac{Q}{V_{кр}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot \tau_{сдв}^2 \cdot HV}{\alpha}} \cdot \frac{Q}{V_{кр}}; \quad (3.148)$$

$$P_y = \frac{P_z}{K_{рез}} = \frac{\sigma}{K_{рез}} \cdot \frac{Q}{V_{кр}} = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot \tau_{сдв} \cdot HV^2}{\alpha^2}} \cdot \frac{Q}{V_{кр}}, \quad (3.149)$$

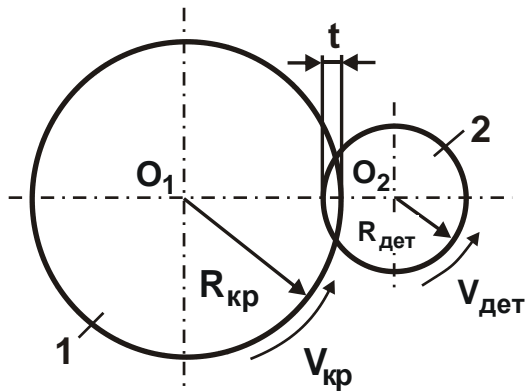


Рисунок 3.31– Расчетная схема параметров процесса круглого шлифования: 1 – круг; 2 – деталь

где  $Q$  – производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;  $V_{кр}$  – скорость круга, м/с;  $\sigma = P_z / S_{сум}$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>.

Как видно, уменьшить составляющие силы резания при шлифовании можно уменьшением параметров  $\sigma$ ,  $Q$ , и увеличением коэффициента резания  $K_{рез}$  и скорости круга  $V_{кр}$ . Отношение  $\alpha = a/R$  ( $\alpha = a_z/R$ ) для круглого шлифования алмазным кругом определяется зависимостью [133]:

$$\alpha = \frac{a_z}{R} = \frac{1,09 \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot V_{кр} \cdot R^3}, \quad (3.150)$$

где  $\bar{X}$ ,  $m$  – зернистость и объемная концентрация зерен в алмазном круге;  $V_{дет}$  – скорость детали, м/с;  $t$  – глубина шлифования, м;  $\rho = 1/R_{кр} + 1/R_{дет}$  – приведенный радиус, м<sup>-1</sup>;  $R_{кр}$ ,  $R_{дет}$  – радиусы круга и детали, м;  $a_z$  – толщина среза единичным зерном, м.

Увеличить отношение  $\alpha = a_z/R$  можно, главным образом, уменьшением параметра  $R$ , который входит в зависимость (3.150) с наибольшей степенью. Это может быть достигнуто применением алмазно-абразивных инструментов, которые характеризуются высокой остротой режущих кромок алмазных зерен. Однако в этом случае важно обеспечить своевременное удаление с рабочей поверхности алмазного круга затупившихся зерен, имеющих увеличенное значение параметра  $R$ . Это достигается применением эффективных методов правки круга, особенно электроэрозионной или электрохимической правки алмазных кругов на высокопрочных металлических связках.

Из зависимости (3.150) следует, что с увеличением параметра  $R$  отношение  $\alpha = a_z/R$  существенно уменьшается.

Как известно [245], при условии достижения значений  $a_z/R < 0,04$  процесс резания прекращается, возможен только процесс упруго-пластического деформирования материала. Поэтому, чтобы обеспечить устойчивый процесс резания, необходимо выполнить условие:  $a_z/R > 0,04$ . Исходя из зависимости (3.150), это возможно в результате увеличения параметров  $\bar{X}$ ,  $V_{дет}$ ,  $t$  и уменьшения  $m$  и  $V_{кр}$ .

Если представить режущее зерно в форме сферы радиусом  $R$ , то  $\bar{X} = 2 \cdot R$  и зависимость (3.150) приобретает упрощенный вид:

$$\alpha = \frac{1,09 \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot V_{кр}}. \quad (3.151)$$

В этом случае увеличить отношение  $\alpha = a_z/R$  можно увеличением параметров  $V_{дет}$ ,  $t$  и уменьшением  $m$ ,  $V_{кр}$ . Более целесообразно увеличивать скорость детали  $V_{дет}$ , реализуя процесс многопроходного шлифования.

Величина  $\alpha$  связана с отношением  $Q/V_{кр}$  зависимости (3.150). С учетом выражения  $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$  (где  $B$  – ширина шлифования, м) и решая зависимость (3.150) относительно отношения:

$$\frac{Q}{V_{кр}} = \frac{\alpha \cdot m \cdot B \cdot R^3}{1,09 \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3} \cdot \sqrt{\frac{t}{\rho}}, \quad (3.152)$$

после подстановки зависимости (3.152) в (3.148) и (3.149), получено:

$$P_z = \sqrt[3]{32 \cdot \tau_{сдв}^2 \cdot HV \cdot \alpha^2} \cdot \frac{m \cdot B \cdot R^3}{1,09 \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3} \cdot \sqrt{\frac{t}{\rho}}; \quad (3.153)$$

$$P_y = \sqrt[3]{16 \cdot \tau_{сдв} \cdot HV^2 \cdot \alpha} \cdot \frac{m \cdot B \cdot R^3}{1,09 \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3} \cdot \sqrt{\frac{t}{\rho}}. \quad (3.154)$$

Тогда

$$y = \frac{P_y}{c} = \sqrt[3]{16 \cdot \tau_{сдв} \cdot HV^2 \cdot \alpha} \cdot \frac{m \cdot B \cdot R^3}{1,09 \cdot 10^3 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot c} \cdot \sqrt{\frac{t}{\rho}}. \quad (3.155)$$

Из полученных зависимостей следует, что уменьшить составляющие силы резания при шлифовании можно уменьшением параметров  $\alpha$ ,  $m$ ,  $B$ ,  $R$ ,  $t$  и увеличением зернистости круга  $\bar{X}$ . Однако это приводит к уменьшению производительности обработки  $Q$ , что неэффективно. В этих условиях основным путем увеличения производительности обработки является увеличение скорости круга  $V_{кр}$ .

Величина упругого перемещения  $y$  изменяется по закону изменения радиальной  $P_y$  составляющей силы резания. Поэтому добиться уменьшения величины  $y$  и, тем самым, повысить точность обработки можно уменьшением параметра  $R$  и увеличением зернистости круга  $\bar{X}$ . Важно также обеспечить уменьшение отношения  $\alpha = a_z/R$  до предельного значения, при котором будет осуществлен процесс стружкообразования и резания, например до значения  $\alpha = 0,04$ .

С учетом зависимости (3.150) тангенциальную  $P_z$  и радиальную  $P_y$  составляющие силы резания при шлифовании можно выразить через производительность обработки  $Q$ :

$$P_z = \frac{R}{\bar{X}} \cdot \sqrt[3]{\frac{\tau_{сдв}^2 \cdot HV \cdot m \cdot B}{10 \cdot \pi}} \cdot \sqrt{\frac{t}{\rho}} \cdot \frac{Q^2}{V_{кр}^2}; \quad (3.156)$$

$$P_y = 0,1 \cdot \left(\frac{R}{\bar{X}}\right)^2 \cdot \sqrt[3]{\frac{16 \cdot \tau_{сдв} \cdot HV^2 \cdot m^2 \cdot B^2}{\pi^2}} \cdot \frac{t}{\rho} \cdot \frac{Q}{V_{кр}}. \quad (3.157)$$

Величина упругого перемещения  $y$  определяется:

$$y = \frac{0,1}{c} \cdot \left(\frac{R}{\bar{X}}\right)^2 \cdot \sqrt[3]{\frac{16 \cdot \tau_{сдв} \cdot HV^2 \cdot m^2 \cdot B^2}{\pi^2}} \cdot \frac{t}{\rho} \cdot \frac{Q}{V_{кр}}. \quad (3.158)$$

Из зависимостей (13) – (15), аналогичных зависимостям (3.153) – (3.155), видно, что наибольшее влияние на составляющие силы резания  $P_z$  и  $P_y$  и величину упругого перемещения  $y$  при шлифовании оказывают параметры  $R$  и  $\bar{X}$ . Поэтому уменьшить величину  $y$  можно, главным образом, за счет уменьшения параметра  $R$  (рис. 3.32). Это достигается применением кругов из синтетических сверхтвердых материалов и высокопористых кругов [132].

Как известно, шлифовальный круг характеризуется разновысотным расположением режущих зерен на его рабочей поверхности, что не позволяет в полной мере использовать его потенциальные возможности с целью уменьшения величины  $y$ . Значительно большими возможностями в этом направлении располагает обработка свободным абразивом, характеризующееся фактически одновысотным расположением режущих зерен (рис. 3.32).

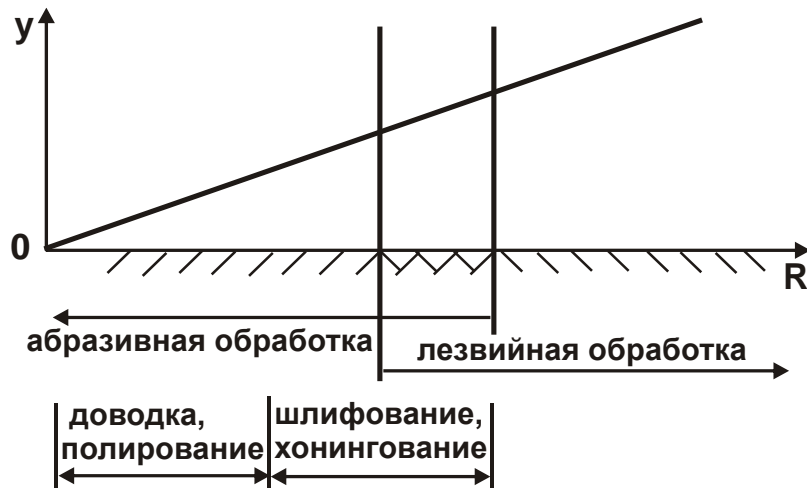


Рисунок 3.32 – Характер изменения величины упругого перемещения  $y$  от  $R$  при условии:  $a = \text{const}$

В условиях продольного точения (рис. 3.33) тангенциальная  $P_z$ , радиальная  $P_y$  и осевая  $P_x$  составляющие силы резания  $P$ , а также условное напряжение резания  $\sigma$  с учетом отношений:  $Q = S \cdot t \cdot V$ ;  $S_{\text{срез}} = a \cdot v = S \cdot t$ ;  $a = a_z = S \cdot \sin \varphi$ ;  $v = t / \sin \varphi$ ;  $\alpha = a / R$  принимают вид:

$$P_z = \sigma \cdot S_{\text{срез}} = t \cdot \sqrt[3]{\frac{32 \cdot \tau_{\text{сдв}}^2 \cdot HV \cdot R \cdot S^2}{\sin \varphi}}; \quad (3.159)$$

$$P_y = \frac{\sigma \cdot \cos \varphi}{K_{\text{рез}}} \cdot S_{\text{срез}} = t \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt[3]{\frac{16 \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot HV^2 \cdot R^2 \cdot S}{\sin^2 \varphi}}; \quad (3.160)$$

$$P_x = \frac{\sigma \cdot \sin \varphi}{K_{\text{рез}}} \cdot S_{\text{срез}} = t \cdot \sqrt[3]{16 \cdot \tau_{\text{сдв}} \cdot HV^2 \cdot R^2 \cdot S \cdot \sin \varphi}; \quad (3.161)$$

$$\sigma = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot \tau_{\text{сдв}}^2 \cdot HV \cdot R}{S \cdot \sin \varphi}}, \quad (3.162)$$

где  $S$  – подача, м/об.;  $t$  – глубина резания, м;  $V$  – скорость резания, м/с;  $S_{\text{срез}}$  – площадь поперечного сечения среза, м<sup>2</sup>;  $\varphi$  – главный угол резца в плане, градус.

Как видно, больше всего влияет на составляющие силы резания  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$  глубина резания  $t$ : с ее увеличением  $P_z$ ,  $P_y$  и  $P_x$  увеличиваются. С увеличением подачи  $S$  составляющие силы резания также увеличиваются, однако, в меньшей степени. Условное напряжение резания  $\sigma$  с увеличением подачи  $S$  и главного угла резца в плане  $\varphi$  уменьшается.

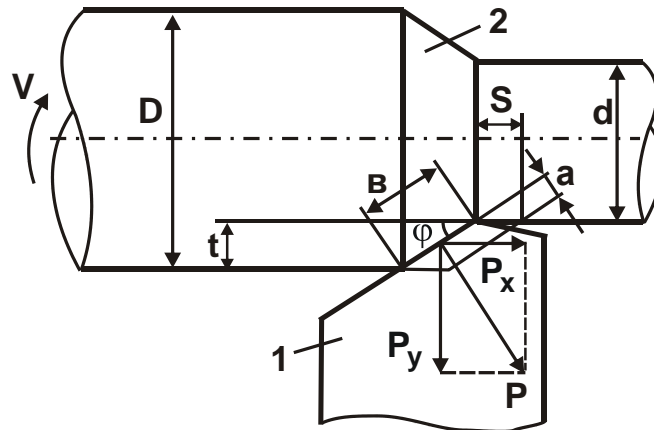


Рисунок 3.33 – Расчетная схема продольного точения: 1 – резец; 2 – деталь; D, d – диаметры заготовки и обработанной детали

Величина упругого перемещения  $y$  определяется:

$$y = \frac{P_y}{c} = \frac{t \cdot \cos \varphi}{S} \cdot \sqrt[3]{\frac{16 \cdot \tau_{сдв} \cdot HV^2 \cdot R^2 \cdot S}{\sin^2 \varphi}}. \quad (3.163)$$

Исходя из зависимости (3.163), уменьшить величину упругого перемещения  $y$  можно уменьшением глубины резания  $t$  и увеличением жесткости технологической системы, главного угла резца в плане  $\varphi \rightarrow 90^\circ$ , а также уменьшением радиуса округления вершины лезвия инструмента  $R$ . Учитывая то, что уменьшение глубины резания  $t$  связано с уменьшением производительности обработки и неэффективно, основным путем уменьшения величины  $y$  следует рассматривать увеличение жесткости технологической системы  $c$  и уменьшение параметра  $R$  за счет применения более износостойких инструментальных материалов с нанесенными на них износостойкими покрытиями, которые обеспечивают высокую режущую способность лезвийных инструментов.

## Выводы

1. Аналитически установлено, что условное напряжение резания (энергоёмкость обработки) при шлифовании в общем виде определяется отношением радиальной составляющей силы резания, обусловленной трением связки круга с обрабатываемым материалом, и суммарной радиальной составляющей силы резания. Увеличение данного

отношения в пределах от 0 до 1 вызывает неограниченное увеличение условного напряжения резания (энергоёмкости обработки), что и является причиной чрезвычайно высоких значений энергоёмкости обработки при шлифовании, достигаемых на практике.

2. Теоретически обоснованы основные условия уменьшения энергоёмкости обработки. Они состоят в обеспечении примерного равенства фактической и номинальной производительности обработки и ее увеличении; применении относительно мягких кругов, полностью или частично компенсирующих возникновение упругих перемещений в технологической системе путем размерного износа шлифовального круга и обеспечения его работы в режиме самозатачивания.

3. Получена аналитическая зависимость для определения производительности обработки при шлифовании по жесткой схеме в условиях интенсивного трения связки круга с обрабатываемым материалом и наличия упругих перемещений в технологической системе. Установлено, что увеличить производительность обработки в этих условиях можно повышением режущей способности круга, скорости круга и уменьшением радиальной составляющей силы резания, обусловленной трением связки круга с обрабатываемым материалом.

4. Показано, что возникновение колебаний при шлифовании связано с отсутствием в технологической системе равновесного состояния, обусловленного равенством сил  $P_y$  и  $c \cdot y$ . Чтобы выполнить это условие, необходимо обработку производить по упругой схеме шлифования с фиксированным радиальным усилием  $P_y$ , определяемым из условия равновесия  $P_y = c \cdot y$ . Это позволит исключить неустановившийся во времени процесс шлифования, характеризующийся изменением упругого перемещения и наличием колебаний в технологической системе.

5. Определены основные направления повышения эффективности финишной обработки деталей резанием на основе применения современных лезвийных и абразивных инструментов, позволяющих осуществлять высокоточную обработку деталей с одного станка с наименьшими производственными затратами. Теоретически обоснованы основные условия снижения силовой напряженности процесса резания, повышения показателей точности, качества и производительности обработки.

## Раздел 4

### Связь прерывистости процесса резания с динамическими и технологическими параметрами при шлифовании

Одним из путей повышения технического уровня и качества выпускаемой продукции является совершенствование существующих технологических процессов, в том числе и шлифование.

Известно, что эксплуатационные свойства деталей машин зависят не только от точности их изготовления, но и от высокого качества поверхностей, достигаемого на конечных операциях механической обработки – операциях шлифования.

В тоже время, одним из часто встречаемых дефектов на этих операциях может быть прижег поверхности и, как следствие, нарушение структуры и физико-механических свойств поверхностного слоя. Решение данной проблемы возможно:

- 1) за счет снижения режимов шлифования, а, следовательно, и производительности обработки;
- 2) применения новых технологических приемов обработки, в частности абразивного инструмента, имеющего прерывистую рабочую поверхность.

К этому виду конструкции инструмента можно отнести непосредственно прерывистые круги (описание конструкции и технологические возможности приведены в многочисленных работах профессора Якимова А. В. [186, 243, 245] и его учеников [168, 186], композиционные круги [115, 118], сегментные шлифовальные круги [239].

Однако использование абразивного инструмента этого типа сдерживается из-за наличия колебаний инструмента, возможности появления волнистости и не всегда удовлетворительной шероховатости на обрабатываемой поверхности. Для целенаправленного управления этими параметрами при прерывистом шлифовании необходимо выявить, как формируется волнистость на обрабатываемой поверхности, а также определить взаимосвязь образуемой волнистости с конструкцией прерывистого круга, его колебаниями, режимами обработки и температурными зависимостями. Важно теоретически изучить и экспериментально показать, что при практическом использовании шлифо-



вальных кругов с прерывистой рабочей поверхностью можно управлять как физико-механическими, так и геометрическими параметрами качества обрабатываемой поверхности.

#### **4.1. Состояние вопроса о формировании рельефа шлифованной поверхности**

Известно, что при шлифовании имеются определенные возможности управлять параметрами качества обрабатываемой поверхности. Однако для эффективного решения этого процесса необходимо знать причины, влияющие на эти параметры.

##### **4.1.1. Процесс формирования геометрических параметров, в частности шероховатости и волнистости, на поверхности обработки**

В основном в работах [106, 136, 146, 147, 217, 243] рассматриваются вопросы образования шероховатости поверхности. Какие условия способствуют появлению волнистости – рассматриваются редко [116, 118, 119, 181, 217, 243, 245, 248]. К тому же нет четкого распределения между волнистостью и шероховатостью. В работе [62] предлагалось разделить волнистость и шероховатость исходя из высоты неровностей и расстояния между ними (рис. 4.1). В работах [98, 180, 252] за разграничивающий критерий предлагается принимать величину отношения шага  $S_w$  к высоте  $W_z$  неровностей.

Выбор параметров волнистости и шероховатости поверхности рекомендуется производить исходя из служебного назначения детали и которые будут оптимальными для соответствующих условий работы пар трения. Также утверждается, что в большинстве случаев волнистость, отрицательно влияющая на эксплуатационные свойства машин, часто бывает более опасна, чем шероховатость [107].

По данным, приведенным в работах [107, 216], для большинства трущихся пар оптимальная высота неровностей находится в пределах  $0,08 > R_a > 0,02$  мкм шероховатости поверхности, для стальных проработанных поверхностей  $R_a = 1,27 \dots 0,04$  мкм [236]. А оптимальное соотношение между высотой и средним шагом неровностей обеспечивают большую износоустойчивость (рис. 4.2) [107, 109].

В работе [119] показано, что траектория колебания инструмента влияет на профиль волн, причем, главным показателем при нормировании является высота волны, поскольку, с точки зрения несущей поверхности, она является более важной.

Расстояние между неровностями L, мкм	Высота неровностей, мкм									
	0-1	1-2	2-4	4-8	8-16	16-32	32-64	64-128	128-256	256-500
0-1										
1-2										
2-4										
4-8										
8-16										
16-32										
32-64										
64-128										
128-256										
256-500										
500-1000										
1000-2000										
2000-4000										
4000-8000										
8000-16000										
16000-32000										
32000-64000										
64000-128000										
128000-256000										
256000-500000										

Рисунок 4.1 – Предлагаемая граница распределения между волнистостью и шероховатостью исходя из их высоты и шага [62]

К основным причинам образования волнистости, в первую очередь, относят:

1) динамические процессы, возникающие при обработке деталей на металлорежущих станках, связанные с потерей устойчивости системы СПИД [24, 95, 98, 100, 180];

2) вибрации, возникающие вследствие автоколебаний и вынужденных колебаний [106, 180];

3) неуравновешенность вращающихся деталей станка и инструмента [57, 245];

4) возникновение относительных колебаний детали и инструмента [98, 106, 146, 180];

5) еще одной из причин образования волнистости называется прерывистый характер резания и формообразования [180]. Причем, как отмечается, высота такой волнистости может быть незначительна, но она опасна как вторичный источник возбуждения колебаний.

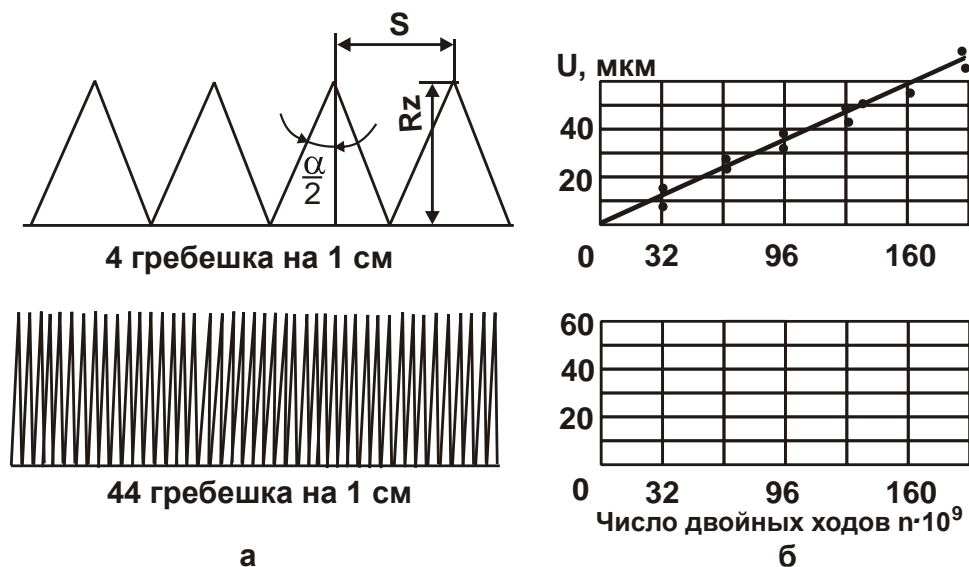


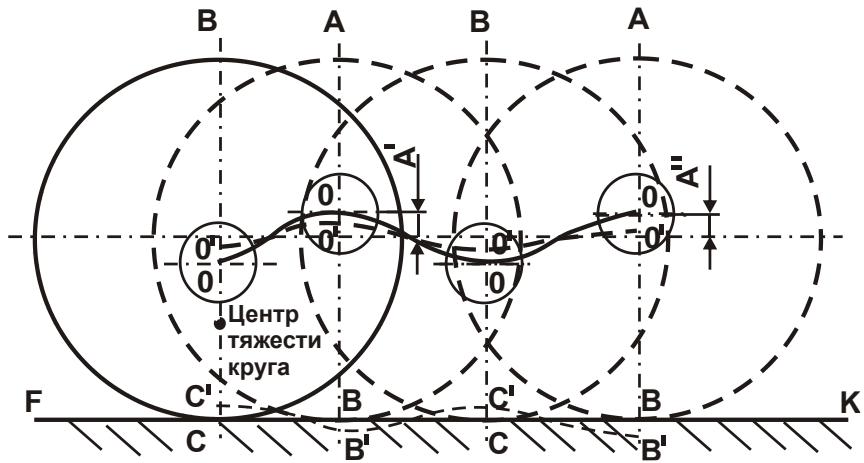
Рисунок 4.2 – Влияние формы неровностей (а) и величины опорной кривой (б) на износ поверхности, при одинаковой высоте неровностей [109]

О причинах возникновения волнистости упоминается также в стандартах некоторых стран: например, стандарт ФРГ – DIN 4762, Великобритании – BS 1134:1961, США – ASA B.46.1-1962, Франции – E 05-015.

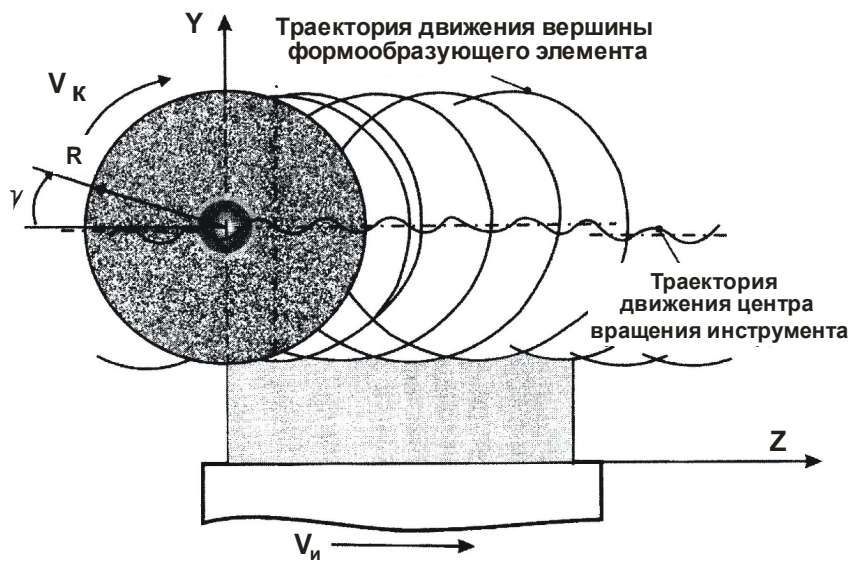
#### 4.1.2. Взаимосвязь формообразующей кромки прерывистого круга с обрабатываемой поверхностью

Процесс взаимодействия прерывистого круга с обрабатываемой поверхностью в основном рассматривался с точки зрения формирования физико-механических свойств и частично формирования геометрических параметров поверхности [26, 88, 186, 245].

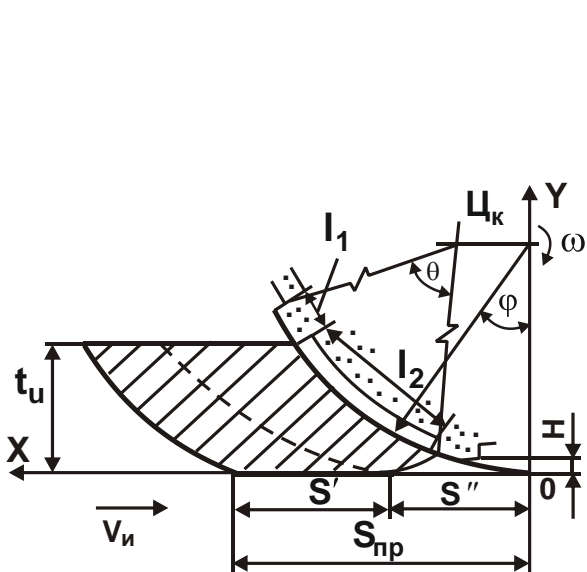
В работах Якимова А. В. [245], Свирщева В. И. [201], Корсакова В. С. [90], Новоселова Ю. К. [146] процесс формирования профиля поверхности представлен в виде перемещения центра круга (О) и, соответственно, формообразующей точки (С) в результате действия центра тяжести круга (рис. 4.3,а, б) или в результате геометрических параметров соотношения длины паза/выступа (рис. 4.3,в, г).



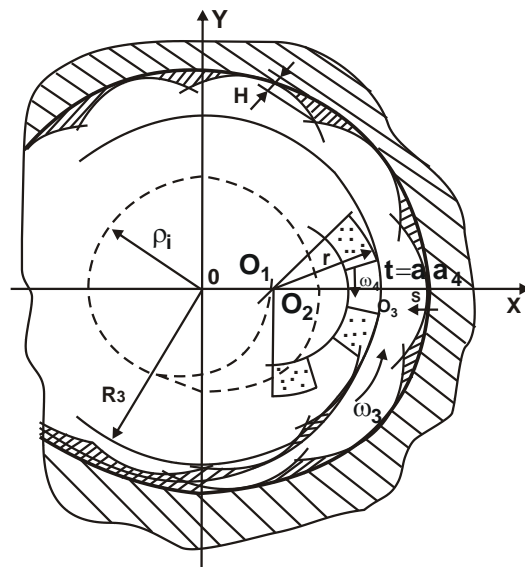
а) по данным Якимова А. В. [245]



б) по данным Новоселова Ю. К. [146]



в) по данным Свирицева В. И. [201]



г) по Корсакову В. С и др. [90]

Рисунок 4.3 – Образование профиля поверхности

Причем, в работе [201] описание параметров макронеровностей включает только геометрические параметры круга и режимы обработки (рис. 4.3,в):

$$S' = \frac{V_u \cdot l_1}{\omega \cdot R}; \quad S'' = \frac{V_u \cdot l_2}{\omega \cdot R}; \quad S = \frac{V_u \cdot (l_1 + l_2)}{\omega \cdot R}; \quad H = \frac{V_u^2 \cdot l_u^2}{8 \cdot \omega^2 \cdot R \cdot \left(\frac{V_u}{\omega} \pm R\right)^2}. \quad (4.1)$$

Приведенный в работе [90] механизм образования неровностей ( $\Delta$ ) учитывает геометрические параметры инструмента, детали и режимы обработки:

$$\Delta = R_3 + \frac{S\varphi}{60 \cdot \omega_3} - \rho_H \cdot \left[ \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) + \sqrt{\frac{r^2}{\rho_H^2} - \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right)} \right],$$

а перемещение центра прерывистого круга описывается только как перемещение по архимедовой спирали за счет подачи (рис. 4.3,г):

$$\rho_i = \rho_3 - r + \frac{\alpha}{2\pi} \cdot \varphi,$$

где  $\alpha$  – шаг спирали.

Таким образом, перемещение центра круга имеет более сложный характер, а, следовательно, и процесс формирования неровностей на обрабатываемой поверхности существенно отличается, поскольку в приведенных примерах не учитывают перемещения шлифовального круга от высокочастотных вибраций, вызванных прерывистостью процесса резания.

## **4.2. Построение модели образования волнистости на обрабатываемой поверхности при прерывистом шлифовании**

Для определения профиля, образуемого на обработанной поверхности, и его геометрических параметров, формирующихся при шлифовании инструментом с прерывистой рабочей поверхностью, необходимо решить следующие задачи:

- определить траекторию движения характерных точек (центра масс и периферии) шлифовального круга и его взаимодействие с обрабатываемой поверхностью;

– построить математическую модель, связывающую динамические параметры процесса обработки с параметрами формируемой волнистости.

В работах ряда авторов [41, 88, 106, 180, 181] отмечается, что траекторией движения формообразующей точки круга является сложная замкнутая циклоидальная или квазициклоидальная кривая, вызванная вибрациями системы СПИД.

Рассмотрим, как формируется рельеф на обрабатываемой поверхности переходя последовательно от простых перемещений к более сложным. Шлифовальный круг может совершать следующие движения (рис. 4.4).

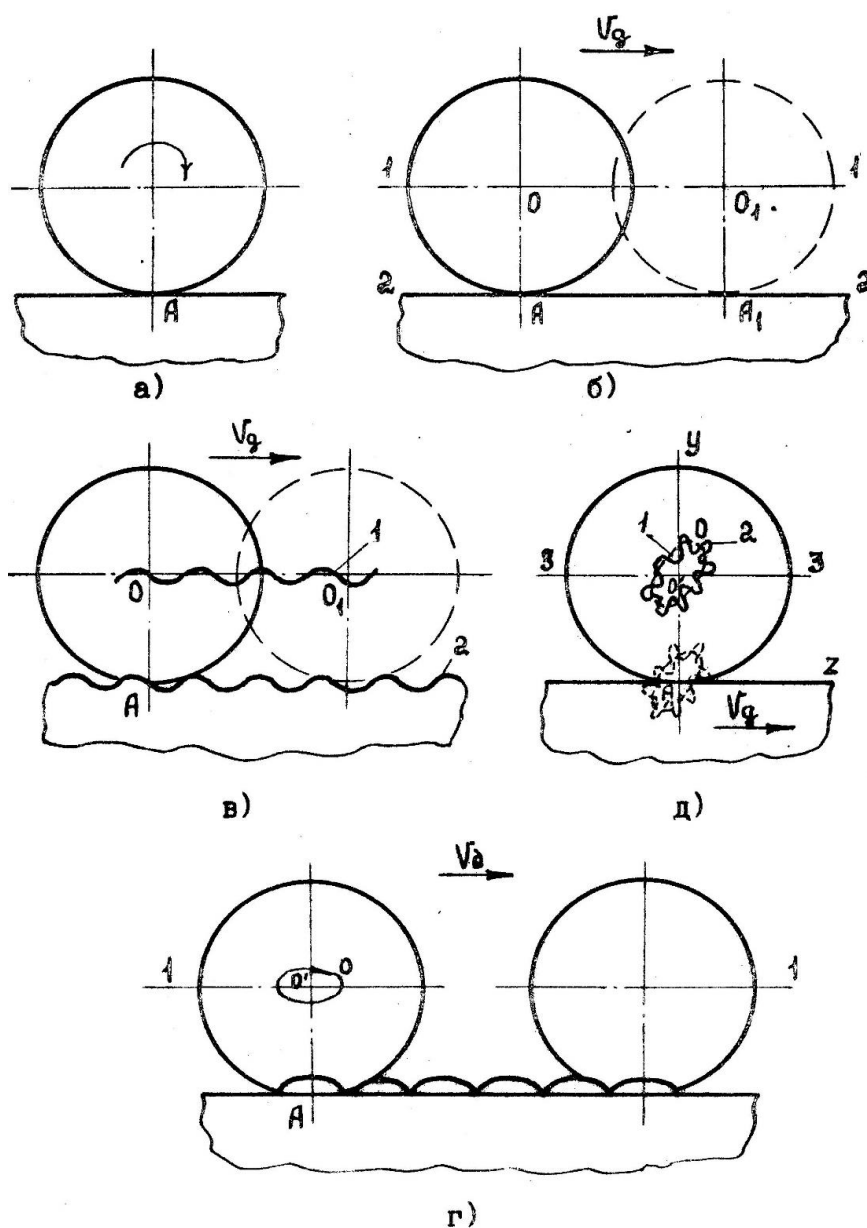


Рисунок 4.4 – Схема траектории движения формообразующей точки круга и формирование волнистости на обрабатываемой поверхности

При равномерном вращении круга вокруг своей оси (с угловой скоростью  $\omega'$ ), без продольного перемещения, изменение профиля поверхности (в точке А) не происходит (рис. 4.4,а).

Необходимым условием возникновения процесса формообразования является наличие движения инструмента или его кромок относительно обрабатываемой поверхности. В этом случае при отсутствии каких-либо дополнительных источников колебания самая простая схема формообразования профиля поверхности будет представлять собой прямую линию А–А<sub>1</sub>, параллельную оси О–О<sub>1</sub>, равноотстоящую от нее на величину R – радиуса круга (рис. 4.4,б).

При равномерном синусоидальном перемещении центра круга вдоль оси О–О<sub>1</sub> (рис. 4.4,в), точка А (считая круг жестким телом) также совершает синусоидальные перемещения, формируя на поверхности кривую 2 (без учета величины радиуса круга).

Известно, что при вращении геометрическая и физическая оси шпинделя могут не совпадать в силу различных причин (например, погрешностей изготовления шпинделя, динамической неуравновешенности). В результате геометрическая ось шпинделя вращается вокруг физической оси со скоростью вращения шпинделя, т.е. геометрический центр круга О совершает круговое или эллипсоидальное перемещение вокруг неподвижной оси О' и движется по прямой 1–1 (рис. 4.4,г). При этом "неподвижная" точка А периферии будет описывать уже более сложную циклоидальную кривую.

Эта схема соответствует случаю движения и обработки нормальным (сплошным) кругом со смещенным центром масс, т.е. дисбаланс.

Возможен и более сложный вариант, при котором геометрический центр круга О, совершающий эллипсоидное перемещение 1 вокруг неподвижной оси О, получает еще дополнительное синусоидальное движение 2 вокруг этой же оси О' и вся система перемещается по прямой 3–3 (рис. 4.4,д). Формообразующая точка А, совершая такое же движение, как и точка О, (без учета вращения точки А вокруг оси О') будет описывать в плоскости YAZ сложную квазициклоидальную кривую.

Можно предположить, что приведенный вариант будет соответствовать процессу обработки при прерывистом шлифовании, т.к. движение центра масс по эллипсоидной кривой будет вызвано наличием его смещения, а синусоидальный характер движения вызван наличием возмущающей силы, действующей по синусоидальному закону.

Таким образом, чтобы определить вид кривой, формирующейся на обрабатываемой поверхности по методам 2-й группы динамических признаков формообразования (по градации, предложенной в работе [146]), при обработке абразивным инструментом и применении методов механики необходимо для формообразующей точки, находящейся на поверхности, задать ее координаты  $Y, Z$ , профиль и траекторию движения.

#### 4.2.1. Определение траектории движения оси шлифовального круга

Для решения задачи определения траектории движения оси шлифовального круга, в первую очередь необходимо описать движение оси круга (точки  $O$ ), совершаемой в плоскости  $YAZ$  (рис. 4.4), при наличии дисбаланса.

В общем виде неуравновешенность шпиндельного узла можно представить через главный вектор неуравновешенных сил  $\bar{Q}$  [41], имеющий три основные составляющие:  $\bar{q}_k$  – конструкционная;  $\bar{q}_T$  – технологическая;  $\bar{q}_3$  – эксплуатационная неуравновешенности:

$$\bar{Q} = \bar{q}_k + \bar{q}_T + \bar{q}_3,$$

каждая из которых имеет свои причины.

Конструкционная неуравновешенность  $\bar{q}_k$  – связана с наличием лысок, углублений конструкции. Изготовление шлифовальных кругов с прерывистой режущей поверхностью, и не всегда связанное с этим точное взаимное расположение их элементов в диаметральном сечении.

Технологическая неуравновешенность  $\bar{q}_T$  – связана с определенным допуском на изготовление элементов шпиндельного узла (включая и шлифовальный круг), а, следовательно, и не симметричным их монтажом, наличием смещения центра масс шлифовального круга за счет отклонений формы и неточности сборки.

Эксплуатационная неуравновешенность,  $\bar{q}_3$  – связана с изменением формы и размеров детали и шлифовального круга в процессе обработки, а также со смещением центра масс шлифовального круга из-за неравномерной плотности его материала.

Приведенные неуравновешенности будут вызывать низкочастотные колебания (назовем их несущей (основной) частотой) системы "шлифовальный круг – шпиндель", амплитуда которой зависит от ве-



личины смещения центра масс шлифовального круга  $A_0 = f(E)$ , (т.е. его дисбаланса), а частота колебаний – от угловой скорости вращения шпинделя  $\omega = f(n_{об})$ .

Однако главный вектор неуравновешенных сил можно свести к минимально допустимому, по технологическим возможностям, значению за счет введения в систему дополнительных уравновешивающих сил, противоположных по знаку, т.е. проведение балансировки шлифовального круга или шпиндельного узла в целом:

$$\bar{Q} = -\bar{Q}_д \rightarrow \min .$$

Составим дифференциальное уравнение движения центра масс шлифовального круга и относительных поворотов оси шпинделя около центра масс для прерывистых кругов, учитывая возникающие вынужденные колебания, связанные со специфическими особенностями шлифования данными кругами.

В предлагаемой схеме расчета приняты следующие допущения:

1) Система колеблется под действием сил, вызванных прерывистостью процесса резания. Данное допущение основано на том, что при обработке нормальным кругом, на записанных осциллограммах перемещения центра, ясно видны колебания, связанные с наличием сил резания и дисбалансом круга, частота которых соответствует скорости вращения шпинделя.

При обработке прерывистым кругом на основную составляющую наложена гармоника более высокого порядка, вызванная наличием ударных сил  $F_v$ , частота которой соответствует частоте изменения этих сил (т.е. количеству выступов на круге).

Еще одной особенностью шлифования прерывистыми кругами будет то, что удар, происходящий в момент соприкосновения выступа с обрабатываемой поверхностью, несколько отличается от понятия удара, рассматриваемого в механике, когда при соприкосновении двух упругих тел, скорость их движения изменяется на некоторую конечную величину и происходит их остановка или отскок. Этот удар характеризуется тем, что происходит еще пластическая деформация обрабатываемой поверхности и внедрение абразивного зерна, т.е. непосредственно процесс резания. Следовательно, в данном случае нельзя принимать полностью понятие удара как такового. Поэтому, используется понятие "ударной нагрузки", воспринимаемой телом.

2) Демпфирование в упругой технологической системе отсутствует.

3) Деталь имеет абсолютную жесткость. Данное допущение основано на том, что жесткость магнитного стола, а, следовательно, и связанной с ним детали примерно на 2 порядка выше жесткости опор шпинделя. Данные по динамическим исследованиям, приведенные в работах [201, 226], показывают, что максимальные колебания наблюдались у шпинделя станка в месте установки шлифовального круга. Колебания остальных элементов упругой системы незначительны по отношению к шпинделю (колебания которого приняты за единицу) и составляют: шлифовальной бабки – 0,25 ... 0,4; колонны – 0,08 ... 0,1; стола – 0,02 ... 0,03; крестового суппорта – 0,015 ... 0,02, т.е. колебания стола можно не учитывать.

4) Шлифовальный круг имеет постоянную форму правильного цилиндра. Данное допущение основано на результатах исследований [201] износа прерывистых кругов во времени. Нарушение макропрофиля поверхности по образующей не происходит. Радиальный износ прерывистого круга во времени протекает равномерно и наличие волнистости на поверхности круга не наблюдалось (рис. 4.5).

5) Шпиндель станка вместе со шлифовальным кругом считаем жестким, установленным на податливых опорах. Данное допущение основано на том, что изгибная жесткость шпинделя значительно превышает жесткость опор [41].

6) Ось шпинделя совмещена с геометрическим центром круга.

На первом этапе найдем уравнение движения для обычного шлифовального круга с учетом его дисбаланса [38, 41, 201] (рис. 4.6)

Пусть  $Y_1, Y_2, Z_1, Z_2$  представляют собой малые перемещения оси шпинделя в опорах при колебаниях в радиальном и тангенциальном направлениях (на первой и второй опорах соответственно). Перемещение центра  $S$  массы шлифовального круга установим через перемещение шпинделя в опорах:

$$Y_{ск1} = Y_1 \cdot \frac{I_{кр} + X_{ц}}{X_{ц}}.$$

Аналогично получим выражение для определения перемещений в горизонтальной плоскости:

$$Z_{ск1} = Z_1 \cdot \frac{I_{кр} + X_{ц}}{X_{ц}},$$

где  $X_{ц}$  – точка пересечения оси балки с горизонтальной линией при условии равновесия, определяется по методике, приведенной в [201].

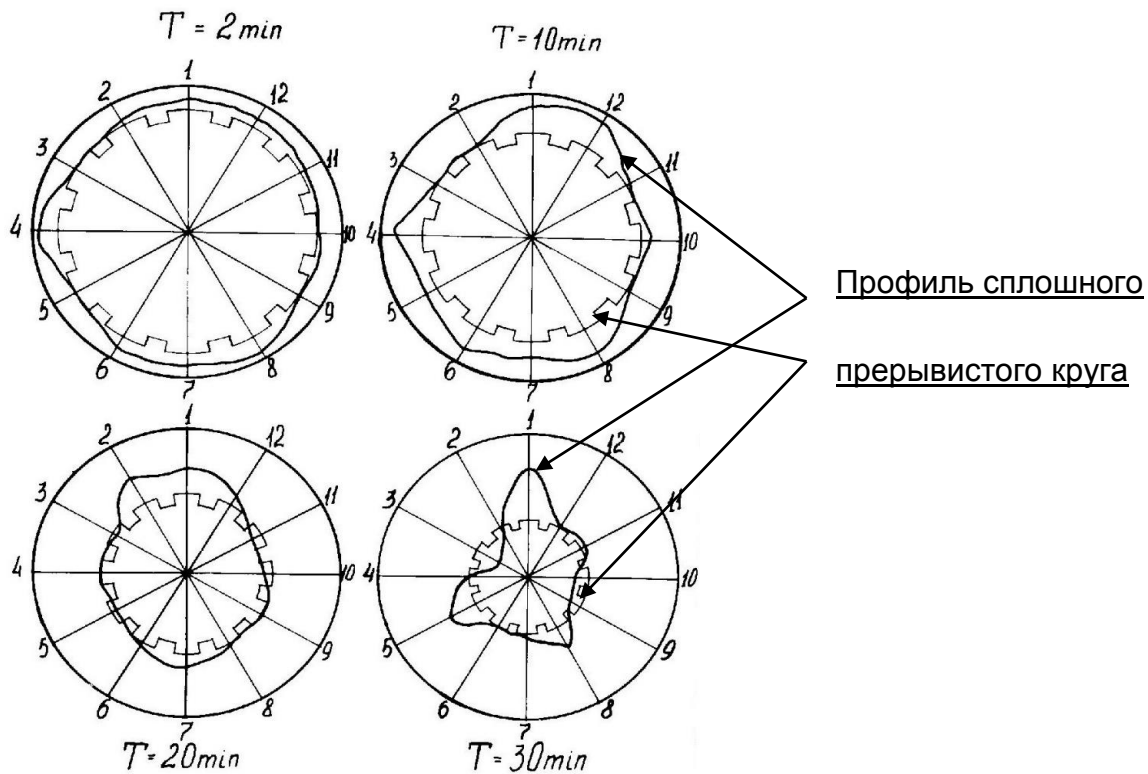


Рисунок 4.5 – Формирование профиля рабочей поверхности сплошного и прерывистого ( $n = 12$  шт.,  $l = 50$  мм) кругов в среднем сечении по ширине в зависимости от времени шлифования [201]

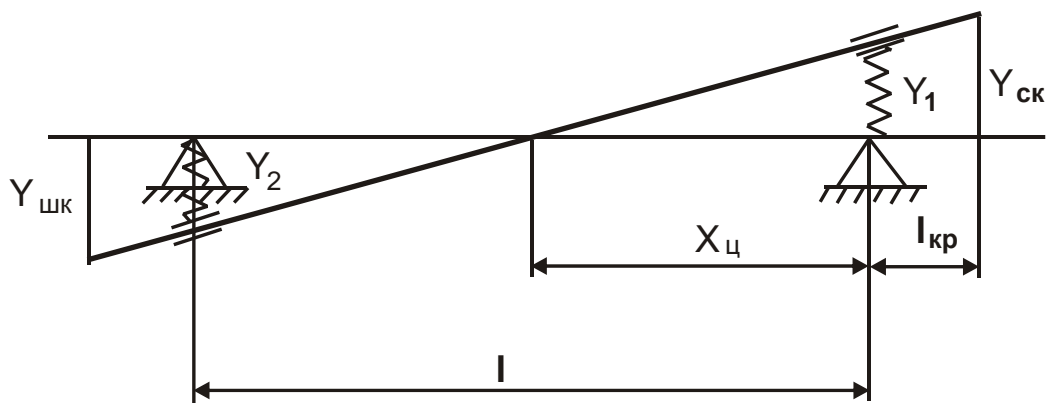


Рисунок 4.6 – Схема радиального перемещения  $y_{ск}$  центра масс шлифовального круга в зависимости от перемещения оси шпинделя в опорах

Жесткость опор обозначим:  $C_{в1}$ ,  $C_{в2}$ ,  $C_{г1}$ ,  $C_{г2}$  соответственно в вертикальном и горизонтальном направлениях. Реакции подшипников

в направлениях  $Y$  и  $Z$ , вызываемые малыми перемещениями  $Y_1, Y_2, Z_1, Z_2$ , будут  $C_{B1}Y_1, C_{B2}Y_2, C_{r1}Z_1, C_{r2}Z_2$ .

Возмущающими факторами для нормального круга с учетом его дисбаланса будут сила резания  $P_{рез}$  и неуравновешенная центробежная сила  $P_{ц.б.}$  (рис. 4.7).

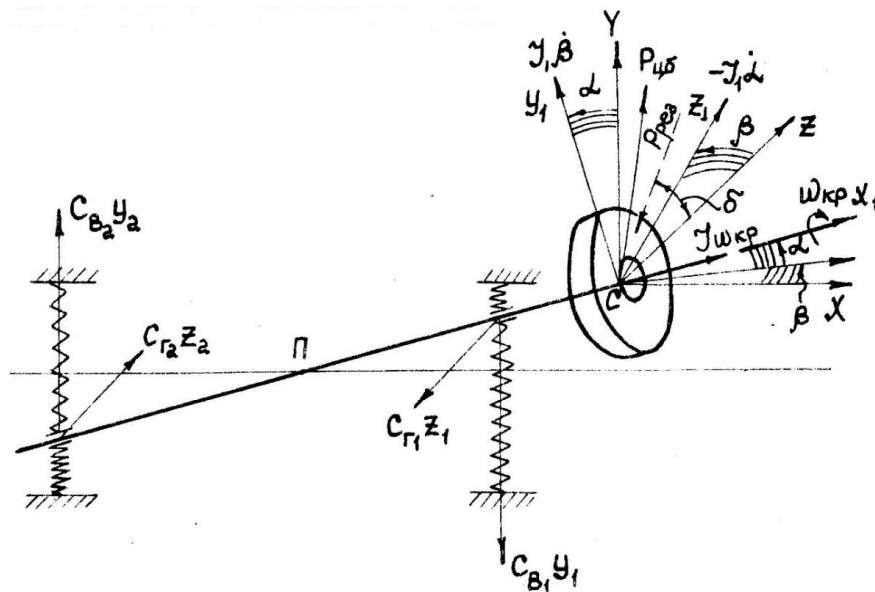


Рисунок 4.7 – Схема действующих сил неуравновешенного консольного шпинделя с шлифовальным кругом

Уравнение, определяющее перемещения центра масс в проекциях на оси  $Y$  и  $Z$ , имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{P}{g} \cdot \ddot{y}_{ск} + C_{B1} \cdot Y_1 - C_{B2} \cdot Y_2 + P_{рез} \cdot \sin \delta + P = P_{ц.б.} \cdot \sin \omega_{кр} t; \\ \frac{P}{g} \cdot \ddot{z}_{ск} + C_{r1} \cdot Z_1 - C_{r2} \cdot Z_2 + P_{рез} \cdot \cos \delta = P_{ц.б.} \cdot \cos \omega_{кр} t, \end{aligned} \right\}, \quad (4.2)$$

где  $P$  – сила тяжести.

Для полного определения движения оси шпинделя необходимо еще составить дифференциальные уравнения, описывающие повороты оси шпинделя  $X_1$  относительно неподвижных осей  $X$  и  $Z$ . Согласно закону изменения момента количества движения, производная по времени полного момента количества движения движущейся системы относительно неподвижной оси равна моменту сил относительно той же оси [24]. В результате упругих деформаций ось вращения  $X_1$  составляет с неподвижными координатными плоскостями  $XY$  и  $XZ$  малые углы  $\alpha$  и  $\beta$ . Углы поворота оси шпинделя в вертикальной и горизонтальной плоскостях через перемещения шпинделя в опорах описываются:

$$\alpha = \frac{Y_2 - Y_1}{l}; \quad \beta = \frac{Z_2 - Z_1}{l}. \quad (4.3)$$

Составляющие момента количества движения относительно осей  $X_1, Y_1, Z_1$  определяются:

$$L_{x1} = -l\omega_{кр}; \quad L_{y1} = -l_1\dot{\beta}; \quad L_{z1} = l_1\dot{\alpha},$$

где  $l$  – момент инерции шлифовального круга относительно оси  $X_1$ ;  $l_1$  – момент инерции шлифовального круга относительно осей  $OY_1$  и  $OZ_1$ .

Моменты количества движения относительно неподвижных осей  $Y$  и  $Z$  определим, спроектировав на эти оси моменты  $L_{x1}; L_{y1}; L_{z1}$ :

$$L_y = L_{y1} + L_{x1} \cdot \alpha = -l_1\dot{\beta} - l\omega_{кр}\alpha;$$

$$L_z = L_{z1} + L_{x1} \cdot \beta = -l_1\dot{\alpha} - l\omega_{кр}\beta.$$

На основании закона изменения момента количества движения имеем:

$$M_Y = \frac{d}{dt}L_Y; \quad M_Z = \frac{d}{dt}L_Z, \quad (4.4)$$

где  $M_Y$  и  $M_Z$  – соответственно, моменты внешних сил относительно осей  $Y$  и  $Z$ .

С учетом равенства (4.3) и (4.4) дифференциальные уравнения, описывающие повороты оси  $X$  шпинделя относительно неподвижных осей  $Y$  и  $Z$ , можно записать:

$$\left. \begin{aligned} M_Z + C_{B1} \cdot Y_1 \cdot l_{кр} - C_{B2} \cdot Y_2 (l + l_{кр}) &= 0; \\ M_Y - C_{r1} \cdot Z_1 \cdot l_{кр} + C_{r2} \cdot Z_2 (l + l_{кр}) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

Система дифференциальных уравнений, описывающих движения оси шпинделя шлифовального круга в пространстве под действием сил резания и неуравновешенности круга, имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{P}{g} \cdot \left( \ddot{y}_1 \frac{l_{кр} + \chi_{ц}}{\chi_{ц}} \right) + C_{B1} Y_1 - C_{B2} Y_2 + P_{рез} \cdot \sin \delta + P &= P_{ц.б.} \cdot \sin \omega_{кр} t; \\ \frac{P}{g} \cdot \left( \ddot{z}_1 \frac{l_{кр} + \chi_{ц}}{\chi_{ц}} \right) + C_{r1} Z_1 - C_{r2} Z_2 + P_{рез} \cdot \cos \delta &= P_{ц.б.} \cdot \cos \omega_{кр} t; \\ l_1 \frac{\ddot{y}_2 - \ddot{y}_1}{l} + l\omega_{кр} \frac{\dot{z}_1 - \dot{z}_2}{l} + C_{B1} Y_1 l_{кр} - C_{B2} Y_2 (l + l_{кр}) &= 0; \\ l_1 \frac{\ddot{z}_1 - \ddot{z}_2}{l} + l\omega_{кр} \frac{\dot{y}_1 - \dot{y}_2}{l} - C_{r1} Z_1 l_{кр} + C_{r2} Z_2 (l + l_{кр}) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

Система уравнений (4.6) составлена для силовой неуравновешенности круга, поскольку установлено [39, 40], что наибольшие отклонения оси вызывает силовая неуравновешенность, при которой амплитуда вибраций в 2 ... 3 раза больше амплитуды вибраций, вызываемых моментной неуравновешенностью.

При наличии гироскопических моментов колебания в плоскостях YOX и ZOX взаимосвязаны, а, следовательно, плоские колебания вала невозможны [24].

Шпиндель шлифовального станка можно рассматривать как гироскоп [28, 41, 88], вращающийся вокруг полюса (П) (рис. 4.7), т.е. колебания шпинделя, вызванные неуравновешенностью, представляют "прямую" прецессию с угловой скоростью, равной скорости вращения шпинделя.

Частное решение системы дифференциальных уравнений (4.6) представляющих собой колебания шпинделя с кругом под действием сил резания и наличия дисбаланса, имеет вид:

$$\begin{aligned} Y_1 &= y_{10} + B_1 \sin \omega_{кр} t; & Y_2 &= y_{20} + B_2 \sin \omega_{кр} t; \\ Z_1 &= z_{10} + A_1 \cos \omega_{кр} t; & Z_2 &= z_{20} + A_2 \cos \omega_{кр} t, \end{aligned} \quad (4.7)$$

где  $y_{10}$ ,  $y_{20}$ ,  $z_{10}$ ,  $z_{20}$  – перемещения точек оси шпинделя, лежащих в плоскости опор, вызванных действием сил резания  $P_{рез}$  и силы тяжести круга  $P$  (рис. 4.8);  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  – амплитуды колебаний опор шлифовальной бабки (горизонтальные и вертикальные), определяемые по теореме Крамера [31]:

$$A_1 = \frac{\Delta A_1}{\Delta}; \quad A_2 = \frac{\Delta A_2}{\Delta}; \quad B_1 = \frac{\Delta B_1}{\Delta}; \quad B_2 = \frac{\Delta B_2}{\Delta},$$

$\Delta$  – определитель системы (4.6) четырех алгебраических уравнений, полученных в результате подстановки решений (4.7) в систему уравнений (4.6);  $\Delta A_1$ ,  $\Delta A_2$ ,  $\Delta B_1$ ,  $\Delta B_2$  – определители искоемых постоянных.

После подстановки и соответствующих преобразований получим систему, в которой слагаемые в правой части, содержащие члены  $y_{10}$ ,  $y_{20}$ ,  $z_{10}$ ,  $z_{20}$ , можно принять равными нулю, поскольку рассматриваются перемещения, связанные с учетом изменения возмущающих усилий во времени. Сила резания  $P_{рез}$  не влияет на характер движения оси, если принять ее не изменяющейся во времени, а вызывает лишь единовременное смещение ее, остающееся постоянным в течение всего времени шлифования [38, 39].

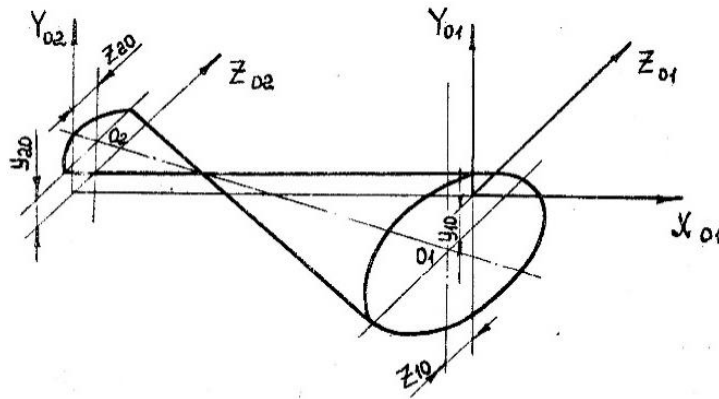


Рисунок 4.8 – Поверхность, описываемая осью шпинделя в пространстве под действием дисбалансов шлифовального круга

Сила тяжести принимается равномерно распределенной массой по всему объему круга. Входящую в систему силу резания  $P_{рез}$  можно представить в виде какой-либо постоянно действующей силы, изменяющейся по синусоидальному закону:  $P_{рез} = P_0 \cdot \sin \omega t$ . Тогда, слагаемое

силы резания примет вид:  $\frac{P_0 \cdot \sin \omega t \cdot \sin \delta}{\sin \omega t} = P_0 \cdot \sin \delta \rightarrow (P_y; P_z)$ , т.е. будет результирующей сил  $P_y$  и  $P_z$ .

Поскольку нас интересуют только амплитуды колебаний на первой опоре, т.е.  $A_1, B_1$ , то определители  $\Delta A_1$  и  $\Delta B_1$  получим из определителя  $\Delta$  системы заменой последовательно соответствующего столбца на столбец:

$$\begin{pmatrix} -P_y + P_{ц.б.} \\ -P_z + P_{ц.б.} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Определитель  $\Delta$  системы:

$$\Delta = \begin{vmatrix} \left( -\frac{P\omega_{кр}^2 K_1}{g} + C_{B1} \right) & (-C_{B2}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \left( -\frac{P\omega_{кр}^2 K_1}{g} + C_{r1} \right) & (-C_{r2}) \\ \left( \frac{I_1 \omega_{кр}^2}{I} + C_{B2} I_{кр} \right) & \left( -\frac{I_1 \omega_{кр}^2}{I} - C_{B2} K_2 \right) & \left( -\frac{I \omega_{кр}^2}{I} \right) & \left( \frac{I \omega_{кр}^2}{I} \right) \\ \left( \frac{I \omega_{кр}^2}{I} \right) & \left( -\frac{I \omega_{кр}^2}{I} \right) & \left( -\frac{I_1 \omega_{кр}^2}{I} - C_{r1} I_{кр} \right) & \left( \frac{I_1 \omega_{кр}^2}{I} + C_{r2} K_2 \right) \end{vmatrix} =$$

$$\begin{aligned}
&= \left( -\frac{P\omega_{kp}^2 K_1}{g} + C_{B1} \right) \left[ \left( -\frac{P\omega_{kp}^2 K_1}{g} + C_{r1} \right) \cdot \left( \frac{l\omega_{kp}^2}{l} \right) \cdot \left( -\frac{l\omega_{kp}^2}{l} \right) + (-C_{r2}) \times \right. \\
&\times \left( -\frac{l_1\omega_{kp}^2}{l} - C_{B2}K_2 \right) \cdot \left( -\frac{l\omega_{kp}^2}{l} - C_{r1}l_{kp} \right) - \left( -\frac{l\omega_{kp}^2}{l} \right) \cdot \left( -\frac{l\omega_{kp}^2}{l} \right) \times \\
&\times \left. (-C_{r2}) - \left( \frac{l_1\omega_{kp}^2}{l} + C_{r2}K_2 \right) \cdot \left( -\frac{l_1\omega_{kp}^2}{l} - C_{B2}K_2 \right) \cdot \left( -\frac{P\omega_{kp}^2 K_1}{g} + C_{r1} \right) \right] - (C_{B2}) \times \\
&\times \left[ \left( \frac{P\omega_{kp}^2 K_1}{g} + C_{r1} \right) \cdot \left( \frac{l\omega_{kp}^2}{l} \right) \cdot \left( \frac{l\omega_{kp}^2}{l} \right) + (-C_{r2}) \times \right. \\
&\times \left( \frac{l_1\omega_{kp}^2}{l} + C_{B1}l_{kp} \right) \cdot \left( -\frac{l_1\omega_{kp}^2}{l} - C_{r1}l_{kp} \right) - \left( \frac{l\omega_{kp}^2}{l} \right) \cdot \left( -\frac{l\omega_{kp}^2}{l} \right) \times \\
&\times \left. (-C_{r2}) - \left( \frac{l_1\omega_{kp}^2}{l} + C_{r2}K_2 \right) \cdot \left( \frac{l_1\omega_{kp}^2}{l} + C_{B2}l_{kp} \right) \times \right. \\
&\times \left. \left( -\frac{P\omega_{kp}^2 K_1}{g} + C_{r1} \right) \right] \tag{4.8}
\end{aligned}$$

Определители  $\Delta B_1$  и  $\Delta A_1$ :

$$\begin{aligned}
\Delta B_1 &= (-P_y + P_{ц.б}) \left[ \left( -\frac{P\omega_{kp}^2 K_1}{g} + C_{r2} \right) \cdot \left( \frac{l\omega_{kp}^2}{l} \right) \cdot \left( -\frac{l\omega_{kp}^2}{l} \right) + (-C_{r2}) \times \right. \\
&\times \left( \frac{l_1\omega_{kp}^2}{l} - C_{B2}K_2 \right) \cdot \left( -\frac{l_1\omega_{kp}^2}{l} - C_{r1}l_{kp} \right) - (-C_{r2}) \cdot \left( -\frac{l\omega_{kp}^2}{l} \right) \times \\
&\times \left( -\frac{l\omega_{kp}^2}{l} \right) - \left( -\frac{P\omega_{kp}^2 K_1}{g} + C_{r1} \right) \cdot \left( \frac{l_1\omega_{kp}^2}{l} - C_{B2}K_2 \right) \times \\
&\times \left. \left( \frac{l_1\omega_{kp}^2}{l} - C_{r2}K_2 \right) \right] - (-C_{B2}) \times \\
&\times \left[ (-P_z + P_{ц.б}) - \left( \frac{l\omega_{kp}^2}{l} \right) \cdot \left( \frac{l_1\omega_{kp}^2}{l} - C_{r2}K_2 \right) - (-P_z + P_{ц.б}) \times \right. \\
&\times \left. \left( -\frac{l\omega_{kp}^2}{l} \right) \cdot \frac{l_1\omega_{kp}^2}{l} \right] \tag{4.9}
\end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
\Delta A_1 = & (-P_z + P_{ц.б}) \times \left[ \left( -\frac{P\omega_{кр}^2 K_1}{g} + C_{B1} \right) \cdot \left( -\frac{I_1\omega_{кр}^2}{I} - C_{B2}K_2 \right) \cdot \left( \frac{I_1\omega_{кр}^2}{I} - C_{Г2}K_2 \right) + \right. \\
& + (-C_{B2}) \cdot \left( \frac{I\omega_{кр}^2}{I} \right) - \left( -\frac{I\omega_{кр}^2}{I} \right) \cdot \left( \frac{I\omega_{кр}^2}{I} \right) \cdot \left( -\frac{P\omega_{кр}^2 K_1}{g} + C_{B1} \right) - \\
& \left. - \left( \frac{I_1\omega_{кр}^2}{I} + C_{Г2}K_2 \right) \cdot \left( \frac{I_1\omega_{кр}^2}{I} + C_{B2}I_{кр} \right) \cdot (-C_{B2}) \right] + (-C_{Г2}) \times \\
& \times \left[ (-P_y + P_{ц.б}) \cdot \left( \frac{I_1\omega_{кр}^2}{I} + C_{B2}I_{кр} \right) \cdot \left( -\frac{I\omega_{кр}^2}{I} \right) - \left( -\frac{I\omega_{кр}^2}{I} \right) \times \right. \\
& \left. \times \left( -\frac{I_1\omega_{кр}^2}{I} - C_{B2}I_{кр} \right) \cdot (-P_y + P_{ц.б}) \right] \quad (4.10)
\end{aligned}$$

В приведенных выражениях (4.8) – (4.10)

$$K_1 = \frac{I_{кр} + x_{ц}}{x_{ц}}; \quad K_2 = I + I_{кр}.$$

Для определения уравнений движения точек, принадлежащих оси шпинделя и лежащих соответственно в поперечных плоскостях опор  $Y_1OZ_1$  и  $Y_2OZ_2$  из уравнений (4.7) исключим параметр  $t$ , после чего получим:

$$\frac{(y_1 - y_{10})^2}{B_1^2} + \frac{(z_1 - z_{10})^2}{A_1^2} = 1; \quad \frac{(y_2 - y_{20})^2}{B_2^2} + \frac{(z_2 - z_{20})^2}{A_2^2} = 1. \quad (4.11)$$

Равенства (4.11) представляют собой канонические уравнения эллипсов с началом координат соответственно в точках  $O_1 (y_{10}; z_{10})$  и  $O_2 (y_{20}; z_{20})$ . Таким образом, конец оси шпинделя, в результате сложения гироскопических колебаний в вертикальном и горизонтальном направлениях, под действием неуравновешенных сил будет описывать эллиптическую траекторию [38, 88].

Проведенные ранее исследования [115, 148, 244] показали, что при шлифовании кругами с прерывистой рабочей поверхностью на основную составляющую колебаний круга (рис. 4.9), связанную с его дисбалансом, накладывается еще гармоника более высокого порядка (рис. 4.10), возникающая под действием возмущающей силы  $F_b$  (т.е. ударной нагрузки) (рис. 4.11), связанной со специфическими условиями обработки данными кругами.

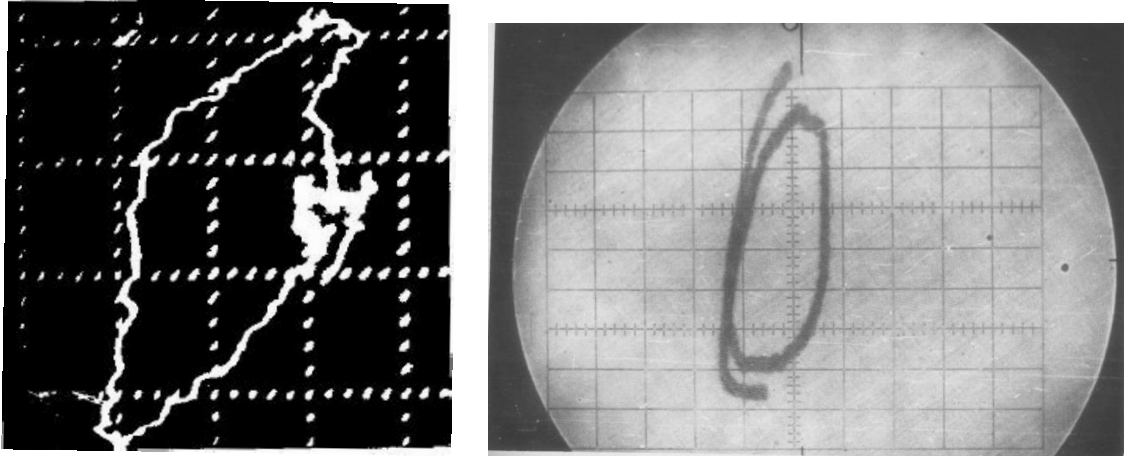


Рисунок 4.9 – Осциллограмма перемещений центра круга при холостом вращении в результате наличия дисбаланса

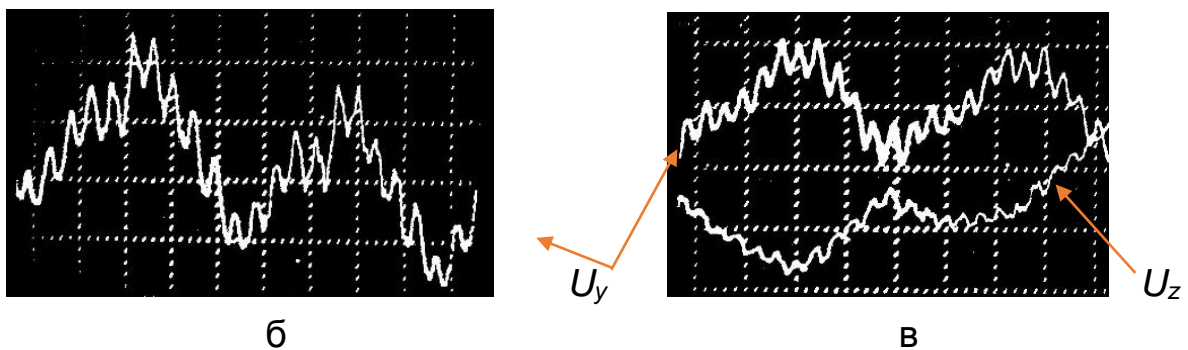
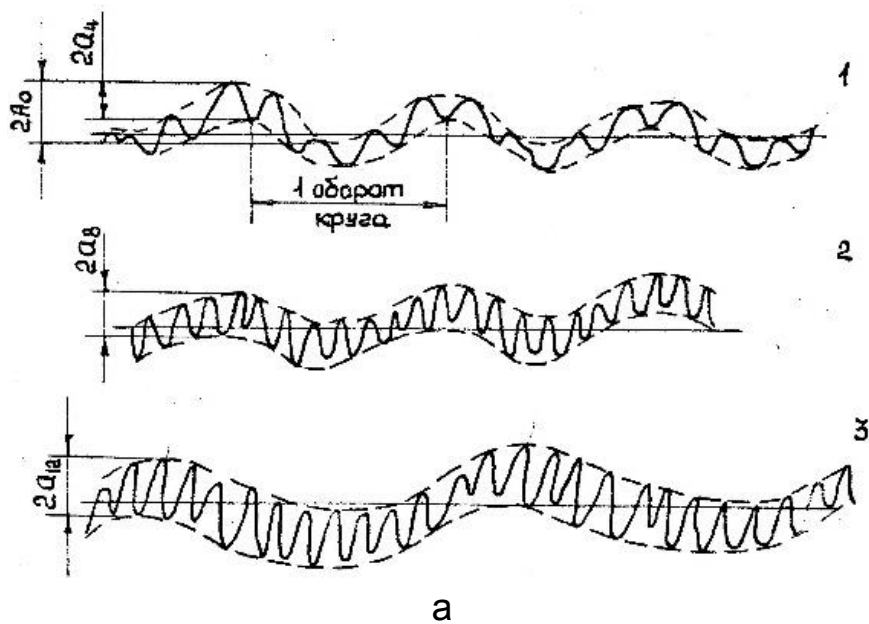


Рисунок 4.10 – Образец записи виброперемещений (а) и осциллограмма перемещений при обработке прерывистыми кругами с 10 (б) и 12 выступами (в)

Наличие ударной нагрузки подтверждается тем, что характерной особенностью реакции системы на ударное возбуждение является наличие выходного сигнала по окончании входного действия (так называемый эффект ударного последействия) [165].

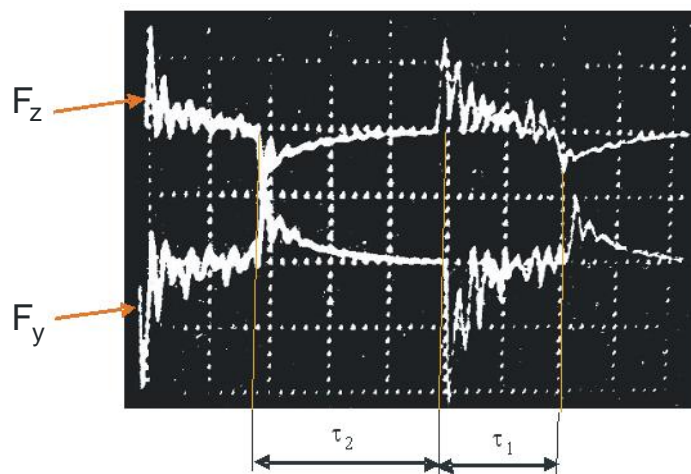


Рисунок 4.11 – Осциллограммы ударной нагрузки возникающей в процессе шлифования ( $\tau_1$  – время прохождения выступа;  $\tau_2$  – время прохождения паза)

На приведенной осциллограмме видно, что в момент соприкосновения (удара) выступа круга с обрабатываемой поверхностью происходит всплеск составляющих  $F_i$ . За время прохождения выступа ( $\tau_1$ ), в процессе съема металла, происходит постепенное затухание колебаний в связи с увеличением натяга в системе. В момент прохождения впадины ( $\tau_2$ ), происходит резкое снятие натяга и всплеск амплитуды в обратном направлении.

Представив возмущающую силу  $F_B$  в виде двух составляющих (радиальной и тангенциальной)  $F_{By}$  и  $F_{Bz}$  и разложив их в ряд Фурье рассмотрим определенные гармоники:

$$F_{By} = B \sin \omega_1 t;$$

$$F_{Bz} = A \sin \omega_1 t,$$

где  $A$  и  $B$  – амплитудные значения сил  $F_{Bz}$  и  $F_{By}$ .

Уравнения движения центра круга под действием ударной нагрузки в плоскости YOZ:

$$\begin{cases} \ddot{y} + \omega^2 y = B \sin \omega_1 t; \\ \ddot{z} + \omega^2 z = A \sin \omega_1 t. \end{cases} \quad (4.12)$$

Частное решение этой системы имеет вид:

$$\begin{cases} y^* = C_1 \cdot \sin \omega_1 t; \\ z^* = C_2 \cdot \sin \omega_1 t. \end{cases} \quad (4.13)$$

Подставив (4.13) в (4.12):

$$\begin{cases} -C_1 \omega_1^2 + \omega^2 C_1 = B; \\ -C_2 \omega_1^2 + \omega^2 C_2 = A, \end{cases} \quad (4.14)$$

определим коэффициенты  $C_1$  и  $C_2$  системы:

$$C_1 = \frac{B}{\omega^2 - \omega_1^2}; \quad C_2 = \frac{A}{\omega^2 - \omega_1^2},$$

и, подставив в (4.13), определим перемещения оси под действием гармонической возмущающей силы  $F_B$ :

$$\left. \begin{aligned} y^* &= \frac{B}{\omega^2 - \omega_1^2} \cdot \sin \omega_1 t; \\ z^* &= \frac{A}{\omega^2 - \omega_1^2} \cdot \sin \omega_1 t. \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

Иными словами, под действием гармонической возмущающей силы ось шпинделя относительно эллипсоидной кривой будет совершать еще гармонические синусоподобные колебания.

Таким образом, на основании принципа суперпозиции при шлифовании прерывистыми кругами центр масс круга будет описывать в плоскости сечения ( $YOZ$ ), перпендикулярном оси шпинделя, сложную замкнутую кривую, описываемую выражением (4.16):

$$\begin{cases} Y = B_{св} \cdot \sin \omega_0 t_c + U_y \cdot \sin \omega_B t_c \cdot \sin \omega_0 t_c; \\ Z = A_{сг} \cdot \cos \omega_0 t_c + U_z \cdot \sin \omega_B t_c \cdot \cos \omega_0 t_c, \end{cases} \quad (4.16)$$

определяющим положение центра масс круга в данный момент времени  $t_c$  относительно неподвижных координат  $O'Y$  и  $O'Z$  (рис. 4.4д), где  $A_{сг}$  и  $B_{св}$  – амплитуды горизонтальных и вертикальных (соответственно) колебаний, связанных с дисбалансом круга;  $U_y$  и  $U_z$  – амплитуды вынужденных радиальных и тангенциальных колебаний, связанных с действием вынуждаемой возмущающей силы;  $\omega_0$  и  $\omega_B$  – частоты основной и высокочастотной составляющей вынужденных колебаний (соответственно).

Следовательно, система уравнений (4.16) определяет координаты движения оси шлифовального круга в плоскости сечения, перпен-

дикулярном оси шпинделя, под действием возникающих сил, с учетом амплитуды и частоты колебаний.

Теоретически рассчитанная по системе уравнений (4.16) траектория перемещения геометрического центра круга с учетом действующих факторов (режимов обработки, соответствующих сил резания, величин ударной нагрузки) приведена на рис. 4.12. Введенная в расчетах величина дисбаланса принята предельно допустимой для данного круга.

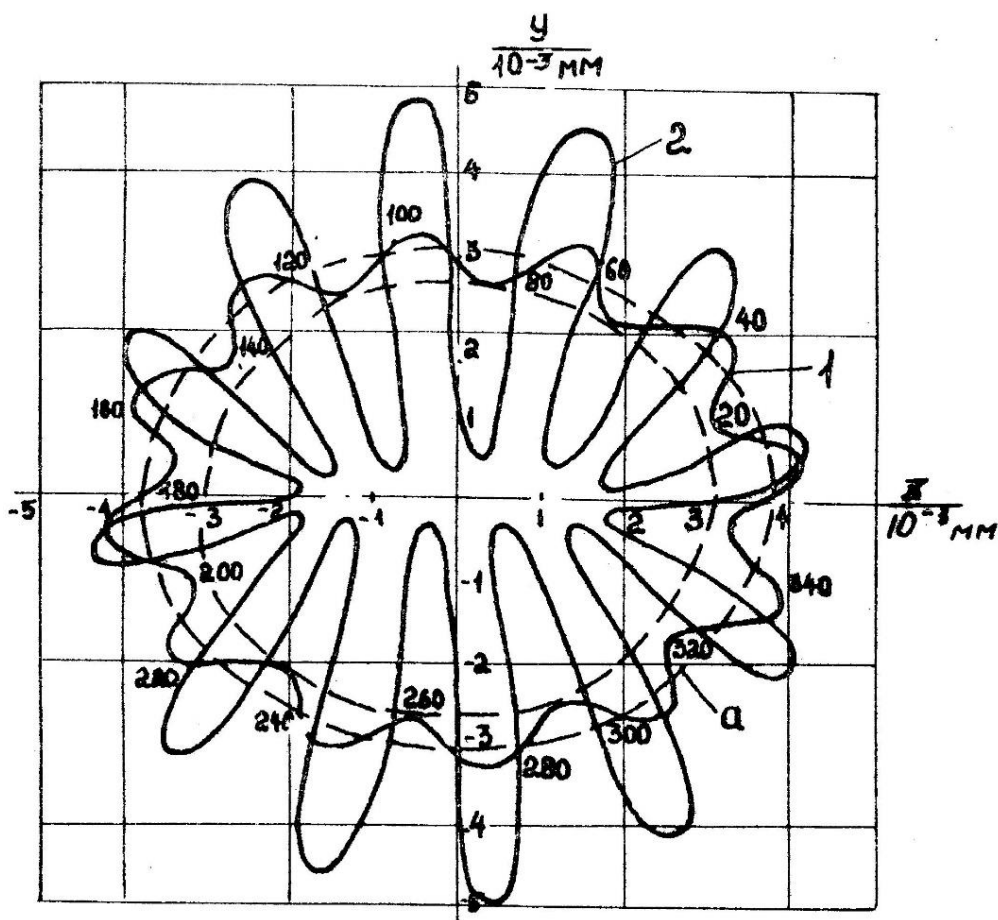
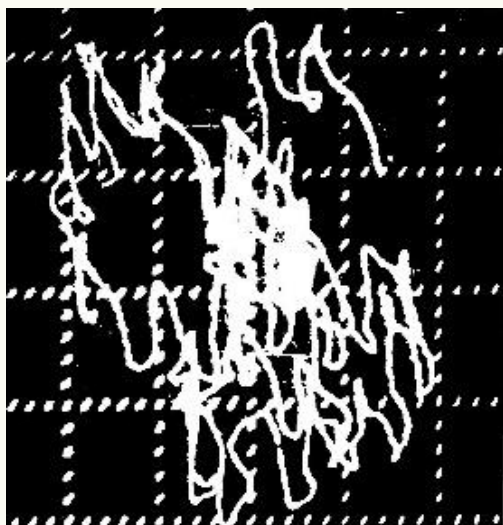


Рисунок 4.12 – Траектория перемещения центра прерывистого круга с 12 пазами в плоскости YOZ, перпендикулярной оси шпинделя (рассчитанной за один оборот), при различных режимах обработки  
 (кривая №1 при  $V_d = 0,05$  м/с,  $t = 10 \cdot 10^{-6}$  м.  
 кривая №2 –  $V_d = 0,3$  м/с,  $t = 50 \cdot 10^{-6}$  м)

На приведенном рисунке видно, что под действием перечисленных выше факторов центр круга описывает довольно сложную траекторию. Двигаясь по эллипсоидной кривой (а), он совершает еще синусоподобные перемещения относительно этой кривой. С возрастанием режимов обработки, увеличивается и амплитуда синусоидальных перемещений.

Теоретически рассчитанная траектория аналогична траектории перемещения, для прерывистых кругов, записанная на экране осциллографа экспериментально (рис. 4.13, рис. 4.14).



а



б

Рисунок 4.13 – Осциллограммы виброперемещений центра круга:  
а) кривая виброперемещений при работе кругом с 10 выступами;  
б) часть оборота круга с 10 выступами

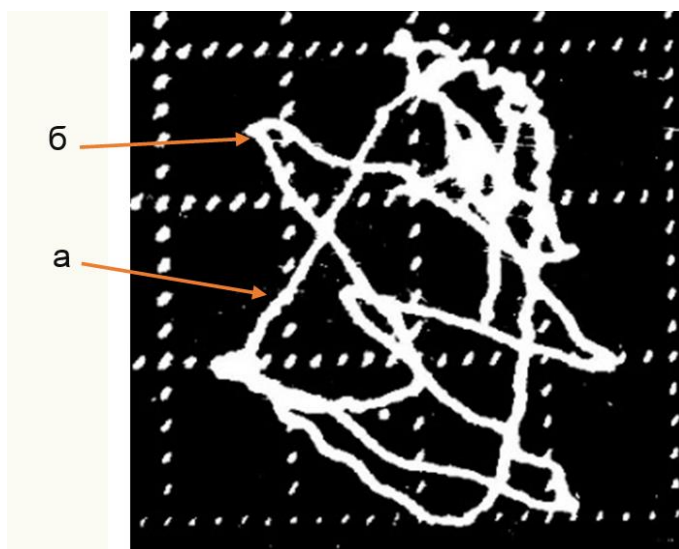


Рисунок 4.14 – Траектория, описываемая центром круга при холостом вращении (а), при шлифовании (б) кругом с 4 выступами

При холостом вращении (рис. 4.9, рис. 4.14,а), в результате наличия дисбаланса, центр круга совершает эллипсоподобные перемещения. В процессе шлифования, под действием выступов круга его центр, двигаясь по замкнутой траектории, одновременно совершает

еще дополнительные синусоподобные перемещения относительно этой траектории (рис. 4.13, рис. 4.14,б).

На представленных осциллограммах наглядно видно, что количество этих дополнительных перемещений зависит от количества выступов на круге. Например, при обработке прерывистым кругом с 4 выступами, хорошо видно 4 пика при перемещении (рис. 4.14, кривая б), на рис. 4.13,б записана часть оборота при обработке кругом с 10 выступами.

Зная движение центра масс круга, можно перейти к рассмотрению модели образования волнистости на обрабатываемой поверхности, формируемой формообразующей точкой периферии круга при шлифовании прерывистыми кругами с учетом их конструктивных особенностей. Однако для определения координат ( $X$ ,  $Y$ ) в зависимостях (4.16) движения оси, необходимо рассчитать еще величину амплитуды высокочастотных вынужденных колебаний ( $U_y$ ,  $U_z$ ).

#### **4.2.2. Определение амплитуды высокочастотных вынужденных колебаний**

Как установлено выше, при прерывистом шлифовании на систему будет действовать гармоническая возбуждающая сила, связанная со специфическими особенностями шлифования (прерывистым характером резания). Поскольку частота возбуждающей силы не зависит от массы и упругости системы и может быть задана произвольно, то частота вынужденных колебаний системы будет равна частоте возбуждающей силы [147, 165, 171], которая в свою очередь будет зависеть от конструкции круга (т.е. количества их пазов) и при заданной постоянной угловой скорости вращения шпинделя  $\omega_B = f(n)$ , для данного круга будет величиной постоянной.

Величина амплитуды возбуждаемых вынужденных колебаний будет функцией от величины возбуждающей силы  $U = f(F_B)$ , зависящей в свою очередь от конструкции круга (количества и протяженности выступов), режимов обработки, обрабатываемого материала.

$$F_B = f(k, V_d, t, \mu),$$

где  $k$  – конструкция круга;  $V_d$  – продольная подача;  $t$  – глубина резания;  $\mu$  – обрабатываемый материал.

Амплитуду вынужденных колебаний определим следующим образом. Уравнение изогнутой оси имеет вид:

$$Ely^{IV} = F\rho\ddot{y},$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения,  $m^2$ ;  $\rho$  – плотность материала балки,  $kg/m^3$ .

Граничные условия  $y(0, t) = y(l, t) = 0$ ;

$$\left. \begin{aligned} Ely''(0, t) &= -M(t) + I_0\ddot{y}'(0, t) \\ Ely''(l, t) &= -I_l\ddot{y}'(l, t) \end{aligned} \right\} \quad (4.17)$$

Удовлетворяя граничным условиям и разлагая функцию  $M(t)$  в ряд по гармоникам (перемещения конца шпинделя с кругом), рассмотрим одну из них:

$$M(t) = M_n \cos(\omega_n t + \varphi).$$

Соответствующее частное решение ищем в виде  $y = x(t)$ :

$$y_n = \sum (A_n \cdot \cos \omega_n t + B_n \cdot \sin \omega_n t) \cdot [C_1^{(n)} \cdot \operatorname{ch}(k\sqrt{\omega_n} \cdot x) + C_2^{(n)} \cdot \operatorname{ch}(k\sqrt{\omega_n} \cdot x) + C_3^{(n)} \cdot \cos(k\sqrt{\omega_n} \cdot x) + C_4^{(n)} \cdot \sin(k\sqrt{\omega_n} \cdot x)] \quad (4.18)$$

Так как

$$A_n \cdot \cos(\omega_n t) + B_n \cdot \sin(\omega_n t) = C_n \sin(\omega_n t + \varphi_n);$$

$$C_n = \sqrt{A_n^2 + B_n^2} = 1,$$

то первый множитель в уравнении (4.18) будет равен 1 и решение сведется к нахождению постоянных  $C_1^{(n)} \dots C_4^{(n)}$ , где  $k = \sqrt{\frac{F\rho}{EI}}$ ;  $\omega_n$  – частота вынужденных высокочастотных колебаний;  $E$  – модуль упругости,  $H/m^2$ ;  $I$  – момент инерции поперечного сечения стержня относительно нейтральной оси сечения, перпендикулярной к плоскости колебаний,  $m^4$ ;  $EI$  – жесткость на изгиб,  $Hm^2$ ;  $x = l_{кр}$  – расстояние от центра массы круга до опоры (рис. 4.15);  $A_n, B_n, C_1^{(n)} \dots C_4^{(n)}$  – коэффициенты, зависящие от частоты вынужденных колебаний.

Исходя из граничных условий (4.17), получим следующую систему четырех уравнений (4.19)  $n$ -й гармоники для определения постоянных  $C_1^{(n)} \dots C_4^{(n)}$ :



$$\begin{cases} C_1^{(n)} + C_3^{(n)} = 0; \\ EI\kappa^2\omega_n \cdot (C_1^{(n)} - C_3^{(n)}) + I_0\omega_n^2\kappa\sqrt{\omega_n} \cdot (C_2^{(n)} + C_4^{(n)}) = -M(t); \\ C_1^{(n)} \cdot \operatorname{ch}(\kappa\sqrt{\omega_n}l) + C_2^{(n)} \cdot \operatorname{ch}(\kappa\sqrt{\omega_n}l) + C_3^{(n)} \cos(\kappa\sqrt{\omega_n}l) + C_4^{(n)} \sin(\kappa\sqrt{\omega_n}l) = 0; \\ C_1^{(n)} [\operatorname{ch}(\kappa\sqrt{\omega_n}l) - P_1 \operatorname{ch}(\kappa\sqrt{\omega_n}l)] + C_2^{(n)} [\operatorname{ch}(\kappa\sqrt{\omega_n}l) - P_1 \operatorname{ch}(\kappa\sqrt{\omega_n}l)] + \\ + C_3^{(n)} [-\cos(\kappa\sqrt{\omega_n}l) + P_1 \sin(\kappa\sqrt{\omega_n}l)] - C_4^{(n)} [\sin(\kappa\sqrt{\omega_n}l) + P_1 \cos(\kappa\sqrt{\omega_n}l)] = 0, \end{cases} \quad (4.19)$$

где  $M(t)$  – изгибающий момент

$$M_n = F \cdot l_{кр}; \quad (4.20)$$

$$P_1 = \frac{I_1\omega_n^2}{\kappa\sqrt{\omega_n}EI};$$

$I_1$  – момент инерции на шкиве;  $I_0$  – момент инерции на круге.

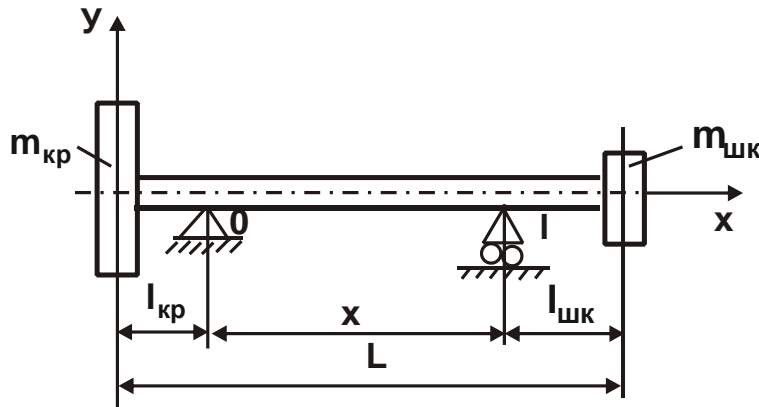


Рисунок 4.15 – Расчетная схема шпиндельного узла  
( $m_{кр}$  – масса круга;  $m_{шк}$  – масса шкива;  $m$  – масса шпинделя)

Решая систему (4.19), определяем коэффициенты  $C_1^{(n)} \dots C_4^{(n)}$  и, подставляя их в (4.18), находим амплитуду вынужденных колебаний. Расчет амплитуды радиальных ( $U_y$ ) и тангенциальных ( $U_z$ ) вынужденных высокочастотных колебаний производится по одной и той же методике с заменой в уравнении (4.20) соответственно радиальной ( $F_y$ ) и тангенциальной ( $F_z$ ) возбуждающей силы.

**Влияние прерывистости процесса на величину ударной нагрузки и амплитуду высокочастотных вынужденных колебаний.** Проведенные экспериментальные исследования показали зависимость амплитуды и частоты вынужденных высокочастотных колебаний от величины ударной нагрузки ( $F_i$ ), которая напрямую зависит от конструкции круга и режимов обработки.

При постоянной скорости вращения круга ( $f = 45,48$  Гц) (на данном оборудовании), частота следования ударных импульсов, будет происходить с частотой возбуждающей силы ( $f_b = kf$ ) (зависит от количества выступов). С увеличением их количества частота импульсов возрастает. Например, для кругов с 4 выступами  $f_b = 181,9$  Гц; с 8 выступами  $f_b = 363,8$  Гц; с 12 выступами –  $f_b = 545,8$  Гц.

Экспериментальные зависимости величины ударной нагрузки от режимов обработки и конструкции круга представлены на рис. 4.16, рис. 4.17.

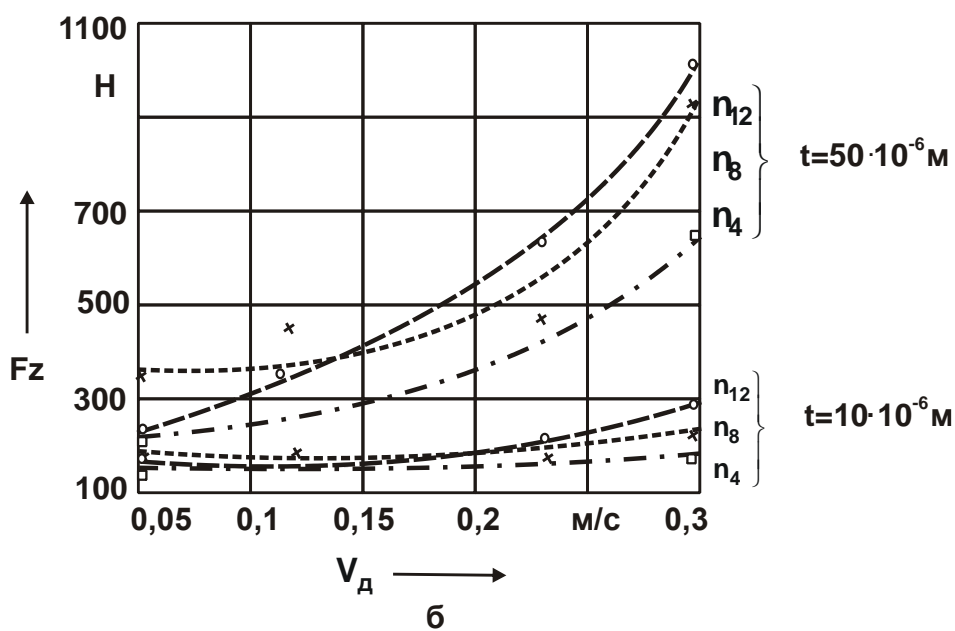
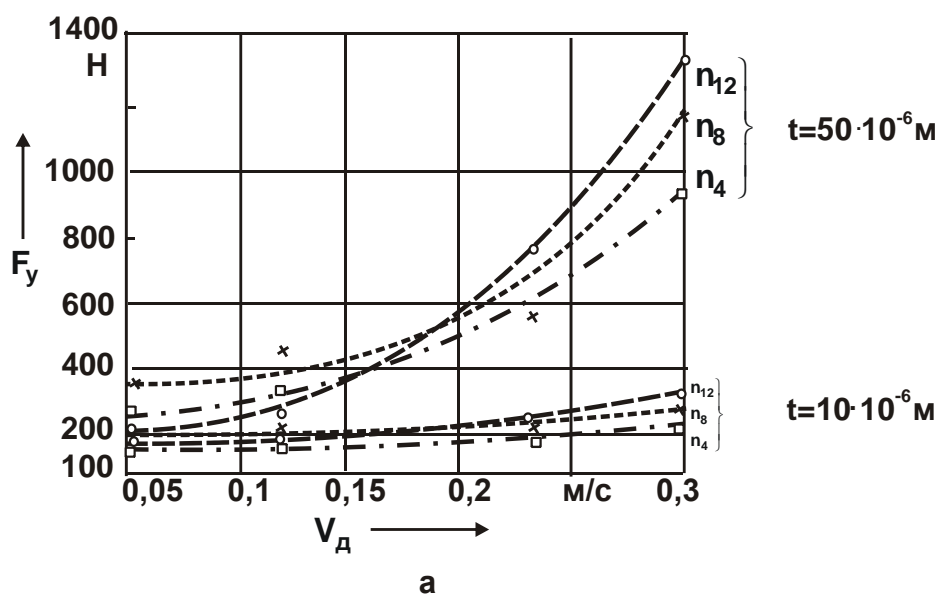


Рисунок 4.16 – Зависимости радиальной  $F_y$  и тангенциальной  $F_z$  составляющих ударной нагрузки от скорости детали и конструкции круга ( $n_4, n_8, n_{12}$  – прерывистый круг 4, 8 и 12 выступами соответственно)

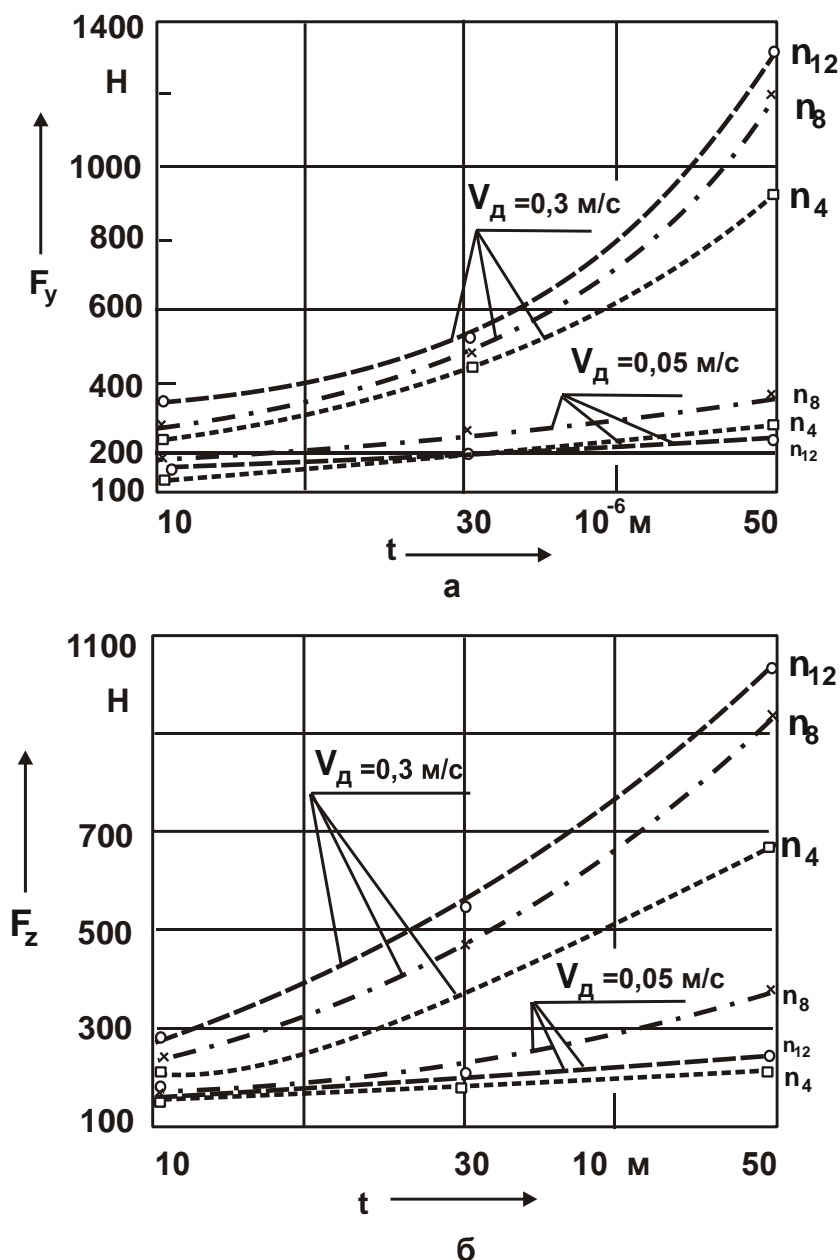


Рисунок 4.17 – Влияние конструкции круга и глубины шлифования на величину радиальной  $F_y$  и тангенциальной  $F_z$  составляющих ударной нагрузки

Общим для всех зависимостей является возрастание ударной нагрузки при ужесточении режимов обработки.

С увеличением скорости стола увеличивается относительная скорость соударения режущей кромки инструмента с обрабатываемой поверхностью, возрастает импульс силы и кинетическая энергия соударяющихся тел, зависящая от скорости:

$$E_0 = \frac{M \cdot V_0^2}{2}. \quad (4.21)$$

В то же время, вследствие замкнутости системы "процесс резания – ЭУС" изменение кинетической энергии удара ( $E_0$ ), согласно зависимости (4.22):

$$A^2 = \frac{2 \cdot E_0}{m\omega^2}, \quad (4.22)$$

вызывает изменение амплитуды колебаний ( $A$ ) (рис. 4.18). Приводящее в свою очередь к увеличению ударной нагрузки:

$$F_{\max} = \left( \frac{E_0}{b} \cdot \frac{1+n}{n} \right)^{\frac{1}{1+n}}, \quad (4.23)$$

где  $n$  – коэффициент динамической силовой характеристики, зависящий от формы соударяющихся тел;  $b$  – коэффициент податливости деформируемого элемента, зависящий от свойств материалов и конфигурации деформируемого элемента.

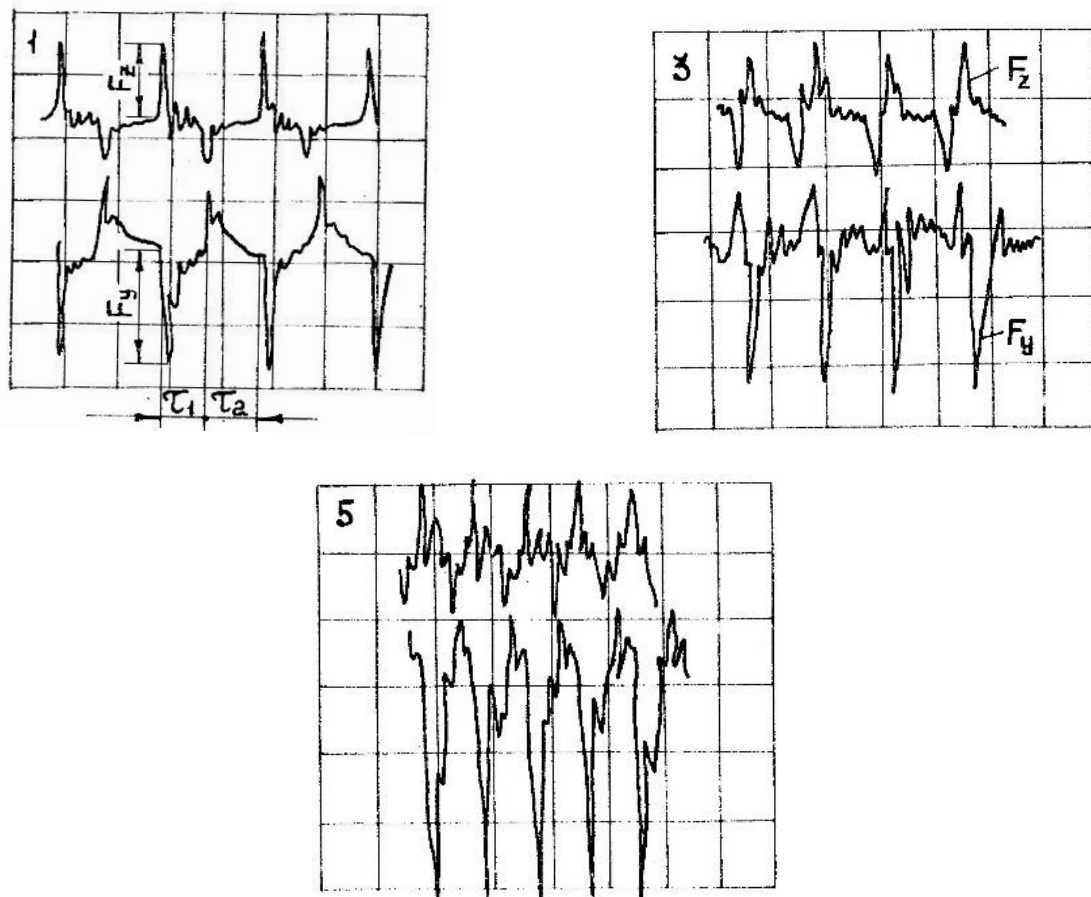


Рисунок 4.18 – Изменение частоты следования ударной нагрузки и ее амплитуды от конструкции круга

(1 – прерывистый круг с 2 выступами (при  $V_d = 0,17$  м/с,  $t = 10 \cdot 10^{-6}$  м, усиление  $F_z = 1$  В/дел,  $F_y = 2$  В/дел); 3 – круг с  $n = 8$  шт.; 5 – круг с  $n = 12$  шт. (при  $V_d = 0,3$  м/с,  $t = 50 \cdot 10^{-6}$  м, усиление  $F_z$  ( $F_y$ ) = 5 В/дел))

С увеличением глубины и продольной подачи при шлифовании происходит снижение степени устойчивости всей системы, что также приводит к увеличению уровня колебаний, а, следовательно, и энергии удара. При небольших значениях режимов обработки (например,  $t = 10 \cdot 10^{-6}$  м и  $V_d = 0,05$  м/с), изменение величины ударной нагрузки, при различной конструкции круга – незначительны.

Существенные различия и увеличение ударной нагрузки наблюдаются при одновременном увеличении скорости продольной подачи и глубины обработки (при  $V_d = 0,3$  м/сек;  $t = 50 \cdot 10^{-6}$  м). Так, например, при  $V_d = 0,05$  м/сек и  $t = 10 \cdot 10^{-6}$  м величина ударной нагрузки для прерывистых кругов (рис. 4.16) колеблется в пределах  $F_y = 176 \dots 200$  Н,  $F_z = 177 \dots 199$  Н, и составляет 9 ... 13 %. С увеличением продольной скорости стола и глубины обработки различия уже существенны и составляют  $F_y = 930 \dots 1339$  Н,  $F_z = 684 \dots 1029$  Н, т.е. разница в величине ударной нагрузки достигает  $\approx 50 \dots 55$  %.

Из приведенных графиков (рис. 4.16, рис. 4.17) видно, что у кругов с 12 пазами величина ударной нагрузки выше, чем у кругов с 4 и 8 пазами (при  $V_d = 0,3$  м/с,  $t = 50 \cdot 10^{-6}$  м). Это объясняется тем, что с увеличением частоты колебаний увеличивается кинетическая энергия колеблющейся массы, а, следовательно, и величина удара, что подтверждается приведенными выше зависимостями (4.3) и записью осциллограммам ударной нагрузки (рис. 4.18).

С изменением количества выступов (2, 8, 12) – изменяется время следования ударных импульсов (осциллограмма 1, 3, 5) и величина амплитуды ударной нагрузки.

Как было сказано выше, действие ударной нагрузки вызывает колебания шлифовального круга определенной амплитуды и частоты (например, для круга с 4 выступами –  $f_b = 181,9$  Гц; с 8-ю –  $f_b = 363,8$  Гц; с 12-ю –  $f_b = 545,8$  Гц) [181, 201].

Экспериментальные данные влияния режимов обработки на амплитуды высокочастотных вынужденных колебаний (рис. 4.19) показали, что с изменением режимов обработки (увеличением глубины и скорости продольной подачи стола) амплитуды высокочастотных составляющих колебаний увеличиваются. Согласно имеющейся зависимости, амплитуда обратно пропорциональна квадрату изменения частоты колебаний. Поэтому амплитуда колебаний у круга с 8 выступами больше чем у кругов с 12. Это можно объяснить тем, что частота удар-

ной нагрузки близка к частоте резонанса, в результате высокочастотная составляющая колебаний резко возрастает.

Известно, что при работе в области резонанса необходимо уменьшать жесткость демпфирующей массы, чтобы увеличить коэффициент относительного демпфирования. С увеличением же глубины шлифования, за счет увеличения натяга в системе жесткость увеличивается.

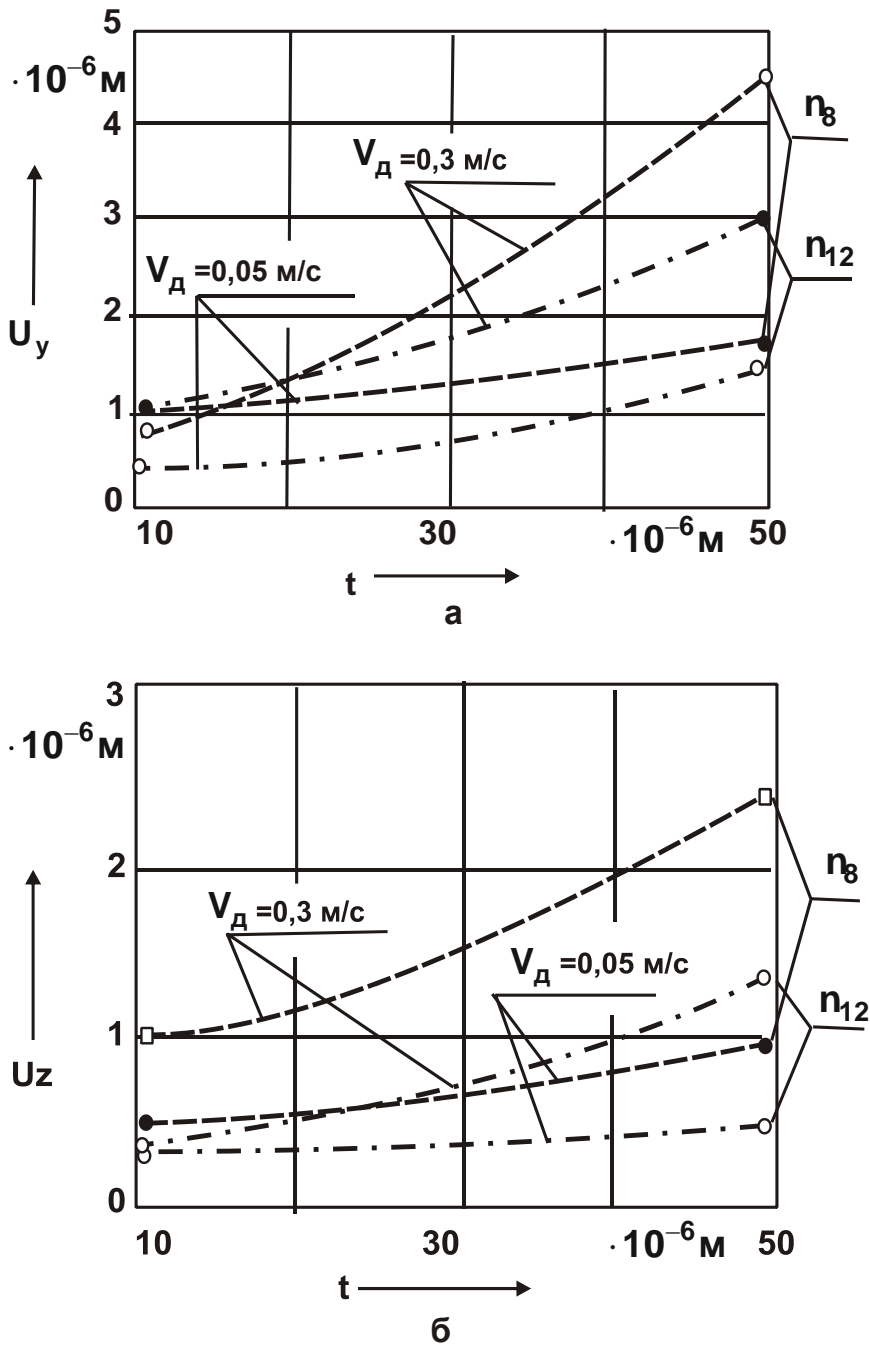


Рисунок 4.19 – Влияние конструкции круга и режимов обработки на амплитуду (а) – вертикальных ( $U_y$ ) и (б) – горизонтальных ( $U_z$ ) высокочастотных вынужденных колебаний круга

На рис. 4.20 представлено изменение амплитуды высокочастотных колебаний от режимов обработки. С увеличением скорости продольной подачи (осциллограммы 1), глубины шлифования (2, 3), амплитуды колебаний увеличиваются.

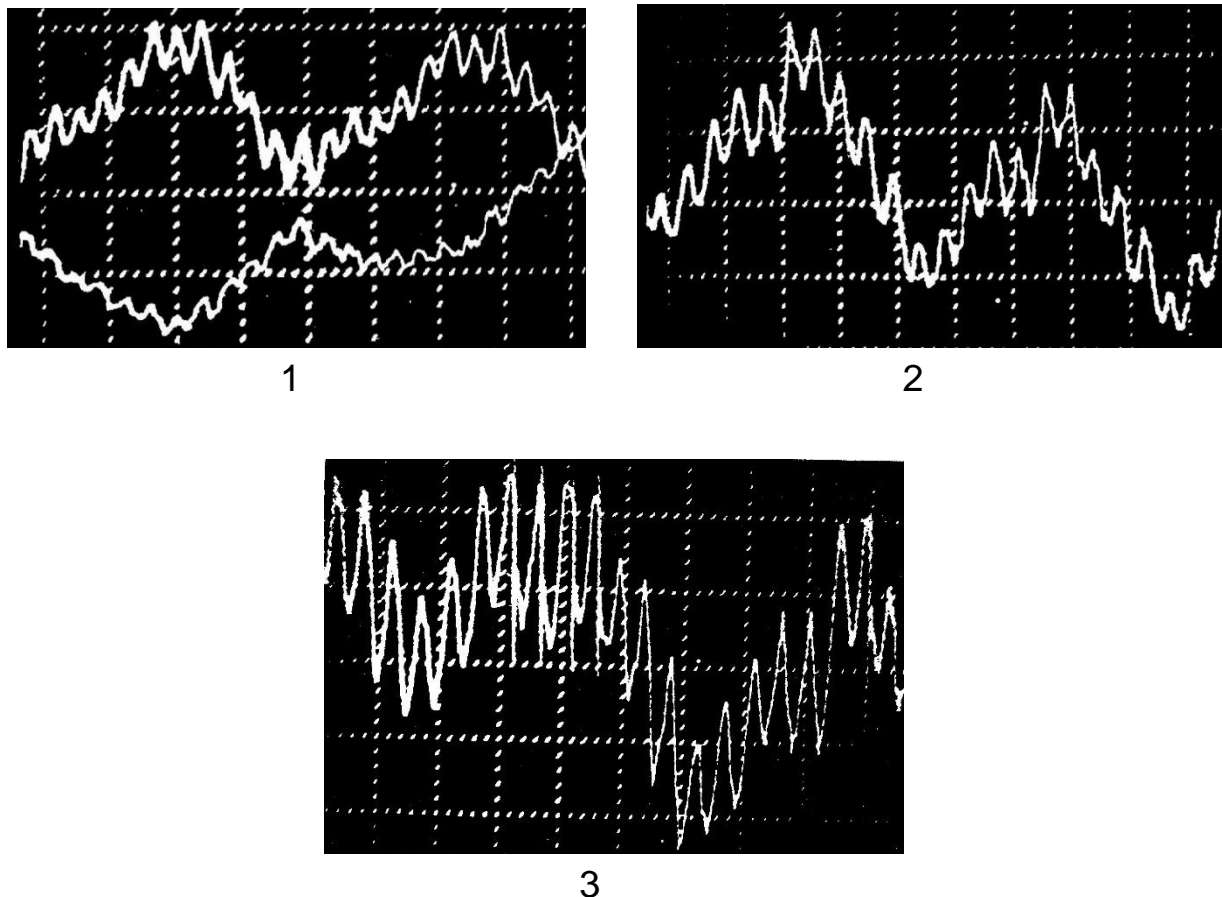


Рисунок 4.20 – Осциллограммы изменения амплитуды колебаний в зависимости от режимов обработки:

1) круг с 12 выступами –  $V_d = 0,05$  м/с; (при  $t = 50 \cdot 10^{-6}$  м).

Круг с 10 выступами:

2)  $V_d = 0,167$  м/с,  $t = 10 \cdot 10^{-6}$  м, ширина обработки  $b = 8$  мм;

3)  $V_d = 0,167$  м/с,  $t = 40 \cdot 10^{-6}$  м, при  $b = 8$  мм)

**Определение сил резания при шлифовании прерывистыми кругами.** Выяснив действие дополнительной возбуждающей силы, рассмотрим взаимосвязь режимов обработки, сил резания с дисбалансом круга и возникающими амплитудами низкочастотных колебаний (основной частоты).

Влияние режимов обработки на силы резания при шлифовании приведены на графиках (рис. 4.21, рис. 4.22)

Из графиков видно, что при шлифовании прерывистыми кругами, силы затрачиваемые на процесс резания, меньше чем при шлифовании сплошным кругом.

Это можно объяснить тем, что при шлифовании с вибрациями существенно изменяются условия процесса резания.

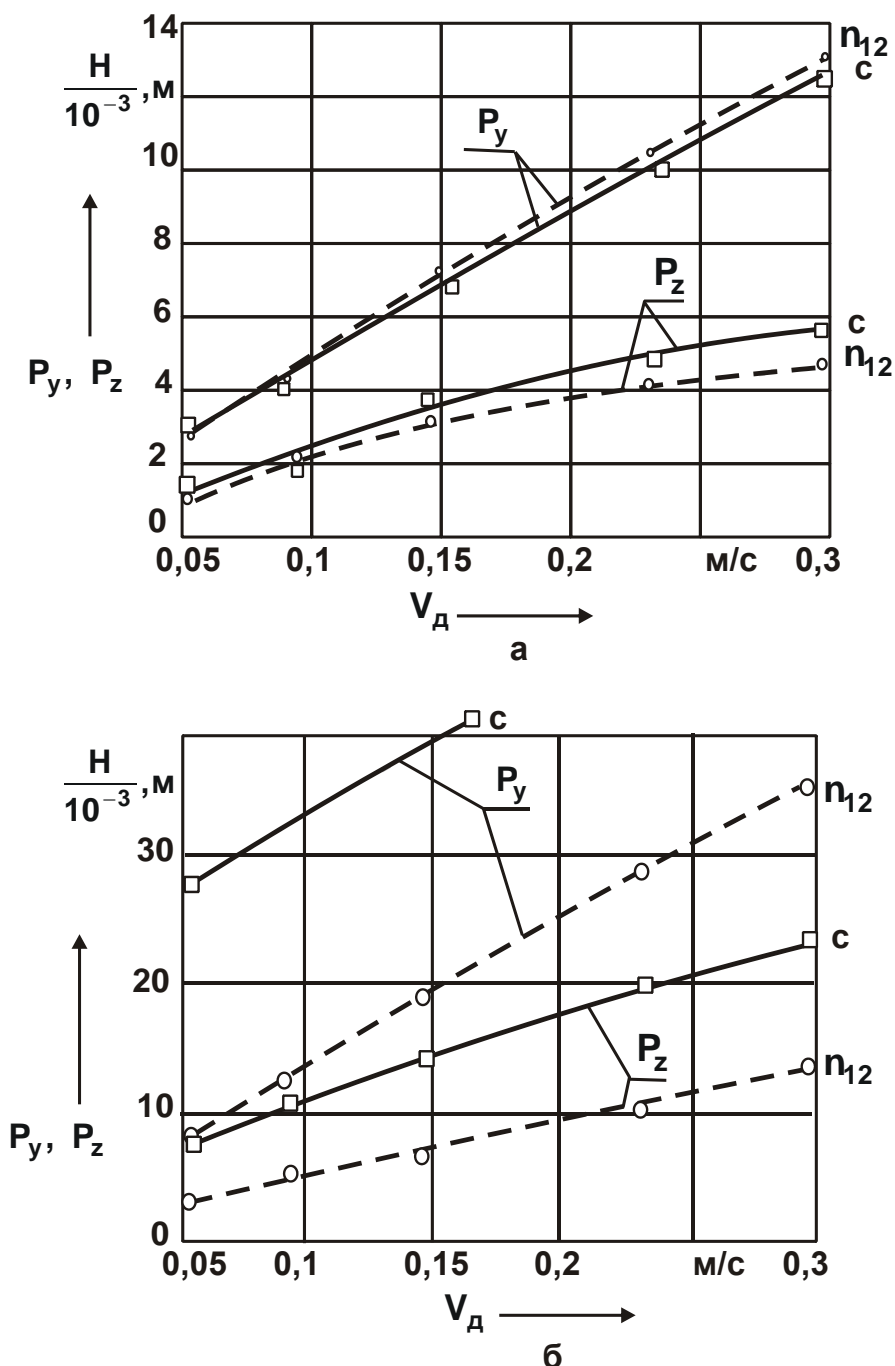


Рисунок 4.21 – Зависимости радиальной  $F_y$  и тангенциальной  $F_z$  составляющих силы резания от скорости продольной подачи: а – при глубине шлифования  $t = 10 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ ; б – при  $t = 50 \cdot 10^{-6} \text{ м}$



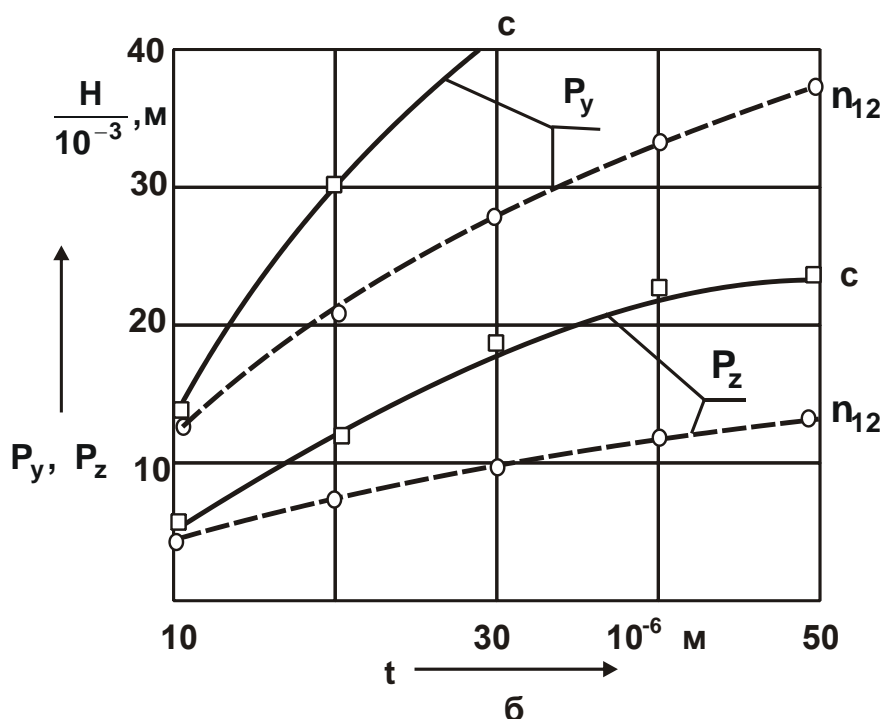
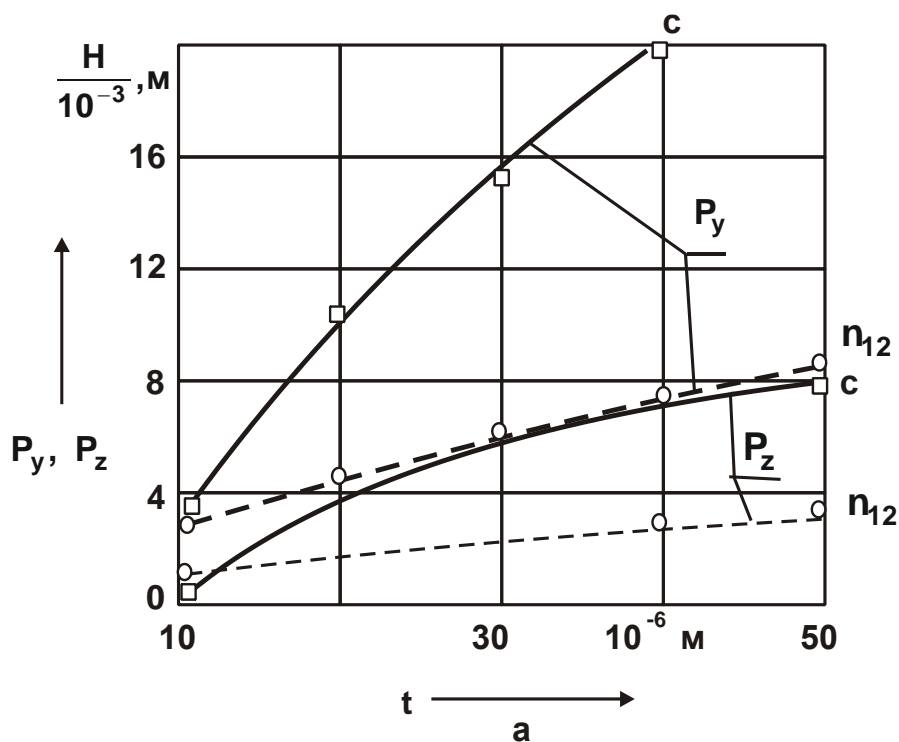


Рисунок 4.22 – Зависимость радиальной  $F_y$  и тангенциальной  $F_z$  составляющих силы резания от глубины шлифования:  
 а – при скорости детали  $V_d = 0,05$  м/с; б – при  $V_d = 0,3$  м/с

Вектор скорости резания постоянно изменяет свое направление и величину, происходит периодический отрыв режущих кромок инструмента от поверхности, изменяется скорость и соотношение между зоной пластической деформации и диспергирования металла. Кроме то-

го, в момент соприкосновения режущего выступа с обрабатываемой поверхностью происходит удар. Ударное воздействие инструмента, совместно с вибрациями, как известно [171], приводит к охрупчиванию поверхности металла, что также способствует снижению сил резания.

С увеличением режимов обработки ( $V_d$  и  $t$ ) радиальная  $F_y$  и тангенциальная  $F_z$  составляющие силы резания увеличиваются.

На рис. 4.23, рис. 4.24 приведены графики горизонтальной и вертикальной составляющих амплитуды колебаний основной частоты.

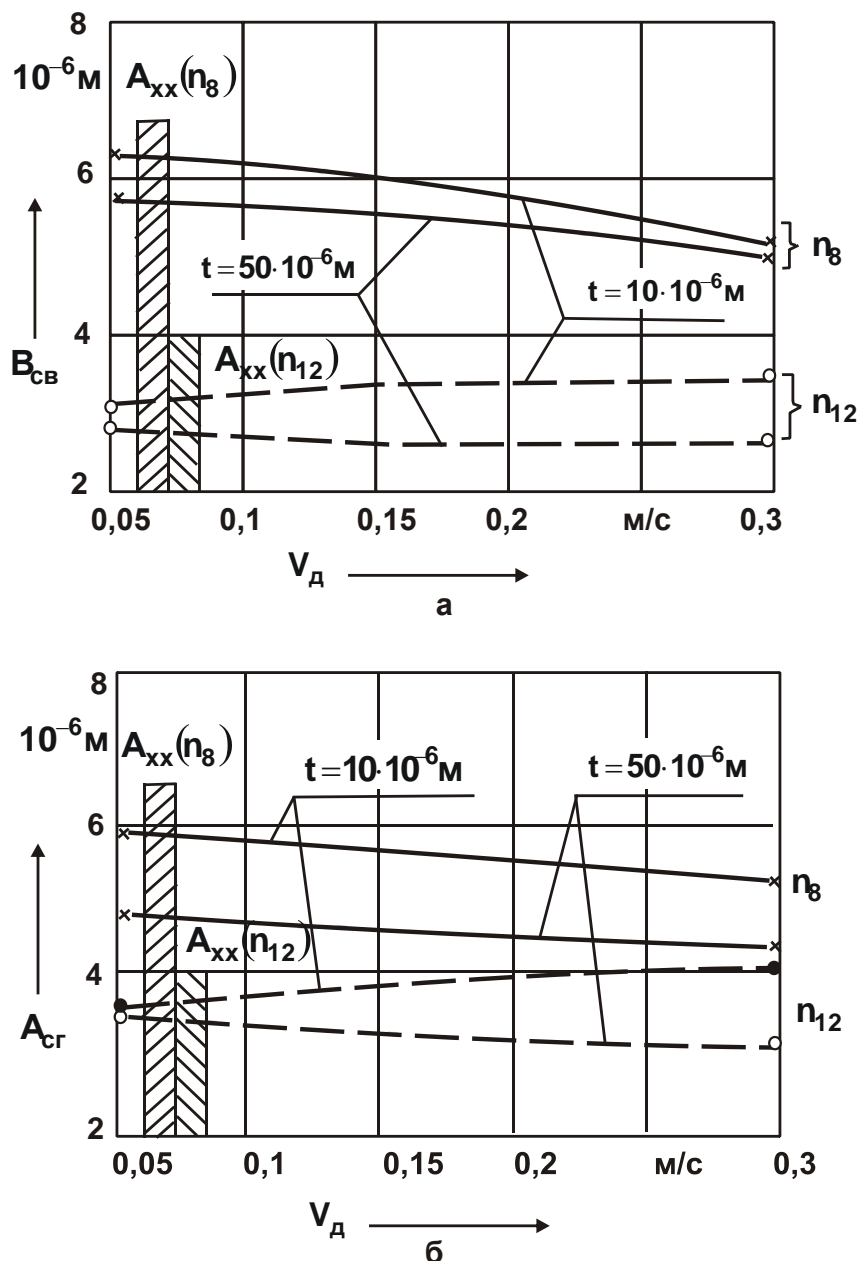


Рисунок 4.23 – Влияние скорости детали ( $V_d$ ) и конструкции прерывистого круга на амплитуду вертикальных (а) и горизонтальных (б) колебаний круга основной частоты (материал детали – сталь ШХ 15, ширина образца 5 мм)

Приведенные на этих же графиках столбчатые диаграммы показывают величину амплитуды колебаний при холостом ходе (т.е. при свободном вращении шлифовального круга).

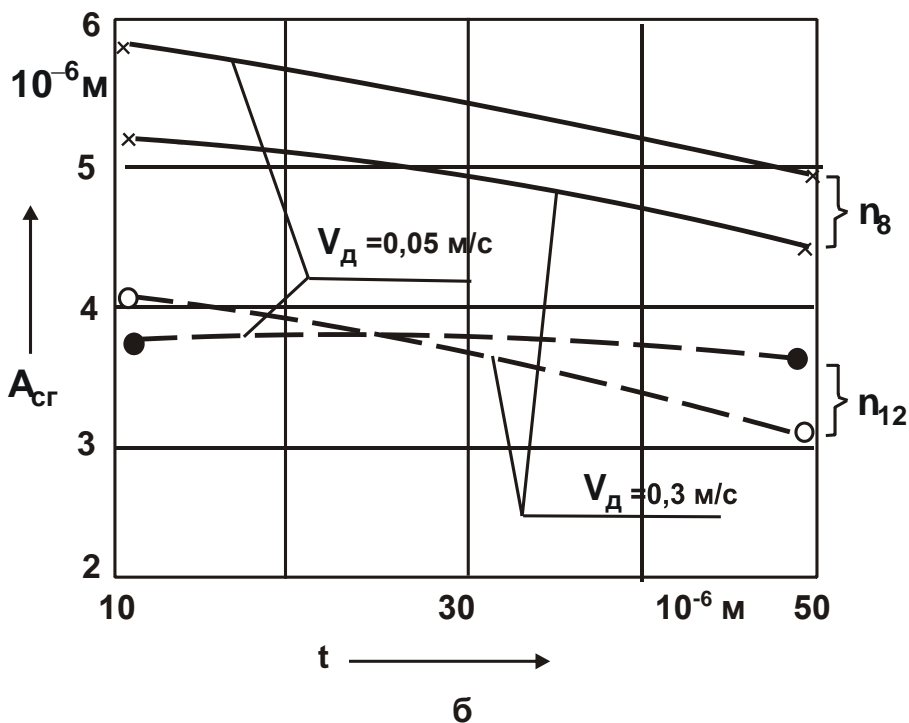
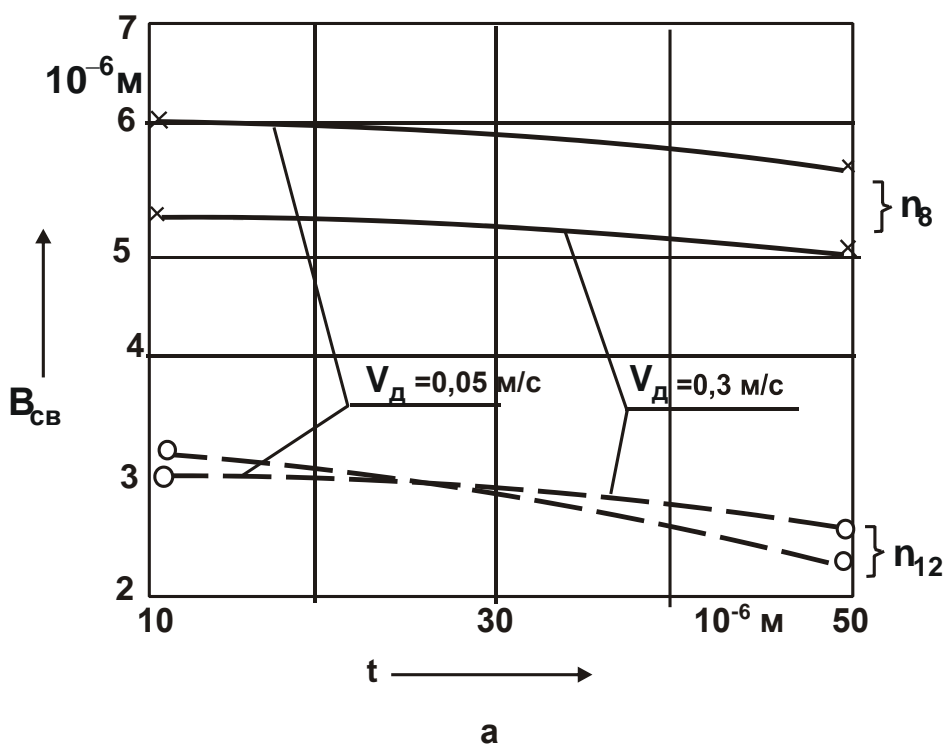


Рисунок 4.24 – Влияние глубины шлифования ( $t$ ) на амплитуду вертикальных (а) и горизонтальных (б) колебаний круга основной частоты

Величина амплитуды колебаний при холостом ходе зависит только от величины дисбаланса круга (при постоянной жесткости системы). С увеличением дисбаланса увеличиваются амплитуды колебаний при холостом ходе. При наличии нагрузки на шпиндель (в процессе шлифования), амплитуды колебаний основной частоты относительно амплитуды колебаний при холостом ходе уменьшаются (рис. 4.23).

Из приведенных графиков видно, что максимальная точка кривой амплитуды колебаний, вызванных изменениями режимов обработки, находится ниже, чем столбчатые диаграммы, показывающие величину амплитуды колебаний при холостом ходе. Например, для прерывистого круга с 8 пазми (рис. 4.23,а) для вертикальной составляющей, амплитуда холостого хода составила  $A_{xx}(p_8) = 6,7 \cdot 10^{-6}$  м, а амплитуда колебаний при наличии небольшой нагрузки на шпиндель ( $V_d = 0,05$  м/с;  $t = 10 \cdot 10^{-6}$  м);  $B_{cb}(p_8) = 6,3 \cdot 10^{-6}$  м. С увеличением нагрузки на шпиндель, особенно глубины шлифования, амплитуда колебаний несущей частоты еще больше уменьшается и при режимах ( $V_d = 0,05$  м/с;  $t = 50 \cdot 10^{-6}$  м) составила уже  $B_{cb}(p_8) = 5,7 \cdot 10^{-6}$  м. Для прерывистого круга с 12 пазми  $A_{xx}(p_{12})$  составила  $3,9 \cdot 10^{-6}$  м, а при нагрузке – снизилась до  $B_{cb}(p_{12}) = 3,0 \cdot 10^{-6}$  м (при  $V_d = 0,05$  м/с;  $t = 10 \cdot 10^{-6}$  м);  $B_{cb}(p_{12}) = 2,8 \cdot 10^{-6}$  м (при  $V_d = 0,05$  м/с;  $t = 50 \cdot 10^{-6}$  м).

Аналогичная картина снижения амплитуды колебаний основной частоты при наличии нагрузки на шпиндель, по сравнению с амплитудой колебаний при холостом ходе, наблюдается и для горизонтальной составляющей (рис. 4.22,б).

Характер изменения амплитуды колебаний основной частоты при изменении режимов обработки как для горизонтальной, так и вертикальной составляющей при обработке прерывистым кругом остается одинаковым. Из графиков видно, что при увеличении скорости и глубины шлифования величина амплитуды колебаний почти не изменяется или немного уменьшается и составляет 10 ... 15 %. На рис. 4.25 показана зависимость амплитуды колебаний от величины поперечной подачи. Шлифовались образцы шириной 8 мм и 4,5 мм.

Из графиков видно, что с уменьшением ширины обрабатываемой детали амплитуда колебаний еще более уменьшилась. В общем случае снижение амплитуды колебаний основной частоты в процессе шлифования по сравнению с амплитудой колебаний при холостом ходе объясняется тем, что при шлифовании изменяется жесткость тех-

нологической системы за счет увеличения натяга, в результате амплитуда колебаний уменьшается (при постоянной частоте).

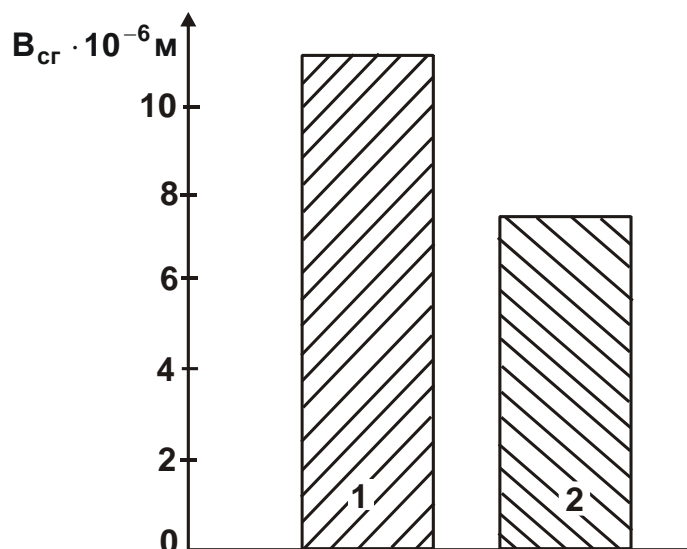


Рисунок 4.25 – Зависимость амплитуды вертикальных колебаний основной частоты от ширины обработки: 1 – ширина детали 8 мм; 2 – ширина детали 4,5 мм

Таким образом, амплитуда колебаний несущей частоты зависит в основном от величины дисбаланса круга, при постоянной скорости его вращения и почти не зависит от изменения режимов шлифования.

Выяснив траекторию перемещения оси шлифовального круга амплитуду и частоту его колебаний в результате прерывистости процесса резания, что подтверждается и проведенными экспериментальными исследованиями, можно перейти к вопросу определения формирования профиля (волнистости) на обрабатываемой поверхности.

#### **4.2.3. Математическая модель образования волнистости на обрабатываемой поверхности при шлифовании прерывистыми кругами**

Рассмотрим подробно схему образования волнистости на обрабатываемой поверхности. Как было сказано ранее, "идеальной" поверхностью является прямая 2–2, образуемая при движении центра инструмента (а, следовательно, и жестко связанной с ним формообразующей точки), по прямой 1–1 (рис. 4.4,б). Действительной траекторией движения центра инструмента является более сложная кривая 1' (рис. 4.26).

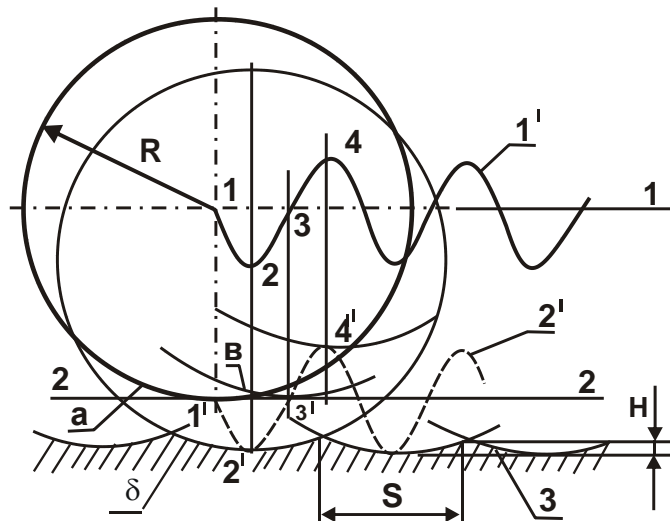


Рисунок 4.26 – Схема образования волнистой поверхности

Формообразующая точка круга, копируя движение центра по траектории 1', занимала бы также последовательно положения 1', 2', 3', 4' и т.д., двигаясь по траектории 2'. Но, поскольку шлифовальный круг является объемным телом с радиусом  $R$ , то образующийся на поверхности детали профиль будет представлять собой огибающую (3) семейства дуг, образованных формообразующей точкой периферии круга (с радиусом  $R_{кр}$ ):

$$F(x, y, t) = 0.$$

Связь между формируемым на обрабатываемой поверхности профилем с динамическими и кинематическими параметрами работающего инструмента можно представить в виде:

$$Y_B = Y_{огиб.дин.} + Y_{огиб.кин.}, \quad (4.24)$$

где  $Y_{огиб.дин.} = f_1(X_{дин.})$  – параметры кривой, связанные с динамикой процесса;  $Y_{огиб.кин.} = f_2(X_{кин.})$  – параметры кривой, связанные с кинематикой формирования неровностей в зависимости от геометрических параметров круга (количества и протяженности выступов и впадин).

Координаты профиля волнистой поверхности при плоском шлифовании периферией круга, определим, как [173]:

$$\left. \begin{aligned} X_{дин.} &= X \pm \frac{R \cdot \dot{y}}{\sqrt{(\dot{x})^2 + (\dot{y})^2}}; \\ Y_{дин.} &= Y \pm \frac{R \cdot \dot{x}}{\sqrt{(\dot{x})^2 + (\dot{y})^2}}, \end{aligned} \right\} \quad (4.25)$$

где  $R$  – радиус круга;  $X$  и  $Y$  – координаты центра круга.

Подставив уравнения (4.16) с учетом продольного перемещения ( $V_d \cdot t$ ) детали относительно круга в (4.25) и произведя некоторые упрощения, получим параметры динамической составляющей профиля волнистой поверхности для  $i$ -й гармоники, образующейся при прерывистом шлифовании (где  $Y \rightarrow y, Z \rightarrow x$ ):

Решение системы уравнений (4.26) позволяет получить параметры волнистой поверхности ( $X_B, Y_B$ ) в общем виде с учетом динамики процесса резания, кругами с непрерывной формообразующей кромкой периферии:

$$\left. \begin{aligned} X_{\text{дин}} &= (A_{\text{сГ}_i} + U_{z_i} \sin \omega_{B_i} t_c) \cos \omega_{O_i} t_c + V_d t_c + \\ &+ \frac{R[(B_{\text{сВ}_i} + U_{y_i} \sin \omega_{B_i} t_c) \omega_{B_i} \cdot \cos \omega_{O_i} t_c + U_{y_i} \cdot \omega_{B_i} \cos \omega_{B_i} t_c \cdot \sin \omega_{O_i} t_c]}{V}, \\ Y_{\text{дин}} &= (B_{\text{сВ}_i} + U_{y_i} \sin \omega_{B_i} t_c) \sin \omega_{O_i} t_c + \\ &+ \frac{R[U_{z_i} \cdot \omega_{B_i} \cos \omega_{B_i} t_c \cos \omega_{O_i} t_c + V_d - (A_{\text{сГ}_i} + U_{z_i} \sin \omega_{B_i} t_c) \omega_{O_i} \sin \omega_{O_i} t_c]}{V} \end{aligned} \right\} (4.26)$$

где

$$V = \sqrt{(\dot{x})^2 + (\dot{y})^2} = \sqrt{[U_{z_i} \cdot \omega_{B_i} \cos \omega_{B_i} t_c \cos \omega_{O_i} t_c + V_d - (A_{\text{сГ}_i} + U_{z_i} \sin \omega_{B_i} t_c) \omega_{O_i} \sin \omega_{O_i} t_c]^2 + [(B_{\text{сВ}_i} + U_{y_i} \sin \omega_{B_i} t_c) \omega_{B_i} \cdot \cos \omega_{O_i} t_c + U_{y_i} \cdot \omega_{B_i} \cos \omega_{B_i} t_c \cdot \sin \omega_{O_i} t_c]^2}.$$

При обработке прерывистым кругом будут некоторые отличия в формировании профиля, т.к. режущая кромка имеет прерывистый характер по образующей круга (в связи с тем, что выступы и впадины имеют определенную протяженность), т.е. на формирование профиля обрабатываемой поверхности, будут влиять еще и геометрические параметры круга.

Кинематическая составляющая ( $Y_{\text{огиб.кин.}} = f_2(X_{\text{кин.}})$ ) с учетом времени прохождения выступа-впадины будет формироваться следующим образом (рис. 4.27).

При вращении круга в момент прохождения впадины над обрабатываемой поверхностью (участок I-II) формируется макровыступ, равный  $u_k$ , при прохождении режущего выступа круга – срезается слой металла (участок III). Координаты точек формируемых неровностей будут определяться из условия (4.27):

$$kS < x_k < (k+1)S, \quad (4.27)$$

где  $k = 0; 1; 2; 3; \dots$  – номер формируемой неровности;

$$y_k = \begin{cases} A(x_k - kS)^2; & kS < x_k \leq kS + \frac{S'}{2}; & \text{(I участок)} \\ A(x_k - kS + S'')^2; & kS + \frac{S''}{2} < x_k \leq kS + S'; & \text{(II участок)} \\ 0; & kS + S'' < x_k \leq (k+1)S; & \text{(III участок)} \end{cases}$$

где

$$A = \frac{R_{кр}}{2 \left( \frac{R_D}{\omega} + R_{кр} \right)^2}$$

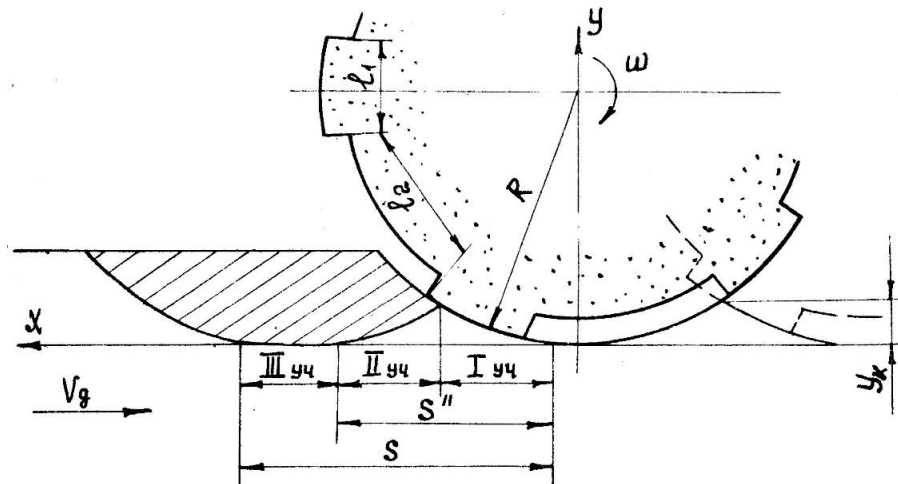


Рисунок 4.27 – Схема формирования макронеровностей на обрабатываемой поверхности при плоском шлифовании, с учетом только кинематики относительного движения прерывистого круга и детали

Протяженность формируемых неровностей  $S''$  и  $S$  рассчитывается из зависимостей (4.28) [180]:

$$S'' = \frac{V_D \cdot l_2}{\omega \cdot R_{кр}}; \quad S = \frac{V_D \cdot (l_1 + l_2)}{\omega \cdot R_{кр}}; \quad (4.28)$$

Проведенный расчет протяженности и высоты макронеровностей ( $x_k, y_k$ ), образуемых от кинематической составляющей, т.е. макронеровностей, формируемых непосредственно за счет только протяженности выступов ( $l_1$ ) и впадин ( $l_2$ ), скорости перемещения ( $V_D$ ) и вра-



щения круга ( $\omega$ ), показал, что даже при относительно большой величине продольной подачи детали (например, при  $V_d = 0,3$  м/с при плоском шлифовании на станке модели 3Г71) и протяженности впадины круга  $l_2 = 50$  мм (для кругов диаметром 250 мм), высота формируемых неровностей не превышает  $y_k = 1,5 \cdot 10^{-4}$  мм, а протяженность  $S'' = 0,397$  мм, т.е. фактически являются величинами второго порядка малости, по сравнению с волнистостью, образуемой за счет динамики процесса и ими можно пренебречь. Следовательно, можно принять, что формируемая волнистость при прерывистом шлифовании будет зависеть только от динамической составляющей:

$$Y_v = f(Y_{\text{огиб.дин}}).$$

Анализ системы уравнений (4.26) позволяет сделать следующий вывод. Основное влияние будут оказывать частота и амплитуда вынужденных высокочастотных колебаний, радиус круга и скорость продольной подачи. Однако поскольку частота вынужденных высокочастотных колебаний зависит от количества выступов на круге, то для данного (конкретного) круга она будет величиной постоянной. Амплитуды высокочастотных колебаний будут зависеть от количества выступов и режимов обработки. Следовательно, изменение режимов обработки приведет к изменению величины удара, и как следствие, амплитуды колебаний.

Известно также [180, 181], что при определенных сочетаниях режимов обработки, радиуса круга, амплитуды и частоты колебаний формообразующая точка периферии круга относительно поверхности детали может двигаться по синусоиде (кривая 1, 2, рис. 4.28) или совершать петлеобразное движение в пространстве (кривая 3), т.е. наступает так называемый эффект "самоперерезания" волн. Суть данного процесса в том, что шлифовальный круг, проходя дважды через одну и ту же точку поверхности, срезает дополнительно часть материала, а оставшаяся часть неровностей будет иметь значительно меньшую высоту  $h$ , чем высота общей синусоиды  $H$ . (рис. 4.28).

Такой эффект возможен при условии, когда для двух различных моментов времени ( $T_{c1}$  и  $T_{c2}$ ) координаты пары значений  $X$  и  $Y$  имеют одно и то же значение, т.е. должно соблюдаться следующее условие:

$$\text{при } T_{c1} \neq T_{c2} \quad \begin{cases} X_{v1} = X_{v2} \\ Y_{v1} = Y_{v2} \end{cases} \quad (4.29)$$

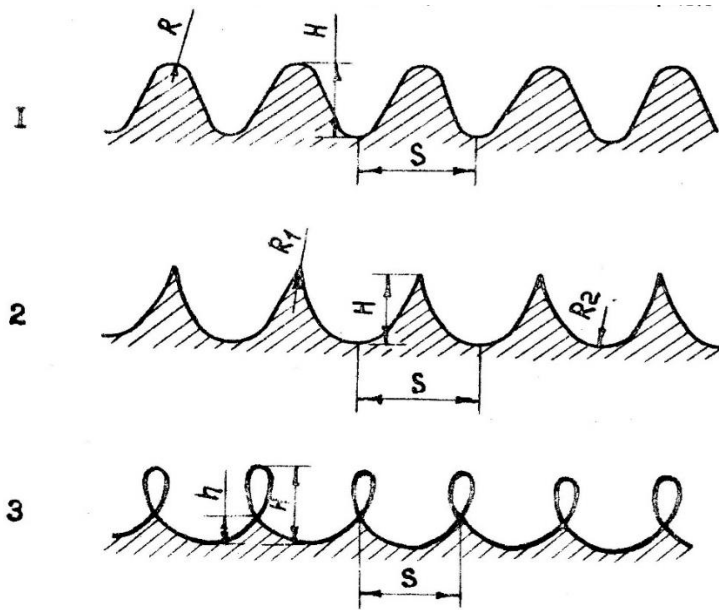


Рисунок 4.28 – Траектория движения формообразующей точки круга в плоскости перпендикулярной оси шпинделя

Таким образом, система уравнений (4.26), определяющая координаты точек волнистой поверхности, при наступлении эффекта "самоперерезания" для  $i$ -й гармоники, будет иметь вид (4.30):

$$\begin{aligned}
 & (A_{сг} + U_z \sin \omega_B t_{c1}) \cos \omega_0 t_{c1} + V_d t_{c1} + \\
 & + \frac{R \left[ (B_{св} + U_y \sin \omega_B t_{c1}) \omega_B \cdot \cos \omega_0 t_{c1} + U_y \cdot \omega_B \cos \omega_0 t_{c1} \cdot \sin \omega_B t_{c1} \right]}{V(1)} = \\
 & = (A_{сг} + U_z \sin \omega_B t_{c2}) \cos \omega_0 t_{c2} + V_d t_{c2} + \\
 & + \frac{R \left[ (B_{св} + U_y \sin \omega_B t_{c2}) \omega_B \cdot \cos \omega_0 t_{c2} + U_y \cdot \omega_B \cos \omega_0 t_{c2} \cdot \sin \omega_B t_{c2} \right]}{V(2)}, \\
 & (B_{св} + U_y \sin \omega_B t_{c1}) \cdot \sin \omega_0 t_{c1} = \\
 & = \frac{R \left[ U_z \cdot \omega_B \cdot \cos \omega_B t_{c1} \cdot \cos \omega_0 t_{c1} + V_d - (A_{сг} + U_z \sin \omega_B t_{c1}) \omega_0 \cdot \sin \omega_0 t_{c1} \right]}{V(1)} = \\
 & = (B_{св} + U_y \sin \omega_B t_{c2}) \cdot \sin \omega_0 t_{c2} = \\
 & = \frac{R \left[ U_z \cdot \omega_B \cdot \cos \omega_B t_{c2} \cdot \cos \omega_0 t_{c2} + V_d - (A_{сг} + U_z \sin \omega_B t_{c2}) \omega_0 \cdot \sin \omega_0 t_{c2} \right]}{V(2)} \quad (4.30)
 \end{aligned}$$

На основании разработанной математической модели проведен расчет и построена траектория перемещения формообразующей точки круга (рис. 4.30 – рис. 4.32). Определены координаты профиля волнистой поверхности в зависимости от динамики и кинематики работы прерывистого шлифовального круга.

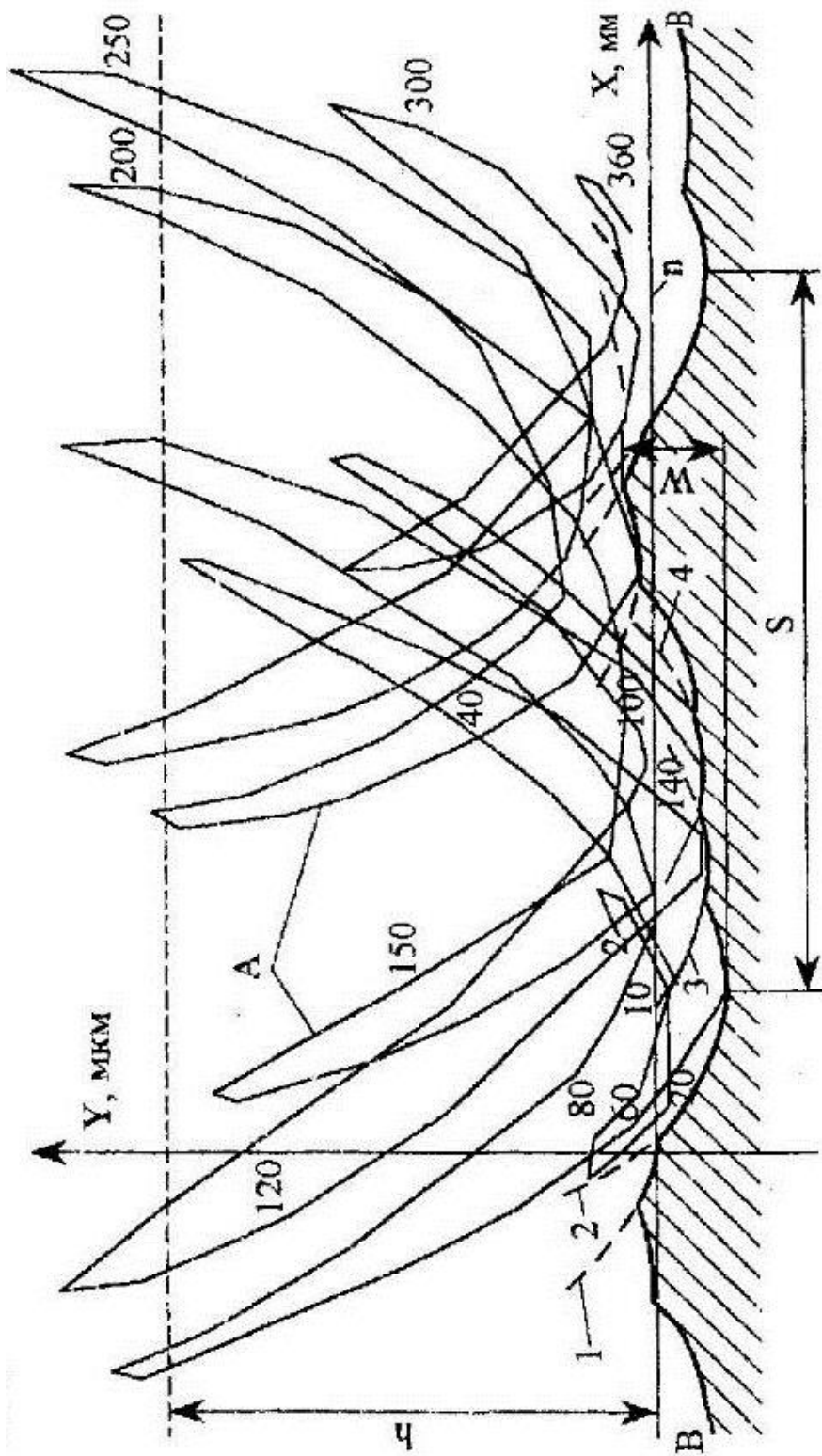


Рисунок 4.30 – Формирование волнистости при обработке прерывистым кругом с 12 пазами.

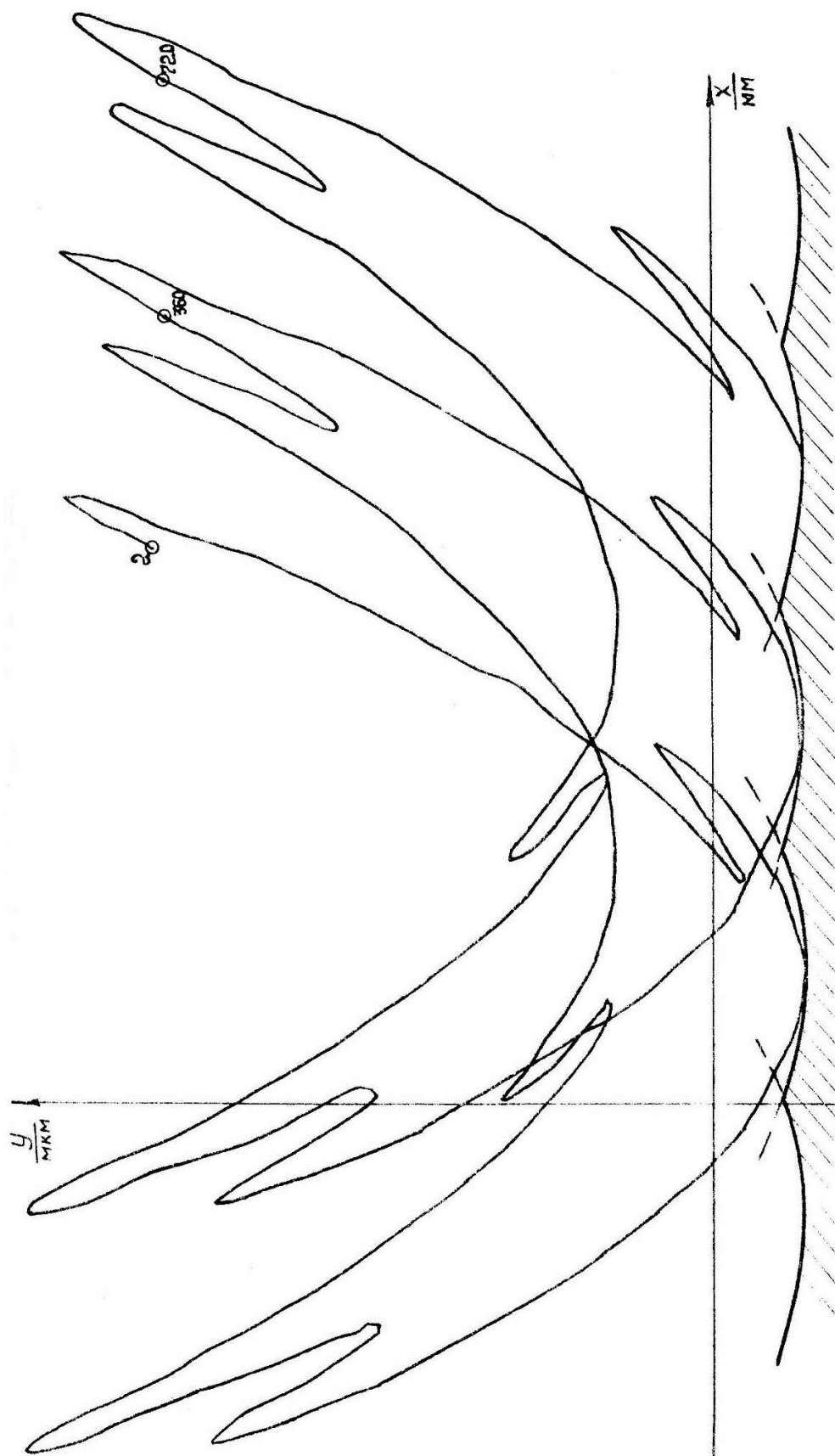


Рисунок 4.31 – Формирование волнистости и траектория движения формообразующей точки круга при обработке прерывистым кругом с 4 выступами за 2 оборота (до 720°).

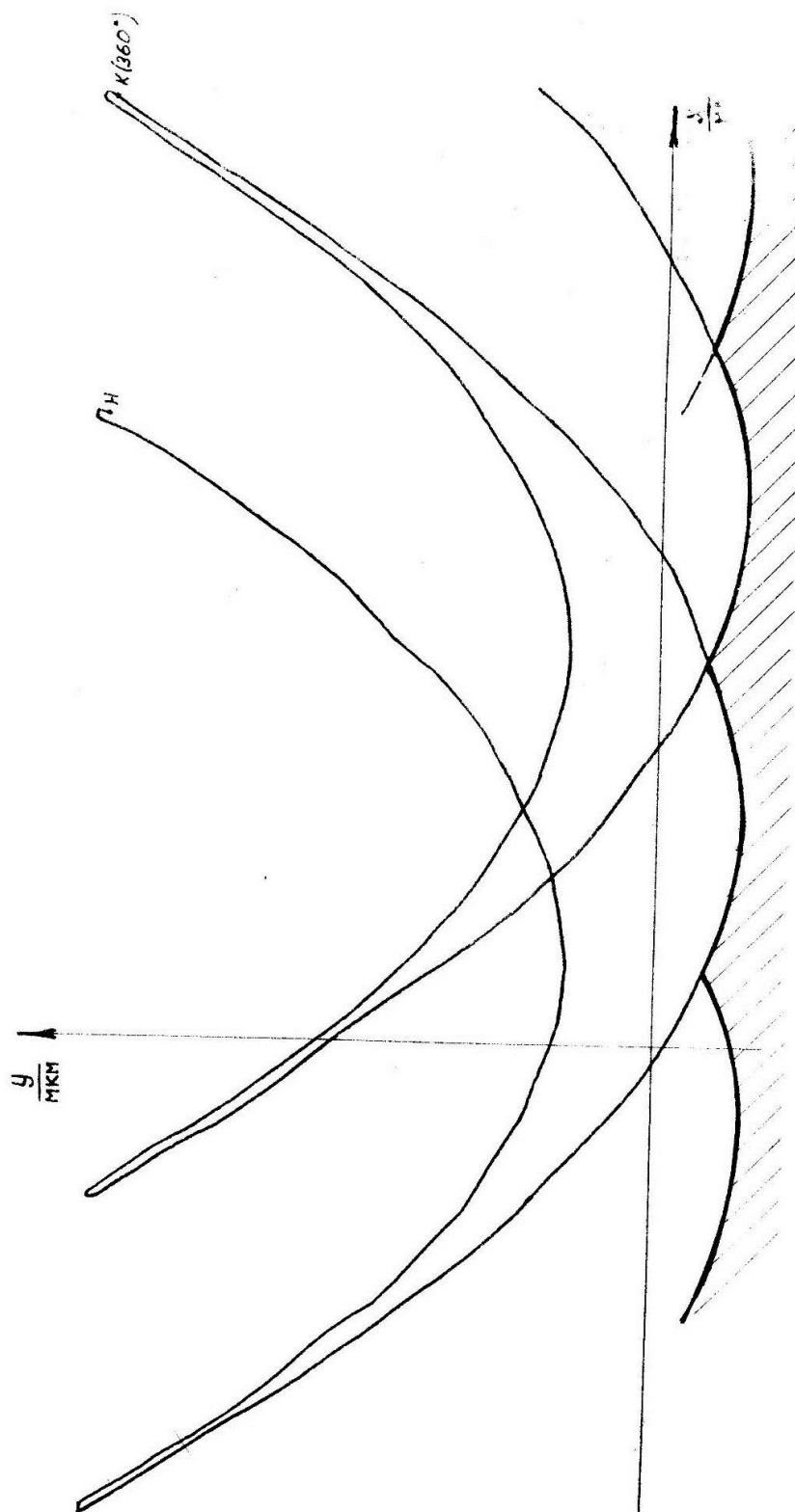


Рисунок 4.32– Формирование волнистости и траектория движения формообразующей точки круга (за 2 оборота) при обработке обычным кругом (с непрерывной режущей поверхностью) имеющим дисбаланс:  
 н – начало вращения круга ( $0^{\circ}$ ), к – конечная точка оборота ( $360^{\circ}$ ), за второй оборот траектория движения повторяется

Анализ приведенных траекторий, показал, что вследствие наличия высокочастотных вынужденных колебаний, формообразующая точка круга, совершая петлеобразные (осциллирующие) движения, неоднократно проходит через одну и ту же точку пространства, снимая припуск тонкими, отдельными слоями, уменьшая высоту формируемого профиля (высоту волны). Таким образом, при прерывистом шлифовании всегда наблюдается эффект "самоперерезания" волн.

В зависимости от конструкции круга (и, как следствие, параметров колебаний) изменяется несколько траектория его движения и профиль формируемых неровностей (рис. 4.30 – рис. 4.32).

Анализ построенной траектории (за один оборот круга, через каждые  $2^\circ$ ) (рис. 4.30) показал, что формообразующая точка круга совершает петлеобразные осциллирующие перемещения двигаясь по траектории (А) многократно проходит через одну и ту же зону пространства и постепенно срезая весь слой металла. Дуги 1, 2, 3, 4, ..., n окружности круга радиусом R оставляют на поверхности детали соответствующий след. Огибающая для этих дуг кривая В – В и будет представлять собой профиль волнистости формируемой на поверхности детали. Разность между наивысшей и низшей точкой профиля – есть высота данной волны (W), а расстояние между одноименными точками профиля – ее шаг (S).

Наличие высокочастотных колебаний (например, для круга с 4 пазами, рис. 4.31) привело к снижению высоты формируемой волнистости, даже при завышенной амплитуде колебаний несущей частоты. Для сплошного круга высота формируемой волны составила  $W = 0,6$  мкм (рис. 4.32), а для прерывистого круга с 4 выступами  $W = 0,7$  мкм (рис. 4.31). (Амплитуды несущей частоты, связанные с дисбалансом для сплошного круга, составили  $B_{св} = 3,05 \cdot 10^{-6}$  м;  $A_{сг} = 3,8 \cdot 10^{-6}$  м; для прерывистого круга  $B_{св} = 3,05 \cdot 10^{-6}$  м;  $A_{сг} = 3,8 \cdot 10^{-6}$  м;  $U_y = 3,29 \cdot 10^{-7}$  м;  $U_z = 4,7 \cdot 10^{-7}$  м).

Сравнение высоты формируемой волнистости рассчитанной и построенной для случая использования сплошного или прерывистого круга с 12 выступами, показало, что при одинаковых режимах обработки (расчет проведен для режимов резания  $V_d = 0,05$  м/с;  $t = 10 \cdot 10^{-6}$  м), идентичной частоте ( $f = 45,48$  Гц) и амплитудах колебаний несущей частоты ( $B_{св} = 3,05 \cdot 10^{-6}$  м,  $A_{сг} = 3,8 \cdot 10^{-6}$  м), наличие высокочастотных колебаний ( $f = 545,8$  Гц) связанных с прерывистостью процесса резания ( $U_z = 0,47 \cdot 10^{-6}$  м;  $U_y = 0,33 \cdot 10^{-6}$  м) и неоднократным прохождением фор-

мообразующей точки круга через одну и ту же зону резания, привело к снижению высоты волны и составило  $W = 0,2$  мкм (для сплошного круга  $W = 0,6$  мкм). Кроме того, при таком движении происходит периодический отрыв формообразующей точки круга от обрабатываемой поверхности, что и приводит к послойному удалению припуска на заданной глубине  $h$ , и как следствие снижение сил резания.

По итогам теоретических разработок, построены профили волн и рассчитаны их параметры (рис. 4.33, рис. 4.34) [21].

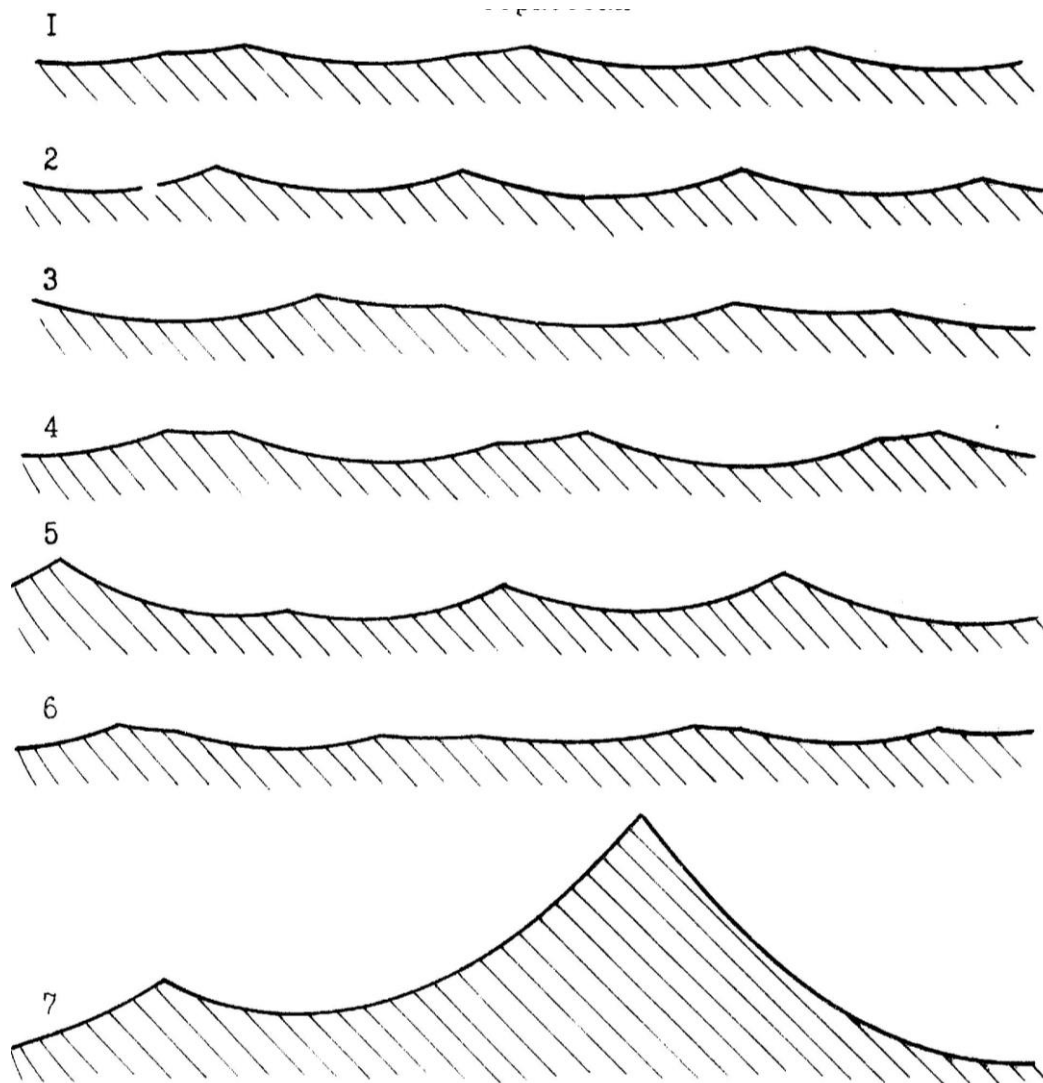


Рисунок 4.33 – Изменение параметров волны при различных режимах обработки:

- 1)  $W_z = 1,5 \cdot 10^{-6}$  м,  $S = 1,48 \cdot 10^{-3}$  м (при  $V_d = 0,067$  м/с,  $t = 20 \cdot 10^{-6}$  м);
- 2)  $W_z = 1,5 \cdot 10^{-6}$  м,  $S = 1,34 \cdot 10^{-3}$  м ( $V_d = 0,117$  м/с,  $t = 50 \cdot 10^{-6}$  м);
- 3)  $W_z = 1,5 \cdot 10^{-6}$  м,  $S = 2,2 \cdot 10^{-3}$  м ( $V_d = 0,1$  м/с,  $t = 30 \cdot 10^{-6}$  м);
- 4)  $W_z = 2,0 \cdot 10^{-6}$  м,  $S = 1,84 \cdot 10^{-3}$  м ( $V_d = 0,083$  м/с,  $t = 30 \cdot 10^{-6}$  м);
- 5)  $W_z = 2,1 \cdot 10^{-6}$  м,  $S = 1,83 \cdot 10^{-3}$  м ( $V_d = 0,167$  м/с,  $t = 10 \cdot 10^{-6}$  м);
- 6)  $W_z = 1,05 \cdot 10^{-6}$  м,  $S = 1,16 \cdot 10^{-3}$  м ( $V_d = 0,133$  м/с,  $t = 10 \cdot 10^{-6}$  м);
- 7)  $W_z = 8,15 \cdot 10^{-6}$  м,  $S = 2,69 \cdot 10^{-3}$  м ( $V_d = 0,25$  м/с,  $t = 30 \cdot 10^{-6}$  м).

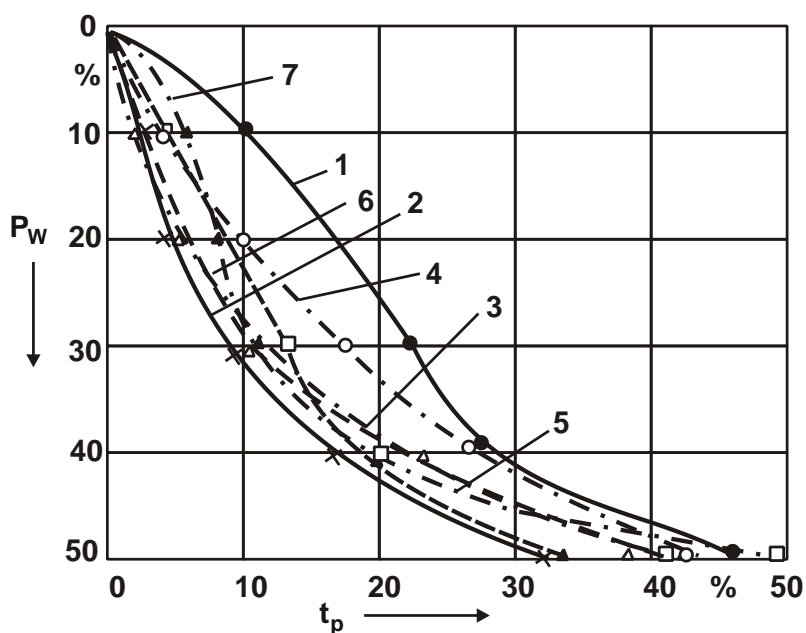
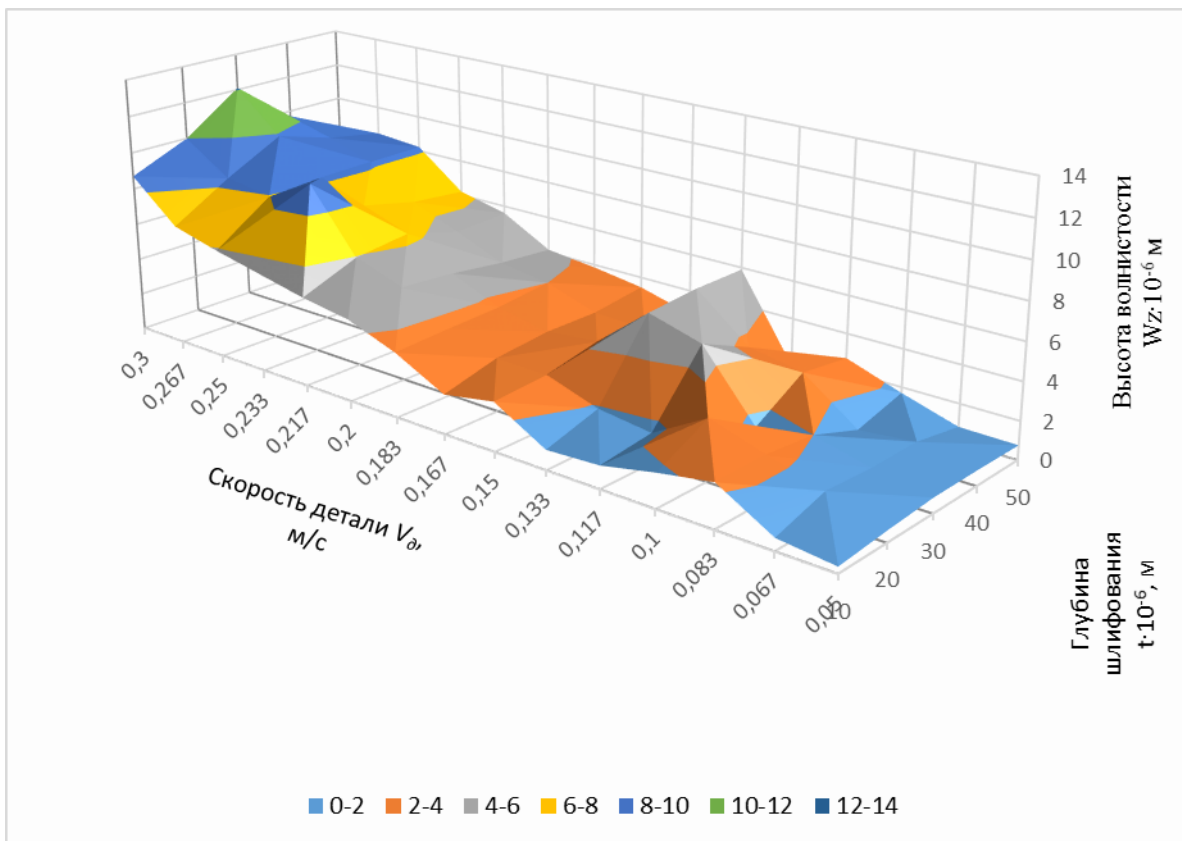


Рисунок 4.34 – Опорные кривые построенных профилей

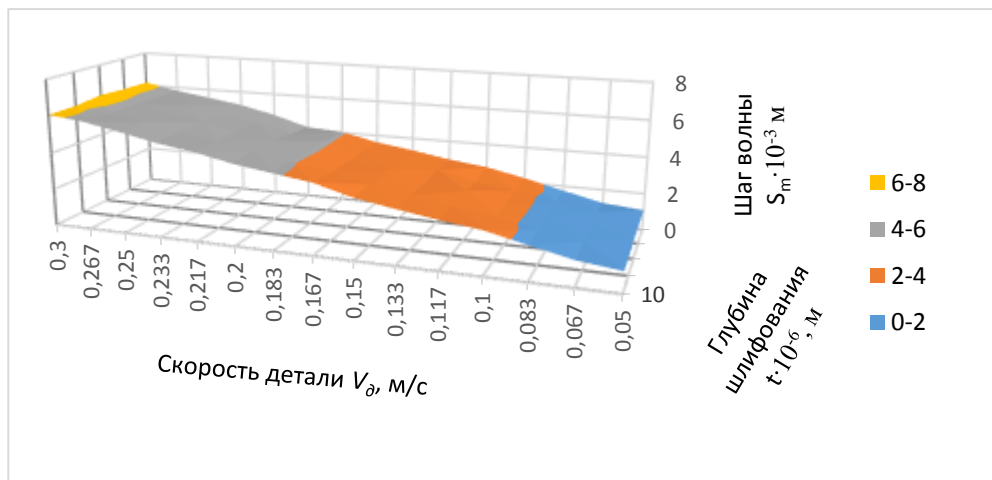
Анализ приведенных рисунков показал, что при различных режимах обработки, вследствие определенных сочетаний амплитуды и частоты колебаний прерывистого круга и многократного перерезания профиля, можно получить одинаковые параметры высоты волны (например, профили 1, 2, 3) (рис. 4.33), имеющие примерно одинаковую величину несущей поверхности (кривые 2, 3) (рис. 4.34) и большую опорную поверхность (кривая 1). Аналогично и профили 4, 5 (рис. 4.33), имеющих одинаковую высоту неровностей ( $W_{z4} = 2,0$  мкм;  $W_{z5} = 2,1$  мкм), но различные опорные кривые. До уровня  $P_w = 30$  % опорные кривые совпадают, а при  $P_w = 30 \dots 47$  % опорная поверхность у профиля № 4 больше (рис. 4.34); при  $P_w = 50$  % возросла опорная поверхность у профиля №5. В результате многократного прохождения формообразующих элементов круга и, происходящих при этом процессе, перерезании волн, вершины профилей 1, 4, 6 более сглажены, а профили 2, 5 более заостренные (все профили представлены в одном масштабе). Профиль №7 имеет высокие заостренные вершины (расчет радиуса выступа волны составил  $R_{07} = 192,22$  мм), а, например, профили 1 и 6 имеют радиус вершины  $R_{01} = 374,6$  мм и  $R_{06} = 298,95$  мм.

На рисунке 4.35 приведены расчетные значения высоты и шага волн при обработке на плоскошлифовальном станке 3Г71 абразивным шлифовальным кругом с 12 выступами и соотношением длины паза к выступу 1/2 ( $l_n = 22$  мм;  $l_b = 44$  м). Диапазон режимов обработки  $V_d = 0,05 \dots 0,3$  м/с;  $t = 10 \cdot 10^{-6} \dots 50 \cdot 10^{-6}$  м.





а



б

Рисунок 4.35 – Расчетные значения параметров волнистости: высоты (а) и шага волн (б) при обработке на плоскошлифовальном станке модели 3Г71

На приведенном рис. 4.35,а видно, что с увеличением режимов обработки высота волнистости увеличивается. Причем, изменение скорости обработки (при фиксированной глубине), оказывает большее влияние на изменение высоты волны, чем изменение глубины (при фиксированной скорости). Только в области, ограниченной пределами

$V_d = 0,117 \dots 0,15$  м/с; и  $t = 30 \cdot 10^{-6} \dots 50 \cdot 10^{-6}$  м, происходит резкий скачок высоты волнистости, по всей вероятности, связанной с наступлением резонанса для данного сочетания режимов обработки и конструкции круга. В то же время, на общей поверхности хорошо видны глубокие впадины, по всей вероятности, связанные с дополнительным самоперерезанием волн и уменьшением их высоты. Шаг волны (рис. 4.35,б) зависит только от скорости детали.

**Экспериментальные определения параметров волнистости.** На рис. 4.36, рис. 4.37 приведены экспериментальные данные зависимости высоты волны от режимов и конструкции круга.

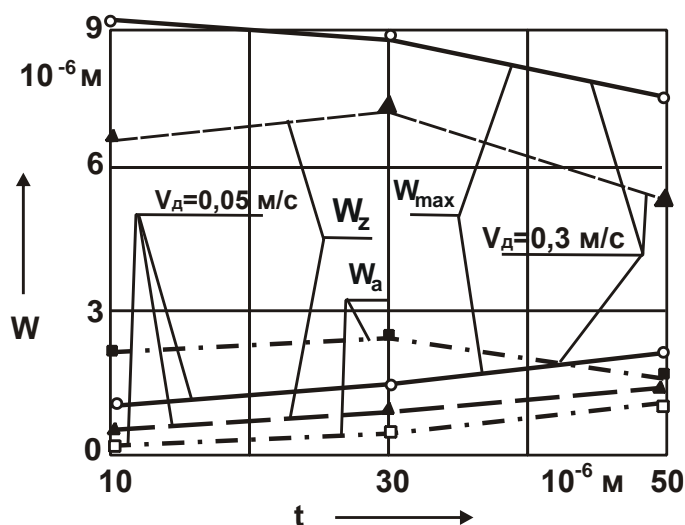


Рисунок 4.36 – Влияние режимов обработки на высоту волнистости: круг прерывистый с  $n = 12$  выступов

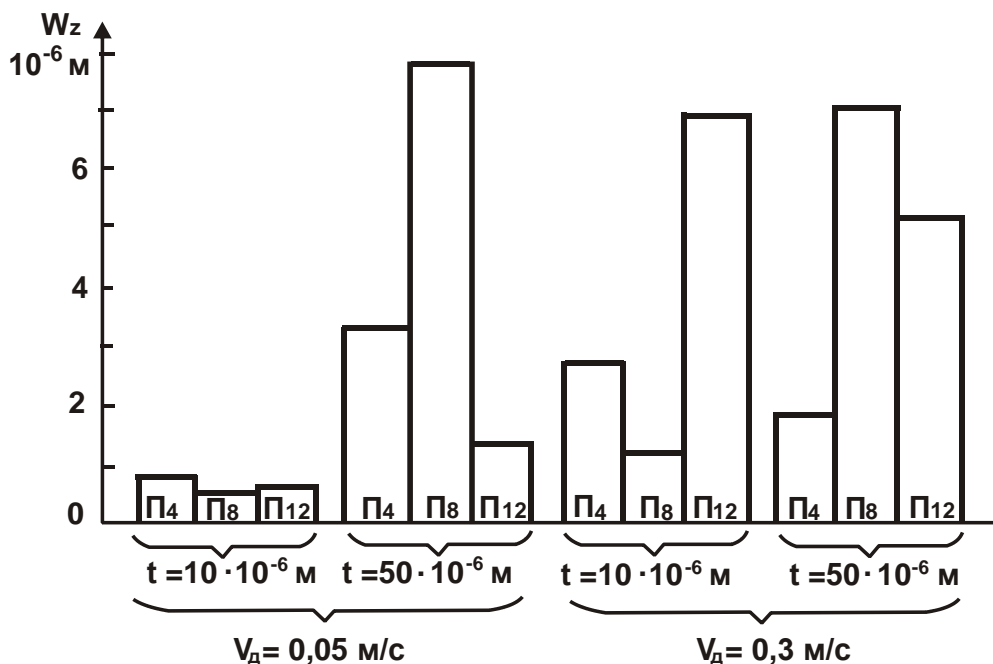


Рисунок 4.37 – Влияние конструкции круга на параметры волны

На рис. 4.38 приведены профилограммы профилей, шлифованных поверхностей, обработанных прерывистыми кругами

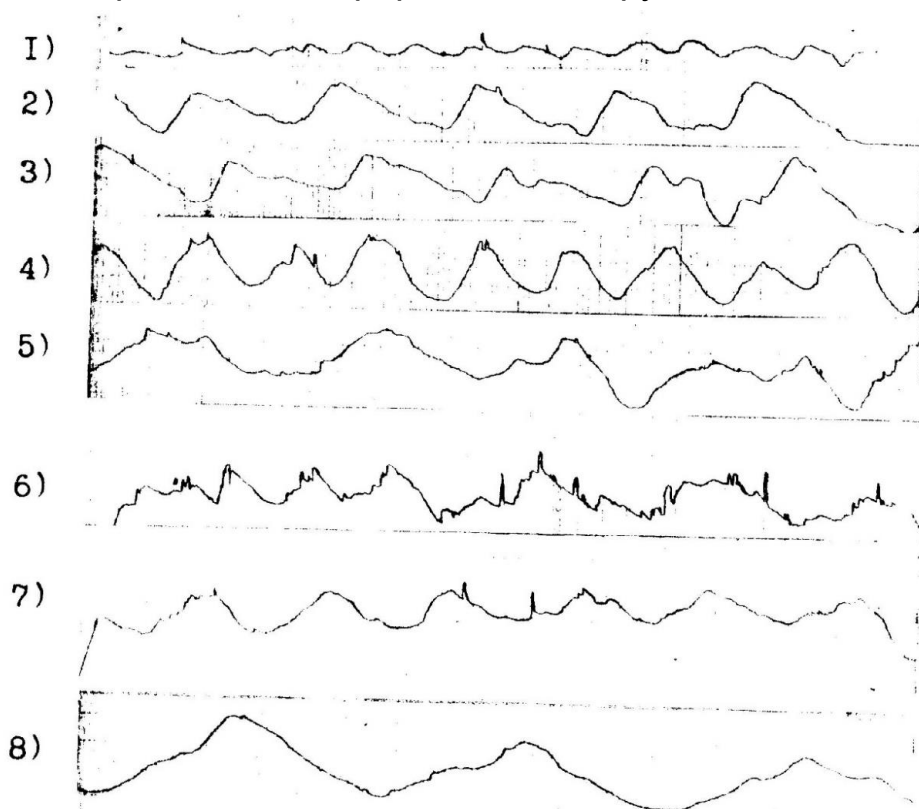


Рисунок 4.38 – Профили волнистости, полученные при различной обработке: №1 – ВУ = 2000, ГУ = 8; №2 ... №3 – ВУ = 1000, ГУ = 8; №4 ... №7 – ВУ = 4000, ГУ = 20; №8 – ВУ = 4000, ГУ = 40

Профилограммы различаются по форме, шагу, высоте волн. Например, профили 2 и 3 имеют пилообразную форму. Профиль № 4 имеет более округлые вершины, чем профиль № 3. У профиля № 5 шаг волны примерно в 2 раза больше, чем у № 4. Профиль № 6 имеет более заостренные вершины.

Эффективность приведенных положений проверялась при обработке деталей типа "Направляющих" ("Танкетка" материал – сталь 20Х, цементированная HRC 59 ... 63). Обработка производилась на плоскошлифовальном станке модели ЗГ71 сплошным и прерывистым ( $n_{\text{выст.}} = 10$ ) кругом при одинаковых режимах обработки (рис. 4.39).

На профиле №4 вершины несколько более плоские, срезанные, и высота волнистости составила  $W_z = 0,49$  мкм, т.е. при прерывистом шлифовании наблюдается эффект самоперерезания волн и дополнительный съем металла с поверхности. При обработке сплошным кругом (деталь № 0) высота волнистости в конце обработки составила  $W_z = 0,73$  мкм.

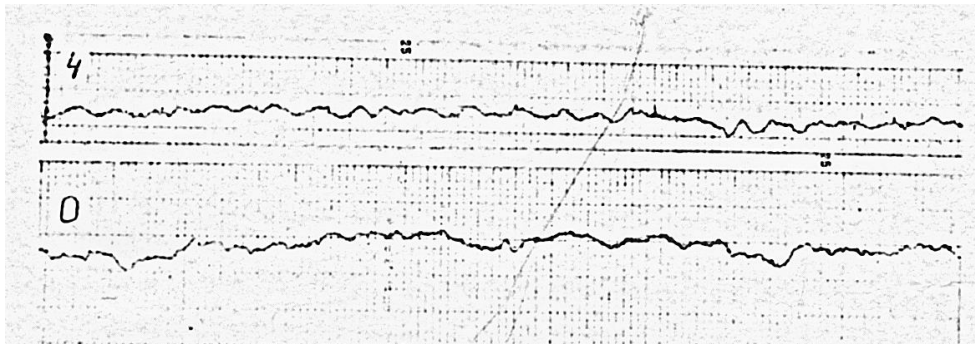


Рисунок 4.39 – Профили волн на обработанных направляющих:  
 № 4 – деталь обрабатывалась кругом с прерывистой поверхностью;  
 № 0 – сплошным кругом ( $V_U=5000$ ,  $\Gamma_U = 10$ )

Увеличение частоты вынужденных колебаний также привело к снижению высоты и шага волнистости (рис. 4.40). Деталь №8 обрабатывалась прерывистым кругом с  $n_{\text{выст.}} = 10$  шт ( $\omega_B = 454,8$  Гц). Режимы обработки  $V_d = 0,267$  м/с;  $S_n = 0,6$  мм/ход;  $t = 40 \cdot 10^{-6}$  м. Параметры волнистости составили  $W_z = 0,66$  мкм,  $S = 2,9$  мм.

Деталь № 3пк обрабатывалась прерывистым кругом с  $n_{\text{выст.}} = 12$  шт. ( $\omega_B = 545,8$  Гц). Режимы обработки  $V_d = 0,267$  м/с;  $S_n = 0,7$  мм/ход;  $t = 50 \cdot 10^{-6}$  м. Параметры волнистости:  $W_z = 0,13$  мкм,  $S = 0,94$  мм.

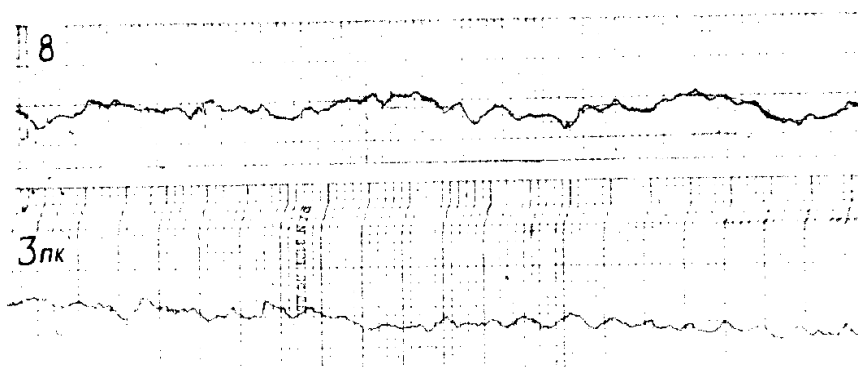


Рисунок 4.40 – Профили волн на направляющих обработанных прерывистыми кругами с разной частотой колебаний:  
 №8 – деталь обрабатывалась прерывистым кругом с  $n_{\text{выст.}} = 10$  шт. ( $\omega_B = 454,8$  Гц); №3пк – круг с  $n_{\text{выст.}} = 12$  шт. ( $\omega_B = 545,8$  Гц)  
 ( $V_U = 20000$ ,  $\Gamma_U = 10$ )

При обработке длинных широких направляющих ( $L \times S = 0,5 \times 0,160$  м) (за одну установку обрабатывался комплект из 4-х деталей, материал сталь 20Х, цементированная НРС 58 ... 62) на плоскошлифовальном

станке модели ЗБ722 кругами ПП 450×63×03, высота волны составила  $W_z = 0,79$  мкм, при шлифовании сплошным кругом ( $V_d = 0,267$  м/с;  $S_n = 35$  мм/ход;  $t = 20 \cdot 10^{-6}$  м, плюс дополнительный выхаживающий проход в конце обработки при  $t = 10 \cdot 10^{-6}$  м). При этом на обрабатываемой поверхности наблюдался прижег, в результате засаливания круга (в процессе шлифования приходилось трижды править круг) и интенсивное дробление в виде волнистости.

При обработке прерывистыми кругами (с  $n_{\text{выст.}} = 20$  шт.,  $l_{\text{паза}} / l_{\text{выст.}} = 25/46$  мм, частота вынужденных колебаний  $f = 495,4$  Гц), высота волнистости на поверхности направляющих составила  $W_z = 0,639$  мкм (даже при увеличенной глубине шлифования  $t = 30 \cdot 10^{-6}$  м).

В результате дополнительных высокочастотных колебаний и периодического отрыва режущей кромки от обрабатываемой поверхности засаливание круга происходит менее интенсивно. Правку производили после обработки 2-х комплектов. В итоге возросла производительность обработки.

На приведенных ниже рис. 4.41, рис. 4.42 видно, что при любых режимах (нагрузке) производительность при обработке прерывистым кругом и его режущая способность намного выше, чем при обработке сплошным, а энергия, затрачиваемая на процесс резания (рис. 4.43) намного ниже. Это объясняется наличием высокочастотных колебаний круга и периодическим отрывом от поверхности.

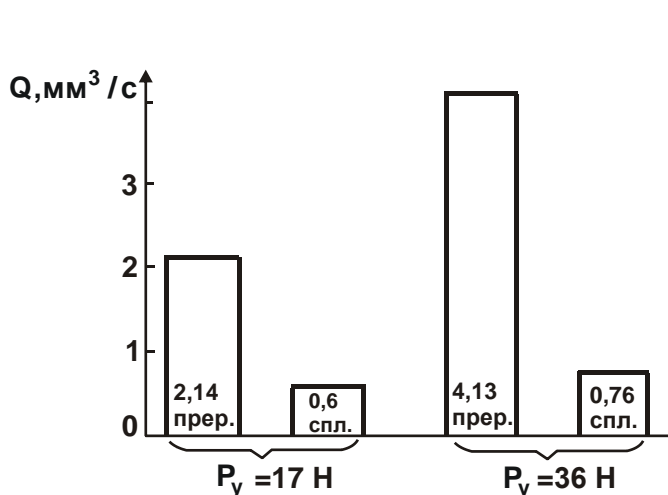


Рисунок 4.41 – Производительность обработки различными кругами

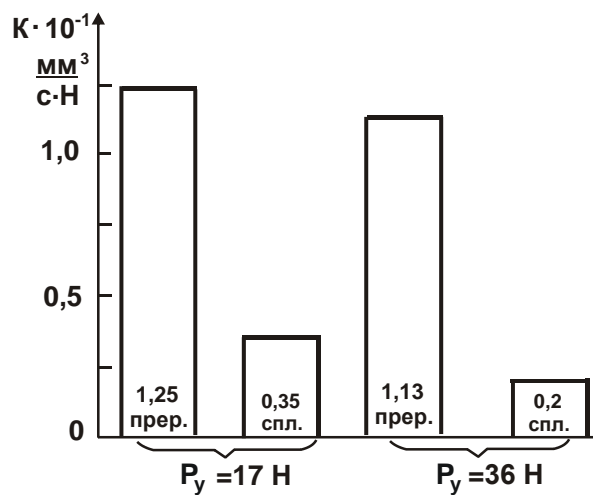


Рисунок 4.42 – Режущая способность кругов при различной нагрузке

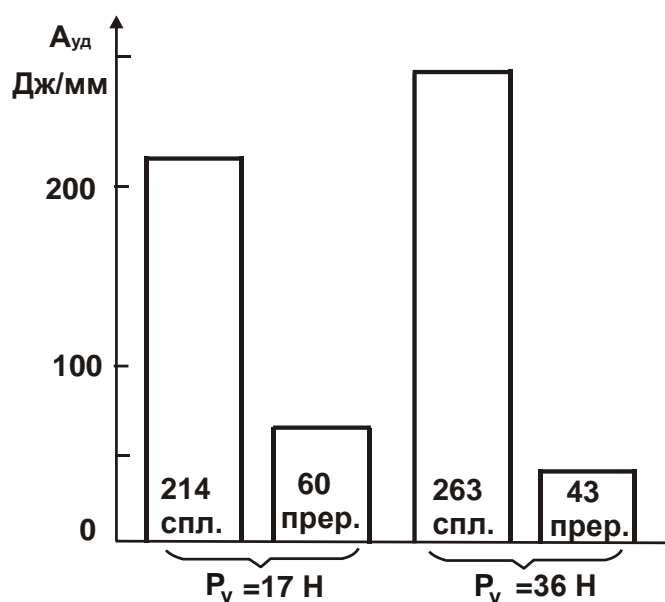


Рисунок 4.43 – Работа, затрачиваемая на процесс резания

#### 4.2.4. Связь прерывистости с температурой процесса шлифования

В большинстве рассматриваемых работ [146, 186, 243, 245] по прерывистому шлифованию, основной вопрос стоял о взаимосвязи процесса прерывистого шлифования с температурой обрабатываемой поверхности, т.е. об установлении зависимости величины теплового потока от протяженности выступа и впадины и их соотношения. И соответственно, исходя из этих положений, разрабатывались меры по уменьшению температуры. Например, уменьшить количество впадин на круге при увеличении отношения протяженности впадины к выступу [168]. Или увеличивая количество пазов за  $n = 60$  шт. и выше и снижая их протяженность до 3 мм. Однако практически использовать такой шлифовальный круг диаметром  $\varnothing 250$  мм не представляется возможным, т.к. в этом случае при общей длине образующей  $l = 785$  мм и количестве пазов  $n = 80$  шт., длине паза  $l_n = 3$  мм, длина выступа составит  $l_b \approx 6,8$  мм. Следовательно, учитывая ударный характер работы прерывистого круга, прочности выступов такой протяженности может оказаться недостаточно. Как показали испытания обожженных черепков ("восьмерки") абразивного инструмента из материала 24А (6 структуры, связка К5), прочность на разрыв составила  $1,26$  кГс/мм<sup>2</sup>, в то же время сила резания может достигать значения до  $P_z = 3,65$  кГс (при  $V = 3$  м/мин,  $t = 0,05$  мм).

Исходя из условия устойчивой работы упругой системы плоскошлифовального станка, требуемой степени понижения температуры в

зоне резания и размерной стойкости круга, рекомендуется [201] принимать соотношение паза к выступу в пределах 1,5 ... 2 раза, при их количестве 12 ... 18 шт.

Кроме того, как показали расчеты, например, при количестве пазов  $n = 12$  шт., и длине паза  $l_n = 22$  мм ( $l_n / l_b = 1/2$ ) (т.е. учитывая рекомендации [245] по оптимизации соотношения  $l_n / l_b \leq 0,5$ ), время прохождения паза составляет  $\tau = 6,146 \cdot 10^{-4}$  с, в то время как скорость остывания тела составляет всего  $0,038$  °С/с. Следовательно, прерывание процесса на такой короткий промежуток времени само по себе не будет оказывать влияние на снижение температуры резания [114].

К тому же в этой и последующих работах [147, 245] заранее принято положение (условие) о том, что необходимо снизить температуру процесса на заранее заданную величину, и, исходя из этого положения, производится теоретический расчет параметров инструмента и режимов обработки. Что, по нашему мнению, является не совсем адекватным.

Рассмотрим проблему с другой стороны.

Взаимосвязь прерывистости с перемещениями инструмента в основном рассматривалась в виде [146, 245] (рис. 4.3а,б)

В реальности абразивный инструмент с прерывистой рабочей поверхностью совершает в пространстве более сложную траекторию. Как было установлено выше (рис. 4.30 – рис. 4.32), в результате действия ударной нагрузки происходит дополнительные высокочастотные колебания инструмента и послойное удаление припуска, а также отрыв режущей кромки инструмента от обрабатываемой поверхности. В результате уменьшается время контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью, а значит и глубина проникновения тепла в поверхность и соответственно температура шлифования [131].

Соотношение сил резания (рис. 4.21, рис. 4.22) показывает, например, что при одинаковой скорости резания  $V_d = 0,3$  м/с (рис. 4.21,б) при набранной по лимбу глубине  $t = 50 \cdot 10^{-6}$  м (для прерывистого круга), сила резания  $P_z$  затрачиваемая на процесс резания, такая же по величине как для сплошного круга при  $t = 20 \cdot 10^{-6}$  м. В тоже время производительность (рис. 4.41) и режущая способность (рис. 4.41) у прерывистого круга (при тех же режимах  $P_y = 36$  Н) намного выше, чем у сплошного, а работа, затрачиваемая на процесс резания (рис. 4.43) намного ниже.

Таким образом, работа с вибрациями существенно изменяет условия процесса резания. Как видно из представленных ранее осциллограмм перемещения шлифовального круга (рис. 4.13, рис. 4.14), вектор скорости резания будет постоянно изменять свое направление и величину, происходит периодический отрыв режущих кромок инструмента от поверхности, а также изменяется скорость и соотношение между зоной пластической деформации и диспергирования металла. Кроме того, в момент соприкосновения режущего выступа с обрабатываемой поверхностью происходит удар, что совместно с вибрациями приводит к охрупчиванию обрабатываемой поверхности металла. Уменьшается процесс трения связки о поверхность, увеличивается скорость круга (в виде увеличения скорости внедрения режущего зерна, в результате дополнительного вибрационного перемещения круга) и как следствие уменьшение температуры шлифования.

Все эти условия способствуют обеспечению высокой режущей способности шлифовального круга (рис. 4.42), уменьшению условного напряжения резания  $\sigma$  и, как следствие, уменьшению температуры резания [131].

## Выводы

1. Периодический разрыв режущей кромки на образующей шлифовального круга сам по себе не оказывает существенного влияния на снижение температуры при шлифовании.

2. Снижение температуры при шлифовании прерывистыми кругами происходит в результате дополнительных высокочастотных колебаний круга, вызванных именно периодическим воздействием паза-выступа на обрабатываемую поверхность, периодическим изменением натяга и проседания в системе шлифовальный круг – деталь. Наличие ударного импульса в момент соприкосновения рабочего выступа с поверхностью и, как следствие, колебания круга, приводит к изменению съема припуска, а также периодического отрыва режущей кромки от поверхности. И все эти факторы в совокупности приводят к снижению температуры обрабатываемой поверхности.

3. Производительность при обработке прерывистым кругом и его режущая способность намного выше, чем при обработке сплошным, а энергия, затрачиваемая на процесс резания намного ниже.



## Раздел 5

### Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя зубьев высокоточных зубчатых колес при шлифовании

#### 5.1. Поверхностные дефекты шлифования зубчатых колес и причины их возникновения

Процесс шлифования характеризуется значительными скоростями резания, большим удельным давлением и трением. Эти особенности процесса шлифования обуславливают возникновение высоких температур в зоне контакта круга с деталью, иногда превышающие критические точки структурных преобразований. Из работ [243, 245] известно, что около 80 % затрачиваемой на шлифование работы превращается в теплоту, остальная – в потенциальную энергию деформации кристаллической решетки. Тепло, выделяемое в процессе шлифования, поглощается, главным образом, обрабатываемой деталью. Из работ [97, 176] известно, что оно распределяется примерно так: в обрабатываемую деталь –  $Q_{\text{д}} = 0,84 \cdot Q_{\text{общ}}$ , в шлифовальный круг –  $Q_{\text{кр}} = 0,12 \cdot Q_{\text{общ}}$  и в стружку  $Q_{\text{стр}} = (0,03 \div 0,05) \cdot Q_{\text{общ}}$ .

Высокая температура на поверхности обрабатываемой детали сохраняется доли секунды, поскольку большая часть возникающей теплоты сразу отводится слоями холодного металла, лежащими ниже. Однако, несмотря на кратковременность нагрева, высокие температуры вызывают появление структурных изменений, внешне характеризующихся прижогами. Прижоги подразделяются на два класса [247]: прижоги отпуска и прижоги закалки. Прижоги отпуска возникают в том случае, когда температура нагрева поверхностных слоев не превышает критической точки превращения  $A_{c1}$  и тепло быстро отводится вглубь металла, при этом образуются продукты распада мартенсита (троостит и сорбит). Прижоги закалки возникают при разогреве шлифованной поверхности выше температуры фазовых превращений. Кроме прижогов, на поверхности деталей после шлифования часто появляются дефекты другого вида – трещины – в результате действия суммарного напряжения [169, 170, 192, 196], возникающего вследствие

неоднородной пластической деформации в различных зонах поверхностного слоя. Неоднородность деформаций металла зависит как от теплового расширения и сжатия при быстром и неравномерном нагреве и охлаждении отдельных объемов металла, так и от неравномерных изменений, обусловленных структурными преобразованиями.

Рыжов Н. М. [192] указывает, что после шлифования зубчатых колес на режимах, где не появляются прижоги, возникает небольшое остаточное напряжение. На зубьях шестерен, имеющих прижоги, растягивающее напряжение достигает  $700 - 750 \text{ Н/мм}^2$ . Под влиянием этого напряжения на поверхности появляются трещины, расположенные, как правило, перпендикулярно направлению шлифования. Из работы [245] известно, что в результате закалки цементируемых сталей 12Х2Н4А, 16ХГТП, 14ХГСМ2М2 в поверхностном слое детали возникают сжимающие остаточные напряжения  $500 - 600 \text{ Н/мм}^2$ . После шлифования происходит их перераспределение: в зависимости от режимов они могут быть сжимающими  $50 - 100 \text{ Н/мм}^2$  и растягивающими  $200 - 750 \text{ Н/мм}^2$ .

На рис. 5.1 представлены кривые распределения остаточных напряжений на глубине поверхностного слоя в зубьях шестерен из стали 12Х2Н4А после зубошлифования. Методика определения напряжений в зубьях шестерен приведена в работе [245]. Анализ кривых показывает, что вследствие аустенитно-мартенситных превращений, а также быстро протекающего отпуска под влиянием теплового эффекта происходит перераспределение напряжений: например, в одном из зубьев (кривая 3) обнаружены сжимающие напряжения:  $\sigma = 200 \text{ Н/мм}^2$ , в других (кривые 2, 4, 5, 6) – растягивающие напряжения, но разной величины ( $200 - 600 \text{ Н/мм}^2$ ). Разная напряженность в зубьях шестерен после шлифования объясняется неравномерностью припуска, снимаемого из-за имеющихся отклонений по шагу и профилю, наличием кинематических погрешностей и радиального биения после химико-термической обработки и восстановления баз [240, 241].

Значительное влияние на появление трещин оказывает теплопроводность материала. Низкая теплопроводность способствует появлению прижогов и трещин при шлифовании. В работе [85] установлено, что наибольшей теплопроводностью обладает чистое железо. Углерод и такие легирующие элементы, как хром и никель снижают теплопроводность. Из структурных составляющих наименьшую теплопро-

водность имеет аустенит, а наибольшую – перлит [200]. Следовательно, при черновых проходах появление повторно-закаленного слоя на боковых поверхностях зубьев способствует возникновению шлифовочных трещин на последующих проходах операции зубошлифования.

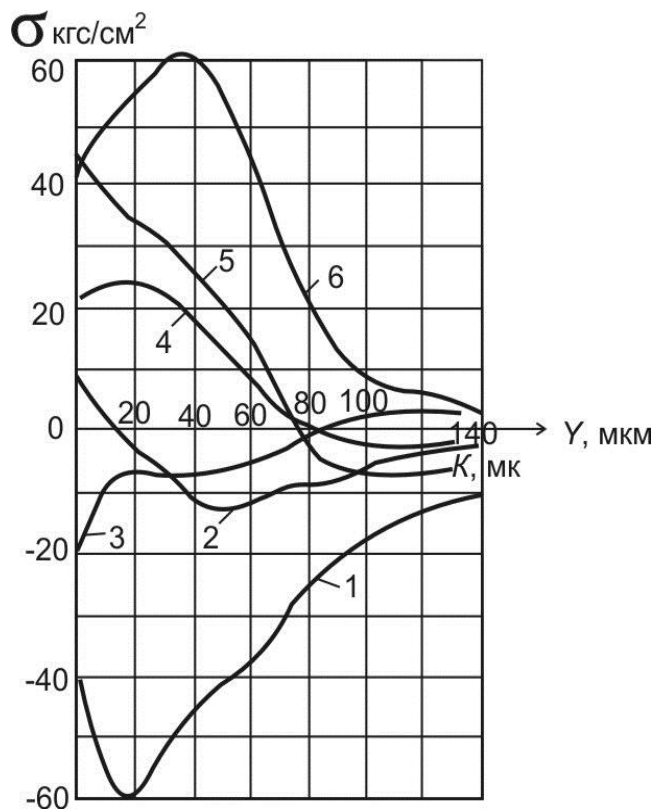


Рисунок 5.1 – Распределение остаточных напряжений по глубине поверхностного слоя в зубьях шестерен: 1 – зуб после термической обработки; 2 ... 6 – зуб после зубошлифования

Приведенные в работах [97, 172, 241, 246] данные показывают связь структуры материала и способа шлифования с качеством поверхностного слоя. Однако данная информация не раскрывает механизм формирования напряжений с учетом нагрева и охлаждения поверхности, а также с учетом изменения критических точек структурных преобразований. При разработке кинетики формирования термоупругих напряжений в работе [241] установлено, что трещины на поверхности возникают не в период нагрева, а в период охлаждения. Установлено, что при шлифовании зубчатых колес на станках МААГ с 15-градусной режущей рейкой прижоги возникают во впадине зубчатых колес, а в зоне переходной кривой от эвольвенты к впадине возникают трещины (рис. 5.2).

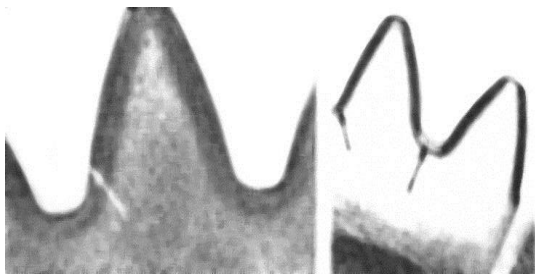


Рисунок 5.2 – Шлиф зубчатых секторов с шлифовальными трещинами (слева) и с прижогом во впадине

Прижоги вторичной закалки, которые имеют повышенное процентное содержание аустенита, часто не выявляются при травлении, и зубчатые колеса с подобными дефектами считаются пригодными к эксплуатации. Участки перехода различных структур наиболее опасны, поскольку здесь концентрируется растягивающее напряжение, ко-

торое, как показывает опыт эксплуатации редукторов, вызывает в местах перехода от впадины к профилю зуба появление трещин. Разрушение зуба, произошедшее по трещине, имеет усталостный характер. Усталостные зоны, как видно из рис. 5.3, расположены на глубине 0,1 – 0,15 мм от поверхности.

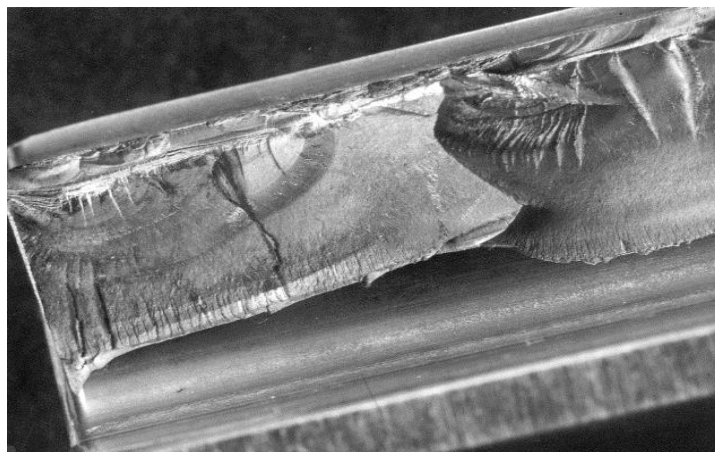


Рисунок 5.3 – Вид излома зуба с центром усталости

Из работ [2, 166, 240] известно, что в процессе шлифования зубчатых колес в зоне контакта круга с боковой поверхностью зуба возникают температуры порядка 1000 – 1200 °С, а скорость нагрева поверхности составляет 5000 – 6000 °С/с. Максимальная температура на поверхности сохраняется доли секунды, поскольку большая часть тепла уходит в нижерасположенные слои холодного металла. Однако, несмотря на кратковременность теплового воздействия, высокие температуры, развивающиеся при шлифовании, вызывают появление в поверхностном слое зубьев структурных изменений (прижогов). Форма прижогов зависит от схемы зубошлифования.

На рис. 5.4,а показана схема обработки зубчатого колеса на зубошлифовальном станке МААГ (5851). Два тарельчатых круга образуют трапецеидальный зуб прямобочной режущей рейки с углом при вершине  $30^\circ$ . Круги вращаются с окружной скоростью 30 м/с. Обрабатываемое зубчатое колесо поворачивается вокруг своей оси вправо – влево на определенный угол, а ось колеса осуществляет прямолинейное возвратно-поступательное движение вправо – влево. Сочетание этих движений обеспечивает обкатку боковой поверхности зуба по неподвижной рейке. Кроме указанных движений, обрабатываемое зубчатое колесо осуществляет прямолинейное возвратно-поступательное движение вдоль своей оси (продольная подача). Внешний вид прижогов, возникающих при данной схеме зубошлифования, показан на рис. 5.4,б.

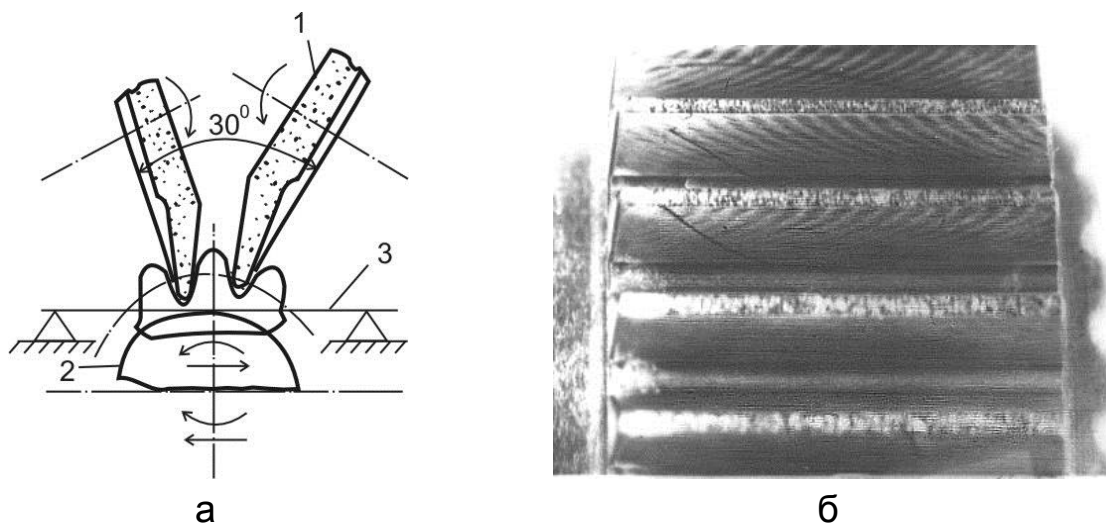


Рисунок 5.4 – Схема шлифования зубчатого колеса на станке МААГ (5851) с 15-градусной настройкой кругов (а); внешний вид прижогов (б): 1 – тарельчатый шлифовальный круг; 2 – обкатной барабан; 3 – ленты

На рис. 5.5,а показана схема обработки зубчатого колеса на зубошлифовальном станке МААГ (5851). Два тарельчатых шлифовальных круга расположены вертикально. Расстояние между кругами равно размеру общей нормали. Эти круги вращаются с окружной скоростью 30 м/с и образуют прямоугольный зуб прямобочной режущей рейки. На рис. 5.5,б показаны шлифовальные прижоги отпуска в виде мелких пятен на боковой поверхности зуба в шахматном порядке.

На рис. 5.5,в показан шлифовальный прижог закалки, расположенный во впадине зубчатого колеса.

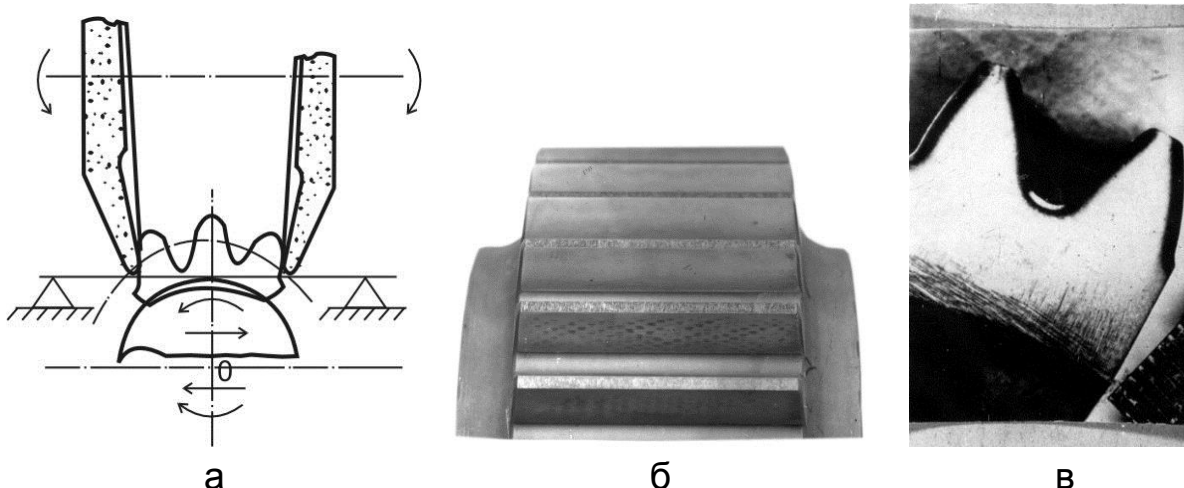


Рисунок 5.5 – Схема шлифования зубчатого колеса на станке МААГ (5851): с нулевой настройкой кругов (а); внешний вид прижогов (б, в)

Показанный на рис. 5.5, в прижог в виде белой полосы был обнаружен при травлении микрошлифа, расположенного на торце зубчатого колеса. В нижней части ножки зуба (на границе прижога закалки) концентрируются большие растягивающие напряжения, которые в процессе эксплуатации зубчатого колеса могут вызвать появление трещин.

На рис. 5.6 показаны трещины, расположенные на границах между впадиной и боковыми поверхностями зубьев. Эти трещины возникли в процессе эксплуатации зубчатого колеса.

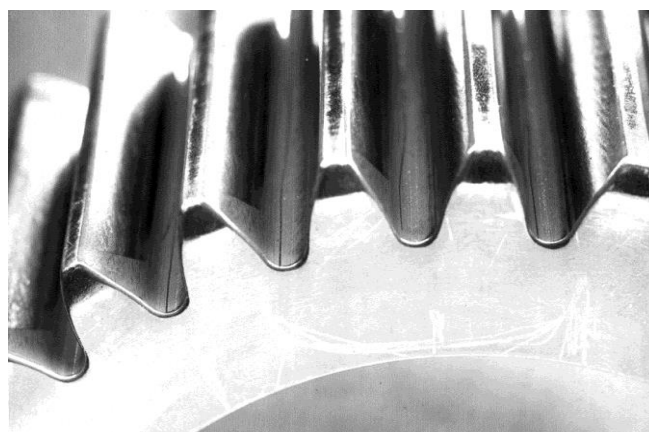


Рисунок 5.6 – Трещины, расположенные на границах между впадиной и боковыми поверхностями зубьев

На рис. 5.7, а показана схема обработки зубчатого колеса на зубошлифовальном станке НАИЛС (5831).

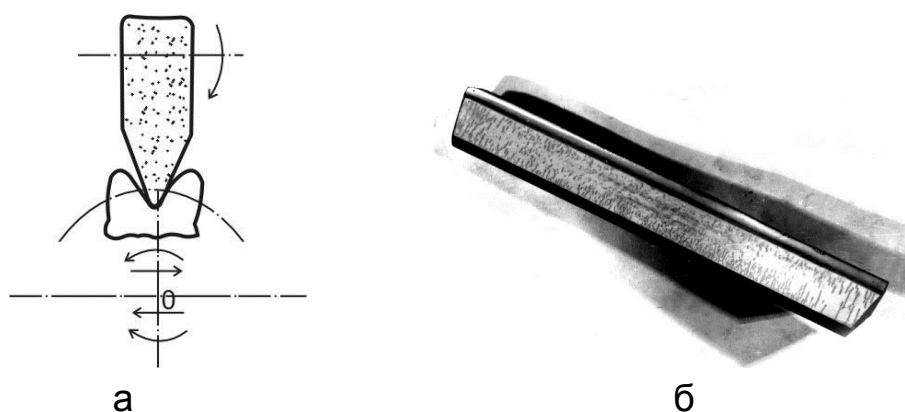


Рисунок 5.7 – Схема обработки зубчатого колеса на зубошлифовальном станке НАИЛС (5831) (а); шлифовальные трещины на зубе (б)

Осевое сечение шлифовального круга имеет форму зуба трапециевидальной прямобочной режущей рейки с углом при вершине  $40^\circ$ . Круг вращается с окружной скоростью 30 м/с и совершает быстрые прямолинейные возвратно-поступательные перемещения вдоль оси обрабатываемого зубчатого колеса. При повороте зубчатого колеса влево его ось совершает прямолинейное движение вправо, а при повороте колеса вправо – прямолинейное движение влево. Указанные движения обеспечивают обкат боковой поверхности зуба по рейке. На рис. 5.7,б показан зуб колеса, обработанный по описанной схеме.

На боковой поверхности зуба видны шлифовальные трещины, размеры которых по длине зуба разные: в средней части зуба трещины мелкие, а по краям – крупные. Это объясняется тем, что в центре зуба глубина проникновения температуры шлифования меньше, чем по краям. Разная теплонапряженность по длине зуба объясняется тем, что скорость перемещения круга вдоль длины зуба разная: на его краях она минимальная, а в центре – максимальная. Кроме того, повышение температуры на краях зуба можно объяснить тем, что торцы зуба являются адиабатическими стенками, которые препятствуют распространению тепла.

На рис. 5.8,а показана схема обработки зубчатого колеса на зубошлифовальном станке Гир-Грайдинг (5861). Обработка на этом станке осуществляется по методу копирования.

Осевое сечение шлифовального круга имеет форму впадины зубчатого колеса. Зубчатое колесо осуществляет прямолинейное поворотно-поступательное движение вдоль своей оси. После каждого поворотно-поступательного движения круга зубчатое колесо поворачива-

ется на угол, равный  $360^\circ/z$  (где  $z$  – число зубьев на колесе). После полного оборота зубчатого колеса производится радиальная подача шлифовального круга. Под действием высокой температуры происходит расширение поверхностного слоя металла, но этому расширению препятствуют глубинные, менее разогретые слои. Из-за неоднородной пластической деформации различных поверхностных слоев в них после охлаждения возникает остаточное напряжение растяжения. Возникновение в поверхностном слое растягивающих напряжений, превышающих предел прочности обрабатываемого материала, вызывает появление трещин.

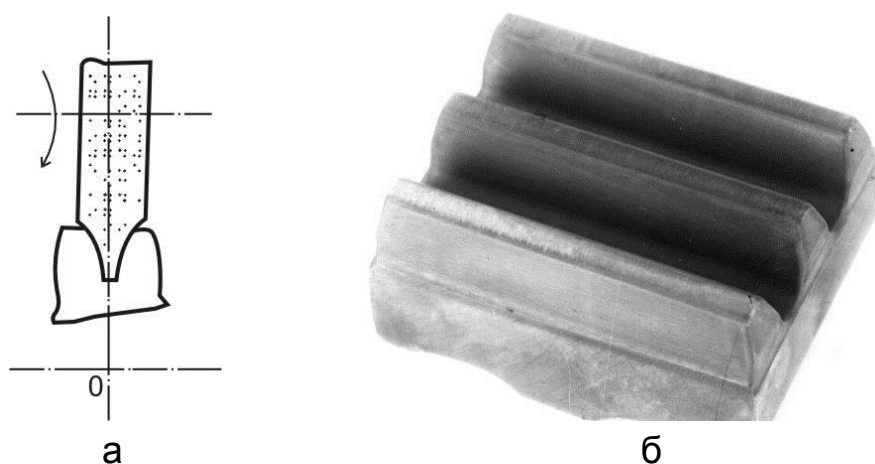


Рисунок 5.8 – Схема шлифования зубчатого колеса на станке 5861 (а), внешний вид прижога (б)

Из заводского опыта изготовления зубчатых колес известно, что наиболее теплонапряженной схемой зубошлифования является схема обработки зубчатого колеса червячным абразивным кругом на станке Рейсхауэр (5833), а менее теплонапряженной схемой – схема обработки тарельчатым абразивным кругом на станке МААГ (5851) с 15-градусной настройкой кругов. Из всех известных схем зубошлифования станки с червячным абразивным кругом имеют наибольшую производительность, а станки с тарельчатыми кругами – наименьшую. Станки МААГ (5851) обеспечивают наиболее точную обработку зубчатых колес (3 – 4 степени точности), а станки НАИЛС (5831) – 5 – 6 степени точности, а станок Гир-Гардинг (5861) обеспечивает 7 степень точности. Станки Рейсхауэр обеспечивают 4 – 5 степени точности. Высокая точность обработки на станках МААГ достигается за счет наличия в них механизма компенсации размерного износа кругов.



Из работ [166, 240 – 242] известно, что появление прижогов и трещин на боковых поверхностях зубьев связано в основном с неравномерностью припуска, снимаемого на разных зубьях колеса, обусловленного деформацией зубчатого венца при химико-термической обработке.

## **5.2. Анализ причин, вызывающих преждевременный выход из строя зубчатых колес в условиях эксплуатации**

В работах [80, 111] приводятся данные по видам разрушений и выходу из строя зубчатых колес, являющихся составными частями различных машин. Анализ этих данных показывает, что из всех видов разрушений преобладающим является выкрашивание (питтинг) на боковых поверхностях зубьев. Выход передач из строя вследствие излома зубьев наблюдается значительно реже.

По данным Минского автозавода [111], долговечность зубчатых колес значительно чаще лимитируется дефектами осповидного выкрашивания и износом, чем усталостными поломками зубьев колес. К подобным выводам пришли и работники Харьковского завода транспортного машиностроения [111].

Большая работа по исследованию дефектов зубчатых передач авиадвигателей проведена в Государственном научно-исследовательском институте гражданского воздушного флота (Гос. НИИ ГВФ) [80]. По данным их исследований, в зубчатых передачах типичным видом разрушений является выкрашивание, которое имеет вид отдельных раковин. Отмечено, что с увеличением срока службы интенсивность выкрашивания растет. Выкрашивание имеет усталостную природу и объясняется периодическим изменением контактного напряжения. По данным работы [80], в течение 1986 – 1990 гг. отремонтировано на Минском автомобильном заводе 1308 двигателей, в том числе 587 (40 %) зубчатых передач. Причем, 89 % от всех дефектов зубчатых передач составляет выкрашивание. Обобщая, можно отметить, что основным дефектом зубчатых передач, снижающим их долговечность, является выкрашивание боковых поверхностей зубьев.

Основной причиной интенсивного выкрашивания (питтинга) является наличие прижогов и микротрещин. На машиностроительных заводах высокооборотные тяжелонагруженные зубчатые колеса после

шлифования подвергаются 100-процентному контролю на предмет выявления прижогов. Однако, несмотря на тщательный контроль рабочих поверхностей зубьев, многие машины не вырабатывают свой ресурс из-за преждевременного появления на боковых поверхностях зубьев трещин или усталостного выкрашивания. Для установления причин, вызывающих преждевременное разрушение шестерен, при их изготовлении проводилась тщательная проверка зубьев на наличие на них прижогов, а также проводился анализ видов повреждений зубчатых колес редуктора в условиях эксплуатации [111].

В табл. 5.1 представлены статистические данные по дефектам зубчатых колес, обнаруженных после выработки ресурса.

Из анализа данных, приведенных в табл. 5.1, имеем:

1. Большое количество зубчатых колес выходит из строя вследствие выкрашивания, что свидетельствует о низкой контактной прочности поверхностного слоя зубчатых колес.

2. Появление трещин можно объяснить наличием прижогов, не обнаруженных при изготовлении.

Таблица 5.1 – Статистические данные по дефектам зубчатых колес

Период	Выкрашивание (питтинг)	Перекосы, задиры, вмятины	Трещины	Схваты-вание	Коррозия
Дефекты, обнаруженные после испытаний					
1986 – 1990	27	33	6	2	4
Дефекты зубчатых колес, обнаруженные после отработки ресурса					
1986	34	29	8	–	15
1987	27	48	–	7	10
1989	13	–	11	–	–
1990	–	8	5	13	7
Всего	74	80	24	20	22

После 150-часового периода работы на рабочей поверхности зубьев обнаружены трещины. Обзор излома, выполненного по трещине, показал усталостную природу разрушения. Очаги усталости, как видно из рис. 5.9, расположены на глубине 0,1 – 0,15 мм от поверхности. На рис. 5.10 показан внешний вид разрушенного зуба спирально-конической шестерни редуктора после 250-часового периода работы. Разрушение имеет вид усталостного выкрашивания.

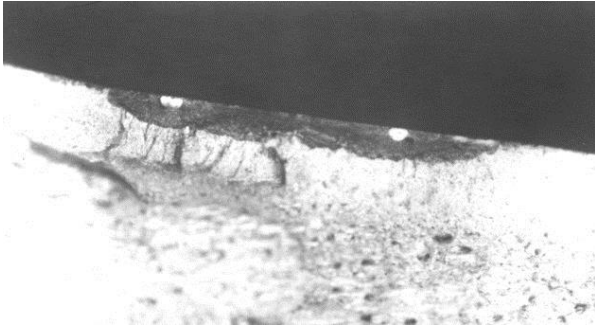


Рисунок 5.9 – Очаги усталости



Рисунок 5.10 – Внешний вид разрушенного зуба спирально-конической шестерни

Для установления причин разрушения было проведено комплексное исследование качества поверхностного слоя. Магнитной дефектоскопией были обнаружены трещины на боковых сторонах зубьев. Обзор участков выкрашивания показал, что выкрашивание является результатом образования усталостных трещин. Среды усталости расположены от поверхности на глубине 0,15 мм. После горячего травления в 50 %-м водном растворе соляной кислоты на профилях зубьев были обнаружены поперечные трещины, перпендикулярные направлению движения шлифовального круга. Измерение микротвердости на боковых поверхностях зуба показало, что в местах прижогов твердость снижается на 1200 – 1500 МПа по сравнению с начальной микротвердостью  $H_{50} = 7400$  МПа. Прижоги вторичной закалки обнаружены на рабочей стороне зубьев в виде светлых штрихов. Зубья с прижогами подвергались повторной закалке, после чего твердость рабочих профилей зубьев восстанавливалась до исходной твердости HRC 60 ... 62. Восстановление твердости до исходной твердости свидетельствовало о том, что занижение твердости не связано с концентрацией углерода в поверхностном слое. Прижоги возникали в результате высоких температур при шлифовании.

На рис. 5.11 показан излом зуба шестерни. При осмотре шестерни на боковых поверхностях зубьев обнаружены участки, осветленные в результате наклепа. Эти участки имеют усталостное выкрашивание. Внешний вид профиля зуба с выкрашиванием показан на рис. 5.12.

Анализ дефектов показывает, насколько сильно влияние прижогов на долговечность зубчатых колес. Приведенные данные подтверждают необходимость исследования и разработки новых более со-

вершенных методов обработки высокооборотных тяжело нагруженных зубчатых колес, предотвращающих появление шлифовальных дефектов и обеспечивающих стабилизацию режущей способности кругов и теплонапряженности процесса шлифования.

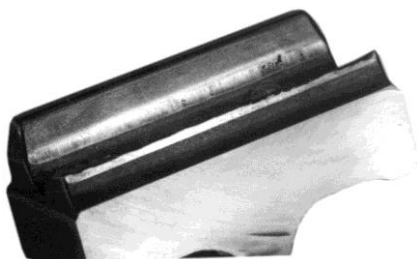


Рисунок 5.11 – Излом зуба шестерни



Рисунок 5.12 – Внешний вид выкрашивания поверхности зуба (стократное увеличение)

### **5.3. Анализ факторов, ограничивающих производительность шлифования зубчатых колес**

Зубчатые колеса силовых передач транспортного машиностроения в процессе изготовления проходят сложную химико-термическую обработку. От многократных высокотемпературных нагревов и последующих охлаждений в металле возникает термическое напряжение, которое деформирует зубчатый венец колеса. Погрешности изготовления колеса, появляющиеся при этом, как правило, устраняются на операции зубошлифования. Результаты исследований [2, 166, 192] свидетельствуют о решающем влиянии физико-механического состояния поверхностного слоя на эксплуатационные свойства зубчатых колес. Например, в работах [192, 241] указывается, что снижение твердости боковых поверхностей зубьев с HRC 60 ... 62 до HRC 50 ... 52 сокращает долговечность зубчатых колес в 6 – 8 раз, предел усталостной прочности снижается на 20 – 30 %. По этим причинам при изготовлении зубчатых колес высокооборотных авиационных редукторов прижоги не допустимы.

Статистический анализ зарегистрированного брака по шлифовальным прижогам на зубьях шестерен показывает [192], что его процентный уровень через 2 – 3 месяца повторяется. Например, на Пермском ПО "Моторостроитель" брак по прижогам при зубошлифовании в 1990 году составлял 20 – 30 %, периодически увеличиваясь и умень-

шаясь. Например, в 1989 году колебание процентного уровня брака составило 10 – 20 %, а в 1988 году – 5 – 10 % [22].

Чтобы ответить на вопрос: по какой причине периодически меняется процентное содержание брака на заводах, надо знать причины, способствующие появлению шлифовальных дефектов. К этим причинам следует отнести: уровень организации производства, состояние оборудования, характеристику абразивного инструмента и степень его засаливаемости, вид и качество смазочно-охлаждающих средств, физико-химические свойства и химический состав обрабатываемого материала, режимы химико-термической обработки, колебания припуска на боковых поверхностях зубов, обусловленные деформацией зубчатого венца, технологической наследственностью, режимами шлифования и правки шлифовальных кругов. В технической литературе имеются отдельные частные исследования, объясняющие влияние отдельных факторов на появление шлифовальных дефектов. Но данная разрозненная информация не позволяет решить проблему качества и увеличения производительности обработки зубчатых колес. Исследованию процесса прерывистого шлифования посвящены работы [29, 202, 211, 212, 243, 245].

Большое количество работ посвящено созданию конструкций прерывистых кругов. Например, фирма Super Cut Inc (США) получила патент на конструкцию прерывистого абразивного чашечного круга с винтовой поверхностью режущих выступов.

Alex Block получил патент США [164] на сборный прерывистый шлифовальный круг. Henry J Jeffers Lewiston получил патент США 51-293 В24d5 / 00 3290835 28.7.95 на сегментный шлифовальный круг для торцевого шлифования корпусных деталей.

Фирма Charles Pierre (Бельгия) получила патент 51-206 В24d5 / 1r3200314U 15.8.98 на отрезной прерывистый круг с алмазными сегментами.

Бельгийская компания De Jonckheere M, которая является одной из самых передовых в Европе по разработке специальных абразивных и алмазных кругов для обработки высокопрочных материалов, разработала новые конструкции алмазных прерывистых инструментов.

Harold C Miller [163] получили патент США на конструкцию прерывистого шлифовального круга с регулируемыми сегментами для шлифования плоских поверхностей.

Roy J Walters получили патент США на сегментный абразивный круг и способ его изготовления [264].

Дереза Л. К., Гульчинский Е. С., Коновалов А. К. разработали конструкцию прерывистого круга и провели исследования его режущей способности [260].

Якимов А. В., Сипайлов В. А., Бояршинов Ю. А. получили авторское свидетельство СССР 67С1 200461 на способ прерывистого шлифования [38].

Н. Gunter Lux [32] получил патент Австрии 67-В1 199532 на разработку конструкции шлифовального круга с прорезями на рабочей поверхности и способ его изготовления.

Японские ученые Енгельград Е. и Ханабиа И. разработали конструкцию шлифовального круга и провели сравнительные исследования по устойчивости и энергоемкости и получили патент 74К03 МКИ В24 23394 15.10.79.

Приведенный далеко не полный перечень патентов свидетельствует о том, что процесс шлифования кругами с прерывистой рабочей поверхностью привлекает внимание ученых разных стран.

Абразивная промышленность выпускает прерывистые абразивные круги на вулканитовой связке и производит абразивные секторы на бакелитовой связке для сегментных головок.

Абразивные круги на вулканитовой связке на операциях зубошлифования не применяются в связи с их эластичностью. Сегментные головки с абразивными секторами на бакелитовой связке применяются для шлифования спирально-конических зубчатых колес на станках 5А72.

Абразивная промышленность прерывистые круги на керамической связке не выпускает. Это связано с тем, что любой вырез на шлифовальном круге с керамической связкой при его обжиге является концентратором напряжения. Под влиянием больших растягивающих напряжений шлифовальный круг в процессе эксплуатации может разрушаться.

Прерывистые шлифовальные круги на керамической связке изготавливаются непосредственно на машиностроительных заводах, где они применяются. Впадины на прерывистых кругах прорезают алмазными кругами.

## 5.4. Тепловые процессы при зубошлифовании

Различные зубошлифовальные станки существенно отличаются своими технологическими возможностями (табл. 5.2).

Таблица 5.2 – Технологические возможности зубошлифовальных станков

Модель станка	Режущий инструмент	Размеры детали, мм			Число зубьев	Диаметр круга, мм
		Диаметр	Модуль	Наибольшая ширина		
5851 5853	Тарельчатый круг	35–320 150–800	2–10 2–12	220 290	10–120 12–210	225 275
5B830 5B832 5B836	Абразивный червяк	5–125 20–200 50–800	0,2–1,5 0,3–3 1,5–8	80 100 320	12–160 12–200 16–240	400 400 450
5831 5A841 5844	Конический круг	30–320 30–320 120–1250	1,5–6,0 1,5–8,0 3–16	100 150 320	12–200 10–200 16–350	240 350 500
5891 5893 5A893	Плоский круг	10–125 100–320 40–320	1–6 2–12 2–16	30 50 55	7–100 8–120 10–150	250 500 500
586 586A 5B861B	Фасонный круг	25–500 800 400–1000	1–19 12 3–12	200 250 320	10–300 10–300 16–250	350 400 500
МАОГ HSS–10 HSS–30BC 1HSS–75	T2 220 2T 220 T 220	150 300 750	6 10 10	100 230 120	– – –	– – –
НАИЛС RS3 RS5 RS12	K–240	300 500 1200	6 8 15	120 150 300	– – –	– – –
		K–300				
Рейсхауэр ZA N ZA O ZA	4270–350 4270–350 4270–350	240 240 300	4 5 5	170 170 170	– – –	– – –
Гир-Грейдинг 6632 GG–320	Пр 650 Пр 650	32 16	1800 600	600 600	– –	– –

Приведенный, далеко не полный, перечень типов зубошлифовальных станков показывает существенные различия их технологических возможностей.

На разных зубошлифовальных станках применяются круги, отличающиеся геометрической формой и размерами. Пятна контакта этих кругов с обрабатываемыми зубьями также отличаются как конфигурацией, так и размерами. Площадь пятна контакта  $S'$  оказывает влияние на интенсивность теплового потока  $q = N/S'$  ( $N$  – мощность, затрачиваемая на резание, Вт). От скорости перемещения теплового источника зависит время его воздействия  $\tau = 2h/V_d$  ( $2h$  – ширина теплового источника) на каждую точку обрабатываемой поверхности. С изменением указанных параметров изменяется температура в зоне контакта  $T \equiv q \cdot \sqrt{\tau}$ .

В известных работах, посвященных исследованию тепловых процессов при зубошлифовании [103, 169, 187 – 189, 194, 200, 245], зону контакта круга с деталью обычно принимают в виде бесконечной длинной полосы. По поверхности полубесконечного тела в положительном направлении оси  $Z$  движется полосовой источник тепла шириной  $2h$  со скоростью  $V$ . Математическая формулировка задачи сводится к решению уравнения теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + V \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \quad (5.1)$$

с начальными и граничными условиями

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0, |z|>h} + \alpha T|_{x=0, z>h} = 0; \quad - \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0, |z|<h} = q = \text{const}; \quad T|_{\tau=0} = 0. \quad (5.2)$$

Однако данный подход к выбору тепловой схемы при зубошлифовании не отражает реальной картины. Если учесть форму зубчатого венца и различие кинематических схем зубошлифовальных станков, то тепловые процессы можно свести к семи различным тепловым схемам (рис. 5.13). Для управления тепловой напряженностью процесса зубошлифования необходимо выбрать расчетную схему для участка профиля зуба, который имеет наибольшую тепловую напряженность. Действительно, при шлифовании зуба шестерни встречаются различные тепловые схемы. Например, шлифование впадины соответствует тепловой схеме обработки вогнутого профиля (рис. 5.13,а). Причем, эта схема соответствует шлифованию зубчатого венца на станках Гир-



Грайдинг (5860, 5861), работающих по методу копирования профильным кругом.

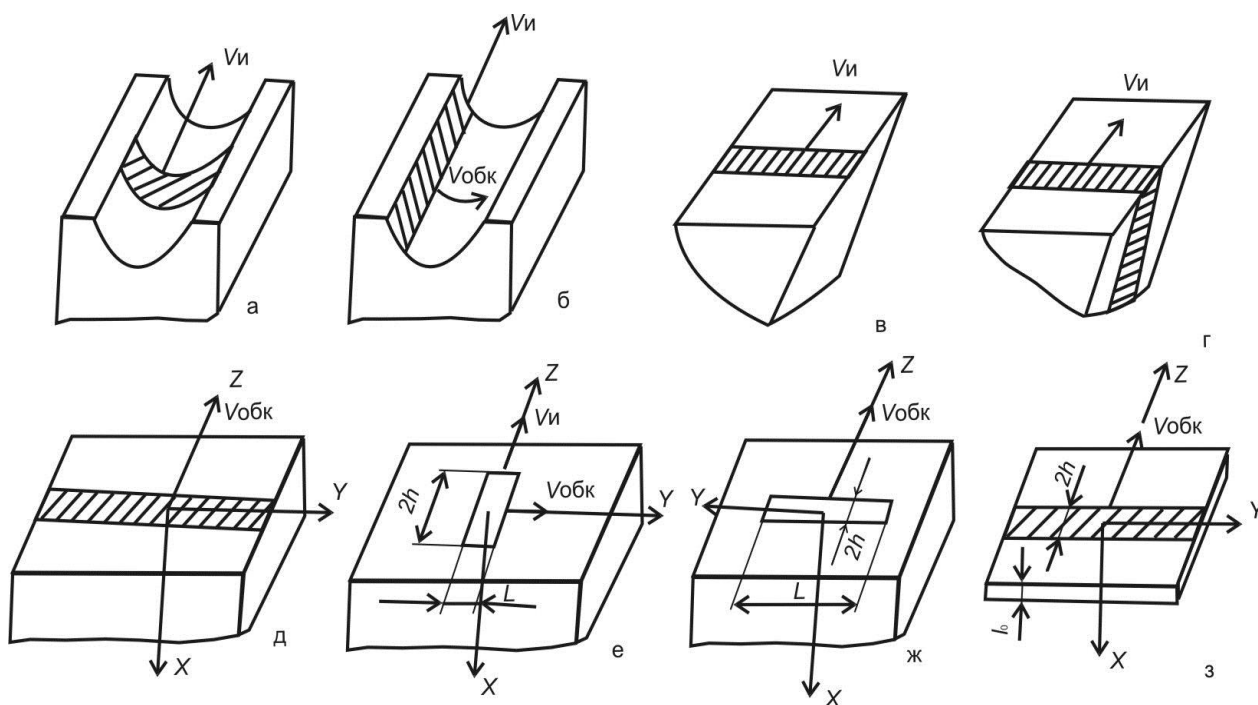


Рисунок 5.13 – Схема различных тепловых источников зубошлифовальных станков

Впадину зубчатых колес шлифуют не только на станках, работающих по методу копирования, но и на станках, работающих по методу обкатки, например, 5851, 5853, МААГ (рис. 5.13,б). Здесь форма впадины формируется закругленной кромкой тарельчатого круга при обкаточном движении. Следует отметить, что эта схема шлифования впадины является более теплонапряженной. Повышенная теплонапряженность связана с тем, что, во-первых, на станках МААГ процесс протекает без охлаждения, а, во-вторых, каждая точка профиля зуба подвергается многократному тепловому воздействию. Шлифованию вершины зубьев, например, шлиц Хирта, соответствует тепловая схема обработки клина (рис. 5.13,в). Влияние клиновидной формы шлиц Хирта на температурное поле представлено в работе [211]. Шлифованию зубчатых колес масляных насосов на станках с червячным кругом соответствует тепловая схема с зоной контакта, охватывающей клин (рис. 5.13,г).

Тяжелонагруженные зубчатые колеса обычно изготавливаются из цементируемых или азотируемых сталей. Такую тепловую схему мож-

но рассматривать как обработку детали с покрытием, которое отличается по своим физико-механическим свойствам от матрицы – основного металла. Температурное поле в цементированном слое существенно отличается от температурного поля однородной массивной детали.

Расчетная схема представлена на рис. 5.13,з. По поверхности пластины толщиной  $l_0$  с постоянной скоростью движется тепловой источник шириной  $2h$ . Плоскости  $X=0$  и  $X=l_0$  не пропускают тепла. Нужно найти стационарное температурное поле в системе координат, связанной с источником. Такая задача сводится к решению дифференциального уравнения (5.1) с краевыми условиями:

$$-\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = q = \text{const}; \quad T|_{t=0} = 0; \quad \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} + \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=l_0} = 0. \quad (5.3)$$

Решение этой задачи осуществлялось методом источников в совокупности с методом отражений [211]. Решение имеет вид:

$$\frac{\pi \lambda VT}{2qa} = \int_{z-H}^{z+H} \exp(-\xi) k_0 \left( \sqrt{X^2 + \xi^2} \right) \cdot \frac{\sum_{n=-\infty}^{n=\infty} k_0 \sqrt{(X-2Dn)^2 + \xi^2}}{k_0 (X^2 + \xi^2)} d\xi, \quad (5.4)$$

где  $X = \frac{Vx}{2a}$ ;  $D = \frac{V \cdot l_0}{2a}$ ;  $\xi = \frac{V}{2a}(z - z')$ .

Данное выражение описывает температурное поле в тонкостенной пластине, нижняя граница которой является адиабатической стенкой, препятствующей свободному прохождению тепла. Однако следует отметить, что полученное решение [211] не отражает реальную картину шлифования зубчатых колес с цементируемым или нитроцементируемым слоем. Дело в том, что цементируемый слой не является адиабатическим препятствием для свободного прохождения теплового потока в глубинные слои металла, но на грани, за счет имеющихся различий в теплопроводности материала, тепловой поток встречает сопротивление. Отсутствие решений указанных задач не позволяет управлять теплонапряженностью процесса зубошлифования. При шлифовании зубчатых колес на станках НАИЛС зона контакта вытянута в направлении скорости движения источника и имеет ограниченную длину (рис. 5.13,е). Тепловой источник совершает быстрое возвратно-поступательное движение с переменной скоростью в направлении оси  $Z_k$  и медленное обкаточное движение в направлении

оси  $Y$ . Скорость перемещения теплового источника изменяется по синусоидальному закону, имея в середине длины зуба максимальное значение и минимальное – на торцах.

Для оценки теплонапряженности процесса зубошлифования на станках НАИЛС необходимо оценить влияние ограниченности теплового источника на температурное поле. Необходимо определить, при каких условиях и с какой степенью точности зону контакта круга можно считать бесконечно длинной. Отсутствие в технической литературе данной информации не позволяет управлять теплонапряженностью процесса и качеством поверхностного слоя шлифованных зубчатых колес. Влияние ограниченности теплового источника на температурное поле рассмотрено в работах [157, 211].

На рис. 5.13,ж показана расчетная тепловая схема на станке МААГ с нулевой установкой кругов. Зона контакта представляет узкую полосу, вытянутую вдоль зуба, которая совершает возвратно-поступательное обкаточное движение в направлении оси  $Z_k$  и продольную подачу  $S$  (мм/кач.) в направлении оси  $Y$ .

На зубошлифовальном станке МААГ зона контакта круга с боковой поверхностью зуба имеет сложную форму. При обкаточном движении круга от головки зуба к ножке зоной контакта служит контур сечения тора с эвольвентной поверхностью, а при движении круга от ножки к головке зоной контакта служит контур сечения конической поверхности с эвольвентной поверхностью зуба.

В технической литературе отсутствуют аналитические зависимости для расчета площади контакта круга с боковой поверхностью зуба. Отсутствие такой информации не позволяет определять интенсивность теплового потока, и, как следствие, рассчитывать температуру в зоне шлифования.

При зубошлифовании на станках МААГ вектор скорости вращения шлифовального круга и вектор скорости перемещения детали расположены в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. В то же время при плоском и круглом шлифовании эти векторы находятся в одной плоскости. Вектор продольной подачи стола при зубошлифовании на станках МААГ совпадает с вектором скорости вращения круга. При плоском шлифовании вектор поперечной подачи находится в плоскости, перпендикулярной вектору скорости вращения круга.

Все известные в технической литературе теплофизические уравнения отражают условия плоского и круглого шлифования. Отличие кинематики движения исполнительных органов зубошлифовального станка МААГ не позволяет использовать известные теплофизические уравнения для расчета температуры при зубошлифовании. Кроме того, процесс зубошлифования на станках МААГ сопровождается многократным прерыванием процесса резания. За период прохождения зоны контакта вдоль направления зуба каждая точка боковой поверхности зуба подвергается многократному тепловому действию и охлаждению. Итак, теплофизические модели должны учитывать, не только нагрев поверхности за период прохождения зоны контакта над исследуемой точкой боковой поверхности зуба, но также учитывать охлаждение поверхности за период разрыва процесса резания.

Необходимо изучить закономерность изменения интенсивности теплового потока по длине зоны контакта.

Для описания тепловых процессов при зубошлифовании на станках МААГ необходимо на основе динамики нарастания температур установить аналитическую зависимость для расчета температур при прерывистом шлифовании с учетом накопления тепла в зоне контакта при многократном действии тепловых импульсов. На рис. 5.13,д представлена тепловая схема процесса шлифования зубчатого колеса на станках 5891, 5893 с плоской рабочей поверхностью круга. Плоский шлифовальный круг, охватывая всю ширину зубчатого колеса, получает медленное обкаточное движение. Станок обеспечивает высокую точность, но процесс сопровождается высокой теплонпряженностью. Здесь тепловой источник можно считать бесконечной длины. Это означает, что при рассмотрении распределения температуры в плоскости можно пренебречь ограниченностью длины источника.

Проведенный критический анализ работ показал, что для обеспечения и стабилизации качества поверхностного слоя при шлифовании зубчатых колес необходимо:

- 1) установить связь температуры с кинематикой движения теплового источника;
- 2) установить динамику изменения температуры при многопроходном и прерывистом шлифовании;
- 3) установить связь геометрических параметров прерывистого круга с температурой.

## **5.5. Технологические методы повышения качества изготовления высокоточных зубчатых колес**

Зубчатые колеса авиадвигателей относятся к наиболее сложным в технологическом отношении деталям. Сложная и ажурная конфигурация зубчатых колес, минимальные припуски существенно затрудняют процессы термической и механической обработки и требуют тщательного их исполнения.

Работоспособность зубчатых колес в значительной степени зависит от точности их изготовления и качества поверхностного слоя зубьев. Эксплуатационные свойства зубчатых колес зависят от воздействия на поверхностный слой зубьев комплекса технологических и металлургических факторов. К наиболее устойчивым факторам следует отнести металлургическое качество и расположение волокон (макроструктуру горячедеформированного металла). Оба эти фактора не претерпевают изменений в ходе технологического процесса и наследуются готовой деталью. Для того чтобы уменьшить их влияние на качество зубчатых колес авиационных двигателей, применяют легированные стали.

К наиболее ответственным и трудоемким операциям, на которых формируются точность и качество поверхностного слоя зубьев колес, следует отнести зубонарезание, зубошлифование и, особенно, химико-термическую обработку. Она предусматривает газовую цементацию в шахтных печах. Недостаток данной операции – значительные деформации и коробления. Они вызывают снижение показателей точности на 2 – 3 степени. Для восстановления требуемой точности применяют зубошлифование. Для повышения точности и качества изготовления зубчатых колес необходимо исключить влияние негативных факторов технологической наследственности.

Анализ отечественного и зарубежного опыта изготовления свидетельствует о широком применении комбинированных методов зубообработки закаленных зубчатых колес. Комбинированный метод включает: зубофрезерование, зубошевингование, химико-термическую обработку (цементацию и закалку), зубошлифование и зубохонингование.

Операцию зубошевингования применяют для устранения погрешностей операции зубофрезерования. Однако операция зубошевингования исправляет только погрешности геометрического эксцен-

триситета, а погрешности кинематического эксцентриситета остаются без изменений.

Концерн Gildemeister Германия [179] для изготовления зубчатых колес для автотракторной промышленности применяет технологический процесс, включающий: термическую обработку закалкой; глубинное шлифование профильным кругом на станке REISHAUER RZP; зубохонингование. Этот высокопроизводительный технологический процесс обеспечивает 5 – 6 степень точности по ГОСТ 16.4.3–72. Данная технология может быть использована только для изготовления зубчатых колес из закаленных сталей СТ 40, СТ 40Х и др.

Для высокоточных зубчатых колес авиационной промышленности, которые изготавливаются из цементированных 12Х2Н4АШ, 12ХН3АШ, 18ХН4АШ и азотированных 38ХМ10А сталей, данная технология не применяется.

Высокооборотные зубчатые колеса из цементированных сталей должны иметь сравнительно мягкую сердцевину и упрочненный износостойкий поверхностный слой боковых поверхностей зубьев. Такие физико-механические свойства материала можно обеспечить при изготовлении зубчатых колес по следующей технологии: нарезание зубчатого венца (зубофрезерование или глубинное шлифование), зубошвингование, химико-термическая обработка (газовая цементация с последующей закалкой) и зубошлифование. Однако данная технология имеет серьезные недостатки: из-за больших погрешностей геометрического и кинематического эксцентриситетов, а также погрешностей настройки зубошлифовальных станков возникает необходимость назначать на операцию зубошлифования припуск 0,25 ... 0,3 мм. Из-за сдвига по фазе погрешностей кинематического и геометрического эксцентриситетов возникает неравномерность припусков, снимаемых с боковых поверхностей зубьев.

Из заводского опыта изготовления зубчатых колес и исследований [241] известны случаи, когда неравномерность припуска по боковым поверхностям зубьев достигает 450 – 500 мкм. Например, при зубофрезеровании, которое обеспечивает равномерное распределение припуска по боковым поверхностям зубьев  $\Pi = 0,25$  мм, за счет возникающих погрешностей химико-термической обработки и погрешностей базирования при восстановлении базы с одного из профилей боковой

поверхности зуба удаляться припуск 450 мкм, а с другого профиля удаляться припуск всего лишь 50 мкм.

Неравномерность припусков, удаляемых на операции зубошлифования, увеличивает вероятность появления шлифовочных дефектов, увеличивает машинное время на операцию зубошлифования за счет увеличения числа проходов и создает на боковых поверхностях зубьев структуры с различным процентным содержанием углерода.

Установлено [166], что максимум контактной выносливости имеют зубчатые колеса из стали 12Х2Н4А с процентным содержанием углерода на поверхности 1,4 – 1,5 %. На глубине 0,5 – 0,6 мм от поверхности процентное содержание углерода снижается от 1,4 ÷ 1,5 до 0,90 ÷ 0,95 [22].

Следует отметить, что, несмотря на имеющуюся неравномерность снимаемого припуска, операция зубошлифования обеспечивает необходимую точность, но наследственное влияние неравномерно снимаемых припусков проявляет себя в условиях эксплуатации. За последние годы разработан ряд технологических процессов высокого уровня [178], исключая операцию зубофрезерования. К примеру: глубинное шлифование; ионная химико-термическая обработка, включающая процессы ионной цементации или нитроцементации; зубохонингование.

Для реализации указанной технологии фирма Reishauer изготовила станок для глубинного зубошлифования модели R1400TWIN. Станок позволяет осуществлять глубинное шлифование зубчатых колес  $m \leq 4$  мм. Шлифование производится профильными и червячными кругами из КНБ с керамической связкой диаметром 250 мм. Скорость резания 327 м/с. Станок экспонировался на международных выставках ЭМО-97 в Ганновере, Милане и в 1999 году – на международной выставке в Париже [178].

Данный технологический процесс исключает операцию зубофрезерования, обеспечивает 6–7 степень точности. Он получил широкое применение на заводах автомобильной промышленности. Для высокоточных зубчатых колес авиационных редукторов он не может быть использован.

Второй вариант технологического процесса высокого уровня, который исключает трудоемкую операцию зубошлифования, имеет следующую последовательность обработки высокоточных зубчатых колес:

- 1) Закалка до твердости HRC 59 ... 60;

2) скоростное высокоточное зубофрезерование, которое обеспечивает 4–5 степень точности;

3) зубохонингование.

Для реализации такого высокопроизводительного технологического процесса при сотрудничестве фирм Gleason-Pfauter, Mitsubishi, Lambert был разработан зубофрезерный станок WSC 130 WF, работающий со скоростью 500 м/мин при частоте вращения шпинделя 9000 об/мин. Полимербетонная станина с толщиной стенок 160 мм имеет замкнутую рамочную конструкцию, обеспечивающую ей высокую статическую и динамическую жесткость при достаточно высокой виброустойчивости. Шпиндель вращается в гидравлических опорах [178].

Данный технологический процесс реализуется для зубчатых колес, подвергающихся объемной закалке. Зубчатые колеса авиационных двигателей изготавливаются из цементованных сталей (12Х2Н4А, 18Х2Н4А, ДИ-4А, ЭИ-712, 12ХН3А и др.).

Данный технологический процесс обеспечивает для закаленной стали высокую степень точности, высокую производительность и необходимое качество поверхностного слоя. Однако применять его для цементованных сталей нельзя.

Проведенный анализ известных технологических процессов изготовления зубчатых колес показал, что для решения проблемы улучшения качества поверхностного слоя необходимо решить один из главных вопросов: равномерно распределить припуски по боковым поверхностям зубьев колеса при зубошлифовании.

Учитывая непредсказуемость протекающих процессов при формировании точности зубчатых колес в ходе технологического процесса их изготовления, была поставлена задача:

– провести всестороннее исследование причин, вызывающих появление неравномерности припусков, удаляемых на операции зубошлифования с учетом имеющихся погрешностей кинематического и геометрического эксцентриситетов и смещения их по фазе. Установить также влияние наладки зубошлифовальных станков на неравномерность распределения припуска по боковым поверхностям зубьев;

– на основании установленных закономерностей разработать способы наладки зубошлифовальных станков МААГ и НАИПС по выравниванию припуска по боковым поверхностям зубьев на операции зубошлифования.



## 5.6. Обоснование актуальности объекта исследования

Объектом исследования является процесс обработки цилиндрических колес  $m = 3 \dots 10$ , твердостью HRC 60 ... 62, 3–4 степени точности, из цементованных сталей 12Х2Н4А, 12Х3Н3А, 18Х2Н4А и др. К такому классу относятся тяжело нагруженные  $P=(4 \dots 5) \cdot 10^3 \text{ Н/см}^2$ , высокооборотные ( $V = 70 \text{ м/с}$  и более) зубчатые колеса авиационных редукторов.

Завершающей операцией обработки зубчатых колес, на которой формируется точность и качество поверхностного слоя боковых поверхностей зубьев, является зубошлифование на станках 5851, 5851М, 5853 МААГ, 5831, 5841 НАИЛС. От многократных нагревов при химико-термической обработке (цементации при 900 °С, закалке при 840 °С, отпуске при 180 – 200 °С, обработке холодом при 70 °С) зубчатые колеса деформируются. Перед операцией зубошлифования точность по отдельным параметрам достигает 11–12 степеней. Из зубчатого колеса 11–12 степени точности после операции зубошлифования следует получить зубчатое колесо 3–4 степени точности. Для компенсации погрешностей на операцию зубошлифования назначается припуск 0,3 – 0,4 мм на сторону. На моторостроительных авиационных заводах такой припуск удаляется за 5 – 8 проходов.

По такой технологии зубчатые колеса обрабатываются:

1) на Запорожском машиностроительном заводе "Мотор Сич" шлифование зубчатых колес производится на станках 5851, 5853 МААГ (4, 5 степени точности зубчатых колес);

2) на Пермском машиностроительном заводе (Россия) шлифование зубчатых колес производится на станках 5851, 5851М, 5853 МААГ, 5831 НАИЛС, Рейсхауэр, 5833 (4, 5, 6 степени точности зубчатых колес);

3) на Московском заводе "Салют" шлифование зубчатых колес производится на станках 5851, 5853 МААГ, 5831 НАИЛС (4, 5 степени точности);

4) на машиностроительном заводе им. Климова (г. Санкт-Петербург, Россия) шлифование зубчатых колес производится на станках 5851, 5853 МААГ, степень точности – 4;

5) на Калужском моторостроительном заводе шлифование зубчатых колес производится на станках 5851, МААГ, Рейсхауэр (4, 5 степени точности).

Приведенный далеко не полный перечень авиационных заводов показал, что для обработки зубчатых колес на операции зубошлифования применяются станки 5851, 5853 МААГ, обработка на которых имеет низкую производительность, сопровождается высокой теплонапряженностью. На боковых поверхностях зубьев после зубошлифования возникают шлифовочные дефекты (прижоги и трещины). Наличие указанных дефектов снижает долговечность зубчатых колес в 5 – 8 раз.

За последние годы ряд фирм, например, Gilder leister (Германия) и Mori Seiki (Япония) разработали зубошлифовальные станки и технологические процессы изготовления зубчатых колес 6–7 степени точности, исключая операцию зубошлифования.

Однако приведенные технологические процессы не обеспечивают необходимую точность и контактную прочность зубчатых колес авиационных редукторов. Итак, технология изготовления зубчатых колес 3–4 степени точности, включающая операцию зубошлифования на станках 5851, 5853 МААГ, на машиностроительных авиационных заводах является наиболее рациональной.

Следует также отметить, что наряду с созданием новых высокооборотных зубофрезерных станков число выпускаемых зубошлифовальных станков не уменьшается, а, наоборот, увеличивается.

На операции зубошлифования неравномерность снимаемого припуска с боковых поверхностей зубьев достигает 0,5 – 0,6 мм. В результате изменяется глубина цементованного слоя, изменяется процентное содержание углерода на поверхности, возникает неравномерная твердость, изменяются критические точки структурных превращений, увеличивается временное термоупругое напряжение, на поверхности появляются шлифовочные трещины после зубошлифования, а в процессе эксплуатации зубчатых колес – питтинг и преждевременное разрушение зубчатых колес. Для устранения указанных дефектов необходимо провести комплексное исследование по определению возможностей разработки новых методов повышения производительности обработки и улучшения качества поверхностного слоя при изготовлении высокоточных зубчатых колес.

Таким образом, проведенный анализ литературных источников показал, что наличие шлифовальных дефектов на боковых поверхностях зубьев колес снижает их долговечность в 5 – 8 раз, а контактную прочность – на 30 – 40 %. Доказано, что эксплуатационные свойства

поверхностных слоев зубчатых колес формируются в течение всего жизненного цикла их изготовления. Доказано влияние тепловых процессов на качество поверхностного слоя боковых поверхностей зубьев колес при шлифовании, установлены причины возникновения шлифовальных дефектов. Установлено, что процесс шлифования протекает в условиях взаимодействия шлифовального круга с обрабатываемым зубчатым колесом, которые непрерывно изменяются и создают нестабильность обработки во времени. Это вызывает отрицательные изменения теплового и силового воздействия на круг, потерю его режущей устойчивости, ухудшение качества поверхностного слоя.

Поэтому целью работы является разработка методологии обеспечения стабильности параметров качества поверхностей тяжело нагруженных высокооборотных зубчатых колес при шлифовании. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- устранить возможность появления на обрабатываемых поверхностях волнистости и прижогов;

- обеспечить условия самозатачивания абразивных прерывистых кругов за счет изменения условий взаимодействия инструмента и заготовки;

- выявить причину преимущественного появления шлифовальных дефектов в начале и в конце эвольвентного профиля зуба и разработать методы расчета температур и глубин распространения прижогов на разных участках этого профиля;

- разработать метод выравнивания неравномерно распределенных по зубьям превышений действительного припуска над припуском, заданным на операцию зубошлифования;

- разработать метод распределения припуска по проходам шлифования с позиции предотвращения появления прижогов на окончательно обработанной поверхности.

### **5.7. Аналитическое определение интенсивности теплового потока при зубошлифовании тарельчатыми кругами на станках, работающих по нулевой схеме**

Для расчета интенсивности теплового потока  $q$  необходимо знать площадь пятна контакта инструмента с деталью  $\Phi$  и тангенциальную составляющую силы резания  $P_z$ :

$$q = \frac{P_z \cdot V_{кр}}{\Phi} . \quad (5.5)$$

Рабочая поверхность тарельчатого круга состоит из торообразной и конической частей. При обкаточном движении инструмента в направлении впадины съём обрабатываемого материала осуществляется режущими зёрнами, расположенными на торообразной поверхности (на закругленной кромке круга), а при обкаточном движении – в обратном направлении работают зёрна, расположенные на коническом участке рабочей поверхности круга. На рис. 5.14 показана линия пересечения АСБЕ конического участка круга с цилиндром, имитирующим фрагмент боковой поверхности зуба, расположенный вблизи линии пересечения этой поверхности с делительным цилиндром обрабатываемого колеса. С учетом движения инструмента вдоль зуба граница пятна контакта приобретает вид криволинейного четырехугольника БКМЕ.

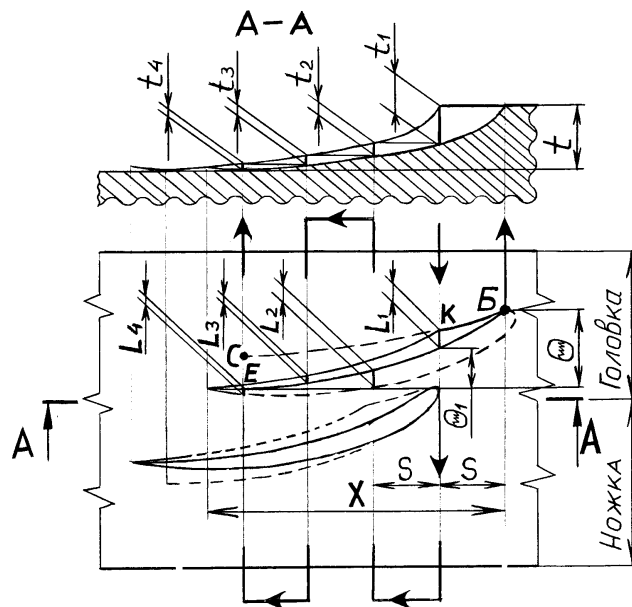


Рисунок 5.14 – Линия пересечения конической части тарельчатого круга с цилиндром, участок которого имитирует фрагмент боковой поверхности зуба в районе делительной окружности

На рис. 5.15 показаны пятна контакта зуба с коническим и торообразным участками тарельчатого круга. Расчеты площадей пятен контакта проводились по аналитическим зависимостям:

$$\theta = \sqrt{2 \cdot \rho \cdot t - t^2} ; \quad (5.6)$$

$$\rho = r_o \cdot \operatorname{tg} 20^\circ , \quad X = \sqrt{2 \cdot (R_{кр} - r) \cdot \theta - \theta^2} ; \quad (5.7)$$

$$\theta_i = \frac{2 \cdot (R_{kp} - r) - \sqrt{[2 \cdot (R_{kp} - r)]^2 - 4 \cdot (X - i \cdot S)^2}}{2}, \text{ для } 1 \leq i \leq n \quad (5.8)$$

$$\Delta_i = \sqrt{(\rho - t + r)^2 + \theta^2}, \quad 1 \leq i \leq n \quad (5.9)$$

$$t_1 = (\rho + r) - \Delta_1, \quad (5.10)$$

$$t_i = (\rho_{i-1} + r) - \Delta_i, \quad \text{для } 2 \leq i \leq n \quad (5.11)$$

$$\rho_k = \rho - \sum_{i=1}^k t_i, \quad \text{для } 1 \leq k \leq n \quad (5.12)$$

$$L_i = \sqrt{2 \cdot r \cdot t_i - t_i^2}, \quad \text{для } 1 \leq i \leq n \quad (5.13)$$

$$\Phi = \sum_{i=1}^n \frac{(L_i + L_{i-1}) \cdot S}{2}, \quad (5.14)$$

$$n = \frac{X - S}{S}. \quad (5.15)$$

где  $r$  – радиус закругления кромки круга  $r = 0,4 \cdot m$ ;  $m$  – модуль обрабатываемого колеса;  $R_{kp}$  – радиус круга;  $r_o$  – радиус основной окружности;  $\rho$  – радиус кривизны эвольвенты в точке пересечения с делительной окружностью;  $X$  – длина зоны контакта круга с зубом;  $t$  – глубина резания;  $t_i$  – глубины внедрения шлифовального круга в обрабатываемый материал в различных поперечных сечениях зоны контакта, удаленных друг от друга на расстояния, равные величине продольной подачи  $S$ ;  $L_i$  – ширины зоны контакта в разных поперечных сечениях;  $\Phi$  – площадь пятна контакта круга с зубом шестерни;  $n$  – число обкаточных движений, осуществляемых в пределах длины зоны контакта.

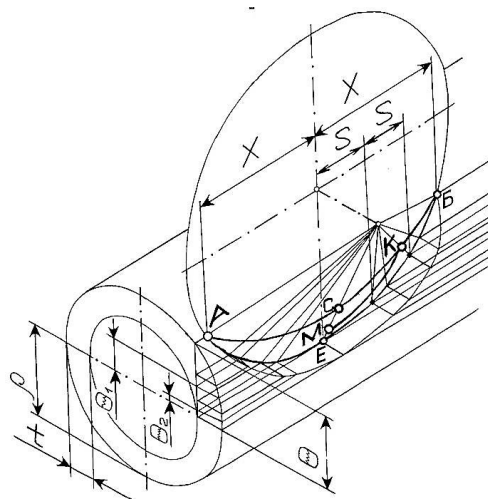


Рисунок 5.15 – Обкаточные движения, осуществляемые в пределах длины зоны контакта



Скорости  $V_{пл.1}$ ,  $V_{пл.2}$ ,  $V_{пл.3}$ ,  $V_{пл.4}$  внедрения нормальных составляющих элементарных слоев обрабатываемого материала в рабочую поверхность круга неодинаковы в пределах ширины зоны контакта и зависят от углов  $\psi_1$ ,  $\psi_2$ ,  $\psi_3$ ,  $\psi_4$ :

$$V_{пл.тек_i} = V_{обк.тек} \cdot \cos \psi_i = V_{обк.тек} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t_i}{r}}. \quad (5.17)$$

Подставляя зависимость (5.16) в (5.17) получено:

$$V_{пл.тек_i} = V_{обк} \cdot \frac{l_{тек}}{(R_{кр} - r)} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t_i}{r}}. \quad (5.18)$$

Различие углов  $\alpha_{тек}$  и  $\psi_i$  входа элементарных слоев в рабочую поверхность абразивного инструмента предопределяет различие условий съема материала. Распределение съема материала и загруженность режущих зерен на различных участках зоны контакта неодинаковы. Получена аналитическая зависимость для расчета тангенциальной составляющей  $P_z$  силы резания, возникающей от внедрения нормальной составляющей элементарного слоя материала в рабочую поверхность круга:

$$P_{z.теки} = \frac{0,44 \cdot A \cdot B}{2,25} \cdot \left[ \frac{\operatorname{tg} \gamma \cdot k'}{b} \right]^{0,25} \cdot \left( \frac{6,75 \cdot V_{обк} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t_i}{r}} \cdot \frac{l_{тек}}{(R_{кр} - r)}}{V_{кр}} \right)^{0,75} dl_{тек}, \quad (5.19)$$

где  $k'$  – поверхностная концентрация зерен на рабочей поверхности круга, шт./м<sup>2</sup>.

Тангенциальные составляющие  $P_{z.теки}$  сил резания отличаются между собой вследствие различных условий съема обрабатываемого материала на различных участках зоны контакта. Исходя из этого, получена аналитическая зависимость для расчета тангенциальной составляющей  $P_{z,i}$  силы резания, возникающей от одновременного внедрения в одну из полос круга всех нормальных составляющих элементарных слоев материала:

$$P_{z,i} = 0,469 \cdot A \cdot \left[ \frac{\operatorname{tg} \gamma \cdot k'}{b} \right]^{0,25} \cdot \left( \frac{V_{обк} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t_i}{r}}}{(R_{кр} - r) \cdot V_{кр}} \right)^{0,75} \cdot B \cdot \left[ (\bar{X} - 0,5 \cdot S)^{1,75} - [(\bar{X} - 0,5 \cdot S) - i \cdot S]^{1,75} \right], \quad (5.20)$$

где  $\gamma$  – половина угла при вершине зерна;  $b$  – максимальная высота выступания режущих зерен над уровнем связки круга,  $b = (1 - \varepsilon) \cdot \bar{X}$ ;  $\bar{X}$  – зернистость круга;  $(1 - \varepsilon)$  – коэффициент, учитывающий высоту выступания зерен над связкой;

$$k' = \frac{3 \cdot m' \cdot (1 - \varepsilon)}{200 \cdot \pi \cdot \bar{X}^2};$$

$m'$  – объемная концентрация зерен круга, %;  $m' = (60 - 2 \cdot N)$ ;  $N$  – номер структуры шлифовального круга;  $B$  – ширина полосы;

$$B = \frac{C_1}{n} = C_1 \cdot \frac{S}{(X - S)}; \quad C_1 = r \cdot \left( \frac{\pi}{2} - \psi_1 \right);$$

$$t_i = \frac{r}{2} \cdot \sin^2 \left[ \left( \frac{\pi}{2} - \psi_1 \right) \cdot \left( 1 - (i - 1) \cdot \frac{S}{(X - S)} \right) \right], \quad \text{где } 1 < i \leq n. \quad (5.21)$$

Угол  $\psi_1 = \arccos \sqrt{\frac{2 \cdot t_1}{r}}$ .  $t_1$  определяется из зависимости (5.10).

Зависимость (5.20) увязывает тангенциальную составляющую силы резания с параметрами режима шлифования (скоростью обкатки  $V_{обк}$ , скоростью круга  $V_{кр}$ , продольной подачей  $S$ ), характеристиками шлифовального круга (половиной угла при вершинах режущих зерен  $\gamma$ , поверхностной концентрацией зерен на рабочей поверхности круга  $k'$ , радиусом круга  $R_{кр}$ , радиусом закругления режущей кромки круга  $r$ ) и параметром  $A$ , характеризующим прочностные свойства обрабатываемого материала.

Тангенциальная составляющая  $P_z$  результирующей силы, возникающей от одновременного внедрения обрабатываемого материала во все полосы рабочей поверхности абразивного инструмента, равна сумме  $P_{z,i}$ :

$$P_z = \sum_{i=1}^n P_{z,i}. \quad (5.22)$$

Используя зависимости (5.14) и (5.22), произведены расчеты интенсивностей тепловых потоков  $q = \frac{P_z \cdot V_{кр}}{\Phi}$ , формируемых при шлифовании разных зубчатых колес на разных режимах шлифования. Результаты расчетов представлены на рис. 5.17 [262, 269].



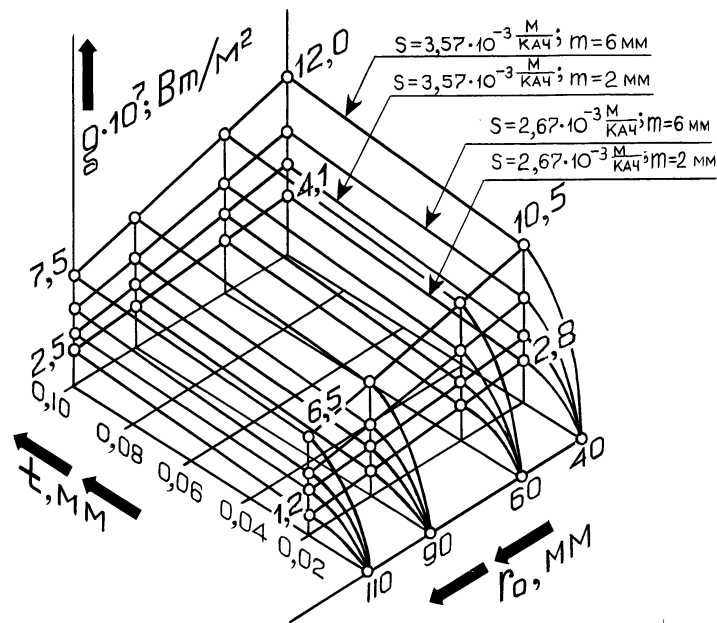


Рисунок 5.17 – Зависимости интенсивности теплового потока  $q$  от глубины резания  $t$ , рассчитанные для различных значений продольной подачи  $S$ , радиусов основной окружности  $r_0$  и модулей  $m$  обрабатываемого колеса

Из представленных данных видно, что из режимных параметров наибольшее влияние на интенсивность теплового потока  $q$  оказывает продольная подача  $S$ . А это значит, что при разработке систем автоматического и адаптивного управления шлифованием на станках, работающих с использованием тарельчатых кругов, в качестве параметра, управляющего теплонапряженностью процесса, необходимо назначать продольную подачу.

## 5.8. Теоретическое обоснование возможности обеспечения качества поверхностного слоя зубьев шестерен за счет применения прерывистых шлифовальных кругов

Принимая одномерную теплофизическую схему и применяя принцип суперпозиции, разработана математическая модель для определения температур, формируемых при зубошлифовании прерывистыми тарельчатыми кругами, рабочая поверхность которых состоит из выступов и впадин определенной протяженности, на станках, работающих по нулевой схеме [191, 268]:

$$T_k = \frac{2 \cdot \psi}{\sqrt{c \cdot \rho_M \cdot \lambda}} \cdot \sum_{i=1}^k q_i \left[ \sqrt{(k-i+1) \cdot \frac{l'_1}{V_{кр}} + (k-i) \cdot \frac{l'_2}{V_{кр}}} \times \right. \\ \times \operatorname{ierfc} \left( \frac{t - \sum_{i=1}^k t'_i}{2 \cdot \sqrt{a} \sqrt{(k-i+1) \cdot \frac{l'_1}{V_{кр}} + (k-i) \cdot \frac{l'_2}{V_{кр}}}} \right) - \\ \left. - \sqrt{(k-i) \cdot \frac{(l'_1 + l'_2)}{V_{кр}}} \cdot \operatorname{ierfc} \left( \frac{t - \sum_{i=1}^k t'_i}{2 \cdot \sqrt{a} \sqrt{(k-i) \cdot \frac{(l'_1 + l'_2)}{V_{кр}}}} \right) \right], \quad (5.23)$$

где  $\psi$  – коэффициент, показывающий, какая часть работы переходит в теплоту,  $\psi = 0,8$ ;  $\rho_M$ ,  $c$ ,  $\lambda$  – плотность ( $\text{кг/м}^3$ ), теплоемкость ( $\text{Дж/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})}$ ) и теплопроводность ( $\text{Дж/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot ^\circ\text{C})}$ ) обрабатываемого материала соответственно (рис. 5.18);  $k$  – число режущих выступов, принимающих участие в перерезании адиабатического стержня:

$$k = \frac{\sqrt{2 \cdot r \cdot t_1}}{V_{обк}} \cdot \frac{V_{кр}}{(l'_1 + l'_2)}; \quad (5.24)$$

$q_i$  – интенсивности тепловых потоков, формируемых при срезах металла отдельными режущими выступами прерывистого круга:

$$q_i = \frac{P_{z,i} \cdot V_{кр}}{\Phi_i}; \quad (5.25)$$

$$P_{z,i} = 0,469 \cdot A \cdot \left[ \frac{\operatorname{tg} \gamma \cdot k'}{b} \right]^{0,25} \cdot \left( \frac{6,75 \cdot V_{обк} \cdot \sqrt{2 \cdot t_i}}{(R_{кр} - r) \cdot V_{кр}} \right)^{0,75} \times \\ \times B_i \cdot \left( \frac{(X - S)(2 \cdot i - 1)}{2 \cdot k} \right)^{1,75}; \quad (5.26)$$

$B_i$  – ширины участков рабочей поверхности круга:

$$B_i = \sqrt{t_i'^2 + \left[ \frac{(l'_1 + l'_2)}{V_{кр}} \cdot \frac{V_{обк}}{(\rho - t_1)} \cdot \left( \rho - \sum_{j=1}^i t'_j \right) \right]^2}, \quad \text{где } 1 \leq i \leq k, \quad (5.27)$$

$$t_i = t_1 - \sum_{j=1}^{i-1} t'_j, \quad \text{где } 2 \leq i \leq k,$$

$$t'_1 = \sqrt{r^2 - \left\{ \left(1 - \frac{i}{k}\right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t_1}{r}} \cdot [r + (\rho - t_1)] \right\}^2} - (r - t_1), \quad (5.28)$$

$$t'_i = \sqrt{r^2 - \left\{ \left(1 - \frac{i}{k}\right) \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t_1}{r}} \cdot [r + (\rho - t_1)] \right\}^2} - (r - t_1) - \sum_{j=1}^{i-1} t'_j, \quad \text{где } 2 \leq i \leq k, \quad (5.29)$$

$$\Phi_i = \frac{(X - S) \cdot B_i \cdot (2 \cdot i - 1)}{2 \cdot k}, \quad \text{где } 1 \leq i \leq k. \quad (5.30)$$

Моделирование характера нарастания температуры в фиксированной точке профиля зуба осуществлялось по схеме (рис. 5.18), в которой количество разбиенок зоны контакта на отдельные полосовые участки равно числу режущих выступов, принявших участие в перерезании стержня, расположенного по нормали к обрабатываемой поверхности.

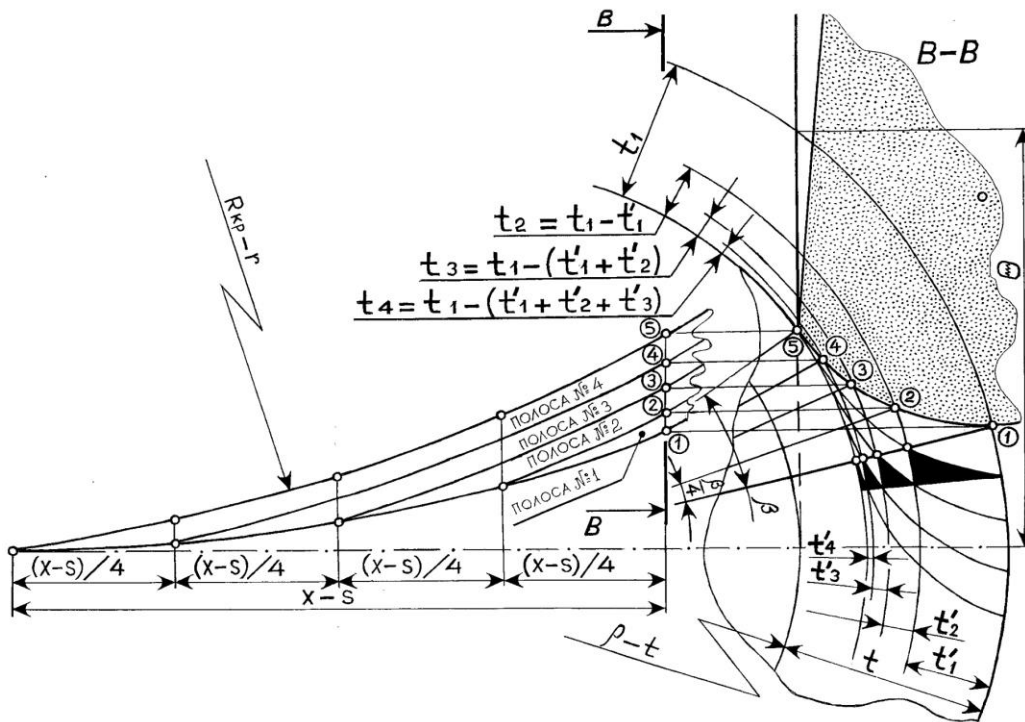


Рисунок 5.18 – Перерезание адиабатического стержня отдельными выступами прерывистого круга

В структуре зависимости (5.23) заложено суммирование приростов температур  $\Delta T_i$ , формируемых в точке, расположенной на глубине резания  $t$ , при действии на эту точку тепловых потоков разных интенсивностей  $q_i$ .

Используя зависимости (5.23) – (5.30), произведены расчеты температур, формируемых при зубошлифовании прерывистыми тарельчатыми кругами с разным числом  $n$  режущих выступов и разными соотношениями длин впадин и выступов  $K_{пр} = l_2/l_1$ . Результаты расчетов приведены на рис. 5.19 [250, 251].

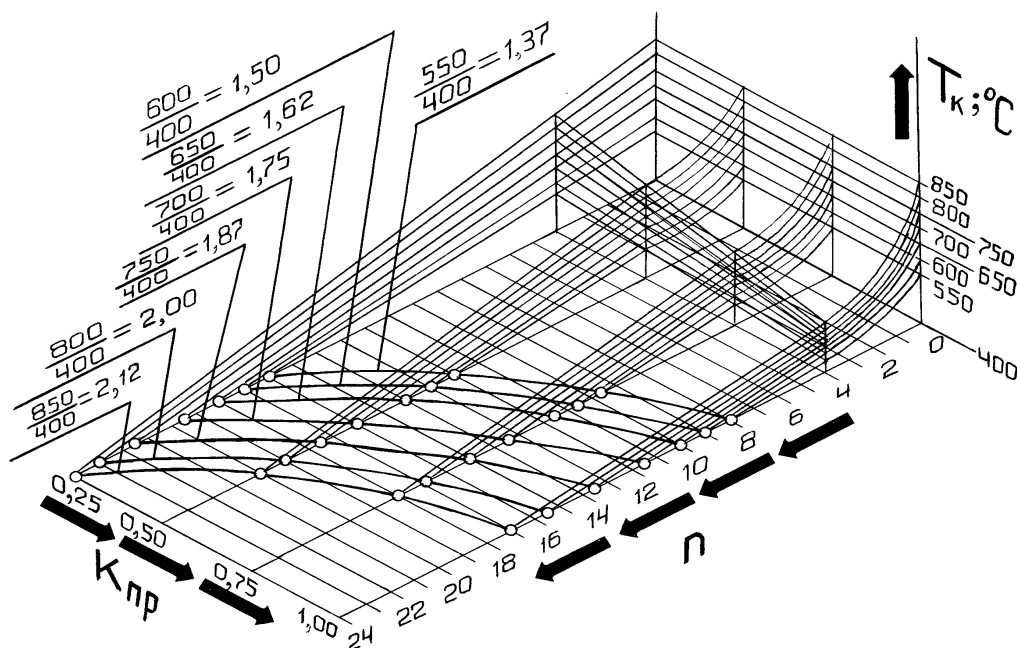


Рисунок 5.19 – Зависимости температуры прерывистого шлифования  $T_k$  от числа режущих выступов на круге для разных значений  $K_{пр} = l_2/l_1$  при исходных температурах (температурах сплошного шлифования)  $T_{спл.} = 850\text{ °C}; 800\text{ °C}; 750\text{ °C}; 700\text{ °C}; 650\text{ °C}; 600\text{ °C}; 550\text{ °C}$

На рис. 5.19 показаны температуры  $T_k = 850\text{ °C}, 800\text{ °C}, 750\text{ °C}, 700\text{ °C}, 650\text{ °C}, 600\text{ °C}, 550\text{ °C}$ , сформированные при шлифовании абразивным инструментом с непрерывной рабочей поверхностью на разных режимах, и снижение этих температур до уровня  $T_k = 400\text{ °C}$  за счёт применения прерывистых шлифовальных кругов. На рис. 5.19 в плоскости  $(K_{пр}; n)$  показано семейство кривых, представляющих собой геометрические множества точек, каждая из которых является такой совокупностью коэффициента прерывистости  $K_{пр}$  и числа режущих выступов на круге, при которой температура прерывистого шлифования равна  $400\text{ °C}$ . Из рис. 5.19 видно, что понизить температуру прерывистого шлифования можно увеличением числа впадин на абразив-

ном инструменте и увеличением величины отношения их длин к длинам режущих выступов. Процесс прерывистого шлифования всегда сопровождается колебаниями.

Представляют опасность колебания с возрастающими амплитудами. Такие колебания приводят к появлению на обрабатываемых поверхностях циклических прижогов и волнистости, а также сопровождаются повышенным износом абразивного инструмента.

В работе установлена аналитическая зависимость, позволяющая рассчитывать амплитуды вынужденных колебаний, возникающие при прерывистом шлифровании:

$$Y_1 = \frac{Y_{cm} \cdot l_1 \cdot k''}{2 \cdot V_{кр} \cdot C \cdot \left| \sin\left(\pi \cdot \frac{k}{\omega}\right) \right|} = \frac{Y_{cm} \cdot l_1 \cdot k''}{V_{кр} \cdot C} \cdot \beta, \quad (5.31)$$

где  $Y_{cm} = \frac{F_{y.o}}{C}$  – величина упругого перемещения сплошного круга под

воздействием силы  $F_{y.o}$ ;  $C$  – статическая жесткость;  $\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot V_{кр}}{(l_1 + l_2)}$  – ча-

стота вынужденных колебаний;  $k''$  – собственная частота колебаний;

$$\beta = \frac{1}{2 \cdot \left| \sin\left(\frac{\pi \cdot k''}{\omega}\right) \right|}.$$

Расчеты, выполненные по зависимости (5.31), показали, что с увеличением количества режущих выступов  $n$  на прерывистом круге при неизменной величине отношения ширины прорези к протяженности выступа, амплитуда вынужденных колебаний уменьшается (рис. 5.20, рис. 5.21). С физической точки зрения снижение амплитуды колебаний означает, что прерывистый круг не успевает упруго переместиться под действием импульса силы  $S = F_{y.o} \cdot \tau_1$  (где  $\tau_1 = l_1' / V_{кр}$ ) на величину, равную упругому перемещению, возникающему при статическом приложении составляющей  $F_{y.o}$  силы резания. Следовательно, при прерывистом шлифровании шпиндель будет изгибаться на меньшую величину, а фактическая глубина резания  $t_{ф.прер.}$  будет больше, чем при шлифровании сплошным кругом. С увеличением истинного съема возрастает толщина среза, приходящаяся на отдельные зерна, что благоприятно сказывается на самоформлении режущего рельефа абразивного инструмента.



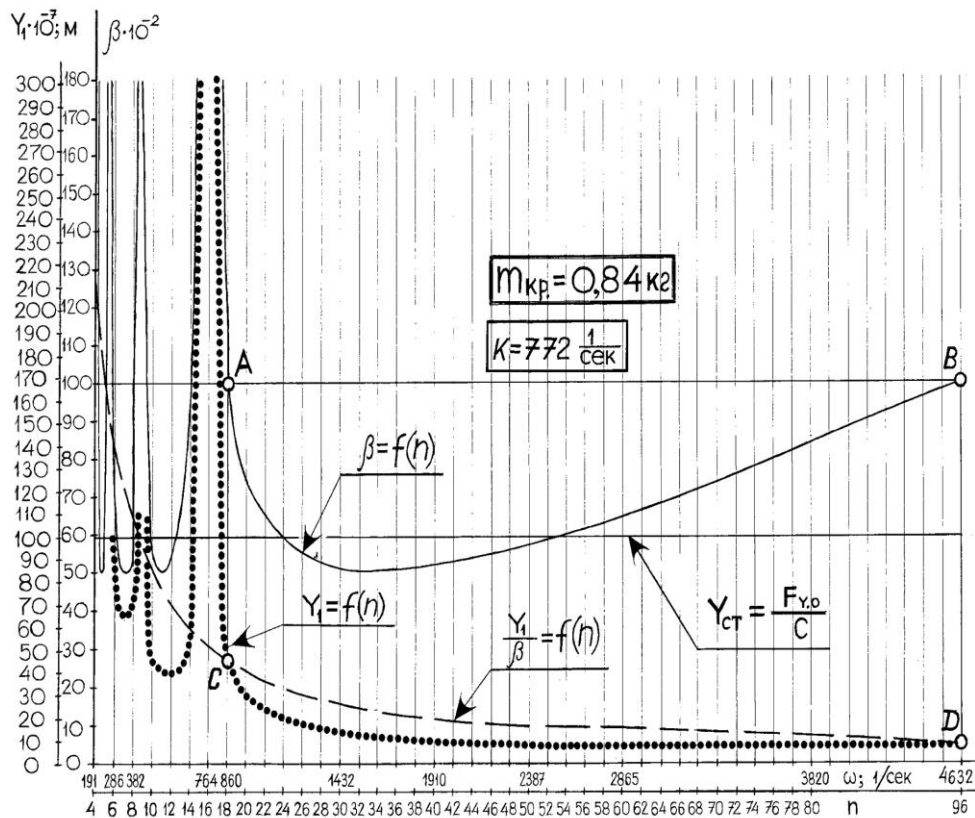


Рисунок 5.21 – Зависимость амплитуды вынужденных колебаний  $Y_1$  и коэффициента  $\beta$  от количества режущих выступов круга при  $k'' = 772 \text{ 1/с}$

Во время контакта  $\tau_1$  режущего выступа с обрабатываемой деталью жесткость упругой системы равна  $C_0 + C_0 \cdot \left( \frac{t_{\text{л}}}{t_{\text{ф}}} - 1 \right) / 2$ , а во время разрыва процесса резания  $C_0 - C_0 \cdot \left( \frac{t_{\text{л}}}{t_{\text{ф}}} - 1 \right) / 2$  (где  $t_{\text{л}}$ ,  $t_{\text{ф}}$  – глубина резания, установленная по лимбу, и фактическая глубина резания) (рис. 5.22).

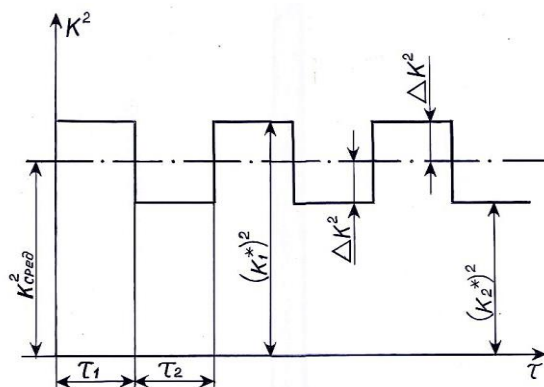


Рисунок 5.22 – Изменение коэффициента  $k^2$  при прерывистом шлифовании

Дифференциальное уравнение движения одномассовой системы по оси координат  $x$ , направленной перпендикулярно обрабатываемой поверхности, имеет вид:

$$\ddot{x} + 2 \cdot h \cdot \dot{x} + k_{\text{сред}}^2 \cdot (1 \pm \mu) \cdot x = 0, \quad (5.32)$$

где  $\mu = \frac{\Delta k^2}{k_{\text{сред}}^2}$ ;  $\Delta k^2 = \frac{k_o}{2 \cdot m} = \frac{C_o \cdot \left( \frac{t_{\text{л}}}{t_{\text{ф}}} - 1 \right)}{2 \cdot m}$ ;  $k_o$ ,  $C_o$  – динамическая и статическая жесткости упругой системы соответственно;

$k_{\text{сред}} = \sqrt{\frac{C_o}{m}}$  – среднее значение собственной частоты, 1/с;  $h$  – величина, характеризующая затухание колебаний во времени, 1/с.

Решения дифференциальных уравнений (5.32) с постоянными коэффициентами принимают вид:

$$x_1 = C_1 \cdot e^{-h \cdot \tau} \cdot \text{sink}_1 \cdot \tau + D_1 \cdot e^{-h \cdot \tau} \cdot \text{cosk}_1 \cdot \tau; \quad (5.33)$$

$$x_2 = C_2 \cdot e^{-h \cdot \tau} \cdot \text{sink}_2 \cdot \tau + D_2 \cdot e^{-h \cdot \tau} \cdot \text{cosk}_2 \cdot \tau;$$

где  $k_1 = \sqrt{\frac{C_o}{m} + \frac{C_o \cdot \left( \frac{t_{\text{л}}}{t_{\text{ф}}} - 1 \right)}{2 \cdot m} - h^2}$ ;  $k_2 = \sqrt{\frac{C_o}{m} - \frac{C_o \cdot \left( \frac{t_{\text{л}}}{t_{\text{ф}}} - 1 \right)}{2 \cdot m} - h^2}$ .

Получено условие неустойчивой работы упругой системы [35, 113]:

$$|L| > \frac{1+M}{2}. \quad (5.34)$$

где  $L = \frac{e^{-h(\tau_1 + \tau_2)}}{h(k_2 + h \sin 2k_2 \tau_1)} \left[ k_1^2 \text{sink}_1 \tau_1 \text{sink}_2 \tau_2 - \right.$   
 $\left. - 2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot \text{cosk}_2 \tau_1 \cdot \text{cosk}_1 \tau_1 \cdot \text{cosk}_2 (\tau_1 + \tau_2) - \right.$   
 $\left. - k_2^2 \text{sink}_1 \tau_1 \sin(2 \cdot k_2 \tau_1 + k_2 \tau_2) \right]; \quad (5.35)$

$$M = \frac{k_1 k_2 e^{-2h(\tau_1 + \tau_2)} \cos(2 \cdot k_2 (\tau_1 + \tau_2))}{h(k_2 + h \sin 2k_2 \tau_1)}, \quad (5.36)$$

где  $\tau_1 = \frac{l_1}{V_{\text{кр}}}$ ;  $\tau_2 = \frac{l_2}{V_{\text{кр}}}$ ;  $l_1 = \frac{\pi \cdot D_{\text{кр}}}{n \cdot (1+N)}$ ;  $l_2 = \frac{\pi \cdot D_{\text{кр}}}{n \cdot \left( 1 + \frac{1}{N} \right)}$ ;  $N = \frac{l_2}{l_1}$ ;  $n$  – число

впадин на шлифовальном круге.



С использованием пакета прикладных программ "MAPLE-9.5" были произведены расчеты по проверке соблюдения условия (5.34) для разных условий шлифования. Результаты расчетов представлены в виде графических зависимостей левой и правой частей условия (5.34) от  $n$  и  $N$  (рис. 5.23).

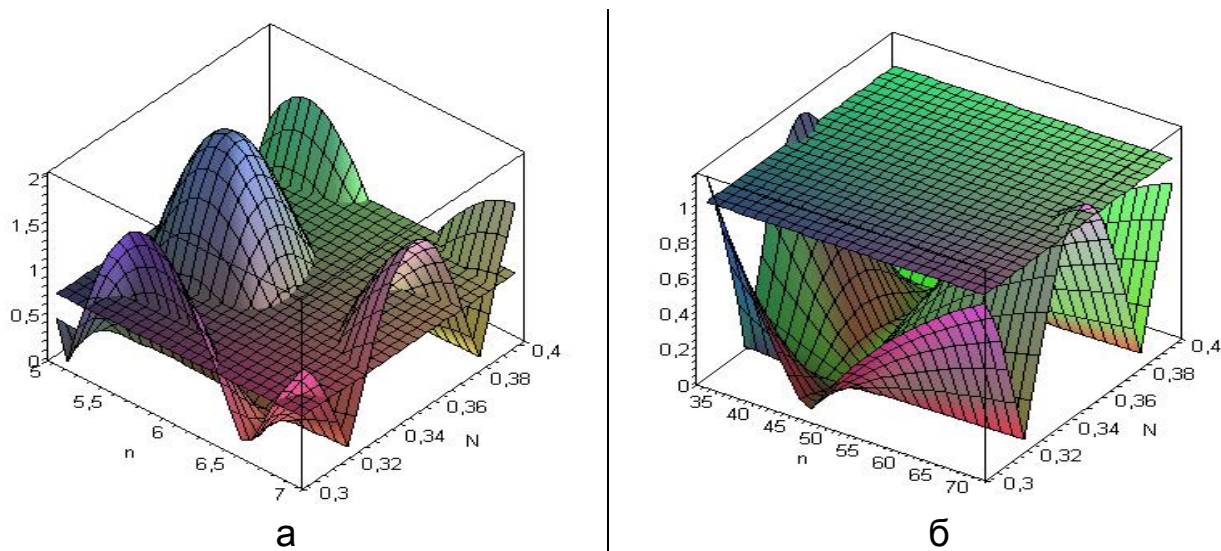


Рисунок 5.23 – Примеры зависимостей  $L$  (нижняя поверхность)

$$\text{и } \frac{M+1}{2} \text{ (верхняя поверхность) от } n \text{ и } N$$

На рис. 5.23,а показаны поверхности, описывающие зависимости левой и правой частей неравенства (5.34) от геометрических параметров прерывистых кругов, которые пересекаются, а на рис. 5.23,б – соответственно поверхности, которые не пересекаются. Области, соответствующие местам взаимного пересечения этих поверхностей, являются областями неустойчивой работы упругой системы станка.

На рис. 5.24 заштрихованные области представляют собой множества значений геометрических параметров прерывистых кругов, при шлифовании которыми в упругой системе станка не будет возникать параметрический резонанс. Расчеты, проведенные по зависимостям (5.35) и (5.36), позволили выявить такие совокупности чисел режущих выступов  $n$ , отношений длин впадин к длинам выступов  $N = \frac{l_2}{l_1}$  и жесткостей резания  $k_0$ , при которых сохраняется параметрическая устойчивость упругой системы станка (рис. 5.25).

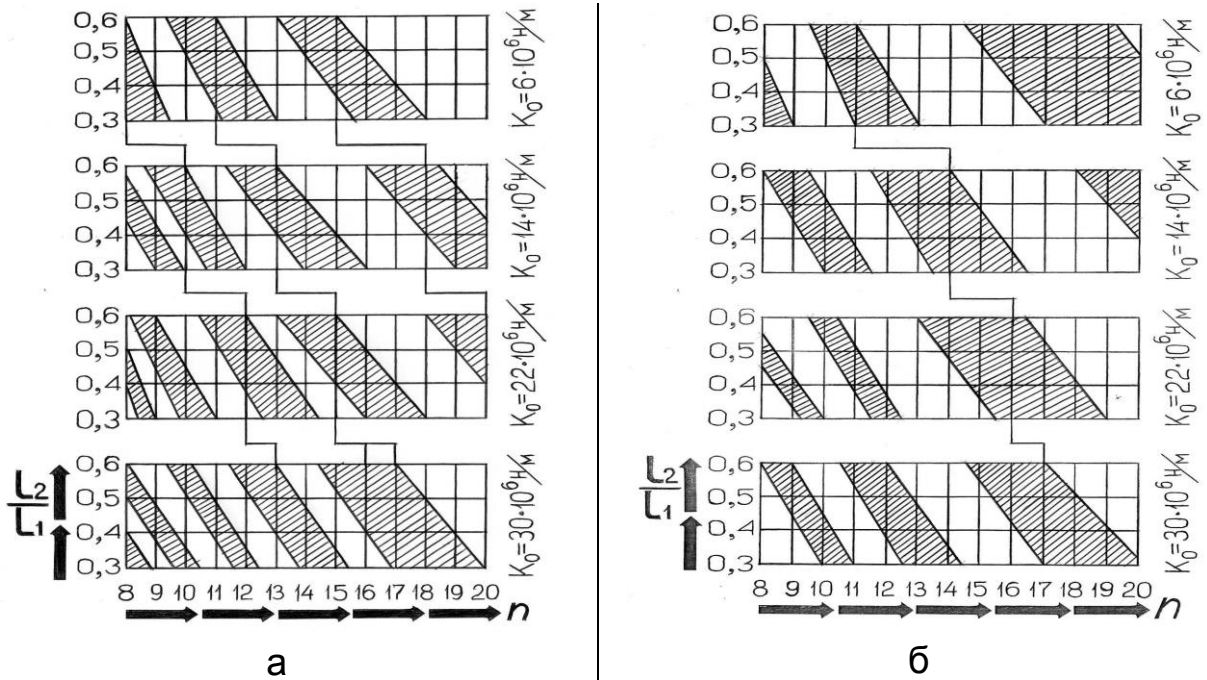


Рисунок 5.24 – Множество сочетаний числа режущих выступов  $n$ , их длин  $l_1$  и расстояний между ними  $l_2$ , обеспечивающих устойчивую работу упругой системы станка при  $C = 10,8 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$ ,  $V_{кр} = 25 \text{ м/с}$  (а),  $V_{кр} = 35 \text{ м/с}$  (б)

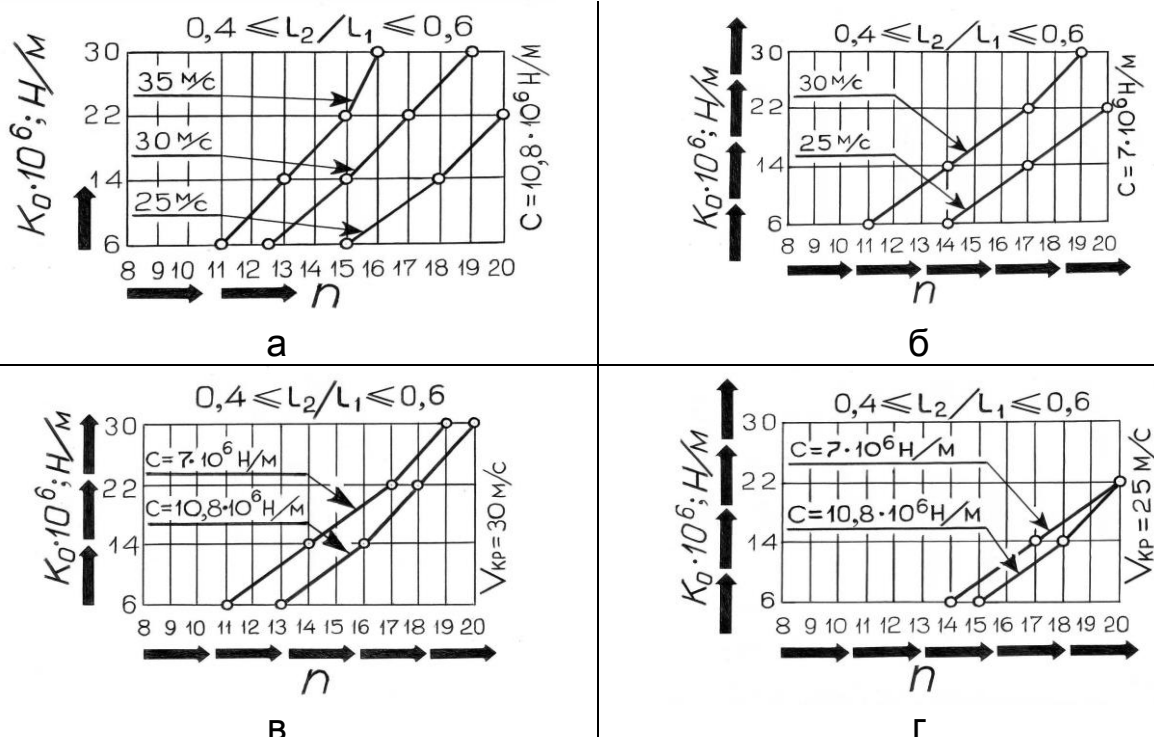


Рисунок 5.25 – Сочетания чисел режущих выступов  $n$  и жесткостей резания  $K_0$ , обеспечивающие устойчивую работу упругой системы станка при  $C = 10,8 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$  (а),  $C = 7 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$  (б),  $V_{кр} = 30 \text{ м/с}$  (в),  $V_{кр} = 25 \text{ м/с}$  (г)

Из рис. 5.25, а, б видно, что для обеспечения устойчивой работы упругой системы станка необходимо при уменьшении скорости вращения круга  $V_{кр}$  увеличивать на нем число режущих выступов  $n$ . Из рис. 5.25, в, г видно, что для обеспечения параметрической устойчивости упругой системы станка необходимо при увеличении жесткости станка  $C$  увеличивать число режущих выступов  $n$  на шлифовальном круге.

### **5.9. Технологические предпосылки предотвращения появления прижогов на обрабатываемых поверхностях при зубошлифовании на станках, работающих тарельчатыми кругами**

Разработан способ равномерного распределения припуска по боковым поверхностям зубьев при шлифовании цементованных колес. Сущность способа заключается в том, что после ориентации инструмента по максимально бьющей впадине заготовку последовательно поворачивают в разные стороны на  $50^\circ$  и  $140^\circ$  и каждый раз определяют асимметричность инструмента относительно первоначальной (настроечной) впадины. После этого заготовку поворачивают назад на  $90^\circ$ , и по результатам замеров инструмент устанавливают в среднее положение.

Получена аналитическая зависимость, позволяющая определять глубину проникновения  $\chi$  критической температуры  $T = 400^\circ\text{C}$  [34, 213]:

$$\chi = \left( \frac{1,6 - (0,16 - 0,325 \cdot U)}{\sqrt{U}} \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \frac{\lambda}{q \cdot \frac{L_1}{2}} \right)^{0,25} \cdot \frac{L_1}{2} \cdot \frac{1}{(1,7416 \cdot \sqrt{U} - 0,61)} \quad (5.37)$$

где  $L_1$  – ширина зоны контакта шлифовального круга с деталью;

$U = \frac{V_{обк.} \cdot \frac{L_1}{2}}{a}$  – безразмерный комплекс скорости перемещения теплового источника;

$\theta_{сп}/\theta_{пр}$  – безразмерный коэффициент, показывающий, во сколько раз снизится температура, если шлифование осуществлять кругами с прерывистой рабочей поверхностью:

$$\frac{\theta_{\text{сп}}}{\theta_{\text{пр}}} = 0,036 \cdot n + 0,64 \cdot \frac{l'_2}{l_1} + 0,74; \quad (5.38)$$

$$10 \leq n \leq 20; \quad 0,25 \leq \frac{l'_2}{l_1} \leq 0,50.$$

Зависимость (5.37) является математической основой для проектирования переходов зубошлифования. Бояршиновым Ю. А. и Свирцевым В. И. установлено, что при зубошлифовании тарельчатыми кругами зависимость глубины дефектного (отпущенного) слоя  $h_d$  от глубины резания  $t$  имеет линейный характер. Рассчитав по зависимости (5.37) глубины отпущенных слоев для двух произвольно заданных глубин резания  $t_A$  и  $t_B$ , можно определить тангенс угла наклона  $\text{tg}\beta$  прямой, определяющей зависимость  $h_d = f(t)$  (рис. 5.26).

Глубину резания  $t_0$ , при которой не возникают прижоги отпуска, можно определить из соотношения

$$\text{tg}\beta = \frac{h_{дВ}}{t_B - t_0} \cdot t_0 = \frac{t_B \cdot \text{tg}\beta - h_{дВ}}{\text{tg}\beta}. \quad (5.39)$$

Зная глубину резания  $t_0$ , при которой не возникают прижоги отпуска, и угол  $\beta$ , нетрудно определить глубины резания при многопроходном шлифовании с учетом ограничения: глубина распространения прижога не должна превышать припуск, оставшийся под последующие проходы. Расчетная схема для определения этих глубин резания приведена на рис. 5.26. Глубины резания на различных проходах зубошлифования определяются по зависимости:

$$t_i = t_{i-1} + t_{i-1} \cdot \text{tg}(90^\circ - \beta) \quad \text{при } 1 \leq i. \quad (5.40)$$

Нумерация глубин резания на рис. 5.26 соответствует последовательности их расчета и не совпадает с порядком послойного удаления общего припуска  $Z$  при многопроходном зубошлифовании. Сумма глубин резания  $t_i$ , рассчитанных по зависимости (5.40), должна быть равна величине общего припуска  $Z$ . Если сумма толщин срезов обрабатываемого материала превысит величину припуска  $Z$ , то последняя рассчитанная глубина резания должна быть скорректирована в сторону уменьшения:

$$t'_3 = t_3 - \left( \sum_{i=0}^3 t_i - Z \right). \quad (5.41)$$

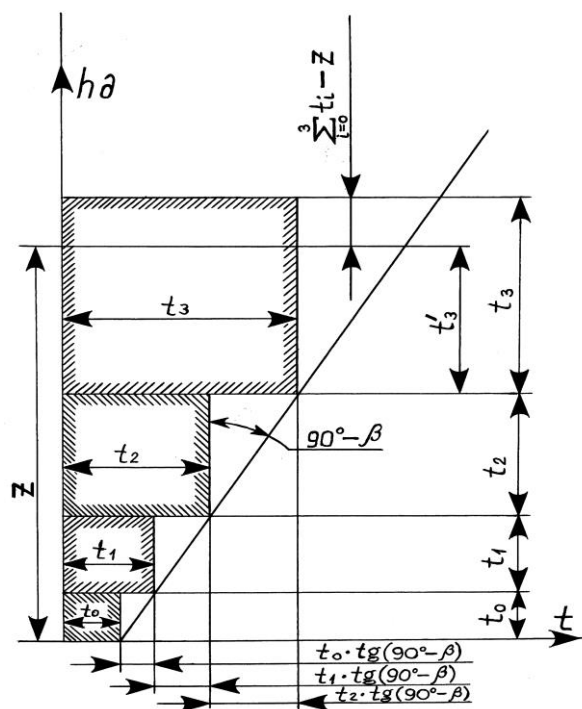
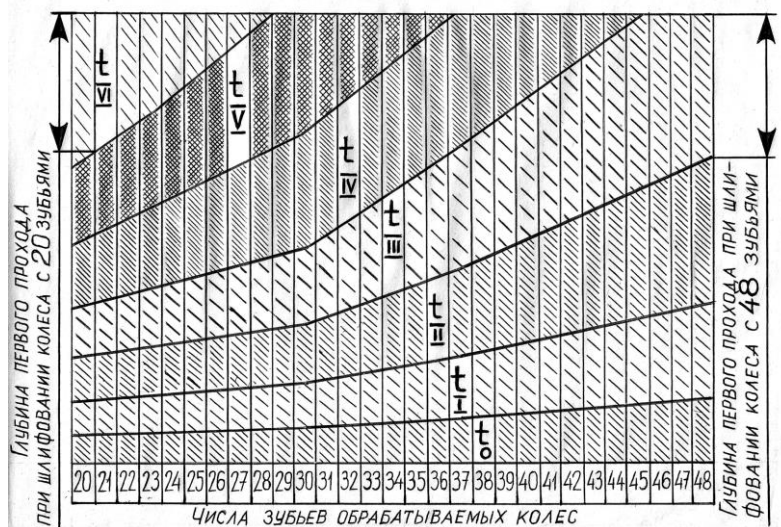


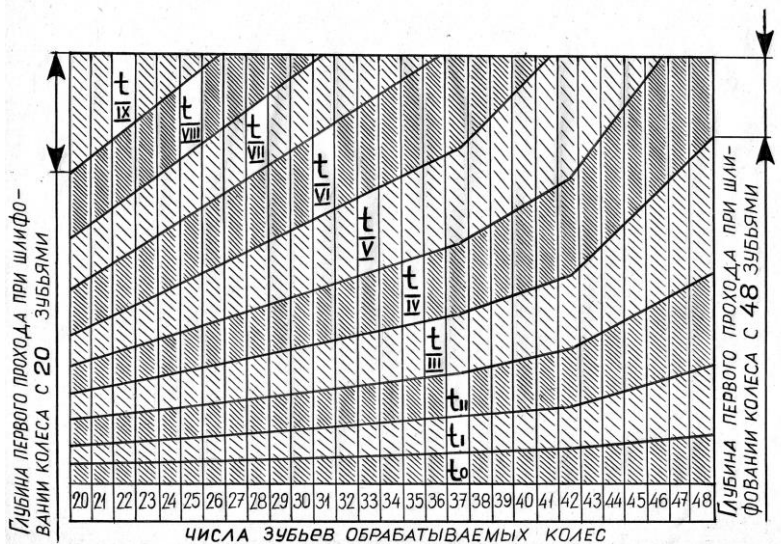
Рисунок 5.26 – Схема распределения припуска при многопроходном шлифовании

На рис. 5.27 показано, как изменяется характер распределения общего припуска, удаляемого с боковых поверхностей зубьев, при увеличении количества последних с 20 до 48 и при постоянном модуле  $m = 2$  мм. Расчеты глубин резания для различных проходов проводили в точке начала рабочего эвольвентного профиля (рис. 5.27,а) и в точке, расположенной на делительной окружности (рис. 5.27,б) для  $Z_{\text{общ}} = 0,3$  мм;  $n' = 112$  кач./мин.

Из рис. 5.27 видно, что с увеличением количества зубьев на обрабатываемом колесе при неизменном модуле глубины резания в условиях многопроходного шлифования увеличиваются. Глубины резания средней части эвольвентного профиля больше глубин, рассчитанных для его начального участка. Увеличение глубин в средней части обрабатываемого профиля объясняется уменьшением глубины прогрева металла из-за увеличения скорости обката. Скорость обката изменяется по синусоидальному закону и в средней части профиля принимает максимальное значение. Проведенные расчеты показали, что проектирование переходов зубошлифования необходимо проводить для точки, с которой начинается рабочий эвольвентный профиль обрабатываемого зуба, так как в этой точке глубины структурно-измененных слоев принимают наибольшие значения.



а



б

Рисунок 5.27 – Глубины резания для различных проходов шлифования: в точке, расположенной посередине эвольвентного профиля зуба (а); в точке начала рабочего эвольвентного профиля (б)

### 5.10. Аналитическое определение температур, возникающих на различных участках рабочего профиля зуба при шлифовании на станках, работающих двумя тарельчатыми кругами

Изменение радиуса кривизны рабочего профиля обрабатываемого зуба в пределах его высоты вызывает изменение длины и ширины пятна контакта абразивного инструмента с зубом шестерни. От длины

пятна контакта зависит число проходов фиксированной точки обрабатываемой поверхности под тепловым источником, а от ширины – зависит время нагрева этой точки. Из рис. 5.28 видно, что пятна контакта на ножке, делительной окружности и головке имеют разные длины:  $X_n < X_d < X_g$ .

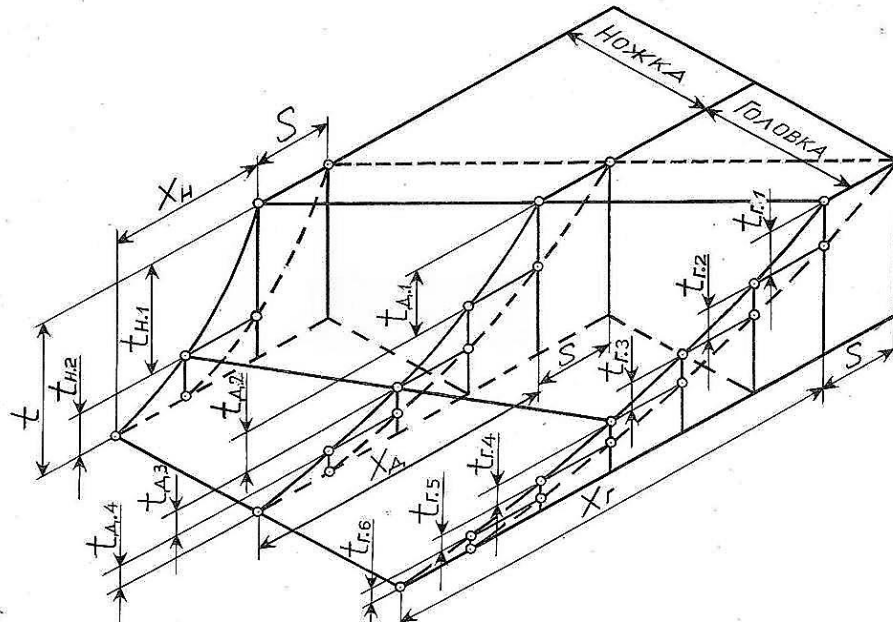


Рисунок 5.28 – Увеличение длины пятна контакта зуба шестерни с шлифовальным кругом при движении последнего в направлении вершины зуба

В работе получены аналитические зависимости для расчетов поверхностных температур в точках, расположенных в начале, в середине и в конце рабочего эвольвентного профиля обрабатываемого зуба. Для точки, расположенной вблизи вершины зуба, расчет температуры проводится по зависимостям [74, 267]:

$$T = \sum_{n=0}^{K_{\Gamma}-1} \frac{2 \cdot q_{(2n+1)} \cdot a}{\pi \cdot \lambda \cdot V_{\Gamma}} \cdot M_{\Gamma.пр.} \cdot \int_{Z-n \cdot L - H_{ср.г}}^{Z-n \cdot L + H_{ср.г}} \exp(-\xi) \cdot Ko(\xi) \cdot d\xi +$$

$$+ \sum_{n=0}^{K_{\Gamma}-1} \frac{2 \cdot q_{(2n+2)} \cdot a}{\pi \cdot \lambda \cdot V_{\Gamma}} \cdot M_{\Gamma.обр.} \cdot \int_{Z-n \cdot L - (L-4 \cdot H_{ср.г}) - H_{ср.г}}^{Z-n \cdot L - (L-4 \cdot H_{ср.г}) + H_{ср.г}} \exp(-\xi) \cdot Ko(\xi) \cdot d\xi; \quad (5.42)$$

$$M_{\Gamma.пр.} = \left[ 1 - \frac{4 \cdot \alpha \cdot a}{\lambda \cdot V_{ср.г}} \cdot \frac{(z-n \cdot L)}{2} \cdot \exp\left(\frac{z-n \cdot L}{2}\right) \cdot Ko\left(\frac{z-n \cdot L}{2}\right) \right]; \quad (5.43)$$

$$M_{\Gamma, \text{обр.}} = \left[ 1 - \frac{4 \cdot \alpha \cdot a}{\lambda \cdot V_{\text{сред}}} \cdot \frac{(z - n \cdot L - (L - 4 \cdot H_{\text{ср.}\Gamma}))}{2} \right] \times \exp\left(\frac{z - n \cdot L - (L - 4 \cdot H_{\text{ср.}\Gamma})}{2}\right) \cdot \text{Ko}\left(\frac{z - n \cdot L - (L - 4 \cdot H_{\text{ср.}\Gamma})}{2}\right). \quad (5.44)$$

Для точки, расположенной на делительной окружности, расчет поверхностной температуры проводится по зависимостям:

$$T = \sum_{n=0}^{K_{\text{Д}}-1} \frac{2 \cdot q(2 \cdot n+1) \cdot a}{\pi \cdot \lambda \cdot V_{\text{Д}}} \cdot M_{\text{Д.пр.}} \cdot \int_{Z-n \cdot L - H_{\text{сред.Д}}}^{Z-n \cdot L + H_{\text{сред.Д}}} \exp(-\xi) \cdot \text{Ko}(\xi) \cdot d\xi + \sum_{n=0}^{K_{\text{Д}}-1} \frac{2 \cdot q(2 \cdot n+2) \cdot a}{\pi \cdot \lambda \cdot V_{\text{Д}}} \cdot M_{\text{Д.обр.}} \cdot \int_{Z-(n+0,5)L - H_{\text{сред.Д}}}^{Z-(n+0,5)L + H_{\text{сред.Д}}} \exp(-\xi) \cdot \text{Ko}(\xi) \cdot d\xi; \quad (5.45)$$

$$M_{\text{Д.пр.}} = \left[ 1 - \frac{4 \cdot \alpha \cdot a}{\lambda \cdot V_{\text{сред}}} \cdot \frac{(z - n \cdot L)}{2} \cdot \exp\left(\frac{z - n \cdot L}{2}\right) \cdot \text{Ko}\left(\frac{z - n \cdot L}{2}\right) \right]; \quad (5.46)$$

$$M_{\text{Д.обр.}} = \left[ 1 - \frac{4 \cdot \alpha \cdot a}{\lambda \cdot V_{\text{сред}}} \cdot \frac{(z - (n+0,5) \cdot L)}{2} \times \exp\left(\frac{z - (n+0,5) \cdot L}{2}\right) \cdot \text{Ko}\left(\frac{z - (n+0,5) \cdot L}{2}\right) \right]. \quad (5.47)$$

Для точки, расположенной около дна впадины, расчет температуры проводится по зависимости:

$$T = \sum_{n=0}^{K_{\Gamma}-1} \frac{2 \cdot q(2 \cdot n+1) \cdot a}{\pi \cdot \lambda \cdot V_{\text{Н}}} \cdot M_{\text{Н.пр.}} \cdot \int_{Z-n \cdot L - H_{\text{сред.Н}}}^{Z-n \cdot L + H_{\text{сред.Н}}} \exp(-\xi) \cdot \text{Ko}(\xi) \cdot d\xi + \sum_{n=0}^{K_{\text{Н}}-1} \frac{2 \cdot q(2 \cdot n+2) \cdot a}{\pi \cdot \lambda \cdot V_{\text{Н}}} \cdot M_{\text{Н.обр.}} \cdot \int_{Z-n \cdot L - 2 \cdot H_{\text{сред.Н}} - H_{\text{сред.Н}}}^{Z-n \cdot L - 2 \cdot H_{\text{сред.Н}} + H_{\text{сред.Н}}} \exp(-\xi) \cdot \text{Ko}(\xi) \cdot d\xi; \quad (5.48)$$

$$M_{\text{Н.пр.}} = \left[ 1 - \frac{4 \cdot \alpha \cdot a}{\lambda \cdot V_{\text{сред}}} \cdot \frac{(z - n \cdot L)}{2} \cdot \exp\left(\frac{z - n \cdot L}{2}\right) \cdot \text{Ko}\left(\frac{z - n \cdot L}{2}\right) \right]; \quad (5.49)$$



$$M_{H.обр.} = \left[ 1 - \frac{4 \cdot \alpha \cdot a}{\lambda \cdot V_{ср.}} \cdot \frac{(z - n \cdot L - 2 \cdot H_{ср.ДН})}{2} \times \right. \\ \left. \times \exp\left(\frac{z - n \cdot L - 2 \cdot H_{ср.ДН}}{2}\right) \cdot \text{Ko}\left(\frac{z - n \cdot L - 2 \cdot H_{ср.ДН}}{2}\right) \right]. \quad (5.50)$$

В зависимостях (5.42), (5.45), (5.48) первое слагаемое – это сумма температур, возникающих при прямых ходах стола, а второе – при обратных ходах.  $K_{Г}, K_{Д}, K_{Н}$  – числа двойных ходов стола, совершаемых за время прохождения фиксированных точек, расположенных, соответственно, на головке, делительной окружности и ножке, под тепловыми источниками:  $K_{Г} = \frac{X_{Г}}{2 \cdot S}$ ;  $K_{Д} = \frac{X_{Д}}{2 \cdot S}$ ;  $K_{Н} = \frac{X_{Н}}{2 \cdot S}$ , где  $X_{Г}, X_{Д}, X_{Н}$  – длина пятен контакта тарельчатого шлифовального круга с обрабатываемым зубом на головке, делительной окружности и ножке соответственно.

Выражения в квадратных скобках зависимостей (5.43), (5.44), (5.46), (5.47), (5.50) – монотонно-убывающие функции, характеризующие влияние теплоотдачи;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи; при теплоотдаче в воздух  $\alpha = 4 \cdot 10^{-5}$  кал/(мм<sup>2</sup>·с·°С);  $V_{Г}, V_{Д}, V_{Н}$  – скорости обкатки на головке (около вершины зуба), на делительной окружности и на ножке (вблизи впадины) соответственно;  $V_{ср.}$  – средняя скорость обката;  $L = \frac{V_{ср.} \cdot l}{2 \cdot a}$ ;  $l = 2 \cdot (m + 1,25 \cdot m + 4 \cdot L_{1Г})$ ;  $L_{1Г}$  – ширина зоны контакта в верхней части головки зуба;  $H_{ср.Г}, H_{ср.Д}, H_{ср.Н}$  – средние безразмерные полуширины тепловых источников на головке, на делительной окружности и на ножке соответственно:

$$H_{ср.Г} = \frac{V_{ср.} \cdot \frac{L_{ср.Г}}{2}}{2 \cdot a}; \quad H_{ср.Д} = \frac{V_{ср.} \cdot \frac{L_{ср.Д}}{2}}{2 \cdot a}; \quad H_{ср.Н} = \frac{V_{ср.} \cdot \frac{L_{ср.Н}}{2}}{2 \cdot a};$$

$L_{ср.Г}, L_{ср.Д}, L_{ср.Н}$  – средние ширины пятен контактов тарельчатого шлифовального круга с головкой, со средней частью зуба и с ножкой, соответственно;  $z = \frac{V_{ср.} \cdot z}{2 \cdot a}$  – безразмерная координата в направлении перемещения теплового источника;  $\text{Ko}(\xi)$  – функция Бесселя второго рода нулевого порядка;  $\xi$  – переменная интегрирования;

$q_{(2n+1)}, q_{(2n+2)}$  – плотности тепловых потоков, формируемых при прямых и обратных ходах соответственно.

На рис. 5.29 и рис. 5.30 приведены схемы, поясняющие зависимость (5.42) для расчета температуры на головке зуба.

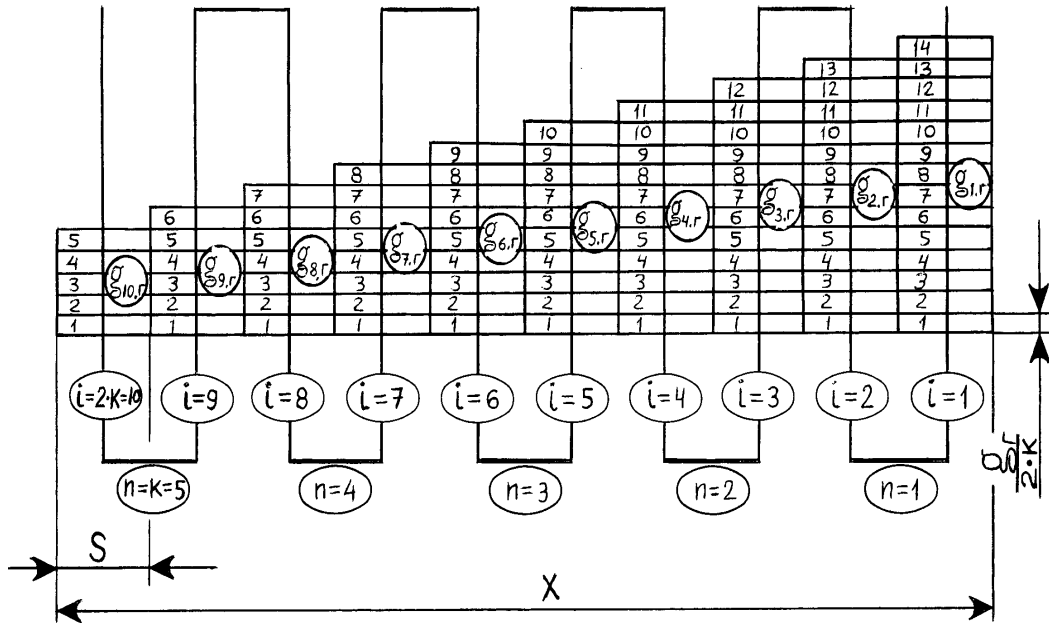


Рисунок 5.29 – Схема прохождения точки, расположенной на головке зуба, под тепловым источником, в пределах которого плотность теплового потока распределена неравномерно

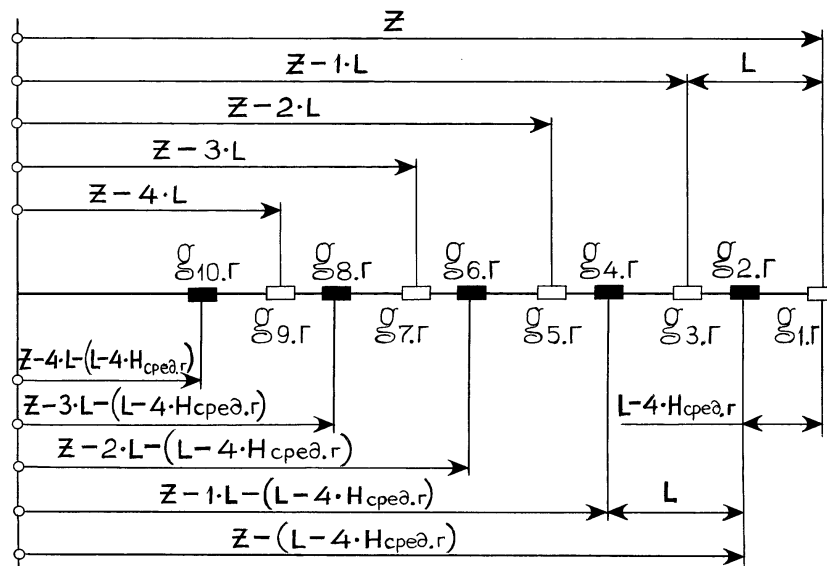


Рисунок 5.30 – Схема прохождения точки, расположенной вблизи вершины зуба, под десятью участками теплового источника, каждый из которых выступает в роли самостоятельного источника тепла

Тепловой источник разбит на отдельные участки, количество которых равно числу проходов точки, расположенной вблизи вершины зуба, под этим источником (рис. 5.29).

Каждый участок имеет свою интенсивность теплового потока, которая рассчитывается по зависимости:

$$q_{i,\Gamma} = \frac{q_{\Gamma}}{2 \cdot K_{\Gamma}} \cdot (3 \cdot K_{\Gamma} - i), \quad (5.51)$$

где  $q_{\Gamma} = \frac{P_{z,\Gamma} \cdot V_{кр}}{\Phi_{\Gamma}}$ ;  $P_{z,\Gamma}$  – тангенциальная составляющая силы резания, рассчитанная по зависимости (5.22);  $\Phi_{\Gamma}$  – площадь пятна контакта абразивного инструмента с головкой зуба, рассчитывается по зависимости (5.14).

На рис. 5.30 участки зоны контакта выступают в роли самостоятельных тепловых источников, изображенных в виде белых (при прямых ходах) и черных (при обратных ходах) прямоугольников.

Произведены расчеты температур, образующихся на ножке, на делительной окружности и на головке при шлифовании зубчатых колес ( $m = 2$  мм;  $m = 8$  мм;  $z_1 = 20; 30; 40; 48$ ) из цементированной стали 12Х2Н4А на станке МААГ с нулевой настройкой тарельчатых кругов на режимах  $S = 1,5$  мм/кач.;  $S = 3$  мм/кач.;  $t = 0,05$  мм;  $n' = 112$  кач./мин (рис. 5.31).

Расчеты показали, что температура в средней части профиля зуба на 35 ÷ 45 % меньше, чем на головке и на 18 ÷ 22 % меньше, чем на ножке.

Снижение температуры в средней части профиля зуба объясняется увеличением скорости обкатки и, как следствие, уменьшением времени воздействия теплового источника на фиксированную точку обрабатываемой поверхности.

Из рис. 5.31 видно, что в исследуемых диапазонах изменения модулей ( $m = 2 \dots 8$  мм) и продольных подач ( $S = 1,5 \dots 3$  мм/кач.) при увеличении чисел зубьев с  $z_1 = 20$  до  $z_1 = 48$  температура шлифования увеличилась на 30 % (в средней части зуба), на 27 % (на ножке) и на 16 % (на головке).

Расчеты показали, что с увеличением модуля и величины продольной подачи увеличивается температура шлифования. Изменение

продольной подачи оказывает большее влияние на температуру шлифования по сравнению с модулем зубчатого колеса.

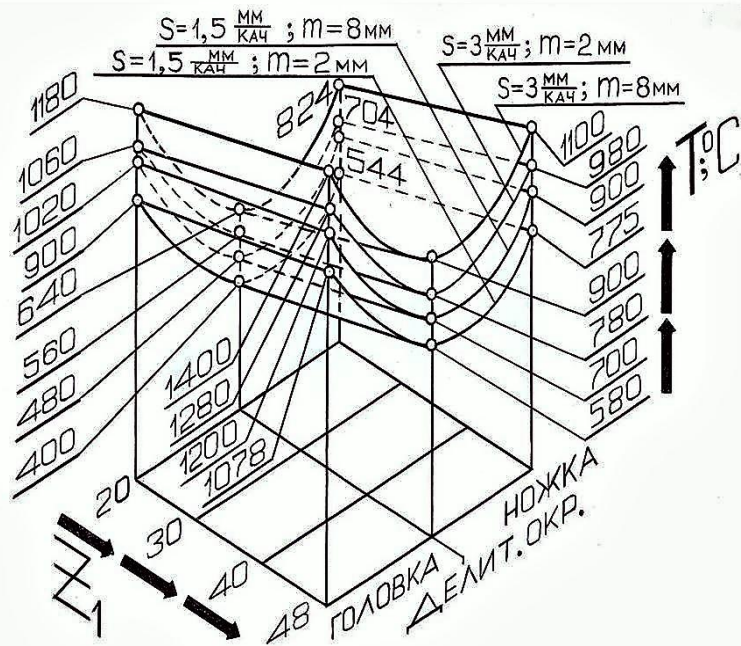


Рисунок 5.31 – Расчетные температуры, образующиеся при шлифовании зубчатых колес ( $m = 2 \text{ мм}$ ;  $m = 8 \text{ мм}$ ;  $z_1 = 20$ ;  $30$ ;  $40$ ;  $48$ ) из цементируемой стали 12Х2Н4А ( $\alpha = 0,05 \text{ см}^2/\text{с}$ ) на станке МААГ с нулевой настройкой кругов на режимах:  $t = 0,05 \text{ мм}$ ;  $n' = 112 \text{ кач./мин}$ ;  $S = 3 \text{ мм/кач.}$ ;  $S = 1,5 \text{ мм/кач.}$

Принимая одномерную теплофизическую схему с линейным тепловым источником, с постоянной интенсивностью теплового потока и применяя принцип суперпозиции, разработана математическая модель для определения температур, возникающих на разных участках обрабатываемой поверхности зуба, при шлифовании на станках МААГ, 5851, 5853 с нулевой настройкой кругов.

В основу моделирования температурных полей при многопроходном шлифовании была заложена схема, в которой точка теплопроводящей среды подвергается многократному нагреву в результате ее периодического прохождения под неподвижным плоским тепловым источником (рис. 5.32) [158, 167].

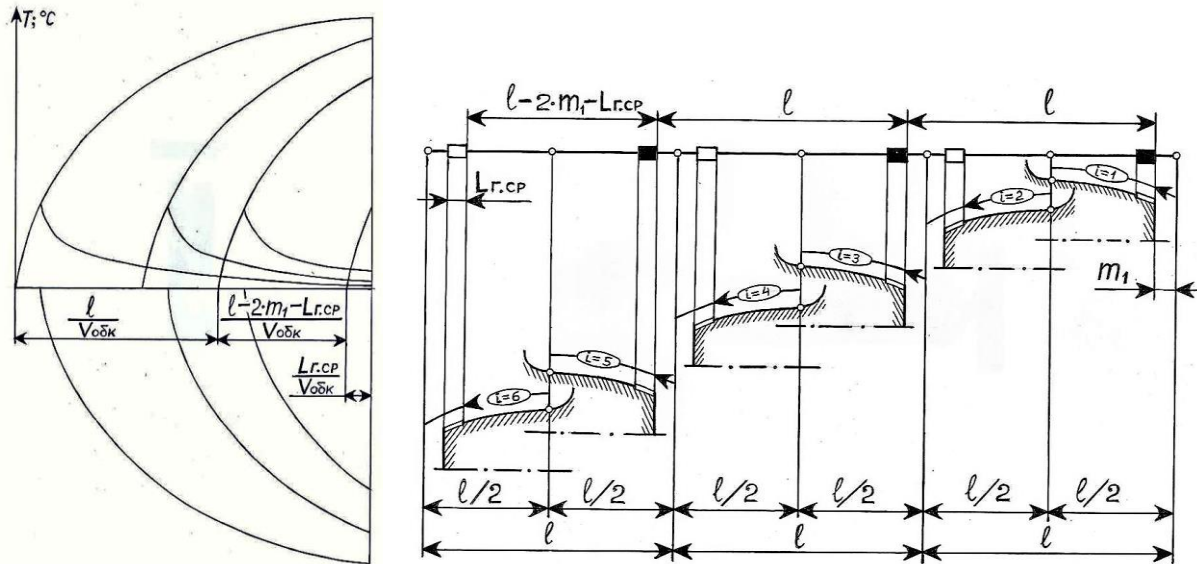


Рисунок 5.32 – Схема формирования результирующей температуры в точке при ее многократном прохождении под тепловым источником, расположенной в верхней части обрабатываемого профиля зуба

Применяя принцип суперпозиции, были получены зависимости (5.52) – (5.54) для определения температур в нижней, средней и верхней частях эвольвентного профиля зуба соответственно:

$$T_k = \frac{2 \cdot \psi \cdot q_H}{\sqrt{c \cdot \rho_M \cdot \lambda}} \cdot \sum_{n=1}^k \left[ \sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + 2 \cdot \frac{L_{г.ср}}{V_{обк}}} \cdot \text{ierfc} \left( \frac{t}{2 \cdot \sqrt{a} \cdot \sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + 2 \cdot \frac{L_{г.ср}}{V_{обк}}}} \right) \right]$$

$$\begin{aligned}
& -\sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{L_{н.ср}}{V_{обк}}} \cdot \text{ierfc} \left( \frac{t}{2 \cdot \sqrt{a} \sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{L_{н.ср}}{V_{обк}}}} \right) + \\
& + \frac{2 \cdot \psi \cdot q_H}{\sqrt{c \cdot \rho_M \cdot \lambda}} \cdot \sum_{n=1}^k \left[ \sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{L_{н.ср}}{V_{обк}}} \cdot \text{ierfc} \left( \frac{t}{2 \cdot \sqrt{a} \sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{L_{н.ср}}{V_{обк}}}} \right) - \right. \\
& \left. - \sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}}} \cdot \text{ierfc} \left( \frac{t}{2 \cdot \sqrt{a} \sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}}}} \right) \right]; \quad (5.52)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_k = & \frac{2 \cdot \psi \cdot q_D}{\sqrt{c \cdot \rho_M \cdot \lambda}} \cdot \sum_{n=1}^k \left[ \sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{l}{2 \cdot V_{обк}} + \frac{L_{д.ср}}{V_{обк}}} \times \right. \\
& \times \text{ierfc} \left( \frac{t}{2 \cdot \sqrt{a} \sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{l}{2 \cdot V_{обк}} + \frac{L_{д.ср}}{V_{обк}}}} \right) - \\
& \left. - \sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{l}{2 \cdot V_{обк}}} \cdot \text{ierfc} \left( \frac{t}{2 \cdot \sqrt{a} \sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{l}{2 \cdot V_{обк}}}} \right) \right] + \\
& + \frac{2 \cdot \psi \cdot q_D}{\sqrt{c \cdot \rho_M \cdot \lambda}} \cdot \sum_{n=1}^k \left[ \sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{L_{д.ср}}{V_{обк}}} \cdot \text{ierfc} \left( \frac{t}{2 \cdot \sqrt{a} \sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{L_{д.ср}}{V_{обк}}}} \right) - \right. \\
& \left. - \sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}}} \cdot \text{ierfc} \left( \frac{t}{2 \cdot \sqrt{a} \sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}}}} \right) \right]; \quad (5.53)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
T_k = & \frac{2 \cdot \psi \cdot q_{\Gamma}}{\sqrt{c \cdot \rho_M \cdot \lambda}} \cdot \sum_{n=1}^k \left[ \sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{(l-2 \cdot m_1)}{V_{обк}}} \cdot \text{ierfc} \left( \frac{t}{\sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{(l-2 \cdot m_1)}{V_{обк}}}} \right) - \right. \\
& \left. - \sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{(l-2 \cdot m_1 - L_{г.ср})}{V_{обк}}} \cdot \text{ierfc} \left( \frac{t}{2 \cdot \sqrt{a} \sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{(l-2 \cdot m_1 - L_{г.ср})}{V_{обк}}}} \right) \right] + \\
& + \frac{2 \cdot \psi \cdot q_{\Gamma}}{\sqrt{c \cdot \rho_M \cdot \lambda}} \cdot \sum_{n=1}^k \left[ \sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{l_{г.ср}}{V_{обк}}} \cdot \text{ierfc} \left( \frac{t}{2 \cdot \sqrt{a} \sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}} + \frac{l_{г.ср}}{V_{обк}}}} \right) - \right. \\
& \left. - \sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}}} \cdot \text{ierfc} \left( \frac{t}{2 \cdot \sqrt{a} \sqrt{(k-n) \cdot \frac{l}{V_{обк}}}} \right) \right], \quad (5.54)
\end{aligned}$$

где  $V_{обк}$  – средняя скорость обкатки;  $l = 2 \cdot (m + 1,25 \cdot m + m_1)$  – длина двойного обкаточного движения;  $m_1$  – величина выхода круга за пределы головки зуба;  $L_{ср.Н} = \frac{\sum_{i=1}^{2 \cdot k} L_{i.Н}}{2 \cdot k}$ ;  $L_{ср.Д} = \frac{\sum_{i=1}^{2 \cdot k} L_{i.Д}}{2 \cdot k}$ ;  $L_{ср.Г} = \frac{\sum_{i=1}^{2 \cdot k} L_{i.Г}}{2 \cdot k}$ ;  $L_{ср.Н}$ ,

$L_{ср.Д}$ ,  $L_{ср.Г}$  – средние значения ширины пятна контакта абразивного круга с обрабатываемым зубом в нижней, средней и верхней частях обрабатываемого профиля соответственно;  $L_{i.Н}$ ,  $L_{i.Д}$ ,  $L_{i.Г}$  – размеры пятна контакта в его поперечных сечениях, отстоящих друг от друга на величину продольной подачи, на нижнем, среднем и верхнем участках обрабатываемого зуба соответственно;  $q_{Н} = \frac{P_{z.Н} \cdot V_{кр}}{\Phi_{Н}}$ ;  $q_{Д} = \frac{P_{z.Д} \cdot V_{кр}}{\Phi_{Д}}$ ;

$q_{Г} = \frac{P_{z.Г} \cdot V_{кр}}{\Phi_{Г}}$ ;  $q_{Н}$ ,  $P_{z.Н}$ ,  $\Phi_{Н}$ ,  $q_{Д}$ ,  $P_{z.Д}$ ,  $\Phi_{Д}$ ,  $q_{Г}$ ,  $P_{z.Г}$ ,  $\Phi_{Г}$  – плотности тепловых потоков  $q$ , тангенциальные составляющие сил резания  $P_z$  и площади пятен контакта абразивного инструмента с обрабатываемым зубом  $\Phi$  в нижней, средней и верхней частях эвольвентного профиля соответственно.

Каждая из зависимостей (5.52) – (5.54) содержит две суммы. Первая сумма учитывает накопление температур в фиксированной точке теплопроводящей среды, формируемых при прохождении этой точки под тепловым источником при прямых ходах. Вторая сумма учитывает накопление температур, формируемых при обратных ходах.

Результаты расчетов, проведенных по зависимостям (5.52) – (5.54), незначительно (до 10 %) отличаются от результатов расчетов, проведенных для тех же условий по зависимостям (5.42), (5.45), (5.48).

### 5.11. Обоснование возможности повышения производительности обработки на зубошлифовальных станках, работающих тарельчатыми кругами

Из всего многообразия зубошлифовальных станков наименее производительными являются станки МААГ, 5851 с 15-градусной исходной режущей рейкой. В работе выявлена и теоретически обоснована возможность повышения производительности обработки на этих станках за счет оптимизации угла установки шлифовальных кругов. От угла установки кругов зависит длина поперечного хода стола  $l_{x.c}$ , а от длины поперечного хода стола зависит машинное время. Получены аналитические зависимости для расчета длины поперечного хода стола и угла установки шлифовальных кругов при размещении последних в одной впадине (5.55) – (5.57) и в смежных впадинах обрабатываемого зубчатого колеса (5.59) – (5.60) [76, 265]:

$$l_{x.c.расч} = 2 \cdot \left( \alpha_{и.расч} - \frac{\pi}{2 \cdot z} + \text{inv}20^\circ \right) \cdot R_{д.о.} \cdot \frac{\cos 20^\circ}{\cos \alpha_{и.расч}}; \quad (5.55)$$

$$l_{x.c.(15)} = 2 \cdot \left[ \frac{\sqrt{\left( \frac{m \cdot z}{2} + 1,2 \cdot m + 2 \right)^2 - r_0^2}}{r_0} - \left( \frac{15^\circ}{57,32} - \frac{\pi}{2 \cdot z} + \text{inv}20^\circ \right) \right] \cdot R_{д.о.} \cdot \frac{\cos 20^\circ}{\cos 15^\circ}; \quad (5.56)$$

$$\alpha_{и.расч} = \frac{\sqrt{\left( \frac{m \cdot z}{2} + 1,2 \cdot m + 2 \right)^2 - r_0^2}}{2 \cdot r_0} + \frac{\pi}{2 \cdot z} - \text{inv}20^\circ; \quad (5.57)$$



$$I_{x.c.расч} = 2 \cdot \left( \alpha_{и.расч.} - \frac{3 \cdot \pi}{2 \cdot z} + \text{inv}20^\circ \right) \cdot R_{д.о.} \cdot \frac{\cos 20^\circ}{\cos \alpha_{и.расч}}; \quad (5.58)$$

$$I_{x.c.(15)} = 2 \cdot \left[ \frac{\sqrt{\left( \frac{m \cdot z}{2} + 1,2 \cdot m + 2 \right)^2 - r_0^2}}{r_0} - \left( \frac{15^\circ}{57,32} - \frac{3 \cdot \pi}{2 \cdot z} + \text{inv}20^\circ \right) \right] \cdot R_{д.о.} \cdot \frac{\cos 20^\circ}{\cos 15^\circ}; \quad (5.59)$$

$$\alpha_{и.расч.} = \frac{\sqrt{\left( \frac{m \cdot z}{2} + 1,2 \cdot m + 2 \right)^2 - r_0^2}}{2 \cdot r_0} + \frac{3 \cdot \pi}{2 \cdot z} - \text{inv}20^\circ. \quad (5.60)$$

Из анализа приведенных зависимостей следует, что длина поперечного хода стола станка зависит от характеристики обрабатываемого зубчатого колеса: модуля, числа зубьев, радиуса делительной окружности. С уменьшением длины поперечного хода стола станка уменьшается сила инерции качающихся частей станка, уменьшается величина деформации лент механизма обкатки и, как следствие, повышается точность обработки зубчатого колеса.

Получена зависимость для расчета количества двойных поперечных ходов стола станка в минуту:

$$n_{расч.} = \sqrt{\frac{I_{x.c.(15^\circ)} \cdot n_{(15^\circ)}^2 \cdot R_{р.расч.}^2 \cdot J_{(15^\circ)}}{I_{x.c.расч.} \cdot R_{р.(15^\circ)}^2 \cdot J_{расч.}}}. \quad (5.61)$$

С уменьшением длины поперечного хода стола увеличивается количество этих ходов в минуту, а это приводит к уменьшению машинного времени:

$$T_M = \frac{L_x}{n \cdot S} \cdot Z \cdot K \cdot M, \quad (5.62)$$

где  $L_x$  – длина продольного хода стола, м;  $S$  – продольная подача, мм/мин;  $M$  – число проходов;  $K = 1$  (при двустороннем делении);  $K = 2$  (при одностороннем делении).

В работе установлена зависимость для расчета силы инерции  $P_j$  качающихся частей станка, из которой видно, что за счет уменьшения длины поперечного хода стола можно увеличить число его качаний  $n$ , сохраняя при этом постоянной силу инерции  $P_j$  качающихся частей станка, т.е. не ухудшая точности обработки:

$$P_j = \frac{l_{x.c.} \cdot J}{R_p^2} \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} \right)^2, \quad (5.63)$$

где  $J$  – момент инерции качающихся частей станка,  $\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ ;  $n$  – число двойных поперечных ходов стола в минуту;  $R_p = \frac{m \cdot Z \cdot \cos 20^\circ}{\cos \alpha_u}$  – радиус ролика обкатки.

На рис. 5.33 представлены зависимости длины поперечного хода стола и машинного времени от числа зубьев и модулей обрабатываемых колес [257].

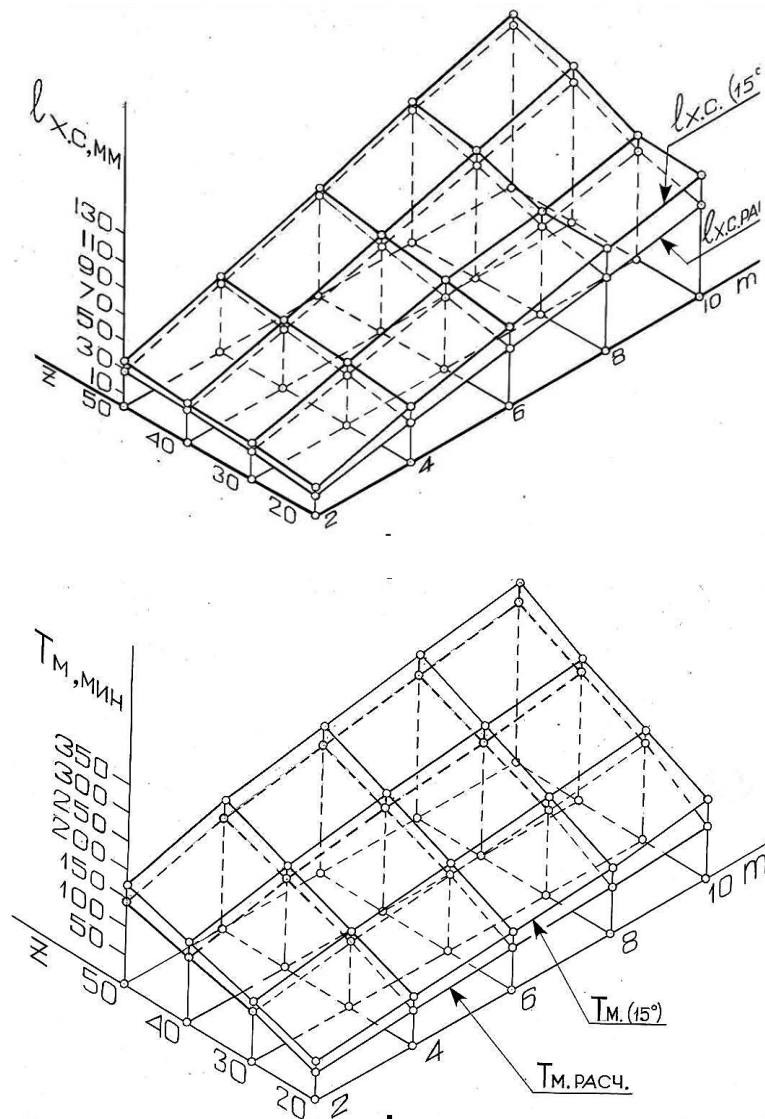


Рисунок 5.33 – Зависимости длины поперечного хода стола  $l_{x.c.}$  на станке МААГ и машинного времени  $T_M$  от числа зубьев  $Z$  и модулей  $m$  обрабатываемых колес

Из этих зависимостей видно, что длина поперечного хода стола и машинное время на станках с 15-градусной настройкой кругов больше, чем на станках, настроенных на расчетный угол производящей рейки. В среднем оптимизация угла установки кругов уменьшает машинное время на 20 %. Если учесть, что общее время обработки равно 6 – 7 часов, то уменьшение машинного времени на 20 % составит 40 минут.

Установлено, что если зубчатые колеса отличаются друг от друга различным сочетанием чисел зубьев и модулей, то для каждого из них существует свой оптимальный угол установки кругов, соответствующий минимальной длине поперечного хода стола. Разработана номограмма, с помощью которой можно для любого колеса выбрать оптимальный угол настройки тарельчатых кругов, при котором машинное время операции зубошлифования будет минимальным (рис. 5.34).

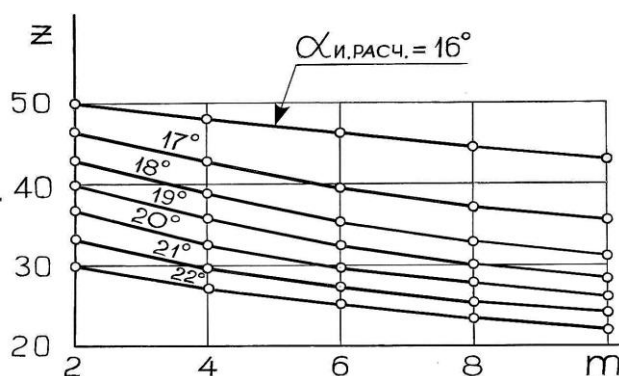


Рисунок 5.34 – Зависимости длины поперечного хода стола  $l_{x.c}$  на станке МААГ и машинного времени  $T_M$  от числа зубьев  $Z$  и модулей  $m$  обрабатываемых колес

## Выводы

1. Проведен анализ упругой системы зубообрабатывающего станка на параметрическую устойчивость. Установлено, что процесс прерывистого шлифования имеет множество неустойчивых областей, зависящих от жесткости станка, режущей способности инструмента и скорости его вращения, количества режущих выступов и впадин, а также от соотношения между их длинами.

2. Установлено, что при снижении режущей способности абразивного инструмента необходимо для обеспечения параметрической устойчивости упругой системы станка увеличивать число режущих выступов на шлифовальном круге.

3. Установлено, что амплитуду вынужденных колебаний можно уменьшить за счет уменьшения длины режущих выступов. С уменьшением амплитуды вынужденных колебаний шпинделя увеличивается фактическая глубина резания. С увеличением истинного съема возрастает толщина среза, приходящаяся на отдельные режущие зерна, что приводит к самообновлению режущего рельефа абразивного инструмента.

4. Установлено, что в разных точках эвольвентных профилей, обрабатываемых тарельчатыми шлифовальными кругами по нулевой схеме, протекают различные тепловые процессы, обусловленные разным количеством тепловых воздействий, воспринимаемых каждой из этих точек, разными временными интервалами между этими воздействиями, разным временем действия тепловых источников и неодинаковыми интенсивностями тепловых потоков. Разработаны методы расчета температур и глубин распространения шлифовочных прижогов на разных участках обрабатываемого эвольвентного профиля зуба.

5. Разработан метод выравнивания неравномерно распределенных по зубьям превышений действительного припуска над припуском, назначенным на операцию зубошлифования, без использования САР.

6. Разработан метод распределения припуска по проходам шлифования с позиций предотвращения появления прижогов на окончательно обработанной поверхности. Разработана методика и составлены номограммы для выбора геометрических параметров прерывистых кругов, обеспечивающих требуемые параметры качества поверхностного слоя обрабатываемых поверхностей зубьев.

7. Предложен метод расчета угла разворота тарельчатого шлифовального круга относительно вертикальной плоскости, при котором обеспечивается равенство длин траекторий обкаточных движений абразивного инструмента в направлении впадины и в направлении вершины зуба, начинающихся от линии качания плоскости вращения круга с боковой поверхностью обрабатываемого зуба при настройке станка. При равенстве длин указанных траекторий снижается машинное время и повышается точность обработки из-за уменьшения силы инерции качающихся частей станка.

8. Прерывистые круги-тарелки, геометрические параметры которых рассчитаны по специальной методике, внедрены на Луцком автомобильном заводе, на заводе "Ковельсельмаш", в Пермском ОАО "Мотовилихинские заводы", на Пермском моторном заводе.

## **Раздел 6**

# **Закономерности и технологические возможности абразивной обработки деталей затопленными струями**

Развитие металлообрабатывающего и штамповочного производства в значительной степени постоянно сдерживается отсутствием высокопроизводительных методов зачистной обработки, особенно при обработке деталей малой жесткости. Так, например, после отрезки колец на токарно-револьверном автомате, трудоемкость удаления заусенцев, расположенных на кромке обреза, составляет 300 – 350 %, а удаление заусенцев после штамповки – 400 – 450 % от трудоемкости изготовления этих деталей. Сложность обработки указанных деталей на зачистных операциях связана с малой жесткостью и небольшими размерами деталей для качественной обработки в виброабразивных машинах или галтовочных барабанах и, в то же время, относительно большой массой для обработки известными способами, например, ультразвуковым. Результаты испытаний установок разных типов показали, что турбулентно-абразивная обработка преимущественно эффективна при обработке жестких деталей простой конструкции, виброабразивная обработка с большими амплитудами колебаний предпочтительна для деталей сложной конфигурации с пазами и отверстиями, в том числе для деталей малой жесткости. Создание вибро-абразивных машин с большими амплитудами колебаний (10 – 20 мм) даже при малых объемах рабочей камеры (до 1 л) связано с большими конструктивными трудностями, а также с вопросами вибро- и шумоизоляции. Таким образом, несмотря на то, что машиностроение и обладает арсеналом технологических приемов и возможностей, направленных на решение задач, связанных с достижением высокого качества и производительности отделочной обработки, зачистка деталей малой жесткости массой до 3 г является немеханизированной и часто осуществляется вручную. Поэтому поиск и разработка новых методов отделочной обработки, обеспечивающих зачистку деталей малой жесткости массой до 3,0 г, является актуальной задачей.

В настоящей работе рассмотрен разработанный на кафедре "Технология машиностроения" ГВУЗ "Приазовский государственный техни-

ческий университет" под руководством профессора Андилахая А. А. [7, 16, 143, 214] эффективный метод абразивной обработки деталей затопленными струями, исключая основной недостаток струйно-абразивных установок – абразивный износ каналов сопел или эжекционных насадок. В этом случае абразивные зерна присоединяются к струям сжатого воздуха за их пределами. Это позволяет создавать декоративные поверхности на деталях сложной пространственной формы из различных металлов и сплавов с одновременным округлением острых кромок, удалением окисной пленки под гальванические покрытия, удалением окалины и грата посредством обработки абразивным порошком, приводимым в движение струями сжатого воздуха, затопленными абразивной суспензией.

Для выяснения сущности процесса абразивной обработки затопленными струями в работе обоснованы закономерности, которым подчиняется процесс взаимодействия абразивных зерен с обрабатываемым металлом в жидкой струе, и его технологические возможности.

### **6.1. Анализ механизма взаимодействия абразивных зерен и металлических деталей в жидкой струе**

Механизм съема металла изучался методом микроскопического

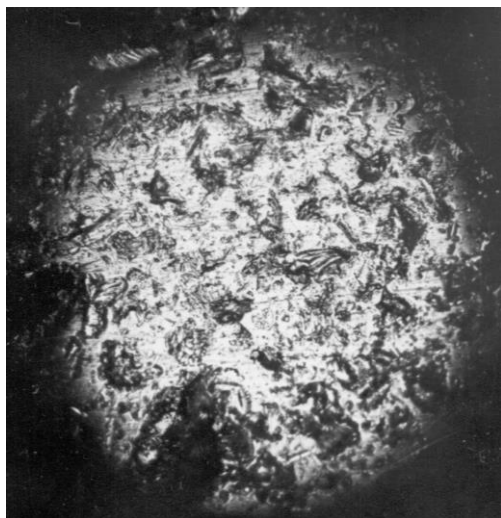


Рисунок 6.1 – Фрагмент полированной поверхности латунного образца с единичными следами абразивных зерен. Ув.×235

исследования единичных следов абразивных зерен на полированной поверхности латунных образцов прямоугольной формы габаритными размерами от 6×3×2 до 20×10×2 мм.

На фотографии (рис. 6.1) представлен фрагмент полированной поверхности с единичными следами, из которых, в основном, и состоит образованная поверхность. В большинстве случаев это короткие царапины переменной глубины. Как правило, такие царапины оканчиваются рельефными отпечатками граней или ребер абразивных зерен с четко выраженными наплывами металла.

На основании результатов скоростной съемки установлено, что в рабочей камере в процессе движения жидкости, абразивных частиц и деталей под действием струй сжатого воздуха (рис. 6.2) имеют место многочисленные столкновения абразивных частиц и деталей, вызывающие пластическую деформацию микрообъемов металла их поверхности.

Поскольку истечение струй в попутный поток жидкости характеризуется отсутствием сколько-нибудь значимых поперечных течений (т.е. они представляют собой квазиламинарное движение), то столкновения деталей и абразивных частиц за счет поперечных перемещений отсутствуют. Очевидно, что силы, действующие на детали и абразивные частицы, сообщают им ускорение, величина которого зависит от их физических свойств, габаритных размеров и геометрической формы. Для раскрытия механизма образования рельефа и физических явлений, сопровождающих процесс обработки, необходимо выявить закономерности взаимодействия абразивных частиц с поверхностью обрабатываемых деталей путем изучения характера, размеров и количества следов.

Характер следов абразивных частиц на полированных латунных образцах отражает качественное многообразие их столкновений. Экспериментально установлена закономерность распределения следов абразива по поверхности деталей плоской формы. В процессе обработки детали переносятся струями сжатого воздуха от сопла к соплу по замкнутой ломанной линии. Попадая очередной раз в струю, детали плоской формы могут располагаться вдоль потока, не оказывая ему большого сопротивления (рис. 6.3,а), под углом к потоку, в результате чего возникает поперечная составляющая, смещающая деталь в сторону из активной зоны действия струи (рис. 6.3,б), и поперек потока, воспринимая его давление всей площадью (рис. 6.3,в). В первом случае скорость детали минимальна. Следовательно, скорость абразивных зерен относительно деталей имеет наибольшую величину. Кроме того, двигаясь вдоль осей струй с малой скоростью, деталь находится относительно большее время под воздействием абразивных зерен, чем в последнем случае (рис. 6.3,в), когда она движется со скоростью, близкой скорости абразивных зерен.

Таким образом, при обработке плоских деталей абразивные зерна воздействуют преимущественно на их торцовые поверхности со стороны меньшего лобового сопротивления.

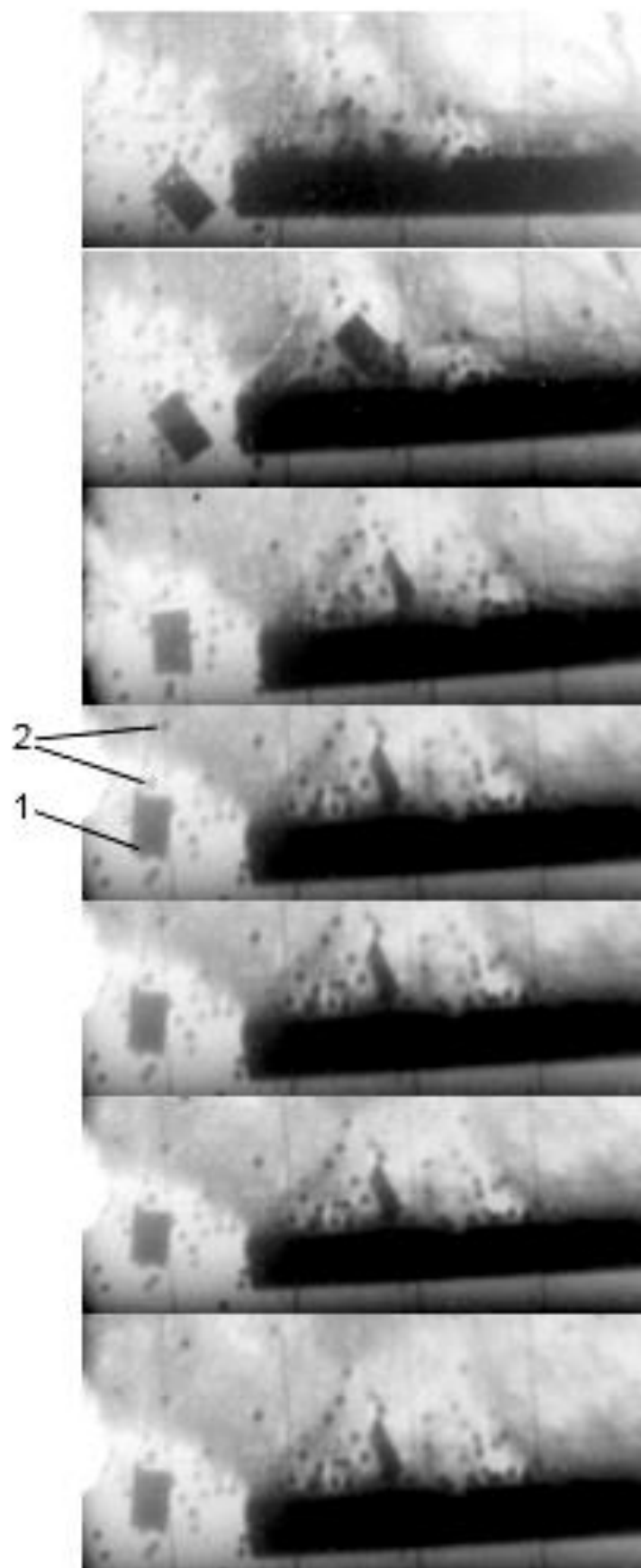


Рисунок 6.2 – Кинограмма процесса истечения струи сжатого воздуха в воду: 1 – контрольные образцы; 2 – абразивный материал



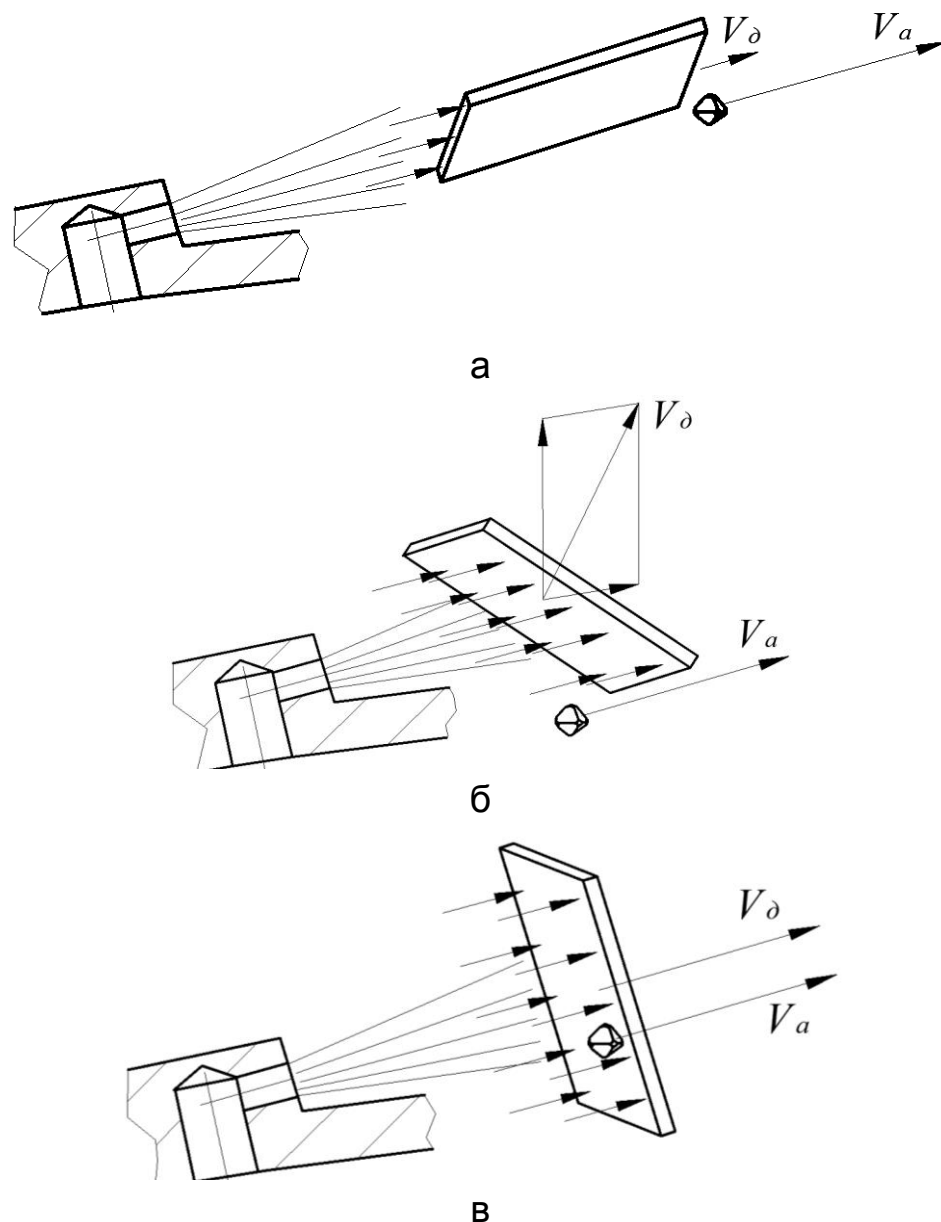


Рисунок 6.3 – Соотношение скоростей абразивного зерна  $V_a$  и детали  $V_d$ , находящихся в зоне действия сопла при ориентации детали: а – вдоль потока; б – под углом к потоку; в – поперек потока

Из этого можно сделать вывод о том, что при обработке плоских деталей процесс локализуется на их кромках. На фотографиях (рис. 6.4) представлены наиболее характерные следы ударов абразивных частиц на полированных латунных образцах, свободно помещенных в рабочую камеру и обрабатываемых в течение одной минуты. Следы воздействия абразива чаще всего имеют форму царапин длиной 45 – 120 мкм, глубиной 2 – 6 мкм. В ряде случаев по кромкам царапин располагается вытесненный из них металл, имеющий форму валика высотой 0,5 – 5 мкм.

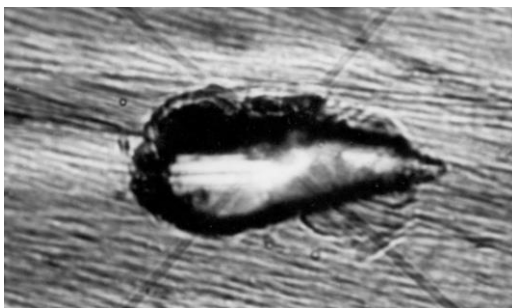
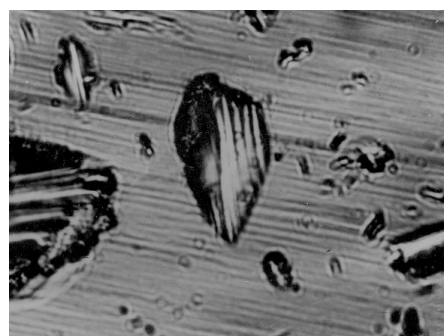


Рисунок 6.4 – Наиболее характерный единичный след абразивного зерна на полированной поверхности образца из латуни ЛС 59-1.  
Ув. × 1100

На основе сопоставления следов абразива на образцах, которые обрабатывались в свободном состоянии и закрепленными относительно струи, а, следовательно, с известным направлением воздействия, установлено, что абразивное зерно прочерчивает след, постепенно углубляющийся в металл, часто оканчивающийся валиком вытесненного металла. На фотографии (рис. 6.5) видно, что единичные следы на образцах, обработанных в закрепленном и не закрепленном состоянии, идентичны и отличаются лишь размерами и направлением воздействия зерен. Учитывая форму и габаритные размеры большинства следов абразивных зерен (рис. 6.4), направление их движения (рис. 6.5), а также форму их вершин, можно построить схему взаимодействия вершины абразивного зерна с металлом. При этом следует руководствоваться данными Кашеева В. Н., согласно которым средний радиус вершин абразивных зерен из карбида кремния зеленого (63С) и электрокорунда нормального (14А) находится в пределах 7 – 12,5 мкм.



а



б

Рисунок 6.5 – Следы абразивных зерен карбида кремния зеленого (63С 63П) на полированных поверхностях латунных образцов, обработанных в течение 20 с: а – в закрепленном состоянии относительно струи; б – в свободном состоянии. Ув. × 1100

Схема взаимодействия абразивного зерна и детали представлена на рис. 6.6. На схеме показана вершина абразивного зерна 1, деформирующая металл детали 2. Поскольку скорость движения вершины абразивного зерна изменяется от  $V_0$  до 0, на схеме показано текущее значение скорости  $V$ . По мере продвижения вершины зерна перед ней образуется валик поднятого металла, который является началом процесса стружкообразования. Однако съем металла в этом случае не имеет места, так как скорость движения вершины падает до нуля. Как видно из схемы глубина внедрения вершины абразивного зерна и высота образовавшегося валика в сумме составляют высоту микронеровностей.

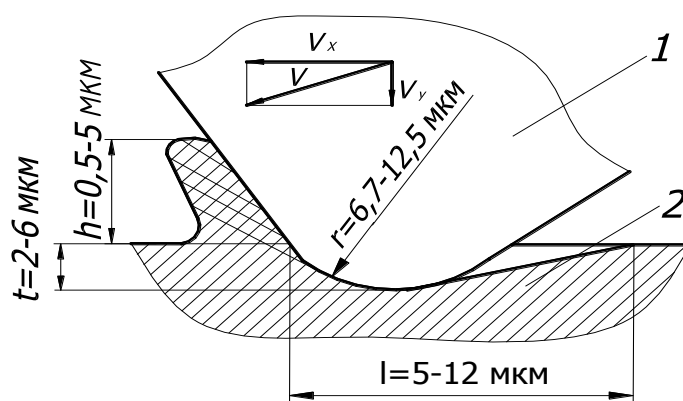


Рисунок 6.6 – Схема взаимодействия вершины абразивного зерна с деталью: 1 – вершина абразивного зерна; 2 – обрабатываемая деталь;  $t$  – глубина внедрения;  $h$  – высота валика;  $l$  – путь резания;  $V$  – скорость резания;  $r$  – радиус сферической вершины

В принятой схеме (рис. 6.6) следует установить характер движения абразивной частицы. В частности, для оценки запаса кинетической энергии абразивной частицы необходимо учитывать не только поступательное, но и вращательное движение вокруг собственного центра тяжести.

Гипотеза о наличии вращательного движения абразивных частиц выдвинута в связи с тем, что движение жидкости, деталей и абразивного материала в рабочей камере задается струями сжатого воздуха. В связи с этим в поперечном сечении образовавшегося потока рабочей смеси (на границах между струями и окружающей рабочей смесью) неизбежно возникает значительный градиент скорости. Действительно,

средняя скорость истечения сжатого воздуха вдоль оси струи составляет 50 – 80 м/с, а средняя скорость общего попутного потока жидкости, абразива и деталей – 1,5 ... 1,8 м/с. Это является причиной возникновения крутящих моментов, приложенных к твердым телам, находящимся в потоке, в том числе и к абразивным частицам.

Необходимость проверки данной гипотезы вызвана тем, что при наличии значительной скорости вращательного движения абразивная частица, имеющая форму многогранника, может воздействовать на деталь как микрофреза – в случае встречного фрезерования или прокатываться по поверхности, не срезая микрообъемов поверхности.

Оценка запаса кинетической энергии вращательного движения единичных абразивных зерен производилась на основании результатов двух опытов. Полированные латунные образцы устанавливались перед соплом таким образом, чтобы в случае значительного запаса кинетической энергии вращения абразивных частиц, закрученных струей (рис. 6.7), следы на поверхности образцов были характерными для микрофрезерования или прокатывания без резания.

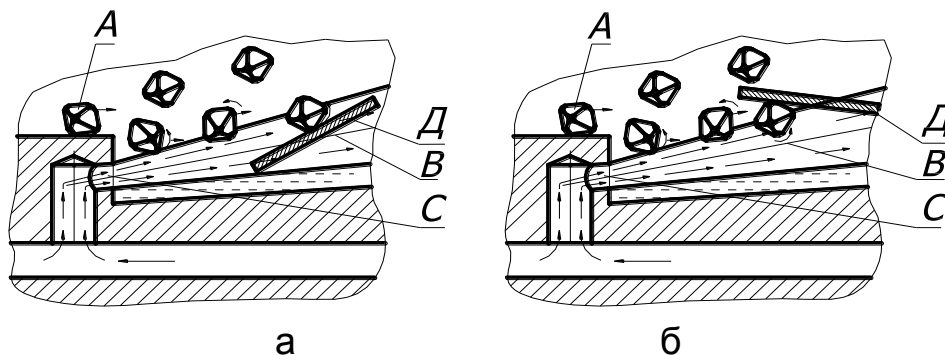


Рисунок 6.7 – Схема проведения эксперимента для оценки запаса кинетической энергии вращения абразивного зерна: А – абразивное зерно; С – воздушное сопло; В – воздушная струя; Д – контрольный образец; а – вероятность встречного резания; б – вероятность попутного резания

На схеме (рис. 6.8) показаны струи сжатого воздуха, которые приводят во вращение жидкость и погруженные в нее абразивные частицы. Абразивные частицы периодически попадают в струи и приобретают в них значительные скорости. В тот момент, когда абразивная частица, движимая попутным потоком, начинает втягиваться в струю, на ее вершину действует более быстрый струйный поток, т.е. сила, приводящая ее во вращение.

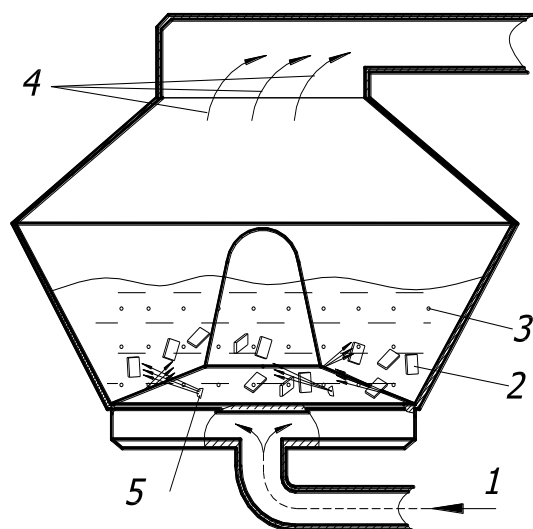


Рисунок 6.8 – Схема действия струй сжатого воздуха на детали и абразивный материал в жидкости: 1 – сжатый воздух; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – абразивное зерно; 4 – отработанный сжатый воздух; 5 – воздушное сопло

Задачей эксперимента являлось определение значимости вращения абразивного зерна при столкновении с деталью.

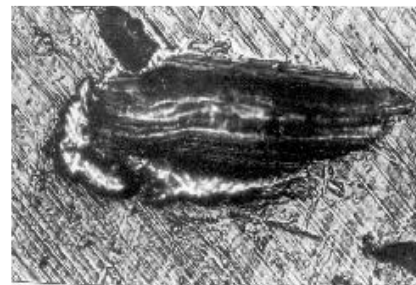
На рис. 6.9 представлены наиболее характерные следы абразивных частиц на полированных латунных образцах. Следы абразивных зерен, полученные в первом и втором экспериментах, не имеют принципиальных отличий. Это свидетельствует о том, что вращение абразивных зерен либо отсутствует, либо энергия их вращения настолько мала по сравнению с энергией поступательного движения, что работа деформации выполняется только за счет последнего. Аналогичные результаты получены зарубежными исследователями: Хатчингзом И. М., Винтером Р. И. и Филдом Д. И. Своими опытами с помощью скоростной съемки авторы показали, что энергия вращения, возникающая после удара сферической частицы о неподвижную мишень, составляет менее 1 % от энергии поступательного движения. В связи с этим, при расчете кинетической энергии, потерянной во время удара, вращение частицы можно не учитывать.

Основная масса единичных следов имеет характерные линии, которые являются отражением субмикрорельефа режущей части абразивного зерна. Это свидетельствует о том, что в локальных зонах контакта абразивной частицы с деталью имеют место высокие давления, возникающие при их взаимодействии. Сосредоточенные на небольших

участках, они вызывают напряжения, превосходящие предел текучести обрабатываемого материала. Наряду со следами, имеющими наплывы металла по кромкам, обнаружены следы, из которых металл срезан за один удар абразивного зерна. Удаление частиц металла с поверхности детали в этом случае идентично срезанию металла при шлифовании периферией абразивного круга. Такие следы являются следствием воздействия абразивного зерна под острым углом к поверхности. Вновь образовавшаяся поверхность имеет характерные параллельные борозды, свидетельствующие о наличии царапания-смятия металла, характерного для обработки абразивным инструментом в закрепленном состоянии. Такой след является частным случаем косоугольного удара, когда абразивное зерно обладает запасом кинетической энергии, достаточным для смятия и полного удаления микрообъема металла.



а



б

Рисунок 6.9 – Следы абразивных зерен на поверхности полированного латунного образца при заданном направлении вращения зерна согласно схеме, приведенной на рис. 6.7:

а – попутное резание; б – встречное резание. Ув. × 850

Подсчет количества следов абразивных зерен на поверхности полированных образцов показал, что процент следов зерен, из которых удален металл, составляет всего 4 – 5 % от их общего числа.

Измерение ширины бороздок на дне следа тупиковой формы (рис. 6.10) указывает на то, что процесс царапания-смятия происходит с изменением кинематического угла резания. Такое изменение возможно в двух случаях: когда в процессе царапания поворачивалась абразивная частица, или поворачивались частица и деталь (рис. 6.11).

Хотя абразивные частицы и детали, попадая в струю сжатого воздуха, где за счет разности скоростей происходит их столкновение, движутся поступательно в одном направлении, основная часть цара-

пин имеет значительную кривизну. Это объясняется тем, что в процессе поступательного движения образцы имеют вращательное движение. В силу значительного градиента скорости в поперечном сечении струи, как указывалось выше, и относительно больших габаритных размеров образца, как и абразивные зерна, детали движутся поступательно, совершая вращательное движение. Один из возможных механизмов образования криволинейной царапины показан на рис. 6.12.

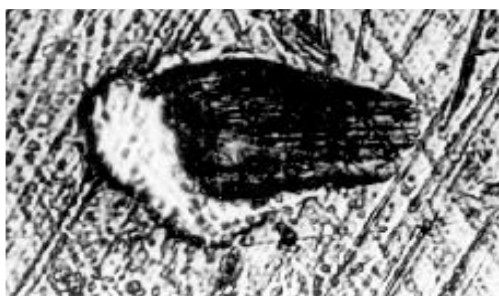


Рисунок 6.10 – След вершины абразивного зерна на поверхности полированного образца из латуни ЛС 59-1. Ув.  $\times 1070$

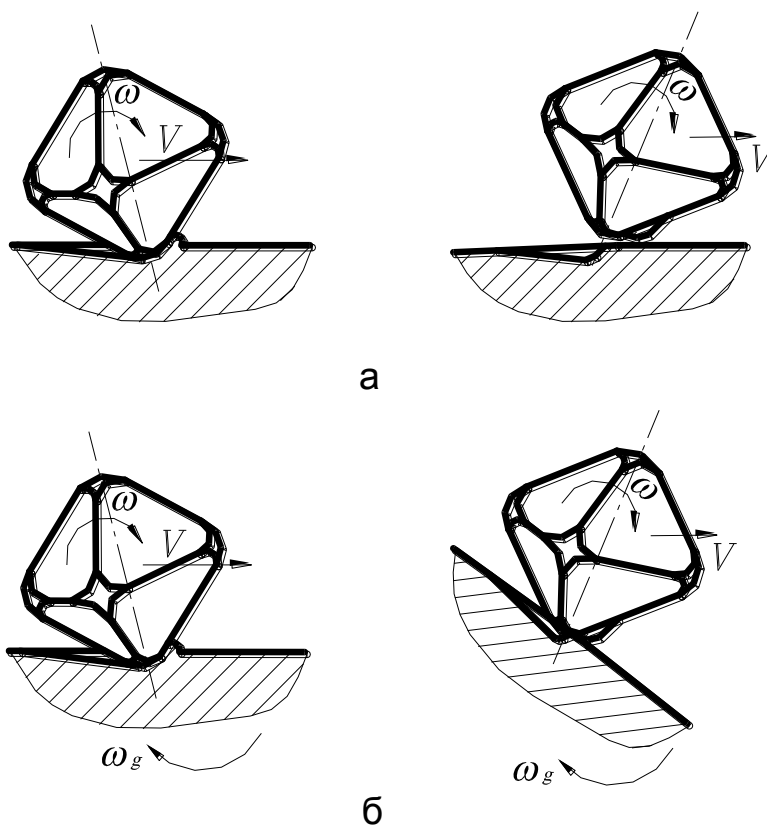


Рисунок 6.11 – Царапание с изменяющимся кинематическим углом резания: а – вращение абразивной частицы; б – вращение детали и абразивной частицы

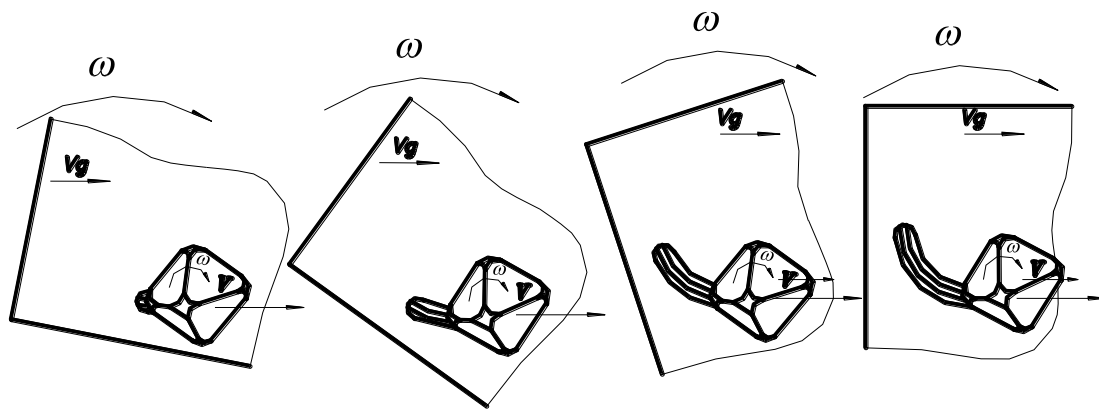


Рисунок 6.12 – Процесс образования криволинейного следа абразивного зерна на поверхности детали:  $\omega$  – угловая скорость вращения детали;  $V_g$  – скорость детали;  $V_a$  – скорость абразивного зерна

Значительно реже на поверхности образцов встречаются следы, представляющие отпечатки вершин, ребер и граней абразивных частиц. В большинстве случаев такие отпечатки имеют рельефную поверхность с сохранившейся окисной пленкой, а также имеют вспученные кромки вокруг образовавшегося углубления.

Таким образом, все множество вероятных столкновений можно разделить на три типа:

- смятие-микрорезание с образованием валика вокруг борозды;
- внедрение в поверхность в результате прямого удара с образованием вспученной кромки вокруг углубления;
- смятие-микрорезание с удалением металла из следа.

На основании результатов исследования [259] можно сделать вывод о том, что постоянство таких параметров как угол атаки, относительная скорость, зернистость абразивных частиц не обеспечивают постоянства деформационных процессов. Это связано с тем, что абразивная частица может иметь остроугольную вершину с одной стороны и тупоугольную с другой, при столкновении частиц с деталью угол между передней гранью и обрабатываемой поверхностью может изменяться в больших пределах, например, для карбида кремния зеленого (63С) от 90 до 0.

На рис. 6.13 показаны наиболее различающиеся схемы возможных столкновений абразивных частиц с обрабатываемой поверхностью. Диапазон изменения угла наклона оси симметрии абразивного зерна к обрабатываемой поверхности в момент столкновения весьма



широк (рис. 6.13). Однако геометрические параметры деформирующей части абразивного зерна (передний и задний углы, а также угол резания) не зависят от этого угла. Постоянство указанных геометрических параметров обусловлено формой вершин абразивных зерен, имеющих сферические поверхности, а также тем, что максимальная глубина внедрения абразивного зерна не превышает величину радиуса его вершины. Поскольку деформирующая часть абразивного зерна имеет криволинейную поверхность, то применение терминов теории резания весьма условно. Каждый из упомянутых углов не может быть выражен какой-либо одной величиной, поскольку измеряется между цилиндрической (вдоль образующей) и сферической поверхностями. Однако некоторое их значение можно определять, спрямляя короткие криволинейные участки сферы.

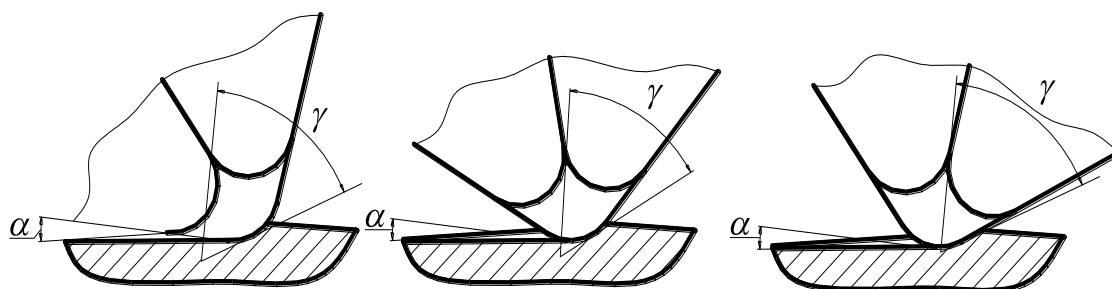


Рисунок 6.13 – Наиболее различающиеся схемы взаимодействия сферической вершины абразивного зерна и детали при их столкновении под острым углом:  $\gamma$  – передний угол;  $\alpha$  – задний угол

В отличие от угла между осью симметрии абразивного зерна и поверхностью детали, изменение глубины внедрения сферической вершины приводит к значительным изменениям характера деформационного процесса. В начальный момент внедрения условный передний угол имеет максимальную отрицательную величину, близкую к  $90^\circ$  (рис. 6.14). По мере внедрения вершины в металл, в контакт вступают новые участки сферической поверхности, и при достижении глубины внедрения, равной радиусу сферы, для точки пересечения обрабатываемой поверхности с касательной к сферической поверхности (рис. 6.14) передний угол станет равным нулю. Это значительно облегчает процесс стружкообразования. Однако детальное изучение царапин и поднятого вокруг них металла показывает, что в таких случаях стружка все же не образуется, и металл от детали не отделяется.

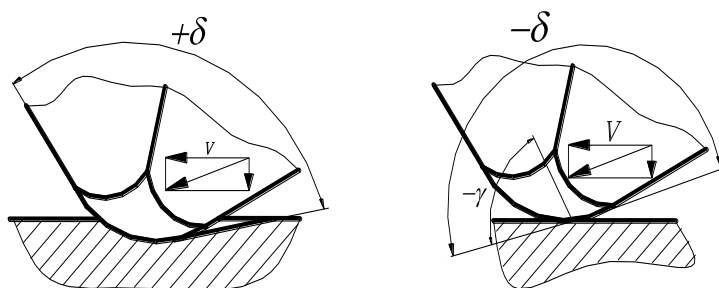


Рисунок 6.14 – Схема изменения угла резания и переднего угла с изменением глубины внедрения сферической вершины абразивного зерна:  $\delta$  – угол резания;  $\gamma$  – передний угол

## 6.2. Исследование формообразования поверхности обрабатываемой детали в процессе абразивной обработки затопленными струями

Процесс деформирования микрообъема поверхностного слоя обрабатываемой детали абразивной частицей может быть рассмотрен на основе положений ряда известных теорий: теории удара, теории резания и более общей теории пластичности. Поскольку начальная скорость внедрения вершины абразивного зерна в металл должна быть равна или меньше скорости его движения относительно детали, для определения указанных скоростей проведена скоростная съемка процесса обработки на натуральной модели. Из кинограмм движения абразивных частиц и деталей установлено, что в воздушной струе, истекающей в жидкость, скорость абразивных зерен из карбида кремния зеленого (63С 63П) и фарфоровых шариков диаметром 2,6 мм составляет 2,0 – 3,1 м/с, а скорость деталей из латуни ЛС 59-1 (габаритными размерами 10×25×1,5 мм) – 1,4 м/с. Очевидно, что разность скоростей абразивной частицы и детали близка к начальной скорости внедрения и составляет от 0,6 до 2,0 м/с. Скорость абразивных зерен и деталей изменяется в указанных диапазонах по мере удаления от среза сопла.

На основе полученных данных построены графики (рис. 6.15), иллюстрирующие изменение скоростей абразивных зерен (кривая 1) и контрольных образцов (кривая 2) при удалении от среза сопла. Из графиков видно, что скорость абразивных зерен и деталей на участке до 65 мм от среза сопла увеличивается, а далее – уменьшается.

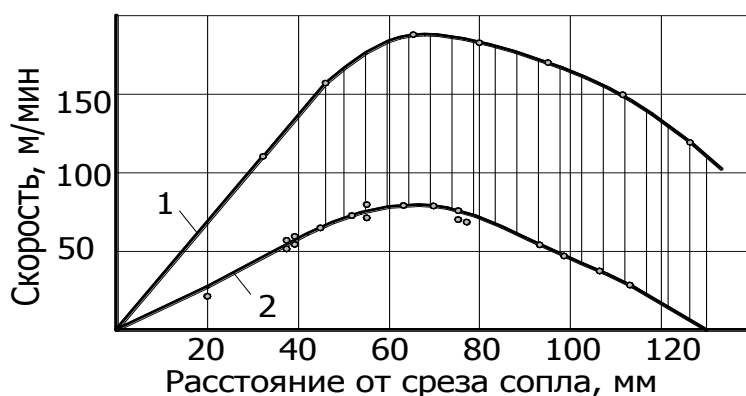


Рисунок 6.15 – Изменение мгновенных скоростей абразивных зерен карбида кремния зеленого (63С 63П, кривая 1) и контрольных образцов (кривая 2) по мере удаления от среза сопла: давление сжатого воздуха – 0,17 МПа, диаметр сопла – 2 мм, рабочая жидкость – вода, единичная масса контрольных образцов – 1 г

Относительная скорость абразивных зерен и деталей также увеличивается на участке до 65 мм (на графике относительная скорость представляет собой вертикали между кривыми 1 и 2). Несмотря на дальнейшее уменьшение скоростей абразива и деталей, их относительная скорость сохраняется на участке до 120 мм. При такой скорости деформация известных металлов и сплавов происходит без увеличения предела текучести. Поскольку столкновение абразивной частицы и детали происходит в жидкости или воздушной струе, где поверхности твердых тел смочены жидкостью, развитие удара значительно растягивается во времени. Кроме того, наличие жидкостной пленки приводит к увеличению площади контакта на 20 – 25 %, что вызывает диссипацию механической энергии при столкновении [156]. На основании изложенного можно сделать вывод о том, что рассматриваемый процесс из-за наличия жидкости значительно отличается от условий построения теории удара.

### **6.3. Исследование напряжений в поверхностном слое детали после абразивной обработки затопленными струями**

В силу того, что процесс струйно-абразивной обработки осуществляется за счет столкновения абразивных зерен с деталями, поверхностный слой деталей подвергается структурным изменениям без

полной рекристаллизации (температура в рабочей камере 6 – 8 °С), т.е. создается поверхностный наклеп.

Для выявления наличия и определения толщины наклепанного слоя и знака напряжений производилась абразивная обработка пластин из вольфрамо-титанового сплава ВТ1-0 и стали 65Г габаритными размерами 50×20×0,12 мм. Для выявления наличия поверхностного наклепа пластины скреплялись попарно таким образом, чтобы одна сторона каждой из них была изолирована от абразивного воздействия. В этом состоянии пакеты подвергались обработке затопленными струями в установке в течение тридцати минут. После обработки пакеты рассоединили и по степени изгиба, который возникал под действием поверхностного наклепа и свидетельствовал о статически напряженном состоянии материала, оценивали его относительную величину. Толщина наклепанного слоя определялась методом "косого сечения" и методом стравливания наклепанного слоя.

Для определения толщины наклепанного слоя методом "косого сечения" пластина заливалась протокрилом и срезалась под углом 4° к исследуемой поверхности. Сечение пластины полировалось и травливалось 40 % раствором серной кислоты с добавлением 0,01 части фтористого натрия (NaF), после чего структура сечения изучалась под микроскопом.

Второй метод определения толщины наклепа заключался в удалении этого слоя стравливанием 40 % раствором серной кислоты с добавлением фтористого натрия. По мере стравливания наклепанного слоя пластина выравнивалась; после достижения необходимой плоскостности толщина детали замерялась, и ее величина вычиталась из первоначальной толщины. Характер напряжения поверхностного слоя определялся направлением стрелы прогиба пластины относительно обработанной поверхности. Поскольку после обработки исследуемая деталь становится выпуклой в сторону обработанной поверхности, в ней возникают сжимающие касательные напряжения. Сделанный вывод основан на том, что при наклепывании элементы поверхностного слоя расширяются вдоль обрабатываемой поверхности, удлиняя ее, и стремясь изогнуть пластину. Этому воздействию препятствуют внутренние и другие ненаклепанные слои металла, поскольку они при этом подвергаются растягиванию и изгибу. В результате уравновесившегося взаимодействия наклепанный слой удерживается внутренними слоями

металла в сжатом состоянии, а внутренние слои подвергаются при этом растяжению наклепанным слоем.

Усредненное значение напряжения в наклепанном слое в зависимости от прогиба пластины может быть определено по известной формуле [199]:

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{8EIf}{t^2 \varepsilon \Delta F}, \quad (6.1)$$

где  $\sigma_{\text{ср}}$  – среднее значение напряжения в наклепанном слое;  $E$  – модуль упругости металла;  $I$  – момент инерции пластины;  $\varepsilon$  – расстояние между центром тяжести наклепанного слоя и всего сечения пластины;  $t$  – длина пластины;  $f$  – прогиб пластины;  $\Delta F$  – площадь поперечного сечения наклепанного слоя.

Шероховатость поверхности после струйно-абразивной обработки измерялась на профилографе-профилометре модели 201, с записью на электротермическую бумагу. В качестве контрольных образцов использовались полированные латунные пластины, исходная шероховатость которых измерялась на интерферометре модели МИИ-4У4.2.

Единичные следы зерен абразива на обработанной поверхности изучались и фотографировались через специально изготовленный переходник, присоединяемый к верхнему окуляру и через нижнее окно интерферометра с помощью фотоаппарата "Зенит-В" на мелкозернистую пленку "Микрат 200" и "Микрат 300".

Внешний вид обработанных поверхностей и кромок изучался и фотографировался под малым инструментальным микроскопом модели ММИ.

Геометрические параметры заусенцев и шероховатость поверхности с высотой микронеровностей более 4 мкм измерялись на двойном микроскопе модели МИС-11.

#### **6.4. Разработка математической модели энергетических возможностей затопленных воздушных струй при воздействии на обрабатываемые детали**

Экспериментальные исследования взаимосвязи между давлением используемого сжатого воздуха и суммарной массой одновременно обрабатываемых деталей показали, что для каждого типа деталей су-

ществует их оптимальное соотношение, при котором достигается максимальная производительность обработки. На рис. 6.16 представлены графики, иллюстрирующие зависимость производительности обработки (выраженной металлосъемом в единицу времени) от давления, используемого сжатого воздуха при изменении суммарной массы обрабатываемых деталей от 285 г до 475 г единичной массой 0,95 г. Как видно, для каждой суммарной массы обрабатываемых деталей имеется оптимальное давление сжатого воздуха, при котором съем металла максимальный. Поскольку для каждого типа деталей оптимальное соотношение давления, расхода сжатого воздуха и суммарной массы загрузки может оказаться многовариантным, необходимо разработать математическую модель, позволяющую рассчитать диаметр сопла и давление сжатого воздуха по заданным параметрам деталей.

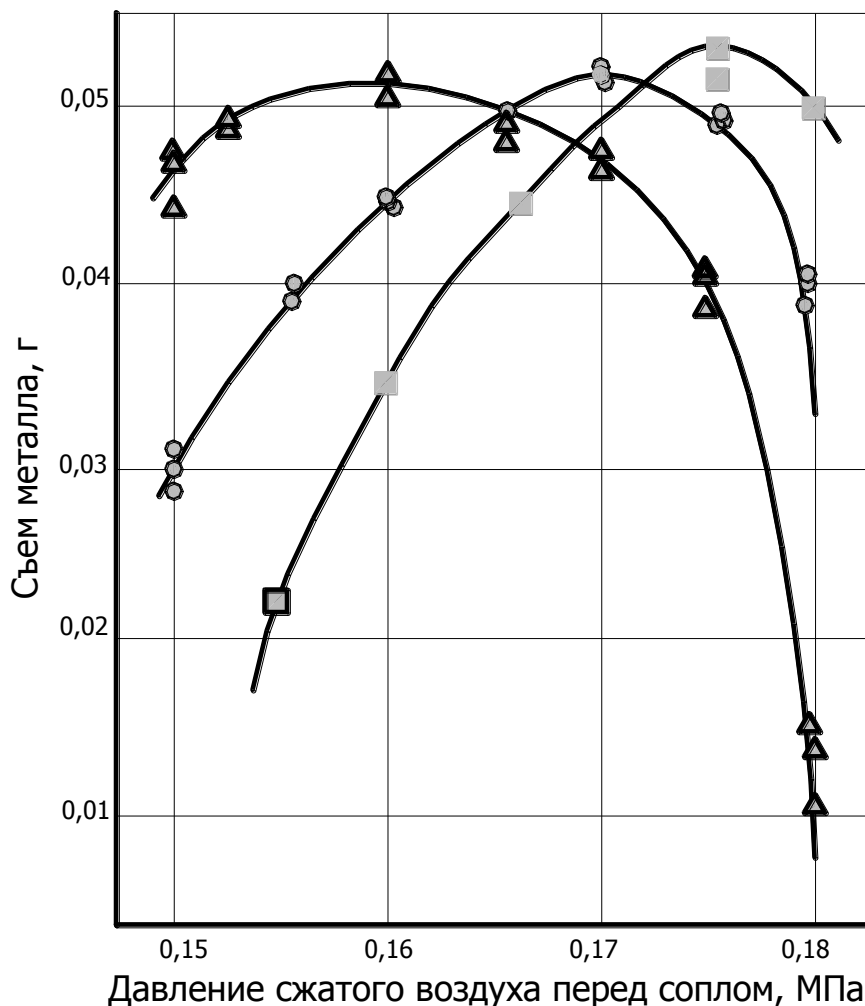


Рисунок 6.16 – Зависимость величины съема металла от давления сжатого воздуха при суммарной массе обрабатываемых деталей:  
 Δ – 300 деталей; o – 500 деталей; □ – 700 деталей

Математическая модель эмпирической зависимости величины максимального количества одновременно обрабатываемых деталей, приходящихся на одно сопло, построена на основании результатов проведенного дробного факторного эксперимента типа  $2^{4-1}$  (1/2 реплики). Для удобства расчета при проектировании абразивных установок для обработки затопленными струями математическая модель представлена в двух видах: в виде зависимости суммарной массы обрабатываемых деталей (в граммах) и в виде числа одновременно обрабатываемых деталей (в штуках) от диаметра сопла  $d$ , давления сжатого воздуха  $P_a$ , единичной массы деталей  $m_d$  и их насыпной плотности. Значения факторов, интервалов и уровней варьирования сведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1 – Факторы, интервалы и уровни варьирования

Факторы	Уровни варьирования			Интервалы варьирования
	+1	0	-1	
$x_1$ – давление сжатого воздуха, $P_a$ , МПа	0,4	0,3	0,2	0,1
$x_2$ – диаметр воздушного сопла, $d$ , мм	3	2,5	2	0,5
$x_3$ – единичная масса детали, $m_d$ , г	5	2,75	0,5	2,25
$x_4$ – насыпная плотность деталей, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	8,5	5,55	2,6	2,85

Матрица планирования экспериментов и результаты опытов приведены в табл. 6.2.

Условные обозначения в табл. 6.2:  $Y_i$  – результат в  $i$ -м опыте;  $\lg Y_i$  – логарифм результата в  $i$ -м опыте;  $S_D^2$  – дисперсия ошибки в параллельных опытах;  $\Delta$  – разность между параллельными опытами;  $S_{ад}^2$  – погрешность отклика;  $\hat{Y}_i$  – отклик в  $i$ -м опыте.

Для построения математической модели рассчитаны коэффициенты уравнения регрессии по формулам с учетом знаков, указанных в матрице [1]:

$$b_0 = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_7 + Y_8}{8};$$

$$b_1 = \frac{Y_1 - Y_2 + Y_3 - Y_4 + Y_5 - Y_6 + Y_7 - Y_8}{8};$$

$$b_2 = \frac{Y_1 - Y_2 - Y_3 + Y_4 + Y_5 - Y_6 - Y_7 + Y_8}{8};$$

$$b_3 = \frac{-Y_1 - Y_2 - Y_3 - Y_4 + Y_5 + Y_6 + Y_7 + Y_8}{8};$$

$$b_4 = \frac{-Y_1 - Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_5 + Y_6 - Y_7 - Y_8}{8}.$$

Таблица 6.2 – Матрица планирования дробного факторного эксперимента  $2^{4-1}$  (1/2 реплики)

Рандомизация опытов	Фиктивная переменная	Давление сжатого воздуха, $x_1$	Диаметр сопла, $x_2$	Единичная масса детали, $x_3$	Насыпная плотность деталей, $x_4$	Максимально допустимая масса деталей, Q, г					Максимально допустимое число деталей, N, шт.				
						$Y_i$	$\lg Y_i$	$S_D^2 = \frac{\Delta^2}{2}$ $\times 10^{-2}$	$S_{ад}^2$ $\times 10^{-2}$	$\hat{Y}_i$ Q, г	$Y_i$	$\lg Y_i$	$S_D^2 = \frac{\Delta^2}{2}$ $\times 10^{-2}$	$S_{ад}^2$ $\times 10^{-2}$	$\hat{Y}_i$ N, шт.
4	+	+	+	-	-	161	2,206	0,3	4	160,8	323	2,5	0,23	25	323,5
3	+	-	-	-	-	65,7	1,81	0,402	0,25	65,65	126	2,09	0,1	36	126,6
8	+	+	-	-	+	108,8	2,03	0,24	10	109,8	200	2,3	0,36	1	199,9
5	+	-	+	-	+	66,62	1,82	0,464	47	67,31	127	2,1	0,08	138	125,8
7	+	+	+	+	+	66,7	1,82	0,35	5,9	67,47	12	1,07	0,38	36	11,4
2	+	-	-	+	+	27,26	1,43	0,354	7,8	27,54	4	0,6	0,2	1	4,1
1	+	+	-	+	-	65,9	1,81	0,302	1	65,8	11	1,04	0,26	1	10,9
6	+	-	+	+	-	40,3	1,6	0,402	1,4	40,18	7	0,84	0,23	1,6	6,87

Уравнение регрессии с учетом рассчитанных коэффициентов:

$$Y_{N(Q)} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4.$$

После подстановки получили:

$$Y_N = 1,56 + 0,16x_1 + 0,06x_2 - 0,68x_3 - 0,05x_4;$$

$$Y_0 = 1,81 + 0,15x_1 + 0,0045x_2 - 0,15x_3 - 0,04x_4.$$

Указанные зависимости могут быть аппроксимированы степенными функциями:

$$Q = C \cdot P_a^\gamma \cdot d^\lambda \cdot m_D^k \cdot \rho^q; \quad (6.2)$$

$$N = C' \cdot P_a^{\gamma^1} \cdot d^{\lambda^1} \cdot m_D^{k^1} \cdot \rho^{q^1}, \quad (6.3)$$



где  $C, C'$  – коэффициенты, численно равные средней величине параметра оптимизации в исследуемой области;  $\gamma, \gamma^1, \lambda, \lambda^1, k, k^1, q, q^1$  – показатели степени.

В результате логарифмирования степенные функции преобразуются в линейные уравнения:

$$y_1 = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4;$$

$$y_2 = \beta_0^1 + \beta_1^1 x_1 + \beta_2^1 x_2 + \beta_3^1 x_3 + \beta_4^1 x_4.$$

где  $y_1$  и  $y_2$  – логарифмы  $Q$  и  $N$  соответственно;  $x_1, x_2, x_3, x_4$  – логарифмы  $P_a, d, m_d, \rho$ .

Кодирование факторов производится при помощи уравнений преобразования:

$$x_1 = \left[ \frac{2(\lg P_a - \lg P_{a.\max})}{\lg P_{a.\max} - \lg P_{a.\min}} + 1 \right];$$

$$x_2 = \left[ \frac{2(\lg d - \lg d_{a.\max})}{\lg d_{a.\max} - \lg d_{a.\min}} + 1 \right];$$

$$x_3 = \left[ \frac{2(\lg m - \lg m_{\max})}{\lg m_{\max} - \lg m_{\min}} + 1 \right];$$

$$x_4 = \left[ \frac{2(\lg \rho - \lg \rho_{\max})}{\lg \rho_{\max} - \lg \rho_{\min}} + 1 \right].$$

С учетом кодирования факторов с помощью уравнений преобразования, матрицы планирования дробного факторного эксперимента и расчета логарифмов коэффициентов уравнений регрессии и последующего потенцирования полученные уравнения представляются в виде степенной функции:

$$N = 194,2 \cdot \frac{\rho^{1,06} \cdot d^{0,67}}{m_d^{1,36} \cdot \rho^{0,19}}, \text{ шт.};$$

$$Q = 217,6 \cdot \frac{\rho \cdot \sqrt{d}}{m_d^{0,3} \cdot \rho^{0,15}}, \text{ г.}$$

Полученные зависимости позволяют рассчитывать наиболее важные параметры, необходимые для проектирования абразивных установок с обработкой затопленными струями. В частности, при наличии адекватных моделей энергетических возможностей воздушной струи, легко решается компромиссная задача выбора оптималь-

ных комбинаций давления воздуха в пределах 0,2 – 0,4 МПа и диаметра сопел в пределах 2 – 3 мм при обработке деталей с массой от 0,5 до 5 г и насыпной плотностью от 2,6 г/см<sup>3</sup> (для сплавов на основе алюминия) до 8,5 г/см<sup>3</sup> (для сплавов на основе меди).

Полученное математическое описание технологических и конструктивных параметров было положено в основу проектирования струйно-абразивных установок и процессов для зачистной и отделочной обработки мелких деталей малой жесткости.

## **6.5. Исследование влияния технологических и конструктивных параметров на производительность и качество обработки**

### **6.5.1. Исследование влияния конструктивных особенностей рабочей камеры на производительность процесса**

Важнейшим условием достижения высоких положительных результатов при струйно-абразивной обработке являются два очевидных фактора: обеспечение равномерного перемешивания обрабатываемых деталей и всестороннее воздействие абразивных зерен на поверхности обрабатываемых деталей. Эффективность процесса может быть утрачена из-за нарушения пропорции (баланса) между этими двумя факторами. Так перемешивание, т.е. транспортировка деталей и абразивных зерен по замкнутой траектории внутри рабочей камеры, с высокой скоростью противоречит условию достижения существенной разности скоростей между абразивными зернами и обрабатываемыми деталями. С другой стороны, интенсивное локальное воздействие абразивных зерен на обрабатываемые поверхности без должного перемешивания приводит к искажению геометрической формы отдельных деталей и неравномерной обработке партии. На рис. 6.17 представлены принципиальные схемы компоновки воздушных сопел в рабочей камере, заполненной абразивной суспензией.

В процессе обработки по схеме 1 (рис. 6.17) воздух подается снизу вверх, в связи с чем создается режим псевдокипения с весьма небольшой величиной съема металла в единицу времени. Такой режим приемлем для деталей малой массы. Последние в процесс обработки должны находиться во взвешенном состоянии и в постоянном

движении. Способность деталей под действием струйных течений удерживаться во взвешенном состоянии определяется отношением массы детали к площади ее поверхности, которое не должно быть более  $3 \times 10^{-3}$  г/мм<sup>2</sup>. Кроме того, режим равномерной обработки зависит от общей массы загруженных деталей и сохраняется при весьма малой жесткости и сложной пространственной форме суммарной массе, не превышающей 180 – 200 г.

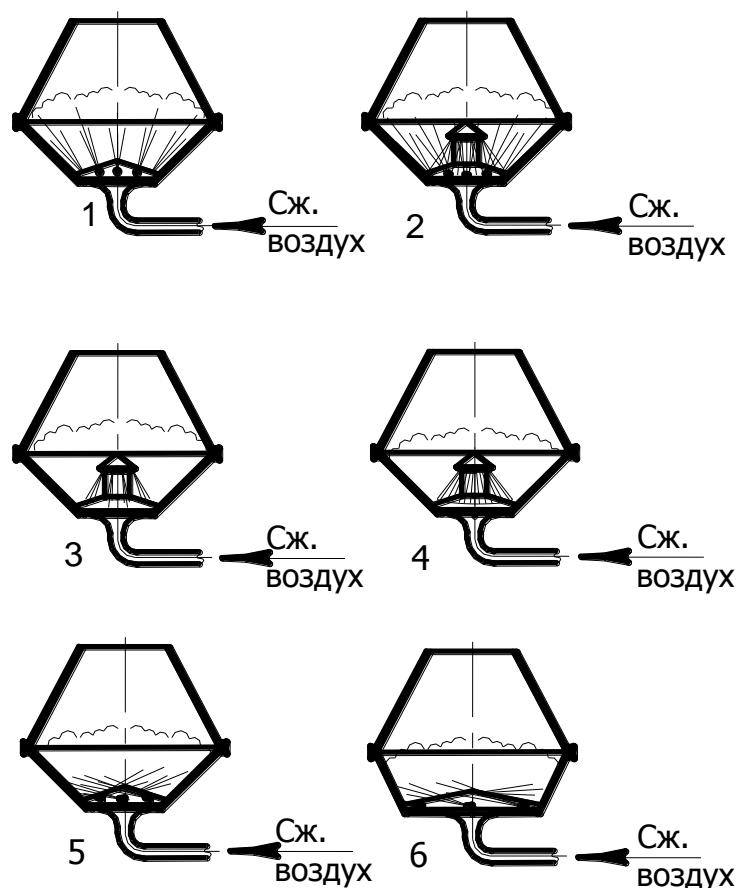


Рисунок 6.17 – Схема компоновки элементов рабочей камеры объемом до 3 литров

Обработка по схеме 2 (рис. 6.17) приводит к значительному распылению и уносу жидкости из рабочей камеры. В связи с этим стабильность обработки и перемешивания нарушается, создаются условия для интенсивного износа внутренней облицовки.

Хорошие результаты получены при обработке деталей из латуни, бронзы, стали и др. материалов по схеме 3. При обработке листовых штампованных деталей с заусенцами высотой 0,1 – 0,12, шириной у

основания 0,08 – 0,1 мм обеспечивается качественная равномерная обработка с небольшим преобладанием металлосоема на плоских поверхностях. Это связано с прилеганием плоских деталей к донной части рабочей камеры под напором струй. Оси сопел направлены под углом 70 – 85° к горизонту, что обеспечивает, наряду с обработкой, транспортировку деталей от струи к струе. Однако при создании режима интенсивного перемещения массы загрузки, достигаемого увеличением напора струй, часть их энергии приходится на донную поверхность рабочей камеры, подвергая ее гидроабразивной эрозии. Образование углублений в местах непосредственного воздействия струй является причиной появления фонтанирующих возвратных потоков. При этом транспортировка деталей от струи к струе ухудшается, а процесс эрозии быстро прогрессирует.

Повышение стойкости в условиях движущейся гидроабразивной среды за счет подбора соответствующих физико-механических свойств материала донной части позволяет повысить срок службы рабочей камеры в 2 – 2,5 раза [25]. Вместе с тем, этого недостаточно для эксплуатации установки в производственных условиях. Во избежание образования локальных разрушений донной части рабочей камеры был опробован способ подачи сжатого воздуха через щелевидное сопло по схеме 4. Однако, несмотря на сохраненные расход и давление сжатого воздуха, производительность обработки (величина металлосоема) резко уменьшилась. Это можно объяснить уменьшением градиента скорости в поперечном сечении теперь уже сплошной плоской струи, а также уменьшением ее напора. Кроме того, эрозия поверхности не уменьшилась, а лишь распределилась по поверхности донной части завихрителя в виде замкнутого углубления.

Рассмотренные схемы могут быть охарактеризованы одним общим признаком – они обеспечивают движение массы загрузки по крутой, замкнутой спирали приближенно тороидальной формы. Движение массы загрузки по пологой спирали той же формы обеспечивается компоновкой сопел по схемам 5 и 6. Такая компоновка элементов рабочей камеры обеспечила более высокие показатели степени перемешивания и величины металлосоема. Высокий уровень перемешивания, а, следовательно, и равномерности обработки партии деталей, объясняется образованием сплошного потока рабочей жидкости, увлекающего за собой абразивные частицы и детали. В тех случаях, когда

конструкцией рабочей камеры предусматривалась обработка в основном за счет разности скоростей деталей и абразивных частиц (схемы 5, 6), свободно движущихся в струях, наблюдалось избирательное воздействие абразива на поверхности деталей. Поверхности деталей со стороны наименьшего лобового сопротивления подвергались более интенсивной обработке, чем поверхности той же детали со стороны наибольшего лобового сопротивления. Это объясняется тем, что максимальная разность скоростей и, следовательно, продолжительность нахождения детали в струе (при условии равновероятного числа различных ориентаций детали, в том числе наибольшим и наименьшим лобовым сопротивлением к потоку) по данным скоростной съемки процесса, приходится на тот случай, когда деталь займет положение, соответствующее наименьшему лобовому сопротивлению.

Этот эффект подтверждается результатами экспериментальных исследований. Для двух случайных положений плоской детали (наибольшим и наименьшим лобовым сопротивлением к вектору скорости потока), в первом случае, сила, способствующая приближению абразивного зерна к детали, на 1 – 2 порядка меньше, чем во втором случае. Таким образом, при использовании рабочих камер по схемам 5, 6 для обработки, например, листовых штампованных деталей преимущественное воздействие абразивных частиц приходится на их кромки со стороны торцовых поверхностей. Толщина же деталей остается практически неизменной.

Сравнительные исследования обработки по схемам, приведенным на рис. 6.17, позволили выявить наиболее прогрессивную конструкцию рабочей камеры, которая обеспечивает в совокупности наибольший металлосъем, интенсивное перемешивание, долговечность внутренней облицовки и экономичный расход сжатого воздуха.

Как установлено ранее, съем металла при обработке достигается в те моменты, когда детали находятся непосредственно в струях. Общими требованиями, предъявляемыми к размерам рабочей камеры, являются: отсутствие застойных зон; сохранность или хотя бы минимальные потери жидкости в ходе технологического процесса; возможность механизированной выгрузки и отделения деталей по окончании обработки.

Таким образом, эффективная длина струи определяет расстояние между соплами, количество сопел ограничивается суммарным

расходом сжатого воздуха. В свою очередь, расход сжатого воздуха ограничивается условием минимальной потери технологической жидкости, т.е. абразивной суспензии.

Поскольку длина струи с эжектированными абразивными частицами зависит от давления сжатого воздуха и диаметра сопла, разработана математическая модель, представляющая собой уравнение для определения длины струи, истекающей в жидкость:

$$L = 124,3 \cdot P_a^{0,9} \cdot d^{1,3}, \quad (6.10)$$

где  $P_a$  – давление сжатого воздуха, МПа;  $d$  – диаметр сопла, мм; 124,3 – коэффициент, учитывающий плотность, вязкость, температуру и др. параметры сжатого воздуха и жидкости.

Уравнение показывает степень влияния наибольших важных параметров на предельную длину действия абразивных зерен.

Полученная зависимость весьма сходна с формулой для определения расхода сжатого воздуха, приведенной в работе [160]:

$$A = 4,68P_a \cdot d^2, \quad (6.11)$$

где  $P_a$  – давление сжатого воздуха перед соплом, МПа;  $d$  – диаметр выходного сечения сопла, мм.

Приведенные зависимости иллюстрируются полученными графиками (рис. 6.18), на которых показаны две эквидистантные поверхности, одна из которых является математической моделью длины струи в воде в зависимости от давления сжатого воздуха и диаметра сопла, а вторая представляет собой расход сжатого воздуха в зависимости от тех же параметров. На основании подобия зависимостей можно сделать вывод о том, что длина распространения струи, несущей абразивные частицы в рассматриваемом диапазоне, пропорциональна расходу сжатого воздуха. Эта закономерность может быть использована для контроля технологического процесса на промышленной установке с помощью стандартного расходомера сжатого воздуха.

Скоростная съемка позволила установить максимальную скорость абразивных частиц на участке от 20 до 60 мм от среза сопла. Поскольку скорость абразивных зерен на расстоянии 60 – 80 мм резко уменьшается, расстояние между соплами при упомянутых параметрах не должно превышать 60 мм.

При проектировании рабочей камеры промышленной установки сопла были размещены в углублениях, которые предохраняют их от

абразивного износа. В связи с этим поверхность дна рабочей камеры образуется чередующимися впадинами и прямыми участками, которые также, выполняя роль трамплинов, способствуют переворачиванию и перемешиванию плоских деталей. Высота трамплинов (или глубина впадин) определяет размеры теневых участков для движущейся массы деталей. Последние, после отрыва от трамплинов, могут попасть лишь в малоактивные участки струй. В связи с этим высота трамплинов принимается минимальной, но достаточной для размещения воздушных сопел. Вариант компоновки системы сопел (завихрителя) представлен на рис. 6.19, а внешний вид рабочей камеры для обработки затопленными струями – на рис. 6.20.

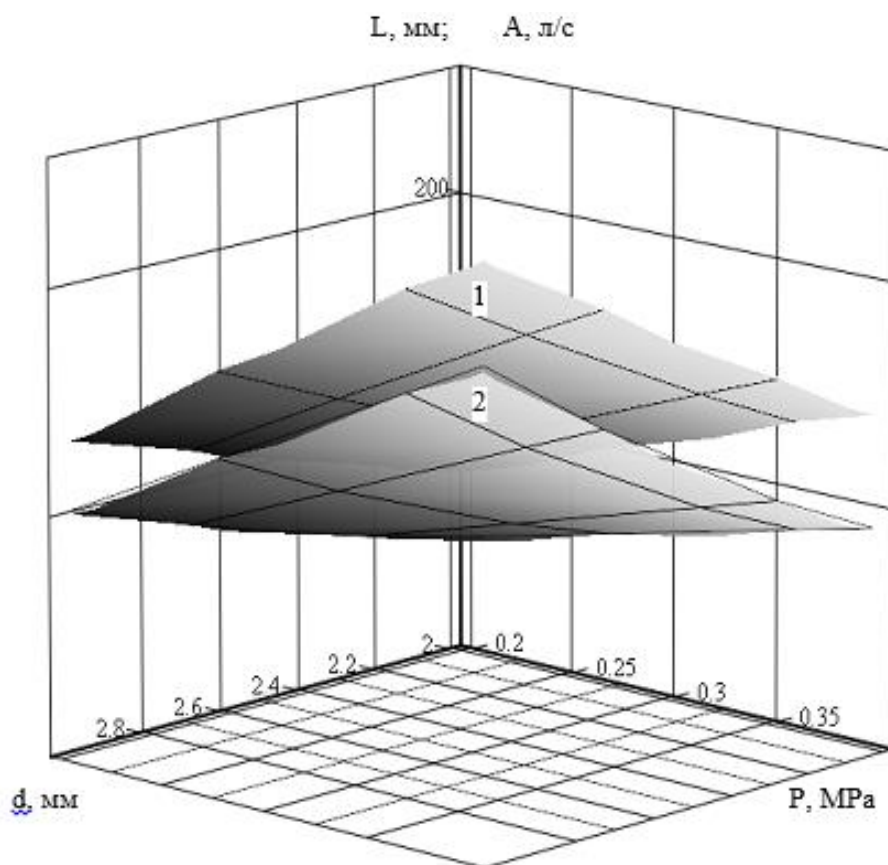


Рисунок 6.18 – Влияние давления сжатого воздуха  $P$  и диаметра сопел  $d$  на длину действия воздушной струи, затопленной абразивной суспензией (1); на расход сжатого воздуха (2)

Немаловажным условием успешной эксплуатации оборудования для обработки затопленными струями являются меры, предотвращающие засорение сопел после отключения подачи сжатого воздуха, поскольку их диаметр соизмерим с размерами абразивных зерен.



Рисунок 6.19 – Внешний вид соплового устройства



Рисунок 6.20 – Внешний вид рабочей камеры для обработки затопленными струями

### **6.5.2. Зависимость производительности обработки от конфигурации воздушных сопел**

Воздушные сопла являются важнейшими конструктивными элементами оборудования для отделочной обработки затопленными струями. Истечение воздушных струй в жидкость, содержащую абразивный материал, сопровождается эжекцией зерен и сообщением им определенных ускорений. Очевидно, что производительность обработки находится в прямой зависимости от количества абразивных зерен, вовлеченных в воздушные струи.

Этими исходными данными обусловлена постановка задачи: выявить конструкции воздушных сопел, обеспечивающих наиболее эффективные условия обработки, а также надежное перемешивание мелких деталей малой жесткости. Поскольку абразивные зерна присоединяются к струе после среза сопла, т.е. из среды, в которую подают-



ся струи сжатого воздуха, важной является способность струй присоединять к себе абразивные зерна.

При исследовании различных конструкций сопел (рис. 6.21) для определения длины и поперечного сечения рабочей части струи, несущей абразивные частицы, способные совершать работу, перед соплом поочередно устанавливали неподвижные экраны.

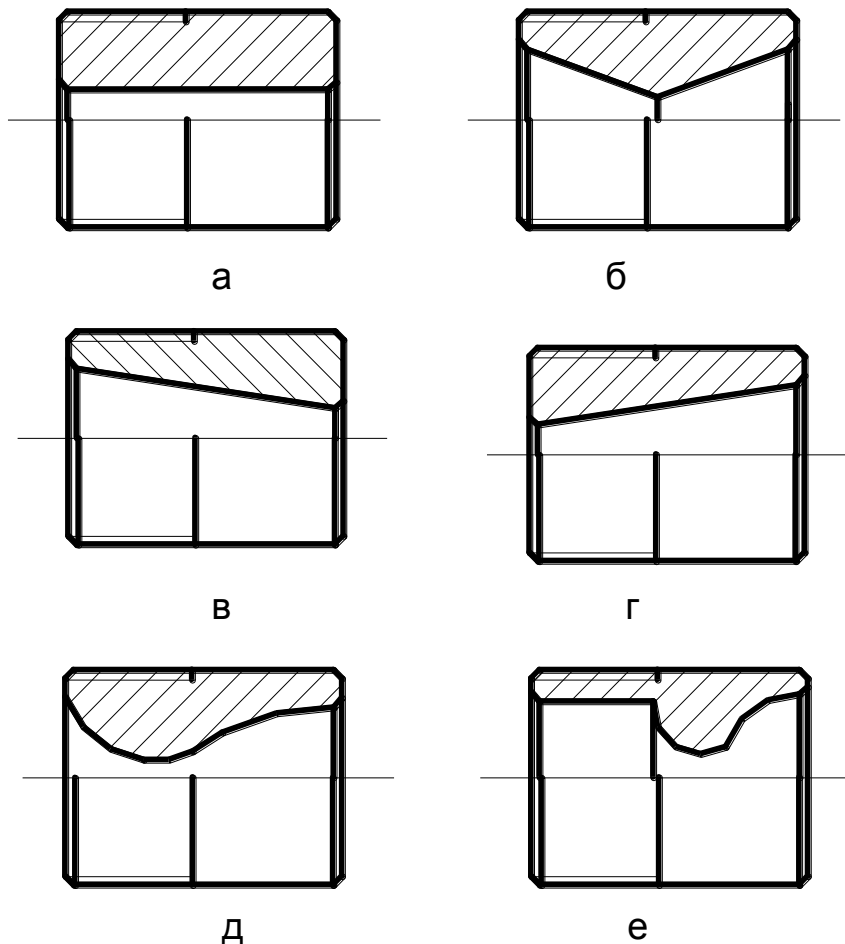


Рисунок 6.21 – Конструкции каналов сопел: а – цилиндрическое; б – со встречными конусами; в – с обратным конусом; г – с прямым конусом; д – сопло Лавалья; е – укороченное сопло Лавалья

Экраны представляли собой полированные латунные пластины, которые устанавливали на расстоянии от среза сопла, равном 3, 5, 10, 30, 60 и 90 мм. Полученные следы позволили установить зоны эжектирования абразивных зерен в струю, количество зерен, проходящих через поперечное сечение струи в единицу времени, а также оценить изменение запаса кинетической энергии абразивных зерен по мере их удаления от среза сопла путем сравнения глубины вмятин в разных

сечениях. В этих экспериментах наиболее важными являются не очертания и скорость воздушной струи в жидкости, а наличие и запас кинетической энергии абразивных зерен, способных совершать работу деформации. Критерием выбора конфигурации сопел принята их эжекционная способность. Установлено, что струи сжатого воздуха перед входом в абразивную суспензию на относительно коротком участке движутся в свободном объеме, где происходит их расширение. В продольном сечении, вытекающая из сопла струя, имеет прямолинейные границы начального участка (рис. 6.22), а при продолжении, в целом, образует усеченный конус. Одним из оснований этого конуса является сечение сопла. Второе представляет собой некоторую площадку, сливающуюся с общим потоком.

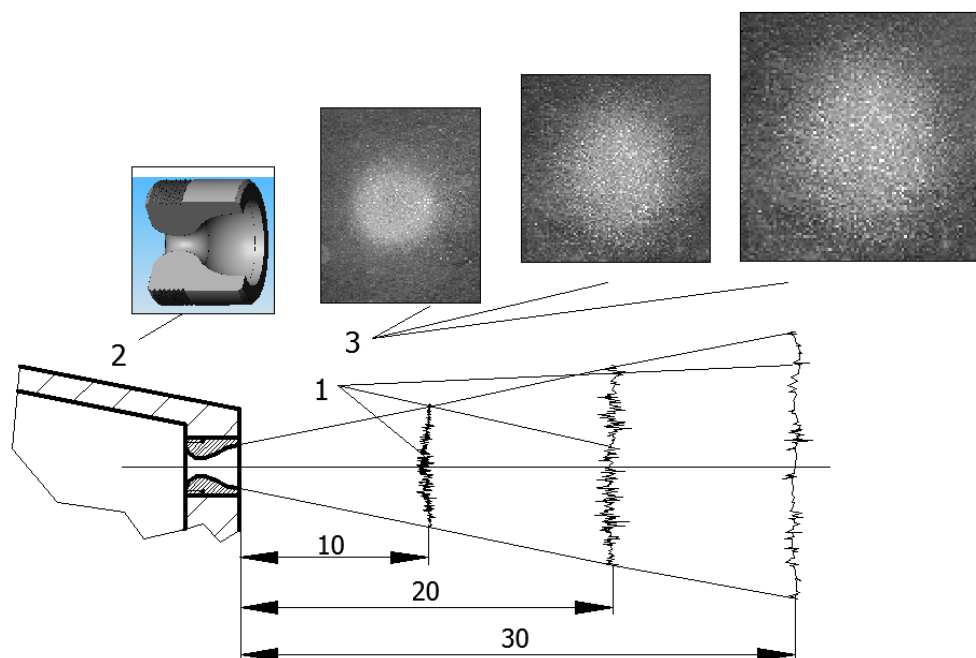


Рисунок 6.22 – Структура воздушной струи, затопленной абразивной суспензией, истекающей из сопла Лаваля, полученная на основе профилограмм: 1 – профилограммы отпечатков абразивных зерен на полированных латунных экранах, обработанных в течение 3-х секунд; 2 – сверхзвуковое сопло Лаваля в разрезе; 3 – фотографии отпечатков

## 6.6. Экспериментальные исследования производительности процесса и режимов обработки

Абразивная обработка затопленными струями мелких деталей при использовании схем подачи сжатого воздуха, показанных на рис. 6.17, может обеспечивать либо равномерное воздействие на все поверхно-

сти деталей сложной конфигурации, к которым имеется доступ абразивных зерен и рабочей жидкости, либо обеспечивать дифференцированное воздействие абразивного материала на плоскости или кромки деталей. Эти характеристики значительно расширяют технологические возможности и применимость метода зачистной и отделочной обработки деталей с различной конфигурацией и техническими требованиями. Поскольку абразивная обработка затопленными струями обладает широким диапазоном технологических возможностей, для каждой разновидности обработки существует определенное специфическое условие, определяющее тот или иной типовой технологический процесс. Однако ряд основных закономерностей имеет общий характер, определяющийся особенностями метода.

Влияние основных технологических параметров на производительность обработки исследовалось в соответствии с планом дробного факторного эксперимента. Поскольку для постановки планированного эксперимента необходимы априорные сведения о существовании процесса во всем диапазоне значений параметров, величины этих диапазонов, а также сведения о роли каждого компонента рабочей среды, следует охарактеризовать каждый из них.

### **6.6.1. Рабочая жидкость**

Рабочая жидкость является обязательной составляющей рабочей среды. Ее наличие способствует протеканию процесса микрорезания, удалению продуктов износа с поверхностей обрабатываемых деталей, исключает пылеобразование, обеспечивая нормальные условия труда оператора, способствует равномерному распределению деталей и абразива по объему рабочей камеры, а также их разделению после обработки. Путем регулирования уровня жидкости в рабочей камере достигается изменение интенсивности обработки.

Применение жидкости обеспечивает условия для введения в процесс веществ, способствующих увеличению съема металла, пассивации деталей, предотвращает слипание плоских деталей и обеспечивает равномерную обработку.

Наличие жидкости, согласно закону Архимеда, обуславливает уменьшение веса деталей, поэтому допустимое количество одновременно обрабатываемых деталей в этих условиях значительно увели-

чивается. Рабочая жидкость обеспечивает доставку абразивного материала к воздушным соплам и предохраняет внутреннюю облицовку рабочей камеры от прямого воздействия струй сжатого воздуха, несущего абразивный материал.

Поскольку отработанный сжатый воздух проходит через рабочую жидкость, его влажность значительно увеличивается. Это обстоятельство ограничивает возможность использования агрессивных и токсичных жидкостей, а также легкоразлагающихся растворов, в связи с недопустимостью загрязнения окружающей среды. Поскольку струйно-абразивная обработка, в силу аэрации раствора, является одновременно и окислительным процессом, особенно при обработке деталей из легко окисляющихся материалов, целесообразно в рабочую жидкость добавлять ингибитор коррозии. В настоящих исследованиях снижение коррозии достигалось использованием 1,5 – 3,0 % раствора кальцинированной соды ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), а также 0,5 % раствора хромпика ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ).

### **6.6.2. Абразивный материал**

В процессе струйно-абразивной обработки абразивный материал является обрабатывающим инструментом, поэтому его физико-механические, геометрические и динамические характеристики играют особую роль. Наряду с абразивными зёрнами, воздушные струи приводят в движение и обрабатываемые детали. Причем, разница их скоростей определяется различием геометрических и физических параметров, поэтому оптимальные параметры абразива в значительной мере зависят от параметров детали. В частности, важную роль среди них играет лобовое сопротивление, плотность материала, объем и соотношение минимальных и максимальных габаритных размеров деталей.

В качестве инструмента, обеспечивающего тот или иной механизм взаимодействия с поверхностями деталей исследовался ряд природных и искусственных абразивных материалов: морской и речной песок зернистостью 0,3 – 0,5 мм, электрокорунд белый и нормальный (24А, 14А), карбид кремния зеленый (63С) зернистостью от 16 до 100, технический карбид бора зернистостью 20, гранулы гранита с максимальным размером до 15 мм, отсеб шлака, керамзит, бой шамотного и красного кирпича размером до 15 мм, фарфоровые шарики

диаметром 4 мм, стеклянные шарики диаметром 2,5 мм, деревянные кубики, покрытые слоем абразивного материала, размером 15 мм, стальная и чугунная колотая дробь, свинцовая дробь, кусочки мела, мелконарезанная шлифовальная шкурка, кусочки войлока и фетра, пропитанные пастой ГОИ, абрикосовые косточки. Выбор наиболее универсального обрабатывающего материала обуславливался достижением максимальной производительности и качества обработки, дешевизной и долговечностью.

Исследование производительности обработки в зависимости от разновидности искусственных абразивов показало, что она почти не изменяется и колеблется в диапазоне 6 – 10 % при обработке электрокорундом белым (марки 24А), карбидом кремния зеленым (марки 63С), электрокорундом нормальным (марки 14А) и карбидом бора. Фарфоровые и стеклянные шарики, свинцовая дробь, песок, а также кусочки мела снижают производительность обработки, что обусловлено отсутствием острых вершин и кромок. Производительность обработки и шероховатость поверхности при использовании стальной и чугунной колотой дроби аналогичны обработке абразивными зернами. Основным недостатком использования дроби из черного металла является то, что при ее высыхании коррозия приводит к схватыванию дроби в прочные комки, которые сложно использовать для повторной обработки. Таким образом, наиболее универсальными и доступными для промышленного использования являются искусственные абразивные материалы, например, карбид кремния зеленый марки 64С – 63С, электрокорунд нормальный марки 16А – 12А и электрокорунд белый марки 25А – 22А, серийно выпускаемые отечественной промышленностью в зерне.

Значительное влияние на производительность процесса оказывает количественный состав массы загрузки, в частности, количество рабочей жидкости и качество абразивного материала. На рис. 6.23 показана зависимость производительности обработки, выраженная металлосъемом в единицу времени с контрольных образцов, от количественного состава абразивного материала и рабочей жидкости. Здесь наибольшая производительность определяется максимальной аппликацией и соответствует 0,5 л трехпроцентного раствора кальцинированной соды и 110 см<sup>3</sup> абразивного материала – карбид кремния зеленый зернистостью 50 – 63 (марки 63С 63П). Снижение металлосъема с увеличением объема жидкости можно объяснить падением величины ки-

нетической энергии струй, приходящихся на единицу массы загрузки. Повышение металлосъема с увеличением объема абразива обусловлено увеличением числа столкновений частиц с деталями. Это справедливо до тех пор, пока струи не перегружены абразивом и их энергия обеспечивает достаточное перемешивание деталей.

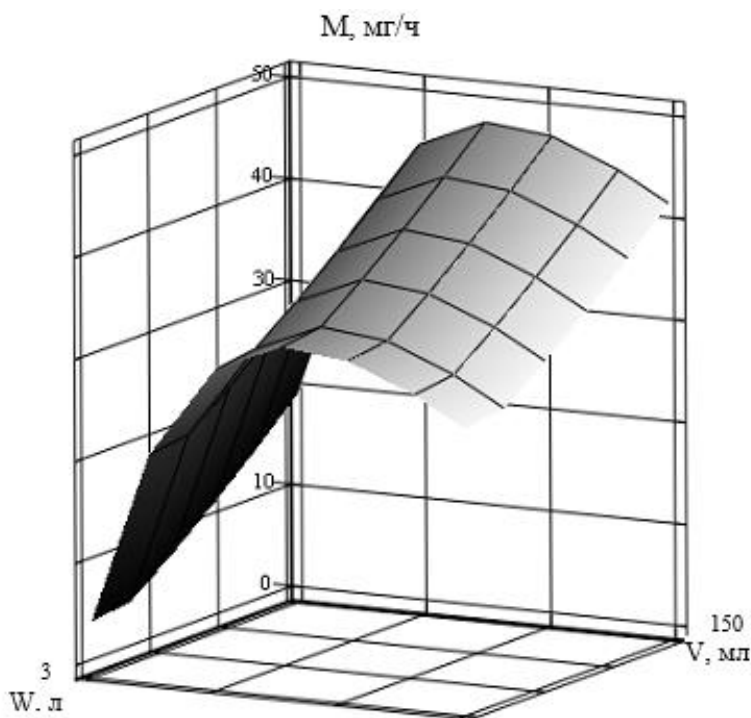


Рисунок 6.23 – Зависимость съема металла от объема загруженных абразивного материала и рабочей жидкости

На основании результатов предварительного исследования принимается вид абразивного материала и рабочей жидкости, а также граничные уровни варьирования объемом и зернистостью абразивного материала и объемом рабочей жидкости. Планируемый эксперимент проводился с карбидом кремния зеленым в диапазоне размеров зерен 200 – 630 мкм (63С 20П – 63С 63П), обеспечивающих получение шероховатости поверхности по шкале  $R_z$  не более 6,5 мкм. Количество абразивного материала принималось в соответствии с данными экспериментов (рис. 6.23): на нижнем уровне – 60 см<sup>3</sup>, на верхнем – 140 см<sup>3</sup>. В качестве рабочей жидкости использовался водный раствор трехпроцентной кальцинированной соды, с нижним уровнем, равным 0,5, верхним – 1,5 литра.

Как отмечалось выше, рассматриваемый процесс обработки предназначен для удаления заусенцев, округления острых кромок и

создания матовой поверхности на деталях малой жесткости, а также небольших габаритных размеров с массой до 5 г. Наиболее часто такие детали встречаются в радио- и электротехнической промышленности, приборостроении и оптико-механическом производстве.

### 6.6.3. Обрабатываемые детали

Номенклатура деталей для обработки на струйно-абразивной установке показана на рис. 6.24 – рис. 6.26.



Рисунок 6.24 – Номенклатура деталей радиотехнических заводов

В процессе абразивной обработки затопленными струями деталей малой жесткости их геометрическая форма сохраняется благодаря тому, что усилия, возникающие при взаимодействии единичных абразивных зерен с деталями невелики. С другой стороны, эти усилия должны быть достаточными для выполнения работы деформации в локальных объемах обрабатываемого материала. В связи с этим, наиболее предпочтительными для обработки являются детали, материал которых характеризуется относительно невысокими прочностными параметрами,

например, многие сплавы на основе меди и алюминия. Особенно широкое применение находят детали, получаемые штамповкой из листовой латуни на предприятиях радио- и электротехнической промышленности, и детали из сплавов на основе алюминия, получаемые точением на предприятиях оптико-механического производства.



Рисунок 6.25 – Номенклатура деталей оптико-механического производства

Процесс перемешивания деталей обеспечивается струями сжатого воздуха и потоками жидкости и зависит от ряда параметров, в том числе от массы, размеров, лобового сопротивления, плотности материала деталей, диаметра сопел и давления сжатого воздуха. В связи с большим количеством параметров определение максималь-



но допустимой массы одновременно обрабатываемых деталей представляет определенную трудность. Поэтому для решения данной задачи проведены исследования по плану дробного факторного эксперимента по вышеизложенной методике, на основании которого эмпирическим путем получена математическая модель, представленная в виде двух степенных функций.



Рисунок 6.26 – Номенклатура деталей приборостроения и оптико-механического производства для обработки на струйно-абразивной установке затопленными струями

Первая из них (6.12) представляет собой зависимость максимально допустимого числа деталей, приходящихся на одно сопло (в штуках), а вторая (6.13) – максимально допустимой массы деталей (в граммах) от давления сжатого воздуха, диаметра воздушного сопла, единичной массы и насыпной плотности деталей (в приведенных зависимостях показатели степени округлены):

$$N = 194,2 \frac{\rho^{1,06} \cdot d^{0,67}}{m_{\text{д}}^{1,36} \cdot \rho^{0,19}} \text{ шт.}; \quad (6.12)$$

$$Q = 217,6 \frac{\rho \cdot \sqrt{d}}{m_{\text{д}}^{0,3} \cdot \rho^{0,15}}, \quad (6.13)$$

где  $\rho$  – давление сжатого воздуха, МПа;  $d$  – диаметр воздушного сопла, мм;  $\rho$  – насыпная плотность деталей, г/см<sup>3</sup>;  $m_{\text{д}}$  – единичная масса деталей, г.

Полученные зависимости позволяют установить максимально допустимую суммарную массу и число деталей, приходящихся на одно воздушное сопло. Величина допустимой суммарной массы обрабатываемых деталей является одним из важнейших параметров процесса, определяющих экономическую эффективность, поскольку одновременно является параметром, определяющим наибольшую интенсивность процесса при прочих равных условиях. Высокая производительность обработки при загрузке в камеру максимально допустимой суммарной массы объясняется тем, что в этих условиях масса деталей перекатывается весьма медленно, обуславливая наличие наибольшей скорости абразивных частиц относительно деталей.

Как установлено выше, процесс перемешивания деталей в значительной мере определяется их геометрической формой. Кромки плоских деталей подвергаются более интенсивной обработке, чем плоскости. Экспериментально установлено, что поверхности деталей разной массы в диапазоне 0,5 – 5 г при расходе сжатого воздуха 0,34 м<sup>3</sup>/мин подвергаются обработке неодинаково. Так, в диапазоне 0,5 – 2,5 г (рис. 6.27), когда отдельные детали сравнительно легко подхватываются струями, преимущественное воздействие абразивных зерен на кромки деталей четко выражено. С увеличением массы деталей от 2,5 до 5 г, когда детали при имеющихся условиях труднее перемешиваются, количество отпечатков увеличивается как на торцовых, так и на плоских поверхностях. При этом преобладание воздействия на какие-либо поверхности не проявляется.

По результатам экспериментов установлены нижний и верхний уровни варьирования суммарной и единичной массы обрабатываемых деталей. Влияние суммарной массы на съем металла с контрольных образцов исследовалось при 0,1 и 0,325 кг загрузки, а влияние единичной массы – с образцами массой 0,5 и 3,0 г. Таким образом, на основа-

нии результатов исследований установлены изменения основных технологических параметров в окрестности оптимума.

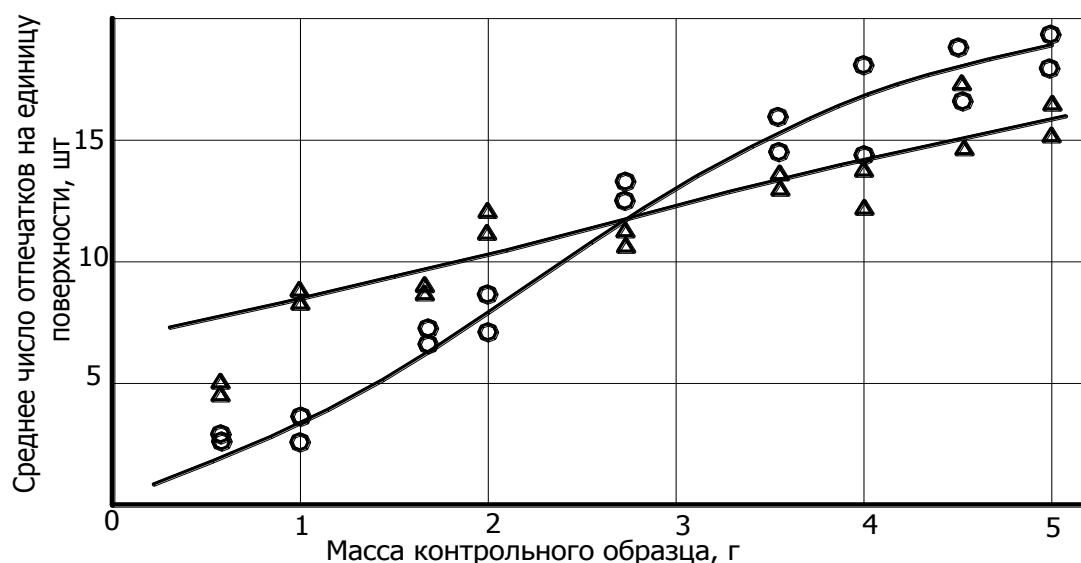


Рисунок 6.27 – Зависимость критерия производительности обработки от единичной массы обрабатываемых деталей: Δ – количество отпечатков на торцах контрольных образцов; ○ – количество отпечатков на плоскостях тех же образцов

В соответствии с методикой дробного многофакторного эксперимента разработана математическая модель процесса, по которой произведены расчеты значений съема металла в единицу времени в мг и шероховатость поверхности по шкале  $R_a$  в мкм для трех уровней каждого из исследованных параметров. На основании выполненных расчетов построены графики, наглядно иллюстрирующие характер изменения металлосъема и шероховатости поверхности от основных параметров обработки.

### 6.7. Выбор и обоснование оптимальных режимов абразивной обработки затопленными струями

Для обоснованного выбора параметров обработки необходимо выявить степень значимости и взаимную связь коэффициентов уравнения регрессии. Оценка степени значимости коэффициентов и направления изменения параметра оптимизации производилась на

основе общепринятых положений [1] теории планированного эксперимента:

$$y = 17,3 + 2,625x_1 - 2,575x_2 - 1,2x_3 - 1,775x_4 + 0,9x_6 + 1,95x_1x_2. \quad (6.14)$$

В соответствии с уравнением регрессии, представляющим собой математическую модель процесса струйно-абразивной обработки, для получения максимальной производительности в соответствии со знаками перед коэффициентами при  $x_1$  и  $x_6$  необходимо увеличивать значения параметров, а при  $x_2$ ,  $x_3$  и  $x_4$  необходимо уменьшать их величины в заданном диапазоне значений. Знак при эффекте взаимодействия  $x_1x_2$  указывает на то, что увеличение металлосоема может достигаться при одновременном уменьшении или одновременном увеличении значений взаимодействующих факторов. Поскольку знаки при этих параметрах имеют противоположные значения – формализованного решения данный случай не имеет [1]. В этом случае теория планированного эксперимента предусматривает сравнение численных значений коэффициентов и пожертвование наименьшим из них [1]. В рассматриваемой модели значения коэффициентов весьма близки, однако коэффициент при эффекте взаимодействия меньше коэффициентов при параметрах  $x_1$  и  $x_2$ . В связи с этим для увеличения параметра выхода следует руководствоваться знаками  $\pm$  при линейных эффектах  $x_1$  и  $x_2$ . Абсолютные величины коэффициентов определяют вклад каждой из переменных в получение величины съема металла.

В натуральных переменных максимальный удельный съем металла может быть достигнут путем увеличения объема загруженного абразива и повышения концентрации содового раствора, путем уменьшения количества жидкости и количества одновременно обрабатываемых деталей, а также в случае обработки наиболее мелких деталей. Повышение съема металла при увеличении объема абразивного материала, загружаемого в рабочую камеру, объясняется повышением концентрации абразивно-жидкостной суспензии и, следовательно, увеличением числа столкновений абразивных зерен с деталями. Однако чрезмерное увеличение объема загружаемого абразива приводит к уменьшению допустимой суммарной массы обрабатываемых деталей.

Увеличение концентрации раствора  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (кальцинированной соды) приводит к увеличению съема металла в малой степени, однако является ценным побочным эффектом, поскольку основное назначе-

ние соды – сдерживать коррозионный процесс. Поскольку присутствие соды уменьшает химическое взаимодействие жидкости, воздуха и металла, можно предположить, что рост съема металла достигается путем изменения физических характеристик, например, за счет увеличения ее плотности или вязкости. Увеличение производительности обработки при уменьшении объема рабочей жидкости возникает при выносе ее в распыленном виде из рабочей камеры струями сжатого воздуха, но при этом процесс обработки становится нестабильным и скачкообразно нарушается. Детали ударяются о стенки рабочей камеры и теряют исходную геометрическую форму. Значительно увеличивается величина микронеровностей, появляются забоины. Кроме того, уменьшение объема рабочей жидкости ниже критической величины вызывает возникновение застойных зон, т.к. детали без жидкости прибавляют в весе, а струи сжатого воздуха теряют напорную силу в связи с уменьшением эжектируемой жидкости.

Количество одновременно обрабатываемых деталей определяет экономическую эффективность разработанного метода абразивной обработки. Поэтому выявление максимально допустимой суммарной массы деталей весьма важно. Установлено, что при предельно допустимой загрузке рабочей камеры детали экранируют струйные потоки, в связи с чем снижается удельный металлосъем. Однако при этом детали имеют минимальную скорость перемещения под действием струйных течений, что обеспечивает максимальную разность скоростей деталей и абразивных частиц. Таким образом, хотя съем металла с единичных контрольных образцов уменьшается с увеличением массы загрузки, суммарный съем металла, приходящийся на всю массу обрабатываемых деталей, увеличивается.

## **6.8. Оборудование для обработки деталей затопленными струями**

На основе разработанных эмпирических математических моделей выявлены конструктивные и технологические параметры, заложенные в принципиальную схему и устройство установок для обработки мелких деталей затопленными струями [8 –14, 136].

Разработана гамма установок, позволяющая обрабатывать детали широкой номенклатуры массой до 3 г. В целях обеспечения без-

опасности обслуживания установок для осуществления процесса обработки используется один источник энергии – сжатый воздух давлением 0,4 ... 0,6 МПа (от промышленной пневмосети). Принципиальная схема установки представлена на рис. 6.28.

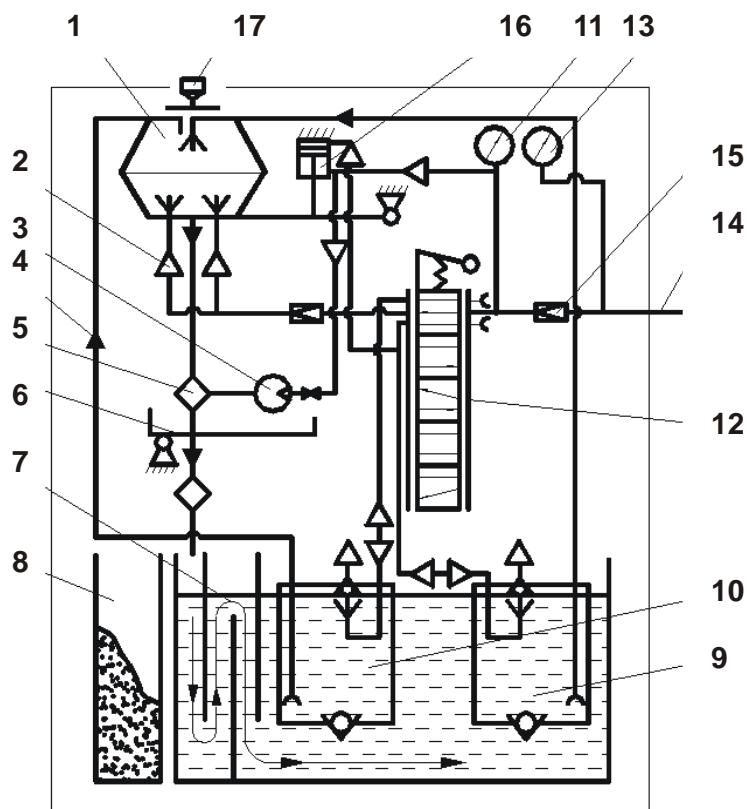


Рисунок 6.28 – Принципиальная схема струйно-абразивной установки для обработки мелких деталей затопленными струями

Принципиальная схема содержит общепринятые обозначения:  $\Delta$  – пневмопровод;  $\blacktriangle$  – гидропровод, а также: 1 – рабочая камера; 2 – подача сжатого воздуха; 3 – пневмовибратор сепаратора-транспортера деталей; 4 – подача рабочей жидкости; 5 – сепаратор-транспортер деталей; 6 – сепаратор абразива; 7 – бак-отстойник; 8 – бункер для абразива; 9 – бак для промывки; 10 – бак для дозирования; 11 – манометр давления в пневмосети; 12 – кран распределительный пятипозиционный; 13 – манометр для контроля давления на всех переходах; 14 – подвод сжатого воздуха; 15 – стабилизатор давления сжатого воздуха; 16 – объемный пневмоцилиндр; 17 – загрузочное окно. Установка для поверхностной обработки мелких деталей, загружаемых в рабочую камеру "навалом" управляется пятипозиционным распределительным пневмокраном, блок-схема работы которого представлена на рис. 6.29.

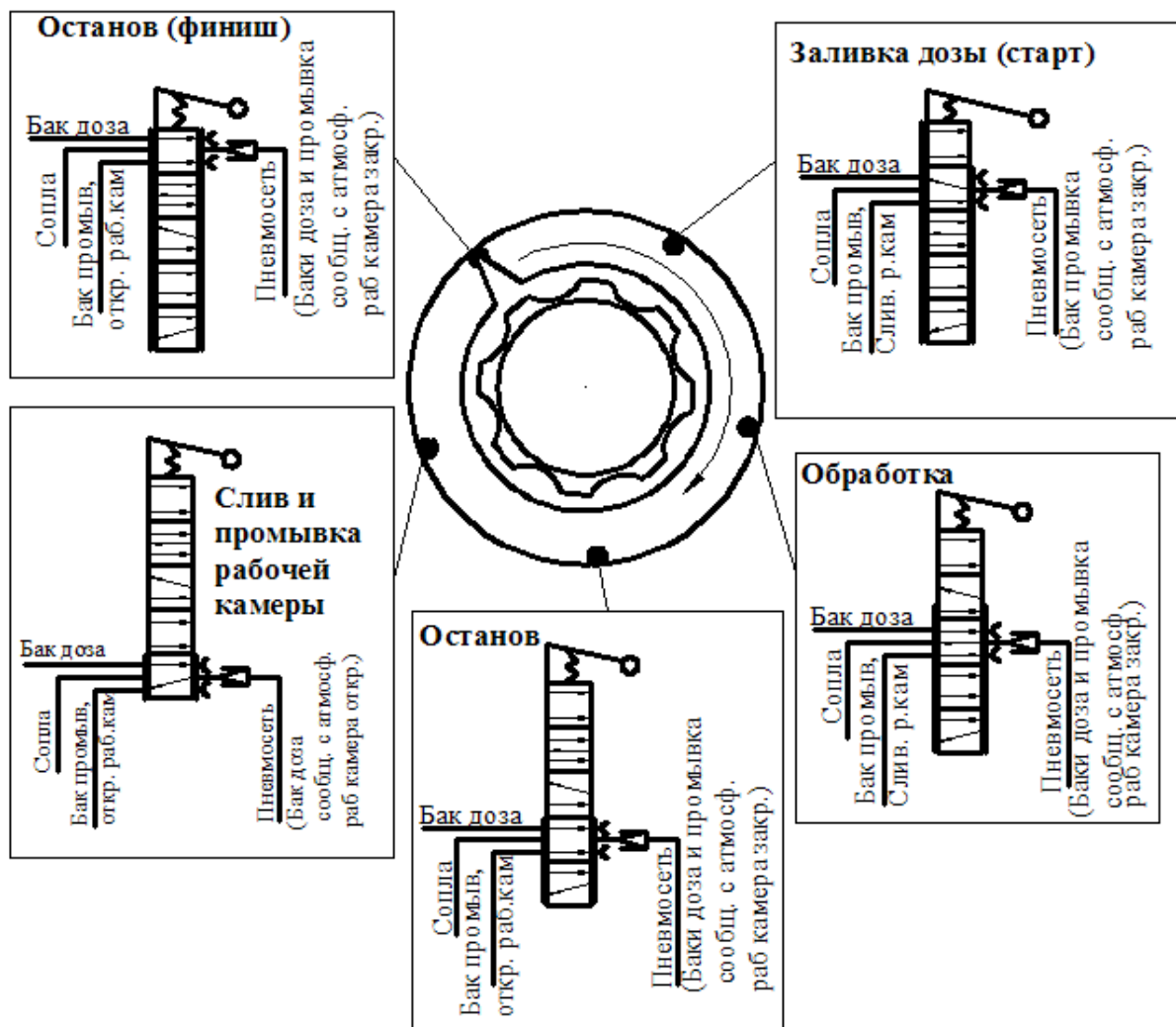


Рисунок 6.29 – Блок-схема работы пятипозиционного пневмокрana к принципиальной схеме на рис. 6.28

Установка представляет собой прямоугольный корпус с фигурной верхней панелью. Внутри корпуса размещены все функциональные узлы. На верхней панели находится загрузочный люк, через который производится загрузка деталей и абразивного материала. С крышкой люка сблокирована самоуплотняющаяся заслонка, представляющая собой инфильтрацию отработанного воздуха в область рабочего места оператора. Справа расположен манометр для контроля давления сжатого воздуха во всех режимах работы установки: "заливка дозы", "обработка", "выгрузка-промывка", а также манометр – для контроля за давлением в пневмомагистрали. На горизонтальной поверхности панели размещены рукоятки управления переходами операции струйно-абразивной обработки. Основным органом управления является пятипозиционный распределитель 12 (рис. 6.28, рис. 6.29), который обес-

печивает переключение установки на пять переходов, из которых состоит операция (табл. 6.3).

Таблица 6.3 – Содержание операции

№ п/п	Положение рукоятки переключателя	Содержание перехода	Примечание
1	"Заливка дозы (старт) "	Заливается доза жидкости из бака "Доза". Оператор загружает абразивный материал (шлифзерно) и обрабатываемые детали	Сжатый воздух подается в бак "Доза", в штоковую полость пневмоцилиндра, слабым напором в сопла, при этом бак "Промывка" сообщается с атмосферой
2	"Обработка"	Осуществляется абразивная обработка деталей затопленными струями	Сжатый воздух подается через сопла в рабочую камеру в виде струй, в штоковую полость пневмоцилиндра. Баки "Доза" и "Промывка" сообщаются с атмосферой
3	"Останов"	Промежуточное положение	Сжатый воздух подается через сопла в рабочую камеру слабым напором. Баки "Доза" и "Промывка" сообщаются с атмосферой
4	"Слив и промывка рабочей камеры"	Выгрузка содержимого рабочей камеры и промывка рабочей камеры и деталей на решетке	Сжатый воздух подается в бак "Промывка", слабым напором в сопла, при этом бак "Доза" сообщается с атмосферой
5	"Останов (финиш) "	Окончание текущей операции, предстартовое положение для следующей.	Сжатый воздух подается в бесштоковую полость пневмоцилиндра. Баки "Доза" и "Промывка" сообщаются с атмосферой

Установка работает следующим образом. Через входной штуцер 14 сжатый воздух давлением до 0,6 МПа подается в пневматический редуктор 15, где давление снижается и поддерживается автоматически в диапазоне 0,4 – 0,5 МПа. Далее сжатый воздух постоянного давления подается на распределитель 12, соединенный с контрольным



манометром 11 и в объемный пневмоцилиндр 16, который создает усилие для плотного закрывания донной части рабочей камеры 1. При установке рукоятки распределителя в положение З.Д. – "заливка дозы" сжатый воздух подается в вытеснительный бак 10, заполненный рабочей жидкостью, создает избыточное давление, закрывает лепестковые клапаны и вытесняет жидкость по трубопроводу в рабочую камеру. При этом доза вытесненной жидкости определяется глубиной погружения заборной трубы в вытеснительный бак, а манометр 11 показывает давлением в вытеснительном баке 10. После выталкивания дозы рабочей жидкости сжатый воздух свободно выходит через трубопровод 4, и давление на манометре 11 резко снижается, что служит знаком об окончании заливки дозы. При установке рукоятки распределителя в положение О – "обработка", сжатый воздух через дроссель поступает к соплам рабочей камеры и создает условия, необходимые для обработки деталей. При этом манометр 11 показывает давление сжатого воздуха перед соплами.

По окончании обработки рукоятка распределителя 12 устанавливается в положение О – "останов" и далее в положение С – "слив, промывка". В этом режиме сжатый воздух кроме штоковой полости 16 подается и в бесштоковую полость объемного пневмоцилиндра, и в силу разности рабочих площадей поршня пневмоцилиндр открывает рабочую камеру. Одновременно с этим сжатый воздух подается в вытеснительный бак промывки 9 и аналогично дозировке подает рабочую жидкость для промывки деталей. Содержимое рабочей камеры выгружается на вибросепаратор 5, а вслед за ним, через рабочую камеру разбрызгиванием подается рабочая жидкость, которая промывает внутренние стенки рабочей камеры 1 и детали, находящиеся на вибросепараторе.

Определение момента окончания промывки аналогично определению окончания дозировки. Промывая детали, рабочая жидкость увлекает зерна абразивного материала на опрокидывающийся сепаратор 6, представляющий собой широкое корыто, наклоненное под небольшим углом к горизонту. Вследствие наклона сепаратора рабочая жидкость стекает в одно из четырех отделений бака-отстойника 7, а абразивный материал оседает на его дно. Попав в бак-отстойник 7, порция рабочей жидкости проходит лабиринт, обеспечивающий ее очистку от легких (плавающих) и тяжелых (оседающих) включений и заполняет вытеснительные баки 9 и 10 через лепестковые клапаны по

принципу сообщающихся сосудов. При этом полости баков сообщаются с атмосферой за счет открытия верхних лепестковых клапанов и специальных каналов в золотнике распределителя.

Включением пневматического вибратора 3 вибротранспортер 5 приводится в действие и подает обработанные детали в специальный контейнер. Для подготовки полуавтомата к следующему циклу работы распределитель устанавливается в следующее положение Д – "дозировка", при этом рабочая камера 1 закрывается пневмоцилиндром 16, так как отключается подача сжатого воздуха в его бесштоковую полость, и доза рабочей жидкости вновь заполняет рабочую камеру. Для выполнения переходов операция на полуавтомате необходимо вращать распределитель 12 по часовой стрелке, что обеспечит правильную последовательность технологических переходов и подготовку к следующему циклу. В каждом из положений распределителя, вплоть до промежуточных, обеспечиваются условия заполнения вытеснительных бачков 9 и 10 для выполнения функций в режимах дозировки и промывки.

В результате внедрения установок на ряде предприятий оборонной промышленности ликвидирован ручной труд – зачистка заусенцев, округление острых кромок, очистка от окисной пленки, окалины и т.п. на деталях, полученных после листовой штамповки.

## **Выводы**

На основе проведенных экспериментальных и теоретических исследований установлено:

1. Абразивная обработка затопленными струями осуществляется за счет многочисленных столкновений абразивных зерен и обрабатываемых деталей, движимых струями сжатого воздуха в жидкости.

2. Столкновение абразивных зерен и обрабатываемых деталей является следствием различия их геометрической формы, плотности и особенностей лобового сопротивления.

3. В основном следы абразивных зерен на поверхности деталей являются постепенно углубляющимися в металл бороздами, заканчивающимися, как правило, валиками вытесненного металла.

4. Вращение абразивных зерен, задаваемое струями сжатого воздуха, в процессе струйно-абразивной обработки не влияет сколько-

нибудь значимо на процесс пластического деформирования металла, так как зерна имеют небольшой момент инерции, его деформация обеспечивается, в основном, за счет энергии поступательного движения зерна.

5. Постановка и обработка активных многофакторных экспериментов позволили получить эмпирические зависимости производительности процесса абразивной обработки затопленными струями и энергетических возможностей воздушных струй от основных конструктивных и технологических параметров в заданных диапазонах.

6. Полученные эмпирические зависимости позволяют решить компромиссные задачи при проектировании абразивных установок для обработки затопленными струями с различными технико-экономическими показателями.

7. При выборе и использовании всевозможных схем подачи струй сжатого воздуха в рабочую камеру следует учитывать, что съем металла с обрабатываемых деталей достигается в те периоды, когда они находятся непосредственно в струях.

8. Разработано эффективное оборудование, представленное гаммой установок, для осуществления отделочной абразивной обработки мелких деталей затопленными струями. Их применение исключает трудоемкие ручные зачистные операции, повышает качество, производительность и стабильность обработки за счет улучшения товарного вида обработанных деталей и одновременной обработки большого количества деталей, загруженных в рабочую камеру "навалом". Установлено, что в процессе обработки происходит округление кромок деталей, устраняются заусенцы, следы коррозии и различные неоднородности на обрабатываемых поверхностях, образуется однородная матовая поверхность с шероховатостью в пределах  $R_a = 0,8 \dots 1,25$  мкм, с упрочняющим наклепом (сжимающими напряжениями на глубину 5 – 6 мкм). Показано, что по сравнению с традиционной ручной обработкой мелких деталей применение разработанных установок и технологий абразивной обработки затопленными струями уменьшает в отдельных случаях трудоемкость до 66 раз.

9. Установки для абразивной обработки затопленными струями мелких деталей следует применять в условиях крупносерийного и массового производства, а также с учетом невысокой стоимости (2 тыс. у. е.) и в условиях среднесерийного производства.

## **Раздел 7**

### **Технологическое обеспечение качества абразивной обработки внутренних поверхностей в гидро- и пневмоцилиндрах**

В современном производстве при изготовлении высокоточных деталей машин, по-прежнему, чрезвычайно острой является проблема обеспечения требуемых высоких показателей качества обработки, в особенности шероховатости обрабатываемых поверхностей. Несмотря на имеющийся большой арсенал возможных методов абразивной обработки, обеспечивающих существенное уменьшение высот микронеровностей на обрабатываемых поверхностях, их применение на практике не всегда эффективно. Основной причиной является низкая производительность обработки на финишных операциях доводки и абразивного полирования.

В особой степени это относится к операциям шлифования внутренних поверхностей гидро- и пневмоцилиндров, где требуется обеспечить высокие требования шероховатости поверхности после предшествующих операций лезвийной обработки. Однако, как показывает практика, выполнить эти требования на операциях внутреннего шлифования обычными абразивными кругами весьма сложно. Поэтому актуальной является задача применения новых более эффективных технологий финишной абразивной обработки внутренних поверхностей гидро- и пневмоцилиндров, обеспечивающих снижение шероховатости поверхности до необходимого уровня – не выше  $R_a = 0,05$  мкм.

В настоящее время получили применение комбинированные методы финишной абразивной обработки, удачно сочетающие эффекты доводки свободным абразивом и шлифования. Например, использование шлифовальных кругов фактически с одновысотным выступанием режущих зерен над уровнем связки позволяет существенно уменьшить высоты микронеровностей на обрабатываемых поверхностях при достаточно высокой производительности обработки.

Для определения оптимальных условий обработки с использованием этих методов необходимо разработать математические модели формирования шероховатости поверхности и обосновать условия ее

уменьшения. Их практическое применение станет важным фактором повышения эффективности абразивной обработки на основе критерия наименьшей шероховатости обрабатываемой поверхности.

Необходимо отметить, что шероховатость поверхности является важнейшим показателем качества обработки деталей машин, определяющим их эксплуатационные свойства. Поэтому изысканию эффективных методов снижения высотных параметров шероховатости обрабатываемой поверхности в научно-технической литературе постоянно уделяется большое внимание. В особой мере это относится к методам шлифования, которые являются основными методами окончательной обработки деталей машин, обеспечивающими высокие показатели шероховатости и точности обрабатываемых поверхностей. Так, благодаря созданию и применению алмазно-абразивных инструментов появилась возможность существенного уменьшения высотных параметров шероховатости поверхностей обрабатываемых деталей, работающих в условиях интенсивного трения и износа. Это позволило повысить их работоспособность, а также стало важным этапом создания новых образцов наукоемкой техники.

Дальнейшим этапом развития методов финишной обработки деталей машин следует рассматривать создание надежных методик расчета параметров шероховатости поверхности, особенно для процессов шлифования, на основе теоретико-вероятностного подхода, предложенного профессорами Королевым А. В. и Новоселовым Ю. К. Это позволит спрогнозировать перспективные направления улучшения шероховатости поверхности при шлифовании.

### **7.1. Теоретический анализ условий уменьшения шероховатости поверхности с учетом вероятностного участия абразивных зерен шлифовального круга в резании**

Длительное время при анализе закономерностей формирования шероховатости поверхности при шлифовании подходили с кинематико-геометрических позиций без учета вероятностного участия зерен шлифовального круга в резании [106]. Это ограничивало возможности объективного представления о путях снижения шероховатости поверх-

ности. Поэтому на смену упрощенному кинематико-геометрическому подходу пришел теоретико-вероятностный подход [63, 147, 226, 231], позволивший принципиально по-новому решать задачи по определению оптимальных условий шлифования с учетом требований по шероховатости поверхности. Он положен в основу создания новых более эффективных технологий абразивной обработки и, особенно, процессов шлифования, обеспечивающих, наряду с повышением производительности, более высокие показатели шероховатости поверхности. В результате в ряде случаев удалось предварительное и окончательное шлифование объединить в одну операцию, что позволило снизить трудоемкость и повысить производительность обработки без ухудшения шероховатости поверхности. В связи с этим, важно, используя теоретико-вероятностный подход, обосновать условия уменьшения шероховатости поверхности при внутреннем шлифовании отверстий в пневмо- и гидроцилиндрах [139].

Для решения поставленной задачи следует воспользоваться результатами исследований, приведенных в работе [142]. В ней проведен теоретический анализ параметров шероховатости поверхности  $R_a$  и  $R_{max}$  при неупорядоченном расположении режущих зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента и их вероятностном участии в резании (рис. 7.1,а). В основу расчетов положена вероятностная функция  $\Phi(y)$ , определяющая вероятность неснятого материала (в виде микронеровностей) с поверхности образца:

$$\Phi(y) = e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}{B} \cdot y}, \quad (7.1)$$

где  $\gamma$  – половина угла при вершине конусообразного режущего зерна;  $n$  – количество абразивных зерен, принимающих участие в процессе образования шероховатости поверхности;  $B$  – ширина образца, м;  $y$  – координата, отсчитываемая от вершины режущего зерна, м.

Положение средней линии  $y = a$ , которая разделяет микропрофиль обработанной поверхности на две части, определяется из условия равенства заштрихованных на рис. 2 площадей  $F_1$  и  $F_2$ :

$$a = \int_0^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy = \frac{B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n \cdot R_{max}}{B}} \right). \quad (7.2)$$

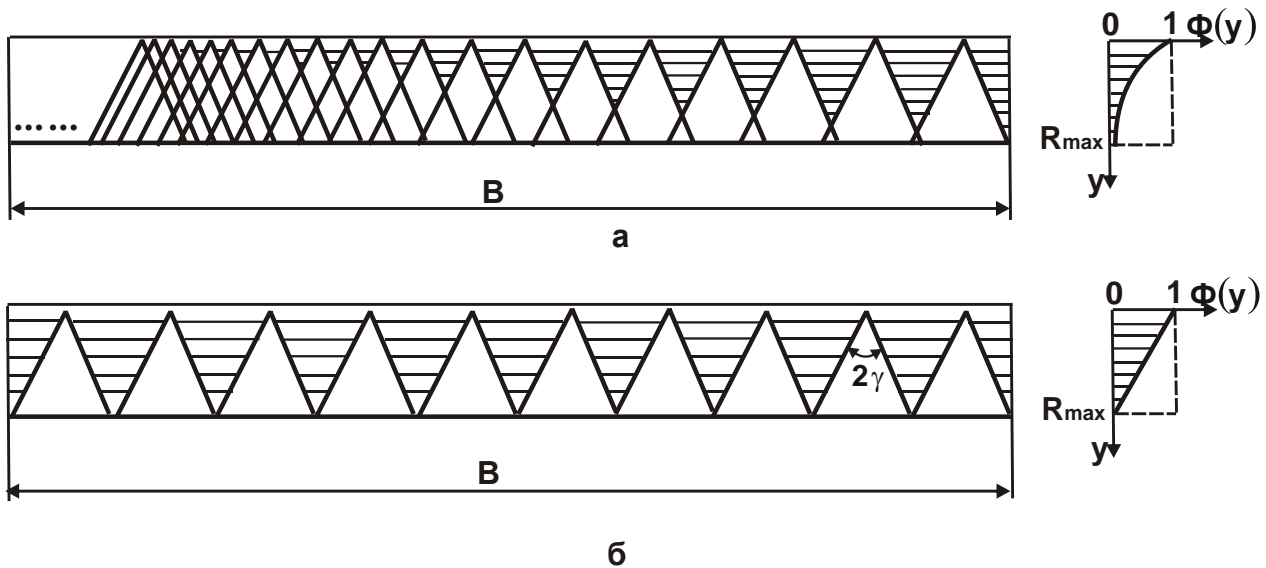


Рисунок 7.1 – Расчетная схема вероятностной функции  $\Phi(y)$  при неравномерном (а) и равномерном (б) расположении проекций зерен

На рис. 7.2 наибольшая впадина микропрофиля соответствует значению  $y=0$ , а наибольший выступ микропрофиля – значению  $y=R_{\max}$  (рис. 7.1). Тогда параметр шероховатости поверхности  $R_a$  описывается зависимостью (рис. 7.2) [142]:

$$R_a = 2 \cdot \int_a^{R_{\max}} \Phi(y) \cdot dy = \frac{B}{\text{tg}\gamma \cdot n} \left( e^{-\frac{2 \cdot \text{tg}\gamma \cdot n \cdot a}{B}} - e^{-\frac{2 \cdot \text{tg}\gamma \cdot n \cdot R_{\max}}{B}} \right). \quad (7.3)$$

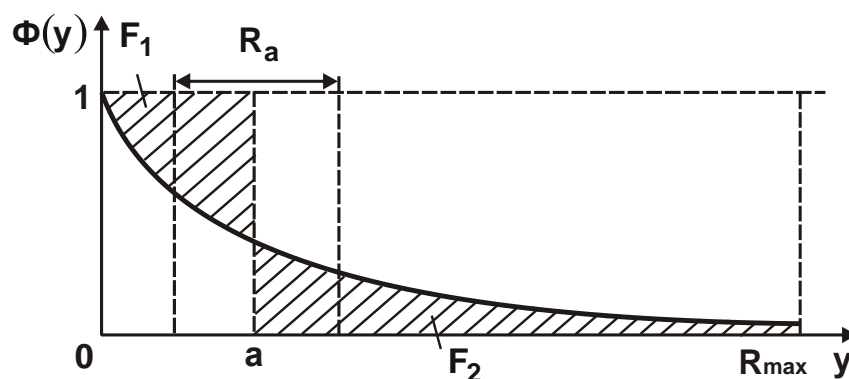


Рисунок 7.2 – Расчетная схема параметра шероховатости поверхности  $R_a$

В действительности пределом интегрирования экспоненциальной функции  $\Phi(y)$  в зависимостях (7.2) и (7.3) следует рассматривать  $y \rightarrow \infty$  вместо  $y = R_{\max}$ . Тогда зависимости (7.2) и (7.3) примут вид:

$$a = \frac{B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}; \quad (7.4)$$

$$R_a = \frac{0,367 \cdot B}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n}. \quad (7.5)$$

Как видно, параметры  $a$  и  $R_a$  определяются величиной  $n$ : чем она больше, тем меньше  $a$  и  $R_a$ .

При упорядоченном расположении режущих зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента и, соответственно, при упорядоченном наложении проекций зерен на диаметрально плоскость обрабатываемого образца (рис. 7.1,б) функция  $\Phi(y)$  принимает вид:

$$\Phi(y) = 1 - \frac{y}{R_{\max}}. \quad (7.6)$$

Подставляя зависимость (7.6) в (7.2) и (7.3), имеем:

$$a = \int_0^{R_{\max}} \left(1 - \frac{y}{R_{\max}}\right) \cdot dy = \frac{R_{\max}}{2}; \quad (7.7)$$

$$R_a = 2 \cdot \int_0^{R_{\max}} \left(1 - \frac{y}{R_{\max}}\right) \cdot dy = \frac{R_{\max}}{4}. \quad (7.8)$$

Параметр шероховатости поверхности  $R_{\max}$  в данном случае определяется из условия:  $2 \operatorname{tg} \gamma \cdot n \cdot R_{\max} = B$ . Откуда

$$R_{\max} = \frac{B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}. \quad (7.9)$$

Соответственно

$$a = \frac{B}{4 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}; \quad (7.10)$$

$$R_a = \frac{0,125 \cdot B}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n}. \quad (7.11)$$

Сравнивая зависимости (7.5) и (7.11), видно, что при упорядоченном расположении режущих зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента и, соответственно, при упорядоченном наложении проекций зерен на диаметрально плоскость обрабатываемого образца (рис. 7.1,б), параметр шероховатости поверхности  $R_a$  в 3 раза меньше, чем при неупорядоченном наложении проекций зерен на диаметральной плоскости обрабатываемого образца (рис. 7.1,а). Это указывает на то, что неупорядоченный (вероятностный) характер участия



зерен в резании приводит к увеличению параметра шероховатости поверхности  $R_a$  (рис. 7.3) и, соответственно, к ухудшению качества обрабатываемой поверхности. Поэтому применение абразивных инструментов с упорядоченным расположением режущих зерен на его рабочей поверхности (например, абразивных лент, т.е. при ленточном шлифовании) позволяет повысить качество обработки за счет уменьшения параметра шероховатости поверхности  $R_a$ , что подтверждается многочисленными практическими данными [245].

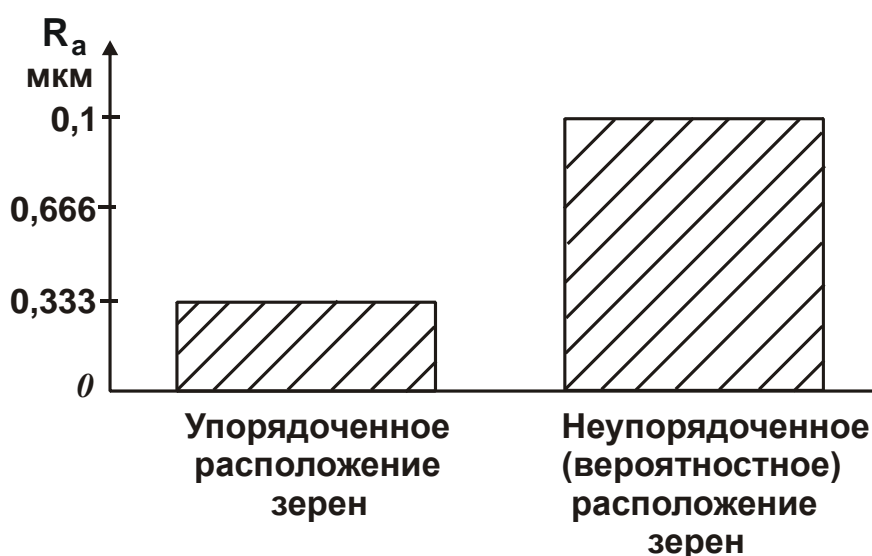


Рисунок 7.3 – Расчетные значения параметра шероховатости поверхности  $R_a$  при упорядоченном и неупорядоченном расположении зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента:

$$B = 1 \text{ мм}; \gamma = 45^{\circ}; n = 3,67 \cdot 10^3 \text{ шт.}$$

В отличие от параметра шероховатости поверхности  $R_a$ , параметр шероховатости поверхности  $R_{\max}$  для экспоненциальной функции  $\Phi(y)$ , описываемой зависимостью (7.1), можно определить лишь с наперед заданной степенью точности. Например, при условии  $y = R_{\max}$ , принимая значение  $\Phi(y = R_{\max}) = 0,1; 0,01; 0,001$  и т.д. Тогда при условии  $y = R_{\max}$  зависимость (7.1) опишется:

$$R_{\max} = - \frac{\ln \Phi(y = R_{\max}) \cdot B}{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n}. \quad (7.12)$$

Знак "минус" в зависимости (7.12) указывает на то, что функция  $\ln \Phi(y = R_{\max})$  является отрицательной.

С учетом зависимостей (7.12) и (7.5) отношение  $R_{\max}/R_a = -1,362 \cdot \ln \Phi(y = R_{\max})$ .

Принимая  $\Phi(y = R_{\max}) = 0,1$ , имеем  $\ln \Phi(y = R_{\max}) = -2,3$ . Тогда:

$$R_{\max} = \frac{1,15 \cdot B}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n}; \quad \frac{R_{\max}}{R_a} = 3,133.$$

Принимая  $\Phi(y = R_{\max}) = 0,01$ , имеем  $\ln \Phi(y = R_{\max}) = -4,6$ . Тогда:

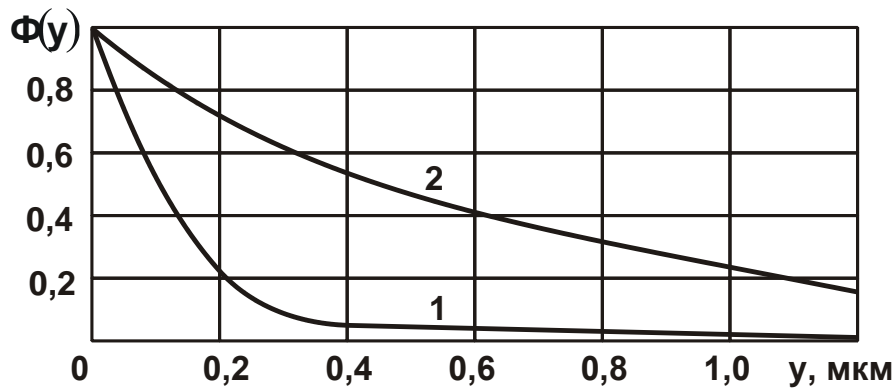
$$R_{\max} = \frac{2,3 \cdot B}{\operatorname{tg} \gamma \cdot n}; \quad \frac{R_{\max}}{R_a} = 6,266.$$

С уменьшением значения  $\Phi(y = R_{\max})$  параметр  $R_{\max}$  и отношение  $R_{\max}/R_a$  увеличиваются, причем, в неограниченных пределах. Поэтому установить истинные значения параметра  $R_{\max}$  и  $R_{\max}/R_a$  можно, используя иные условия. Например, рассматривая упорядоченное расположение зерен на рабочей поверхности инструмента (рис. 7.1,б). В этом случае, согласно зависимости (7.8), параметр  $R_{\max} = 4R_a$ . Однако в реальных условиях абразивной обработки, как правило, имеет место неупорядоченное расположение режущих зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента (рис. 7.1,а). Поэтому закономерности формирования шероховатости поверхности следует рассматривать с позиции теории вероятностей.

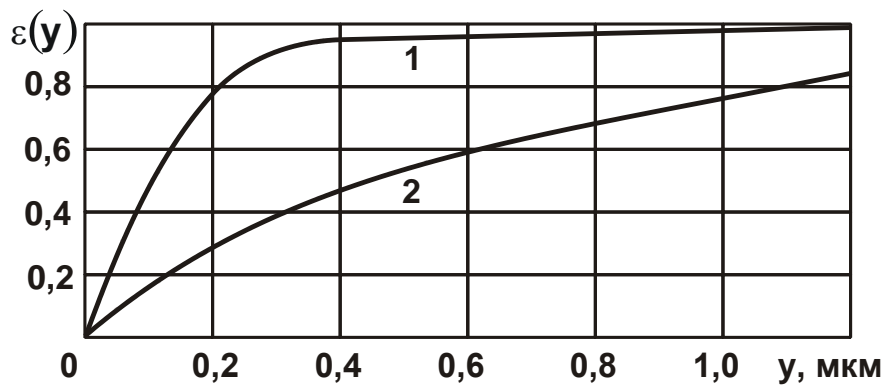
С учетом зависимости (7.5) вероятностную функцию  $\Phi(y)$ , описываемую зависимостью (7.1), можно представить в виде:

$$\Phi(y) = e^{-\frac{0,734}{R_a} \cdot y}. \quad (7.13)$$

Очевидно, чем больше параметр шероховатости поверхности  $R_a$ , тем меньше значение функции  $\Phi(y)$ . Поэтому при абразивном полировании, характеризующемся меньшими значениями  $R_a$  по сравнению с шлифованием, функция  $\Phi(y)$  будет принимать меньшие значения (рис. 7.4,а), а функция  $\varepsilon(y) = 1 - \Phi(y)$ , наоборот, большие значения (рис. 7.4,б). Подтверждением тому являются экспериментальные графики изменения классической функции – относительной опорной длины микропрофиля обработанной поверхности  $t_p$  (в %) после различных методов обработки (рис. 7.5 [142]). Они указывают на то, что при абразивном полировании достигается наименьшее значение шероховатости обработанной поверхности.



а



б

Рисунок 7.4 – Графики изменения функций  $\Phi(y)$  и  $\varepsilon(y)$ :

1 –  $R_a=0,1$  мкм; 2 –  $R_a=0,5$  мкм

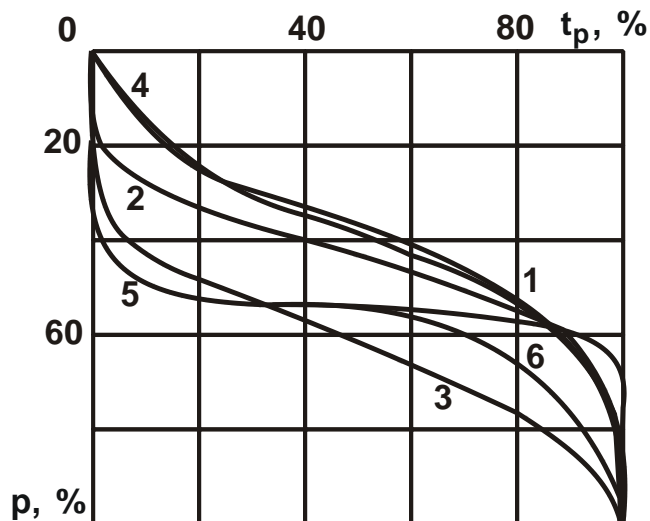


Рисунок 7.5 – Относительные опорные длины микропрофиля обработанной поверхности  $t_p$  (в %) образцов из сплава АМг4 после различных методов обработки: 1 – прокат (виходная поверхность); 2 – гидроабразивная обработка; 3 – точение; 4 – фрезерование; 5 – абразивное полирование; 6 – точение алмазом

Приведенные на рис. 7.5 графики функции  $t_p$  (в %) соответствуют графику изменения функции  $\varepsilon(y) = 1 - \Phi(y)$ , рис. 7.4. Для этого следует рассматривать координату  $y$  направленной в противоположную сторону, т.е. вниз с вершины наибольшей микронеровности. По мере увеличения координаты  $y$  функция  $\varepsilon(y) = 1 - \Phi(y)$  непрерывно увеличивается, асимптотически приближаясь к значению 1. Исходя из рис. 7.5, при абразивном полировании функция  $t_p$  увеличивается незначительно, а затем фактически при одинаковом значении  $y$  увеличивается почти от 0 до 1 и далее лишь асимптотически неограниченно приближается к значению 1. По сути, значение координаты  $y$ , при котором происходит резкое увеличение функции  $t_p$ , определяет положение средней линии микропрофиля обработанной поверхности  $y = a$  (рис. 7.2). Такое резкое увеличение функции  $t_p$  фактически от 0 до 1 указывает на весьма малое значение параметра шероховатости поверхности  $R_a$ , равное 0,1 мкм.

Наблюдаемое небольшое увеличение функции  $t_p$  на участке, предшествующем ее резкому увеличению фактически от 0 до 1, связано с наличием небольшого количества зерен, имеющих большую высоту выступания по сравнению с основной массой зерен. Следовательно, резкое изменение функции  $t_p$  в диапазоне от 0 до 1 объясняется участием в резании большого количества абразивных зерен, имеющих приблизительно одинаковую высоту выступания над уровнем рабочей поверхности абразивного инструмента. Поэтому эффект абразивного полирования состоит в первую очередь в возможности обеспечения фактически одновысотного расположения абразивных зерен на рабочей поверхности абразивного инструмента.

На рабочей поверхности шлифовального круга режущие зерна расположены разновысотно. В результате происходит разновысотное участие зерен в резании. Это приводит к увеличению параметров шероховатости поверхности  $R_a$ ,  $R_{max}$  и ухудшению качества обработки.

Таким образом показано, что при абразивном полировании можно добиться существенного уменьшения шероховатости обрабатываемой поверхности. Однако при этом продолжительность обработки достаточно высокая. Так, установлено, что продолжительность операции

круглого наружного шлифования твердосплавного режущего инструмента (развертки) составляет 1 ... 5 мин при съеме припуска до 2 мм. Продолжительность операции доводки алмазной пастой этого инструмента при съеме припуска 0,02 мм составляет от 3 до 12 мин и более. Как видно, процесс шлифования более производительен, однако требует изыскания путей уменьшения шероховатости поверхности до уровня, достигаемого при доводке и абразивном полировании.

## **7.2. Упрощенный подход к определению условий эффективного применения финишной абразивной обработки для уменьшения шероховатости поверхности**

Для более детального теоретического обоснования условий существенного уменьшения шероховатости поверхности при финишной абразивной обработке следует воспользоваться расчетной схемой определения параметров шероховатости поверхности, приведенной в работах [131, 142].

На рис. 7.6,а приведен график изменения функции  $L(y)$  – опорной длины микропрофиля обработанной поверхности по глубине  $y$ . За штрихованным показан неудаленный с обработанной поверхности металл, оставшийся в виде микронеровностей после предварительной лезвийной обработки. За начало отсчета ( $y=0$ ) на графике принята самая глубокая впадина микронеровностей, оставшихся после предварительной обработки. Координата  $y = R_{\max 0}$  соответствует максимальной высоте микронеровностей на обрабатываемой поверхности.

При абразивном полировании происходит удаление оставшихся после предварительной обработки микронеровностей. В результате координата  $y = R_{\max 0}$  через определенное время обработки переместится в положение  $y = R_{\max 1}$ . Расчетами установлено, что при упрощенном представлении на рис. 7.6,а функции  $L(y) = \operatorname{tg} \alpha \cdot y$  (где  $\operatorname{tg} \alpha = B / R_{\max 0}$ ;  $B$  – базовая длина обработанной поверхности, м) в виде прямой линии положение средней линии микропрофиля обработанной поверхности определяется из условия  $a = 0,5 \cdot R_{\max 0}$ . Соответственно, отношение параметров шероховатости обработанной поверхности  $R_{\max 0} / R_a = 4$ .

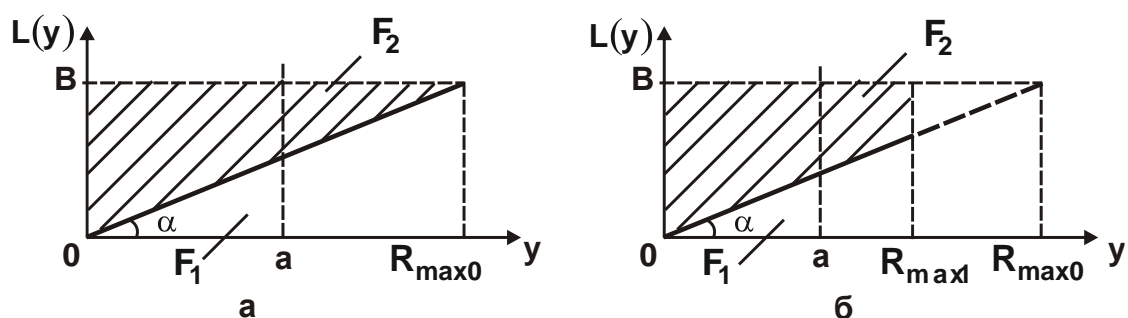


Рисунок 7.6 – Характер изменения функции  $L(y)$  по глубине микропрофиля  $y$  для исходной шероховатости поверхности (а) и после абразивной обработки (б)

При значении  $y = R_{\max1}$  (рис. 7.6,б) положение средней линии микропрофиля обработанной поверхности изменится. Для его определения следует воспользоваться известным условием [142], согласно которому площади  $F_1$  и  $F_2$ , определяющие площади впадин и выступов на базовой длине  $B$  обработанной поверхности, равны между собой.

Исходя из рис. 7.6,б, имеем:

$$F_1 = \int_0^a L(y) \cdot dy = \int_0^a \operatorname{tg} \alpha \cdot y \cdot dy = \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{a^2}{2}; \quad (7.14)$$

$$F_2 = (R_{\max1} - a) \cdot B - \int_a^{R_{\max1}} L(y) \cdot dy = (R_{\max1} - a) \cdot B - \operatorname{tg} \alpha \cdot \left( \frac{R_{\max1}^2}{2} - \frac{a^2}{2} \right). \quad (7.15)$$

Из условия  $F_1 = F_2$  получено:

$$a = R_{\max1} - \frac{R_{\max1}^2}{2 \cdot R_{\max0}}. \quad (7.16)$$

Тогда

$$F_1 = \frac{B \cdot R_{\max1}^2}{2 \cdot R_{\max0}} \cdot \left( 1 - \frac{R_{\max1}}{2 \cdot R_{\max0}} \right)^2; \quad (7.17)$$

$$F_2 = \frac{B \cdot R_{\max1}^2}{2 \cdot R_{\max0}} \cdot \left( 1 - \frac{R_{\max1}}{2 \cdot R_{\max0}} \right)^2. \quad (7.18)$$

Как видно, площади  $F_1$  и  $F_2$  равны между собой. Следовательно, расчеты выполнены правильно.

Параметр шероховатости поверхности  $R_a$  определяется из условия  $R_a \cdot B = F_1 + F_2$  или

$$\frac{1}{2} \cdot R_a \cdot B = F_1. \quad (7.19)$$

С учетом зависимости (7.17) имеем:

$$R_a = \frac{R_{\max 1}^2}{R_{\max 0}} \cdot \left(1 - \frac{R_{\max 1}}{2 \cdot R_{\max 0}}\right)^2. \quad (7.20)$$

В табл. 7.1 приведены рассчитанные на основе зависимости (7.20) значения параметра  $R_a$ .

Таблица 7.1 – Расчетные значения параметра  $R_a$  при  $R_{\max 0} = 1$  мкм

$R_{\max 1}$ , мкм	0	0,01	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,67	0,8	1,0
$R_a$ , мкм	0	0,0001	0,0023	0,009	0,0324	0,065	0,102	0,176	0,2	0,23	0,25

Как видно, с уменьшением параметра  $R_{\max 1}$  в пределах  $R_{\max 0} \dots 0$  значения  $R_a$  непрерывно уменьшаются, вплоть до нуля. Это указывает на возможность существенного уменьшения параметра  $R_a$  в условиях абразивного полирования за счет уменьшения высоты микронеровностей исходной шероховатости. Данная закономерность, по сути, и определяет эффективность применения на практике абразивного полирования. В этих условиях расчет параметра  $R_a$  можно производить по упрощенной зависимости (7.20):

$$R_a = \frac{R_{\max 1}^2}{R_{\max 0}}. \quad (7.21)$$

Уменьшение параметра  $R_a$  с уменьшением параметра  $R_{\max 1}$  связано с уменьшением площадей  $F_1$  и  $F_2$ . В результате площадь  $(a \cdot B - F_1)$  незначительно отличается от площади  $a \cdot B$  (рис. 7.6,б) и параметр  $R_a \rightarrow 0$  согласно зависимости (7.19).

Из зависимости (7.20) вытекает зависимость для определения отношения параметров шероховатости поверхности  $R_a/R_{\max1}$ :

$$\frac{R_a}{R_{\max1}} = \frac{R_{\max1}}{R_{\max0}} \cdot \left(1 - \frac{R_{\max1}}{2 \cdot R_{\max0}}\right)^2. \quad (7.22)$$

В зависимости (7.22) отношение параметров  $R_{\max1}/R_{\max0}$  оказывает противоположное влияние на отношение параметров шероховатости поверхности  $R_a/R_{\max1}$ . Для определения экстремального значения функции  $R_a/R_{\max1}$  следует зависимость (7.22) подчинить необходимому условию экстремума: первая производная функции  $R_a/R_{\max1}$  от отношения  $R_{\max1}/R_{\max0}$  равна нулю. Используя это условие, получено:  $R_a/R_{\max1}=0,67$ .

Расчетами установлено, что в точке экстремума вторая производная функции  $R_a/R_{\max1}$  по величине  $R_{\max1}/R_{\max0}$  принимает отрицательное значение. Это указывает на то, что в точке экстремума функция принимает максимальное значение, а противоположная функция  $R_{\max1}/R_{\max0}$  – минимальное значение. Однако экстремум не настолько явно выражен, поскольку в широком диапазоне изменения величины  $R_{\max1}/R_{\max0}$  функции  $R_a/R_{\max1}$  и  $R_{\max1}/R_{\max0}$  фактически постоянны.

В табл. 7.2 и на рис. 7.7 приведены расчетные значения отношения  $R_a/R_{\max1}$ , которые подтверждают правильность аналитического решения. В диапазоне изменения  $R_{\max1}/R_{\max0}=0,4...1,0$  отношение  $R_a/R_{\max1}$  изменяется несущественно, а с уменьшением значений  $R_{\max1}/R_{\max0}=0,1...0,01$  оно принимает весьма малые значения –  $R_a/R_{\max1}=0,1...0,01$ . Соответственно, отношение  $R_{\max1}/R_a = 10...100$ .

Таблица 7.2 – Расчетные значения отношений  $R_a/R_{\max1}$  и  $R_{\max1}/R_a$

$R_{\max1}/R_{\max0}$	0	0,005	0,01	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6	0,67	0,8	1,0
$R_a/R_{\max1}$	0	0,005	0,01	0,047	0,09	0,162	0,216	0,256	0,294	0,296	0,288	0,25
$R_{\max1}/R_a$	$\infty$	200	100	21,3	11,1	6,17	4,63	3,9	3,4	3,38	3,47	4,0

Как видно, в этом случае отношения  $R_{\max1}/R_{\max0}$  и  $R_a/R_{\max1}$  фактически равны между собой. Этим объясняются экспериментальные данные, приведенные в работе [142], согласно которым при абразивном



полировании отношение  $R_{\max1}/R_a$  достигает значения 30 и более. В результате фактически полностью устраняется исходная шероховатость и на обработанной поверхности образуется шероховатость, сформированная непосредственно в процессе абразивного полирования.

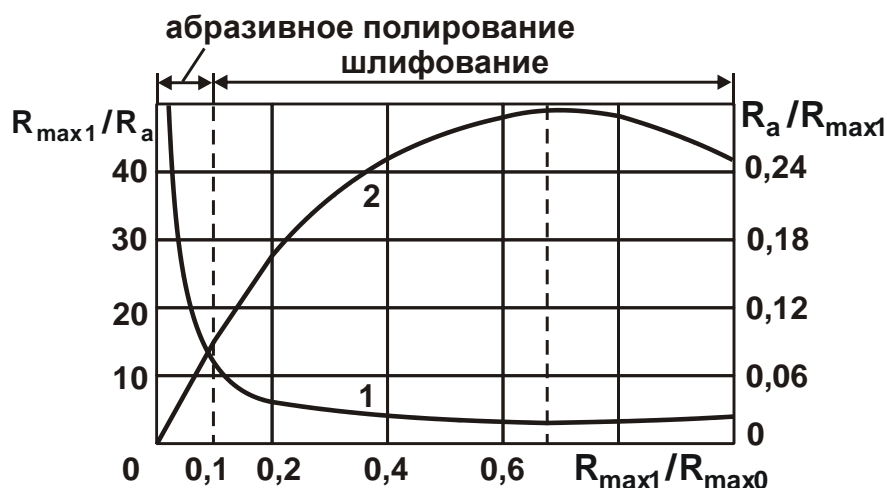


Рисунок 7.7 – Зависимости отношений  $R_{\max1}/R_a$  (1) и  $R_a/R_{\max1}$  (2) от отношения  $R_{\max1}/R_{\max0}$

При шлифовании отношение  $R_{\max1}/R_a$ , как правило, не превышает значение 10. Исходя из табл. 7.2 и рис. 7.7, это указывает на то, что процесс шлифования осуществляется при изменении отношения  $R_{\max1}/R_{\max0} = 0,1 \dots 1$ , тогда как процесс абразивного полирования осуществляется при изменении отношения  $R_{\max1}/R_{\max0} = 0,01 \dots 0,1$ , т.е. в весьма малом диапазоне.

Таким образом, на основе предложенного теоретического подхода удалось определить характер изменения отношения  $R_a/R_{\max1}$ , которое дополняет анализ образования шероховатости поверхности при абразивной обработке с помощью параметра  $R_a$ .

Для более полного анализа закономерностей формирования шероховатости поверхности при абразивной обработке следует рассмотреть аналитическую зависимость для определения параметра  $R_a$ , приведенную в работе [205]:

$$R_a = \frac{0,367 \cdot B}{\text{tg} \gamma \cdot n}, \quad (7.23)$$

где  $\gamma$  – половина угла при вершине конусообразного режущего зерна;

$n = k \cdot V \cdot l$  – количество абразивных зерен, принимающих участие в процессе образования шероховатости поверхности;  $k$  – поверхностная концентрация абразивных зерен, шт./м<sup>2</sup>;  $l$  – длина контакта абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью, м.

Окончательно зависимость (7.23) принимает вид:

$$R_a = \frac{0,367}{\text{tg}\gamma \cdot k \cdot l}. \quad (7.24)$$

Как следует из зависимости (7.24), уменьшить параметр  $R_a$  можно за счет увеличения двух параметров:  $k$  и  $l$ . Увеличение параметра  $l$  при внутреннем шлифовании предполагает увеличение длины контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью. Для этого можно использовать предложенную в ГВУЗ "Приазовский государственный технический университет" на кафедре "Технология машиностроения" схему внутреннего шлифования, устанавливая ось вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия (рис. 7.8 [203]).



Рисунок 7.8 – Схема обработки отверстия в цилиндре

Эта схема позволяет в несколько раз увеличить длину контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью и изменить направление образования рисок от проработавших зерен. Они будут образовываться фактически вдоль обрабатываемой поверхности, что положительно отразится на работоспособности пневмо- и гидроцилиндров.

Увеличить поверхностную концентрацию абразивных зерен  $k$  на рабочей поверхности шлифовального круга можно за счет применения круга с мягкой основой, например, мягкого войлочного (фетрового) круга с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П [203]. В этом случае под действием нагрузки абразивные зерна "утопают" в связку и в процессе резания участвует большее их количество, что способствует увеличению параметра  $k$ . Применение такого шлифовального круга позволяет одновременно увеличить параметры  $k$  и  $l$ . Это приводит к уменьшению параметра шероховатости поверхности  $R_a$  до значения 0,04 мкм, чего невозможно достичь при внутреннем шлифовании обычными абразивными кругами.

Установленное такое небольшое значение параметра шероховатости поверхности  $R_a$  соответствует значениям  $R_a$ , полученным при абразивном полировании. Однако при внутреннем шлифовании достигается более высокая производительность обработки, что позволяет совместить операции предварительного и окончательного внутреннего абразивного шлифования в одну операцию с обеспечением требуемых (высоких) показателей шероховатости обрабатываемых поверхностей. Следовательно, основным фактором, влияющим на достижение высоких показателей шероховатости обрабатываемых поверхностей при абразивной обработке необходимо рассматривать увеличение количества работающих зерен  $n$ . С их увеличением ( $n = k \cdot V \cdot l$ ) за счет увеличения параметров  $k$  и  $l$  параметр шероховатости поверхности  $R_a$  уменьшается и может принимать весьма малые значения.

Для установления связи количества работающих зерен  $n$  со скоростью поперечной подачи шлифовального круга  $S_{\text{поп}}$  необходимо представить  $l = V \cdot \tau$ , где  $V$  – скорость резания, м/с;  $\tau = R_{\text{max1}} / S_{\text{поп}}$  – время перемещения шлифовального круга в радиальном направлении на величину  $R_{\text{max1}}$ , с.

Параметр шероховатости поверхности  $R_{\text{max1}}$  следует выразить через известное отношение  $R_{\text{max1}} / R_a$ , расчетные значения которого приведены в табл. 7.2:

$$R_{\text{max1}} = \left( \frac{R_{\text{max1}}}{R_a} \right) \cdot R_a. \quad (7.25)$$

Подставляя приведенные выше выражения в зависимость (7.24), получено:

$$R_a = \frac{0,367 \cdot S_{\text{поп}}}{\text{tg}\gamma \cdot k \cdot V \cdot \left(\frac{R_{\text{max1}}}{R_a}\right) \cdot R_a},$$

откуда

$$R_a = \sqrt{\frac{0,367 \cdot S_{\text{поп}}}{\text{tg}\gamma \cdot k \cdot V \cdot \left(\frac{R_{\text{max1}}}{R_a}\right)}}. \quad (7.26)$$

Значение отношения  $R_{\text{max1}}/R_a$  необходимо устанавливать из условия примерного равенства значений параметра шероховатости поверхности  $R_a$ : рассчитанного по зависимости (7.26) и приведенного в табл. 7.2. Исходя из зависимости (7.26), параметр шероховатости поверхности  $R_a$  в меньшей степени изменяется с изменением параметров процесса шлифования, чем в зависимости (7.24).

Уменьшить параметр шероховатости поверхности  $R_a$  можно увеличением параметров  $k$ ,  $V$  и отношения  $R_{\text{max1}}/R_a$ , которое, согласно табл. 7.2, тем больше, чем меньше параметр шероховатости поверхности  $R_{\text{max1}}$ . Из этого вытекает, что, осуществляя процесс полирования, для которого отношение  $R_{\text{max1}}/R_a$  принимает относительно большие значения, можно добиться существенного уменьшения параметра  $R_a$ . Кроме того, уменьшению параметра  $R_a$  при абразивном полировании способствует также уменьшение скорости поперечной подачи  $S_{\text{поп}}$ . При обычном абразивном шлифовании  $S_{\text{поп}}$  больше, чем при абразивном полировании, а отношение  $R_{\text{max1}}/R_a$ , входящее в зависимость (7.26), наоборот, меньше. Это предопределяет более высокие значения параметра шероховатости поверхности  $R_a$  при абразивном шлифовании. Поэтому в этих условиях эффективно применение указанного выше шлифовального круга с мягкой основой, например, мягкого войлочного (фетрового) круга с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П [203]. Для него отношение  $R_{\text{max1}}/R_a$  больше, а, соответственно, меньше параметр шероховатости поверхности  $R_a$  даже при увеличенных значениях  $S_{\text{поп}}$ .

### 7.3. Развитие теоретико-вероятностного подхода к определению параметров шероховатости поверхности при шлифовании

В работах профессор Новикова Ф. В. [141, 142] приведены аналитические зависимости для определения параметров шероховатости поверхности при шлифовании. Однако они получены применительно к конусообразной форме режущих зерен, что справедливо в большей мере для зерен круга, изготовленных из синтетических сверхтвердых материалов. Обычные абразивные зерна в расчетах, как правило, моделируются в форме сферы. Поэтому важно полученные аналитические зависимости подчинить условиям шлифования кругом со сферической формой режущих зерен. Это позволит количественно оценить результаты расчетов параметров шероховатости поверхности при шлифовании для различных форм зерен и определить возможности их практического использования для прогнозирования условий уменьшения высотных параметров шероховатости поверхности. Для решения этой задачи следует воспользоваться аналитической зависимостью для определения максимальной высоты микронеровностей на обработанной поверхности детали  $R_{\max}$  при шлифовании, приведенной в работе [141]:

$$R_{\max} = 5 \sqrt{\frac{10^5 \cdot \pi^2 \cdot \bar{X}^6 \cdot V_{\text{дет}}^2 \cdot \rho}{\text{tg}^2 \gamma \cdot m^2 \cdot V_{\text{кр}}^2}}, \quad (7.27)$$

где  $V_{\text{дет}}$  – скорость детали, м/с;  $V_{\text{кр}}$  – скорость круга, м/с;  $\bar{X}$  – зернистость круга, м;  $m$  – объемная концентрация зерен в круге;  $R_{\text{дет}}$  – радиус детали, м;  $R_{\text{кр}}$  – радиус круга, м;  $\rho = \frac{1}{R_{\text{дет}}} + \frac{1}{R_{\text{кр}}}$  – приведенный радиус, м<sup>-1</sup>;  $\gamma$  – половина угла при вершине режущей части зерна в форме конуса.

При плоском шлифовании  $R_{\text{дет}} \rightarrow \infty$ , тогда  $\rho = 1/R_{\text{кр}}$ . При круглом наружном шлифовании  $\rho = \frac{1}{R_{\text{дет}}} + \frac{1}{R_{\text{кр}}}$ , а при внутреннем шлифовании

$\rho = -\frac{1}{R_{\text{дет}}} + \frac{1}{R_{\text{кр}}}$ , т.к.  $R_{\text{дет}}$  принимает отрицательное значение.

Зависимость (7.27) содержит неопределенный параметр – угол  $\gamma$ . При моделировании режущего зерна в форме конуса его рекомендуется в расчетах принимать равным или близким к  $45^\circ$ , исходя из экспериментальных данных измерения углов при вершинах абразивных зерен.

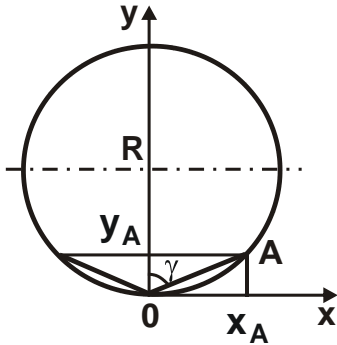


Рисунок 7.9 – Расчетная схема координат точки А –  $x_A$  и  $y_A$

Как показано выше, при анализе процесса шлифования абразивным кругом традиционно режущие зерна рассматриваются в форме сферы. Поэтому следует воспользоваться расчетной схемой, представленной на рис. 7.9, рассматривая угол  $2\gamma$ , вписанным в окружность, которая соответствует форме режущего зерна. Поскольку

$R_{\max}$  значительно меньше радиуса зерна  $R$ , то вполне допустимо его сферическую часть представить в форме конуса. Тогда тригонометрическая функция  $\text{tg}\gamma$ , входящая в зависимость (7.27), определится:

$$\text{tg}\gamma = \frac{x_A}{y_A}, \quad (7.28)$$

где  $x_A, y_A$  – координаты точки А, в которой происходит пересечение поверхностей конуса и сферы.

Координата  $y_A = R_{\max}$ , а координата  $x_A$  определяется из уравнения окружности:

$$x^2 + (y - R)^2 = R^2, \quad (7.29)$$

где  $\bar{X} = 2 \cdot R$  – диаметр абразивного зерна, м.

Откуда

$$x_A = \sqrt{R^2 - (y_A - R)^2} \approx \sqrt{\bar{X} \cdot R_{\max}}. \quad (7.30)$$

Подставляя зависимость (7.30) в (7.28), имеем:

$$\text{tg}\gamma = \sqrt{\frac{\bar{X}}{R_{\max}}}. \quad (7.31)$$

Зависимость (7.27) с учетом зависимости (7.31) принимает вид:

$$R_{\max} = \sqrt[5]{\frac{R_{\max}}{\bar{X}} \cdot \frac{10^5 \cdot \pi^2 \cdot \bar{X}^6 \cdot V_{\text{дет}}^2 \cdot \rho}{\text{tg}^2 \gamma \cdot \text{m}^2 \cdot V_{\text{кр}}^2}}. \quad (7.32)$$

После возведения левой и правой частей зависимости (7.32) в пятую степень, получено:

$$R_{\max}^4 = \frac{10^5 \cdot \pi^2 \cdot \bar{X}^5 \cdot V_{\text{дет}}^2 \cdot \rho}{m^2 \cdot V_{\text{кр}}^2},$$

откуда

$$R_{\max} = 10 \cdot \bar{X} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot \sqrt{10 \cdot \bar{X} \cdot \rho \cdot V_{\text{дет}}}}{m \cdot V_{\text{кр}}}}. \quad (7.33)$$

Таким образом, установлена зависимость для определения параметра шероховатости поверхности  $R_{\max}$  при шлифовании кругом со сферическими режущими зернами. Она отличается от аналогичной зависимости (7.27), справедливой для круга с конусообразными режущими зернами.

Проведем сравнение результатов расчетов параметра шероховатости  $R_{\max}$  по зависимостям (7.33) и (7.27), используя исходные данные, приведенные в работе [141]:  $V_{\text{дет}} = 1$  м/мин.;  $V_{\text{кр}} = 35$  м/с;  $R_{\text{дет}} = 80$  мм;  $R_{\text{кр}} = 150$  мм;  $\bar{X} = 0,2$  мм;  $m = 100$ .

Исходя из зависимости (7.33), расчетами установлено:  $R_{\max} = 3,4$  мкм. Соответственно, параметр шероховатости поверхности  $R_a$  с учетом известного условия  $R_{\max}/R_a = 5$  равен  $R_a = 0,68$  мкм. Расчетное значение угла  $\gamma$  (рис. 7.9) в этом случае равно  $\gamma = 82^\circ$ .

Исходя из зависимости (7.27), с учетом  $\gamma = 45^\circ$  расчетами установлено:  $R_{\max} = 7,72$  мкм;  $R_a = 1,54$  мкм.

Как видно, при сферической форме режущих зерен параметр шероховатости поверхности  $R_a$  принимает значение, в 2,26 раза меньше, чем при конусообразной форме зерен. Это в большей мере соответствует экспериментальным данным параметра шероховатости поверхности  $R_a$  (рис. 7.10 [140]), полученным при круглом наружном шлифовании (с небольшой глубиной шлифования  $t = 0,05$  мм) твердосплавного изделия (многолезвийного инструмента – фрезы) алмазным кругом 1A1 300x25 AC6 200/160 M1-01 4 на металлической связке M1-01. Обрабатываемый материал – твердый сплав ВК8. Долевая продольная подача (определяемая отношением ширины шлифования к высоте круга) устанавливалась равной  $S_d = 0,9$ .

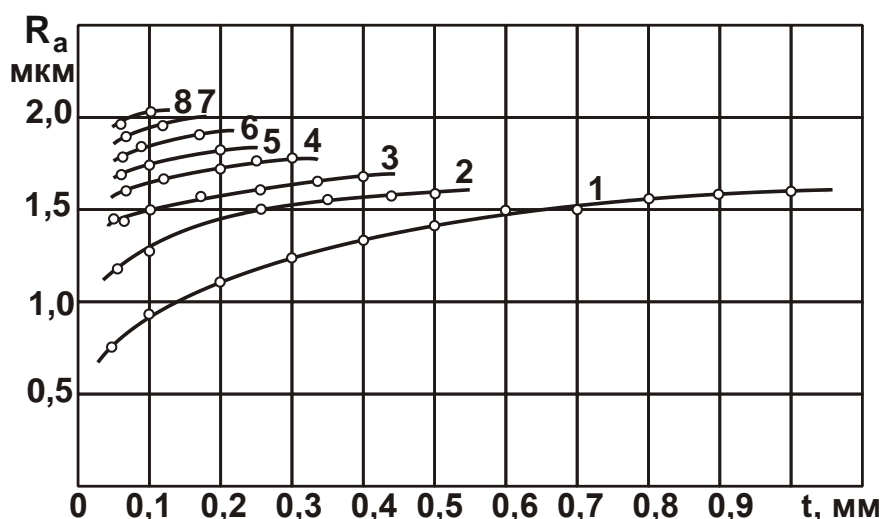


Рисунок 7.10 – Зависимость параметра шероховатости поверхности  $R_a$  от глубины шлифования  $t$ . Условия шлифования: алмазный круг – 1A1 300x25 AC6 200/160 M1-01 4; обрабатываемый материал – твердый сплав BK8;  $V_{кр} = 35$  м/с;  $S_d = 0,9$ ;  $R_{дет} = 80$  мм; 1, ..., 6 –  $V_{дет} = 1, \dots, 6$  м/мин.; 7 –  $V_{дет} = 8$  м/мин.; 8 –  $V_{дет} = 10$  м/мин

Как следует из рис. 7.10, с увеличением глубины шлифования  $t$  и переходом в область глубинного шлифования параметр шероховатости поверхности  $R_a$  увеличивается. Это происходит в результате повышения интенсивности разрушения алмазных зерен и образования на них острых режущих кромок, т.е. в результате перехода от сферической формы режущих зерен к конусообразной форме. В этом случае целесообразно параметр шероховатости поверхности  $R_a$  устанавливать на основе зависимости (7.27), которая справедлива для конусообразной формы режущих зерен. Полученное расчетное значение  $R_a = 1,54$  мкм для этого случая с учетом  $\gamma = 45^\circ$  вполне соответствует экспериментально установленным значениям при  $t > 0,05$  мм (рис. 7.10).

Расчет параметра шероховатости поверхности  $R_a$  на основе зависимости (7.33) для скорости детали  $V_{дет} = 10$  м/мин показал, что  $R_a = 2,15$  мкм (при  $R_{max} = 10,74$  мкм). Соответственно, расчетное значение угла  $\gamma = 77^\circ$ . Сравнивая расчетное значение  $R_a$  с экспериментальным значением  $R_a$  при глубине шлифования  $t = 0,05$  мм (рис. 7.10), установлено, что они близки. Расхождение этих значений составляет менее 10 %, что свидетельствует о достоверности предложенного



подхода к расчету параметров шероховатости поверхности  $R_a$  и  $R_{max}$  при шлифовании кругом со сферической формой режущих зерен.

Таким образом, предложенный теоретический подход позволяет уточнить известные расчетные зависимости для определения параметров шероховатости поверхности при шлифовании и получить более точные расчетные значения высотных параметров шероховатости поверхности. Установленная зависимость (7.31) для определения функции  $\text{tg}\gamma$  позволяет уточнить приведенное в работе [141] теоретическое решение об определении максимальной (вероятностной) толщины среза при шлифовании:

$$H_{max} = \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{\rho \cdot t}}{\text{tg}\gamma \cdot m \cdot V_{кр}}} \quad (7.34)$$

Подставляя в зависимость (7.34) функцию  $\text{tg}\gamma$ , определяемую зависимостью (7.31), имеем:

$$H_{max} = \sqrt[3]{\sqrt{\frac{H_{max}}{\bar{X}}} \cdot \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{\rho \cdot t}}{m \cdot V_{кр}}} \quad \text{или} \quad (7.35)$$

$$H_{max}^6 = \frac{H_{max}}{\bar{X}} \cdot \left( \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{\rho \cdot t}}{m \cdot V_{кр}} \right)^2 \quad (7.36)$$

Откуда

$$H_{max} = \bar{X} \cdot \sqrt[5]{\left( \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{\rho \cdot t}}{m \cdot V_{кр}} \right)^2} \quad (7.37)$$

В результате получено аналитическое решение, позволяющее привести в соответствие теорию и практику шлифования, поскольку в зависимости (7.37) отсутствует неопределенная функция  $\text{tg}\gamma$ .

На основе зависимости (7.37) с учетом  $\bar{X} = 2 \cdot R$  (где  $R$  – радиус зерна, м) можно установить отношение  $H_{max}/R$  [142], определяющее условия осуществления процесса резания (стружкообразования) или пластического деформирования обрабатываемого материала (без образования стружки):

$$\frac{H_{max}}{R} = 2 \cdot \sqrt[5]{\left( \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{\rho \cdot t}}{m \cdot V_{кр}} \right)^2} \quad \text{или} \quad (7.38)$$

$$\frac{H_{\max}}{R} = 2 \cdot \sqrt[5]{\left( \frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot Q}{m \cdot V_{\text{кр}} \cdot B} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{t}} \right)^2}, \quad (7.39)$$

где  $Q = B \cdot V_{\text{дет}} \cdot t$  – производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;  $B$  – ширина шлифования, м.

Расчетами установлено, что при  $Q = 10 \cdot 10^3$  мм<sup>3</sup>/мин отношение  $H_{\max}/R = 0,255$ , а при  $Q = 10^3$  мм<sup>3</sup>/мин., соответственно,  $H_{\max}/R = 0,1$ . Как известно, при  $H_{\max}/R = 0,255$  процесс резания (стружкообразования) осуществим, а при  $H_{\max}/R = 0,1$  будет преобладать процесс пластического деформирования обрабатываемого материала.

Таким образом установлено, что, благодаря предложенному подходу к определению параметров шероховатости поверхности при шлифовании, можно более точно и обоснованно подходить к выбору оптимальных условий обработки, обеспечивающих заданную шероховатость обработанной поверхности. Полученные теоретические решения являются дальнейшим развитием работы [208], посвященной определению условий уменьшения высотных параметров шероховатости поверхности  $R_a$  и  $R_{\max}$  при шлифовании.

#### **7.4. Расчет параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке с учетом износа режущих зерен шлифовального круга**

Актуальной следует рассматривать задачу аналитического определения параметров шероховатости поверхности и условий их уменьшения с учетом износа режущих зерен и образования на них площадок износа. Установленные на этой основе более глубокие закономерности формирования шероховатости обрабатываемой поверхности позволят научно обоснованно подходить к определению условий повышения эффективности финишной абразивной обработки [206].

Для обобщенного анализа закономерностей формирования шероховатости поверхности при абразивной обработке необходимо рассмотреть упрощенный теоретический подход к расчету параметров

шероховатости поверхности, принимая, что обработка производится режущими зёрнами конусообразной формы одинаковой высоты с углом при вершине  $2\gamma$ . При их наложении на диаметрально расположенную плоскость (имитирующую обрабатываемый образец) образуется режущий профиль с равноудаленными проекциями вершин зёрен (рис. 7.11,а).

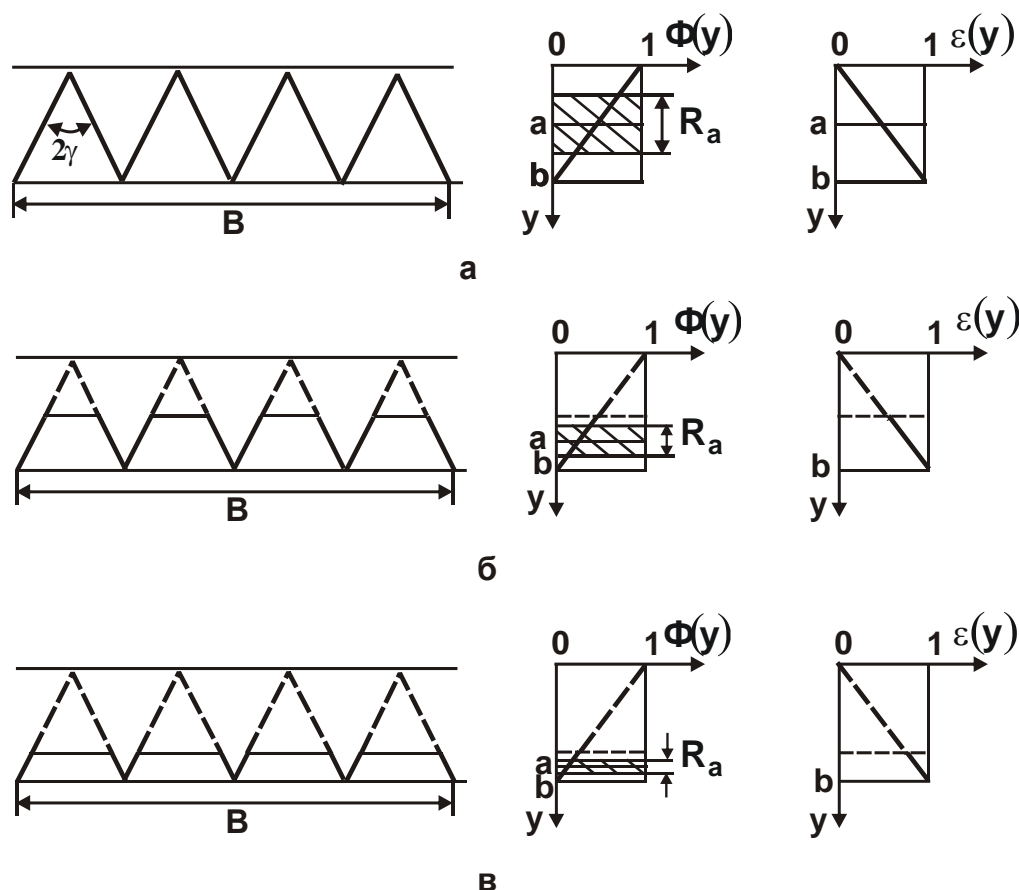


Рисунок 7.11 – Расчетная схема параметров шероховатости поверхности

Относительная полнота этого профиля  $\varepsilon(y)$  и противоположная функция  $\Phi(y) = 1 - \varepsilon(y)$  описываются прямыми линиями на этом же рисунке. Следовательно, величина  $a$ , определяющая положение средней линии микропрофиля обработанной поверхности, равна  $a = 0,5 \cdot b$  (рис. 7.11,а), а параметр шероховатости поверхности  $R_a = 0,25 \cdot b$ , где  $b$  – высота выступания вершин неизношенных зёрен над уровнем рабочей поверхности абразивного инструмента, м. Это вытекает из условия:  $F_1 = \frac{1}{2} \cdot R_a \cdot 1$ , где  $F_1 = \frac{1}{8} \cdot b \cdot 1$  – площадь треугольника. Отсюда вы-

текает отношение:  $b/R_a = 4$  или с учетом условия  $b = R_{\max}$  имеем:  $R_{\max}/R_a = 4$ .

Установленное теоретически значение отношения  $R_{\max}/R_a = 4$  согласуется с известными экспериментальными данными [230], полученными при шлифовании.

Важно рассмотреть случай абразивной обработки режущими зернами одинаковой высоты с образованными на их вершинах площадками износа одинаковой длины  $x_1 = 0,5 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot b$  (рис. 7.11,б), которые имитируют геометрическую форму режущей части зерна. В этом случае функции  $\varepsilon(y)$  и  $\Phi(y)$  имеют вид, показанный сплошной линией на рис. 7.11,б. Очевидно, величина  $a = 0,75 \cdot b$ , а параметр шероховатости поверхности  $R_a$  определяется из условия  $F_1 = \frac{1}{2} \cdot R_a \cdot 1$ , где

$F_1 = \frac{1}{8} \cdot \left( \frac{1}{4} \cdot b \cdot 1 \right)$ . Соответственно, отношение  $b/R_a = 16$  или с учетом условия  $b = 2 \cdot R_{\max}$  принимает значение  $R_{\max}/R_a = 8$ .

Как видно, с образованием на режущих зернах площадок износа отношение  $R_{\max}/R_a$  увеличилось до значения, которое нетипично для процесса шлифования, однако имеет место при абразивном полировании. Так, в работе [235] показано, что при абразивном полировании (рис. 7.12) экспериментально установленное значение  $R_{\max}/R_a = 30$ , т.е. это значение еще больше превышает теоретически установленное значение, равное  $R_{\max}/R_a = 8$ .

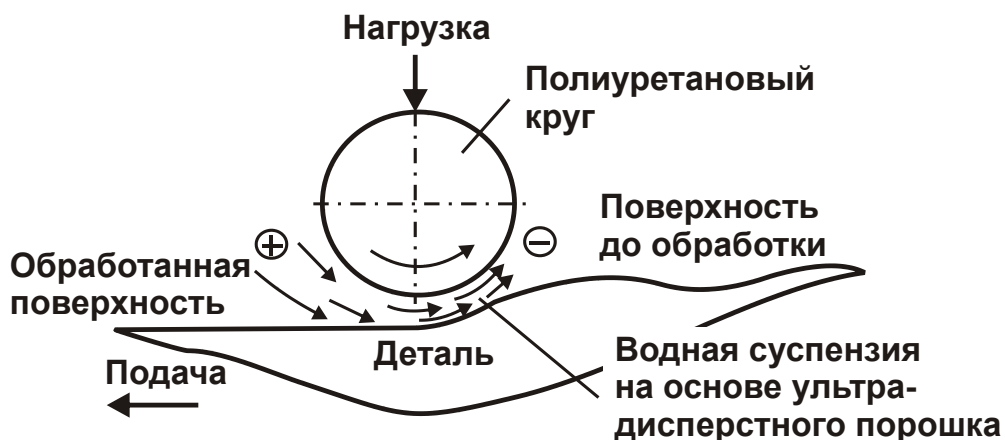


Рисунок 7.12 – Схема полирования суспензией на основе ультрадисперсного порошка [235]

Выполняя аналогично расчеты параметра шероховатости поверхности  $R_a$  при абразивной обработке режущими зернами с еще большими длинами площадок износа, например, с  $x_1 = 0,25 \cdot \text{tg} \gamma \cdot b$  (рис. 7.11,в), из условия  $F_1 = \frac{1}{2} \cdot R_a \cdot 1$ , где  $F_1 = \frac{1}{8} \cdot \left( \frac{1}{16} \cdot b \cdot 1 \right)$ , установлено отношение  $b/R_a = 64$ . С учетом условия  $b = 4R_{\text{max}}$  отношение  $R_{\text{max}}/R_a = 16$ . В этом случае отношение  $R_{\text{max}}/R_a$  увеличилось в 2 раза по сравнению с предыдущим случаем.

С увеличением длины площадки износа на режущем зерне до значения  $x_1 = 0,125 \cdot \text{tg} \gamma \cdot b$ , из условия  $F_1 = \frac{1}{2} \cdot R_a \cdot 1$ , где  $F_1 = \frac{1}{8} \cdot \left( \frac{1}{64} \cdot b \cdot 1 \right)$ , установлено отношение  $b/R_a = 254$ . С учетом условия  $b = 8 \cdot R_{\text{max}}$  отношение  $R_{\text{max}}/R_a = 32$ .

Как видно, теоретически установленное значение отношение  $R_{\text{max}}/R_a$  примерно совпадает с экспериментально установленным значением, равным  $R_{\text{max}}/R_a = 30$ . Это указывает на то, что длина площадки износа на режущих зернах оказывает значительное влияние на отношение  $R_{\text{max}}/R_a$ . Следовательно, добиться уменьшения параметра шероховатости поверхности  $R_a$  можно за счет создания на режущих зернах площадок износа, т.е. создания так называемых "плосковершинных" зерен [230] или применения овализированных абразивных зерен [235].

Необходимо отметить, что приведенные результаты расчетов справедливы при обработке абразивным инструментом без поперечной подачи. В противном случае закономерности формирования шероховатости поверхности изменятся в связи с разновысотным наложением проекций зерен на диаметрально расположенную плоскость. А это приведет к увеличению параметра шероховатости поверхности  $R_a$ . Чем больше поперечная подача абразивного инструмента, тем в большей мере будет проявляться разновысотное наложение проекций зерен на диаметрально расположенную плоскость и, соответственно, больше будет параметр шероховатости поверхности  $R_a$ . Поэтому при высокопроизводительном шлифовании, несмотря на возможность образования на режущих зернах значительных площадок износа, параметр шерохова-

тости поверхности  $R_a$  будет существенно увеличиваться. Очевидно, уменьшить его можно в условиях абразивного полирования при весьма малых значениях поперечной подачи с обеспечением достаточно высоких значений отношения  $R_{\max}/R_a > 4$ .

Если рассматривать в первом приближении в качестве толщины среза режущим зерном  $a_z$  параметр шероховатости поверхности  $R_{\max}$ , то при абразивном полировании наблюдается тенденция перехода от процесса резания к процессам трения и упруго-пластического деформирования обрабатываемого материала с абразивным зерном (без образования микростружки). Данная закономерность возможна лишь в условиях абразивного полирования, осуществляемого при фактически одновысотном расположении зерен на рабочей поверхности инструмента, и с небольшой поперечной подачей. При обычном шлифовании, как отмечалось выше, такой процесс обработки неосуществим в связи с разновысотным расположением режущих зерен на рабочей поверхности шлифовального круга, а также в связи с увеличенной поперечной подачей. В этом случае отношение  $R_{\max}/R_a$  меньше и изменяется, как установлено экспериментально [30, 63, 89, 106, 147, 230], в пределах 4 ... 10. Поэтому на финишных операциях следует использовать шлифовальные круги фактически с одновысотным выступанием режущих зерен над уровнем связки. Это позволит уменьшить высоты микронеровностей на обрабатываемых поверхностях.

Исходя из предложенного теоретического подхода определения отношения  $R_{\max}/R_a$ , можно установить его обобщенную аналитическую зависимость. Для этого следует высоту  $v$  разбить на  $z$  одинаковых частей. Тогда площадь треугольника  $F_1 = \frac{1}{8} \cdot \left( \frac{b}{z} \cdot \frac{1}{z} \right)$ , а с учетом условия  $F_1 = \frac{1}{2} \cdot R_a \cdot 1$  равна:  $R_a = \frac{1}{4} \cdot \frac{b}{z^2}$ . С учетом  $b = z \cdot R_{\max}$  получено:

$$\frac{R_{\max}}{R_a} = 4 \cdot z. \quad (7.40)$$

В табл. 7.3 и рис. 7.13 приведены расчетные значения отношения  $R_{\max}/R_a$  в зависимости от величины  $z$ . Как видно на рис. 7.13, значения отношения  $R_{\max}/R_a$  увеличиваются по линейной зависимости с увеличением величины  $z$ .

Таблица 7.3 – Расчетные значения отношения  $R_{\max}/R_a$

$z$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_{\max}/R_a$	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40

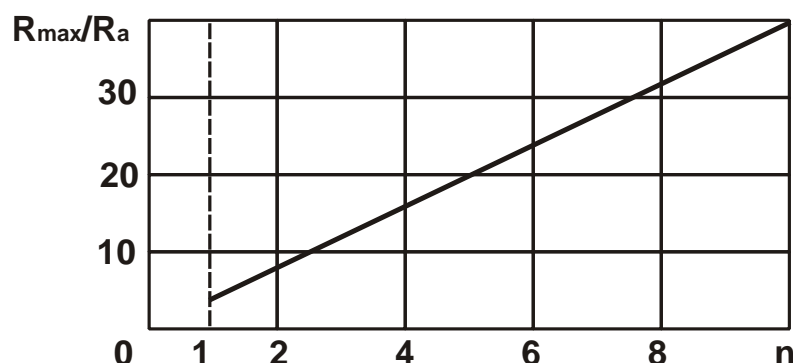


Рисунок 7.13 – Зависимость отношения  $R_{\max}/R_a$  от величины  $z$

Таким образом, по известному значению  $z$ , исходя из зависимости (7.40), можно определить отношение  $R_{\max}/R_a$  или, наоборот, по известному значению  $R_{\max}/R_a$  определить значение  $z$ .

Параметр шероховатости поверхности  $R_{\max}$  определяется из условия:  $2 \cdot b \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n = B$ , где  $n$  – количество абразивных зерен, участвующих в формировании шероховатости поверхности, шт. Тогда с учетом зависимости  $b = z \cdot R_{\max}$  имеем:

$$R_{\max} = \frac{B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot z \cdot n} \quad (7.41)$$

Как видно, основными условиями уменьшения параметра шероховатости поверхности  $R_{\max}$  является увеличение величины  $z$  и количества режущих зерен  $n$ . Параметр шероховатости поверхности  $R_a$  определяется из зависимости (7.40):

$$R_a = \frac{B}{8 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot z^2 \cdot n} \quad (7.42)$$

Существенно уменьшить параметр шероховатости поверхности  $R_a$  можно, главным образом, за счет увеличения величины  $z$ , т.е. увеличения длины площадки износа на режущем зерне  $x_1$ .

Таким образом теоретически установлено, что чем больше величина  $x_1$  и больше зерен участвует в формировании шероховатости по-

верхности, тем меньше параметры шероховатости поверхности  $R_{\max}$ ,  $R_a$  и больше отношение  $R_{\max}/R_a$ . Это согласуется с экспериментальными данными. Используя полученные результаты расчетов, можно научно обоснованно подходить к разработке эффективных технологических процессов финишной абразивной обработки.

### **7.5. Теоретический анализ технологических возможностей уменьшения шероховатости поверхности при абразивной обработке**

В работе [234] показано, что важнейшим условием уменьшения шероховатости поверхности при абразивной обработке следует рассматривать одновысотное расположение режущих зерен на рабочей поверхности инструмента. Исходя из этого, в настоящем параграфе поставлена задача оценить технологические возможности уменьшения шероховатости поверхности в условиях доводки свободным абразивом, когда режущие зерна в форме сферы фактически одновысотно расположены на рабочей поверхности инструмента, что в значительно большей мере соответствует экспериментальным данным [208].

Для расчета параметров шероховатости поверхности  $R_a$  и  $R_{\max}$  при абразивной обработке использована упрощенная расчетная схема, представленная на рис. 7.14. В расчетной схеме режущие зерна в форме сферы радиусом  $R$  одновысотно расположены на рабочей поверхности инструмента и взаимно перекрываются в процессе формирования шероховатости обрабатываемой поверхности. Неудаленный материал с обрабатываемой поверхности представлен функцией распределения  $\Phi(y)$  [234], изменяющейся от максимального значения, равного радиусу окружности  $R$  (в безразмерных величинах, равного единицы), до значения  $\Phi(y)=h$  (в безразмерных величинах, равного отношению  $h/R$ ), где  $h$  – длина перекрытия зерна другим, рядом расположенным зерном.

Очевидно, чем больше проекций зерен, оставивших свой след на диаметральной плоскости обрабатываемого образца, тем больше длина  $h$  и, соответственно, меньше шероховатость обработанной поверхности.



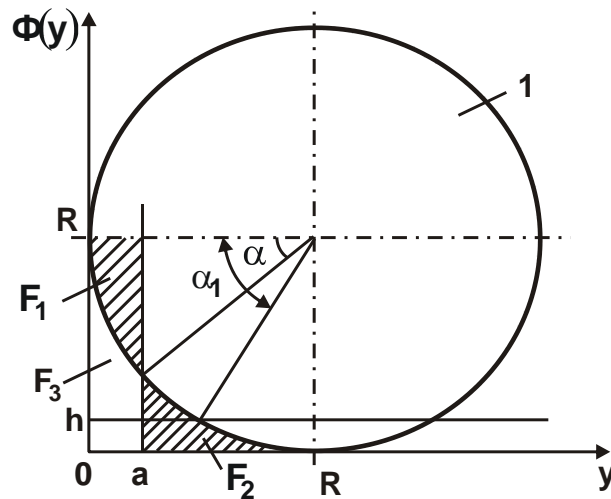


Рисунок 7.14 – Расчетная схема параметров шероховатости поверхности: 1 – абразивное зерно

Параметр шероховатости поверхности  $R_a$  определяется из условия равенства площадей впадин  $F_1$  и выступов  $F_2$ , разделенных между собой средней линией микропрофиля обработанной поверхности  $a$  и показанных на рис. 7.14 заштрихованными областями:

$$F_1 = \frac{\pi \cdot R^2}{4} \cdot \frac{\alpha}{90^\circ} - \frac{R^2}{2} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha, \quad (7.43)$$

где  $\alpha$  – угол, проведенный через центр окружности (описывающей форму зерна) радиусом  $R$ , и точку пересечения средней линии микропрофиля  $a$  с данной окружностью.

В расчетах угол  $\alpha$  подлежит определению;

$$F_2 = F_0 - F_3; \quad (7.44)$$

$$F_0 = R \cdot (R - h) - \frac{\pi \cdot R^2}{4} \cdot \frac{\alpha_1}{90^\circ} - \frac{R^2}{2} \cdot \sin(90^\circ - \alpha_1) \cdot \cos(90^\circ - \alpha_1); \quad (7.45)$$

$$F_3 = a \cdot (R - h) - F_1, \quad (7.46)$$

где  $F_0$  – площадь, ограниченная линиями  $y = 0$ ;  $\Phi(y) = h$  и окружностью радиусом  $R$ ;  $F_3$  – площадь, ограниченная линиями  $y = 0$ ;  $y = a$ ;  $\Phi(y) = h$  и окружностью радиусом  $R$ ;  $\alpha_1$  – угол, проведенный через центр окружности (зерна) и точку пересечения двух соседних окружностей.

После преобразований зависимости (7.44) получено:

$$F_2 = F_0 - a \cdot (R - h) + F_1. \quad (7.47)$$

Из условия равенства площадей  $F_1$  и  $F_2$  имеем:

$$\left(1 - \frac{h}{R}\right) - \frac{\pi}{4} \cdot \frac{\alpha_1}{90^\circ} - \frac{1}{4} \cdot \sin 2\alpha_1 = (1 - \cos \alpha) \cdot \left(1 - \frac{h}{R}\right). \quad (7.48)$$

В случае  $h = 0$  зависимость (7.48) принимает вид:

$$\cos \alpha = \frac{\pi}{4} = 0,785, \quad (7.49)$$

откуда  $\alpha = 38^\circ$ . Из условия  $F_1 = \frac{1}{2} \cdot R_a \cdot R$  с учетом  $R = R_{\max}$  получено:  
 $R_{\max}/R_a = 5,624$ ;  $R_a/R = 0,17781$ .

В случае  $h/R = 0,5$  из условия  $\sin \alpha_1 = 0,5 \cdot R/R = 0,5$  получено:  
 $\alpha_1 = 30^\circ$ . Из зависимости (7.48) определен угол  $\alpha = 17^\circ$ . Поскольку  
 $R_{\max} = R - R \cdot \cos \alpha_1$ , то отношение  $R_{\max}/R_a = 7,9$ . Как видно, с увеличением величины  $h$  отношение  $R_{\max}/R_a$  увеличивается, а отношение  
 $R_{\max}/R = 1 - \cos \alpha_1 = 0,134$ , наоборот, уменьшается. Отношение  
 $R_a/R = 0,017$  также уменьшается.

В случае  $h/R = 0,8$  угол  $\alpha_1 = 11,5^\circ$ , а угол  $\alpha = 8^\circ$ . Соответственно,  
отношения:  $R_{\max}/R = 0,02$ ;  $R_{\max}/R_a = 11,5$ ;  $R_a/R = 0,00174$ . В данном  
случае отношение  $R_{\max}/R_a$  стало еще больше, а отношение  
 $R_a/R = 0,00174$ , наоборот, меньше.

В случае  $h/R = 0,9$  угол  $\alpha_1 = 5,74^\circ$ , а угол  $\alpha = 3,1^\circ$ . Соответственно  
отношения:  $R_{\max}/R = 0,005$ ;  $R_{\max}/R_a = 62,5$ ;  $R_a/R = 8 \cdot 10^{-5}$ . В этом  
случае отношение  $R_{\max}/R_a$  принимает весьма большое значение, а  
отношения  $R_{\max}/R$  и  $R_a/R$  – весьма малые значения.

Как видно, с увеличением  $h/R$  отношение  $R_a/R$  уменьшается  
интенсивнее отношения  $R_{\max}/R$ , что и приводит к увеличению отно-  
шения  $R_{\max}/R_a$  (табл. 7.4, рис. 7.15). По таким же закономерностям  
будут изменяться и параметры шероховатости поверхности  $R_a$  и  $R_{\max}$ ,  
рассматривая параметр  $R$  (радиус режущего зерна) заданным.

Заслуживает внимания то, что с увеличением отношения  $h/R$  от-  
ношение параметров шероховатости поверхности  $R_{\max}/R_a$  значитель-  
но увеличивается, принимая значения, нетипичные процессу шлифо-  
вания. Как известно, при шлифовании отношение  $R_{\max}/R_a$  изменяется  
в пределах 4 ... 10, тогда как при условии  $h/R = 0,9$  оно достигает

чрезвычайно большого значения  $R_{\max}/R_a = 62,5$ . Из этого можно заключить, что в реальных условиях шлифования реализуются значения  $h/R = 0 \dots 0,8$ . Соответственно в этом диапазоне отношение  $R_{\max}/R_a$  изменяется в пределах  $5,624 \dots 11,5$ , что приблизительно совпадает с практическими данными. Диапазон изменения значений  $h/R > 0,8$ , очевидно, нереализуем на практике из-за сложности обеспечения одновысотного расположения абразивных зерен на рабочей поверхности инструмента.

Таблица 7.4. Расчетные значения угла  $\alpha$  и отношений  $R_a/R$ ,  $R_{\max}/R$  и  $R_{\max}/R_a$

$h/R$	0	0,5	0,8	0,9
$\alpha$ , град.	38	17	11,5	3,1
$R_a/R$	0,1778	0,017	0,00174	0,00008
$R_{\max}/R$	1,0	0,134	0,02	0,005
$R_{\max}/R_a$	5,624	7,9	11,5	62,5

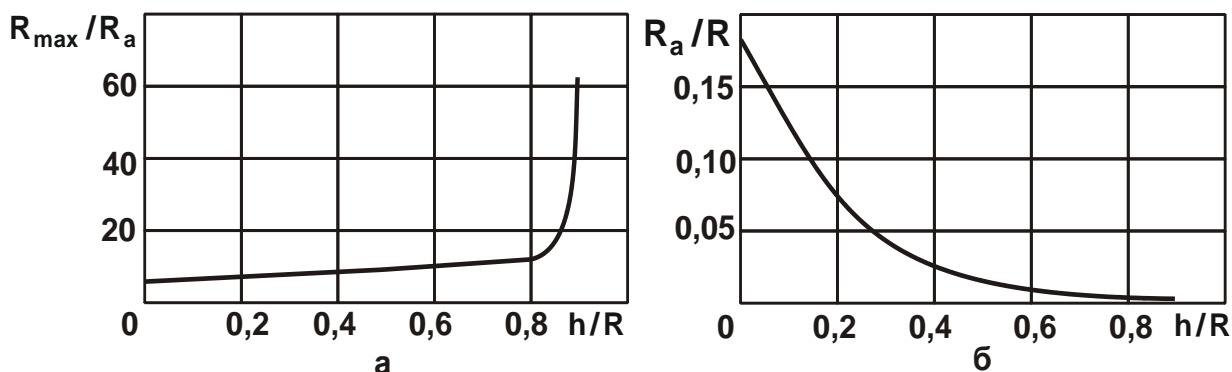


Рисунок 7.15 – Зависимости отношений  $R_{\max}/R_a$  (а) и  $R_a/R$  (б) от отношения  $h/R$

Таким образом, расчетами установлено, что чем больше проекций зерен, оставивших свой след на диаметральной плоскости обрабатываемого образца, тем больше отношение  $h/R$  и меньше отношения  $R_{\max}/R$  и  $R_a/R$ , а, соответственно, меньше значения параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке  $R_a$  и  $R_{\max}$ .

С уменьшением радиуса режущего зерна  $R$  пропорционально уменьшаются параметры  $R_a$  и  $R_{\max}$ . Например, в случае  $h/R = 0$  (табл. 7.4) при  $R = 0,5$  мкм (применение алмазного порошка зернисто-

стью AC 1/0) параметры шероховатости поверхности  $R_a$  и  $R_{max}$  соответственно равны  $R_a = 0,089$  мкм и  $R_{max} = 0,5$  мкм. В случае  $h/R = 0,5$  (табл. 7.4) при  $R = 0,5$  мкм имеем:  $R_a = 0,0085$  мкм и  $R_{max} = 0,067$  мкм. Эти значения параметров шероховатости поверхности  $R_a$  и  $R_{max}$  фактически соответствуют практическим требованиям при обработке высокоточных деталей машин. Для их обеспечения, как видно, требуется применение алмазного порошка весьма низкой зернистости AC 1/0.

С увеличением зернистости алмазного порошка для достижения таких же значений параметров шероховатости поверхности  $R_a$  и  $R_{max}$  необходимо увеличивать количество режущих зерен, участвующих в формировании шероховатости поверхности (путем увеличения отношения  $h/R \rightarrow 1$ ). Так, в случае  $h/R = 0,9$  применение алмазного порошка более крупной зернистости AC 50/40 (т.е.  $R \approx 0,25$  мкм) позволяет добиться следующих значений параметров шероховатости поверхности:  $R_a = 0,002$  мкм и  $R_{max} = 0,125$  мкм. Это приблизительно такой же результат, как и в случае  $h/R = 0$  при  $R = 0,5$  мкм. Однако с увеличением количества режущих зерен, участвующих в формировании шероховатости обрабатываемой поверхности, снижается производительность обработки.

Необходимо отметить, что полученные расчетные данные справедливы при одновысотном расположении одинаковых по форме и размерам абразивных или алмазных зерен на рабочей поверхности инструмента, т.е. для идеальных условий обработки. При несоблюдении данных условий будет иметь место разновысотное расположение режущих зерен на рабочей поверхности инструмента. Это приведет к увеличению параметров шероховатости поверхности  $R_a$  и  $R_{max}$ , что и наблюдается в реальных условиях обработки, когда, даже применяя алмазный порошок зернистостью AC 1/0, невозможно уменьшить параметр  $R_a$  ниже значения  $R_a = 0,1$  мкм [230, 235]. Поэтому основным условием достижения высоких показателей шероховатости поверхности следует рассматривать обеспечение фактически одновысотного расположения абразивных или алмазных зерен на рабочей поверхности инструмента.

Одним из эффективных практических решений в данном направлении, как показано в п. 7.2, следует рассматривать разработанный в

ГВУЗ "Приазовский государственный технический университет" на кафедре "Технология машиностроения" эффективный метод внутреннего шлифования с применением мягкого войлочного (фетрового) круга с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П. Этот метод позволяет существенно уменьшить параметр шероховатости поверхности  $R_a$  без увеличения трудоемкости и уменьшения производительности обработки. При этом эффективно шлифование производить, устанавливая ось вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия цилиндра (рис. 7.8).

Выполненные экспериментальные исследования предложенного метода внутреннего шлифования на модернизированном токарном станке модели 1М63 (частота вращения шпинделя – 200 об./мин; частота вращения шлифовального круга – 1400 об./мин) показали, что в течение 30 минут шлифования достигается шероховатость поверхности  $R_a = 0,04$  мкм [130]. При этом использовался абразивный порошок 63С 20П. Очевидно, добиться такого значительного результата при обычном внутреннем шлифовании абразивными и алмазными кругами невозможно в связи с разновысотным расположением режущих зерен на рабочей поверхности круга. В данном же случае имеет место фактически одновысотное (однослойное) расположение режущих зерен, что и предопределяет резкое уменьшение параметра шероховатости поверхности  $R_a$ .

С физической точки зрения эффект обработки в данном случае обусловлен значительным увеличением количества одновременно работающих абразивных зерен, во-первых, за счет их однослойного расположения на рабочей поверхности шлифовального круга. Во-вторых, за счет увеличения площади контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью по сравнению с обычным внутренним шлифованием. В-третьих, за счет возможного "утопания" режущих зерен в мягкую связку шлифовального круга, что приводит к снижению определенного (все же имеющего место в реальных условиях обработки) разновысотного выступания зерен и к уменьшению параметра шероховатости поверхности  $R_a$ .

Таким образом, показано, что на финишных операциях следует использовать шлифовальные круги фактически с однослойным распо-

ложением абразивных или алмазных зерен на его рабочей поверхности. Это позволит существенно уменьшить параметры шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  и  $R_{max}$ .

Предложенный упрощенный подход к расчету параметров шероховатости поверхности  $R_a$ ,  $R_{max}$  и их отношения  $R_{max}/R_a$  указывает на то, что с увеличением количества зерен, участвующих в формировании шероховатости поверхности, параметры  $R_{max}$  и  $R_a$  уменьшаются, а отношение  $R_{max}/R_a$  увеличивается. Результаты расчетов подтверждаются экспериментальными данными и свидетельствуют о достоверности предложенного теоретического подхода. Следовательно, предложенный подход позволяет оценить технологические возможности уменьшения шероховатости поверхности при абразивной обработке и разработать практические рекомендации по их реализации.

## **7.6. Повышение качества и производительности обработки отверстий при внутреннем шлифовании**

Окончательная обработка отверстий всегда вызывает значительные трудности с точки зрения обеспечения шероховатости и точности обрабатываемых поверхностей. Поэтому технологический процесс окончательной обработки отверстия, как правило, включает довольно большое количество операций абразивной обработки. Это имеет место, например, при обработке деталей гидро- и пневмоагрегатов для авиационной техники [197, 198]. Операция внутреннего шлифования в данном случае является лишь начальной операцией финишной обработки, после чего в зависимости от требований к параметрам шероховатости и точности обрабатываемых поверхностей применяются операции хонингования, доводки свободным абразивом и т.д. Все это резко увеличивает трудоемкость и снижает производительность обработки, требует применения различных абразивных инструментов. В связи с этим представляется актуальным решение задачи по обеспечению высоких показателей шероховатости, точности и производительности при окончательной абразивной обработке отверстий, что позволит существенно повысить эффективность их обработки. Решение этой задачи весьма важно, например, при обработке отверстий в гидро- и пневмоцилиндрах, где достаточно остро стоит проблема повышения

производительности обработки при обеспечении высоких показателей шероховатости и точности обрабатываемых поверхностей. При этом необходимо обеспечить образование рисок-царапин в процессе абразивной обработки вдоль оси цилиндра, что позволит повысить его эксплуатационные свойства за счет совпадения направления образующихся рисок-царапин с движением поршня в цилиндре [37].

Для обоснования технологических возможностей внутреннего шлифования следует провести сравнительный теоретический анализ традиционной схемы внутреннего шлифования (рис. 7.16,а) и схемы внутреннего шлифования абразивным кругом, ось вращения которого расположена перпендикулярно оси вращения обрабатываемой детали (рис. 7.16,б) [37]. В рассматриваемых схемах шлифования обрабатываемая деталь вращается со скоростью  $V_{дет}$ , а шлифовальный круг – со скоростью  $V_{кр}$ .

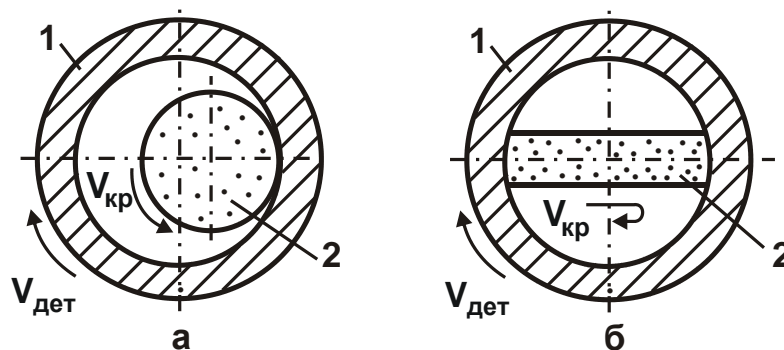


Рисунок 7.16 – Схемы внутреннего шлифования:  
1 – обрабатываемая деталь; 2 – абразивный круг

Производительность обработки при использовании традиционной схемы внутреннего шлифования (рис. 7.16,а) определяется аналитической зависимостью:

$$Q = B \cdot V_{дет} \cdot t, \quad (7.50)$$

где  $B$  – ширина шлифования, м;  $V_{дет}$  – скорость детали, м/с;  $t$  – глубина шлифования, м.

Производительность обработки при использовании схемы внутреннего шлифования абразивным кругом, ось вращения которого расположена перпендикулярно оси вращения обрабатываемой детали (рис. 7.16,б), определяется зависимостью:

$$Q = \pi \cdot D_{дет} \cdot S_{прод} \cdot t, \quad (7.52)$$

где  $D_{дет}$  – диаметр обрабатываемого отверстия, м;  $S_{прод}$  – скорость продольной подачи, м/с.

На рис. 7.17 показан вид сверху рассматриваемой схемы шлифования, представленной на рис. 7.16,б. За половину оборота детали абразивный круг (в результате участия в резании его двух диаметрально расположенных частей периферии) переместится в продольном направлении на величину продольной подачи  $B_1$ . В результате образуется волнистая шероховатая поверхность, определяемая параметром шероховатости поверхности  $R_{max}$ .

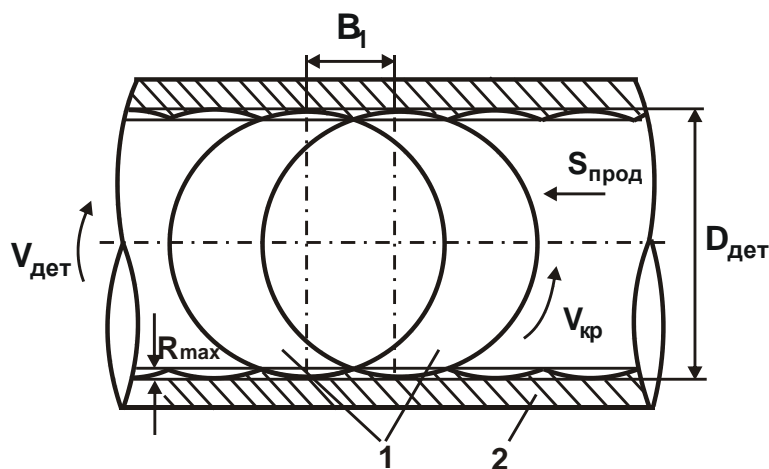


Рисунок 7.17 – Изменение положения абразивного круга 1 в обрабатываемом отверстии за половину оборота детали 2 и образование волнистой шероховатой поверхности

С точки зрения участия зерен круга в процессе резания и закономерностей съема материала (рис. 7.17) в зависимости (7.52) можно в первом приближении рассматривать скорость продольной подачи  $S_{прод}$ , равной скорости детали  $V_{дет}$ , которая устанавливается при обычном внутреннем шлифовании (рис. 7.16,а). В этом случае, по сути, функцию скорости детали  $V_{дет}$  выполняет скорость продольной подачи  $S_{прод}$ . Тогда зависимость (7.52) примет вид:

$$Q = \pi \cdot D_{дет} \cdot V_{дет} \cdot t. \quad (7.53)$$

Поскольку справедливо условие:  $\pi \cdot D_{дет} > B$ , то, сравнивая зависимости (7.51) и (7.53), видно, что при осуществлении внутреннего шлифования по схеме, показанной на рис. 7.16,б, за счет увеличения ширины шлифования достигается большая производительность обра-



ботки. Причем, эффект увеличения производительности обработки будет обеспечиваться в широких пределах изменения ширины шлифования. Например, даже если использовать обычный шлифовальный круг диаметром, равным диаметру обрабатываемого отверстия (рис. 7.16,б), то производительность обработки будет в 2 раза больше, чем при обычном внутреннем шлифовании. Это связано с участием в резании двух диаметрально расположенных частей периферии круга.

Продольная подача  $V_1$ , приходящаяся на половину оборота детали, при шлифовании по рассматриваемой схеме, определяется из условия (рис. 7.17):

$$\tau = \frac{V_1}{S_{\text{прод}}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{дет}}}{2 \cdot V_{\text{дет}}}, \quad (7.54)$$

откуда

$$V_1 = \pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot \frac{S_{\text{прод}}}{2 \cdot V_{\text{дет}}}, \quad (7.55)$$

где  $\tau$  – время половины оборота детали, с.

Как видно, с увеличением скорости детали  $V_{\text{дет}}$  уменьшается продольная подача  $V_1$  и, соответственно, уменьшается максимальная высота микронеровностей на обрабатываемой поверхности, определяемая параметром шероховатости поверхности  $R_{\text{max}}$ .

Исходя из расчетной схемы, представленной на рис. 7.17, параметр шероховатости поверхности  $R_{\text{max}}$  может быть установлен из геометрического условия:

$$\frac{D_{\text{дет}}}{2} - R_{\text{max}} = \sqrt{\left(\frac{D_{\text{дет}}}{2}\right)^2 - \left(\frac{V_1}{2}\right)^2}. \quad (7.56)$$

После возведения во вторую степень левой и правой частей полученного уравнения (7.56), и пренебрегая наименьшим по величине в нем слагаемым  $R_{\text{max}}^2$ , получено:

$$R_{\text{max}} = \frac{V_1^2}{4 \cdot D_{\text{дет}}}. \quad (7.57)$$

Следовательно, параметр шероховатости поверхности  $R_{\text{max}}$  вполне однозначно определяется величиной продольной подачи  $V_1$ , приходящейся на половину оборота детали. Чем она меньше, тем меньше

параметр  $R_{\max}$ . Необходимо отметить, что полученная зависимость (7.57) соответствует аналогичной зависимости, приведенной в работе [27] применительно к процессу фрезерования цилиндрической фрезой, рассматривая в ней вместо параметра  $V_1$  подачу на зуб фрезы.

Подставляя зависимость (7.55) в (7.57), имеем:

$$R_{\max} = \left( \frac{\pi \cdot S_{\text{прод}}}{4 \cdot V_{\text{дет}}} \right)^2 \cdot D_{\text{дет}}. \quad (7.58)$$

Как видно, для уменьшения параметра шероховатости поверхности  $R_{\max}$ , обусловленного волнистостью шероховатой поверхности, следует уменьшить скорость продольной подачи  $S_{\text{прод}}$  и увеличить скорость детали  $V_{\text{дет}}$ . С увеличением  $V_{\text{дет}}$  и уменьшением продольной подачи  $V_1$  закономерности съема материала и формирования шероховатости поверхности становятся фактически такими же, как и при обычном внутреннем шлифовании (рис. 7.16,а). Параметр шероховатости поверхности  $R_{\max}$  в меньшей мере зависит от волнистости шероховатой поверхности, а определяется, главным образом, количеством проработавших зерен круга. Иными словами, происходит переход от макрогеометрии обработанной поверхности отверстия (обусловленной волнистостью шероховатой поверхности) к микрогеометрии, определяемой количеством проработавших зерен круга, т.е. исключается волнистость шероховатой поверхности. Причем, в этом случае за счет увеличения количества проработавших зерен круга по сравнению с обычным внутренним шлифованием производительность обработки будет больше, а шероховатость поверхности, наоборот, меньше.

С увеличением ширины шлифования (площади контакта круга с обрабатываемой деталью) эффект увеличения производительности обработки и уменьшения шероховатости поверхности будет усиливаться. При ширине шлифования, равной длине окружности обрабатываемого отверстия, может быть полностью исключена волнистость шероховатой поверхности.

При необходимости (для уменьшения параметра шероховатости поверхности  $R_{\max}$ ) следует произвести дополнительно возвратно-поступательные выхаживающие проходы абразивного круга. Из сказанного следует, что скорость продольной подачи  $S_{\text{прод}}$  для рассмат-

риваемой схемы шлифования (рис. 7.17) должна принимать значения, равные или близкие к скорости детали  $V_{дет}$  при обычном внутреннем шлифовании, а скорость детали должна быть больше, чем при обычном внутреннем шлифовании. Это позволит максимально использовать потенциальные возможности рассматриваемой схемы шлифования с точки зрения повышения производительности обработки при обеспечении заданных показателей шероховатости и соответственно точности обрабатываемой поверхности.

В особой мере это относится к шлифованию с увеличенной глубиной шлифования, когда вследствие увеличения продольной подачи  $V_1$  увеличивается максимальная высота микронеровностей на обрабатываемой поверхности, обусловленная волнистостью шероховатой поверхности и определяемая параметром шероховатости поверхности  $R_{max}$ . В этом случае уменьшить параметр  $R_{max}$  можно, главным образом, за счет уменьшения продольной подачи  $V_1$ . На этой основе может быть реализована схема высокопроизводительного глубинного шлифования, осуществляемая с относительно небольшой скоростью продольной подачи  $S_{прод}$ , увеличенной глубиной шлифования  $t$  и достаточно большой скоростью детали  $V_{дет}$ .

При обычном внутреннем шлифовании реализация схемы высокопроизводительного глубинного шлифования, наоборот, предполагает существенное уменьшение скорости детали  $V_{дет}$  при относительно небольшой скорости продольной подачи  $S_{прод}$  и увеличенной глубине шлифования  $t$  [214].

Таким образом показано, что рассматриваемая схема внутреннего шлифования абразивным кругом, ось вращения которого расположена перпендикулярно оси вращения обрабатываемой детали (рис. 7.16,б), с точки зрения закономерностей кинематики съема материала и формирования шероховатости поверхности отличается от схемы обычного внутреннего шлифования (рис. 7.16,а).

Необходимо отметить, что в этом случае при весьма малых глубинах шлифования, традиционных для доводочных операций, не будет столь явно проявляться волнистость шероховатой поверхности, а продольная подача  $V_1$  также не будет столь значительно влиять на параметр шероховатости обработанной поверхности  $R_{max}$ . Следова-

тельно, шлифование можно производить с меньшими (традиционными для внутреннего шлифования) значениями скорости детали  $V_{дет}$ . В этом случае шероховатость поверхности будет зависеть в основном от количества одновременно работающих зерен круга: чем оно больше, тем меньше шероховатость поверхности. Поэтому на доводочных операциях необходимо, в первую очередь, увеличивать ширину шлифования (площадь контакта круга с обрабатываемой деталью), увеличивая тем самым количество одновременно работающих зерен круга и обеспечивая уменьшение шероховатости поверхности [203]. Для более значительного уменьшения параметра шероховатости поверхности  $R_{max}$  следует осуществлять возвратно-поступательные выходящие проходы абразивного круга.

Если ширина шлифования меньше длины окружности обрабатываемого отверстия (рис. 7.16,б), то, очевидно, необходимо увеличивать скорость детали  $V_{дет}$  с целью уменьшения продольной подачи  $V_1$ . Это обеспечит фактически непрерывное участие зерен в формировании обрабатываемой поверхности, как и при обычном внутреннем шлифовании. Соответственно, уменьшится шероховатость и повысится точность обрабатываемой поверхности отверстия.

Таким образом, показано, что увеличение площади контакта круга с обрабатываемой деталью за счет применения схемы внутреннего шлифования абразивным кругом, ось вращения которого расположена перпендикулярно оси вращения обрабатываемой детали (рис. 7.16,б), является важным резервом повышения эффективности внутреннего шлифования.

В этом случае эффект обработки достигается за счет увеличения количества одновременно работающих зерен.

Применение рассматриваемой схемы внутреннего шлифования позволяет также изменить направление образующихся рисок на обработанной поверхности от проработавших зерен круга. Они становятся параллельными оси обрабатываемого отверстия в детали. Это очень важно при изготовлении гидро- и пневмоцилиндров с точки зрения повышения их износостойкости и работоспособности, поскольку они будут совпадать с направлением движения поршня в цилиндре, что приведет к снижению износа уплотнений поршня и, соответственно, снижению усилия при движении поршня в цилиндре.

## **7.7. Разработка эффективного метода внутреннего шлифования и обоснование его технологических возможностей**

Обработка внутренних поверхностей деталей машин, как показано выше, вызывает значительные сложности обеспечения высоких показателей качества и точности обрабатываемых поверхностей. При обработке мерными многолезвийными осевыми инструментами (сверлами, зенкерами, развертками и т.д.) это связано в значительной степени с имеющей место несоосностью обрабатываемого отверстия и инструмента. В результате происходит "разбивка" обрабатываемого отверстия – его максимальный диаметр становится больше диаметра осевого инструмента, что, естественно, снижает точность обработки. При растачивании и внутреннем шлифовании отверстий также сложно устранить погрешности обработки, связанные с неравномерностью снимаемого припуска. Метод хонингования в этом отношении более эффективен, поскольку позволяет уменьшить погрешности обработки в радиальном и продольном направлениях. Кроме того, этот метод позволяет расположить риски-царапины, образующиеся от проработавших абразивных зерен, под некоторым углом к оси обрабатываемого отверстия, что повышает его износостойкость в конструкциях таких изделий, как гидро- и пневмоцилиндры, работающих в условиях интенсивного трения и износа. В связи с этим возникает необходимость создания прогрессивных методов абразивной обработки, обеспечивающих формирование образующихся рисок-царапин вдоль оси обрабатываемого отверстия, с целью повышения его работоспособности в процессе эксплуатации.

Необходимо отметить, что вопросам механической обработки отверстий посвящены работы [83,198], в которых сформулированы основные условия повышения параметров качества и точности обрабатываемого отверстия. Показано, что для их достижения используются процессы резания лезвийными и абразивными инструментами. Однако на практике не получили применения методы абразивной обработки, при которых образующиеся риски-царапины располагаются вдоль обрабатываемого отверстия и, тем самым, повышают его эксплуатационные свойства. Так, при хонинговании образующиеся риски-

царапины располагаются под некоторым углом к оси обрабатываемого отверстия, но не вдоль обрабатываемого отверстия. Эффективным решением в этом направлении может быть предложенный на кафедре "Технология машиностроения" ГВУЗ "Приазовский государственный технический университет" под руководством профессора Андила-хая А. А. метод внутреннего шлифования, при котором ось вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом устанавливается перпендикулярно оси вращения обрабатываемого цилиндра [214]. Этот метод обеспечивает расположение образующихся при шлифовании рисок-царапин вдоль обрабатываемого отверстия, что открывает новые возможности повышения его эксплуатационных свойств. Однако, для эффективного использования этого прогрессивного метода внутреннего шлифования необходимо провести его дальнейшие исследования, научно обосновать технологические возможности с точки зрения обеспечения качества и точности обработки, разработать практические рекомендации.

Для анализа закономерностей внутреннего шлифования рассмотрим первоначально схему обычного внутреннего шлифования (рис. 7.18,а). Возникающие в процессе шлифования тангенциальная  $P_z$  и радиальная  $P_y$  составляющие силы резания определяются зависимостями [132]:

$$P_z = \sigma \cdot S_{\text{МГН}}; \quad (7.59)$$

$$P_y = \frac{P_z}{K_{\text{ш}}} = \frac{\sigma}{K_{\text{ш}}} \cdot S_{\text{МГН}}, \quad (7.60)$$

где  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $S_{\text{МГН}} = Q/V_{\text{кр}}$  – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими зернами шлифовального круга, м<sup>2</sup>;  $Q = V_1 \cdot V_{\text{дет}} \cdot t$  – производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;  $V_1$  – продольная подача на один оборот детали, м/об.;  $V_{\text{дет}}$ ,  $V_{\text{кр}}$  – скорости детали и круга, м/с;  $t$  – глубина шлифования, м;  $K_{\text{ш}} = P_z/P_y$  – коэффициент шлифования.

Производительность обработки  $Q$  определяется зависимостью, полученной из условия:  $\tau = V_1/S_{\text{прод}} = \pi \cdot D_{\text{дет}}/V_{\text{дет}}$ , откуда

$$V_1 = \pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot \frac{S_{\text{прод}}}{V_{\text{дет}}}; \quad (7.61)$$

$$Q = \pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot S_{\text{прод}} \cdot t, \quad (7.62)$$

где  $\tau$  – время одного оборота детали, с;  $S_{\text{прод}}$  – скорость продольной подачи, м/с;  $D_{\text{дет}}$  – диаметр обрабатываемого отверстия детали, м.

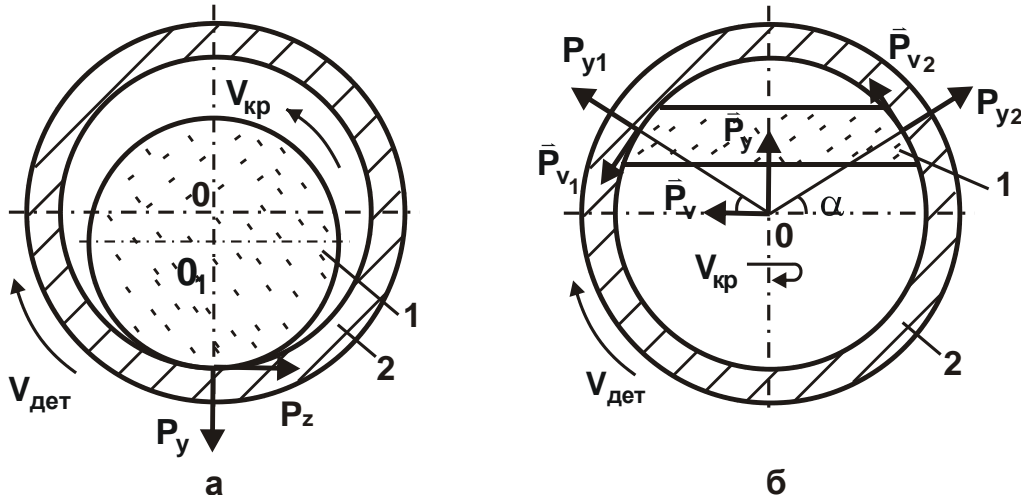


Рисунок 7.18 – Расчетные схемы обычного внутреннего шлифования (а) и внутреннего шлифования, при котором ось вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом устанавливается перпендикулярно оси вращения обрабатываемого цилиндра (б): 1 – шлифовальный круг; 2 – обрабатываемая деталь

Как следует из зависимости (7.62), производительность обработки  $Q$  в обобщенном виде определяется скоростью продольной подачи  $S_{\text{прод}}$  и не зависит от скорости детали  $V_{\text{дет}}$ .

Исходя из зависимостей (7.59) и (7.60), основными условиями уменьшения тангенциальной  $P_z$  и радиальной  $P_y$  составляющих силы резания при заданной производительности обработки  $Q$  являются: уменьшение условного напряжения резания  $\sigma$  (на основе повышения режущей способности круга, снижения интенсивности трения в зоне шлифования) и увеличение скорости круга  $V_{\text{кр}}$ . Как показывает практика шлифования, выполняется условие  $P_z < P_y$ , поскольку  $K_{\text{ш}} = P_z / P_y < 1$ .

При лезвийной обработки, как правило, наоборот, выполняется условие  $K_{\text{ш}} = P_z / P_y > 1$ , т. е. справедливо условие  $P_z > P_y$ . Это снижает силовую напряженность процесса резания и, соответственно, обеспечивает повышение параметров качества, точности и производительности обработки.

Величина упругого перемещения шлифовального круга в радиальном направлении равна:

$$y = \frac{P_y}{c} = \frac{\sigma}{K_{\text{ш}} \cdot c} \cdot \frac{Q}{V_{\text{кр}}}, \quad (7.63)$$

где  $c$  – жесткость технологической системы, Н/м.

Как видно, основными условиями уменьшения величины  $y$  и повышения точности обработки при заданной производительности обработки  $Q$  является уменьшение отношения  $\sigma/K_{\text{ш}}$  и увеличение параметров  $c$  и  $V_{\text{кр}}$ .

При внутреннем шлифовании по схеме, показанной на рис. 7.18,б, силы резания, возникающие в I и II зонах контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью, следует разложить на три составляющие: тангенциальную  $P_z$ , радиальную  $P_y$  и окружную  $P_v$ .

Тангенциальная составляющая силы резания  $P_{z1}$  действует в направлении вращения круга вдоль оси обрабатываемого отверстия (в разные стороны в двух зонах контакта круга с обрабатываемым отверстием I и II). Радиальная составляющая силы резания  $P_{y1}$  действует в направлении, перпендикулярном действию  $P_{z1}$ , т.е. перпендикулярно оси обрабатываемого отверстия (под углом  $\alpha$  к горизонтальной диаметральной плоскости отверстия). Окружная составляющая силы резания  $P_{v1}$  действует в направлении, перпендикулярном действию  $P_{z1}$  и  $P_{y1}$  – по касательной к окружности, проведенной через точку контакта круга с обрабатываемым отверстием, в направлении, противоположном вращению обрабатываемой детали.

Исходя из такого представления составляющих силы резания и с учетом их попарного равенства в зонах I и II ( $P_{z1} = P_{z2}$ ;  $P_{y1} = P_{y2}$ ;  $P_{v1} = P_{v2}$ ), они могут быть аналитически выражены, аналогично зависимостям (7.59) и (7.60):  $P_{z1} = 0,5 \cdot \sigma \cdot S_{\text{МГН}}$ ;  $P_{y1} = 0,5 \cdot \sigma \cdot S_{\text{МГН}} / K_{\text{ш}}$ . Входящий в зависимости коэффициент 0,5 указывает на то, что в каждой из зон I и II удаляется приблизительно половина обрабатываемого материала (поступающего в зону резания), а продольная подача на один оборот детали равна  $0,5 \cdot V_1$ . При этом составляющие силы резания  $P_{y1}$  и  $P_{v1}$  связаны между собой коэффициентом трения  $f$ , т.е.  $P_{v1} = f \cdot P_{y1}$ .



Таким образом, уменьшить тангенциальную  $P_{z1}$ , радиальную  $P_{y1}$  и окружную  $P_{v1}$  составляющие силы резания при заданной производительности обработки  $Q$ , как и при обычном внутреннем шлифовании, можно уменьшением отношения  $\sigma/K_{\text{ш}}$  путем повышения режущей способности круга и снижения интенсивности трения в зоне шлифования, а также увеличением скорости круга  $V_{\text{кр}}$ .

При условии попарного равенства в зонах I и II составляющих силы резания имеем:  $P_z = 0$ , т. к. составляющие силы резания  $P_{z1}$  и  $P_{z2}$  равны между собой и направлены в противоположные стороны.

Суммарная проекция радиальной составляющей силы резания  $\bar{P}_y$  на горизонтальную плоскость при условии  $P_{y1} = P_{y2}$  равна нулю, а на вертикальную плоскость равна  $\bar{P}_y = 2 \cdot P_{y1} \cdot \sin \alpha$ .

Суммарная проекция окружной составляющей силы резания  $\bar{P}_v$  на горизонтальную плоскость при условии  $P_{v1} = P_{v2}$  равна  $\bar{P}_v = 2 \cdot P_{v1} \cdot \sin \alpha$ , а на вертикальную плоскость равна нулю.

Соответственно, суммарная сила резания равна:

$$P = \sqrt{\bar{P}_y^2 + \bar{P}_v^2} = 2 \cdot P_{y1} \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{1 + f^2}. \quad (7.64)$$

Поскольку  $f^2 < 1$ , то приближенно можно принять:  $P = 2 \cdot P_{y1} \cdot \sin \alpha$ , т.е. пренебречь величиной  $\bar{P}_v$ , которая значительно меньше  $\bar{P}_y$ . Следовательно, чем меньше угол  $\alpha$ , тем меньше суммарная сила резания  $P$ . Так, при  $\alpha \rightarrow 0$  имеем  $P \rightarrow 0$ . При  $\alpha = 30^\circ$ , соответственно,  $P = P_{y1}$ . В этом случае суммарная сила резания  $P$  принимает значение, равное радиальной составляющей силы резания  $P_{y1}$ , действующей лишь в зоне I, а это в 2 раза меньше радиальной составляющей силы резания  $P_y$ , определяемой зависимостью (7.60) при обычном внутреннем шлифовании. Поэтому, применяя схему внутреннего шлифования, показанную на рис. 7.18,б, можно в 2 раза и более уменьшить силу резания и, соответственно, величину упругого перемещения  $y$  и, таким образом, добиться повышения точности обработки.

Очевидно, чем меньше угол  $\alpha$ , тем меньше суммарная сила резания  $P$  и выше точность обработки. С этой точки зрения целесообразно шлифовальный круг располагать посередине обрабатываемого

отверстия. Однако тогда уменьшится длина дуги контакта круга с обрабатываемым отверстием по сравнению с асимметричным расположением шлифовального круга относительно горизонтальной диаметральной плоскости, как это показано на рис. 7.18,б. Соответственно, уменьшится количество одновременно работающих зерен круга, что приведет к увеличению шероховатости обработанной поверхности. Следовательно, существует оптимальное асимметричное положение шлифовального круга относительно горизонтальной диаметральной плоскости (определяемое углом  $\alpha$ ), при котором можно одновременно добиться требуемых показателей точности и шероховатости обработанной поверхности.

Необходимо отметить, что при расположении шлифовального круга на уровне горизонтальной диаметральной плоскости (т.е. при  $\alpha = 0$ ), будет осуществляться, по сути, обработка отверстия "мерным инструментом", аналогично процессам сверления, зенкерования, развертывания и т.д. При неравномерно снимаемом припуске это приведет к несоосности обрабатываемого отверстия и шлифовального круга вследствие отклонения оси круга от исходного положения. При многопроходной обработке произойдет уменьшение отклонения оси шлифовального круга и, соответственно, увеличится максимальный диаметр обрабатываемого отверстия, который, очевидно, будет больше диаметра шлифовального круга. В результате будет иметь место "разбивка" отверстия и снижение точности обрабатываемого отверстия. Поэтому для исключения этого случая обработки необходимо шлифовальный круг устанавливать асимметрично относительно горизонтальной диаметральной плоскости, как показано на рис. 7.18,б. На рис. 7.17 показан вид сверху рассматриваемой схемы шлифования, представленной на рис. 7.18,б, при условии, что шлифовальный круг расположен на уровне горизонтальной диаметральной плоскости (т.е. при  $\alpha = 0$ ).

В данном случае за половину оборота детали шлифовальный круг (в результате участия в резании его двух диаметрально расположенных частей периферии) переместится в продольном направлении на величину  $B_1$ . В результате образуется волнистая шероховатая поверхность, определяемая параметром шероховатости поверхности  $R_{\max}$ . Для его расчета следует воспользоваться зависимостью (7.57).

Как следует из зависимости (7.57), уменьшить параметр  $R_{\max}$  можно за счет уменьшения продольной подачи (за половину оборота детали  $B_1$ ). Например, для обеспечения  $R_{\max} = 0,2$  мкм при диаметре круга  $D_{\text{кр}} = 100$  мм в соответствии с зависимостью (7.57) параметр  $B_1$  необходимо устанавливать равным 0,283 мм.

В зависимости (7.61) параметр  $B_1$  определяет продольную подачу на один оборот детали, т.е.  $B_1 = 0,566$  мм. Соответственно

$$\frac{S_{\text{прод}}}{V_{\text{дет}}} = \frac{B_1}{\pi \cdot D_{\text{дет}}} = \frac{0,566}{3,14 \cdot 100} = 0,0018. \quad (7.65)$$

Из зависимости (7.65) следует, что при скорости детали  $V_{\text{дет}} = 200$  м/мин скорость продольной подачи  $S_{\text{прод}}$  принимает относительно небольшое значение, равное 0,36 м/мин, которое является традиционным для схемы глубинного шлифования. Если увеличить  $S_{\text{прод}}$ , то согласно зависимости (7.61) увеличится продольная подача на один оборот детали  $B_1$ , а это приведет к увеличению параметра  $R_{\max}$  в соответствии с зависимостью (7.57). Для уменьшения  $R_{\max}$  до заданного значения следует произвести дополнительные продольные ходы круга, т.е. осуществить, по сути, процесс выхаживания. Поэтому при увеличении скорости продольной подачи  $S_{\text{прод}}$  (при заданном значении  $B_1$ ) следует увеличить скорость детали  $V_{\text{дет}}$  до максимально возможной величины, реализуемой на станке.

Следовательно, изменяя параметры режима шлифования  $V_{\text{дет}}$  и  $S_{\text{прод}}$ , можно добиться уменьшения  $B_1$  до значения, при котором произойдет переход от макрогеометрии формирования обработанной поверхности (связанной с ее волнистостью) к микрогеометрии, зависящей от количества проработавших зерен круга. Этот фактор станет определяющим в образовании шероховатости поверхности: чем больше абразивных зерен будет участвовать в процессе резания, тем меньше будет шероховатость поверхности.

Приведенные в работе [130] результаты экспериментальных исследований предложенного метода внутреннего шлифования на модернизированном токарном станке модели 1М63 (частота вращения шпинделя – 200 об./мин; частота вращения шлифовального круга –

1400 об./мин) показали, что при использовании обычного абразивного круга сложно добиться высоких показателей шероховатости обработки в связи с волнистым характером образования поверхности. Гораздо эффективнее в этом случае использовать мягкий войлочный (фетровый) круг с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П. Как показали исследования, в течение 30 минут шлифования этим кругом достигается шероховатость поверхности  $R_a=0,04$  мкм, соответствующая рассмотренному выше случаю ( $R_{max}=0,2$  мкм). Несомненно, добиться такого значительного результата при шлифовании абразивным кругом фактически невозможно, тем более при скорости детали  $V_{дет}=62,8$  м/мин (при частоте вращения шпинделя – 200 об./мин), которая приблизительно в 3 раза меньше теоретически установленного выше значения  $V_{дет}=200$  м/мин. Эффект обработки обусловлен упругими свойствами применяемого шлифовального круга, обеспечивающими существенное увеличение площади его контакта с обрабатываемым материалом, количества одновременно работающих абразивных зерен и за счет этого уменьшение шероховатости поверхности. Следовательно, используя мягкий войлочный (фетровый) круг с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П, можно исключить образование волнистости на обрабатываемой поверхности и обеспечить формирование шероховатости поверхности в зависимости от количества проработавших зерен круга. При этом уменьшение шероховатости поверхности происходит без увеличения трудоемкости и уменьшения производительности обработки.

### **7.8. Условия снижения температуры резания при внутреннем шлифовании**

Возможности практического применения схемы внутреннего шлифования, в которой ось вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом устанавливается перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия (рис. 7.18), могут быть значительно расширены благодаря возможности уменьшения еще и температуры резания. Поэтому важно провести теоретический анализ закономерностей формирования температуры резания и определить рациональные условия шлифования по температурному критерию [207].

Для решения поставленных задач следует воспользоваться аналитической зависимостью для определения температуры резания при шлифовании, полученной профессором Якимовым А. В. [245] и получившей широкое применение при анализе закономерностей управления тепловыми процессами при шлифовании:

$$\theta = \frac{q}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot l}{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot V_{\text{дет}}}}, \quad (7.66)$$

где  $q = P_z \cdot V_{\text{кр}} \cdot \bar{\psi} / F$  – плотность теплового потока, характеризующая количество теплоты, проходящей через единицу поверхности детали в единицу времени, Вт/м<sup>2</sup>;  $\bar{\psi}$  – коэффициент, показывающий, какая часть работы переходит в теплоту, поглощаемую обрабатываемой деталью (например, по данным работы [212] для алмазного шлифования необходимо принимать  $\bar{\psi} = 0,4$ , поскольку в теплоту переходит 80 % от всей работы, а обрабатываемой заготовкой поглощается 50 % теплоты);  $P_z$  – тангенциальная составляющая силы резания, Н;  $V_{\text{кр}}$  – скорость круга, м/с;  $F = B \cdot l$  – площадь контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью, м<sup>2</sup>;  $B$  – ширина шлифования, м;  $l$  – длина дуги контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью, м;  $V_{\text{дет}}$  – скорость детали, м/с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·К);  $c$  – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·К);  $\rho$  – плотность обрабатываемого материала, кг/м<sup>3</sup>.

Зависимость (7.66) представлена в самом общем виде. Поэтому ее необходимо привести к конкретным условиям шлифования, выражая тангенциальную составляющую силы резания следующей зависимостью [212]:  $P_z = \sigma \cdot S_{\text{мгн}}$ , где  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $S_{\text{мгн}} = Q / V_{\text{кр}}$  – мгновенная суммарная площадь поперечного сечения среза всеми одновременно работающими абразивными зернами шлифовального круга, м<sup>2</sup>;  $Q = B \cdot t \cdot V_{\text{дет}}$  – производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;  $t$  – глубина шлифования, м. Тогда  $P_z = \sigma \cdot B \cdot t \cdot V_{\text{дет}} / V_{\text{кр}}$ , а плотность теплового потока выразится:  $q = \sigma \cdot V_{\text{дет}} \cdot t \cdot \bar{\psi} / l$ . Соответственно температура резания  $\theta$  определится:

$$\theta = \frac{\sigma \cdot t \cdot \bar{\psi}}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot V_{\text{дет}}}{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot l}} = \frac{\sigma \cdot \bar{\psi}}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot Q \cdot t}{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot B \cdot l}}. \quad (7.67)$$

При плоском шлифовании, представляя  $l = \sqrt{2 \cdot t \cdot R_{кр}}$  [214], зависимость (7.67) принимает вид:

$$\theta = \frac{\sigma \cdot \bar{\psi}}{2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot Q}{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot B}} \cdot \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{кр}}}, \quad (7.68)$$

где  $R_{кр}$  – радиус круга, м.

Из зависимости (7.68) вытекает, что с уменьшением глубины шлифования  $t$  при обычном плоском шлифовании периферией круга и условии  $Q = \text{const}$  (т.е. при пропорциональном увеличении скорости детали  $V_{дет}$ ) температура резания  $\theta$  уменьшается. Следовательно, для уменьшения температуры резания  $\theta$  эффективно использовать схему многопроходного шлифования с увеличенной скоростью детали  $V_{дет}$ . Важным фактором уменьшения температуры резания  $\theta$  необходимо также рассматривать уменьшение условного напряжения резания  $\sigma$  за счет применения шлифовальных кругов с мягкой основой, например, мягкого войлочного (фетрового) круга с наклеенным слоем абразивного порошка 63С 20П [207], снижающего интенсивность трения в зоне шлифования. Увеличение радиуса круга  $R_{кр}$ , исходя из зависимости (7.68), способствует снижению температуры резания  $\theta$ , однако не существенно.

В зависимости (7.67) отношение  $l/V_{дет}$  определяет время контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью: с его увеличением температура резания  $\theta$  уменьшается. Поэтому, очевидно, целесообразно шлифование производить с увеличенной длиной дуги контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью  $l$ . Эффективным решением в этом направлении является применение схемы внутреннего шлифования, в которой ось вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом устанавливается перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия (рис. 7.19 [207]).

По сравнению с традиционно применяемой схемой круглого внутреннего шлифования, длина дуги контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью  $l$  в этом случае может быть увеличена в несколько раз. Следовательно, это создает условия уменьшения температуры резания  $\theta$  и, соответственно, повышения качества и производительности обработки.



Рисунок 7.19 – Схема внутреннего шлифования

В зависимости (7.67) произведение  $V \cdot l = F$ . Поэтому, во сколько раз увеличится площадь контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью  $F$  от применения указанной схемы внутреннего шлифования, во столько раз может быть увеличена производительность обработки  $Q$  при заданной температуре резания  $\theta$ . Дополнительным фактором повышения производительности обработки  $Q$  или уменьшения температуры резания  $\theta$  в этом случае необходимо рассматривать уменьшение условного напряжения резания  $\sigma$  за счет применения шлифовальных кругов с мягкой основой, снижающих интенсивность трения в зоне шлифования.

Уменьшение глубины шлифования  $t$  также способствует увеличению производительности обработки  $Q$  или уменьшению температуры резания  $\theta$  при условии  $Q = \text{const}$ . Причем, эффект от уменьшения глубины шлифования  $t$  будет более значительным, чем при использовании схемы шлифования периферией круга, поскольку параметр  $t$  входит в зависимость (7.67) с большей степенью, чем в зависимость (7.68).

Следуя зависимости (7.67), за счет увеличения длины дуги контакта шлифовального круга с обрабатываемой деталью  $l$  можно пропорционально увеличивать скорость детали  $V_{\text{дет}}$ , сохраняя заданной температуру резания  $\theta$  и увеличивая тем самым производительности обработки  $Q = V \cdot t \cdot V_{\text{дет}}$  без уменьшения глубины шлифования  $t$ . Это открывает новые возможности осуществления на практике схемы высокопроизводительного многопроходного шлифования при одновременном обеспечении высокого качества обрабатываемых поверхностей.

Таким образом показано, что существуют различные направления уменьшения температуры резания  $\theta$  и увеличения производи-

тельности обработки  $Q$  на основе использования прогрессивной схемы внутреннего шлифования, в которой ось вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом устанавливается перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия (рис. 7.19 [207]). Наряду с уменьшением шероховатости поверхности [138], данная схема позволяет уменьшить и температуру резания  $\theta$ , что, во-первых обеспечивает высококачественную обработку, во-вторых, позволяет производить финишную обработку с более высокой производительностью без образования на обрабатываемых поверхностях прижогов, микротрещин и других температурных дефектов.

Результаты практического применения предложенного метода внутреннего шлифования поверхностей в пневмо- и гидроцилиндрах показали на его высокую эффективность. По показателям качества и производительности обработки данный метод шлифования превосходит применяемый метод обычного внутреннего шлифования и открывает новые возможности создания конкурентоспособной машиностроительной продукции.

### **7.9. Экспериментальная оценка полученных теоретических решений**

Окончательная обработка внутренней поверхности цилиндров, традиционно, осуществляется на внутришлифовальных станках. Недостатком такого способа является то, что заготовку после выполнения операции растачивания необходимо переустанавливать с токарного станка на шлифовальный станок, а это требует значительного времени на выверку положения обрабатываемого цилиндра, переустанавливаемого с токарного станка на внутришлифовальный. Как правило, это приводит к потере точности взаимного расположения поверхностей и осей. Не менее, а может наиболее важным является то, что в процессе абразивной обработки обработочные риски, т.е. следы, образующиеся от воздействия абразивных зерен, направлены вдоль обработочных рисков, образовавшихся после растачивания, т.е. перпендикулярно по отношению к образующей обрабатываемого отверстия. Поскольку поршни (штоки) в процессе работы пневмо- и гидроцилиндров, компрессоров, двигателей внутреннего сгорания и т. п. перемещаются в осевом направлении, т.е. вдоль образующей, а следова-



тельно, поперек обработочных рисок, последние подвергаются повышенному износу, что отрицательно сказывается на долговечности уплотнений. Частично эти недостатки ликвидируются хонингованием, которое характеризуется низкой производительностью, следовательно, высокой трудоемкостью, поскольку обработка осуществляется за счет возвратно-поступательного движения абразивных брусков вдоль образующей отверстия, при одновременном вращении хонинговальной головки или обрабатываемого цилиндра. Причиной низкой производительности хонингования является возвратно-поступательное движение инструмента, который в каждый возвратный ход снижает скорость до нуля, т. е. проходит через "крайние мертвые точки".

В связи с этим в работе предложены способ и устройство для внутреннего шлифования предварительно расточенного отверстия, которые лишены перечисленных недостатков [208]. Обработка цилиндра производится сначала лезвийным, а затем абразивным инструментом на токарном станке без переустановки детали, т.е. без смены баз. Ось вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом устанавливается перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия цилиндра (рис. 7.8, рис. 7.19). В качестве абразивного инструмента использовался войлочный круг диаметром 175 мм, периферийная поверхность круга была покрыта жидким стеклом, прокатана по абразивному порошку и высушена в течение 1 часа.

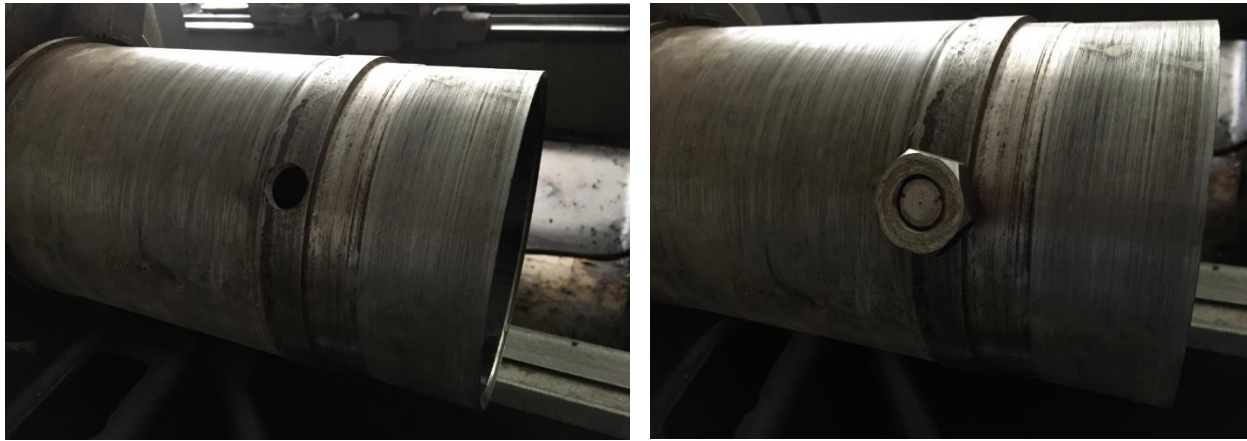
После растачивания отверстия опытный образец устройства устанавливали на токарный станок с высотой центров 300 мм в резцедержатель или на место резцедержателя и подключали электродвигатель привода абразивного круга. Вылет абразивного круга на опытном образце устройства – 600 мм. Минимальный диаметр отверстия, к которому применимо изготовленное устройство – 180 мм. Поскольку операции шлифования предшествует лезвийная обработка радиальное и торцевое биение полностью отсутствуют. Это позволяет оставлять минимальный припуск на последующий переход, т.к. исключается необходимость резервировать дополнительный слой межоперационного припуска, компенсирующего радиальное биение после смены баз. Поэтому припуск на окончательную обработку может быть соизмеримым с высотой микронеровностей, полученных после лезвийной обработки, т.е. растачивания.

Измерение параметров шероховатости поверхностей в отверстиях гидро-пневмоцилиндров с помощью современных проффилографов-профилометров, например, модели Optical Profiler Micron beta (рис. 7.20) практически невозможно из-за труднодоступного расположения контролируемых поверхностей, а также габаритов деталей.



Рисунок 7.20 – Проффилограф-профилометр модели Optical Profiler Micron beta

В связи с этим изготовлен цилиндр для проведения исследований, в стенке которого размещено сквозное резьбовое отверстие, ось которого направлена перпендикулярно к оси цилиндра (рис. 7.21,а). В отверстие вворачивали заглушку на глубину минимального выступа относительно внутренней поверхности цилиндра и стопорили контрогайкой (рис. 7.21,б). После растачивания отверстия цилиндра обработке подвергалась и заглушка. Для определения шероховатости заглушку выкручивали и помещали на проффилограф-профилометр для проведения замеров.



а

б

Рисунок 7.21 – Цилиндр для проведения исследований со сквозным резьбовым отверстием (а) и с ввернутой в него заглушкой (б)



Рисунок 7.22 – Экспериментальные исследования на кафедре "Технология машиностроения" ГВУЗ "Приазовский государственный технический университет" проводит аспирант Сергеев А. С.

В результате осуществления процесса растачивания (рис. 7.22) была получена поверхность с шероховатостью  $R_a = 3,2$  мкм.

Режим абразивной обработки (рис. 7.23): скорость резания  $V = 750$  м/мин (12 м/с); продольная подача  $S = 2$  мм/об.; частота вращения заготовки  $50$  мин<sup>-1</sup>. Глубина шлифования устанавливалась прижимом абразивного круга с натягом по отношению к обрабатываемой поверхности, равным  $0,5 - 5$  мм. Натяг (фактическое смещение абразивного круга) задавали по лимбу, где цена деления указывается в мм на сторону. Фактическую глубину шлифования определяли следующим образом: измеряли диаметр обрабатываемой детали до обработки и после обработки, полученную разность делили на 2.

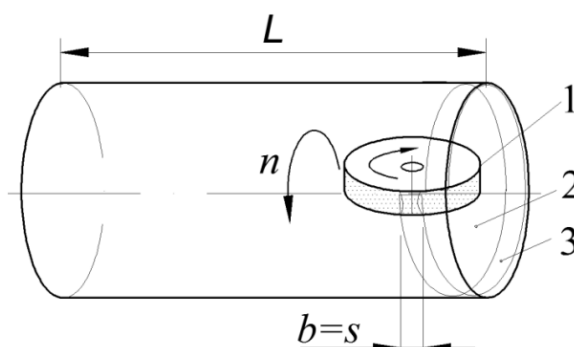


Рисунок 7.23 – Схема обработки отверстия цилиндра абразивным инструментом: 1 – войлочный круг с наклеенным абразивным порошком; 2 – обрабатываемый цилиндр; 3 – шлифованная полоса;  $b$  – ширина пятна контакта;  $S$  – подача;  $n$  – частота вращения детали;  $L$  – длина детали

Взаимосвязь между величиной натяга и фактической глубиной шлифования показана на рис. 7.24. Как видно, с увеличением величины натяга фактическая глубина шлифования  $t_f$  непрерывно увеличивается. Причем, при обработке кругом на вулканитовой связке в большей степени, чем при обработке войлочным и фетровым кругами. Это связано с более высокой режущей способностью круга на вулканитовой связке.

В результате абразивной обработки за один рабочий ход диаметр отверстия в цилиндре увеличивался на  $2 - 7$  мкм, что, в основном, соответствует сглаживанию обработочных рисок, образовавшихся после растачивания.

Полученные экспериментальные данные согласуются с теоретическим решением, рассматривая величину натяга, возникающего в технологической системе, в виде:

$$y = \frac{P_y}{c} = \frac{P_z}{K_{ш} \cdot c} = \frac{\sigma \cdot Q}{K_{ш} \cdot c \cdot V_{кр}}, \quad (7.69)$$

где  $P_y$ ,  $P_z$  – радиальная и тангенциальная силы резания, Н;  $P_y = P_z / K_{ш}$ ;  $K_{ш}$  – коэффициент шлифования;  $P_z = \sigma \cdot Q / V_{кр}$ ;  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $Q$  – производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;  $V_{кр}$  – скорость круга, м/с;  $c$  – жесткость технологической системы, Н/м.

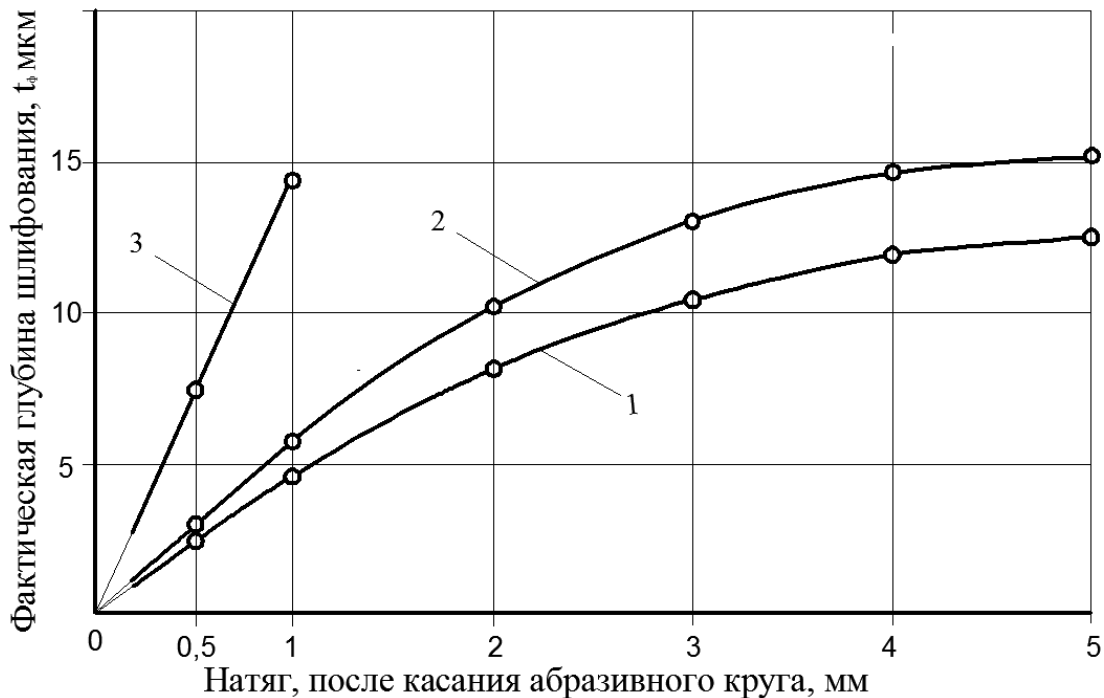


Рисунок 7.24 – Зависимость фактической глубины шлифования  $t_{ф}$  от величины натяга, после касания абразивного круга с наклеенным на его рабочую поверхность абразивным порошком зернистостью 2000: 1 – войлочный круг; 2 – фетровый круг; 3 – круг на вулканитовой связке

Поскольку производится абразивная обработка отдельных микронеровностей (обработочных рисок), образовавшихся после растачивания (рис. 7.25), то производительность обработки  $Q$  определяется зависимостью:

$$Q = Q_0 \cdot k, \quad (7.70)$$

где  $Q_0 = \pi \cdot D_{дет} \cdot t_{ф} \cdot S$  – производительность обработки сплошного материала, м<sup>3</sup>/с;  $D_{дет}$  – диаметр детали, м;  $k$  – коэффициент, определяющий долю объема микронеровностей в объеме сплошного материала.

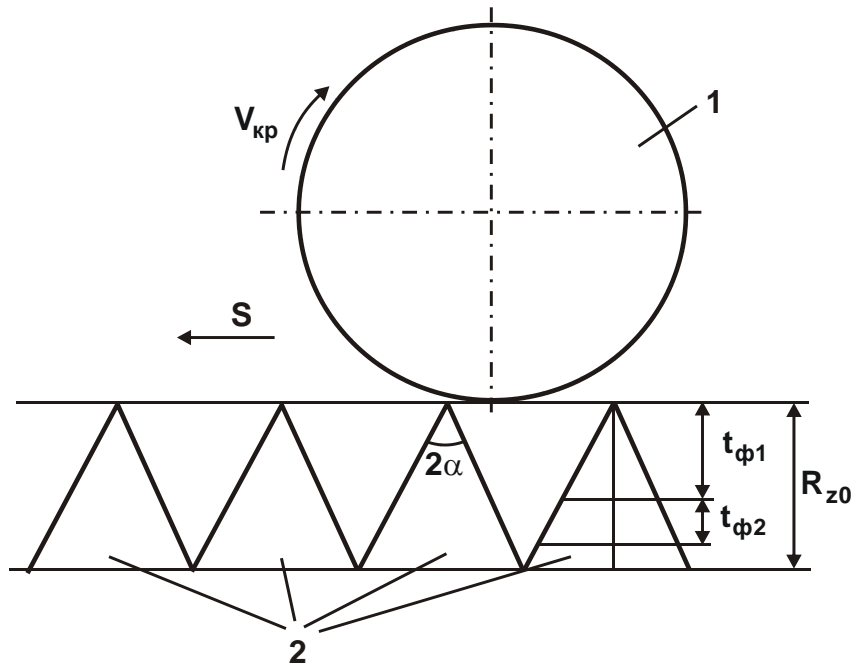


Рисунок 7.25 – Расчетная схема параметров шлифования:  
1 – абразивный круг; 2 – микронеровности (обработочные риски),  
образовавшиеся после растачивания

Для определения коэффициента  $k$  рассмотрим расчетную схему, показанную на рис. 7.25.

При первом проходе круга:

$$k_1 = \frac{\vartheta_1}{\vartheta_{01}}, \quad (7.71)$$

где  $\vartheta_1 = B \cdot F_1$  – объем снимаемого материала в виде микронеровности шириной  $B$ ,  $\text{м}^3$ ;  $F_1 = t_{\phi 1}^2 \cdot \text{tg} \alpha$  – площадь поперечного сечения микронеровности (в виде треугольника на рис. 7.25), удаляемой на первом проходе круга,  $\text{м}^2$ ;  $\vartheta_{01} = B \cdot F_{01}$  – объем снимаемого сплошного материала шириной  $B$ ,  $\text{м}^3$ ;  $F_{01} = t_{\phi 1} \cdot 2R_{z0} \cdot \text{tg} \alpha$  – площадь поперечного сечения снимаемого сплошного материала (рис. 7.25), удаляемого на первом проходе круга,  $\text{м}^2$ ;  $t_{\phi 1}$  – фактическая глубина шлифования на первом проходе круга,  $\text{м}$ ;  $R_{z0}$  – начальная высота микронеровности,  $\text{м}$ ;  $2\alpha$  – угол при вершине микронеровности.

Тогда

$$k_1 = \frac{t_{\phi 1}}{2R_{z0}}. \quad (7.72)$$

При втором проходе круга:

$$k_2 = \frac{\vartheta_2}{\vartheta_{02}}, \quad (7.73)$$

где  $\vartheta_2 = B \cdot F_2$  – объем снимаемого материала в виде микронеровности шириной  $B$ , м<sup>3</sup>;  $F_2 = t_{\phi 2} \cdot \frac{2 \cdot t_{\phi 1} + 2 \cdot (t_{\phi 1} + t_{\phi 2})}{2} \cdot \operatorname{tg} \alpha$  – площадь поперечного сечения микронеровности (в виде трапеции на рис. 7.25), удаляемой на втором проходе круга, м<sup>2</sup>;  $\vartheta_{02} = B \cdot F_{02}$  – объем снимаемого сплошного материала шириной  $B$ , м<sup>3</sup>;  $F_{02} = t_{\phi 2} \cdot 2R_{z0} \cdot \operatorname{tg} \alpha$  – площадь поперечного сечения снимаемого сплошного материала (рис. 7.25), удаляемого на втором проходе круга, м<sup>2</sup>;  $t_{\phi 2}$  – фактическая глубина шлифования на втором проходе круга, м.

Тогда

$$k_2 = \frac{2 \cdot t_{\phi 1} + t_{\phi 2}}{2R_{z0}}. \quad (7.74)$$

Очевидно, при  $n$ -м проходе круга:

$$k_n = \frac{2 \cdot \sum_{i=1}^{n-1} t_{\phi i} + t_{\phi n}}{2R_{z0}}, \quad (7.75)$$

где  $t_{\phi i}$  – текущие значения фактической глубины шлифования на  $i = 1 \dots (n-1)$  проходах круга, м;  $t_{\phi n}$  – фактическая глубина шлифования на  $n$ -м проходе круга, м.

Как следует из зависимости (7.75), с увеличением количества проходов круга  $n$  коэффициент  $k_n$  увеличивается, в пределе принимая значение 1. С учетом зависимостей (7.70) и (7.72) величина натяга  $y$ , возникающего при первом проходе круга и определяемого зависимостью (7.69), принимает вид:

$$y = \frac{\sigma \cdot \pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot t_{\phi 1}^2 \cdot S}{2 \cdot K_{\text{ш}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot R_{z0}}. \quad (7.76)$$

Откуда

$$t_{\phi 1} = \sqrt{\frac{2 \cdot K_{\text{ш}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot R_{z0} \cdot y}{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot \sigma \cdot S}}. \quad (7.77)$$

При втором проходе круга величина натяга  $y$ , определяемого зависимостью (7.69), с учетом зависимостей (7.70) и (7.74) принимает вид:

$$y = \frac{\sigma \cdot \pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot t_{\phi 2} \cdot (2 \cdot t_{\phi 1} + t_{\phi 2}) \cdot S}{2 \cdot K_{\text{ш}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot R_{z0}} . \quad (7.78)$$

Откуда

$$t_{\phi 2}^2 + 2 \cdot t_{\phi 1} \cdot t_{\phi 2} - \frac{2 \cdot K_{\text{ш}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot R_{z0} \cdot y}{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot \sigma \cdot S} = 0 . \quad (7.79)$$

В результате получено квадратное уравнение относительно неизвестной величины  $t_{\phi 2}$ . Его решение:

$$t_{\phi 2} = -t_{\phi 1} \pm \sqrt{t_{\phi 1}^2 + \frac{2 \cdot K_{\text{ш}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot R_{z0} \cdot y}{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot \sigma \cdot S}} . \quad (7.80)$$

Очевидно, величина  $t_{\phi 2}$  не может быть отрицательной, поэтому

$$t_{\phi 2} = \sqrt{t_{\phi 1}^2 + \frac{2 \cdot K_{\text{ш}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot R_{z0} \cdot y}{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot \sigma \cdot S}} - t_{\phi 1} . \quad (7.81)$$

После умножения и деления зависимости (7.81) на сопряженную

величину:  $\sqrt{t_{\phi 1}^2 + \frac{2 \cdot K_{\text{ш}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot R_{z0} \cdot y}{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot \sigma \cdot S}} + t_{\phi 1}$ , получено:

$$t_{\phi 2} = \frac{A}{\left(\sqrt{t_{\phi 1}^2 + A} + t_{\phi 1}\right)} , \quad (7.82)$$

где  $A = \frac{2 \cdot K_{\text{ш}} \cdot c \cdot V_{\text{кр}} \cdot R_{z0} \cdot y}{\pi \cdot D_{\text{дет}} \cdot \sigma \cdot S} = t_{\phi 1}^2$ .

После преобразования зависимости (7.82) имеем:

$$t_{\phi 2} = \frac{t_{\phi 1}^2}{\left(\sqrt{t_{\phi 1}^2 + t_{\phi 1}^2} + t_{\phi 1}\right)} = \frac{t_{\phi 1}}{\left(\sqrt{2} + 1\right)} = 0,41 \cdot t_{\phi 1} . \quad (7.83)$$

Из зависимости (7.83) вытекает:  $t_{\phi 2} < t_{\phi 1}$ .

Зависимость (7.81) носит нелинейный характер, что согласуется с экспериментальными графиками, приведенными на рис. 7.24. Отличие этих графиков, исходя из зависимости (7.81), связано с различными значениями отношения  $\sigma/K_{\text{ш}}$  при осуществлении обработки за один проход круга. При обработке вулканитовым кругом отношение  $\sigma/K_{\text{ш}}$



значительно меньше, чем при обработке войлочным и фетровым кругами (рис. 7.24). Так, при  $t_{\phi} = 15$  мкм отношение  $\sigma/K_{\omega}$ , исходя из зависимости (7.77) и рис. 7.24, при обработке вулканитовым кругом приблизительно в 5 раз меньше, чем при обработке войлочным кругом.

При  $t_{\phi} = 7$  мкм значения отношения  $\sigma/K_{\omega}$  отличаются приблизительно в 4 раза, а при  $t_{\phi} = 3$  мкм – в 3 раза. Следовательно, с увеличением величины натяга  $u$  происходит дополнительное снижение режущей способности войлочного круга, а, соответственно и фетрового круга, по отношению к вулканитовому кругу, который обладает высокой режущей способностью в широком диапазоне изменения величины  $u$ .

На рис. 7.26 показан характер изменения параметра шероховатости поверхности  $R_z$  в зависимости от величины натяга.

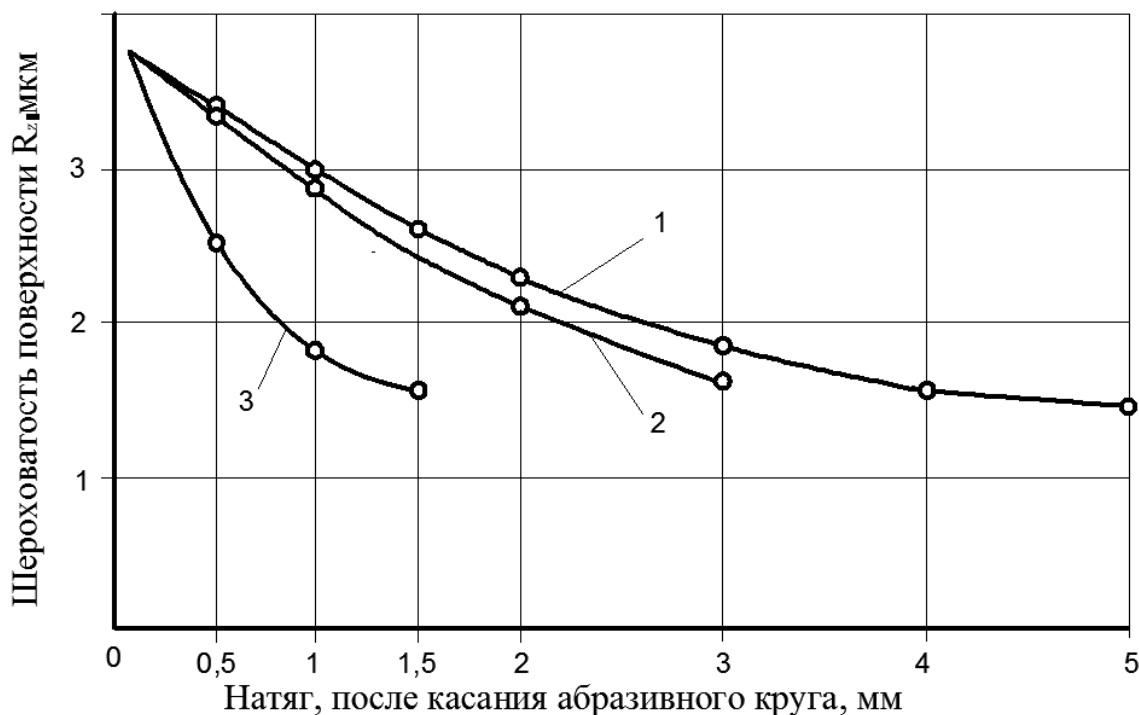


Рисунок 7.26 – Зависимость параметра шероховатости поверхности  $R_z$  от величины натяга, после касания абразивного круга с наклеенным на его рабочую поверхность абразивным порошком зернистостью 2000: 1 – войлочный круг; 2 – фетровый круг; 3 – круг на вулканитовой связке

По сути, приведенные графики иллюстрируют характер уменьшения остаточных микронеровностей, образованных при растачивании, в соответствии с зависимостью:  $R_z = R_{z0} - t_{\phi}$ , где  $R_{z0}$  – начальная вы-

сота микронеровностей. Поэтому, сравнивая графики, приведенные на рис. 7.24 и рис. 7.26, видно, что чем больше фактическая глубина шлифования, тем меньше параметр шероховатости поверхности  $R_z$ . Наименьшие значения  $R_z$  достигаются при обработке кругом на вулканитовой связке.

Таким образом установлено, что в процессе обработки тонкостенного цилиндра (толщиной стенки 5 ... 10 мм) мягкими кругами увеличение натяга способствует уменьшению высоты микронеровностей. Интенсивность процесса зависит от плотности материала мягких кругов. Так более плотный по сравнению с войлочным кругом фетровый круг в 1,7 раза меньшим натягом доводит поверхность до шероховатости 1,25 мкм по  $R_a$ , а для круга на вулканитовой связке натяг меньше в 2 раза относительно фетрового. Из анализа графиков можно сделать вывод о том, что с увеличением плотности абразивного круга значительно снижается натяг. Попытка использования абразивного круга на керамической связке, т. е. с максимальной плотностью, приводит к вибрации в системе СПИД. Важную роль при этом играет продольная подача, с учетом того, что относительно большое пятно контакта мягкого абразивного круга позволяет производить повторную обработку при величине продольной подачи меньше поперечного размера пятна контакта абразивного круга и обрабатываемой поверхности в зоне обработки. Минимальным и достаточным условием экономичной обработки мягким абразивным кругом является срезание вершин микронеровностей, полученных на предыдущем переходе, т. е. при растачивании с удельной подачей, близкой к поперечному размеру пятна контакта. Тогда при установлении глубины резания (натяга) за один оборот шпинделя необходимо получить требуемую шероховатость поверхности (рис. 7.26). Такого же результата можно достичь при меньшем натяге, но с подачей, меньше размера пятна контакта, за счет многократного прохождения обработанной поверхности.

На рис. 7.27 показан характер изменения параметра шероховатости поверхности  $R_z$  в зависимости от зернистости абразивного порошка (по FEPA) для разной исходной шероховатости поверхности (определяемой параметром  $R_a$ ), образованной при растачивании. Обработка производилась войлочным кругом. Уменьшение параметра FEPA означает увеличение зернистости абразивного порошка. Поэтому с

увеличением зернистости абразивного порошка параметр шероховатости поверхности  $R_z$  уменьшается, что связано с повышением режущей способности абразивного круга (снижением его засаливания). Как видно, с уменьшением исходной шероховатости поверхности имеет место уменьшение текущего значения параметра шероховатости поверхности  $R_z$ .

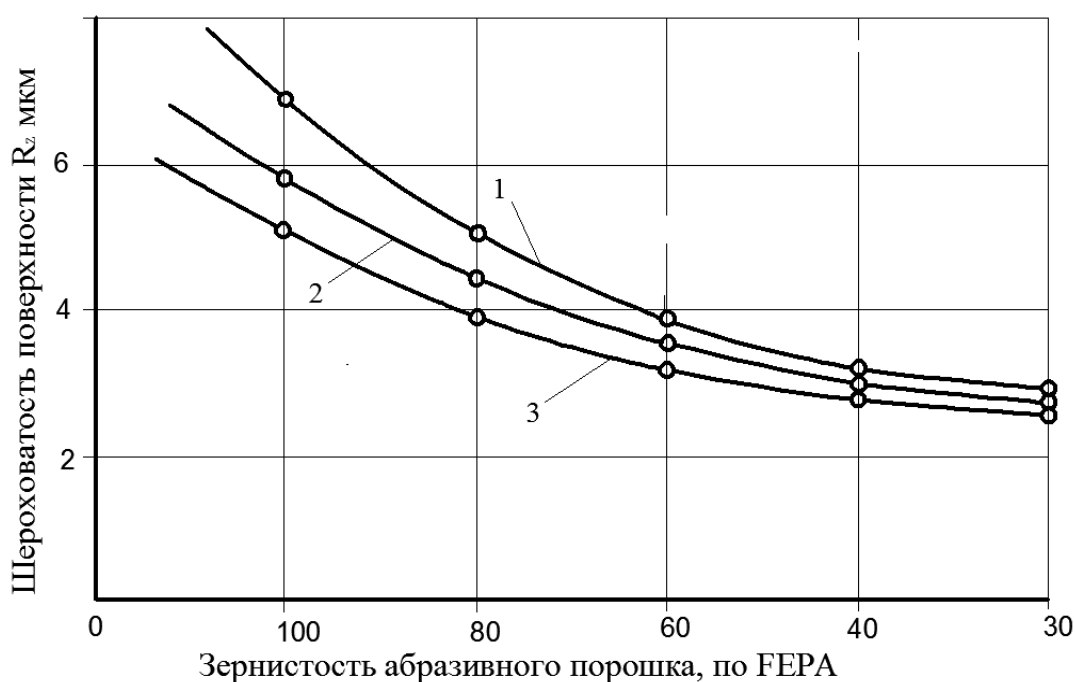


Рисунок 7.27 – Зависимость параметра шероховатости поверхности  $R_z$  от зернистости абразивного порошка для разной исходной шероховатости поверхности: 1 –  $R_a = 3,2$  мкм; 2 –  $R_a = 2,5$  мкм; 3 –  $R_a = 1,25$  мкм

На рис. 7.28 показан характер изменения фактической глубины шлифования  $t_\phi$  в зависимости от величины натяга при обработке абразивными кругами с нанесенной на их рабочую поверхность пастой ГОИ. Фактическая глубина шлифования  $t_\phi$  в этом случае значительно меньше по сравнению с обработкой абразивными кругами с наклеенным на их рабочую поверхность абразивным порошком (рис. 7.24). Это связано с более низкой режущей способностью круга и указывает на возможность достижения более высоких показателей шероховатости поверхности после предварительного удаления обработочных рисок, образовавшихся при растачивании.

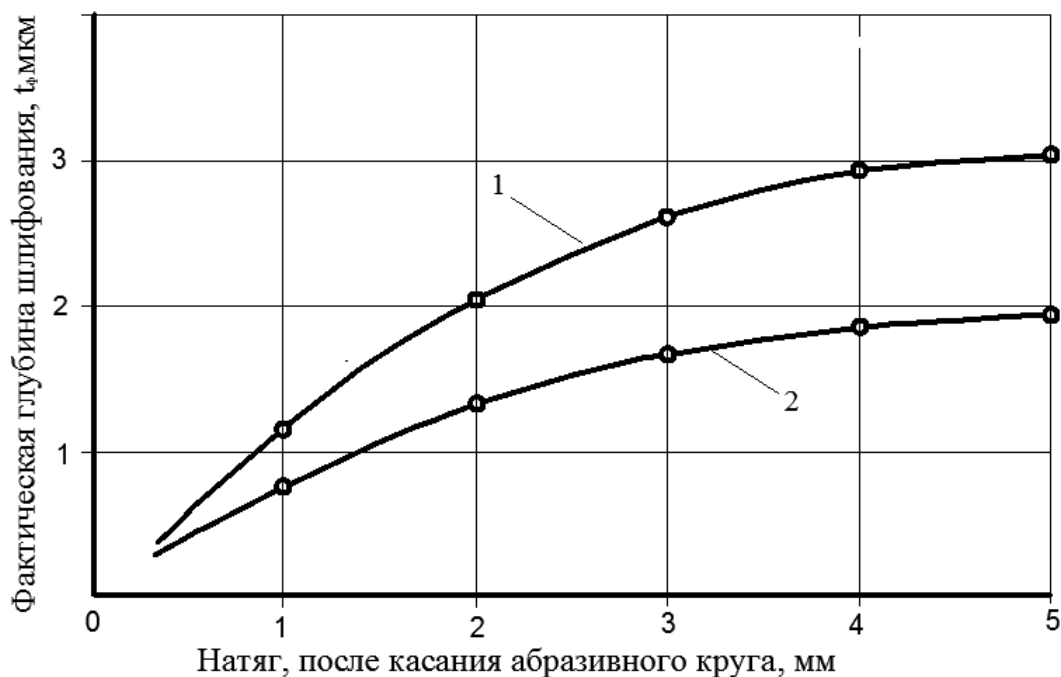


Рисунок 7.28 – Зависимость фактической глубины шлифования от величины натяга, после касания абразивного круга с нанесенной на его рабочую поверхность пастой ГОИ:  
1 – фетровый круг; 2 – войлочный круг

При предварительном подборе зернистости абразивного материала руководствовались следующими ограничениями. Применение зернистости до F100 (по FEPA, что соответствует 0,25 мм или 250 мкм) сопровождается интенсивным засаливанием рабочей поверхности круга, а крупнозернистый абразив F24 и более в процессе обработки оставляет заметные обработочные риски и относительно быстро выкрашивается с поверхности войлочного круга. Таким образом, выбрана промежуточная фракция, т.е. применена зернистость абразивного материала F40.

Принятая скорость шлифования выбрана максимально возможной с учетом прочности войлочного материала при воздействии центробежной силы, а также с учетом стандартной частоты вращения асинхронного двигателя – 1400 об./мин. Диаметр войлочного круга выбран максимальным, вписывающимся в обрабатываемое отверстие, его диаметр 175 мм.

В результате обработки войлочным кругом с наклеенным порошком карбида кремния зеленого зернистостью F40 за один рабочий ход получена шероховатость  $R_a = 1,25$  мкм, а после второго рабочего хода

$R_a=0,63$  мкм. Дальнейшая обработка, т.е. следующий рабочий ход осуществлялся с нанесением на периферию войлочного круга пасты ГОИ, в результате чего получена зеркальная поверхность.

Известно, что шероховатость поверхности измеряют в направлении, перпендикулярном направлению обработочных рисок. Однако в связи с тем, что очередной технологический переход выполняется инструментом, который оставляет обработочные следы, перпендикулярные предыдущему переходу, которым является растачивание и их направление совпадает с направлением движения поршня, то в соответствии функциональным назначением поверхности, шероховатость поверхности целесообразно измерять в направлении движения поршня.

Благодаря такому направлению обработочных следов, полностью исчезла необходимость прохождения периода приработки поршня с цилиндром на малых оборотах, например, двигателя внутреннего сгорания, компрессора, насоса и др.

Преимуществом предложенного метода абразивной обработки является и то, что в процессе обработки не возникают вибрации детали и инструмента, особенно это важно при обработке тонкостенных цилиндров. С учетом этого свойства можно рассчитывать на значительное снижение металлоемкости проектируемых цилиндров, так как толщина их стенок, как правило, при конструировании устанавливается конструктивной (вместо расчетной) с целью обеспечения жесткости в процессе обработки. Перспективным является использование предлагаемой технологии для окончательной обработки внутренней поверхности гильз блока цилиндров двигателей внутреннего сгорания, так как толщина стенок в них должна быть расчетной, т.е. минимальной для скорейшей передачи тепла в охлаждающую жидкость зарубашечного пространства блока цилиндров.

Технология и устройство были применены при изготовлении пневмоцилиндров (диаметром отверстия 195 мм, длиной 400 мм), заготовкой послужила труба прокат 210, сталь 20. Восемь пневмоцилиндров с уплотнениями поршней резиновыми кольцами было установлено на автоматической линии ампулирования лекарственных средств, где они работают без ремонта на протяжении нескольких лет. Следует отметить, что сжатый воздух (0,4 МПа), перед подачей в пневмоцилиндр проходит подготовку в виде подмешивания в него масляного тумана.

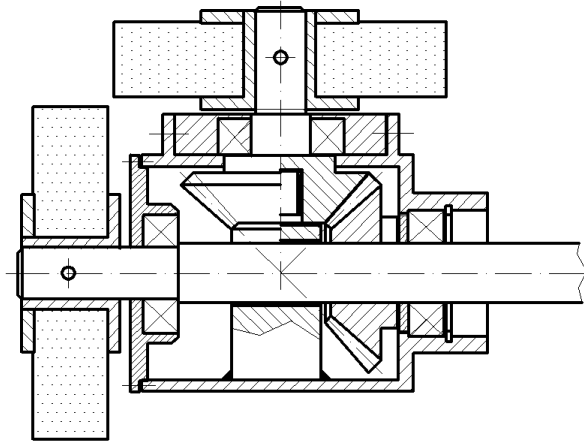


Рисунок 7.29 – Конструкция шлифовальной головки с двумя абразивными кругами

Для дальнейшего повышения эффективности внутреннего шлифования предложено использовать конструкцию шлифовальной головки с двумя абразивными кругами (рис. 7.29). Это позволяет еще значительно увеличить количество одновременно работающих зерен круга и уменьшить параметр шероховатости обработанной поверхности  $R_a$  ниже значения 0,04 мкм при существенном увеличении производительности обработки.

## Выводы

1. Получены аналитические зависимости для определения условий уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании с позиции теоретико-вероятностного подхода. Показано, что учет вероятностного характера участия зерен шлифовального круга в резании позволяет более достоверно оценить закономерности формирования шероховатости поверхности при шлифовании. Теоретически и экспериментально установлено, что обеспечение примерно одновысотного расположения режущих зерен на рабочей поверхности шлифовального круга позволяет существенно уменьшить шероховатость поверхности – до уровня, достигаемого при доводке алмазной пастой и абразивном полировании.

2. Получены аналитические зависимости для определения высотных параметров шероховатости поверхности при шлифовании кругом, в котором режущие зерна смоделированы в форме сферы. Это

позволяет приблизить расчетные значения параметров шероховатости поверхности при шлифовании к экспериментальным данным. Расчетами установлено, что при переходе от конусообразной к сферической форме режущих зерен высотные параметры шероховатости поверхности уменьшаются более чем в два раза. Предложенный в работе теоретический подход, обеспечивающий переход от конусообразной к сферической форме режущих зерен, позволил также уточнить известные расчетные зависимости для определения максимальной (вероятностной) толщины среза при шлифовании.

3. Разработана технология внутреннего шлифования на основе установления оси вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия цилиндра и применения мягкого войлочного круга с наклеенным абразивным порошком, которая обладает следующими достоинствами:

- позволяет резко снизить высоту микронеровностей поверхности, полученную на предшествующей операции за счет изменения направления главного движения резания путем установления оси вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия цилиндра. В результате достигается изменение направления обработочных следов и тем самым обеспечивается увеличение срока службы уплотнений поршня;

- обеспечивает увеличение производительности окончательной обработки за счет снижения основного (машинного) времени, например, в сравнении с хонингованием;

- обеспечивает снижение трудоемкости обработки отверстия в целом за счет исключения необходимости переустановки заготовки и выверки на другом станке;

- обеспечивает возможность обработки цилиндров малой жесткости благодаря отсутствию вибраций из-за применения мягких абразивных кругов.

4. Разработанная технология окончательной обработки отверстий пневмо- и гидроцилиндров, а также гильз двигателей внутреннего сгорания позволила повысить производительность обработки за счет многократного увеличения скорости резания, например, в сравнении с хонингованием, а также за счет поперечного воздействия на предшествующие обработочные риски, например, после растачивания в сравнении с обработкой на внутришлифовальном станке.

## Раздел 8

# Социально ответственный маркетинг в управлении прибылью машиностроительного предприятия

### 8.1. Социально-ответственный маркетинг на промышленном рынке

XXI век можно охарактеризовать как прорыв в области социальной ответственности. В рамках ООН подписываются глобальные документы о социальной ответственности в разных сферах. Большинство стран ратифицируют эти соглашения и исполняют их на уровне государственных органов, а также на уровне частного бизнеса. Все эти инициативы направлены на защиту населения и окружающей среды. С каждым годом все больше собственников предприятий осознают свою непосредственную ответственность перед странами, на территории которых ведут свою деятельность, населением, потенциальными покупателями, сотрудниками и их семьями. Многие собственники предприятий берут на себя выполнение некоторых социальных обязательств государства перед населением, поскольку чувствуют, что могут более оперативно решить эти вопросы из-за низкого бюрократизма [125].

В Налоговом и Хозяйственном Кодексах Украины, Законе Украины "О рекламе" прописаны некоторые вопросы, которые предприятия должны выполнять для развития общества. Так, каждый субъект хозяйственной деятельности должен платить налоги, предоставлять наемным сотрудникам отпуск, оплачивать больничные листы, предоставлять достойную заработную плату, следить за уровнем выбросов в атмосферу вредных веществ и др. Некоторые предприятия стремятся найти недоработки законодательства и не выполнять какие-то требования Налогового и Хозяйственного Кодекса Украины, сокращая за счет этого величину затрат и увеличивая тем самым свою прибыль.

Многие вопросы по обеспечению нормального уровня жизнедеятельности общества не прописаны в законодательстве, поэтому создаются различные общественные организации, которые на добровольных началах занимаются решением конкретных вопросов [154]. У предприятий появился такой термин как "Социальная ответственность" или "Корпоративная ответственность", выполняя который от-



дельные предприятия стремятся снизить негативное влияние своей деятельности на общество и решить социально значимые вопросы. Одним из таких направлений деятельности является социально-ответственная работа с клиентами, которое получило название "Социально-ответственный маркетинг". Это направление предполагает, что каждое предприятие выбирает: допускать мелкие недоработки по качеству выпускаемой продукции и в продвижении ее на рынке или же вести честную конкурентную борьбу.

Если рассматривать потребительский рынок, где имеется большое количество потенциальных покупателей и товаров массового производства, то потеря нескольких потенциальных клиентов, которые не удовлетворены качеством предлагаемого товара или качеством обслуживания, никак не отразится на эффективности работы предприятия. При этом величина дополнительной прибыли, полученной от реализации некачественного товара или из-за низкого уровня обслуживания, будет значительно выше потенциального убытка. Такое соотношение прибыли и убытка толкает многие предприятия к производству некачественной продукции и предоставлению услуг низкого качества. Так, продукты питания производят с использованием сырьевых заменителей, что приводит к их низкому качеству. Крупные магазины изменяют информацию о дате расфасовки продуктов питания с целью увеличения срока их годности. В объявлениях об аренде помещения занижается цена для привлечения внимания потенциального арендатора и т.д. На потребительском рынке период согласования покупки длится всего несколько минут, и покупатель крайне редко имеет необходимые знания и опыт для оценки качества товара.

Для подтверждения этого тезиса следует рассмотреть пример рынка запчастей для автомобилей. Производство запчастей для автомобилей развивается в двух направлениях: снабжение предприятий для сборки новых автомобилей и продажа запчастей на рынках городов и в мелких магазинах. Рынок запчастей можно рассматривать как потребительский рынок, поскольку в настоящее время имеется большое количество автомобилей, которые постоянно необходимо ремонтировать, заменяя некоторые детали на новые. Покупка запчастей осуществляется в течении нескольких минут, и покупатель не имеет возможности (в связи с отсутствием необходимых знаний и оборудования) провести технический анализ качества покупаемого товара, ис-

пытать его в работе. Поэтому этот рынок весьма привлекателен для контрафактной продукции, поскольку, начиная с 2003 года, годовой прирост объема рынка автозапчастей составляет 26,5 %. Ткачев М. М. [225] в своей работе привел статистику производства запчастей для автомобилей заводом, который является владельцем технологии производства, и статистику продаж в Украине автозапчастей. Согласно этой статистике, рынок запчастей для автомобилей имеет примерно 25 % контрафактной продукции. При производстве этой продукции используется худшее сырье (по сравнению с официальной продукцией), применяются устаревшие технологии, используется персонал низкой квалификации. Кроме того, в себестоимость контрафактной продукции не закладывается амортизация затрат на проектирование и разработку продукции, которые были понесены официальными производителями. Поэтому себестоимость контрафактной продукции значительно ниже, что позволяет устанавливать более низкую цену на продаваемый товар по сравнению с товаром официального производителя.

Второе направление деятельности – снабжение автомобильных заводов по сборке автомобилей – определяет промышленный рынок. В этом случае поставлять свою продукцию могут только сертифицированные производители. По условию соответствия качества, которое закладывается в договор поставки товара, автомобильный завод в случае выявления несоответствия заявленному качеству товара прекращает сотрудничество с поставщиком и предоставляет ему 90 дней на устранение замечаний. Если же поставщик через 90 дней поставит свою продукцию с не устраненным дефектом, то этот поставщик внесется в "черный список" и ему будет запрещено любое сотрудничество с автомобильными заводами всего мира. Данный факт показывает, что промышленные предприятия, которые умышленно идут на обман своего покупателя, могут потерять все.

Маловероятно, что предприятия, работающие на промышленном рынке, пойдут на умышленный обман своего покупателя (имея в контракте жесткое условие соответствия качества) из-за желания получить сверхприбыль. Причиной обмана может стать отсутствие производственной базы (оборудования, инструмента и технологии), достаточной для изготовления продукции требуемого качества. Причину обмана в связи с отсутствием производственной базы следует рассматривать с двух позиций.

1. Многие предприятия не имеют необходимых средств для обновления своего технического потенциала. Поэтому они производят товар в заведомо проигрышных условиях (по сравнению с мировыми конкурентами) и сознательно идут на махинации с продвижением товара, компенсируя этим низкое качество.

2. Предприятия, располагающие необходимыми средствами для обновления технического потенциала, часто не имеют квалифицированного персонала, занимающегося техническим перевооружением. Поэтому эти предприятия для производства нового товара закупают новое оборудование, не соответствующее назначению выпускаемой продукции и с низкой стоимостью, которое, как правило, не позволяет качественно производить требуемую продукцию, а также поступает на предприятие со срывом сроков поставки. В итоге у предприятия есть обязательство по поставке готовой продукции требуемого качества, а производственная база для ее изготовления отсутствует. Поэтому руководителям предприятия приходится придумывать различные мероприятия по производству продукции, максимально приближающейся к требуемому качеству, и чтобы покупатель не заметил этого несоответствия.

Для исключения производства некачественной продукции необходимо постоянно осуществлять техническое перевооружение предприятия, приобретать оборудование, соответствующее требуемому назначению и качеству выпускаемой продукции [121], по критерию цена/качество, а не по критерию минимальной цены, как это предусмотрено системой электронных закупок "Прозора". Для этого следует более активно сотрудничать с инжиниринговыми центрами, где сосредоточены квалифицированные специалисты, способные внедрить новое оборудование в производство, обеспечивая требуемое качество изготавливаемой продукции.

## **8.2. Социально ответственный маркетинг в управлении качеством и конкурентоспособностью машиностроительной продукции**

Мировой экономический кризис, который начался в 2008 году и затронул все страны, нанес значительный урон украинским предприятиям [124]. По оценкам многих экспертов последствия этого кризиса еще ощутимы в украинской экономике. Постоянное пребывание в кри-

зисном состоянии не позволяет предприятиям выйти на нормальный ритм работы и осуществлять долгосрочную программу развития. В результате многие предприятия используют устаревшее оборудование, которое не позволяет изготавливать качественную продукцию. В совокупности с несовершенной законодательной базой и низкой моральной ответственностью некоторых руководителей на рынке реализуется значительный объем некачественной продукции, что наносит ущерб покупателю и окружающей среде. Регулирование и недопущение таких нарушений осуществляет социально ответственный маркетинг (СОМ), который рассматривается многими учеными [92, 96, 104, 105, 149, 152], однако недостаточно еще освещен по конкретным отраслям с особенностями рынков и ситуации в Украине.

Согласно определению профессора Орлова П. А., социально ответственный маркетинг субъектов хозяйствования – это неукоснительное выполнение требований государственных нормативных актов в сфере обеспечения социальной ответственности на территории страны базирования и стран, в которые экспортируются их товары и услуги; недопустимость участия в коррупционных схемах, недопустимость осуществлять мошенничество; недопустимость производства и/или реализации продукции, опасной для имущества, морали, здоровья, жизни людей, окружающей природной среды и общества в целом, а также недобросовестной рекламы и методов психологического воздействия на потребителей с целью навязать выгодное для себя решение или любую покупку; проявление социально направленных инициатив [152]. При этом социально направленные инициативы предприятия не всегда являются обязательными.

Традиционно продукцию промышленного назначения оценивают уровнем качества, а потребительские товары – методами продвижения продукции потребителю.

Крупные мировые производители промышленной продукции, которые сотрудничают со многими государствами, уделяют большое внимание уровню качества выпускаемой продукции и постоянно совершенствуют его. В распоряжении таких предприятий имеются: современное производственное оборудование, высококвалифицированный персонал, большие финансовые ресурсы и эффективные технологии производства. Для таких предприятий (которых в мире единицы) конкурентная борьба на рынках состоит в предоставлении лучшего

послепродажного сервиса. С конкурентами, у которых низкий уровень производственного оборудования и менее квалифицированный персонал, крупные производители выигрывают за счет возможности выпуска продукции лучшего качества.

Крупные промышленные предприятия располагают современной производственной базой, поэтому внедрение нового оборудования или технологий несущественно увеличивает эффективность использования оборудования. Поэтому такие предприятия стремятся инвестировать большие средства в инновации производства и в конструкции продукции. Однако не всегда удается добиться положительного результата и получить нововведения, способные реально улучшить свою продукцию. В таких случаях некоторые промышленные предприятия идут на умышленные махинации. Например, немецкий автопроизводитель Volkswagen инвестировал большую сумму средств в разработку нового экологически чистого дизельного двигателя. Но после многолетних исследований и разработок руководство предприятия пришло к выводу, что нужно инвестировать еще большую сумму и при этом никто не может гарантировать успешное завершение разработки нового двигателя. Это подтолкнуло руководителей к внедрению программного обеспечения, которое в тестировании занижало показатели вредных выбросов и позволяло автомобилям соответствовать новым экологическим стандартам США [17, 81, 99, 150, 177, 238]. Многие другие автопроизводители также безрезультатно инвестировали средства в разработку новых дизельных двигателей, но позже также использовали специальное программное обеспечение для занижения показателей вредных выбросов при тестировании автомобилей. Это указывает на то, что современный уровень развития промышленного производства не позволяет достичь определенных технических решений, и чтобы не потерять свою долю на рынке, автопроизводители вынуждены использовать махинации при продвижении своей продукции.

Одним из направлений развития крупных промышленных предприятий является снижение затрат на сырье, материалы и заработную плату. Это прослеживается, например, в желаниях некоторых европейских стран снизить стоимость закупки природного газа, частичный перенос многими предприятиями производственных мощностей в страны с более низким уровнем заработной платы или закупку комплектов в этих странах. Например, американская компания

The Boeing Company закупила у индийской компании программное обеспечение по более низким ценам для самолетов Boeing 737 MAX, в результате чего два самолета этой модели разбились, погибли более 300 пассажиров.

Промышленные предприятия Украины имеют конкурентные преимущества перед крупными предприятиями развитых стран: низкий уровень заработной платы при высоком уровне квалификации персонала, развитую производственную инфраструктуру замкнутого цикла, низкую стоимость энергоресурсов. При этом производственное оборудование на большинстве предприятий морально и физически устарело.

Ряд промышленных предприятий Украины, осуществляя масштабную модернизацию, совершают, своего рода, технологический прорыв в мир качественной и конкурентоспособной продукции, занимающей лидирующие позиции на зарубежных рынках. За счет этого повышается прибыль предприятия. Примерами таких предприятий являются ПАО "ФЭД", АО "Турбоатом" и другие предприятия, которые инвестировали средства в модернизацию и в настоящее время являются крупными экспортерами отечественной машиностроительной продукции, приносят в бюджет Украины значительные поступления валютной выручки.

Систематическое проведение мероприятий по модернизации промышленного предприятия создает базу, опираясь на которую, предприятия могут эффективно выполнять взятые на себя обязательства перед заказчиками и обществом в целом. Эффективное проведение модернизации позволяет предприятию повышать свою конкурентоспособность на рынке и тем самым повышать финансовую эффективность своей деятельности, а также снижать цену на свою продукцию.

Промышленному предприятию, которое не имеет современной производственной базы, крайне сложно придерживаться принципов социальной ответственности маркетинга.

Целью модернизации производства, в основном, является организация выпуска новой продукции или улучшение производственного процесса выпуска продукции, которая уже производится. Модернизированное оборудование выбирается под конкретную производственную задачу с определенными техническими требованиями. Часто в этот процесс подключают представителей заказчика выпускаемой продукции, чтобы согласовать с ними еще на этапе планирования тех-

нические возможности нового оборудования. Это расширяет возможности маркетинговой деятельности предприятия.

Совместная работа с представителями заказчика повышает конкурентоспособность машиностроительного предприятия за счет более тесных рабочих отношений производителя и заказчика. Руководство предприятия-производителя показывает свою открытость и желание выполнить заказ с максимальной эффективностью.

Впервые вопрос модернизации промышленных предприятий Украины остро встал в начале 2000-х годов в связи с их выходом из затянувшегося кризиса 1990-х годов и необходимостью повышения качества и конкурентоспособности выпускаемой продукции. Особенно остро стоял вопрос модернизации предприятий, производящих авиационную и другую наукоемкую продукцию. Без проведения модернизации предприятий выход этой продукции на зарубежные промышленные рынки был фактически закрыт. Даже Российская Федерация отказывалась от продукции, изготовленной на авиационных предприятиях Украины с применением устаревшего изношенного оборудования с низким качеством изготовления. В этих условиях многие предприятия начали модернизировать свое производство, оснащать его современным, но дорогостоящим зарубежным оборудованием. Однако эффект от его применения в начале был небольшой. Руководители и специалисты предприятий психологически еще не готовы были к работе с таким оборудованием, ведь речь шла о возможности существенного повышения (до 5 раз и более) производительности и, соответственно, качества при использовании современных металлорежущих станков с ЧПУ типа "обрабатывающий центр". Для этого нужны были новые научные знания о предлагаемых технологиях и их возможностях, а они в Украине отсутствовали.

В связи с этим, ГП "ХМЗ "ФЭД" совместно с ПАО "ФЭД" проявили инициативу и, начиная с 2000 года, два раза в год, в течение почти 20 лет проводили на своей территории крупные научно-практические конференции с приглашением ведущих научных школ стран Ближнего и Дальнего зарубежья. Ставилась задача совместными усилиями выйти на уровень понимания и эффективного применения в производстве современных технологий машиностроения. Для этого предприятия – организаторы конференций готовили и издавали сборники научных трудов участников конференций, распространяемые

на предприятиях и в высших учебных заведениях Украины. Было подготовлено фундаментальное научное издание в 10 томах, посвященное современным технологиям машиностроения, с участием ведущих ученых и специалистов, а также подготовлено и издано большое количество разнообразных сборников научно-технических статей, монографий, учебников и учебных пособий. Это позволило ГП "ХМЗ" ФЭД, ПАО "ФЭД" и другим ведущим промышленным предприятиям преодолеть психологичний барьер, связанный с приобретением дорогостоящего зарубежного оборудования, и выйти на реальные одно- и двухгодичные сроки его окупаемости, тогда как ранее окупаемость составляла более 10 лет. Это также позволило предприятиям на новой основе рекламировать свою продукцию, изготовленную с применением принципиально новых технологий. В результате достигнуто значительное повышение производительности труда и качества продукции, которая стала конкурентоспособной на рынках, отвечающей принципам социально ответственного маркетинга.

Проведение указанных мероприятий позволило повысить уровень научно-технических знаний ученых и специалистов Украины, дало толчок к проведению массовой модернизации производства на промышленных предприятиях. Этим ГП "ХМЗ "ФЭД" и ПАО "ФЭД" успешно выполняли функции государства по подъему промышленного производства после кризисного состояния 1990-х годов. Своими действиями ГП "ХМЗ "ФЭД" и ПАО "ФЭД" стали инициаторами социально ответственного маркетинга на промышленных предприятиях, внесли эффективные предложения по организации и проведению маркетинговой деятельности. Также эти предприятия в результате проведенной модернизации производства стали флагманами отечественного машиностроения и добились существенного повышения прибыли и благосостояния своих работников.

Кроме того, ряд ведущих специалистов этих предприятий стали кандидатами и докторами технических и экономических наук. Это значительно повысило научно-технический уровень предприятий и качество наукоемкой продукции, которая стала отвечать требованиям социально ответственного маркетинга. Поэтому одним из основных направлений социально ответственного маркетинга является развитие социально-экономической системы Украины за счет совершенствования



законодательной базы отечественных машиностроительных предприятий промышленного рынка, а также повышение уровня подготовки молодых специалистов, способных разрабатывать и внедрять инновационные технологии производства на промышленных предприятиях.

Вместе с тем, в научной литературе недостаточно внимания уделено разработке научно обоснованных методик, используя которые предприятия могут проводить модернизацию производственных мощностей. Поэтому многие промышленные предприятия и инжиниринговые фирмы (внедряющие оборудование и инструменты) самостоятельно устанавливают перечень вопросов, которые необходимо решить при модернизации производственных мощностей. При этом перечень вопросов, рассматриваемых на различных предприятиях, различен. В результате может оказаться, что приобретенный высокопроизводительный металлорежущий станок, вследствие его высокой стоимости, не позволит изготавливать конкурентоспособную машиностроительную продукцию. Или же, после приобретения более дешевого станка, предприятие не выходит на тот уровень производительности, который достигнут на ведущих предприятиях, занимающихся производством аналогичной продукции. Все это приводит к невыполнению взятых на себя обязательств по срокам заказов.

Часто на новом оборудовании используются устаревшие конструкции режущих инструментов, что не позволяет максимально реализовать высокие потенциальные возможности нового оборудования. В результате снижается экономическая эффективность оборудования, что ограничивает возможности предприятия повышать свою прибыль. При этом, как правило, на предприятиях отсутствует квалифицированный персонал для работы на новом оборудовании.

Осознавая проблему с процессом модернизации, многие предприятия начали заказывать модернизацию "под ключ" в инжиниринговых компаниях. Стоимость такой модернизации значительно выше, однако руководство машиностроительного предприятия может быть на 100 % уверено, что в назначенный срок оборудование будет запущено и эффективно выполнять производственный заказ. Каждая инжиниринговая компания имеет свою методику проведения модернизации "под ключ". Большинство компаний успешно выполняют поставленную задачу, но при этом не реализуют максимально возможный эффект для машиностроительного предприятия.

После анализа и обобщения информации о методиках проведения модернизации инжиниринговыми компаниями, в данной работе предложена усовершенствованная методика. В ней основными являются вопросы, возникающие при проведении модернизации мощностей на стадии обязательного согласования всех поставленных задач и дополнений, которые могут возникнуть в ходе обсуждения, а также на следующей стадии принятия решения о проведении модернизации. Поэтому перед началом практических работ по модернизации предприятия составляется план действий, который не требует серьезных дополнительных изменений в процессе его применения.

Предложенную методику проведения инвестиционного планирования модернизации условно можно разделить на четыре этапа (рис. 8.1). Переход на каждый следующий этап возможен после выполнения всех поставленных задач на предыдущем этапе. В процессе осуществления модернизации невозможно выборочное выполнение некоторых задач отдельно от других без соблюдения очередности.

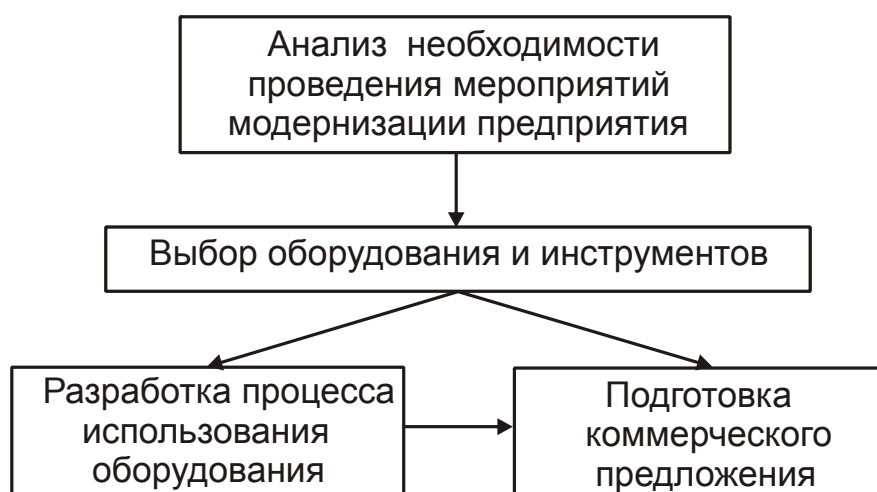


Рисунок 8.1 – Этапы планирования модернизации предприятия

Как видно на рис. 8.1, конечным этапом является подготовка коммерческого предложения и плана проведения модернизации. Подготовленные документы на четвертом этапе предназначены для руководителей промышленного предприятия, на котором будет осуществляться модернизация.

Предложенная методика планирования модернизации производственных мощностей на промышленном предприятии сводит в единый процесс все необходимые меры, чтобы обеспечить максимальную

эффективность от модернизации промышленного предприятия. Данная методика не является исчерпывающей – для каждого заказчика могут быть предложены дополнительные услуги. Однако для эффективной модернизации производственных мощностей выполнение всех рассмотренных в предложенной методике вопросов является обязательным условием.

Предложено также методический подход к разработке долгосрочного развития промышленного предприятия, основанный на необходимости постоянной модернизации производственных мощностей предприятия как основного условия получения максимально возможной прибыли предприятия при неукоснительном соблюдении принципов социально ответственного маркетинга.

Анализ деятельности ПАО "ФЭД" – одного из крупнейших машиностроительных предприятий Украины – показал, что постоянное обновление производственного оборудования и увеличение производительности труда положительно отражается на повышении прибыли предприятия и его дохода.

В результате проведенного исследования установлена взаимосвязь между принципами социально ответственного маркетинга (СОМ) предприятия, его прибылью и качеством выпускаемой продукции. Исходя из этого, целесообразно определение понятия СОМ, которое предлагает Орлов П. А. и характеристику социально-этичного маркетинга, которую предлагает Котлер Ф., принять за основу и предложить определение понятия "социально ответственный маркетинг отечественных машиностроительных предприятий промышленного рынка" со следующей формулировкой: социально-ответственный маркетинг отечественных машиностроительных предприятий промышленного рынка – направление деятельности предприятия, направленное на неукоснительное выполнение требований государственных нормативных актов в сфере обеспечения социальной ответственности на территории страны базирования и стран, в которые экспортируются их товары и услуги; снижение цены продукции; на производство и реализацию качественной продукции, которая является безопасной для морали, здоровья, жизни и имущества заказчиков, а также окружающей природной среды и общества в целом, с эффективным управлением технологией производства и обеспечением качества, необходимого заказчику; недопустимости недобросовестной рекламы и методов психо-

логического воздействия на заказчиков продукции и конечных покупателей с целью навязать им покупку, а также удовлетворение всех потребностей заказчика.

### **8.3. Эффективное управление технологиями машиностроительных предприятий – важный фактор повышения качества их продукции, социальной ответственности, увеличения прибыли и конкурентоспособности**

С развитием общества все больше уделяется внимание вопросам социальной ответственности. Как отмечалось выше, связано это с тем, что практически в каждой сфере деятельности можно обнаружить товар, который не соответствует всем предусмотренным техническим характеристикам. При проведении рекламных компаний предприятия ищут недоработки законодательства, чтобы обойти ограничения и получить конкурентное преимущество на рынке.

Анализ рынка потребительских и промышленных товаров показал, что имеются отличительные особенности, из-за которых необходимо использовать различные подходы для ведения маркетинговой деятельности предприятия на этих рынках [122]. Именно поэтому на рынке потребительских товаров существует большое количество различных контролирующих органов, которые следят за соблюдением прав покупателя. На рынке промышленных товаров количество таких контролирующих органов минимально, а рынок направлен на саморегулирование: когда производитель допускает какие-то махинации в своей деятельности, покупатели его товара, отказываясь от сотрудничества с ним, оказывают серьезное влияние на дальнейшую деятельность такого производителя. Поэтому промышленные предприятия стремятся не участвовать в различных махинациях с продвижением товара, его качеством и т.п.

Многие предприятия, понимая, что они являются частью общества и способны оказывать большое влияние на него, инвестируют значительные средства в социальные проекты. Как показано выше, одним из направлений инвестиций является социально ответственный маркетинг предприятия. Некоторые руководители в этом видят новый

способ продвижения своей продукции, а некоторые – стремятся с помощью социально ответственного маркетинга улучшить повседневную жизнь людей и оказать влияние на развитие общества.

Согласно принципам социально ответственного маркетинга, выпускаемая продукция должна соответствовать требованиям заказчика, быть безопасной в эксплуатации и не наносить ущерб окружающей среде. Ввиду специфики машиностроительного производства большинство такой продукции разрабатывается под конкретного заказчика по его техническим требованиям. Заказчик указывает в техническом задании перечень параметров, которым должна соответствовать продукция, а разработчик совместно с производителем проектируют новую продукцию или модернизируют существующий образец под требования конкретного заказчика. В большинстве случаев заказчик указывает в техническом задании набор функций, которые должно выполнять изготовленное изделие, его соответствие экологическим нормам и т.п. Задача разработчика – указать необходимый перечень параметров качества, которые следует соблюдать при производстве, чтобы продукция соответствовала требованиям заказчика. При этом весь производственный процесс предприятия-производителя должен быть рентабельным и приносить прибыль от производства продукции. На предприятии должна быть внедрена система качества ISO 9001:2015, которая позволит проводить многократную проверку качества выпускаемой продукции.

Следует отметить, что выпускаемая продукция должна соответствовать нормам сертификата ISO14001 и быть экологически безопасной в производстве и эксплуатации, а также соответствовать положению ISO26000:2010 о социальной ответственности предприятия. В основном все промышленные предприятия, которые ассоциируют себя как социально ответственное, имеют сертификаты о внедрении у себя ISO 9001:2015 и ISO 14001.

Вопросам социальной ответственности маркетинга уделяется пристальное внимание многих ученых [32, 93, 237, 256, 268]. При этом многие из них рассматривают социальную ответственность маркетинга на рынке потребительских товаров, а рынок машиностроительной продукции остается малоизученным. В научной литературе сложно найти теоретическую информацию об основных направлениях нарушений, которые используют руководители машиностроительных предприятий

при реализации своей продукции. Слабоизученным является вопрос влияния социально ответственного маркетинга на себестоимость и прибыль машиностроительного предприятия.

Проблема заключается в том, что отсутствует единый подход к управлению себестоимостью и качеством выпускаемой продукции. В классической экономической литературе предлагается оптимизировать укрупненные составляющие процесса производства. Однако при этом существует множество вариантов оптимизации составляющих укрупненного показателя, которыми занимаются уже технические специалисты и у которых иное понимание сущности оптимизации, чем у экономистов. В итоге экономисты дают задание на оптимизацию себестоимости продукции, а технологи, получая от экономистов это задание, оптимизируют в большей степени параметры процесса производства и качества продукции.

При управлении себестоимостью необходимо анализировать затраты на выполнение операций, поскольку они непосредственно связаны с производственным циклом, и управление этими затратами позволяет уменьшить или увеличить прибыль предприятия. При изменении затрат на операцию изменяется качество продукции. В этом случае необходимо знать предельный уровень качества, при превышении которого продукция будет бракованной. Реализуя такую продукцию, руководство предприятия умышленно нарушает принципы социально ответственного маркетинга, что влечет за собой возможность наложения штрафных санкций со стороны заказчика или контролирующих государственных органов и, соответственно, снижение прибыли предприятия, а в некоторых случаях и ликвидацию предприятия.

В научной литературе имеется большое количество информации об эффективных методах и моделях управления прибылью предприятия [65,182, 254]. Во многих случаях при управлении прибылью предприятия параметры качества продукции рассматриваются укрупненным показателем, который характеризует продукцию по двум критериям: качественная или некачественная. При анализе такого показателя сложно определить, какие параметры качества продукции учитываются и поэтому возможны случаи, когда в некоторых моделях управления прибылью предприятия рассматриваются в основном экономические параметры. Вследствие такого управления прибылью можно расчетами добиться положительных теоретических результатов получения

прибыли, но на практике выпускаемая продукция может не соответствовать всем предъявляемым требованиям со стороны заказчика.

При управлении затратами на операции для каждой конкретной продукции необходимо определить существенный показатель качества или интегральный показатель нескольких показателей. В машиностроении одним из основных показателей качества является шероховатость обработанной поверхности детали. Поэтому на основе разработанной математической модели технологических затрат на операции шлифования установлена взаимосвязь затрат на выполнение операции и показателя качества продукции (рис. 8.2) [122]. Затраты на выполнение операции включают: заработную плату основных рабочих с социальными отчислениями, расходный инструмент и материалы, электроэнергию на технологические нужды.

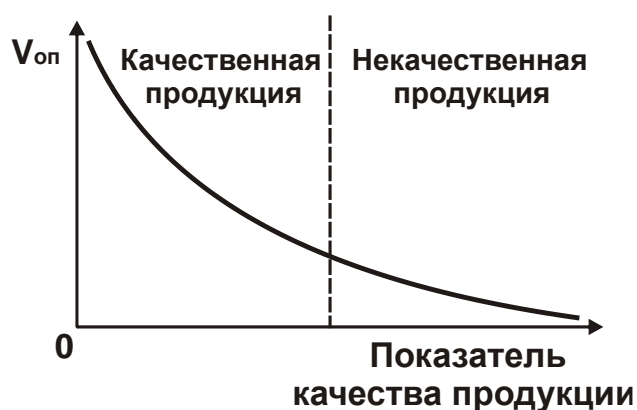


Рисунок 8.2 – Зависимость затрат на операцию  $V_{оп}$  от показателя качества продукции

На рис. 8.2 пунктирной линией показано предельное значение показателя качества продукции, превышение которого указывает на то, что продукция является бракованной. Продукция, показатель качества которой принимает значения, меньшие предельного значения (расположены слева от пунктирной линии), при реализации на рынке будет соответствовать заявленным в контракте требованиям, т.е. соответствовать принципам социально ответственного маркетинга. Продукция, показатель качества которой принимает значения, превышающие предельное значение (расположены справа от пунктирной линии), будет бракованной, т.е. не соответствовать некоторым или всем требованиям, прописанным в контракте. Следовательно, в этом случае будут не выполнены принципы социально ответственного маркетинга.

Анализируя значения показателя качества продукции, которые расположены на схеме слева от предельной границы, видно, что существует множество вариантов производства продукции (рис. 8.3).

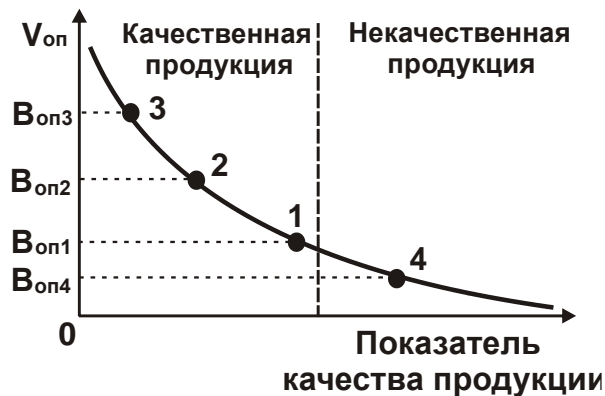


Рисунок 8.3 – Затраты на операцию  $V_{оп}$  при разном уровне показателя качества продукции

На рис. 8.3 видно, что в точке 1 продукция является качественной и соответствует наименьшим затратам. В точке 2 качество продукции выше, чем в точке 1, но и затраты на операцию выше. В точке 3 качество продукции, а, соответственно, и затраты выше, чем в точках 2 и 1. В точке 4 качество продукции ниже, чем в точках 1; 2; 3. При этом продукция может быть даже бракованной, хотя затраты меньше, чем в других точках на схеме.

Предприятие, которое приняло решение повысить качество выпускаемой продукции, т.е. перейти из состояния, определяемого точкой 1 на схеме, в состояние, определяемое точкой 2, увеличивает свои затраты. Однако одновременно с повышением качества производимой продукции произойдет повышение ее конкурентоспособности, увеличится занимаемая ею доля на рынке. Так же у предприятия появится возможность выхода со своей продукцией на зарубежные рынки и участие в активной конкурентной борьбе. Переход в состояние, определяемое точкой 3 на схеме, позволит предприятию еще больше увеличить свою конкурентоспособность на отечественных и зарубежных рынках вплоть до завоевания лидерства на них.

Получение дополнительной прибыли предприятия в результате повышения качества продукции и снижения затрат на операцию возможно за счет увеличения объемов производства и реализации продукции на новых рынках.



На рис. 8.4 показан еще один вариант повышения прибыли за счет снижения затрат при неизменном качестве или повышении качества со снижением затрат.

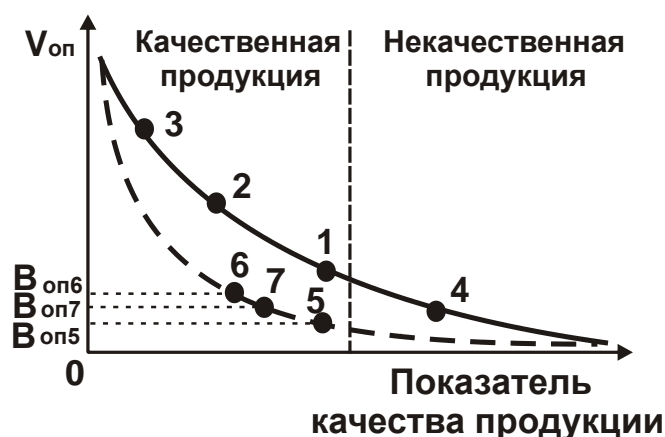


Рисунок 8.4 – Затраты на операцию  $V_{оп}$  при использовании новых технологий

Согласно рис. 8.4, при использовании новых технологий, оборудования и других технических новшеств в производстве продукции, затраты на выполнение операции снижаются при неизменном показателе качества продукции (переход из точки 1 в точку 5). В этом случае можно добиться повышения качества продукции без изменения затрат (осуществляя переход из точки 1 в точку 6) или даже снижая их (при переходе из точки 1 в точку 7). Данное решение обеспечит предприятию существенное конкурентное преимущество, что приведет к увеличению объемов реализации и, тем самым, к увеличению прибыли предприятия. Руководство предприятий, опираясь на взаимосвязь затрат на операцию и показателя качества выпускаемой продукции, может выбирать необходимые уровни качества производимой продукции и затрат, которые достигаются с приобретением нового оборудования, технологий, инструментов и т.п.

На рис. 8.5 показана взаимосвязь трех показателей: затрат на операцию, производительности труда и качества продукции. Используя эту взаимосвязь, можно определить величину затрат и производительность при определенной величине показателя качества продукции. Из анализа взаимосвязи производительности труда и качества продукции, вытекает, что при достижении высоких показателей производительности труда качество продукции значительно ухудшается.

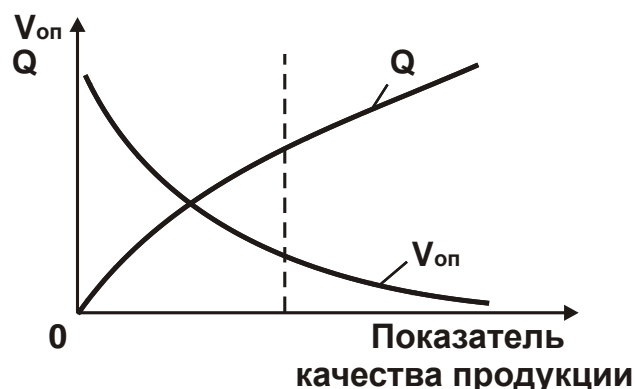


Рисунок 8.5 – Взаимосвязь затрат на операцию  $V_{оп}$ , производительности труда  $Q$  и показателя качества продукции

Социально ответственный маркетинг выступает в роли ограничителя, согласно которому производительность труда не может быть выше определенной величины, так как превышение ее приводит к выпуску бракованной продукции (рис. 8.5). В таких случаях у руководителя предприятия возникают три альтернативных решения:

- работать с минимальной производительностью, но при этом соблюдать принципы социально ответственного маркетинга и выпускать качественную продукцию;

- повышать производительность и тем самым снижать затраты на выполнение операции для обеспечения возможности конкурировать на рынке за счет более низкой цены или получения сверхприбыли, нарушая при этом принципы социально ответственного маркетинга, реализуя бракованную продукцию;

- внедрять новые технологии в производство, позволяющие увеличить производительность без снижения качества продукции (рис. 8.6).

Согласно рис. 8.6, внедряя в производство новые технологии, у руководителя предприятия появляется возможность увеличения производительности труда без ухудшения качества продукции. Это связано со значительным изменением структуры затрат на выпуск продукции по новой технологии. Затраты на выпуск дополнительной продукции за счет повышения производительности труда включают затраты на:

- сырье и материалы,
- расходные инструменты,
- электроэнергию, используемую на технологические цели,
- изменение амортизации производственного оборудования на всю партию продукции.

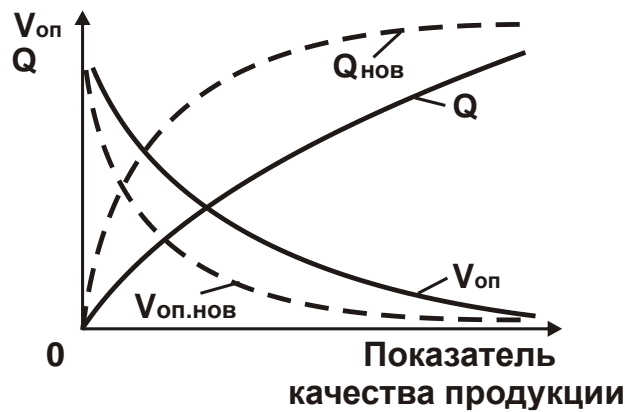


Рисунок 8.6 – Взаимосвязь старой и новой технологий производства относительно качества продукции ( $V_{оп}$  – затраты на операцию,  $Q$  – производительность труда)

Постоянные затраты учитываются в себестоимости партии продукции, изготавливаемой по старой технологии. Затраты на заработную плату с учетом социальных отчислений (если не изменяется тарифная ставка рабочего) будут одинаковы для старой партии продукции и для новой партии продукции, увеличенной за счет повышения производительности труда.

Если, например, новое оборудование и технология позволяют увеличить производительность на 100 %, то предприятие сможет выпускать за определенное время не одно изделие, а два изделия. Затраты на производство второго изделия будут равны сумме стоимости сырья, расходного инструмента, дополнительно использованной электроэнергии, дополнительной амортизации оборудования. Остальные постоянные затраты и затраты на фонд оплаты труда основных рабочих будут определять экономический эффект и увеличат валовую прибыль предприятия (рис. 8.7).

Основным требованием для окупаемости данной модернизации является возможность заключения новых контрактов на производство продукции, увеличение доли рынка и выход на новые зарубежные рынки. С этих позиций можно объяснить эффективность применения в настоящее время на промышленных предприятиях Украины нового высокопроизводительного оборудования производства зарубежных фирм. Как показывает практика, его применение позволяет увеличить производительность труда до 10 раз при обеспечении высокого качества изготавливаемой продукции и, соответственно, при соблюдении принципов социально ответственного маркетинга. Это приводит к зна-

чительному повышению прибыли предприятия. Добиться такого же эффективного результата другими маркетинговыми методами для машиностроительных предприятий Украины фактически невозможно.

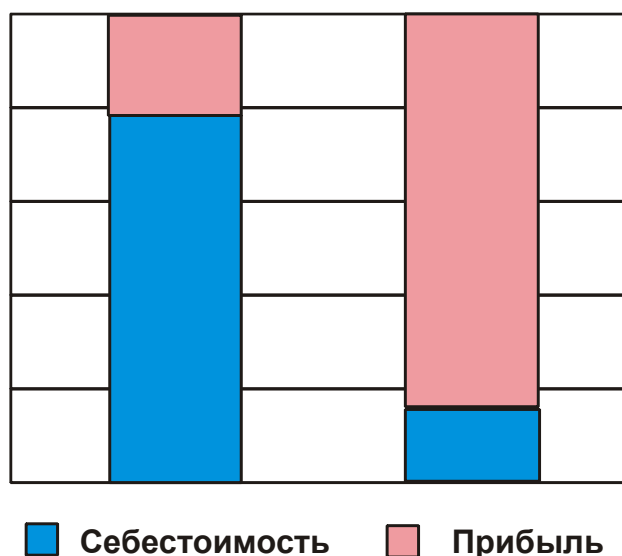


Рисунок 8.7 – Структура стоимости продукции при внедрении новой технологии производства

Несмотря на достаточно высокую стоимость указанного высокопроизводительного оборудования иностранного производства, срок его окупаемости относительно небольшой.

Например, в ЧАО "Свет шахтера" (г. Харьков) срок окупаемости приобретенного современного зубошлифовального станка с ЧПУ модели HOFFLERRAPID 1250 (производство Германии) составил всего 6 месяцев в связи с достигнутым увеличением производительности более чем в 5 раз и высоким качеством изготавливаемой продукции. При этом приобретенный станок также заменил работу 4-х зубошлифовальных станков устаревшей конструкции, применявшихся ранее на предприятии.

Поэтому в настоящее время применение иностранного оборудования на машиностроительных предприятиях Украины является важнейшим условием интенсификации производства и создания высококачественной конкурентоспособной продукции, отвечающей принципам социально ответственного маркетинга, способной вывести предприятия из кризисного состояния и добиться их безубыточной деятельности.

#### **8.4. Социально ответственный маркетинг в металлообработке и его влияние на прибыль предприятия**

Одним из основных направлений социальной ответственности бизнеса, как показано выше, является его маркетинговая деятельность (социально-ответственный маркетинг – СОМ). Основная задача СОМ – обеспечение потребителей качественной и безопасной продукцией. Рассматривая различные отрасли, следует выделить машиностроение, которое способно оказать наиболее негативное влияние на людей и окружающую среду в случае эксплуатации некачественной машиностроительной продукции. Практически любая техногенная катастрофа или обычная авария напрямую или косвенно связаны с эксплуатацией некачественной машиностроительной продукции. Поэтому соблюдение принципов СОМ в машиностроении позволило сократить количество аварий, связанных с эксплуатацией машиностроительной продукции. В настоящее время аварии происходят, но чаще связаны не с работой простых элементов, а с высокотехнологичными технологиями, многие аварии из которых еще мало изучены [123].

При производстве машиностроительных деталей широко используются методы металлообработки. Разработка современных технологий обработки металлов и соблюдение последовательности в выполнении технологических операций позволяет предприятиям производить высококачественную машиностроительную продукцию, тем самым повышая конкурентоспособность товара и предприятия в целом. Потребители этой продукции (заказчики) получают товар, который максимально соответствует их требованиям.

Согласно многочисленным анализам рынка, машиностроительное предприятие, которое во главе своей маркетинговой деятельности ставит соблюдение принципов СОМ, и как результат этого производит высококачественную продукцию – получает максимально выгодные для себя заказы и тем самым повышает финансовые результаты предприятия.

Из этого следует, что СОМ играет важную роль в процессе управления прибылью предприятия. Поэтому многие руководители машиностроительных предприятий, осознавая роль СОМ, стремятся к повышению качества своей продукции, и, в особенности, улучшению

процессов металлообработки как одного из главных факторов повышения качества выпускаемой продукции.

В научной литературе многими авторами рассматривается вопрос о социальной ответственности субъектов хозяйствования и, в особенности, социальной ответственности маркетинга предприятия. Среди них работы: Р. Рейденбаха, П. Робина, Ф. Котлера, К. Л. Келлера, Ж.-Ж. Ламбена, Р. А. Фатхутдинова, В. Руделиуса, Е. М. Азарян, А. Ф. Павленко, Д. И. Акимова, М. И. Белявцева, М. А. Окландера, П. А. Орлова и многих других известных отечественных и зарубежных авторов [3, 23, 92, 96, 104, 153, 261, 266]. В основном в указанных работах рассматриваются общие ситуации социальной ответственности маркетинга предприятия с минимальным обоснованием причин, из-за которых руководители предприятий идут на обман покупателей. Поэтому для обоснования этих причин необходимо углубляться в проблемы производственной деятельности, рассматривая на первом этапе условия формирования первоначальных затрат предприятия – производственные операции [155].

Как отмечалось выше, оптимизация затрат на металлообработку в машиностроении способна оказать значительное влияние на укрупненные показатели затрат предприятия, и в результате повысить прибыль предприятия. К сожалению, в процессе оптимизации затрат на выполнение конкретной операции основное внимание уделяется выполнению указанных технических требований в чертеже изделия. При этом недостаточно рассматривают влияние условий оптимизации затрат на металлообработку на конкурентоспособность продукции и величину прибыли предприятия в целом. Также недостаточно уделяют внимание вопросу негативного влияния изготавливаемой продукции на окружающую среду и общество в целом в процессе эксплуатации этой продукции. Поэтому весьма актуальны вопросы дальнейшего развития теоретико-методических подходов и практических рекомендаций по повышению качества управления прибылью машиностроительного предприятия благодаря социально-ответственному маркетингу и усилению конкурентных позиций предприятия.

Металлообработку можно условно разделить на три этапа: кузнечно-заготовительную, лезвийную и доводочную. Кузнечно-заготовительная обработка формирует предварительную форму и мало влияет на конечное качество детали. На этапах лезвийной и доводочной об-

работки формируется окончательное качество детали. В некоторых случаях доводочные операции (шлифование) не требуются.

Сравнивая себестоимости лезвийной и доводочной обработок, установлено, что лезвийная обработка имеет намного меньшую себестоимость за счет более высокой производительности. Но при этом характеризуется относительно низким качеством обработанных поверхностей и может быть окончательной операцией для ограниченного перечня деталей, не требующих высокого качества. Для деталей, в которых используются доводочные операции, в частности, шлифование, резко повышается себестоимость производства, что в итоге снижает прибыль предприятия.

Одним из главных показателей качества при металлообработке является шероховатость обработанной поверхности, т.е. наличие микронеровностей на поверхности детали. На рис. 8.8 приведена расчетная схема формирования микронеровностей на поверхности детали при точении [27].

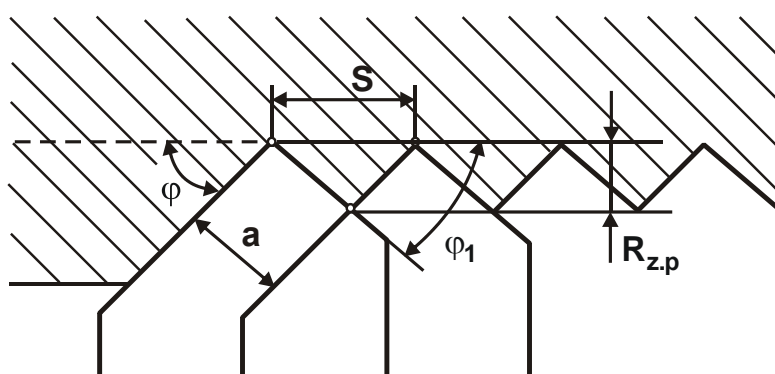


Рисунок 8.8 – Расчетная схема формирования микронеровностей на поверхности детали при точении

Анализируя математическую модель шероховатости обработанной поверхности (8.1) в процессе точения [27], преобразуем ее для получения оптимальной величины подачи  $S$  инструмента:

$$R_{z.p} = \frac{S \cdot \sin \varphi \cdot \sin \varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)}; \quad (8.1)$$

$$S = \frac{R_{z.p} \cdot \sin(\varphi + \varphi_1)}{\sin \varphi \cdot \sin \varphi_1}, \quad (8.2)$$

где  $\varphi$ ,  $\varphi_1$  – главный и вспомогательный углы резца в плане, градус.

Подставляя зависимость (8.2) в классическую зависимость производительности обработки  $Q = S \cdot t \cdot V$  при точении, получено:

$$Q = S \cdot t \cdot V = \frac{R_{z.p} \cdot t \cdot V \cdot \sin(\varphi + \varphi_1)}{\sin \varphi \cdot \sin \varphi_1} = R_{z.p} \cdot t \cdot V \cdot \frac{(\sin \varphi \cdot \cos \varphi_1 + \cos \varphi \cdot \sin \varphi_1)}{\sin \varphi \cdot \sin \varphi_1} =$$

$$= R_{z.p} \cdot t \cdot V \cdot \left( \frac{\cos \varphi_1}{\sin \varphi_1} + \frac{\cos \varphi}{\sin \varphi} \right) = \frac{R_{z.p} \cdot t \cdot V}{\operatorname{tg} \varphi + \operatorname{tg} \varphi_1}, \quad (8.3)$$

где  $t$  – глубина резания, м;  $V$  – скорость резания, м/с.

Из зависимости (8.3) следует, что с увеличением углов  $\varphi$  и  $\varphi_1$  производительность обработки уменьшается. Это является ограничивающим фактором процесса точения и требует снижения производительности обработки при использовании инструмента советского образца, имеющего заостренную режущую кромку резца. Или же можно повысить производительность обработки путем увеличения подачи  $S$ , но при этом из-за увеличения параметра шероховатости обработанной поверхности  $R_{z.p}$  будет снижаться качество детали.

Решением проблемы одновременного повышения производительности и качества обработки при точении стало применение режущих инструментов с закругленной режущей кромкой. В настоящее время зарубежный металлорежущий лезвийный инструмент в основном имеет закругленные режущие кромки. В результате его применения предприятиям удалось в несколько раз повысить производительность обработки при одновременном повышении качества обработанной поверхности. Все чаще предприятия начали отказываться от операции шлифования, поскольку уже после операции точения деталь имеет необходимый уровень качества.

Предприятия, которые до настоящего времени используют устаревшие конструкции режущих лезвийных инструментов, ограничены в осуществлении высокопроизводительной обработки. А предприятия, которые используют устаревший режущий лезвийный инструмент, да еще и стремятся максимально повысить производительность обработки, заведомо производят бракованную продукцию, не отвечающую требованиям по качеству. Это явное нарушение социально-ответственного маркетинга.

На рис. 8.9 приведены схемы точения инструментом с острой кромкой (а) и закругленной кромкой (б).



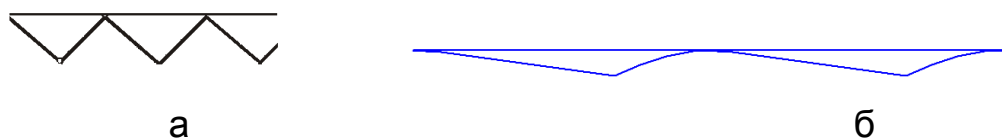


Рисунок 8.9 – Схема микронеровностей поверхности после операций точения

Как видно из рис. 8.9, при использовании инструмента с закругленной кромкой величина микронеровностей поверхности меньше, что позволяет использовать более высокие скорости резания и повысить производительность обработки.

Одним из новшеств в производстве металлорежущих инструментов является инструмент с геометрией Wiper (рис. 8.10), где на сменных металлорежущих пластинах вершины режущих частей созданы из нескольких закруглений, что резко уменьшает величину микронеровностей на обработанной поверхности.

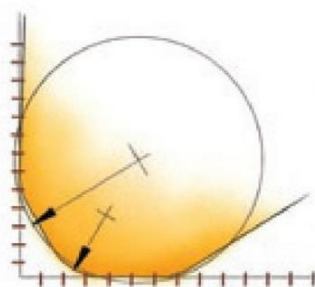


Рисунок 8.10 – Схема вершины режущей части инструмента по технологии Wiper

Предприятия, которые используют режущий инструмент с геометрией Wiper на чистовых операциях точения и фрезерования, значительно повышают качество выпускаемой продукции и кратно увеличивают производительность обработки.

Согласно практическим данным, современный режущий лезвийный инструмент более дорогостоящий по сравнению с инструментом советского образца, но при этом он во много раз эффективнее, так как позволяет уменьшить количество бракованных деталей, снизить потребление инструмента и повысить производительность обработки. Все это приводит к снижению затрат на производство и, тем самым, повышает прибыль предприятия. Заказчик получает продукцию более высокого качества с меньшим сроком изготовления и у него появляет-

ся возможность вести переговоры с производителем о снижении цены покупаемой продукции. Но, главное, заказчик получает продукцию высочайшего качества, в которой до минимума сведена возможность поломки и аварий в процессе эксплуатации.

Для получения высокого качества обрабатываемых деталей, которые в изделии обеспечивают максимальную надежность в эксплуатации, экологичность и т.п., до сих пор существует необходимость в применении операций шлифования, которые увеличивают себестоимость изготовления детали и, тем самым, снижают прибыль предприятия. Поэтому уменьшение затрат на операциях шлифования позволяет предприятию получать дополнительную прибыль.

Рассматривая структуру затрат при шлифовании, можно выделить несколько статей затрат с максимальным удельным весом – это заработная плата рабочего и социальные отчисления, амортизация оборудования и приспособлений. При этом затраты на электроэнергию и режущий инструмент имеют относительно небольшой удельный вес. Следовательно, для снижения затрат на процесс шлифования (и, соответственно, для увеличения прибыли предприятия) необходимо снижать затраты на заработную плату и социальные отчисления, на амортизацию оборудования, чего можно добиться за счет повышения производительности обработки.

Для установления условий уменьшения затрат при шлифовании (технологической себестоимости обработки  $St$ ) с учетом ограничения по основным параметрам качества обрабатываемых поверхностей: параметру шероховатости поверхности  $R_a$ , температуре резания  $\theta$  и погрешности обработки  $\delta$  следует использовать их аналитические зависимости [140]:

$$R_a = 0,2 \cdot 5 \sqrt{\frac{10^5 \cdot \pi^2 \cdot \bar{X}^6 \cdot V_{дет}^2}{m^2 \cdot V_{кр}^2 \cdot R_{кр}}}, \quad (8.4)$$

где  $\bar{X}$  – зернистость круга, м;  $m$  – объемная концентрация зерен в круге;  $V_{дет}$ ,  $V_{кр}$  – скорости детали и круга, м/с;  $R_{кр}$  – радиус круга, м.

$$\theta = \frac{\sigma}{c_m \cdot \rho} \cdot \sqrt{\frac{Q}{a \cdot B}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{R_{кр}}}, \quad (8.5)$$

где  $\sigma$  – энергоемкость обработки, Н/м<sup>2</sup>;  $c_m$  – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·град);  $\rho$  – плотность обрабатыва-

емого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $a = \lambda / (c_m \cdot \rho)$  – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·град);  $Q = B \cdot t \cdot V_{дет}$  – производительность обработки, м<sup>3</sup>/с;  $B$  – ширина шлифовального круга, м;  $t$  – глубина шлифования, м.

$$\delta = \frac{\sigma \cdot Q}{c \cdot K_{рез} \cdot V_{кр}}, \quad (8.6)$$

где  $c$  – жесткость технологической системы, Н/м;  $K_{рез} = P_z / P_y$  – коэффициент резания;  $P_y$ ,  $P_z$  – радиальная и тангенциальная составляющие силы резания, Н.

Рассматривая одну (основную) статью затрат, связанную с заработной платой рабочего, технологическая себестоимость обработки  $Ст$  может быть аналитически представлена:

$$Ст = A \cdot \frac{\vartheta}{Q}, \quad (8.7)$$

где  $A$  – тарифная ставка рабочего, грн.;  $\vartheta$  – объем металла, удаляемого с детали в процессе ее обработки, м<sup>3</sup>.

Как видно, увеличение производительности обработки  $Q$  приводит к пропорциональному уменьшению  $Ст$ . Разрешая зависимости (8.4) и (8.5) относительно параметров режима резания  $V_{дет}$  и  $t$ , входящих в зависимость для определения обработки  $Q = B \cdot t \cdot V_{дет}$ , имеем:

$$V_{дет} = \frac{m \cdot V_{кр} \cdot R_{кр}^{0,5}}{\pi \cdot \bar{X}^3} \cdot \left( \frac{R_a}{2} \right)^{2,5}; \quad (8.8)$$

$$t = \left( \theta \cdot \frac{c_m \cdot \rho}{\sigma} \right)^{1,3} \cdot \left[ \frac{\pi^2 \cdot a^2 \cdot \bar{X}^6}{m^2 \cdot V_{кр}^2} \cdot \left( \frac{2}{R_a} \right)^5 \right]^{0,3}. \quad (8.9)$$

Тогда с учетом двух ограничивающих факторов  $\theta$  и  $R_a$  производительность обработки  $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$  определится:

$$Q = B \cdot \left( \theta \cdot \frac{c_m \cdot \rho}{\sigma} \right)^{1,3} \cdot \left[ \frac{a^2 \cdot m \cdot V_{кр} \cdot R_{кр}^{1,5}}{\pi \cdot \bar{X}^3} \cdot \left( \frac{R_a}{2} \right)^{2,5} \right]^{0,3}. \quad (8.10)$$

Как видно, увеличить производительность обработки  $Q$  можно увеличением параметров  $B$ ,  $\theta$ ,  $R_a$ ,  $R_{кр}$ ,  $m$ ,  $V_{кр}$  и уменьшением параметров  $\sigma$  и  $\bar{X}$ .

Анализ зависимости (8.6) показывает, что производительность обработки  $Q$  с учетом ограничения по погрешности обработки  $\delta$  не зависит от скорости детали  $V_{дет}$  и глубины шлифования  $t$ , а определяется параметрами  $\delta$ ,  $c$ ,  $K_{рез}$ ,  $V_{кр}$  и  $\sigma$ . Поэтому заданное значение  $\delta$  будет достигаться при условии, если производительность обработки  $Q$ , определяемая зависимостью (8.6), будет больше производительности обработки  $Q$ , определяемой зависимостью (8.10). В случае невыполнения этого условия, необходимо в зависимости (8.6) увеличить параметры  $c$ ,  $K_{рез}$ ,  $V_{кр}$  и уменьшить  $\sigma$ . Если же это невыполнимо, то следует наоборот – уменьшать производительность обработки  $Q$ , определяемую зависимостью (8.10), путем уменьшения параметров  $B$ ,  $m$ ,  $R_{кр}$  и увеличения  $\bar{X}$ . При выполнении этого условия обеспечиваются три заданные параметры качества обработки:  $\delta$ ,  $\theta$ ,  $R_a$ .

Подставляя зависимость (8.10) в зависимость (8.7), можно определить минимально возможную технологическую себестоимость обработки  $Ст$ :

$$Ст = A \cdot \frac{\vartheta}{B} \cdot \left( \frac{\sigma}{c_m \cdot \rho \cdot \theta} \right)^{1,3} \cdot \left[ \frac{\pi \cdot \bar{X}^3}{a^2 \cdot m \cdot V_{кр} \cdot R_{кр}^{1,5}} \cdot \left( \frac{2}{R_a} \right)^{2,5} \right]^{0,3}. \quad (8.11)$$

Предложенная математическая модель при заданных параметрах качества позволяет определить, какие требуются технологические характеристики оборудования или инструментов для достижения определенной технологической себестоимости. Исходя из этого, можно сделать вывод: сможет ли предприятие-производитель изготовить конкретную деталь на имеющемся оборудовании с определенными параметрами качества и при этом обеспечить заданную себестоимость изготовления. В свою очередь, из полученной технологической себестоимости определяется полная себестоимость детали и при ее сравнении с ценой, заложенной в контракте, можно оценить, насколько эффективно изготовление этой детали на имеющемся оборудовании или же оно убыточно. В случае получения убытка при изготовлении этой детали у предприятия имеется три варианта решения вопроса ее изготовления: отказаться от убыточного контракта, использовать разные варианты махинаций, позволяющие снизить себестоимость изготовления детали, с помощью предло-

женной математической модели (8.11) скорректировать технические показатели оборудования и инструментов для снижения технологической себестоимости при постоянных параметрах качества.

Используя предложенный теоретический подход, предприятие-производитель еще на этапе составления и разработки технической документации для участия в тендере на изготовление продукции может проанализировать свои возможности и принять решение о дальнейшем участии в тендере с целью получения заказа и, соответственно, прибыли. В этом случае у руководства предприятия не возникнут проблемы с невозможностью выполнения заказа согласно требованиям контракта уже после его подписания. Если у предприятия недостаточно оборудования для выполнения конкретного заказа, то еще на этапе подготовки к участию в тендере предприятие формирует список оборудования и инструментов, которые необходимо приобрести для успешного выполнения условий тендера, получения минимальной себестоимости изготовления, которая ниже цены, заявленной в контракте, что позволит производителю получить прибыль.

В связи с тем, что в математической модели (8.11) большое количество переменных, можно выбрать необходимое оборудование и инструменты, которые будут удовлетворять всем параметрам, входящим в эту математическую модель. Это позволит минимизировать случаи, когда уже в процессе эксплуатации оборудования обнаруживается невозможность выполнения некоторых функций, что приводит к сбою производственного процесса, нарушению условий контракта, а также невозможности получения прибыли.

## **8.5. Инструментальный менеджмент**

В настоящее время все больше компаний применяют у себя принцип Just In Time (JIT). Это наиболее распространенная в мире логистическая концепция, при которой перемещение изделия в процессе производства и поставки от поставщиков тщательно спланированы во времени таким образом, что на каждом этапе процесса следующая партия прибывает для обработки точно в тот момент, когда предыдущая партия завершена. Одно из неперенных условий успешной реализации этого подхода на промышленных предприятиях – применение эффективного инструментального менеджмента [77, 108, 120].

Инструментальный менеджмент (Tool Management) – это комплекс процессов, направленных на решение вопросов выбора инструмента, организации его учета, закупок и восстановления инструмента, его настройки и эксплуатации, а также анализа затрат на инструмент [43]. Задачи инструментального менеджмента можно разделить как минимум на 4 блока: логистика; выбор формы и геометрии инструмента; стратегия обработки; оптимизация обработки.

Все 4 блока задач связаны между собой. Для достижения положительного результата невозможно пренебречь хотя бы одним блоком задач.

Первый блок задач "Логистика" занимается выстраиванием схем доставки от поставщика к рабочему месту (станку) инструмента. Это определение поставщика, выработка ценовой политики, способов доставки, определение необходимых партий инструментов, способов заказа инструментов, перемещение внутри предприятия.

Второй блок задач – мероприятия технического характера, которые определяют условия обработки и по этим условиям выбирается инструмент. Осуществить эти мероприятия могут как специалисты предприятия, так и специалисты поставщика, которым были направлены условия обработки.

Третий блок задач – написание управляющей программы для станка с ЧПУ. Определение наиболее эффективной траектории движения инструмента (или рабочего станка) при обработке, комбинирование нескольких операций и переходов, т.е. определение технологии обработки, которая осуществляется за наименьшее время с применением наименьшего количества средств, оборудования и рабочих.

Четвертый блок задач – выявление наиболее эффективных условий обработки и данных, которые необходимы для принятия решений при выполнении трех первых блоков задач. Эти задачи являются наиболее сложными, поскольку для их решения необходимы математические расчеты с большим количеством переменных. Также сложность заключается в том, что часть этих переменных неизвестна.

Например, математический расчет режимов резания для зарубежного инструмента невозможен, так как многие их характеристики неизвестны. Такие характеристики известны для традиционных отечественных инструментов, разработанных почти полвека назад, и не соответствуют новым зарубежным инструментам. В итоге не удается ма-

тематически рассчитать (с высокой степенью точности) режимы резания, силу резания и стойкость инструмента.

Поэтому режимы резания, в большинстве случаев, устанавливаются произвольно, исходя из опыта технолога. Стойкость инструмента до окончания обработки неизвестна. Все это снижает эффективность обработки деталей и, естественно, работы всего предприятия.

Отсутствуют четкие критерии, определяющие эффективность выбранных режимов резания, стойкости инструмента. Классическая технология машиностроения, которая является основой для выбора режимов резания, предлагает следующие критерии эффективности: высокое качество обработанной поверхности детали и/или уменьшение машинного времени обработки.

Рассматривая первый критерий "качество", можно сделать вывод, что этот показатель должен быть не критерием, а ограничением. Если конструкторская документация предусматривает получение невысокого уровня шероховатости обработанной поверхности, например,  $R_z=20$  мкм, то не следует стремиться уменьшать шероховатость, пренебрегая другими показателями процесса обработки.

Второй критерий – машинное время обработки – предусматривает его максимально возможное снижение. Однако при этом не рассматривается влияние двух указанных критериев на себестоимость обработки. Неизвестно, до каких пределов можно снижать машинное время, чтобы выполнить технические требования к обработке детали и не выйти за рамки допустимого уровня качества. Необходимо учитывать рациональное соотношение между величиной машинного времени на обработку, получаемое качество и себестоимость этой операции.

Решение этих и ему подобных вопросов возможно за счет более тщательной подготовки нового производства или оптимизации существующего производства на основе применения математических моделей, которые описывают процесс работы инструмента с технической стороны и учитывают влияние окружающей среды: макроэкономические показатели и организацию производства на предприятии.

Примером математической модели, которая описывает экономические показатели, может быть уравнение расчета оптимальной стойкости инструмента, где учитывается курс валюты, который непосредственно влияет на закупочную цену инструмента, уровень заработной платы рабочего. Найденная таким путем стойкость инструмента соот-

ветствует минимальной себестоимости обработки, которая принимает параболический вид (рис. 8.11).

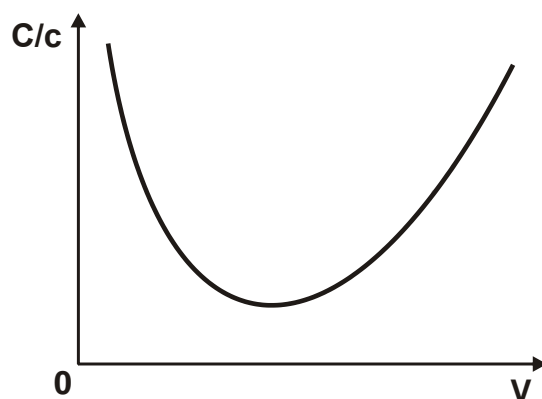


Рисунок 8.11 – Зависимость себестоимости от скорости резания

Если же оказывается, что реальная стойкость инструмента выше или ниже стойкости, установленной на основе этого уравнения, то целесообразно произвести корректировку режимов резания, что позволит выйти на требуемый уровень стойкости инструмента.

За счет разного влияния скорости резания и подачи на стойкость инструмента можно добиться постоянства или повышения производительности обработки.

В табл. 8.1 – табл. 8.3 приведены результаты корректировки режимов резания на основании применения математической модели.

Таблица 8.1 – Результаты испытания

Тип режимов резания	Скорость резания, м/мин	Подача, мм/об	Глубина резания, мм	Производительность, мм/мин	Стойкость, мин
Базовый	142	0,22	1,5	83,6	16,72
Испытываемый	80	0,38	1,5	83,6	37,21

Испытания производились на станке СТХ-310 с применением японского инструмента Tungaloy CNMG 120408 SA AN120, обрабатываемый материал – сталь 12Х18Н10Т. В результате установлено, что производительность обработки остается неизменной (табл. 8.1), а нагрузка на шпиндель станка и качество обработанной поверхности принимают допустимые значения. Стойкость инструмента увеличилась на 122,5 %, что позволило предприятию получить дополнительный экономический эффект.



Таблица 8.2 – Результаты испытания

Тип режимов резания	Скорость резания, м/мин	Подача, мм/об.	Глубина резания, мм	Производительность, мм/мин	Износ по задней поверхности, мм
Базовый	180	0,12	1,0	21,6	0,19
Испытываемый 1	144	0,15	1,0	20,88	0,12
Испытываемый 2	216	0,10	1,0	20,76	0,22

Следующие испытания производилось на станке Doosan Lynx 220 LM с применением инструмента TaeguTec DNMG 130504 FG TT8115 (Южная Корея), обрабатываемый материал – сталь 40X, время обработки – 30 мин.

В результате установлено, что производительность обработки фактически не изменилась (табл. 8.2), а нагрузка на шпиндель станка и качество обработанной поверхности остались в допустимых пределах. Износ инструмента при этом уменьшился на 36,8 %, т.е. предприятие получило дополнительный экономический эффект.

Таблица 8.3 – Результаты испытания

Тип режимов резания	Частота вращения шпинделя, об/мин	Подача, мм/об.	Производительность, мм/мин	Стойкость, дет.
Базовый	800	0,30	240	85
Испытуемый	700	0,35	245	180

Также проводились испытания на станке 16K20T1 с применением инструмента Pramet CNMG 120408E RM, обрабатываемый материал – сталь 20X3МВФ-Ш. В этом случае производительность обработки увеличилась на 2 % (табл. 8.3), а нагрузка на шпиндель станка и качество обработанной поверхности остались в допустимых пределах. Стойкость инструмента повысилась на 111,7 %, что позволило предприятию получить дополнительный экономический эффект. Приведенные результаты показывают, что совершенствование технологий производства машиностроительной продукции позволяет добиться экономического эффекта, снижая при этом затраты на обработку деталей.

Совершенствование процесса металлообработки на основе внедрения новых прогрессивных инструментов позволяет получать

экономический эффект за счет увеличения производительности и стойкости инструмента, однако этот метод совершенствования технологий производства требует дополнительных капитальных вложений.

Использование инструментального менеджмента в производственном процессе на предприятии повышает конкурентоспособность предприятия и выпускаемой продукции. Потребитель продукции приобретает товар высокого качества, безопасный в использовании и не причиняющий вреда окружающей среде. Постоянное совершенствование технологий обработки деталей открывает новые возможности выполнения сложных видов обработки с низкой себестоимостью, что повышает конкурентоспособность продукции на внутреннем и мировом рынках, исключает использование различных махинаций при изготовлении и продвижении продукции на рынке.

Внедрение инструментального менеджмента на машиностроительных предприятиях позволило решить несколько важных проблем: цифровизацию инструментального хозяйства предприятия, что обеспечило своевременное обеспечение рабочего места необходимым инструментом; расчет рациональных режимов резания для конкретного инструмента с учетом максимальной производительности, требуемого качества обработки детали и минимальной себестоимости. Путем применения инструментального менеджмента может быть решена проблема стратегического управления машиностроительным предприятием – за счет своевременного обеспечения рабочего места необходимым инструментом обработка деталей осуществляется в соответствии с утвержденным планом выпуска деталей, что приводит к соблюдению сроков отгрузки готовой продукции заказчику. Выполнение требований контракта позволяет предприятию быть социально-ответственным перед своими сотрудниками, клиентами, государством и обществом в целом, повышая свою репутацию и улучшая финансовые показатели своей деятельности.

## **Выводы**

1. Внутригосударственные и мировые кризисы, которые затронули все предприятия Украины, не позволяли большинству из них в течение последних 30 лет иметь постоянную загрузку производственных мощностей. В результате этого используемое оборудование, техноло-

гии и квалификация специалистов с каждым годом ухудшались, а разрыв между отечественными и зарубежными машиностроительными предприятиями по уровню качества и конкурентоспособности выпускаемой продукции увеличивался. Это приводило к невыполнению принципов социально ответственного маркетинга и ухудшению продвижения продукции на отечественных и зарубежных рынках. Установлено, что для эффективной конкурентной борьбы отечественных предприятий на рынках при соблюдении принципов социально ответственного маркетинга необходимо максимально активно проводить мероприятия по модернизации производственных мощностей. Приведенные примеры модернизации на некоторых отечественных машиностроительных предприятиях показали, что приобретение современного оборудования и обучение персонала позволяют в кратчайшие сроки вывести предприятие на лидирующие позиции зарубежных рынков и оказать активную конкуренцию крупным корпорациям за счет высокого качества продукции и низкой цены, которая достигается благодаря снижению себестоимости производства. При этом унификация процесса проведения модернизации предприятия позволит руководителям предприятий не совершать ошибок в процессе планирования и проведения модернизации, не нарушать сроки введения новых производственных мощностей, и, как следствие, выполнять заключенные контракты с заказчиками относительно установленных сроков и с необходимым качеством выпускаемой продукции, с обеспечением прибыли предприятия.

2. Предложена модель управления прибылью машиностроительного предприятия на основе выполнения принципов социально ответственного маркетинга. Установлено, что основой соблюдения принципов социально ответственного маркетинга машиностроительного предприятия является обеспечение требуемого качества выпускаемой продукции за счет неукоснительного выполнения технических и других требований заказчика или нормативной базы. Для реализации этого условия в работе предложено качество выпускаемой продукции оценивать показателем качества выпускаемой продукции, охватывающим диапазоны "качественная продукция" и "некачественная продукция". Показано, что в диапазоне "качественная продукция" при достижении предельного значения показателя качества выпускаемой продукции затраты на производство принимают наименьшее значение, а произ-

водительность – наибольшее значение. Исходя из этого сделан вывод о том, что при обеспечении снижения затрат на производство и увеличении производительности при заданном значении показателя качества выпускаемой продукции, которое соответствует условиям соблюдения принципов социально ответственного маркетинга, появляется возможность создания конкурентоспособной продукции и управления прибылью машиностроительного предприятия. Установлено, что основой повышения прибыли машиностроительного предприятия, является применение новых технологических и инжиниринговых решений, позволяющих повысить производительность и снизить себестоимость производства при обеспечении высокого качества выпускаемой продукции. Показано, что, используя принципы социально ответственного маркетинга как ограничительного фактора качества выпускаемой продукции, предприятие способно обеспечить максимальный уровень прибыли путем повышения своей конкурентоспособности и добиться увеличения доли на рынке, а также выйти на новые зарубежные рынки.

3. Рассмотрены основные преимущества социально-ответственного маркетинга для машиностроительных предприятий. Выявлены два направления повышения качества машиностроительной продукции, позволяющие предприятию увеличить свои финансовые результаты. Рассматривая проблемы повышения качества на операциях лезвийной обработки, показано, что из-за устаревших конструкций лезвийных инструментов на предприятии производят обработку с пониженной производительностью или же с низким уровнем качества, заведомо изготавливая бракованные изделия. Поэтому в работе предложены математические модели операции шлифования, применение которых позволяет на этапе планирования оценить достигаемые уровни качества деталей и технологической себестоимости. В результате технические специалисты предприятия могут эффективно выбирать необходимое оборудование и инструменты для обеспечения требуемого уровня качества изготавливаемой продукции.

4. Рассмотрены основные факторы, влияющие на социальную ответственность маркетинга машиностроительного предприятия. На основе проведенного анализа сделан вывод о том, что в большинстве случаев махинации на отечественном машиностроительном предприятии являются вынужденными действиями, цель которых – не личное обогащение руководства, а желание поддерживать постоянную

загрузку предприятия заказами по основному виду деятельности. Показано, что большинство случаев махинаций происходит из-за устаревшей производственной базы предприятия. Поэтому модернизация производственных элементов позволяет предприятию производить продукцию с высоким уровнем качества и с минимальной себестоимостью, получать максимально возможную прибыль. Применение математических моделей для прогнозирования производственных возможностей предприятия по изготовлению конкретного заказа открывает возможности еще на этапе подготовки документации для участия в тендере знать, сможет ли предприятие в полном объеме выполнить все требования, предъявляемые заказчиком, и понимать на какую прибыль может рассчитывать предприятие в результате выполнения этого заказа. В связи с этим, опираясь на принципы социально-ответственного маркетинга, руководство предприятия заранее знает свои возможности, а в случае недостатка каких-то производственных элементов – заранее модернизировать их для максимального выполнения всех заявленных требований заказчика и, по возможности, даже завышая уровень безопасности произведенной продукции в условиях эксплуатации заказчиком, а также для окружающей среды. Вместе с тем, в ходе расследования скандала с дизельными автомобилями обнаружено много крупных машиностроительных предприятий Германии, США и других стран ЕС, которые практиковали социально безответственный маркетинг с целью получения прибыли любой ценой. Предприятия же, которые постоянно практикуют социально-ответственный маркетинг, являются прибыльными, как в краткосрочном так и долгосрочном периоде.

5. Совершенствование процесса металлообработки на основе внедрения новых прогрессивных инструментов позволяет получать экономический эффект за счет увеличения производительности и стойкости инструмента, однако этот метод совершенствования технологий производства требует дополнительных капитальных вложений. Второе направление совершенствования технологий производства – применение различных моделей расчета режимов резания – позволяет получать экономический эффект без дополнительных капитальных вложений в совершенствование технологий производства. Использование инструментального менеджмента в производственном процессе предприятия повышает конкурентоспособность предприятия и выпускаемой продукции, а также повышает уровень СОМ.

## Общие выводы

В работе обоснованы основные направления инновационного развития современных технологий и инженерного образования в XXI веке. Показана важность и перспективность применения виртуального и дистанционного обучения. Рассмотрены сущность и характеристики современных технологий, их особенности, потенциальные возможности, определяющие факторы и эффективные направления практического применения. Эти знания позволят студентам и специалистам свободно ориентироваться в мире инновационных технологий, выделять и воплощать в жизнь новейшие, опережающие время технологии, позволяющие предприятию получить монопольное положение на новом рынке товаров, разрабатывать новые типы товаров, аналогов которых еще нет на рынке, достигать значительных успехов в различных сферах деятельности и получать сверхприбыль. На основе полученных знаний о тенденциях развития современных инновационных технологий можно научиться быстро принимать оптимальные управленческие решения в различных сферах деятельности. Большое внимание в работе уделено новым направлениям развития науки о технологии машиностроения, основанным, в первую очередь, на энергетических подходах и использовании энергетических критериев при создании эффективных технологических процессов. На этой основе разработаны практические рекомендации по обоснованию и выбору финишных операций механической обработки по энергетическому критерию.

Проведен анализ и обобщен опыт эффективного использования на промышленных предприятиях Украины современных металлообрабатывающих станков с ЧПУ зарубежного производства, обоснованы их технологические возможности, в особенности применительно к аэрокосмической промышленности. Показана эффективность постпроцессирования в системах ЧПУ с применением программного продукта ESPRIT. Даны практические рекомендации по работе с металлообрабатывающими станками с ЧПУ производства компании DOOSAN. Приведены характеристики металлообрабатывающего оборудования с ЧПУ для 5-осевой обработки при изготовлении сложных деталей за один установ.

Теоретически обоснованы основные направления уменьшения энергоемкости и повышения качества, точности и производительности

механической обработки на основе разработанных глубоких математических (аналитических) моделей технологических процессов лезвийной и абразивной обработки. Показана эффективность применения современных сборных режущих лезвийных твердосплавных инструментов с износостойкими покрытиями в условиях высокоскоростного резания, обеспечивающих уменьшение энергоемкости обработки, температуры и силы резания. Благодаря этому в ряде случаев появляется возможность совмещения операций предварительной и окончательной лезвийной обработки и исключения из технологического процесса изготовления изделий операций шлифования, что повышает производительность и снижает трудоемкость обработки.

С целью совершенствования операций шлифования сформулированы условия возникновения и пути устранения колебаний при шлифовании, условия снижения температуры и силы резания, повышения точности и качества обработки.

Значительное внимание уделено изысканию новых технологических возможностей прерывистого шлифования, исследованию динамики и теплофизики данного метода обработки. На этой основе разработаны эффективные технологические процессы зубошлифования.

В работе раскрыты закономерности и технологические возможности прогрессивного метода финишной абразивной обработки затопленными струями, позволяющего механизировать зачистку деталей малой жесткости массой до 3 г с достижением высокого качества и производительности отделочной обработки.

Показана возможность значительного уменьшения шероховатости обрабатываемых отверстий в гидро- и пневмоцилиндрах, устанавливая ось вращения шлифовального круга с индивидуальным приводом перпендикулярно оси вращения обрабатываемого отверстия и применяя круги с мягкой основой, например, мягкий войлочный (фетровый) круг с наклеенным слоем абразивного порошка.

Определены основные факторы, влияющие на социальную ответственность маркетинга машиностроительного предприятия. Доказано, что эффективная модернизация производственной базы предприятия обеспечивает изготовление продукции более высокого качества и с более низкой себестоимостью, что позволяет выполнять требования социально-ответственного маркетинга и получать прибыль предприятию как в краткосрочном, так и в долгосрочном периоде.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – Москва: Наука, 1976. – 279 с.
2. Айрапетов Э. А. Влияние шлифовочных прижогов на усталостную прочность зубчатых колес / Э. А. Айрапетов // Вестник машиностроения. – 1962. – № 4. – С. 31–33.
3. Акимов Д. И. Социальный маркетинг / Д. И. Акимов. – Киев: Наукова думка, 2008. – 143 с.
4. Алексеев Ю. Н. Введение в теорию обработки металлов давлением, прокаткой и резанием / Ю. Н. Алексеев. – Харьков: ХГУ, 1969. – 110 с.
5. Алмазная обработка : учебн. пособие / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, Г. В. Новиков и др. – Київ: ІЗМН, 1996. – 168 с.
6. Амосов Н. М. Физическая активность и сердце / Н. М. Амосов, Я. А. Бендет. – Киев: Здоровье, 1975. – 255 с.
7. Андилахай А. А. Абразивная обработка деталей затопленными струями / А. А. Андилахай. – Мариуполь: ПГТУ, 2006. – 190 с.
8. Андилахай А. А. Анализ струйно-абразивных методов обработки поверхностей / А. А. Андилахай // Вісник НТУ "ХПІ": зб. наук. праць. Темат. вип.: Технології в машинобудуванні – Харків: НТУ "ХПІ", 2010. – № 53. – С. 4–10.
9. Андилахай А. А. Динамика процесса струйно-абразивной обработки / А. А. Андилахай // Захист металургійних машин від поломок : міжвуз. темат. зб. наук. праць. – Маріуполь: ПДТУ, 2009. – Вип. 11. – С. 251–255.
10. Андилахай А. А. Исследование струй сжатого воздуха, подаваемых в рабочую камеру, заполненную абразивной суспензией / А. А. Андилахай // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: зб. наук. праць. – Маріуполь: ПДТУ, 2003. – Вип. 13. – С. 159–162.
11. Андилахай А. А. Методы очистки металлических поверхностей от окалины, коррозии / А. А. Андилахай // Вісник Харк. нац. техн. ун-ту сільськ. госп-ва імені Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2010. – Вип. 101. – С. 241–245.
12. Андилахай А. А. Методы, перспективы защиты каналов сопел струйно-абразивных установок от износа / А. А. Андилахай // Вісник



Харк. нац. техн. ун-ту сільськ. госп-ва імені Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2011. – Вип. 118. – С. 37–44.

13. Андилахай А. А. Определение областей эффективного применения абразивной обработки затопленными струями / А. А. Андилахай // Захист металургійних машин від поломок : міжвуз. темат. зб. наук. праць. – Маріуполь: ПДТУ, 2012. – Вип. 14. – С. 217–223.

14. Андилахай А. А. Особенности определения технологической эффективности упрочняющей обработки деталей затопленными струями / А. А. Андилахай // Захист металургійних машин від поломок : міжвуз. темат. зб. наук. праць. – Маріуполь: ПДТУ, 2002. – Вип. 6. – С. 238–242.

15. Анділахай В. О. Підвищення ефективності шліфування наплавлених контактних поверхонь великогабаритних деталей металургійного призначення: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / В. О. Анділахай. – Маріуполь, 2011. – 21 с.

16. Анділахай О. О. Наукові основи ефективної оздоблювальної абразивної обробки деталей затопленими струменями: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.02.08. – Одеса: ОНПУ, 2013. – 47 с.

17. Аросьев Г. Volkswagen: история одной махинации – <http://www.dw.com/>

18. Армарега И. Дж. Обработка металлов резанием / И. Дж. Армарега, Р. Х. Браун. – Москва: Машиностроение, 1977. – 327 с.

19. Бабаков И. М. Теория колебаний / И. М. Бабаков – Москва: Наука, 1965. – 560 с.

20. Балакшин Б. С. Основы технологии машиностроения / Б. С. Балакшин. – Москва: Машиностроение, 1969. – 359 с.

21. Баланюк А. В. Связь вибраций с геометрическими параметрами шлифуемой поверхности / А. В. Баланюк, В. Б. Наддачин // Физические и компьютерные технологии: труды 17-й Междунар. научн.-техн. конф., 20–21 сентября 2011, г. Харьков. – Харьков: ХНПК "ФЭД", 2011. – С. 155–159.

22. Бахвалов В. А. Исследование влияния параметров процесса зубошлифования конусным кругом и исходного состояния материала на качество поверхностного слоя: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / В. А. Бахвалов. – Одесса: ОПИ, 1977. – 17 с.

23. Белявцев М. И. Маркетингова політика розподілу : навч. посібник / М. И. Белявцев, Г. Д. Леонова, А. М. Зайцева. – 2-е вид., перероб. і доп. – Донецьк: ООО "Норд Комп'ютер", 2010. – 280 с.
24. Бидерман В. Л. Теория механических колебаний / В. Л. Бидерман – Москва: Высшая школа, 1980. – 408 с.
25. Бикбулатов И. К. Исследование гидроабразивного изнашивания щелевидных отверстий: автореф. дис. ... канд. техн. наук / И. К. Бикбулатов. – Москва, 1972. – 22 с.
26. Бирюков П. К. Исследование качества шлифуемой поверхности чугуновых прокатных валков с отбеленной поверхностью / П. К. Бирюков // Чистовые методы обработки. – Пермь: ППИ, 1971. – № 97. – С. 50–53.
27. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – Москва: Машиностроение, 1975. – 343 с.
28. Бондарь С. Е. О движении шпинделя шлифовального станка с эксцентрично сосредоточенной массой / С. Е. Бондарь // Машиноведение. – 1965. – № 1. – С. 78–86.
29. Бояршинов Ю. А. Разработка и исследование способов повышения качества поверхностного слоя при шлифовании зубчатых колес: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Ю. А. Бояршинов. – Пермь: ППИ, 1979. – 198 с.
30. Братан С. М. Технологічні основи забезпечення якості і підвищення стабільності високопродуктивного чистового та тонкого шліфування: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.02.08. – Одеса, 2006. – 35 с.
31. Бронштейн И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – Москва: Наука, 1981. – 715 с.
32. Брун М. Внутрішньофірмовий маркетинг як елемент орієнтації на клієнта / М. Брун // Проблеми теорії та практики управління. – 2009. – № 6. – С. 66–69.
33. Вибрации в технике. Справочник : В 6-ти т. / Под ред. В. В. Болотина. – Москва: Машиностроение, 1978. – Т. 1. Колебания линейных систем – 352 с.
34. Влияние количества и размеров элементов макропрофиля рабочих поверхностей прерывистых шлифовальных алмазных и эльборовых кругов на их удельный износ / А. А. Якимов, Л. В. Бовнегра,

С. Ю. Дмитриева, С. В. Безнос, В. В. Добровольский // Сучасні проблеми моделювання: зб. наук. праць. – Мелітополь: МДПУ, 2018. – Вип. 11. – С. 181–192. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/cpm\\_2018\\_11\\_32](http://nbuv.gov.ua/UJRN/cpm_2018_11_32)

35. Влияние макропрофиля режущего выступа прерывистого алмазного шлифовального круга на показатели качества поверхностного слоя износостойких плазменных покрытий и твердых сплавов / А. А. Якимов, Л. В. Бовнегра, Н. Н. Клименко, И. С. Синько // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві: зб. наук. праць. – Одеса: Наука і техніка, 2016. – Вип. 2(16). – С. 138–152.

36. Воронов А. Конкурентоспособность промышленной продукции / А. Воронов // Стандарты и качество. – 2003. – № 5. – С. 59–65.

37. Высокопроизводительная финишная обработка отверстий цилиндров / Д. Ф. Новиков, Ф. В. Новиков, В. А. Андилахай, А. А. Андилахай // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении : материалы междунар. научн.-техн. конф., 26–29 сентября 2018 г., Одесса. – Одесса: ОНПУ, 2018. – С. 127–128.

38. Горбунов Б. И. Движение оси шпинделя под действием дисбалансов шлифовального круга / Б. И. Горбунов, В. Г. Гусев // Обработка материалов резанием : Межвузовский сб. – ВЗМИ; Под ред. Б. И. Горбунова – Москва. – 1976. – С. 115–124.

39. Горбунов Б. И. Колебания оси шпинделя под действием дисбалансов консольно-закрепленного круга / Б. И. Горбунов, В. Г. Гусев // Известия вузов. Машиностроение. – 1977. – № 7. – С. 135–139.

40. Горбунов Б. И. О границе силового уравнивания круга бесцентрово-шлифовального станка / Б. И. Горбунов, В. Г. Гусев // Известия вузов. Машиностроение. – 1973. – № 10. – С. 166–168.

41. Горбунов Б. И. Уравнивающие устройства шлифовальных станков / Б. И. Горбунов, В. Г. Гусев. – Москва: Машиностроение, 1976. – 167 с.

42. Грановский Г. И. Кинематика резания / Г. И. Грановский. – Москва: Машгиз, 1947. – 200 с.

43. Гриньова В.М. Організація виробництва: підручник / В. М. Гриньова, М. М. Салун. – Харків: ВД "ІНЖЕК", 2007. – 576 с.

44. Гусарев В. С. Виктор Афанасьевич Добровольский. Инженер. Педагог. Ученый: эссе о жизни и творчестве / В. С. Гусарев. – Одесса: Интерпринт, 2015. – 68 с.

45. Гусарев В. С. Виртуальное обучение – новый стиль инженерного образования 21 века // Вестник инженерной академии Украины. – Киев – Харьков: ИАУ, 2001. – С. 316–317.

46. Гусарев В. С. Глобализация и инженерное образование 21 века / В. С. Гусарев // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве : Труды 2-й Междунар. научн.-техн. конф., г. Харьков, 23–24 октября 2001. – Харьков: ХНПК "ФЭД", 2001. – С. 475–477.

47. Гусарев В. С. Модели процессов. Алгоритмы. Структуры технологических машин : Научное издание / В. С. Гусарев. – Одесса: Печатный дом, 2018. – 227 с.

48. Гусарев В. С. О классификации технологических процессов и физических закономерностях / В. С. Гусарев // Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве : Труды 6-й Междунар. научно-техн. конф., г. Харьков, 10–11 октября 2002. – Харьков: ХНПК "ФЭД", 2002. – С. 103.

49. Гусарев В. С. Проблема инженерного образования 21 века // Вестник инженерной академии Украины. – Харьков: ИАУ, 2000. – С. 689–690.

50. Гусарев В. С. Сравнение и выбор технологического решения на основе энергетического критерия / В. С. Гусарев, Л. С. Стоянова // Научно-технические проблемы станкостроения. – Киев. – 2002. – С. 34–35.

51. Гусарев В. С. Сравнение и выбор технологических решений на основе энергетического критерия / В. С. Гусарев, Л. С. Стоянова // Технические проблемы: станкостроение, производство технологической оснастки и инструмента. – Киев: АТМ Украины, 2002. – С. 14–16.

52. Гусарев В. С. Технологи машиностроения (биографии основоположников) / В. С. Гусарев. – Одесса: Печатный дом, 2007. – 112 с.

53. Гусарев В. С. Технологическая энергоэкономика / В. С. Гусарев // Вестник инженерной академии Украины. – 2001. – № 2. – С. 302–356.

54. Гусарев В. С. Технологическая энергоэкономика / В. С. Гусарев // Вестник инженерной академии Украины. – Киев. – 2001. – Вып. 3 (часть 1). – С. 352–356.

55. Гусарев В. С. Энергетическая эффективность технологических процессов / В. С. Гусарев // Авиационно-космическая техника и технология. Труды Государственного аэрокосмического университета

им. Н. Е. Жуковского "ХАИ". Выпуск 14. – Харьков: Гос. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского "ХАИ", 2000. – С. 41–44.

56. Гусарев В. С. Энергетические проблемы современной технологии машиностроения / В. С. Гусарев // Вестник инженерной академии. – 2002. – № 3. – С. 165–176.

57. Гусев В. Г. Формообразование поверхностей, шлифованных неуравновешенным сборным кругом методом поперечной подачи / В. Г. Гусев // Известия вузов. Машиностроение. – 1984. – № 1. – С. 139–144.

58. Демкин Н. Б. Контактное шлифование шероховатых поверхностей / Н. Б. Демкин – Москва: Наука, 1970. – 227 с.

59. Ди Бартини Р. Л. Некоторые соотношения между физическими величинами / Р. Л. Ди Бартини. – ДАН СССР. – 1965. – № 4. – С. 891–864.

60. Диксон Дж. Проектирование систем / Дж. Диксон. – Москва: Мир, 1969. – 440 с.

61. Дружинин В. В. Проблемы систематологии / В. В. Дружинин, Д. С. Канторов. – Москва: Сов. Радио. – 1976. – 295 с.

62. Дьяченко П. Е. Количественная оценка неровностей обработанных поверхностей / П. Е. Дьяченко, В. Э. Вайнштейн, В. С. Розенбаум. – Москва: АН СССР, 1952.

63. Евсеев Д. Г. Физические основы процесса шлифования / Д. Г. Евсеев, А. И. Сальников. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1978. – 128 с.

64. Евстратов В. А. Теория обработки металлов давлением / В. А. Евстратов. – Харьков: Высш. школа, 1981. – 248 с.

65. Жариков В. Д. Экономика машиностроения : учеб. пособие / В. Д. Жариков, Р. В. Жариков, Е. Б. Попова. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 80 с.

66. Житомирский В. К. Механические колебания и практика их устранения / В. К. Житомирский – Москва: Машиностроение, 1966. – 175 с.

67. Жовтобрюх В. А. Определение условий уменьшения себестоимости обработки деталей машин / В. А. Жовтобрюх // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 6/7 (54). – С. 50–53.

68. Жовтобрюх В. А. Проектирование и автоматизированное программирование современных технологий для станков с ЧПУ : монография / В. А. Жовтобрюх, Ф. В. Новиков. – Днепр: ЛИРА, 2019. – 480 с.

69. Жовтобрюх В. А. Разработка и внедрение эффективных технологических процессов механической обработки / В. А. Жовтобрюх // Сучасні системи технологій у машинобудуванні. Зб. наук. праць, присвячений 90-річчю з дня народження професора Одеського національного політехнічного університету (ОНПУ) Якимова О. В. – Днепропетровськ : ЛІРА. – 2015. – С. 92–105.

70. Жовтобрюх В. А. Теоретический анализ себестоимости обработки / В. А. Жовтобрюх // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 2/1 (56). – С. 18–21.

71. Жовтобрюх В. А. Теоретический анализ условий уменьшения себестоимости механической обработки / В. А. Жовтобрюх // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Харків : ХНТУСГ, 2011. – Вип. 115. – С. 68–73.

72. Жовтобрюх В. А. Теоретическое определение теплового баланса и температуры резания при механической обработке / В. А. Жовтобрюх // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 5/5 (53). – С. 51–54.

73. Жовтобрюх В. О. Підвищення ефективності механічної обробки деталей гідравлічних систем шляхом вибору раціональних параметрів операцій за критерієм собівартості: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. – Маріуполь, 2012. – 21 с.

74. Забезпечення якості виготовлення зубчатих передач в енергомашинобудуванні / О. Якімов, С. Уминський, Н. Кліменко, Л. Бовнегра, Ю. Шихирева // Аграрний вісник Причорномор'я : зб. наук. праць (технічні науки). – Одеса: ОДАУ, 2019. – Вип. 91. – С. 164–175.

75. Зорев Н. Н. Вопросы механики процесса резания металлов / Н. Н. Зорев. – Москва: Машгиз, 1956. – 368 с.

76. Износ шлифовальных кругов с прерывистой рабочей поверхностью / А. Якимов, Л. Бовнегра, С. Уминский, В. Тонконогий, Ю. Смирнова // Резание и инструменты в технологических системах. – Харків: НТУ "ХПІ", 2020. – Вип. 92. – С. 197–207.

77. Инструментальный менеджмент: от входного контроля до протокола износа. – URL: [http://www.umpro.ru/index.php?page\\_id=17&art\\_id\\_1=675&group\\_id\\_4=26](http://www.umpro.ru/index.php?page_id=17&art_id_1=675&group_id_4=26)

78. Иориш Ю. И. Виброметрия / Ю. И. Иориш. – Москва: Машгиз, 1963. – 772 с.
79. Исследование динамических явлений, происходящих при прерывистом шлифовании / В. М. Тонконогий, А. А. Якимов, Л. В. Бовнегра, Л. В. Майзлис, А. С. Филанович // Різання та інструмент в технологічних системах. – Харків: НТУ "ХПІ", 2019. – Вип. 90. – С. 109–125.
80. Исследование прочности тяжело нагруженных высокооборотных передач с твердыми поверхностями зубьев // Труды академии им. Н. Е. Жуковского. – Москва: 1990. – 250 с.
81. Как один Volkswagen может похоронить все дизельные автомобили. – URL: <https://www.vedomosti.ru>
82. Капица П. Л. Профессор и студент. Эксперимент, теория, практика. – Москва: Наука, 1977. – С. 200–205.
83. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке / Э. В. Рыжов, А. А. Сагарда, В. Б. Ильицкий, И. Х. Чеповецкий. – Киев: Наук. думка, 1979. – 244 с.
84. Кащук В. А. Справочник шлифовщика / В. А. Кащук, А. Б. Верещагин. – Москва: Машиностроение, 1988. – 480 с.
85. Кидин И. Н. Фазовые превращения при ускоренном нагреве / И. Н. Кидин. – Москва: Изд.: Черная и цветная металлургия, 1957. – 94 с.
86. Клусов И. А. Проектирование роторных машин и линий : учеб. пособие / И. А. Клусов. – Москва: Машиностроение, 1990. – 320 с.
87. Коваленко В. С. Лазерная технология. – Киев: Высш. школа, 1989. – 280 с.
88. Колев К. С. Точность обработки и режимы резания / К. С. Колев, Л. М. Горчаков. – Москва: Машиностроение, 1976. – 144 с.
89. Королев А. В. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А. В. Королев. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1975. – 212 с.
90. Корсаков В. С. Формирование поверхностей, шлифуемых прерывистыми абразивными кругами / В. С. Корсаков, В. Г. Гусев // Известия вузов. Машиностроение. – 1984. – № 4. – С. 133–138.
91. Космодемьянский А. А. Теоретическая механика и современная техника. – Москва: Просвещение, 1969. – 254 с.
92. Котлер Ф. Маркетинг менеджмент / Ф. Котлер, К. Л. Келлер. – 12-е изд. – Санкт-Петербург: Питер, 2008. – 816 с.

93. Котлер Ф. Маркетинг менеджмент. Экспресс-курс. 2-е изд. / пер. с англ. под ред. С. Г. Божук. – Санкт-Петербург: Питер, 2006. – 464 с.
94. Кошкин Л. Н. Роторные и роторно-конвейерные линии / Л. Н. Кошкин. – Москва: Машиностроение, 1982. – 336 с.
95. Кудинов В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов – Москва: Машиностроение, 1967. – 360 с.
96. Ламбен Ж.-Ж. Менеджмент, ориентированный на рынок / Пер. с англ. под ред. В. Б. Колчанова / Ж.-Ж. Ламбен. – Санкт-Петербург: Питер, 2004. – 800 с.
97. Лоладзе А. В. Износ алмазов и алмазных кругов / А. В. Лоладзе, Г. В. Бокучава. – Москва: Машиностроение. – 1967. – 112 с.
98. Лоповок Т. С. Волнистость поверхности и ее измерение / Т. С. Лоповок. – Москва: Изд. Стандарты, 1973. – 184 с.
99. Луи Швейцер // интервью – URL: <https://www.lesechos.fr/>
100. Лурье Г. Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования / Г. Б. Лурье. – Ленинград: Машиностроение, 1984. – 103 с.
101. Лурье Г. Б. Шлифование металлов / Г. Б. Лурье. – Москва: Машиностроение, 1969. – 197 с.
102. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков – Москва: Высш. школа, 1967. – 600 с.
103. Лыков А. В. Тепломассообмен: справочник. – Москва: Энергия, 1972. – 500 с.
104. Маркетинг : підручник / В. Руделіус, О. М. Азарян, Н. О. Бабенко та ін.; ред.-упор. О. І. Сидоренко, Л. С. Макарова. – 2-ге вид. – Київ: Навчально-методичний центр "Консорціум із удосконалення менеджмент-освіти в Україні", 2008. – 648 с.
105. Маркетинг / У. Руделиус, М. В. Авдохина, Н. И. Ивашко и др. – Москва : Де Ново, 2001. – 706 с.
106. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов / Е. Н. Маслов. – Москва: Машиностроение, 1974. – 320 с.
107. Маталин А. А. Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин / А. А. Маталин. – Москва–Ленинград: Машгиз, 1956. – 252 с.
108. Маталин А. А. Технология машиностроения : учебник / А. А. Маталин. – Ленинград: Машиностроение, 1985. – 496 с.



109. Маталин А. А. Технология механической обработки / А. А. Маталин. – Ленинград: Машиностроение, 1977. – 464 с.
110. Маталин А. А. Точность механической обработки и проектирование технологических процессов / А. А. Маталин. – Москва: Машиностроение, 1970. – 390 с.
111. Материалы научно-технического совещания по новейшей технологии обработки зубчатых колес. – Минск, 1991. – 251 с.
112. Механічна обробка великогабаритних деталей зі зносостійкими наплавочними матеріалами : монографія / Ф. В. Новіков, В. О. Анділахай, І. Є. Іванов, Д. Ф. Новіков. Під ред. Ф. В. Новікова. – Харків: Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2015. – 315 с.
113. Моделирование геометрических параметров рабочих поверхностей прерывистых шлифовальных кругов // А. А. Якимов, Л. В. Бовнегра, С. В. Безнос, С. Ю. Дмитриева, В. В. Добровольский / Сучасні проблеми моделювання: збірн. науков. праць. – Мелітополь: МДПУ, 2018. – Вип. 12. – С. 172–184. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/cpm\\_2018\\_12\\_31](http://nbuv.gov.ua/UJRN/cpm_2018_12_31)
114. Наддачин В. Б. Влияние вибраций на температуру при прерывистом шлифовании / В. Б. Наддачин, В. И. Марчук, С. М. Нечитайло // Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво : зб. праць восьмої Всеукраїнської молодіжної НТК, м. Луцьк, 29–31 жовтня 2008 р. – Луцьк: ЛНТУ, 2008. – С. 50–53.
115. Наддачин В. Б. Динамические характеристики композиционных кругов / В. Б. Наддачин, Г. П. Кремнев, В. П. Сиротин // Прогрессивные методы повышения качества, долговечности и надежности деталей машин при алмазно-абразивной обработке. – Волжский. – 1981. – С. 38–39.
116. Наддачин В. Б. Использование вибраций при прерывистом процессе резания / В. Б. Наддачин, А. В. Бабюк // Обработка дисперсных материалов и сред : Междунар. сб. науч. тр. – Одесса: НПО "ВОТУМ", 2002. – Вып. № 12. – С. 126–130.
117. Наддачин В. Б. Причины вибраций шпиндельной системы станка / В. Б. Наддачин // Металлорежущие станки : Республ. межвед. науч.–техн. сб. – Киев: Техника, 1991. – Вып. № 19. – С. 90–93.
118. Наддачин В. Б. Формирование волнистости поверхности при шлифовании композиционными кругами / В. Б. Наддачин // Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей технологии

в машиностроении. Межвуз. сб. науч. тр. – Пермь: Пермский политех. ин-т, 1984. – С. 77–81.

119. Никулкин Б. И. Исследование влияния динамических явлений при колебаниях на процесс круглого наружного шлифования : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Б. И. Никулкин. – Ленинград: Северо-Западный заочный политех. ин-т, 1968. – 15 с.

120. Новиков Д. Ф. Инструментальный менеджмент // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: Материалы международной научно-технической конференции, г. Одесса, 23–25 сентября 2020 г. – Одесса: ОНПУ, 2020. – С. 115–118.

121. Новиков Д. Ф. Методика инвестиционного планирования технического перевооружения промышленного предприятия / Д. Ф. Новиков // Физические и компьютерные технологии : труды 20-й междунар. научн.-практ. конф., г. Харьков, 23–24 декабря 2014. – Днепрпетровск: ЛИРА, 2015. – С. 222–225.

122. Новіков Д. Ф. Ефективне управління технологіями машинобудівних підприємств – важливий фактор підвищення якості їх продукції, соціальної відповідальності, збільшення прибутку та конкурентоспроможності / Д. Ф. Новіков // Бізнес Інформ. – 2019. – № 12. – С. 432–437.

123. Новіков Д. Ф. Соціально-відповідальний маркетинг в металобробному виробництві та його вплив на прибуток машинобудівного підприємства / Д. Ф. Новіков // Економіка: реалії часу. Науковий журнал. – 2019. – № 4 (44). – С. 99–105

124. Новіков Д. Ф. Соціально відповідальний маркетинг в управлінні якістю та конкурентоспроможністю машинобудівної продукції // Бізнес Інформ. – 2020. – № 1. – С. 367–373.

125. Новіков Д. Ф. Соціально-відповідальний маркетинг на промисловому ринку / Д. Ф. Новіков // Матеріали Міжнародної наукової конференції "Економічний розвиток і спадщина Семена Кузнеця" : тези доповідей, 1–2 червня 2017 р. – Харків: ХНЕУ імені Семена Кузнеця, 2017. – С. 387–389.

126. Новиков Ф. В. Аналитическое определение и анализ энергетических параметров процесса шлифования / Ф. В. Новиков, В. А. Андилахай // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб. наук. праць. – Краматорськ, 2017. – Вип. № 41. – С. 10–17.

127. Новиков Ф. В. Новый упрощенный подход к расчету температуры поверхностного слоя детали при ее механической обработке

/ Ф. В. Новиков, С. М. Яценко // Физические и компьютерные технологии: труды 11-й Междунар. научн.-техн. конф., г. Харьков, 2–3 июня 2005. – Харьков: ХНПК "ФЭД", 2005. – С. 137–146.

128. Новиков Ф. В. Определение максимально возможной производительности обработки при шлифовании на основе температурного критерия / Ф. В. Новиков, И. В. Гершиков, В. А. Андилахай // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь: ДВНЗ "Приазов. держ. техн. ун-т", 2012. – Вып. 14. – С. 233–237.

129. Новиков Ф.В. Определение условий уменьшения погрешностей механической обработки отверстий / Ф. В. Новиков, А. Н. Ковальчук, И. А. Рябенков // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь: ДВНЗ "Приазов. держ. техн. ун-т", 2009. – Вып. 11. – С. 273–279.

130. Новиков Ф. В. Определение условий уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании отверстий в деталях гидравлической аппаратуры / Ф. В. Новиков, Т. М. Брижан // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Зб. наук. праць. – Краматорськ. – 2015. – Вип. № 37. – С. 47–55.

131. Новиков Ф. В. Оптимальные решения в технологии машиностроения : монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, В. Г. Шкурупий. – Днепр: ЛИРА, 2018. – 424 с.

132. Новиков Ф. В. Основы математического моделирования технологических процессов механической обработки : монография / Ф. В. Новиков. – Днепр: ЛИРА, 2018. – 400 с.

133. Новиков Ф. В. Основы повышения качества и производительности механической обработки : монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, Г. В. Новиков. – Днепр: ЛИРА, 2017. – 452 с.

134. Новиков Ф. В. Повышение точности и производительности механической обработки / Ф. В. Новиков, Р. А. Бережной // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ, 2009. – Вип. 81. – С. 29–38.

135. Новиков Ф. В. Современные экологически безопасные технологии производства : монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, Г. В. Новиков. – Днепр: ЛИРА, 2017. – 372 с.

136. Новиков Ф. В. Теоретический анализ параметров силовой напряженности струйно-абразивной обработки / Ф. В. Новиков, А. А. Андилахай // Наукові праці Донецького національного технічного

університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. – Випуск 7 (166). – С. 46–53.

137. Новиков Ф. В. Теоретический анализ энергоемкости обработки при шлифовании / Ф. В. Новиков, В. А. Андилахай // Физические и компьютерные технологии: Труды 17-й Междунар. научн.-техн. конф., г. Харьков, 20–21 сентября 2011. – Харьков: ХНПК "ФЭД", 2011. – С. 14–18.

138. Новиков Ф. В. Условия уменьшения шероховатости поверхности при финишной абразивной обработке отверстий в цилиндрах / Ф. В. Новиков, А. А. Андилахай, А. С. Сергеев // Инженер-механик: Республиканский межотраслевой производственно-практический журнал. – №3(84), июль – сентябрь 2019. – Беларусь, Минск, 2019. – С. 26–27.

139. Новиков Ф. В. Условия уменьшения шероховатости поверхности при финишной абразивной обработке отверстий в цилиндрах / Ф. В. Новиков, А. А. Андилахай, А. С. Сергеев // Качество, стандартизация, контроль: теория и практика: Материалы 19-й Международной научно-практической конференции, г. Одесса, 09–13 сентября 2019. – Киев: АТМ України, 2019. – С. 96–98.

140. Новиков Ф. В. Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01 "Процессы механической обработки, станки и инструменты" / Ф. В. Новиков. – Одесса. – 1995. – 36 с.

141. Новіков Ф. В. Високопродуктивне алмазне шліфування : монографія / Ф. В. Новіков. – Харків: Вид. ХНЕУ, 2014. – 412 с.

142. Новіков Ф. В. Основи обробки металевих виробів з оптичними властивостями : монографія / Ф. В. Новіков, В. Г. Шкурупій. – Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2015. – 388 с.

143. Новіков Ф. В. Основи струминно-абразивної обробки дрібних деталей : монографія / Ф. В. Новіков, О. О. Анділахай. – Харків: Вид. ХНЕУ, 2014. – 348 с.

144. Новіков Ф. В. Теоретичні основи механічної обробки високоточних деталей : монографія / Ф. В. Новіков, І. О. Рябенков. – Харків: Вид. ХНЕУ, 2013. – 352 с.

145. Новіков Ф. В. Фінішна обробка деталей різанням : монографія / Ф. В. Новіков, І. О. Рябенков. – Харків: ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2016. – 272 с.

146. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке : монография / Ю. К. Новоселов. – Севастополь : СевНТУ, 2012. – 304 с.

147. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. – Саратов : Изд. Сарат. ун-та, 1979. – 232 с.

148. Новый абразивный инструмент и его технологические возможности / А. В. Якимов, В. Б. Наддачин, Г. П. Кремнев, В. П. Сиротин // Отделочно-чистовые методы обработки и инструменты в технологии машиностроения : Межвуз. сб. науч. тр. – Барнаул, 1981. – С. 3–6.

149. Окландер М. А. Маркетингові комунікації промислових підприємств в умовах інформаційної економіки : монографія / М. А. Окландер, М. В. Ботушан. – Одеса : Астропринт, 2011. – 210 с.

150. Операционный убыток Volkswagen превысил 4 млрд. евро из-за "дизельгейта" – reuters.com

151. Оптимизация расхода энергии в процессах деформации / Хензель А., Шпиттель Т. // Пер. с нем. – Москва: Металлургия, 1985. – 184 с.

152. Орлов П. А. Важнейшие факторы масштабного повышения социальной ответственности субъектов хозяйствования и их маркетинга для эффективного социально-экономического развития стран / П. А. Орлов // Економіка розвитку. – № 3(83). – 2017. – С. 20–33.

153. Орлов П. А. Качество государственного регулирования и социальная ответственность предприятий как важные факторы конкурентоспособности продукции и страны / П. А. Орлов // Бізнес інформ. – 2017. – № 11. – С. 441–447.

154. Орлов П. А. Проблемы социальной ответственности маркетинга в промышленно развитых странах с рыночной экономикой и в Украине в условиях затяжного мирового экономического кризиса / П. А. Орлов // Науковий журнал "БІЗНЕС ІНФОРМ". – Харків: Видавничий дім "ІНЖЕК", № 1 '2013 р. (420). – С. 6–12.

155. Орлов Петро. Соціально-відповідальний маркетинг в управлінні прибутком машинобудівного підприємства [Socially responsible marketing in the profit management of a machine-building enterprise] / Петро Орлов, Дмитро Новіков // European journal of economics and management. – Volume 5, Issue 5. – Praha, 2019. – Pp. 39–47.

156. Осипов Ю. И. Исследование соударения шарика с поверхностью, покрытой вязкой жидкостью поляризационно-оптическим методом / Ю. И. Осипов, Б. В. Никонова // Виброабразивная обработка деталей. – Ворошиловград: Ворошиловград. машиностр. институт, 1978. – С. 13–18.

157. Основы тепловых явлений при шлифовании деталей машин : учеб. пособие / А. В. Якимов, Б. О. Ткаченко, А. А. Якимов и др. – Одесса: ОГПУ, 1997. – 272 с.

158. Относительный износ прерывистого шлифовального круга из сверхтвердых материалов / А. Якимов, Л. Бовнегра, С. Уминский, В. Тонконогий, Ю. Смирнова // Резание и инструменты в технологических системах. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2020. – № 92. – С. 161–169.

159. Паворв И. Ф. Обработка металлов давлением / И. Ф. Паворв, Н. М. Федосов, В. П. Северденко – Москва: Металлургия, 1955. – 483 с.

160. Пазюк Е. И. Современные установки и технология гидроабразивной обработки / Е. И. Пазюк. – Ленинград: Лениздат. – 1953. – 175 с.

161. Параил В. А. Высшее техническое образование в США (критический анализ) / В. А. Параил. – Киев: Вища школа, 1980. – 192 с.

162. Пат. 199532 Австрии МКИ В 24 – 2339 "Конструкция шлифовального круга с прорезями рабочей поверхности и способ его изготовления" / Y Gunter Lux. – Оpubл. 15.10.78.

163. Пат. 312 1982 США МКИ В 24d 13/00 Прерывистый шлифовальный круг с регулируемыми сегментами / Heruld C., Miller K. – Оpubл. 1.02.85.

164. Пат. 3141269 США МКИ Сi В 23 F 5/02; В 23 F1/02 Сборный прерывистый шлифовальный круг. Alek C, Block M (США) N 13625/73; Заяв 21.09.89. Оpubл. 10.11.90.

165. Пеллинец В. С. Измерение ударных ускорений / В. С. Пеллинец. – Москва: Изд. Стандарты, 1974. – 288 с.

166. Петрусевич А. И. Влияние шлифовальных прижогов на контактную выносливость цементированных зубчатых колес / А. И. Петрусевич, И. Д. Генкин, Н. М. Рыжов // Вестник машиностроения. – 1965. – № 6. – С. 9–10.

167. Підвищення технологічних можливостей обробки зубчастих коліс з повздовжньою модифікацією зубів методами обкату / С. М. Уминський, О. О. Якімов, Л. В. Бовнегра, Ю. С. Барчанова,

А. В. Павлишко // Оборудование и инструмент для профессионалов : Международный информационно-технический журнал (Серия: Металлообработка) – Харьков: Информационно-издательский дом "Центр Информ", 2020. – № 2. – С. 58–60.

168. Повышение эффективности процесса прерывистого шлифования / А. А. Якимов, Л. В. Бовнегра, Ю. В. Шихирева, Е. Г. Павлышко, М. В. Королькова // Різання та інструмент в технологічних системах. – Харків: НТУ "ХПІ", 2019. – Вип. 90. – С. 177–190.

169. Подзей А. В. Влияние тепловых процессов при резании на образование остаточных напряжений / А. В. Подзей // Изв. ВУЗов. Машиностроение. – 1959. – № 8. – С. 15–17.

170. Подзей А. В. Технологические остаточные напряжения / А. В. Подзей. – Москва: Машиностроение, 1973. – 216 с.

171. Подураев В. Н. Обработка резанием с вибрациями / В. Н. Подураев. – Москва: Машиностроение, 1970. – 350 с.

172. Подураев В. Н. Технология физико-химических методов обработки / В. Н. Подураев. – Москва: Машиностроение, 1985. – 264 с.

173. Полянський В. І. Теоретичний аналіз шляхів підвищення якості та продуктивності механічної обробки / В. І. Полянський // Вісник Національного технічного університету "ХПІ" : зб. наук. пр. Серія : Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії. – № 26 (1351). – 2019. – С. 42–46.

174. Попилов Л. Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка металлов. – Москва: Машиностроение, 1982. – 400 с.

175. Попов С. А. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов / С. А. Попов, Н. П. Малевский, Л. М. Терещенко. – Москва: Машиностроение, 1977. – 263 с.

176. Попов С. А. Область применения алмазных кругов на органической связке / С. А. Попов, Г. А. Старчак, Н. П. Малевский // Станки и инструменты. – 1966. – № 3. – С. 15–18.

177. Последствия "дизельного скандала": Volkswagen заплатит автодилерам в США \$1,2 миллиарда – URL: <https://economics.unian.net/>

178. Потапов В. А. Зубообработка на выставке ЕМО-99 / В. А. Потапов // Машиностроитель. – 2003. – № 5. – С. 10–12.

179. Потапов В. А. Kouyepu Gildemeister: Секреты успеха / В. А. Потапов // Машиностроитель. – 2002. – № 11. – С. 8–17.

180. Прилуцкий В. А. Технологические методы снижения волнистости поверхностей / В. А. Прилуцкий. – Москва: Машиностроение, 1978. – 136 с.

181. Прилуцкий В. А. Технологическое обеспечение точности и качества поверхностного слоя деталей машин путем управления периодическими погрешностями обработки : автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.02.08 / В. А. Прилуцкий. – Брянск: Брянский гос. техн. ун-т, 2004. – 36 с.

182. Проскурович О. В. Моделювання адаптивного управління прибутком підприємства / О. В. Проскурович, В. А. Бойчук // Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки. – 2010. – № 1, т. 2. – С. 71–76.

183. Профессор Якимов Александр Васильевич в становлении технологических знаний: научно-информационное издание / Под ред. Ф. В. Новикова, А. А. Якимова, В. А. Жовтобрюха. – Днепр: ЛИРА, 2021. – 292 с.

184. Профессор Якимов Александр Васильевич и его научная технологическая школа / Под общей редакцией проф. Ф. В. Новикова. – Днепр: ЛИРА, 2019. – 296 с.

185. Профессор Якимов Александр Васильевич: страницы жизни : научно-информационное издание / Под редакцией Ф. В. Новикова, А. А. Якимова, В. А. Жовтобрюха. – Днепр: ЛИРА, 2020. – 396 с.

186. Работоспособность прерывистых шлифовальных кругов / А. В. Якимов, В. А. Бахвалов, В. Н. Гусев, С. Б. Кцаян // Технология и организация производства. – Киев, 1976. – № 12. – С. 24–25.

187. Редько С. Г. Количество абразивных зерен шлифовального круга, участвующих в резании / С. Г. Редько // Станки и инструменты. – 1960. – № 12. – С. 10–12.

188. Редько С. Г. Процесс теплообразования при шлифовании металлов / С. Г. Редько. – Саратов: Изд. Саратов. ун-та. 1962. – 224 с.

189. Резников А. Н. Основы расчета тепловых процессов в технологических расчетах : учеб. пособие / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – Куйбышев: Ку.А.И. – 1986. – 153 с.

190. Рік посиленої уваги до науки та освіти / Одеський політехнік. – 2004. – № 1 (2 березня). – С. 4–5.

191. Розширення можливості застосування переривчастих шліфувальних кругів на керамічній зв'язці / О. О. Якімов, В. М. Тонконогий,



Л. В. Бовнегра, В. М. Тігарєв // Сучасні технології в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Харків: НТУ "ХПІ", 2016. – Вип. 11. – С. 64–73.

192. Рыжов Н. М. Исследование свойств поверхностного слоя зубьев зубчатых колес после шлифования и их влияние на усталостную прочность: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / Н. М. Рыжов. – Москва: МВТУ им. Баумана, 1965. – 250 с.

193. Рыжов Э. В. Оптимизация технологических процессов механической обработки / Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков. – Киев: Наук. думка, 1989. – 192 с.

194. Рыжов Э. В. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями / Э. В. Рыжов, С. А. Клименко, О. Г. Гуцаленко. – Киев: Наук. думка, 1994. – 180 с.

195. Рыжов Э. В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Э. В. Рыжов, А. Г. Суслов, В. П. Федоров. – Москва: Машиностроение, 1979. – 176 с.

196. Рыкалин Н. Н. Тепловые основы сварки / Н. Н. Рыкалин // А.Н. СССР. – 1947. – 356 с.

197. Рябенков И. А. Закономерности формирования шероховатости поверхности при абразивной обработке и условия ее уменьшения / И. А. Рябенков, Ф. В. Новиков, А. А. Андилахай // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки: Зб. наук. праць. – Маріуполь: ДВНЗ "Приазов. держ. техн. ун-т", 2016. – Вип. 32. – 2016. – С. 144–150.

198. Рябенков И. А. Повышение эффективности финишной обработки деталей гидроаппаратуры на основе выбора рациональной структуры и параметров операций: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / И. А. Рябенков. – Одесса, 2009. – 21 с.

199. Саверин М. М. Дробеструйный наклеп / М. М. Саверин. – Москва: Машгиз, 1955. – 197 с.

200. Садовский В. Д. Превращения при нагреве стали / В. Д. Садовский, К. А. Малышев, Б. Г. Сазонов. – Черная и цветная металлургия. – Свердловск. – 1954. – 165 с.

201. Свирщев В. И. Исследование геометрических показателей качества процесса плоского прерывистого шлифования с учетом его динамических особенностей : дис. ... канд. техн. наук / В. И. Свирщев. – Пермь, 1977. – 247 с.

202. Свирцев В. И. Технологические основы и обеспечение динамической стабилизации процесса шлифования : автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.02.08 / В. И. Свирцев. – Пермь: ППУ, 1996. – 38 с.

203. Сергеев А. С. Высокоэффективная технология внутреннего шлифования отверстий в пневмо- и гидроцилиндрах / А. С. Сергеев // Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: матеріали XI Міжнар. наук.-техн. конф., присвяченої 90-річчю заснування кафедри обробки металів тиском, м. Харків, 20–22 листопада 2019 р. – Харків: НТУ "ХПІ", 2019. – С. 144–145.

204. Сергеев А. С. Обоснование эффективности применения абразивной обработки для уменьшения шероховатости поверхности // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Технології в машинобудуванні : зб. наук. пр.– Харків: НТУ "ХПІ", 2020. – № 1(1). – С. 19–23.

205. Сергеев А. С. Повышение качества обработки при шлифовании путем уменьшения шероховатости поверхности / А. С. Сергеев, С. А. Дитиненко, Ф. В. Новиков // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії: зб. наук. пр. – Харків: НТУ "ХПІ", 2019. – № 12(1337), 2019. – С. 70–75.

206. Сергеев А. С. Расчет параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке / А. С. Сергеев, Ф. В. Новиков, В. Г. Шкурупий // Перспективні технології та прилади: зб. наук. праць // м. Луцьк, червень 2019. – Луцьк: Луцький НТУ, 2019. – С. 68–74.

207. Сергеев А. С. Условия снижения температуры резания при внутреннем шлифовании / А. С. Сергеев // Вісник Національного технічного університету "ХПІ" : зб. наук. пр. – Харків: НТУ "ХПІ", 2020. – № 2 (2) 2020. – С. 20–23.

208. Сергеев О. С. Теоретичний аналіз технологічних можливостей зменшення шорсткості поверхні при абразивній обробці / О. С. Сергеев, О. О. Анділахай // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. – Маріуполь: ДВНЗ "Приазов. держ. техн. ун-т", 2019. – Вип. 39. – С. 86–93. – URL: DOI: 10.31498/2225-6733.38.2019.

209. Серебрянитский П. П. Краткий справочник станочника / П. П. Серебрянитский. – Ленинград: Лениздат, 1982. – 380 с.

210. Синтетические алмазы в машиностроении / Под ред. В. Н. Бакуля. – Киев: Наук. думка, 1976. – 351 с.

211. Сипайлов В. А. Основы теории тепловых явлений при шлифовании материалов: дис. ... докт. техн. наук: 050301 / В. А. Сипайлов. – Томск: Томский политех. ун-т, 1970. – 450 с.

212. Сипайлов В. А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности / В. А. Сипайлов. – Москва: Машиностроение, 1978. – 166 с.

213. Снижение теплового фактора при плоском абразивном шлифовании / В. М. Тонконогий, А. А. Якимов, Л. В. Бовнегра, С. В. Безнос // Технічні науки та технології : зб. наук. праць. – Чернігів: ЧНТУ, 2017. – Вип. 4 (10). – С. 16–26. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/tnt\\_2017\\_4\\_4](http://nbuv.gov.ua/UJRN/tnt_2017_4_4)  
DOI:10.25140/2411-5363-2017-4(10)-16-26

214. Современные технологии и техническое перевооружение предприятий : монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, А. А. Андилахай, Д. Ф. Новиков, В. И. Полянский. – Днепр: ЛИРА, 2018. – 400 с.

215. Справочник технолога-машиностроителя / под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – Москва: Машиностроение, 1985. – Т.1. – 580 с., Т.2. – 656 с.

216. Стойкость валков чистового холодного проката / Д. А. Драйгор, А. С. Венжега, М. Я. Белкин, Г. И. Вальчук. – Москва: Машиностроение, 1964. – 128 с.

217. Суслов А. Г. Научные основы технологии машиностроения / А. Г. Суслов, А. М. Дальский. – Москва: Машиностроение, 2002. – 684 с.

218. Суслов А. Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А. Г. Суслов. – Москва: Машиностроение, 1987. – 208 с.

219. Тверской М. М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках / М. М. Тверской. – Москва: Машиностроение, 1982. – 208 с.

220. Теоретические основы технологии машиностроения : учебник / А. В. Якимов, Ф. В. Новиков, А. А. Якимов, Г. В. Новиков, Н. И. Решетнев. – Одесса: ОНПУ, 2002. – 491 с.

221. Теория подобия и размерностей / Алабушев П. М. и др. – Москва: Высшая школа, 1968. – 208 с.

222. Технологии производства: проблемы и решения : монография / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, С. А. Дитиненко, А. Г. Крюк,

Н. Ф. Савченко, В. Г. Шкурупий, В. И. Полянский, И. А. Рябенков, Д. Ф. Новиков. – Днепр: ЛИРА, 2018. – 536 с.

223. Технологи и технологии: научно-информационное издание / Ф. В. Новиков, В. А. Жовтобрюх, С. А. Дитиненко, Д. Ф. Новиков. – Днепр: ЛИРА, 2020. – 352 с.

224. Технология машиностроения / Якимов А. В. и др. – Киев – Одесса: Астропринт. 2001. – 608 с.

225. Ткачев М. М. Оцінювання збитків правовласників від контрафактної діяльності на ринку автозапчастин: автореф. ... канд. екон. наук: 08.00.04 / М. М. Ткачев. – Харків: НТУ "ХПИ", 2016. – 22 с.

226. Управление процессом шлифования / А. В. Якимов, А. Н. Паршаков, В. И. Свирцев, В. П. Ларшин. – Киев: Техника, 1983. – 184 с.

227. Фахтудинов И. Р. Конкурентоспособность и качество жизни / И. Р. Фахтудинов // Стандарты и качество. – 2003. – № 5. – С. 70–73.

228. Федосеев О. Б. Шлифование синтетическими сверхтвердыми материалами / О. Б. Федосеев // Изв-я высш. учебн. заведений. Машиностроение. – 1977. – № 5. – С. 104–106.

229. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения: В 10 т. Т. 1. Механика резания материалов / под общ. ред. Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. – Одесса: ОНПУ, 2002. – 580 с.

230. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф. В. Новикова и А. В. Якимова. В 10 т. Т. 7. Точность обработки деталей машин. – Одесса: ОНПУ, 2004. – 546 с.

231. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход) / А. П. Хусу, Ю. Р. Витенберг, В. А. Пальмов. – Москва: Гл. ред. физ.-мат. литературы изд-ва "Наука", 1975. – 344 с.

232. Швец В. В. Некоторые вопросы теории технологии машиностроения / В. В. Швец. – Москва: Машиностроение, 1967. – 63 с.

233. Швец В. В. Распределение технологических процессов обработки в машиностроении по энергетическим уровням и скоростным зонам / В. В. Швец // Вестник машиностроения. – 1967. – № 10. – С. 61–62.

234. Шкурупий В. Г. Аналитическое описание и технологическое обеспечение параметров шероховатости обработки / В. Г. Шкурупий, Ф. В. Новиков // Резание и инструмент в технологических системах: Межд. научн.-техн. сб. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2004. – Вып. 67. – С. 46–56.

235. Шкурупій В. Г. Підвищення ефективності технології фінішної обробки світловідбиваючих поверхонь деталей із тонкого листа і стрічок: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08 / В. Г. Шкурупій. – Одеса, 2006. – 21 с.

236. Шнейдер Ю. Г. Способ образования регулярных микро-рельефов / Ю. Г. Шнейдер. – Машиностроитель. – 1970. – № 9. – С. 11–15.

237. Шталь Т. В. Социальный маркетинг и социальная ответственность бизнеса: взаимосвязи и результаты / Т. В. Шталь, О. О. Тищенко // Маркетинг і менеджмент інновацій. – 2012. – № 4. – С. 97–104.

238. Эндрю Моррис // Financial Times – URL: <https://www.ft.com/>

239. Энциклопедия по машиностроению XXL – URL: <https://mash-xxl.info/page/042122001096066136240140018000015016028014079018/>

240. Якимов А. А. Основы теории обеспечения и стабилизации качества поверхностного слоя при прерывистом шлифовании зубчатых колес / А. А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1997. – 210 с.

241. Якимов А. А. Технологические основы обеспечения и стабилизации качества поверхностного слоя при шлифовании зубчатых колес / А. А. Якимов. – Одесса: Астропринт, 2003. – 453 с.

242. Якимов А. А. Условия возникновения колебаний при резании материалов / А. А. Якимов, Ф. В. Новиков // Труды Одесского политехнического университета. – 2001. – Вып. 5. – С. 15–20.

243. Якимов А. В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей / А. В. Якимов. – Москва: Машиностроение, 1984. – 212 с.

244. Якимов А. В. Исследование влияния режимов, условий шлифования и конструкций композиционных кругов на амплитуду вынужденных колебаний шпинделя / А. В. Якимов, Г. П. Кремнев, В. Б. Наддачин // Управление качеством в механосборочном производстве. – 1981. – С. 6–7.

245. Якимов А. В. Оптимизация процесса шлифования / А. В. Якимов. – Москва: Машиностроение, 1975. – 176 с.

246. Якимов А. В. Прерывистое шлифование / А. В. Якимов. – Киев – Одесса : Изд. объедин. "Вища школа", 1986. – 175 с.

247. Якимов А. В. Устранение дефектов при шлифовании зубчатых колес / А. В. Якимов // Авиационная промышленность. – 1968. – № 5. – С. 35–37.

248. Якимов А. В. Формирование волнистости на обрабатываемой поверхности при шлифовании прерывистыми кругами / А. В. Якимов, В. Б. Наддачин // Технологическое управление триботехническими характеристиками узлов машин : Тез. докл. ВНТК / Под общ. ред. Э. В. Рыжова. – Москва: 1983. – С. 51–53.

249. Якимов Александр Васильевич. К 95-летию со дня рождения: научно-информационное издание / Под редакцией Ф. В. Новикова и А. А. Якимова. – Днепр: ЛИРА, 2020. – 292 с.

250. Якімов О. О. Особливості переривчастого шліфування / О. О. Якімов, Л. В. Бовнегра // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах : міжнар. наук.-техн. журнал. – Хмельницький: Хмельницький нац. ун-т, 2016. – № 1. – С. 179–186.

251. Якімов О. О. Пошук шляхів підвищення продуктивності виготовлення переривчастих абразивних кругів на керамічній зв'язці / О. О. Якімов, Л. В. Бовнегра, Ю. І. Бабіч // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах : міжнар. наук.-техн. журнал. – Хмельницький: Хмельницький нац. ун-т, 2016. – № 2. – С. 55–61.

252. Якушев А. И. Взаимозаменяемость, стандартизация и технические измерения / А. И. Якушев. – Москва: Машиностроение, 1979. – 343 с.

253. Янтовский Е. И. Потоки и энергии / Е. И. Янтовский. – Москва: Наука, 1988. – 143 с.

254. Яркина Т. В. Основы экономики предприятия: краткий курс : учеб. пособие. – Москва: Российский гуманитарный интернет-университет (РГИУ), 2005. – 85 с.

255. Ящерицын П. И. Чистовая обработка деталей в машиностроении / П. И. Ящерицын, А. Н. Мартынов. – Минск: Высш. школа, 1983. – 191 с.

256. Aer M. and Gerz M. (1992). Social Marketing als unternehmerisches Erfolgskonzept. - Stuttgart: [s. n.]. - 280 p.

257. Alexey Yakimov, Isak Karabegovic, Sergey Uminsky, Viktor Strelbitskyi and Julia Shichireva (2021). Stability of the Quality Parameters for the Surface Layer of Pars During Circular Grinding Operations. 2-nd Grabchenko\*s international Conference on Advanced Manufacturing Processes Interpartner-2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. P. 464-476. <https://www.springer.com/gp/book/9783030680138> interpartner 2020, LNME, pp. 464-476, 2021. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-680014-5\\_46](https://doi.org/10.1007/978-3-030-680014-5_46)

258. Carroll A. B. (1991). The Pyramid of Corporate Social Responsibility: Toward the Moral Management of Organizational Stakeholders // *Business and Horizons*. Vol. 34. № 4. 1991. P. 39–48.

259. Hutchings I. M., Winter R. E. and Field J. E. (1976). Solid Particle Erosion of Metals: the Removal of Surface material by Spherical projectiles // *Proceedings of Royal Society*. - V. A-348, № 1654. - P. 379–392.

260. Jacobus K., Devor R. E. and Kapoor S. G. (2000). Machining-Induced residual stress: Experimentation and modeling // *Transaction of the ASME: Journal of manufacturing science and engineering*. 2000, Vol. 122. – P. 20-31.

261. Kotler P. (1997). *Marketing Management*. – 9th edn. Englewood Cliffs NJ, PrenticeHall.

262. Lebedev V., Tonkonogyi V., Yakimov A., Bovnegra L. and Klymenko N. (2019) Provision of the Quality of Manufacturing Gear Wheels in Energy Engineering. In: Ivanov V. et al. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing*. DSMIE 2018. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Part F2, 2019, P. 89-96. ([https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93587-4_10)).

263. Lersen – Basse Jorn. Surface engineering and the new millennium // *Surface Engineering*. – 1998. – V. 14, No 2. – P.18.

264. Nawara L. and Ryniewicz A. (1987). Zastosowanie termowirji do badan cieplych w urzadzeniach technologicznych // *Mechanik*. 1987. 60, No 3. – P. 113-115.

265. Oleksiy Yakimov, Liubov Bovnegra, Vladimir Tonkonogyi, Vladyslav Vaysman, Viktor Strelbitsyi and Inna Sinko (2021). Influence of the geometric characteristics of the discontinuous profile working surfaces of abrasive wheels for precision and temperature when grinding. *Різання та інструменти в технологічних системах*. - KhPI, 2021, № 94. - P. 115-125. DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-7405.2021.94.13>

266. Reidenbach R. E. and Robin P. A. (1991). Conceptual Model of Corporate Moral Development // *Journal of Business Ethics*, April. 1991. – P. 30-37.

267. Tonkonogyi Vladimir, Yakimov Alexey and Bovnegra Liubov (2019). Increase of Performance of Grinding by Plate Circles. I. Karabegovic (Ed.): *NT 2018. LNNS 42*, pp. 121-127. ([https://doi.org/10.1007/978-3-319-90893-9\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-319-90893-9_14))

268. Tonkonogyi, Vladimir & Sidelnykova, Tetiana & Dasic, Predrag & Yakimov, Alexey & Bovnegra, Liubov. (2020). Improving the Performance Properties of Abrasive Tools at the Stage of Their Operation. I. Karabegovic (Ed): NT 2019, LNNS 76, pp.136-145, 2020. ([https://doi.org/10.1007/978-3-030-18072-0\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-18072-0_15)).

269. Tonkonogyi V., Yakimov A., Bovnegra L., Sidelnykova T., Dašić P. (2019) The use of intermittent wheels, impregnated by the contact method to reduce the thermal stress of the grinding process. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 708, Issue 1, December 2019. (DOI: 10.1088/1757-899X/708/1/012034).



## Оглавление

Введение .....	3
Раздел 1. Инженерное образование и развитие технологий .....	5
1.1. Современное инженерное образование .....	5
1.1.1. Проблема инженерного образования XXI века .....	5
1.1.2. Концепция инженерного образования XXI века ...	6
1.1.3. Виртуальное обучение – новый стиль инженерно- го образования XXI века .....	8
1.1.4. Глобализация и инженерное образование XXI века..	10
1.1.5. Дистанционное обучение – путь в инженерное об- разование XXI века .....	13
1.1.6. Ступени образования и квалификации инженеров в XXI веке .....	16
1.1.7. О профессоре Добровольском Викторе Афанасьевиче .....	19
1.1.8. Конкуренция в инженерном образовании .....	25
1.2. Новые направления развития науки о технологии машиностроения .....	30
1.2.1. Энергетические проблемы современной техноло- гии машиностроения .....	30
1.2.2. Энергетическая эффективность технологических процессов .....	37
1.2.3. Технологическая энергоэкономика .....	40
1.2.4. О классификации технологических процессов и физических закономерностях .....	43
1.2.5. Энергетические критерии в технологии машино- строения .....	45
1.2.6. Исследование структуры процессов в машино- строении .....	53
1.2.7. Обоснование и выбор финишных операций меха- нообработки по энергетическому критерию .....	56
Выводы .....	59
Раздел 2. Современные металлообрабатывающие станки с ЧПУ и их технологические возможности .....	60

2.1. Высокоэффективный станок для аэрокосмической промышленности .....	60
2.2. Использование оборудования DOOSAN по максимуму: важность постпроцессирования в ЧПУ .....	63
2.3. Эффективное применение современных обрабатывающих центров с ЧПУ – 8 бонусов украинским пользователям оборудования DOOSAN .....	68
2.4. Оборудование для 5-осевой обработки: изготавливаем сложные детали за один установ .....	78
2.5. Удваиваем производство с новыми двухшпиндельными токарными станками PUMA! .....	87
2.6. Самый популярный токарный центр DOOSAN LYNX 2100 расширяет свои возможности! .....	90
Выводы .....	100
Раздел 3. Теоретическое обоснование основных направлений уменьшения энергоемкости и повышения качества, точности и производительности механической обработки...	101
3.1. Аналитическое описание и анализ энергоемкости обработки при шлифовании .....	102
3.2. Аналитическое описание и анализ энергоемкости обработки лезвийным инструментом .....	108
3.3. Уточненный анализ коэффициента шлифования и условного напряжения резания .....	117
3.4. Повышение производительности шлифования при низкой жесткости технологической системы .....	124
3.5. Определение условий осуществления процессов резания и пластического деформирования .....	129
3.6. Определение условий уменьшения силовой напряженности процесса шлифования .....	136
3.7. Условия возникновения и пути устранения колебаний при шлифовании .....	141
3.8. Выбор оптимального варианта операции шлифования по критериям производительности и точности обработки ...	151
3.9. Определение условий повышения производительности и качества обработки при шлифовании по температурному критерию .....	161

3.10. Технологическое обеспечение параметров точности и качества механической обработки материалов резанием.	169
Выводы .....	175
Раздел 4. Связь прерывистости процесса резания с динамическими и технологическими параметрами при шлифовании .....	177
4.1. Состояние вопроса о формировании рельефа шлифованной поверхности .....	178
4.1.1. Процесс формирования геометрических параметров, в частности шероховатости и волнистости, на поверхности обработки .....	178
4.1.2. Взаимосвязь формообразующей кромки прерывистого круга с обрабатываемой поверхностью ....	180
4.2. Построение модели образования волнистости на обрабатываемой поверхности при прерывистом шлифовании .....	182
4.2.1. Определение траектории движения оси шлифовального круга .....	185
4.2.2. Определение амплитуды высокочастотных вынужденных колебаний .....	200
4.2.3. Математическая модель образования волнистости на обрабатываемой поверхности при шлифовании прерывистыми кругами .....	214
4.2.4. Связь прерывистости с температурой процесса шлифования .....	231
Выводы .....	233
Раздел 5. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя зубьев высокоточных зубчатых колес при шлифовании .....	234
5.1. Поверхностные дефекты шлифования зубчатых колес и причины их возникновения .....	234
5.2. Анализ причин, вызывающих преждевременный выход из строя зубчатых колес в условиях эксплуатации .....	242
5.3. Анализ факторов, ограничивающих производительность шлифования зубчатых колес .....	245
5.4. Тепловые процессы при зубошлифовании .....	248

5.5. Технологические методы повышения качества изготовления высокоточных зубчатых колес .....	254
5.6. Обоснование актуальности объекта исследования .....	258
5.7. Аналитическое определение интенсивности теплового потока, формируемого при зубошлифовании тарельчатыми кругами на станках, работающих по нулевой схеме	260
5.8. Теоретическое обоснование возможности обеспечения качества поверхностного слоя зубьев шестерен за счет применения прерывистых шлифовальных кругов .....	266
5.9. Технологические предпосылки предотвращения появления прижогов на обрабатываемых поверхностях при зубошлифовании на станках, работающих тарельчатыми кругами .....	276
5.10. Аналитическое определение температур, возникающих на различных участках рабочего профиля зуба при шлифовании на станках, работающих двумя тарельчатыми кругами .....	279
5.11. Обоснование возможности повышения производительности обработки на зубошлифовальных станках, работающих тарельчатыми кругами .....	289
Выводы .....	292
Раздел 6. Закономерности и технологические возможности абразивной обработки деталей затопленными струями .....	294
6.1. Анализ механизма взаимодействия абразивных зерен и металлических деталей в жидкой струе .....	295
6.2. Исследование формообразования поверхности обрабатываемой детали в процессе абразивной обработки затопленными струями .....	307
6.3. Исследование напряжений в поверхностном слое детали после абразивной обработки затопленными струями.	308
6.4. Разработка математической модели энергетических возможностей затопленных воздушных струй при воздействии на обрабатываемые детали .....	310
6.5. Исследование влияния технологических и конструктивных параметров на производительность и качество обработки .....	315

6.5.1. Исследование влияния конструктивных особенностей рабочей камеры на производительность процесса .....	315
6.5.2. Зависимость производительности обработки от конфигурации воздушных сопел .....	321
6.6. Экспериментальные исследования производительности процесса и режимов обработки .....	323
6.6.1. Рабочая жидкость .....	324
6.6.2. Абразивный материал .....	325
6.6.3. Обрабатываемые детали .....	328
6.7. Выбор и обоснование оптимальных режимов абразивной обработки затопленными струями .....	332
6.8. Оборудование для обработки деталей затопленными струями .....	334
Выводы .....	339
Раздел 7. Технологическое обеспечение качества абразивной обработки внутренних поверхностей в гидро- и пневмоцилиндрах .....	341
7.1. Теоретический анализ условий уменьшения шероховатости поверхности с учетом вероятностного участия абразивных зерен шлифовального круга в резании .....	342
7.2. Упрощенный подход к определению условий эффективного применения финишной абразивной обработки для уменьшения шероховатости поверхности .....	350
7.3. Развитие теоретико-вероятностного подхода к определению параметров шероховатости поверхности при шлифовании .....	358
7.4. Расчет параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке с учетом износа режущих зерен шлифовального круга .....	363
7.5. Теоретический анализ технологических возможностей уменьшения шероховатости поверхности при абразивной обработке .....	369
7.6. Повышение качества и производительности обработки отверстий при внутреннем шлифовании .....	375

7.7. Разработка эффективного метода внутреннего шлифования и обоснование его технологических возможностей .....	382
7.8. Условия снижения температуры резания при внутреннем шлифовании .....	389
7.9. Экспериментальная оценка полученных теоретических решений .....	393
Выводы .....	407
Раздел 8. Социально ответственный маркетинг в управлении прибылью машиностроительного предприятия .....	409
8.1. Социально-ответственный маркетинг на промышленном рынке .....	409
8.2. Социально ответственный маркетинг в управлении качеством и конкурентоспособностью машиностроительной продукции .....	412
8.3. Эффективное управление технологиями машиностроительных предприятий – важный фактор повышения качества их продукции, социальной ответственности, увеличения прибыли и конкурентоспособности .....	421
8.4. Социально ответственный маркетинг в металлообработке и его влияние на прибыль предприятия .....	430
8.5. Инструментальный менеджмент .....	438
Выводы .....	443
Общие выводы .....	447
Список использованных источников .....	449

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**Новіков Федір Васильович  
Жовтобрюх Валерій Олексійович  
Гусарєв Володимир Сергійович  
Наддачин Валерій Борисович  
Якимов Олексій Олександрович  
Анділахай Олександр Олександрович  
Сергєєв Олександр Сергійович  
Новіков Дмитро Федорович**

# **Інноваційний розвиток сучасних технологій**

**Монографія**

*(Російською мовою)*

Відповідальний за випуск **Новіков Ф. В.**

В авторській редакції

Підп. до друку 28.08.2021 р.  
Формат 60x84/16. Друк офсетний. Ум.-друк. арк. 27,9.  
Наклад 300 пр. Заказ № 209.

Видавництво і друкарня ПП "Ліра ЛТД"  
49107, м. Дніпро, вул. Наукова, 5  
Свідоцтво про внесення до Держреєстру  
ДК № 6042 від 26.02.2018.