

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ОДЕССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. СЕМЕНА КУЗНЕЦА  
ИНЖЕНЕРНАЯ АКАДЕМИЯ УКРАИНЫ  
АССОЦИАЦИЯ ТЕХНОЛОГОВ-МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ УКРАИНЫ  
ИНСТИТУТ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ИМ. В.Н. БАКУЛЯ НАН УКРАИНЫ  
КАФЕДРА ЮНЕСКО «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И  
АДАПТАЦИЯ НЕТРАДИЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ К ПРОБЛЕМАМ  
ПЕРСПЕКТИВНОГО ОБУЧЕНИЯ И ОБЩЕСТВЕННОГО ПРОГРЕССА»  
ООО ХК «МИКРОН»  
ООО «ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР «ВАРИУС»  
ПАО ОДЕССКИЙ КАБЕЛЬНЫЙ ЗАВОД «ОДЕСКАБЕЛЬ»  
ФИРМА «ДИМЕРУС ИНЖЕНЕРИНГ» ООО  
ООО «ИМПЕРИЯ МЕТАЛЛОВ»

# **НОВЫЕ И НЕТРАДИЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИИ**

*Материалы международной научно-технической  
конференции*

*20-22 сентября 2017 года*

Одесса – 2017

**Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении:** Материалы международной научно-технической конференции, 20–22 сентября 2017 г., г. Одесса. – Одесса: ОНПУ, 2017. – 148 с.

#### **ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ**

1. Перспективные технологии и производственные процессы будущего.
2. Современные ресурсосберегающие технологии.
3. Микро- и нанотехнологии в промышленности.
4. Высокопроизводительные инструменты и процессы в материалообработке.
5. Автоматизация технологических процессов в машиностроении и энергетике.
6. Метрологическое обеспечение новых и нетрадиционных технологий.
7. Экологическо-энергетические нетрадиционные технологии и перспективные направления их развития.
8. Технологическая динамика.
9. Методологические вопросы высшего образования в области новых технологий.

Материалы представлены в авторской редакции.

## **ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ БІОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРСТИК СИСТЕМИ «СПОРТСМЕН-ЖЕРДИНА»**

Результат стрибка з жердиною залежить від різних факторів, наприклад, від висоти хвату та виконання певних вправ за годину розбігу і вису на жердині за обмежений годину стрибка. Розбіг у стрибку з жердиною включає вихідне положення стрибуну перед стрибком і винесення з постановкою жердини в упор. Початкове положення спортсмена, що тримає жердину з точки зору ширини захвату між руками залежить від довжини рук, ширини плечей, рухливості в плечових і променезап'ясткових суглобах. Висота хвату залежить від швидкості розбігу, виносу і способу постановки жердини в ящик для упору та переходу від відштовхування у вис, а також від здатності координувати свої рухи у розбігу, тобто в якій степені стрибун володіє технікою стрибка.

В значній мірі цьому сприяє правильний спосіб тримання жердини і ширина захвату, тобто відстань між кистями рук. Максимальне згинання жердини настає в тій момент, коли тулуб стрибуну займає горизонтальне положення до землі. Характеристики фази відштовхування визначаються в основному біомеханічними характеристиками, які здатні реалізувати спортсмен, а саме: швидкістю останніх кроків у розбігу, кутом відштовхування і постановки жердини, висотою положення центру маси спортсмена.

Постановку жердини в упор представляють як динамічний удар енергію якого амортизує (поглинає) еластична жердину і зв'язкового-сухожильний апарат спортсмена. За даними тензометричних досліджень, виникаючі при цьому вертикальні і горизонтальні «упорові» зусилля дуже значні.

Опорна частина стрибка включає фази «вис-замах», «помах», «розгинання», «підтягування», «віджимання». Вона триває з моменту відриву поштовхою ноги спортсмена від поверхні до моменту відпускання жердини і включає рухи вису-замаху, помаху, розгинання, підтягування з поворотом і віджимання.

Біомеханічною основою техніки опорної частини стрибка з жердиною є система маятників, які динамічне взаємно впливають один на одного. Основою техніки махових рухів в стрибку з жердиною є механіка маятника. Таких маятників, три: перший утворюється при обертанні опущеної в ящик для упору жердини, другий – при обертанні тіла стрибуну навколо кистей рук, плечового поясу, третій – при обертанні ніг спортсмена в тазостегнових суглобах по відношенню до тулуба всі три маятника складно взаємодіють між собою залежно від амплітуди рухів спортсмена і кутових швидкостей переміщення ланок тіла.

Кутова швидкість руху жердини залежить від довжини, маси та змінного осьового моменту інерції «спортсмен-жердина». Вкорочення хорди жердини сприяє просуванню системи «стрибун-жердину» до вертикалі, як і за умови

найбільшого видалення загального центру ваги стрибуну в момент обертання навколо місць хвата за жердину. Збільшення хорди жердини, наближення загального центру мас тяжіння стрибуну до осі обертання – зменшує можливість просування даної системи до вертикалі. В результаті укорочення радіусу обертання навколо місць захоплення за жердину, збільшується кутова швидкість в другому маятнику, що позитивно позначається на результаті в стрибку. Знаходження найбільш раціональних біомеханічних характеристик поліпшить техніку виконання цієї частини стрибка.

У розрахунковій схемі фази відштовхування розглядаються біомеханічні характеристики, які здатен реалізувати спортсмен, а саме: швидкість останніх кроків у розбігу, кут відштовхування і постановки жердини, висота положення центру маси спортсмена з використанням пружної жердини, яка представлена як вагомий пружний, стрижень. Спортсмен як тіло розміщено посередині між місцем відштовхування і верхньою точкою хвату. Розрахункова схема та математична модель для визначення раціональних біомеханічних характеристик у фазі відштовхування та вису включала: сили тяжіння системи «спортсмен-жердина», змінну по величині силу аеродинамічного опору залежно від міделя, силу пружності жердини, початкову швидкість відштовхування, висоту центру мас тіла при відштовхуванні, з урахуванням кутів вильоту центру мас спортсмена під час відштовхування, для конкретних фізичних параметрів спортсменів.

Вважатимемо, що тіло спортсмена у фазі польоту рухається в сагітальній анатомічній площині. Результати розрахунків, які отримані при реалізації фізико-математичні моделі динамічної системи «спортсмен-жердина», визначені раціональні біомеханічні характеристики необхідних дій спортсмена.

Для складання фізико-математичної моделі динамічної системи «спортсмен-жердина» необхідно провести дослідження також механічних характеристик системи «спортсмен-жердина».

Механічні характеристики включають : жорсткість та деформацію жердини, момент інерції системи «спортсмен - жердина» відносно осі обертання жердини, з обліком форми жердини при переході від відштовхування у вис.

У розрахунковій схемі фази відштовхування з використанням пружної жердини, яка представлена як вагомий пружний, стрижень, спортсмен як тіло розміщено між місцем відштовхування і точкою хватові. Кінцівки стрибуну – набір вагомих, нерозтяжних, жорстко зафіксованих стрижнів .

Жорсткість жердини вибирається залежно від висоти хватові, довжини і маси тіла спортсмена, швидкості розгону, висоти установки планки і ряду інших чинників. Сила пружності прийнята спрямованої по хорді, що сполучає верхній і нижній кінці зогнутого жердини.

Деформація жердини при висі спортсмена повинна мати, як найбільш раціональну, форму дуги частини загального кола зігнутої жердини.

Осьовий момент інерції визначається як сумарний відносно осі що проходить через центр мас спортсмена і жердини паралельної осі обертання жердини помноженій на квадрат відстані між цими осями. При цьому відстань між осями змінно залежно від кута повороту жердини і спортсмена. Все вищевикладені

механічні характеристик враховуються у фізико-математичної моделі динамічної системи «спортсмен-жердина».

Для визначення основних біомеханічних характеристик були складені фізико - математичні моделі динамічної системи «спортсмен-жердина». Вирішення цього завдання вимагає інтегрування диференціальних рівнянь руху. Така операція легко виконується за допомогою спеціального програмного комплексу «КІДІМ», розробленого на кафедрі теоретичної механіки НТУ «ХПІ».

Виконані розрахунки за допомогою фізико-математичної моделі та отримані графічні характеристики рівнянь руху, траєкторії польоту центру мас тіла спортсмена залежно від початкової швидкості вильоту, висоти хвату, кута вильоту, способу постановки жердини, висоти відштовхування центру мас спортсмена, сил опору середовища, сил реакцій опори, сил пружності жердини та інше. Аналіз графічних характеристик виявив, що високий результат у стрибках с жердиною можливо реалізувати для жінок, наприклад, при раціональних початкових параметрах коли:

- початкова швидкість вильоту центру мас тіла - (8 - 8,5 м / с);
- кут вильоту центру мас тіла по відношенню до горизонталі – (30° - 35°);
- висота відштовхування центру мас спортсмена залежить від конкретних фізичних параметрів спортсменів і досягає над поверхнею  $= (1 - 1,5\text{м})$ ;
- висота хвату над поверхне – (1,5 - 1,7м);
- сили опору середовища на 0,3 - 0.5 % зменшують результат стрибка;
- загальні сили реакцій опори жердини складають – (2 - 3 кН);
- жорсткість та деформація жердини різні залежно від фізичних можливостей спортсмена та умов змагань;
- тривалість фази польотної частини стрибка з жердиною – (1 - 1,5с.).

Фізико-математична модель для визначення основних біомеханічних характеристик і результати, отримані при реалізації фізико-математичні моделі динамічної системи «спортсмен-жердина», визначили раціональні біомеханічні характеристики необхідних дій спортсмена.

Аналіз цих графічних біомеханічних характеристик дозволить в комплексі вибрати найбільш ефективні з них для поліпшення загального результату. Використання на практиці вище перелічених досліджень для визначення раціональних біомеханічних характеристик, дозволять поліпшити техніку стрибків з урахуванням конкретних фізичних параметрів спортсменів. Результати теоретичних і практичних досліджень, можуть бути використані як для спортсменів високого рівня, так і при підготовці спортсменів - новачків для реалізації високого результату у стрибках с жердиною, як для спортсменів чоловіків та жінок.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Адашевский В.М. Теоретические основы механики биосистем / Адашевский В. М. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2001. – 260 с.
2. Адашевський В.М. Метрологія у спорті: навчально-методичний посібник для студентів спеціальностей фізичного виховання / В.М. Адашевський. – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – 76 с.

## РОЗРОБКА УСТАНОВОК ДЛЯ АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ЗАТОПЛЕНИМИ СТРУМЕНЯМИ

У процесі дослідження методу абразивної обробки затопленими струменями [1] виявлена можливість збільшення як одиничної, так і сумарної маси оброблюваних деталей і відповідно продуктивності обробки за рахунок накладення вібрацій на робочу камеру, у якій здійснюється процес обробки. На основі цих досліджень була створена установка (рис. 1) з одночасним видаленням задирок затопленими струменями, які пульсують із частотою, що дорівнює частоті власних коливань робочої камери. У результаті обробки на деталях утворюється матова поверхня, завдяки чому вони набувають товарного вигляду.

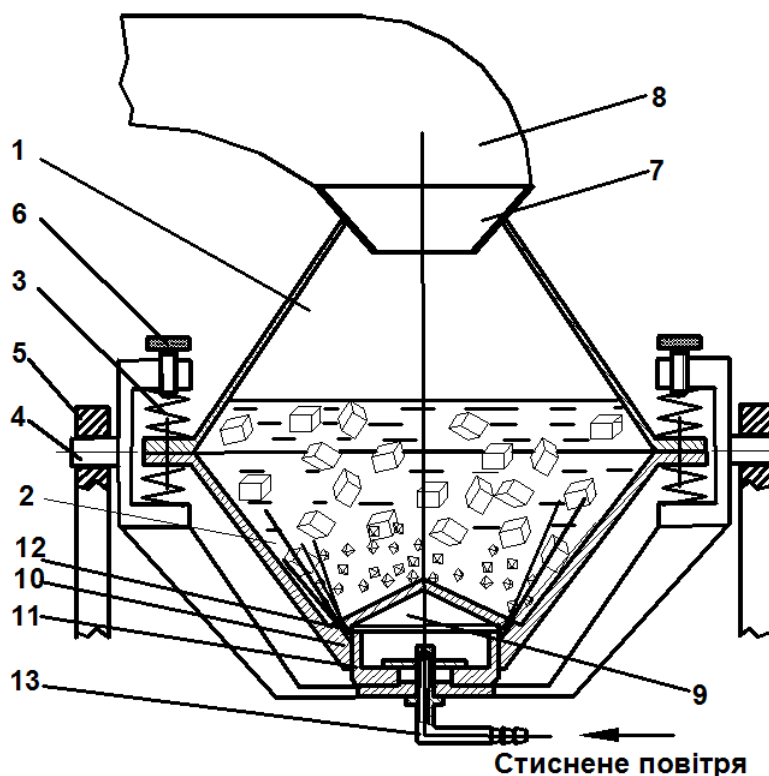
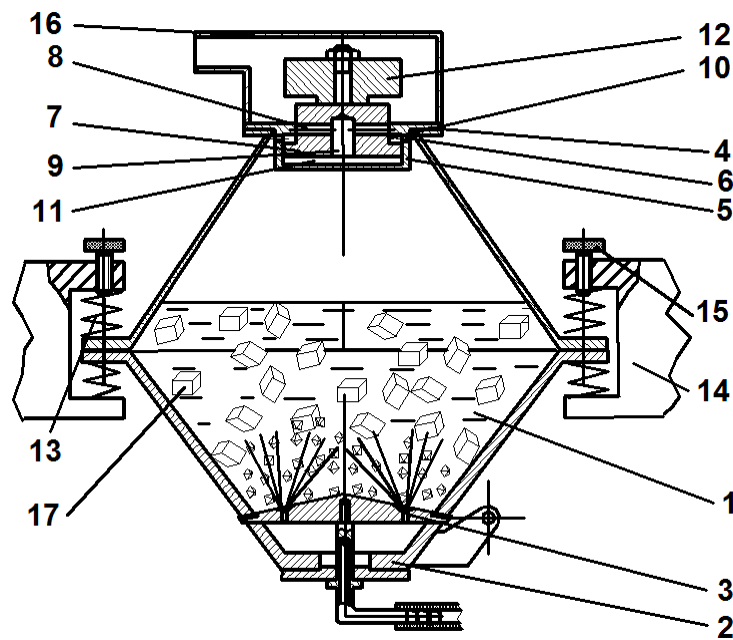


Рисунок 1. – Установка для абразивної обробки дрібних деталей  
затопленими струменями

Установка складається з робочої камери, складеної з двох зрізаних конусів 1 і 2, з'єднаних між собою великими основами. Кромки основ розміщені в цапфах і затиснуті пружинами 3, жорсткість яких регулюється гвинтами 6. У верхній частині робочої камери встановлено захисний конус 7 з рукавом 8 для відведення. Дно робочої камери закрито конусом 9 з юбкою 10 та з сопловими отворами 12. Нерухома частина робочої камери 11 виконана у вигляді поршня, який перекриває соплові отвори 12.

У процесі обробки на деталі діють три основні фактори, які забезпечують інтенсивне переміщення й знімання металу: вібраційна дія гідро-абразивного середовища; струминна обробка затопленим пульсаційним струменем; кавітаційна дія, яка виникає в разі різких змін швидкості потоку, пов'язаних із пульсацією струменів стисненого повітря.

Вплив пульсацій струменів на продуктивність процесу обумовлений наступним. Експериментально встановлено, що чим більше абразивних зерен приєднається до струменя стисненого повітря, тим більшою буде продуктивність обробки. Отже, пульсація струменів створює умови (паузи), необхідні для заповнення абразивними зернами об'єму перед соплом. Це забезпечує прискорення абразивним зернам з кожним наступним імпульсом подачі стисненого повітря й відповідно збільшення кінетичної енергії зерен та продуктивності обробки. В зв'язку з цим, установка для абразивної обробки затопленими струменями набула подальшого вдосконалення. Нове технічне рішення до наявних корисних властивостей, спрямованих на підвищення продуктивності пристрою, додало ще одну властивість – надлишковий пульсаційний тиск у робочій камері, завдяки чому посилилася гідродинамічна кавітація, корисність якої уже відзначалася. Крім того, піднято рівень експлуатаційної технологічності установки за рахунок того, що пневматичний вібропривід віддалено від абразивної суспензії.



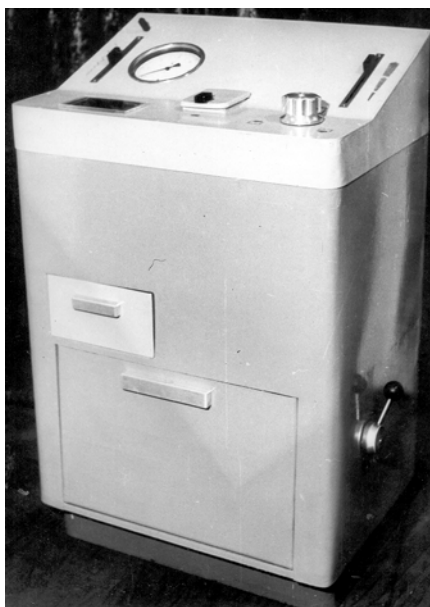
*Рисунок 2. – Схема установки для абразивної обробки деталей затопленими струменями*

На рис. 2 наведено схему установки для абразивної обробки затопленими струменями із пневматичним вібратором на виході. Установка складається з робочої камери 1, у нижній частині якої змонтований вивантажувальний люк 2 з повітряними соплами 3 для подання стисненого повітря в робочу камеру 1. Зверху робоча камера закривається кришкою 4, у якій змонтований корпус пне-

вматичного вібратора 5 з отворами 6. У корпусі 5 розміщено східчастий поршень 7 зі сполученими каналами 8 і 9. Поршень і корпус утворюють кільцеву порожнину 10 і кругову порожнину 11.

Зовнішня частина поршня виготовлена з можливістю кріплення змінного вантажу 12 для регулювання амплітудно-частотної характеристики вібратора. Робоча камера 1 підвішена на пружних елементах 13 у нерухомих опорах 14 з гвинтами 15 для регулювання жорсткості пружних елементів. Зверху робоча камера 1 має кожух 16 для відведення відпрацьованого стисненого повітря.

Таким чином, процес обробки деталей супроводжується вібрацією робочої камери, що сприяє обробці й перемішуванню деталей; дією струменів, які забезпечують всебічну обробку деталей; пульсацією струменів стисненого повітря, яка забезпечує багаторазову дію струменів на деталі; пульсуючим надлишковим тиском у робочій камері, що призводить до виникнення нового ефекту – гідродинамічної кавітації, яка руйнує задирки у важкодоступних місцях деталей. При цьому в установці виключається можливість влучення абразивних зерен і рідини на поверхні тертя пневматичного вібратора, чим досягається надійна робота установки. Крім того, звільнення нижньої частини робочої камери від пневматичного вібратора уможливорює вивантаження вмісту через її нижню частину, наприклад, за допомогою люка 2.



*Рисунок 3. – Установка для абразивної обробки затопленими струменями*

Визначено оптимальні конструктивні й технологічні параметри установок для абразивної обробки затопленими струменями, які дозволяють обґрунтовано вибирати кількість і геометричні розміри конструктивних елементів, а також установлювати раціональні режими обробки, що забезпечують максимально можливу продуктивність за заданою шорсткістю обробки.

Проведені дослідження на установці-напівавтоматі показали можливість збільшення продуктивності обробки у випадку забезпечення необхідної якості оброблених поверхонь порівняно з використовуваними базовими установками. Установлено, що в процесі обробки забезпечується округлення кромek деталей, усуваються задирки, сліди корозії й різні неоднорідності на оброблюваних поверхнях, утворюється однорідна матова поверхня із шорсткістю в межах  $Ra = 0,8 \dots 1,25$  мкм зі зміцнювальним наклепом (стискальними напруженнями глибиною 5 – 6 мкм).

Установлено, що в процесі обробки забезпечується округлення кромek деталей, усуваються задирки, сліди корозії й різні неоднорідності на оброблюваних поверхнях, утворюється однорідна матова поверхня із шорсткістю в межах  $Ra = 0,8 \dots 1,25$  мкм зі зміцнювальним наклепом (стискальними напруженнями глибиною 5 – 6 мкм).

## ЛІТЕРАТУРА

1. Андилахай А. А. Абразивная обработка деталей затопленными струями / А. А. Андилахай. – Мариуполь: ПГТУ, 2006. – 190 с.



*Анкуда С.Н., Хейфец И.М.*  
Белорусский государственный университет информатики и  
радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь

*Алексеева Т.А.*

Полоцкий государственный университет,  
Новополоцк, Республика Беларусь

*Федоров В.П.*

Брянский государственный технический университет,  
Брянск, Российская Федерация

## **ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

Технологический процесс современного машиностроительного производства представляет собой сложную систему, так как в общем случае он может включать совокупность различных механических, термомеханических, физико-химических, ионно-лучевых и др. превращений, а также организационно-технических мероприятий, приводящих к получению материалов, заготовок, деталей машин с заданными свойствами. В качестве элементов такие системы включают как детали, инструменты, средства оснащения, измерения и др. объекты, так и реакции, явления, эффекты и др. элементарные процессы. Все это соответствует такому общему понятию, как система – совокупность определенным образом упорядоченных элементов. Взаимосвязанные и взаимодействующие между собой и внешней средой элементы объединяются в единое целое по некоторым общим признакам. Сущность системы и ее функций невозможно понять, рассматривая только свойства ее отдельных элементов и не учитывая их внутренних связей и взаимодействия с окружающей средой.

**Системный подход** к исследованию и описанию технологических процессов основан на декомпозиции системы на более простые подсистемы, взаимодействующие между собой, раздельном изучении их структуры и функций с последующим синтезом полученных сведений. При синтезе учитываются выявленная иерархия процессов по масштабам области действия, их пространственное расположение и временная последовательность, а также *синергетические эффекты*, общее действие которых превышает кажущуюся сумму отдельно взятых воздействий.

Составляющие сложный процесс элементарные явления протекают в областях, масштабы которых различаются от н и з ш е г о (уровень атомов и молекул) до в ы с ш е г о (уровень технологической системы, участка или производства). Эта особенность находит отражение в иерархической структуре модели, которую целесообразно строить путем последовательного перехода в описании процесса с одного уровня на другой.

*Атомный* или *молекулярный уровень* описывает физико-химические процессы микрокинетики, протекающие в областях, имеющих масштаб расстояний

между атомами. *Уровень частиц малого объема* описывает процессы в масштабе отдельных включений, фаз, структур и т.п. для неоднородной (негомогенной) технологической среды. Эти два уровня должны дополняться явлениями макрокинетики: тепло- и массопереноса, упругости и пластичности в однородной (гомогенной) среде с изотропными и анизотропными свойствами.

*Уровень рабочей зоны технологической системы* описывает процессы в областях, размеры которых соответствуют крупным агрегатам частиц: зонам термического влияния, деформации, диффузии, оплавления и т.п. Этот уровень учитывает характер движения потоков вещества и энергии. *Уровень технологической системы* (процесса и установки) учитывает взаимное расположение и размеры рабочих зон и элементов системы, последовательность технологических воздействий.

Кроме того, различные виды воздействий имеют свой структурный уровень эффектов и явлений. Так, для деформационных процессов используются структурные уровни, описывающие иерархию от молекулярного масштаба до размеров малых частиц разрушения.

Модель каждого уровня содержит в свернутом виде модели более низких уровней и соотношения, описывающие переход с одного уровня на другой.

Системный подход позволяет анализировать и моделировать технологический процесс, представленный в виде отдельных блоков, что существенно упрощает описание сложных явлений, не упуская из вида пространственно-временную структуру моделируемой системы, характер связи между отдельными уровнями и подсистемами.

Создаваемая модель  $M$  с точки зрения системного подхода тоже является системой, т.е.  $S' = S''(M)$ , и может рассматриваться по отношению к внешней среде  $E$ . Наиболее просты модели, в которых сохраняется прямая аналогия явления. Применяют также модели, в которых нет прямой аналогии, а сохраняются лишь законы и общие закономерности поведения элементов системы  $S$ . Правильное понимание взаимосвязей как внутри самой модели  $M$ , так и взаимодействия ее с внешней средой  $E$  в значительной степени определяется тем, на каком уровне находится наблюдатель.

Имеются существенные различия между классическим и системным подходами.

**Классический подход** к синтезу модели предусматривает изучение взаимосвязей между отдельными частями модели путём рассмотрения их как отражения связей между отдельными подсистемами объекта. Такой классический подход может быть использован при создании достаточно простых моделей. Реальный объект, подлежащий моделированию, разбивается на отдельные подсистемы, т.е. выбираются исходные данные  $D$  для моделирования и ставятся цели  $C$ , отображающие отдельные стороны процесса моделирования. По отдельной совокупности исходных данных  $D$  ставится цель моделирования отдельной стороны функционирования системы, на базе этой цели формируется некоторая компонента  $K$  будущей модели. Совокупность компонент объединяется в модель  $M$ . Таким образом, разработка модели  $M$  на базе классического

подхода означает суммирование отдельных компонент в единую модель, причём каждая из компонент решает свои собственные задачи и изолирована от других частей модели. Поэтому классический подход может быть использован для реализации сравнительно простых моделей, в которых возможно разделение и взаимно независимое рассмотрение отдельных сторон функционирования реального объекта. Для модели сложного объекта такая разобщённость решаемых задач недоступна, так как приводит к значительным затратам ресурсов при реализации модели на базе программно-технических средств. Можно отметить две отличительные стороны классического подхода: наблюдается движение от частного к общему, создаваемая модель образуется путем суммирования отдельных ее компонент и не учитывается возникновение нового системного эффекта.

С усложнением объекта моделирования возникает необходимость наблюдения их с более высокого уровня. В этом случае разработчик рассматривает данную систему  $S$  как некоторую подсистему какой-то метасистемы, т.е. системы более высокого ранга, и вынужден перейти на позиции системного подхода, который позволит ему построить не только исследуемую систему, решающую совокупность задач, но и создавать систему, являющуюся составной частью метасистемы.

**Системный подход** наиболее эффективен при исследовании сложных реальных технических систем производства, когда сказывается недостаточность, а зачастую ошибочность принятия каких-либо частных решений. Возникновение системного подхода обусловило увеличивающееся количество исходных данных при разработке, необходимость учёта стохастических связей в системе и воздействий внешней среды  $E$ . Системный подход позволяет решить проблему построения сложной системы с учетом всех факторов и возможностей, пропорциональных их значимости, на всех этапах исследования системы  $S$  и построения модели  $M$ . Он означает, что каждая система  $S$  является интегрированным целым даже тогда, когда она состоит из отдельных разобщенных подсистем. Таким образом, в основе системного подхода лежит рассмотрение системы как интегрированного целого, причем это рассмотрение при разработке начинается с главного – формулировки цели функционирования.

В процессе синтеза модели на основе исходных данных  $D$ , которые известны из анализа внешней среды, тех ограничений, которые накладываются на систему сверху либо исходя из возможностей ее реализации, и на основе цели функционирования  $C$  формулируются исходные требования  $T$  к модели системы  $S$ . На базе этих требований формируются ориентировочно некоторые подсистемы  $P$ , элементы  $\mathcal{E}$  и осуществляется наиболее сложный этап синтеза – выбор  $B$  составляющих системы, для чего используются специальные критерии выбора  $KB$ .

При моделировании необходимо обеспечить максимальную эффективность модели системы. Эффективность обычно определяется как некоторая разность между какими-то показателями ценности результатов, полученных в итоге эксплуатации модели, и теми затратами, которые были вложены в ее раз-

работку и создание. Системный подход предполагает и некоторую последовательность разработки моделей, заключающуюся в выделении двух основных стадий проектирования: *макропроектирование* и *микропроектирование*.

**Стадия макропроектирования** – на основе данных о реальной системе  $S$  и внешней среде  $E$  строится модель внешней среды, выявляются ресурсы и ограничения для построения модели системы, выбираются модель системы и критерии, позволяющие оценить адекватность модели  $M$  реальной системы  $S$ . Построив модель системы и модель внешней среды, на основе критерия эффективности функционирования системы в процессе моделирования выбирают оптимальную стратегию управления, что позволяет реализовать возможность модели по воспроизведению отдельных сторон функционирования реальной системы  $S$ .

**Стадия микропроектирования** в значительной степени зависит от конкретного типа выбранной модели. В случае имитационной модели необходимо обеспечить создание информационного, математического, технического и программного обеспечения системы моделирования. На этой стадии можно установить основные характеристики созданной модели, оценить время работы с ней и затраты ресурсов для получения заданного качества соответствия модели процессу функционирования системы  $S$ .

Независимо от типа используемой модели  $M$  при ее построении необходимо руководствоваться рядом принципов системного подхода: пропорционально-последовательное продвижение по этапам и направлениям создания модели; согласование информационных, ресурсных и других характеристик; правильное соотношение отдельных уровней иерархии в системе моделирования; целостность отдельных обособленных стадий построения модели.

Построение модели относится к числу системных задач, при решении которых синтезируют решения на базе огромного числа исходных данных, на основе предложений больших коллективов специалистов. Использование системного подхода в этих условиях позволяет не только построить модель реального объекта, но и на базе этой модели выбрать необходимое количество управляющей информации в реальной системе, оценить показатели ее функционирования и тем самым на базе моделирования найти наиболее эффективный вариант построения и выгодный режим функционирования реальной системы  $S$ .

После построения модели следующая проблема – это работа с ней, т.е. реализация модели, основные задачи которой состоят в минимизации времени получения конечных результатов и обеспечения их достоверности.

Характеризуя моделирование в целом, необходимо учитывать, что между постановкой задачи моделирования и интерпретацией полученных результатов существует большая группа сложных научно-технических проблем, к основным из них можно отнести следующие: идентификацию реальных объектов; набор вида моделей; построение моделей и их машинную реализацию; взаимодействие исследователя с моделью в ходе машинного эксперимента; проверку правильности полученных в ходе моделирования результатов; выявление основных закономерностей, исследованных в процессе моделирования.

*Антончик К.А.*

СОО «Коммунарка», Минск, Республика Беларусь

*Грецкий Н.Л., Пынькин А.М., Семененко Д. В.,*

*Хейфец М.Л.*

ГНПО «Центр» НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

## **МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

**Ведение.** Технологические процессы в аддитивном производстве сложны и разнообразны. Применяемое оборудование и комплекс средств технического оснащения обеспечивают эффективное и бесперебойное производство изделий, соблюдение условий технологического процесса, выполнение вспомогательных производственных мероприятий. Особый интерес представляют процессы, материалы и оборудование для производства строительных конструкций, отличающиеся с учетом специфики выпускаемых изделий, широким многообразием предложенных и успешно реализуемых схем.

**Материалы.** Среди материалов в аддитивном производстве наибольшее распространение получили строительные смеси на основе цемента быстротвердеющих бетонов и строительных растворов. Для получения необходимых технологических свойств, применяемых материалов требуется одновременное использование различных по своему составу и назначению химических добавок, обеспечивающих корректировку прочности, пластичности, жесткости, плотности и других свойств рабочей смеси. Согласно ГОСТ 24211 химические добавки для бетонов и строительных растворов в зависимости от их назначения классифицируют на следующие группы:

– добавки-регуляторы реологических свойств бетонных и растворных смесей, к которым относятся суперпластификаторы, пластифицирующие и стабилизирующие добавки;

– добавки-регуляторы схватывания цементного теста и твердения бетона и строительного раствора, включающие замедлители схватывания и твердения, ускорители схватывания и твердения, противоморозные добавки;

– добавки-регуляторы структуры бетона и раствора, к которым относятся пластифицирующе-воздухововлекающие, воздухововлекающие, пено- и газообразующие, уплотняющие и гидрофобизирующие;

– добавки, улучшающие качество бетона и строительного раствора: полимерные; повышающие водонепроницаемость, морозостойкость, воздухо- и газонепроницаемость бетона и раствора; улучшающие коррозионную стойкость стали, бетона и раствора и придающие им бактерицидные свойства;

– тонкодисперсные минеральные добавки;

– добавки-заменители части цемента в бетонах и растворах;

– минеральные добавки-наполнители в бетонах и растворах;

– минеральные пластифицирующие добавки;

– комплексные добавки различного назначения.

Введение в состав бетона или строительного раствора химических добавок в виде отдельных компонентов или их композиции позволяет повысить показатели материала.

Для обеспечения соответствия строительных растворов требованиям аддитивного процесса формования они должны характеризоваться высокой скоростью схватывания и твердения цементного теста, повышенной подвижностью и низким водопотреблением.

Как правило, химические добавки для бетона и строительных растворов приготавливаются с водой затворения. При этом под оптимальной дозировкой добавки понимается ее минимальное количество, при котором достигается максимальный эффект от ее использования, оцениваемый по критериям эффективности согласно ГОСТ 24211. Например, критерий эффективности для ускорителей схватывания и твердения определяет прирост прочности не менее чем на 20% через сутки нормального твердения.

Действие ускорителей схватывания и твердения бетонов и строительных растворов заключается, главным образом, в уменьшении электрических зарядов частиц цемента, что позволяет активизировать процесс гидратации трехвалентного алюмината в нем и уплотнить структуру цементного камня в ранние сроки ее формирования.

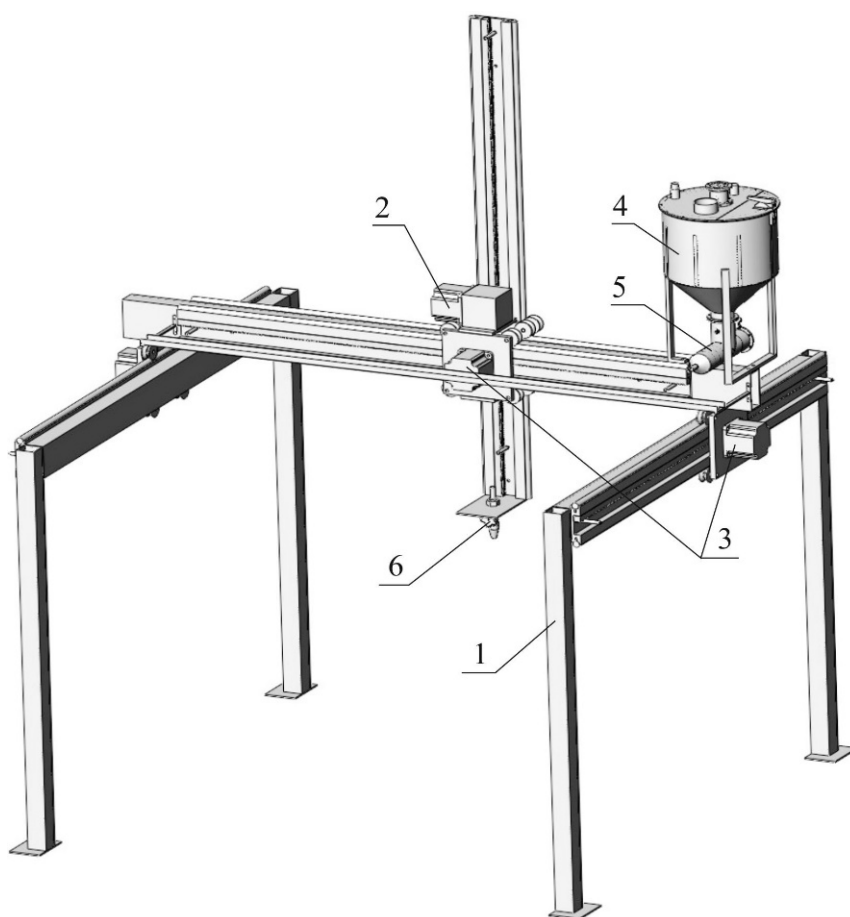
Оптимальный расход ускорителей схватывания и твердения бетонов при приготовлении бетонов и строительных растворов составляет 1÷3% от массы сухого цемента и зависит от химического состава последнего, свойств наполнителей, требований к готовым изделиям, наличия в них арматуры и др.

**Комплекс технологического оборудования.** Современное технологическое оборудование аддитивного производства отличается высокой степенью автоматизации управления, поэтому большое значение имеют минимизация расходов сырья и энергоносителей, эффективное использования персонала. Высокие требования к надежности технологического оборудования обусловлены тем, что в большинстве случаев отказы в работе приводят к нарушению технологического процесса, браку и простою производства.

ОАО «НПО Центр» предложен порталный технологический комплекс для 3D печати (Рис.1).

Комплекс состоит (Рис.1) из порталной рамы 1, механизмов перемещения 2,3 и дозатора, который представляет собой конструкцию, состоящую из емкости 4 для приготовленного состава рабочей смеси, подающего устройства 5 и рабочего органа 6.

Объем рабочей смеси в емкости контролируется датчиками и пополняется по трубе из резервуара насосом. При опускании уровня смеси ниже допустимого открывается клапан и включается насос подачи, после достижения верхнего уровня насос отключается и закрывается клапан. Внутри емкости расположена лопастная мешалка необходимая для поддержания однородности смеси, поскольку однородность массы является важнейшим обстоятельством для точной дозировки и качества получаемого изделия.



*Рисунок 1. – Портальный технологический комплекс для 3D печати: 1 - порталная рама; 2,3 - механизмы перемещения; 4 - дозатор; 5 - подающее устройство; 6 - рабочий орган*

Рабочий орган представляет собой сопло для подачи вязкой массы с клапаном. Клапан рабочего органа открывается, когда привод горизонтального перемещения совершает движение по рабочей траектории, по ее окончании клапан закрывается и выдавливание массы прекращается, а горизонтальный привод продолжает движение по следующей заданной траектории. Таким образом, возникает задача точного дозирования массы, а также точного позиционирования для предотвращения промахов на заданной траектории.

В качестве механизмов перемещения применяются приводы горизонтального и вертикального движения рабочего органа. Привод механизмов перемещения выполнен в виде зубчатой рейки и таким образом, проскальзывание сведено к минимуму.

Привод вертикального движения осуществляет позиционирование рабочего органа относительно рабочей точки, т.е. там, где осуществляется начало подачи смеси, и подъем к исходному положению по завершению печати слоя. Положение вертикальной составляющей рабочего органа постоянно в течении печати каждого слоя и контролируется датчиком положения двигателя. В связи с широким ассортиментом используемых вязких материалов, толщина печатаемого слоя и, следовательно, положение рабочей точки разное, что учитывается при подготовке управляющей программы.

Привод горизонтального движения позиционирует рабочий орган в горизонтальной плоскости по заданной траектории печатаемого слоя, при этом открывается и закрывается клапан подачи смеси на заданных участках траектории, а привод подающего устройства осуществляет требуемое дозирование смеси. Движение данного привода контролируется датчиком положения и согласуется управляющей программой.

**Заключение.** В результате, предложенный порталный технологический комплекс для 3D печати с подобранным составом применяемых материалов позволяет создавать строительные конструкции необходимого качества.

*Беломитцев А.С., Дружинин Є.І., Морачковський О.К.*  
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

## АЛГОРИТМ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ НЕЛІНІЙНИХ СИСТЕМ

**Постановка проблеми.** Однією з важливих наукових проблем природознавства є вирішення задачі про поведінку досліджуваного об'єкта в часі і просторі на основі певних знань про його початковий стан. Зазначена проблема безумовно є математичною задачею і потребує в якості об'єкта дослідження розглядати так звані «динамічні системи» у математичному розумінні цього поняття [1].

**Аналіз публікацій.** Відомо, що звичайні диференціальні рівняння, які описують поведінку нелінійних динамічних систем, мають три типи рішень, відповідних періодичному, квазіперіодичному і хаотичному рухам. Цим рішенням відповідають атрактори системи у вигляді граничного циклу, квазіперіодичного атрактора (Р-мірного тора) і хаотичного або «дивного атрактора». Важливим є те, що найпростіші типи квазіперіодичних і хаотичних атракторів можуть реалізуватися в динамічних системах з розмірністю фазового простору не менше трьох. З точки зору механіки і математики, аналіз хаотичних процесів в детермінованих нелінійних дисипативних системах є однією з фундаментальних проблем, що цікавить багатьох дослідників. В [2, 3] переконливо доведено, що в нелінійних системах причина генерування складних коливальних процесів, які можуть не відрізнятися за фізичними характеристиками від істинно випадкових, криється не в кількості ступенів вільності і не в наявності флуктуацій, як раніше вважалося, а в експоненціальній нестійкості режимів, що породжує суттєву залежність від точності завдання початкового стану системи. Дослідження стійкості режиму функціонування динамічної системи є надзвичайно важливим з практичної точки зору. Ще більш важливою проблемою є аналіз стійкості складних багатокомпонентних систем. У багатьох силових установках вимушені нелінійні коливання є причиною втомних руйнувань елементів пере-



дач і вимагають спеціального розрахункового дослідження. Особливо актуальною є задача розрахунку таких коливань в установках, що містять потужне джерело збудження у вигляді поршневого двигуна внутрішнього згорання, що характерно для колісних та гусеничних транспортних машин, сільськогосподарської техніки, суднових і тепловозних установок. Окрім того, при вивченні коливальних процесів в механічних системах, підданих дії періодичних збуджуючих сил, дослідника зазвичай цікавить функціональна залежність деяких параметрів, що характеризують коливальний процес, від частоти збуджуючого впливу. Ці залежності можуть бути неоднозначні і мати точки розгалуження. Визначення останніх представляє особливий інтерес, тому що в цих точках беруть початок або закінчуються окремі гілки рішень. Слід зазначити, що отримання нових, ефективних прийомів оцінки стійкості періодичних режимів складних нелінійних систем стало можливим у зв'язку з розробкою ітераційних чисельних алгоритмів аналізу. Розглянуті нижче способи оцінки стійкості спираються на дослідження стійкості за першим наближенням і пов'язані з ітераційними процесами визначення періодичних рішень. Ці способи вимагають незначного в порівнянні з самим визначенням періодичного розв'язку обсягу обчислень і зводяться до визначення власних значень деяких матриць, обчислюваних в ході ітераційних процесів.

**Опис алгоритму.** Розглянемо систему з  $n$  степенями вільності, рух якої описується неавтономним векторним диференціальним рівнянням у формі Коші

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{f}(t, \mathbf{y}), \quad (1)$$

де  $\mathbf{y}$  –  $2n$ -мірний вектор стану;  $\mathbf{f}(t, \mathbf{y})$  –  $2n$ -мірна вектор-функція;  $T_1$  – періодична по явно вхідному часу  $t$ :  $\mathbf{f}(t, \mathbf{y}) = \mathbf{f}(t + T_1, \mathbf{y})$ .

Визначення періодичного розв'язку диференціального рівняння (1) еквівалентно знаходженню нерухомої точки точкового відображення і може бути зведене до розв'язання неявно заданого рівняння:

$$\mathbf{y}_T(\mathbf{y}_0) - \mathbf{y}_0 = \mathbf{0}, \quad (2)$$

де  $\mathbf{y}_0 = \mathbf{y}(0)$ ,  $\mathbf{y}_T = \mathbf{y}(T)$  – вектори стану системи в моменти часу  $t = 0$  і  $t = T$ , період  $T$  дорівнює або кратний періоду  $T_1$  правої частини рівняння (1):  $T = rT_1$ .

Для розв'язання рівняння (2) використовується ітераційний процес методу Ньютона:

$$\begin{cases} \left[ \left( \frac{\partial \mathbf{y}_T}{\partial \mathbf{y}_0} \right)_{\mathbf{y}_0} - E \right] \mathbf{z}^v = \mathbf{y}_T(\mathbf{y}_0^v) - \mathbf{y}_0^v \\ \mathbf{y}_0^{v+1} = \mathbf{y}_0^v - \mathbf{z}^v, v = 0, 1, 2, \dots, \end{cases} \quad (3)$$

який дозволяє не тільки визначати періодичні рішення рівняння (1), але і оцінювати їх стійкість за Ляпуновим.

Для оцінки стійкості і аналізу біфуркацій періодичних коливань обчислюються мультиплікатори  $\lambda_i$  рівняння у варіаціях:

$$\mathbb{R}^r x = \left( \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)_{y=\xi(t)}^r \cdot x, \quad (4)$$

де  $(\partial \Phi / \partial y)_{y=\xi(t)}^r$  – матриця Якобі, яка обчислюється на періодичному рішенні  $y = \xi(t)$ . Таким чином, (4) містить періодичні коефіцієнти і дослідження стійкості його тривіального рішення, еквівалентно дослідженню стійкості періодичного рішення  $y = \xi(t)$  рівняння (1) і проводиться згідно теорії Флоке.

Мультиплікатори  $\lambda_i$  є корені рівняння  $\det[\Phi(T) - \lambda E] = 0$ , де  $\Phi(T)$  – матриця монодромії, рівна матрицанту (4) при  $t = T$ .

Найбільший інтерес представляють біфуркації, при яких періодичні рішення втрачають стійкість, так як у відповідних біфуркаційних точках якісно змінюється структура можливих сталих рухів нелінійної системи. При побудові АЧХ системи зміна частоти збурюючого діяння призводить до зміни мультиплікаторів рівняння у варіаціях, внаслідок чого мультиплікатори рухаються уздовж певних траєкторій. Аналіз цих траєкторій дозволяє зробити висновки відносно стійкості періодичних коливань та їх можливих біфуркацій у точках втрати стійкості.

Періодичне рішення рівняння (1)  $y = \xi(t)$  є асимптотично стійким, якщо спектральний радіус рівняння в варіаціях (4)

$$\rho = \max_i |\lambda_i| < 1, \quad (5)$$

таким чином, втрата стійкості пов'язана з виходом одного або пари мультиплікаторів з кола одиничного радіусу. Цей вихід може здійснюватися трьома способами: 1) з'являється дійсний мультиплікатор  $\lambda_i < -1$ ; 2) з'являється дійсний мультиплікатор  $\lambda_i > 1$ ; 3) з'являється пара комплексно спряжених мультиплікаторів  $|\lambda_i| = |\lambda_{i+1}| > 1$ . У першому випадку відбувається біфуркація подвоєння періоду: у точці втрати стійкості  $T$  – періодичного розв'язку народжуються 2 гілки  $2T$  – періодичних стійких розв'язків. Друга біфуркація характерна для, так званої, точки повороту, в якій крива залежності періодичного розв'язку від параметра "повертає" у протилежний бік, стаючи багатозначною. Для розрахунку періодичних коливань в околі такої точки зручно використовувати алгоритм інвертування крайового завдання. Третя біфуркація призводить до народження майже періодичних коливань.

**Висновки.** Наведений вище алгоритм дозволяє виявити вузькі частотні діапазони існування стійких рішень на гілках АЧХ, відповідних нестійким рішенням, а також ілюструє методику дослідження сталих коливань в системах, що описуються сукупністю звичайних диференціальних рівнянь. Крім того, перевірка критерію стійкості і умов розгалуження добре вписується в обчислювальні схеми розроблених ітераційних процесів і вимагає невеликого обсягу обчислень. Таким чином, на першому етапі проводиться розрахунок основних періодичних коливань, який дозволяє визначити області існування неперіодичних

сталих рухів і періодичних рухів збільшеного періоду. Далі знаходяться рішення, які відповідають хаотичному руху нелінійної системи. Але ж, звичайно, ніколи не можна бути впевненим, що виявлені всі можливі усталені рухи нелінійної системи, наприклад, залишається відкритим питання пошуку періодичних рішень, що утворюють замкнуті гілки.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Современные проблемы хаоса и нелинейности / Симо К., Смейл С., Шенсине А. и др. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2002. – 304 с.

2. Фегенбаум М. Универсальность в поведении нелинейных систем / М. Фегенбаум // Успехи физических наук. – 1983. – т.141. – Вып.2. – С. 243-374.

3. Климонтович Ю.Л. Турбулентное движение и структура хаоса / Ю.Л. Климонтович. - М.: Наука, 1990. – 257 с.

*Витязь П.А., Сенюць В.Т.*

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,

Минск, Республика Беларусь

*Ивашко В.С., Лойко В.А., Хейфец М.Л.*

ГНПО «Центр» НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

*Чигилейчик В.А.*

Полоцкий государственный университет,

Полоцк, Республика Беларусь

*Колмаков А.Г.*

ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, Москва, Российская Федерация

## ПОСЛОЙНЫЙ СИНТЕЗ ГРАДИЕНТНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ БРОНЗЫС ДОБАВКОЙ НАНОАЛМАЗОВ

**Введение.** Современные тенденции развития технического прогресса заключаются в создании энергонасыщенной высокопроизводительной техники, содержащей тяжело нагруженные высокоскоростные узлы трения, что требует разработки новых триботехнических материалов с повышенными потребительскими свойствами. Возрастающим требованиям к механическим, трибологическим, защитным свойствам поверхностей трения могут отвечать композиционные покрытия, имеющие гетерогенную структуру с непрерывной металлической или полимерной матрицей и распределенной в ней дисперсной фазой на основе включений мелкодисперсных частиц твердых материалов, упрочняющих фаз т.п. [1].

Добавки микро- и наноструктурных тугоплавких частиц в качестве примесных модификаторов позволяют эффективно изменять структуру таких сплавов, способствует ее измельчению и повышению механических, триботехнических и эксплуатационных характеристик материалов [2]. В качестве модификаторов цветных сплавов широкое применение получили углеродные наноматериалы: нанотрубки, фуллерены, а также ультрадисперсные алмазы [3].

Целями работы являлись: выбор схем и параметров процесса получения композиционного покрытия на основе бронзы ПРБрО10Ф1 с градиентной структурой методом газотермического напыления; выбор оптимального технологического варианта напыления, а также изучение структурных особенностей и физико-механических характеристик полученного композиционного покрытия с градиентной структурой с использованием модификатора на основе наноалмазов [3].

**Методика проведения эксперимента.** Для газотермического напыления были приготовлены шихты, состоящие из напыляемых порошков и модификаторов, которые вводили в количестве от 0,5 до 5 мас. %. Перемешивание шихт осуществляли в баночном смесителе в течение 2 ч. В шихту на основе бронзы ПРБрО10Ф1 вводили модификатор наноалмаз–пироуглерод–Cu. Общую толщину покрытия 7 мм набирали несколькими циклами с перекрытием полос напыления на 1/3 диаметра пятна напыления. Для получения градиентной структуры покрытий напыление осуществляли шихтами с различным содержанием модификатора. Первый слой покрытия напыляли порошком без модификатора. Последующие слои напыляли шихтами, содержащими модификатор в количестве 0,5–2 мас. %; при формировании поверхностных слоев покрытия количество добавки в напыляемой порошковой шихте составляло 5 мас. %.

После напыления с детали удаляли защитные экраны и охлаждали до комнатной температуры. Напыление покрытия проводили при технологических режимах: расстояние от сопла до детали – 130 мм; скорость вращения детали – 15 м/мин; угол напыления – 70°.

**Экспериментальная часть.** На рис.1 показана структура сечения напыленного покрытия на основе бронзы и алюминия с добавкой модификатора наноалмаз-пироуглерод-Cu.

На рис. 2 изображена микроструктура приповерхностных слоев покрытий на основе бронзы с добавкой модификатора наноалмаз-пироуглерод-Cu. Послойный способ напыления позволил сформировать покрытия, в которых наблюдается изменение концентрации введенного модификатора по высоте от подложки к поверхности.

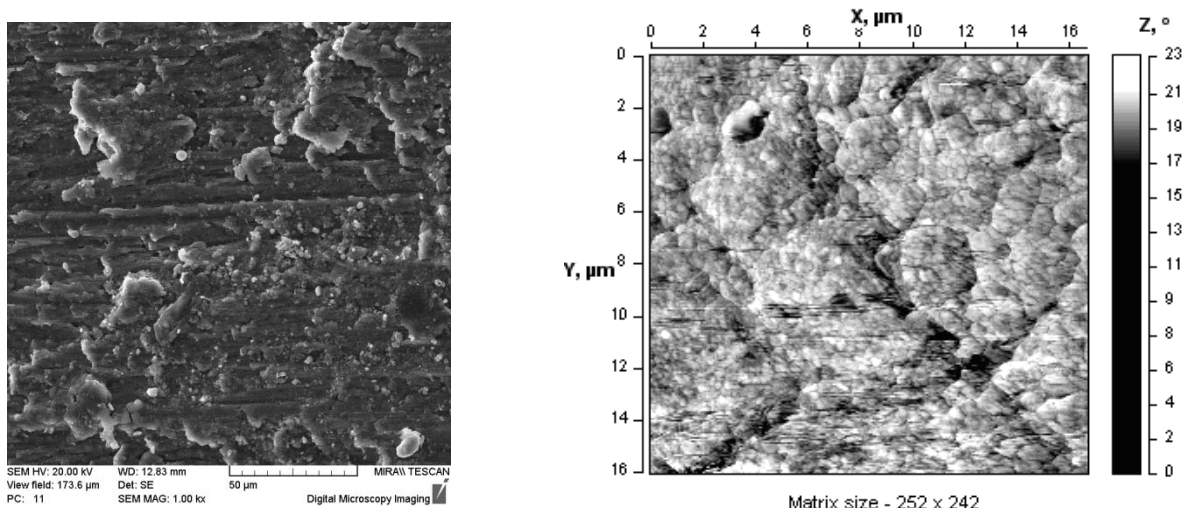
Анализ структуры слоев полученных градиентных покрытий показал, что использование модификаторов позволяет формировать покрытия с более мелкозернистой структурой относительно покрытий без модифицирующих добавок. При этом размер зерна матрицы уменьшается с увеличением концентрации модификатора в напыляемом слое. Так, для бронзового покрытия с добавкой модификатора наноалмаз-пироуглерод-Cu наблюдается следующая тенденция: при концентрации добавки в пределах 0,5–1 мас. % размер зерна в покрытии

составляет в среднем 150 мкм; последовательное увеличение содержания модификатора от 1 до 5 мас. % при напылении слоя приводит к снижению размеров зерна до 30 - 40 мкм.



Рисунок 1. – Структура покрытия на основе бронзы ПРБрО10Ф1 с добавкой модификатора наноалмаз-пироуглерод-Си;  $\times 200$

Методом индентирования при нагрузке 200 г на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 100 г измеряли микротвердость слоев с различным содержанием модифицирующих добавок. Так, для покрытия на основе бронзы ПРБрО10Ф1 микротвердость уменьшается с 1100 до 550 МПа при снижении концентрации добавки наноалмаз-пироуглерод-Си в слое с 5 до 1 мас. %.



а

б

Рисунок 2. – Микроструктура композиционного покрытия на основе бронзы, полученного с добавкой модификатора наноалмаз-пироуглерод-Си: а – СЭМ; б – АСМ-структура

**Заключение.** Методом газотермического напыления получены композиционные покрытия на основе меди с градиентной структурой.

Формирование градиентной структуры покрытий осуществляли путем послойного напыления шихтами с переменным содержанием модифицирующих добавок на основе наноалмазов в диапазоне концентраций 0,5–5 %. Использование наноструктурных модификаторов позволяет формировать покрытие с более мелкозернистой структурой относительно покрытия без модифицирующей добавки. При этом размер зерна матрицы уменьшается с повышением

концентрации модификатора в напыляемом слое. Установлено, что микротвердость слоев покрытия возрастает с увеличением содержания добавки и дисперсности структуры металлической матрицы. При этом рост микротвердости покрытия при уменьшении размера зерна металлической матрицы в 3–5 раз составляет 1,5–2 раза.

*Исследования поддержаны белорусско-российским грантом БРФФИ-РФФИ по проекту Т16Р-176.*

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Русецкий, А.М. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А.М. Русецкий, П.А. Витязь, М.Л. Хейфец др. / Под общ. ред. А.М. Русецкого. – Минск: Беларус. навука, 2012. – 239 с.

2. Чернышова Т.А. О модифицировании литых алюмоматричных композиционных материалов тугоплавкими наноразмерными частицами / Т.А. Чернышова, Л.И. Кобелева, И.Е. Калашников // Металлы – М., 2009. – №1. – С.79-87.

3. Модифицирование материалов и покрытий наноразмерными алмазосодержащими добавками / П.А. Витязь, В.И. Жорник, В.А. Кукареко и др. / Под общ. ред. Витязя П.А. – Минск, Белорусская наука. – 2011. – 522 с.

*Гуцаленко Ю.Г., Севидова Е.К.*

Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

### **ИНСТРУМЕНТЫ ИЗ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТОКОЗАЩИТОЙ КОРПУСА ДЛЯ АЛМАЗНО-ИСКРОВОГО ШЛИФОВАНИЯ НА УНИВЕРСАЛЬНЫХ СТАНКАХ**

Одним из наиболее высокотехнологичных методов механического формообразования труднообрабатываемых материалов, в том числе новейших особо твердых на основе наноструктурного карбида вольфрама и его комбинаций с тугоплавкими оксидами алюминия, циркония и другими, является созданное в НТУ «ХПИ» алмазно-искровое шлифование (АИШ).

До недавнего времени разработка этого прогрессивного метода высокопроизводительной алмазно-абразивной обработки обработки в альма-матер, других университетских центрах высшей технической школы, отраслевых научно-исследовательских институтах, станкоинструментальной отрасли машиностроения и предпринимательской инициативой развивалась исключительно по пути адаптации станочного оборудования к возможности реализации на нем АИШ путем соответствующего специального расширения модельного ряда выпускаемых станкостроительными предприятиями шлифовальных станков или

модернизацией универсальных в условиях механообрабатывающих предприятий.

Первый путь, государственно масштабный и дополнительно заметно затратный для предприятий-производителей шлифовальных станков, пока оказался подъемным только плановой экономике. В основном в силу двух важных обстоятельств. Во-первых, он требует либо надежной кооперации с производителями электрогенераторного дооборудования источниками вводимой в зону резания дополнительной энергии, либо развертывания собственных отраслевых производств этого назначения. Во-вторых, он исходит из устойчивой загруженности потребителя шлифовальных станков номенклатурой труднообрабатываемых материалов, как правило характерных стратегическим отраслям, в особенности военно-промышленному комплексу, устремленным к абсолютному превосходству перспективным разработкам, что объективно предполагает соответствующее эффективное участие государства в управлении экономикой, централизованные гарантии инвестиционной надежности, в том числе с готовностью ожидания долгосрочно отложенной окупаемости.

Второй путь единичных решений возможен в условиях сколь угодно хаотических экономик, исходит из индивидуальной предпринимательской инициативы и требует организационной, в том числе финансовой, способности решать подобные задачи технико-технологического развития конкурентоспособности в условиях отдельного механообрабатывающего предприятия. Этот путь совершенствования машиностроительных производств проходят экономики и хозяйственные субъекты экономик постсоветского пространства. Применительно к осуществимости АИШ он требует выведения шлифовального станка из эксплуатации на токозащитный передел ответственного за точность механического формообразования шпиндельного узла, а также подбора или приобретения источника дополнительного электропитания и соответствующего подключения его к модернизируемому станку.

Шлифовальный инструмент как объект барьерных технических решений, обеспечивающих нетокопроводность его контакту с посадочным местом на шпинделе станка, следовательно возможность осуществления АИШ без предварительного модернизационного вмешательства в передел шпиндельного узла универсального станка, предшествующей исследовательской и производственной практике не рассматривался.

В известных систематизациях алмазно-абразивных инструментов, в том числе академических, выделение таковых по какому-либо признаку, в том числе технологии эксплуатации, который бы указывал на применимость инструментов в комбинированных процессах с введением энергии электрического тока в зону шлифования, к которым относятся операции АИШ, также отсутствует.

В инверсионном решении задачи электроизоляции металлического корпуса шлифовального круга от станка в сторону инновационного решения инструмента путем формирования специального диэлектрического покрытия поверхностей соприкосновения его корпуса со шпинделем (планшайбой), на корпусе должна быть также предусмотрена свободная от электроизоляционного

покрытия зона для возможности осуществления через нее токоподвода к алмазно-металлической композиции рабочей части шлифовального круга. В связи с этим применительно, например, к использованию универсально-заточных станков, внешний контур (диаметр) зоны с электроизоляционным покрытием достаточно ограничить с учетом конструктивных размеров поверхностей базирования на оправке заводской комплектации станка и фланца крепежного замыкания.

Токозащиту стальных корпусов алмазных шлифовальных кругов предлагается осуществлять нанесением специально разработанных износостойких диэлектрических покрытий на основе семейства эпоксидно-диановых смол [1].

Износостойкость обеспечивается введением диэлектрических порошков триоксида алюминия  $Al_2O_3$  или диоксида кремния  $SiO_2$  с возможным варьированием массовой доли как диэлектрических порошков, так и эпоксидных групп.

Композицию получают путем смешивания эпоксидно-диановой смолы и бутилглицидилового эфира с последовательным введением в смесь диэлектрического наполнителя ( $Al_2O_3$  или  $SiO_2$ ), полиметилсилоксана и полиметилфенилоксана. Отвердитель – моно-N-(-цианэтил)-диэтилентриамин – вводят непосредственно перед использованием.

По результатам сравнительных испытаний износостойкость композитного покрытия на основе эпоксидно-диановой смолы, например, с 20 % содержанием массовой доли эпоксидных групп и 30 мас. %  $Al_2O_3$  – на 60-70% выше, чем у такого же, но без алюмооксидного порошкового наполнителя. Удельное электрическое сопротивление разработанного покрытия порядка  $\rho = 10^{14}$  Ом·м. Таким образом, обеспечиваемый разработанными покрытиями посадочных поверхностей стальных корпусов шлифовальных кругов высокий уровень противозащитной защиты позволяет эффективно расширять технологические возможности универсальных шлифовальных станков успешной реализацией на них АИШ и других электрофизикохимических технологий.

Токозащиту алюминиевых корпусов алмазных шлифовальных кругов предлагается осуществлять также формированием на них методом микродугового оксидирования корундовых анодно-искровых покрытий [2], известных высокими диэлектрическими характеристиками (например, для алюмооксидов на алюминии марки АДО порядка  $\rho = 10^{13}$  Ом·м и выше).

В нашей экспериментальной практике для оксидных покрытий на алюминиевом сплаве АК6 толщиной 100...120 мкм, сформированных в алюминатном электролите при напряжении 250-300 В и подвергнутых последующему кипячению в дистиллированной воде с целью уменьшения открытой пористости за счет гидратации оксидной пленки, удельное электрическое сопротивление превышало  $\rho = 10^{12}$  Ом·м при отсутствии пробоя напряжением до 1 кВ (испытания напряжением св. 1 кВ не проводились).

В технологическом маршруте изготовления алмазных кругов операция анодного оксидирования должна выполняться до напрессовки на корпус алмазноносного слоя, чтобы обезопасить этот слой от преждевременных электрофи-



зикохимических повреждений, и может осуществляться конвейерным способом с целью повышения производительности выхода покрытых корпусов.

Для бездефектной модернизации традиционных алмазных чашечных кругов в условиях потребителя предложена специальная оснастка круга перед погружением в емкость формирования покрытия, исключая алмазно-металлическую композицию рабочей части шлифовального круга из электрической цепи микродугового оксидирования.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Гуцаленко, Ю.Г. Композиція для електроізоляційних зносостійких покриттів: патент на корисну модель № 92786 Україна: МПК C08L 63/02 (2006.01), C08J 5/16 (2006.01) / Ю.Г. Гуцаленко, В.В. Івкін, О.В. Руднев, О.К. Севидова; власник: Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т». – № и 201315441; заявл. 30.12.2013; опубл. 10.09.2014. Бюл. № 17.

2. Гуцаленко, Ю.Г. Шліфувальний круг: патент на корисну модель № 96568 Україна: МПК (2006.01) B24D 3/06 / Ю.Г. Гуцаленко, О.К. Севидова, І.І. Степанова; власник: Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т». – № и 201409394; заявл. 26.08.2014; опубл. 10.02.2015. Бюл. № 3.

*Гуцаленко Ю.Г., Івкін В.В., Руднев А.В.,  
Севидова Е.К., Степанова І.І.*

Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

### **НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННОГО МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ПОСАДОЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ АЛМАЗНЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ С АЛЮМИНИЕВЫМИ КОРПУСАМИ**

В НТУ «ХПИ» разработан ряд технических решений, в том числе конструкций шлифовальных кругов с диэлектрическими покрытиями посадочных поверхностей, направленных на реализацию разработанного в нем метода алмазно-искрового шлифования (АИШ) на универсальных станках без предварительно осуществляемой для этого ранее специальной электроизоляционной модернизации их шпиндельных узлов.

Этот подход свободен от риска нарушения точности станка, паспортизованной предприятием-изготовителем, и повышает его технологические возможности при минимальных затратах времени на выведение станка из эксплуатации для проведения соответствующих организационно-технических мероприятий по монтажу токосъемников операционной электрической цепи с участием зоны резания в рабочем контакте «инструмент-заготовка».

Разработка предполагает заинтересованность в ее использовании как предприятий-изготовителей алмазно-абразивных инструментов, так и предприятий-потребителей универсальных шлифовальных станков. Это предположение опирается на технологический авторитет метода АИШ и предпроектную поддержку проспекта реализуемого ею подхода академической наукой и предприятиями промышленности, производящими и потребляющими алмазно-абразивные инструменты (ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, ПАО «Полтавский алмазный инструмент», ХМЗ «Свет шахтера» и др.).



*Рисунок 1. – Лаборанты-магистранты Т. Семенихина и Г. Левенец у установки натурального моделирования МДО*

1,5-2,5 раза [1].

Применение алюмооксидных покрытий в качестве диэлектрических известно в меньшей степени, хотя исследовательская практика свидетельствует об их высоких диэлектрических параметрах, приближающих к диэлектрикам высшего качества. Об этом же свидетельствует и наш опыт. Однако основным недостатком МДО-покрытия как электроизоляционного является ухудшение его диэлектрических свойств со временем, особенно при выдержке во влажном воздухе. Аналогичная среда может возникать также в условиях АИШ с использованием охлаждающе-смазочных жидкостей. Снижение диэлектричности происходит из-за пористости покрытия и его насыщения парами воды или раствором электролита. К сожалению, получить такие покрытия абсолютно без пор невозможно, поскольку это обусловлено сущностью самого процесса МДО, хотя и возможно несколько минимизировать их количество за счет оптимизации технологических параметров.

Механическая обработка высокотвердых корундовых АИП для получения нужного размера с необходимой точностью не составляет особой сложности в применениях лезвийных или абразивных инструментов из сверхтвердых материалов. Однако, если понижение некоторой расчетной толщины АИП со служебной функцией обеспечения, например, износостойкости принципиально не

Применительно к алмазно-абразивным шлифовальным кругам с алюминиевыми корпусами разработка преимущественно ориентирована на формирование на них диэлектрических корундовых анодно-искровых покрытий (АИП) микродуговым оксидированием (МДО, рис. 1, 2).

Известная история применений функциональных алюмооксидных АИП в основном связана с их эксплуатационно выгодными характеристиками стойкости на износ, коррозию и тепловой удар, позволяющими повысить ресурс функциональности поверхности в

препятствует работоспособности детали, хотя и понижает ресурс износостойкой эксплуатации подвергнутой МДО поверхности, то в задачах токозащиты проведение такого понижения следует рассматривать с позиций риска доэксплуатационной выбраковки детали техническим контролем.



*а* *б*  
Рисунок 2. – Чашечный алмазный шлифовальный круг  
в сборе с основной оснасткой для избирательного  
МДО (*а*) и фрагмент под микроскопом МБС-9 (*x 10*),  
зона покрытия слева (*б*)

Прогнозирование размерного исхода операции МДО, окончательной или с последующей доводочной размерной обработкой, важно при ее выполнении на поверхностях рабочих сопряжений, посадочных в разъемных или в неразъемных сборочных соединениях, как это имеет место в технических решениях алмазных шлифовальных кругов с локальной токозащитой корпуса для их расширенной адаптации к АИШ, разработанных в НТУ «ХПИ» на базе корпусных конструкций соответственно конвенционального универсального типа [2] и специальной, выполненной согласно японскому прототипу заодно со шкивом рабочего привода [3].

Перед операцией МДО альтернативно тонкой доводочной послеоперационной механической обработке может быть выполнено предваряющее МДО тонкое расшлифовывание посадочного отверстия круга.

Исследования МДО проведены применительно к характерным представителям современно используемых отечественной инструментальной промышленностью в производстве корпусов алмазных шлифовальных кругов алюминиевых сплавов Д16Т и АК6 в условиях использования источников переменного электрического тока и с квазилинейной характеристикой тока, формирования АИП в типичных растворах щелочи, жидкого стекла и их комбинаций.

Достаточно радикальный эффект предупреждения ухудшения диэлектрических свойств АИП после МДО оказался достижим при обработке поверхности АИП полимерными материалами. Установлено, что насыщение поверхностной пористости МДО-покрытий низковязкостной композицией на основе винилхлорида позволяет в несколько раз повысить характеристики диэлектрической защиты и их устойчивость во влажной среде. Оригинальный состав композиции с низкой вязкостью (12-14 с) обеспечивает глубокое проникнове-

ние в широком диапазоне размеров пор – от 0,1 до 10 мкм при толщине покрытия 50...100 мкм. После суточной выдержки в камере с влажностью ок. 95 % при нормальной температуре (23°C) падение удельного электрического сопротивления и электрической прочности подвергнутого промачиванию АИП не превышало 10%. Способ запатентован [4].

## ЛИТЕРАТУРА

1. Суминов, И.В. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование) / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин [и др.]. – М.: ЭКО-МЕТ, 2005. – 368 с.

2. Гуцаленко, Ю.Г. Шліфувальний круг: патент на корисну модель № 96568 Україна: МПК (2006.01) B24D 3/06 / Ю.Г. Гуцаленко, О.К. Севидова, І.І. Степанова; власник: Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т». – № и 201409394; заявл. 26.08.2014; опубл. 10.02.2015. Бюл. № 3.

3. Гуцаленко, Ю.Г. Шліфувальний круг: патент на корисну модель № 117767 Україна: МПК (2006.01) B24D 5/16 / Ю.Г. Гуцаленко, О.К. Севидова, В.В. Білозеров, Г.І. Махатілова; власник: Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т». – № и 2017 00074; заявл. 03.01.2017; опубл. 10.07.2017. Бюл. № 13.

4. Севидова, О.К. Спосіб формування зносостійких електроізоляційних покриттів на сплавах алюмінію та титану: патент на корисну модель № 111473 Україна: МПК (2016.01) C25D 11/00, C25D 11/04 (2006.01), C25D 3/54 (2006.01) / О.К. Севидова, І.І. Степанова, Ю.Г. Гуцаленко, К.М. Алексєєв; власник: Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – № и 2016 05063; заявл. 06.05.2016; опубл. 10.11.2016. Бюл. № 21.

*Гущин А.М., Зелинский С.А.*

Одесский национальный политехнический университет,  
Одесса, Украина

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЛИНЕЙНЫХ МОТОР-ШПИНДЕЛЕЙ

Высокоскоростные мотор-шпиндели (далее ВМШ), позволяющие решать триединую задачу одновременного повышения производительности, точности и качества механической обработки деталей машин выпускаются практически во всех индустриально развитых странах и дальнейшее их совершенствование идёт по пути их мехатронизации и интеллектуализации, т.е. в едином корпусе сосредотачиваются энергетические, информационные и управленческие блоки, подчинённые единой цели – достижения требуемых эксплуатационных характеристик [1, 2].

Отличительные особенности конструкций мотор-шпинделей, рассматриваемых в настоящей статье, выходят за рамки устоявшихся тенденций и, в основном, сводятся к следующим направлениям:

1. Синергетическому объединению вышеперечисленных параметров (энергия, информация, управление) с гибкопереналаживаемой подачей инструмента в зону обработки.

2. В структуру рассматриваемых конструкций включаются механоэлектронные вычислительные устройства, способные изменять внутреннее состояние ВМШ в соответствии с изменениями, происходящими в окружающей среде (например, анизотропностью обрабатываемого материала).

Отличительные особенности ВМШ поэтапно возникали по мере их эволюционного развития.

3. Объединение в одной конструкции возможностей реверсивного вращательного и возвратно-поступательного линейного движений, контролируемых соответствующими датчиками и микропроцессорной техникой (далее ЛВМШ). [3]

4. Устранения сил трения скольжения в линейном двигателе подачи инструмента в зону обработки. [4]

5. Объединение системы управления ЛВМШ с устройством ЧПУ станков сверлильно-фрезерно-шлифовальной групп. [5]

6. Оснащение ЛВМШ микропроцессорной техникой, совместимой с аналогичными механоэлектронными преобразователями, выполняющими роль рецепторов, существующих в живых организмах и обеспечивающих «инстинкт самосохранения» без использования различного рода датчиков.

Возвращаясь к четвёртому пункту, т.е. к ЛВМШ четвёртого поколения можно констатировать, что всесторонние испытания этой конструкции, изготовленной в Одесском национальном политехническом университете, показали вполне прогнозируемые результаты.

Так при формообразовании отверстий Ø4 мм. трубчатым алмазным инструментом в пакете пластин из лейкосапфира, нефрита и стекла твёрдостью 9; 7; 5 по шкале Мооса [6], «рекомендованная» центральным «мозгом» (ноутбуком) подача инструмента в зону обработки в диапазоне 1÷16 мм/мин «самостоятельно» корректировалась системой управления ЛВМШ в режиме «устойчивого неравновесия», (что присуще только живому организму [7]), в каждый момент времени, в зависимости от мгновенного состояния зоны контакта «инструмент – обрабатываемый материал».

Свойство самостоятельного принятия решений такого рода «интеллектуального» устройства выходит далеко за рамки проблем станкостроения и весьма актуальна для решения проблем теории искусственного интеллекта, где до сегодняшнего дня не решены вопросы «параллелизма» [8], т.е. создания интеллектуальных вычислительных устройств работающих в режиме «параллельно и одновременно» с информацией, поступающей, как правило, из недетерминированной окружающей среды.

Заложенне в ВМШ свойство самостійного прийняття рішень, являється новим шагом в розвитку станкобудування і може бути використано в «інтелектуальних» технологічних системах [8], працюючих в режимі реального масштабу часу з інформацією, поступаючою одночасно від систем управління і стану процесу обробки, виключаючи використання додаткових датчиків.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бушуев, В.В. Особенности проектирования высокоскоростных моторшпинделей приводов главного движения металлорежущих станков сверлильно-фрезерно-расточной группы / В.В. Бушуев, В.В. Молодцов В.В. // Технология машиностроения, – М., 2012, – №1.
2. Подураев, Ю.В. Мехатроника: основы, методика, применение. / Ю.В. Подураев – М.: Машиностроение, 2007, – 256 с.
3. Гуцин А.М., Берест С.Б., Плахов А.В. Способ сверления отверстий малого диаметра. А.С. №1502225., Бюл. №31, опубл. 23.08.89
4. Гуцин А.М., Стешенко И.В., Журавель В.П., Бабин О.Ф., Ковалёв В.Д. Линейный электродвигатель. А.С. №1394349, Бюл. №17, опубл. 07.05.88
5. Гуцин А.М., Плахов А.В., Черкасов С.Н. Механизм адаптивной подачи. А.С. №1495013, Бюл. №27, опубл. 23.07.89.
6. Штребель, Г. Минералогический словарь / Г. Штребель, З. Цимер / пер. с нем. – М.: Недра, 1987. – 404 с.
7. Шевченко, А.И. Актуальная проблематика теории искусственного интеллекта / А.И. Шевченко – Київ: ІПШ, «Наука і освіта», 2003. – 228 с.
8. Люггер Д. Искусственный интеллект / Д. Люггер, Ф. Донорден / пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2002, – 864 с.

*Дерев'янченко О.Г.*

Одесский национальный политехнический университет,  
Одесса, Украина

## **АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОТРИМАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ТЕКСТУРИ ЗОН ЗНОШУВАННЯ ТА РУЙНУВАННЯ ІНСТРУМЕНТІВ З ПОЗИЦІЙ ПОБУДОВИ ВІДПОВІДНИХ КЛАСИФІКАТОРІВ**

В умовах сучасних інтегрованих виробництв з використанням сучасних модулів класу ГВМ актуальною стає задача створення автоматизованих та автоматичних систем багаторівневого розпізнавання станів різальних інструментів. В роботах [1, 2] показана необхідність створення відповідних класифікаторів форм та текстур зон їх зношування чи руйнування. Основна увага в цих роботах приділялась побудові класифікаторів форм названих зон, а питання розроб-

ки класифікаторів текстур ще й досі є відкритим. Разом з цим відповідна інформація є досить важливою. Вона допомагає у визначенні механізмів зношування та руйнування інструментів. Тому у даній роботі приведено стислий аналіз методів її отримання.

У першому наближенні розрізняємо такі класи текстур поверхонь інструменту, як текстури – сліди адгезійного, абразивного та концентрованого зношування поверхонь інструменту, текстури викрошування та текстури поверхонь сколів. Перейдемо до скороченого аналізу деяких з методів отримання відповідної інформації.

Відомо багато робіт, у складі яких вимірювальна інформація про стани зношених поверхонь отримувалася з використанням профілографів. Автор у свій час також використовував цей метод. Звичайні профілографи – профілометри дозволяли отримувати набори аналогових профілограм (перетинів) зношених поверхонь інструменту. У якості прикладу на рис. 1.а представлена аналогова модель – топограма ділянки передньої поверхні різця, яка будувалася без використання ПК по набору профілограм (рис. 1.б) –  $L_{1,1}^T, L_{1,2}^T, \dots, L_{1,(i-1)}^T, L_{1,i}^T, L_{1,(i+1)}^T, \dots, L_{1,n}^T$ . Такі топограми (моделі) дозволяли розпізнавати текстури – сліди абразивного зношування інструменту (зони 2 - 4), сліди наросту (5, 6). Вони забезпечували визначення площі зон, що обмежені профілями  $L_{1,i}^0; L_{1,i}^T$ . Це давало можливість розраховувати об'ємний знос ділянок поверхонь. Але їх побудова була пов'язана з значними витратами часу як на реєстрацію профілів, так і на побудову моделей.

Після модернізації профілографа та стиковки його з ПК значно скоротився час на побудову цифрових 3Д – моделей та визначення зон з особливою текстурою.

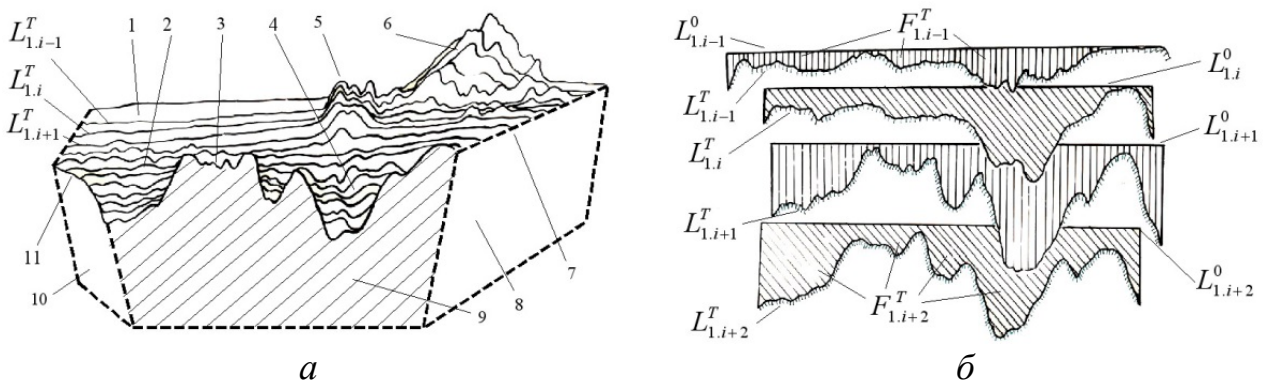


Рисунок 1. – Приклади аналогової топограми ділянки передньої поверхні зношеного різця (а) та окремих перетинів, що використовувались для її побудови (б).

Приклади таких 3Д – моделей, описи відповідного методу та лабораторного стенду для їх побудови приведені нами у роботі [2]. Але недоліками цього методу лишилися значні витрати часу на отримання вимірювальної інформації, можливість його реалізації тільки у лабораторії. Завдяки високій точності побудови моделей він може бути рекомендований для використання на першій ста-

дії створення класифікатору текстур – накопичення вимірювальної інформації, формування набору значущих класів текстур, визначення множини ознак та побудови відповідного простору.

Одним з відомих методів дослідження текстур поверхонь інструменту є метод електронної мікроскопії.

На рис. 2 приведено набори фотографій поверхонь зношеного інструменту, що отримані на електронному мікроскопі МРЕМ – 100. Вони виконані з поступовим збільшенням масштабу реєстрації текстурних ділянок зони зношування А.

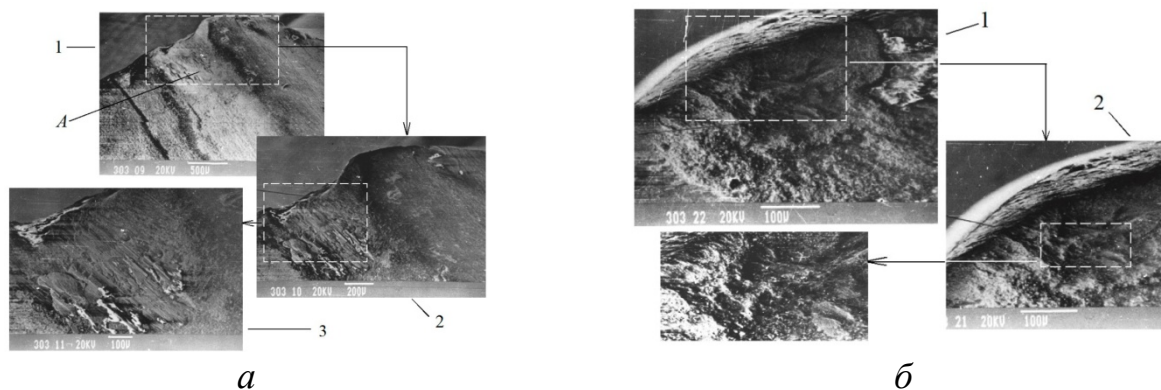


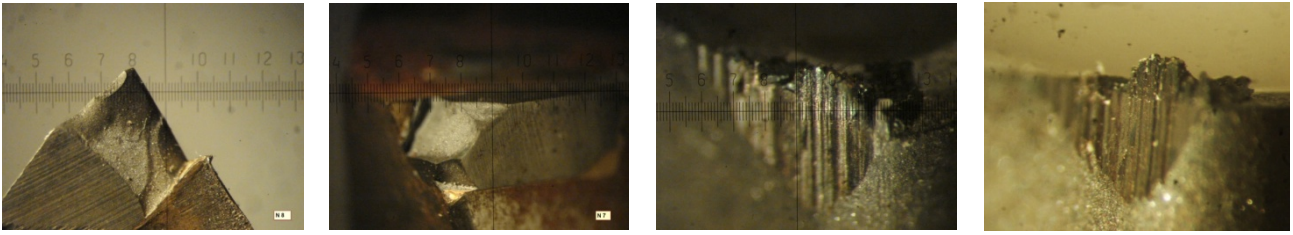
Рисунок 2. – Видляди зон зношування та відповідних текстур головної задньої (а) та передньої (б) поверхонь різця (обробка сталі 8ХФ інструментом з ТНП (Т15К6);  $V = 2,1$  /с;  $S_0 = 0,09$  мм/об ;  $t = 0,2$  мм.)). Машиаб зображень зазначений в нижньому полі кожної з фотографій.

Цей метод дозволяє розпізнавати усі з названих вище класів текстур і може бути рекомендований, як і попередній, для використання на першій стадії створення класифікатору текстур. Крім того, зазначені методи планується використовувати як еталонні.

Друга стадія створення класифікаторів текстур містить такі етапи: вибір методу розпізнавання; створення відповідного алгоритмічного та програмного забезпечення; навчання системи розпізнавання на статистично представимих вибірках даних; отримання вирішальних правил, що дозволяють розділяти області класів у просторі станів поверхнями того чи іншого рівня; оцінка якості розпізнавання класів текстур; контрольна перевірка якості розпізнавання еталонними методами.

Для реалізації цієї стадії необхіден оперативний метод, що може бути реалізований як у лабораторних, так і у виробничих умовах. Основні вимоги для нього - висока швидкість отримання вимірювальної інформації наряду з досить високою якістю; можливість її багаторівневої обробки, накопичення та компактного збереження у відповідних базах даних. У якості такого методу прийнято метод реєстрація комплексу цифрових зображень поверхонь зношування та руйнування з використанням спеціалізованої СТЗ. Приклади таких зображень приведено на рис. 3.





*а б в з*  
 Рисунок 3. – Приклади цифрових зображень текстурних зон на поверхнях сколу вершини різця (а, б) та текстур - слідів концентрованого зношування задній поверхні різців (в, з)

Таким чином, у якості основного методу отримання інформації про текстури зон зношування та руйнування інструментів (в контексті даної роботи) прийнято метод використання спеціалізованої СТЗ з набором цифрових камер. Отримано попередні результати, які показали перспективність його використання. Він буде використовуватись в комплексі з оперативним еталонним методом.

#### **ЛІТЕРАТУРА**

1. Деревянченко, А.Г. Интеллектуальная система диагностирования отказов и прогнозирования ресурса режущих инструментов / А.Г. Деревянченко, Д.А. Криницын – Одесса: Астропринт. 2012. – 202 с.
2. Интеллектуальные системы распознавания состояний режущих инструментов/ А.Г. Деревянченко, В.Д. Павленко, А.А. Фомин и др. – Одесса: Астропринт, 2013. – 300 с.

*Деревянченко А.Г., Гнатюк А.П., Жеглова В.М.,  
 Паленый Ю.Г., Скачко И.В.*

Одесский национальный политехнический университет,  
 Одесса, Украина

### **КОМПЛЕКСНЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ**

Определяющим направлением развития машиностроения является внедрение в производство прогрессивных технологических процессов (ТП), одним из которых является сверление глубоких отверстий (ГО) инструментами одностороннего резания (ИОР). Данный ТП позволяет отказаться от ряда переходов традиционного ТП получения отверстий высокого качества (зацентрировка-сверление спиральными сверлами, зенкерование, развертывание или растачивание) и сократить трудоемкость последующих доводочных технологических операций.

Для обработки ГО ИОР применяются специальные станки. Однако, эти станки недостаточно укомплектованы показывающей и следящей, за ходом ТП, аппаратурой. Так как данный ТП, по определению, закрытый, а стоимость ИОР достаточно высока, то отсутствие вышеуказанной аппаратуры приводит к неоправданному расходом ИОР, а значит к подорожанию выпускаемой продукции.

В связи с вышеизложенным авторы данной статьи поставили себе задачу оснастить, экспериментальный станок для ГС мод. 2810П, предназначенный для обработки ГО головками типа ВТА(STS), системой контроля данного ТП. Решение этой задачи осуществлялось с учетом: минимизации материальных затрат; простоты технической реализации; простоты обслуживания; разработки системы контроля, позволяющей предотвратить критический износ инструмента путем оперативной корректировки процесса обработки или аварийного останова подачи инструмента.

В настоящее время существуют различные системы активного контроля, обеспечивающие измерения отдельных параметров в процессе механической обработки [1, 2], а также системы, позволяющие оперативно управлять ТП [3, 4]. Однако специфика обработки ГО ИОР, из-за закрытости протекания ТП, не приемлет многие уже имеющиеся подходы для решения поставленной задачи.

Косвенную информацию о состоянии режущей части сверлильной головки и режимах резания несут физические величины, связанные с этим процессом, а именно: вибрации, усилия резания, количество тепла, расход смазочно-охлаждающей технологической среды (СОТС). Руководствуясь этим посылом было решено оснастить вышеуказанный станок системой датчиков, которая дала бы возможность определять эти физические величины в течение всего производственного цикла и, кроме того, с использованием системы технического зрения (СТЗ) осуществлять контроль и диагностирование состояний и прогнозирование остаточного ресурса сверлильных головок [5, 6].

Для осуществления, по сути, этих двух задач глубокосверлильный станок был оснащен системой датчиков, следящих в целом, за протеканием ТП (рис. 1).

Кроме того, и СТЗ, позволяющей контролировать износ режущих элементов сверлильной головки после каждого окончания цикла сверления (при смене заготовки) (рис. 2).

Выводы. Оснащение станка модели 2810 системой датчиков и СТЗ позволило:

- автоматизировать выполнение задач по измерению вышеуказанных параметров;
- оперативно производить анализ и обработку измеренной информации;
- оперативно управлять процессом ГС;
- получить новые экспериментальные результаты контроля состояний элементов режущей части головок ВТА на лабораторных стендах, в состав которых входит СТЗ.

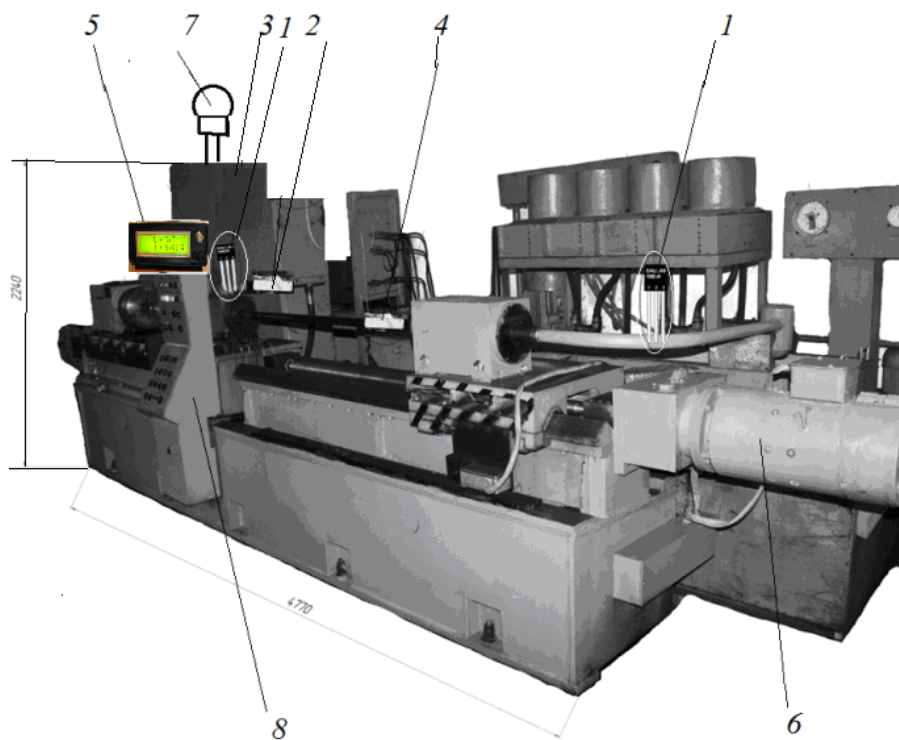


Рисунок 1. Станок мод. 2810П с измерительно-информационной системой (1 – датчики температуры СОТС; 2 – датчик расхода СОТС; 3 – силовой шкаф; 4 – датчик вибраций; 5 – монитор; 6 – привод подачи инструмента; 7 – лампа аварийной сигнализации; 8 – пульт управления)

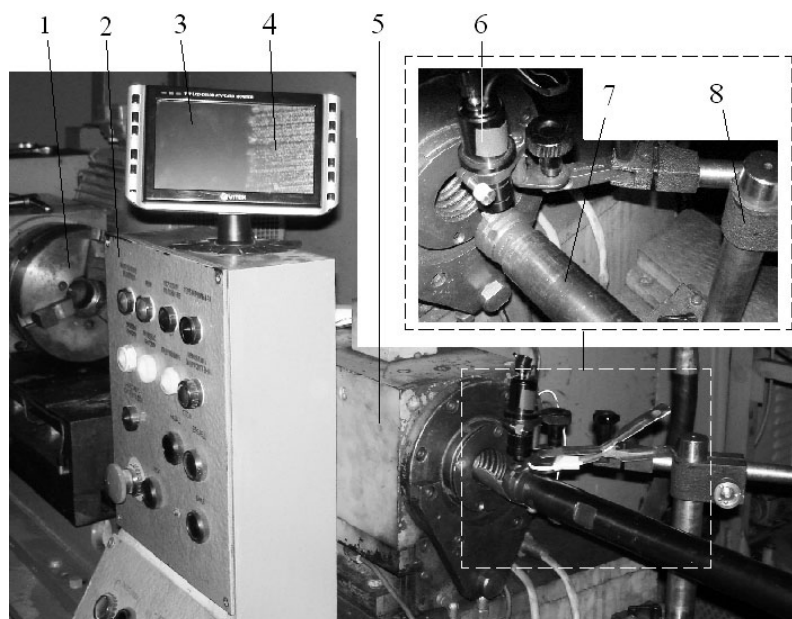


Рисунок 2. Общий вид станка мод. 2810 с СТЗ (1– патрон, 2 – пульт управления, 3 – видеоконтрольное устройство, 4–изображение прикромочного участка одного из режущих элемента сверла, 5–маслоприемник, 6–WEB-камера, 7–борштанга с контролируемой головкой ВТА, стойка, на которой крепится WEB-камера)

– результаты в виде наборов цифровых изображений изношенных поверхностей и режущих кромок, зон выкрашиваний и сколов головок, а также

наработки, полученные при эксплуатации станков, будут использованы для создания соответствующего модуля интеллектуальной системы контроля, диагностирования состояний и прогнозирования остаточного ресурса сверлильных головок.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Активный контроль размеров / под ред. С. С. Волкова. – М.: Машиностроение, 1984 – 224с.
2. Головки Д.Б. Основи метрології та вимірювань / Д.Б. Головки, Г.К. Реґо, Ю. О. Скрипник. – К.: Либідь, 2001. – 408 с.
3. Пестунов В.М. Управление циклом процесса глубокого сверления / В.М. Пестунов, В. В. Свяцкий, Л.П. Свяцкая // Дни науки – 2006: Матеріали II міжнар. наук.-практ. конф. – Дніпропетровськ, 2006. – Т. 10: Техн. науки. – С. 8-11.
4. Пестунов В.М. Элементы системы СПИД, ограничивающие выходные характеристики процесса глубокого сверления / В.М. Пестунов, В.В. Свяцкий, Л.П. Свяцкая // Naukowymprogressnarubieżytyśiącleci – 2008: Materials IV Międzynarodowej naukowii-praktycznej konferencji. – Тум 14. Technicznenauci. – Р. 53-55.
5. Деревянченко А.Г. Система интеллектуального анализа изображений зон износа режущих инструментов / А.Г. Деревянченко, О.Ю. Бабилунга, Д.А. Криницын // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2010. – Вып. 78. – С. 34-41.
6. Дерев'янченко О.Г. Діагностування станів різальних інструментів при прецизійній обробці / О.Г. Дерев'янченко, В.Д. Павленко, А. В. Андреев. – Оdesa: Астропрінт, 1999. – 184 с.

*Дитиненко С.А.*

Харьковский национальный экономический университет  
имени Семена Кузнецца, Харьков, Украина

### ОКОНЧАТЕЛЬНОЕ ШЛИФОВАНИЕ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ИЗДЕЛИЙ АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СВЯЗКАХ

При обработке твердосплавных изделий широко используется алмазное шлифование. Однако его производительность не всегда превышает производительность обычного абразивного шлифования при условии обеспечения высококачественной обработки. Поэтому важно провести теоретические и экспериментальные исследования условий повышения производительности  $Q$  и снижения шероховатости  $R_a$  обработки при круглом наружном шлифовании на основе полученной аналитической зависимости [1]:

$$Q = B \cdot V_{дет} \cdot t = \frac{m \cdot B \cdot V_{кр} \cdot t}{\pi \cdot \bar{X}^3 \cdot \sqrt{\rho}} \cdot \frac{(1+\eta)}{(1-\eta)^2} \cdot \left(\frac{R_a}{2}\right)^{2,5}, \quad (1)$$

где  $B$  – ширина круга, м;  $V_{кр}, V_{дет}$  – соответственно скорости круга и детали, м/с;  $t$  – глубина шлифования, м;  $\rho = \frac{1}{R_{кр}} + \frac{1}{R_{дет}}$ ;  $R_{кр}, R_{дет}$  – соответственно радиусы круга и детали, м;  $m$  – объемная концентрация зерен круга;  $\bar{X}$  – зернистость круга, м;  $\eta = \frac{x}{H} = \frac{x}{x + H_{max}}$  – безразмерный коэффициент, учитывающий степень затупления зерен круга и изменяющийся в пределах  $0 \dots 1$  ( $\eta \rightarrow 0$  - для острых зерен,  $\eta \rightarrow 1$  - для затупленных зерен);  $x$  - величина линейного износа максимально выступающего над связкой зерна, м;  $H$  - условная максимальная глубина внедрения зерен в обрабатываемый материал, отсчитывается от вершины исходного неизношенного максимально выступающего над уровнем связки зерна, м;  $H_{max}$  - максимальная (приведенная) толщина среза, м;

$$H_{max} = \sqrt[3]{\frac{630 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3 \cdot V_{дет} \cdot \sqrt{t \cdot \rho}}{m \cdot V_{кр}} \cdot \frac{(1-\eta)^2}{(1+\eta)}}. \quad (2)$$

Согласно зависимости (1), наибольшее влияние на производительность обработки  $Q$  оказывает безразмерный коэффициент  $\eta$ : с его увеличением  $\eta \rightarrow 1$  производительность обработки неограниченно увеличивается. Выполнить условие  $\eta \rightarrow 1$  можно за счет существенного увеличения величины  $x \rightarrow H$  (или  $H_{max} \rightarrow 0$ ), искусственно создавая на вершинах зерен значительные площадки и обеспечивая при этом процесс резания (съем материала).

Как известно, создать значительные площадки на вершинах зерен алмазных кругов на относительно мягких связках (органических, керамических) не представляется возможным вследствие низкой прочности удержания зерен в связке. Их можно создать на вершинах зерен алмазных кругов на металлических связках, предварительно обеспечив увеличенное выступание зерен над уровнем связки круга за счет применения эффективных методов электроэрозионной или электрохимической правки.

Для разрушения выступающей над уровнем связки части алмазного зерна и образование площадки можно использовать метод шлифования алмазным кругом на металлической связке изделия из сверхтвердого материала, например, алмазного карандаша, пластины из поликристаллического синтетического сверхтвердого материала и т.д. [2].

Предварительно алмазный круг на металлической связке 1A1 300x20x5 AC6 100/80 M1-01 4 подвергался электроэрозионной правке с целью устранения его биения и качественного вскрытия алмазоносного слоя (обеспечения увеличенного выступания зерен над уровнем связки). Затем производилось шлифование по жесткой схеме алмазным кругом алмазного карандаша, который крепился в специально предназначенном для этого устройстве на круг-

лошлифовальном станке. Глубина шлифования составляла 0,02 мм, выполнялось несколько продольных ходов стола станка.

Подготовленный таким способом алмазный круг на металлической связке был испытан на операции круглого наружного шлифования твердосплавных изделий, в результате чего установлено, что шероховатость обработки равна  $R_a = 0,1$  мкм, тогда как после шлифования вновь заправленным электроэрозионным методом этим же алмазным кругом шероховатость обработки находилась на уровне  $R_a = 2$  мкм (приработка круга в течение 30 мин позволила уменьшить шероховатость лишь до уровня  $R_a = 1$  мкм).

Таким образом, шлифование специально подготовленным к работе алмазным кругом на металлической связке позволило существенно снизить шероховатость обработки при достаточно высокой производительности (глубина шлифования  $t = 0,02 \dots 0,05$  мм) в течении длительного периода времени шлифования (30 мин и более).

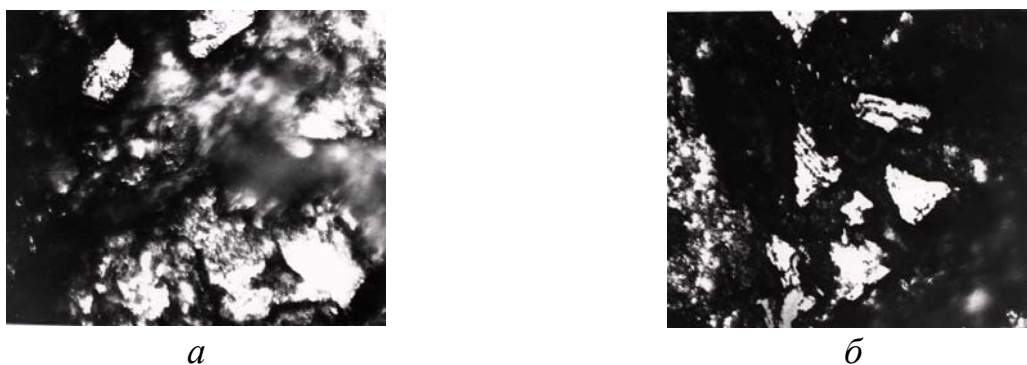


Рисунок 1. – Рабочая поверхность алмазного круга 1А1 300x20x5 АС6 100/80 М1-01 4 (светлые участки на фотографиях – алмазные зерна)

Сравнение расчетных и экспериментальных значений размеров площадок на вершинах зерен показало, что их расхождение составило всего 10 %. Максимальный диаметр площадки на зерне равен 30...40 мкм (рис. 1, а, б), т.е. примерно третьей части размера зерна. На рис.2, а, б показаны фотографии рабочей поверхности алмазного карандаша (с хаотическим расположением зерен) после его шлифования алмазным кругом.

Используя теоретические и экспериментальные исследования, был разработан эффективный технологический процесс окончательной обработки шлифованием цилиндрических твердосплавных изделий, включающий предварительную электроэрозионную правку и специальную технологию подготовки алмазного круга на металлической связке к работе (создание площадок на вершинах алмазных зерен). Установлено, что процесс шлифования обеспечивает повышение производительности и снижение технологической себестоимости при выполнении высоких требований по качеству обработки (параметр шероховатости  $R_a = 0,1$  мкм) на операции круглого наружного продольного шлифования алмазным кругом на металлической связке. Это позволяет в ряде случаев

исключить последующую трудоемкую операцию доводки свободным абразивом (алмазной пастой) из технологического процесса, а в ряде случаев снизить ее трудоемкость, что в целом в несколько раз повышает производительность технологического процесса обработки.



*Рисунок 2. – Рабочая поверхность алмазного правящего карандаша (темные участки на фотографии (а) алмазные зерна; на фотографии (б) показано алмазное зерно в увеличенном масштабе)*

Разработанный технологический процесс шлифования с высокой эффективностью был внедрен на Харьковском машиностроительном заводе «ФЭД» при окончательной обработке твердосплавных изделий.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общ. ред. Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах. – Одесса: ОНПУ, 2002. – Т.4. «Теория абразивной и алмазно-абразивной обработки материалов». – 802 с.

2. Новиков Ф.В. Технология и теория прецизионной обработки твердосплавных инструментов алмазными кругами на металлических связках / Ф.В. Новиков, С.А. Дитиненко // Физические и компьютерные технологии: труды 8-й Междунар. научно-техн. конф., 9-10 декабря 2003, Харьков. – Х.: ХНПК «ФЭД», 2003. – С. 34-39.

*Жовтобрюх В.А.*

ООО «Технический Центр «ВариУс», Днепр, Украина

## **СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ**

Для повышения конкурентоспособности в машиностроительном производстве необходимо рационально использовать его ресурсы. Это относится и к операции сверления, которая должна выполняться быстро и надежно, несмотря на очевидные недостатки и трудности этого процесса. Будь то черновая обра-

ботка полости в заготовке или изготовление точного отверстия для сопряжения деталей в механизме, эффективное сверление всегда рассматривается как серьезное конкурентное преимущество производителя. Южно-корейская компания TaeguTec является мировым лидером в производстве инструмента для обработки отверстий. В своем арсенале она имеет следующие серии инструмента: H-Drill – монолитные твердосплавные сверла; MQL Drill – монолитные твердосплавные сверла для сверления глубоких отверстий (до 20 диаметров) с применением минимального количества СОЖ; T-Drill – сверла с механическим креплением пластин; T-Cap – многофункциональный инструмент для сверления, растачивания и торцевого наружного точения; T-CHAMFER – комбинированные сверла для одновременного снятия фаски; T-Deer – инструментальные системы для глубокого сверления; TS (TB, TM) – REAM – развертки.

Как известно, главными критериями при выборе сверла являются диаметр обрабатываемого отверстия, глубина сверления и, конечно же, материал заготовки. Наиболее важным параметром, влияющим на выбор технологии обработки отверстий, является отношение глубины отверстия к его диаметру ( $L_{отв.}/D$ ). В современной металлообработке принято считать отверстия неглубокими, если это отношение не превышает 5. Для обработки таких отверстий без каких-либо ограничений могут быть применены все виды сверления с окончательной доработкой концевым и расточным инструментом. В то же время к глубоким отверстиям однозначно относят отверстия с отношением  $L_{отв.}/D > 20$ . В этом случае используют специализированное оборудование и инструмент для глубокого сверления и расточки, отличительной особенностью которых является наличие направляющих элементов для опоры режущей части инструмента о стенки самого обрабатываемого отверстия. Наиболее целесообразным методом получения отверстий диаметром от 12,5 до 80 мм и глубиной до 4 – 5 диаметров является обработка сборными сверлами со сменными неперетачиваемыми пластинами серии T-Drill. Они обеспечивают наименьшие инструментальные затраты по сравнению со всеми другими системами.

Серия T-Drill – это высокопроизводительные сверла с механическим креплением квадратных пластин, имеют по 4 эффективных режущих кромки. Типоразмер пластин T-Drill представлен в диапазоне от 5 мм до 14 мм, в зависимости от габаритов корпуса сверла. Различные твердые сплавы и виды стружколомающей геометрии позволяют обрабатывать практически весь спектр материалов: DG – универсальное применение при обработке сталей (рис. 1, а); DK – обработка чугуна (рис. 1, б); DA – полированная передняя поверхность пластины (рис. 1, в) для обработки алюминия и цветных материалов.

Сплавы: TT9030 – обработка всех типов материалов, оптимальное сопротивление механическому удару; TT8020 – прочный сплав при обработке неустойчивых поверхностей или для пакетной обработки; TT6030 – сплав для обработки чугунов; TT7400 – сплав для периферийных пластин при обработке углеродистой и легированной сталей; K10 – твердый сплав для обработки алюминиевых материалов. Сверла серии T-Drill являются высокопроизводительными и работают с высокими скоростями резания (табл. 1).





Рисунок 1. – Пластины SPMG со стружколодами:  
DG (а); DK (б); DA (в)

Таблица 1. – Режимы резания сверлами серии T-Drill

Обрабатываемый материал	Скорость резания $V$ , м/мин	Подача $F_{об}$ , мм/об.
Сталь	130 – 250	0,05 – 0,25
Нержавеющая сталь	170 – 240	0,05 – 0,19
Чугун	130 – 250	0,06 – 0,30
Титановый сплав	30 – 60	0,05 – 0,24
Алюминий	330 – 380	0,06 – 0,26

Для экономически обоснованного сверления отверстий больших диаметров (более 50 мм), компания TaeguTec рекомендует использовать сверла серии T-Drill с двумя картриджами (рис. 2).



Рисунок 2. – Сверло серии T-Drill с картриджами

В комплект одного сверла входят центральный (неподвижный) картридж, который перекрывает центр сверла, и периферийный картридж с возможностью регулирования диаметра сверления за счет комплекта установочных пластин.

Эти пластины помещаются между корпусом сверла и периферийным картриджем. Таким образом, имея один корпус сверла, например, TDR 2567-73-50T2-11CA, можно выполнять обработку отверстий от диаметра 67 мм до 73 мм включительно. Для более стабильного сверления компания TaeguTec предлагает периферийные картриджи фиксированного размера без установочных пластин или сверла с монолитным корпусом без картриджей.

При обработке отверстий большое значение имеет жесткость сверла. Наиболее важным параметром, влияющим на жесткость, является отношение глубины к диаметру сверления ( $L_{отв}/D$ ). Но даже при обработке сверлами TaeguTec серии T-Drill на глубину 5 диаметров обеспечивается жесткость, большая, чем при обработке подобным инструментом других производителей. Этот результат достигается благодаря размещению пластины под определенным углом (угол "атаки") на корпусе сверла, что способствует образованию минимальных вибраций в процессе сверления. На все корпуса сверл серии T-Drill нанесено износостойкое покрытие NickoTec, которое предотвращает налипание стружки.

В процессе сверления срезаемый металл (стружка) постоянно контактирует с корпусом сверла и способствует его быстрому износу. Поэтому дополнительным преимуществом корпуса T-Drill является специальная закаленная область в зоне контакта стружки и корпуса (рис. 3).



Рисунок 3. – Закаленная область

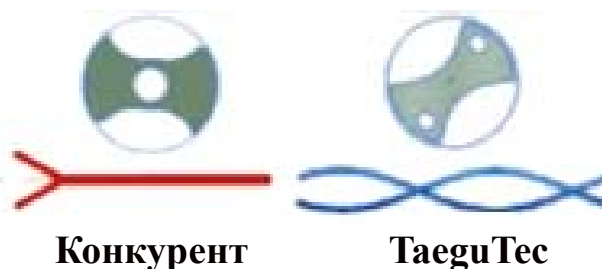


Рисунок 4. Конструкция каналов для подачи СОЖ

Отдельного внимания заслуживает конструкция каналов для подачи СОЖ (рис. 4). При изготовлении сверл T-Drill компания TaeguTec использует уникальную технологию получения винтовых каналов для подачи СОЖ в корпусах. Благодаря расположению каналов для подачи СОЖ в перьях сверла, вблизи периферии корпуса удастся уменьшить толщину сердцевины и, соответственно, увеличить пропускную способность стружечных канавок. Эта конструкция позволяет не только улучшить стружкоудаление и увеличить ресурс работы сверла, но и значительно снижает нагрузки на оборудование в процессе резания.

Чтобы устранить необходимость использования дорогостоящих сверл специального диаметра, компания TaeguTec предлагает использовать патроны с регулируемым диаметром сверления серии FITBORE для сверл с механическим креплением пластин. Диапазон регулирования диаметра составляет от  $-0,30$  до  $+1,30$  мм. Допуск на диаметр отверстия в пределах  $\pm 0,02$  мм.

## ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ ОБРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ И ЖАРОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В последние годы увеличился спрос на прочные и легкие материалы в ряде отраслей промышленности, начиная от аэрокосмической и автомобильной отраслей и заканчивая производством электроэнергии, что привело к разработке и внедрению композиционных материалов. Например, такие композиционные материалы, как пластик, армированный графитовой нитью (углепластик), на 70 % легче стали и на 40 % легче алюминиевого сплава. В частности, для аэрокосмической промышленности углепластик является популярным материалом из-за облегченного веса, что приводит к более высокой эффективности использования топлива.

В таких отраслях промышленности, как автомобилестроение, ветроэнергетика и индустрия отдыха, преимуществом применения композиционных материалов является их более высокая эффективность из-за облегченного веса и превосходной стабильности по сравнению со стандартными аналогами. Поэтому с расширением применения композиционных материалов для их эффективной обработки предлагаются новые фрезерные пластины из поликристаллических алмазов, концевые твердосплавные фрезы и сверла с алмазным покрытием производства компании TaeguTec (рис. 1). Новые инструментальные решения обеспечивают уникальные условия резания труднообрабатываемых материалов, т.к. объединяют в себе специальный сплав, необходимую геометрию и высокотехнологичное алмазное покрытие для обработки композиционных материалов.



Рисунок 1. – Инструменты для обработки труднообрабатываемых композиционных материалов

Пластины из поликристаллического алмаза (PCD) предназначены для обработки на более высоких скоростях резания и подачах по сравнению с другими традиционными материалами режущего инструмента. Специальная разра-

ботка – линейка пластин PCD – предназначена для предотвращения расслоения поверхности композиционных материалов. Для расширения диапазона операций обработки углепластика предлагается 4 конфигурации твердосплавных концевых фрез с алмазным покрытием.

Фрезы типа RRFE идеально подходят для обдирочных работ: исключают расслаивание, снижают усилия резания и вибрацию, обеспечивая высокую производительность инструмента для черновой обработки.

Другая конфигурация твердосплавных концевых фрез с алмазным покрытием для обработки углепластика – RCFE, также как и фрезы RRFE, исключает расслаивание, снижает усилия резания и вибрацию, обеспечивая высокую производительность инструмента для черновой обработки, с той лишь разницей, что используется несколько каналов для отвода стружки, а это позволяет обработку производить на повышенных режимах резания. Для чистовой обработки рекомендуется твердосплавная концевая фреза RCOM с алмазным покрытием, которая исключает расслаивание и представлена в двух конфигурациях: с левым и правым направлением канавок.

Четвертым предложением для обработки углепластика, которое также применимо для чистовой обработки и исключает расслаивание и сколы, являются фрезы RDCF с небольшим наклоном спиральных канавок. Что же касается монолитных твердосплавных сверл с алмазным покрытием, то сверла для обработки углепластика являются идеальным выбором при поиске инструмента, который исключает отслоение во время обработки сквозных отверстий.

Для обеспечения более высокой стойкости инструмента при высокопроизводительной обработке углепластика разработаны два новых сплава: PCD-сплав TD830 с ультратонкой алмазной крошкой. Он характеризуется высокими показателями износостойкости, прочности и качества кромки, обладает исключительной абразивной стойкостью и высокой термической стабильностью.

Вторым рекомендуемым сплавом для обработки волокнистых углепластиков является сплав TTD610. Благодаря прогрессивной технологии нанесения нано-алмазного покрытия этот сплав обеспечивает более высокую стойкость инструмента и стабильность обработки, характеризуется превосходной абразивной износостойкостью (имеет твердость более 8000 по Виккерсу) и одними из самых высоких показателей теплопроводности, ударопрочности и устойчивости среди аналогичных сплавов.

Новые керамические сплавы TC3020 и TC3030 для обработки жаропрочных материалов. Спрос на режущий инструмент, обеспечивающий повышение производительности и снижение себестоимости обработки жаропрочных сплавов, постоянно растет. В связи с этим, в компании TaeguTec освоено производство двух новых керамических сплавов на основе SiAlON – TC3020 и TC3030, которые обеспечивают чрезвычайно высокую производительность обработки. Эти керамические сплавы эффективны для обработки жаропрочных и труднообрабатываемых материалов, таких как инконель, сплав Рене и титан. Они обладают высокой прочностью и стойкостью к выкрашиванию, и являются лучшим выбором для операций прерывистого и непрерывного резания.

С разработкой новых керамических сплавов TC3020 и TC3030 сделан серьезный шаг в будущее – предлагается еще больший диапазон оптимальных для обработки жаропрочных сплавов решений по сравнению с уже применяющимися керамическими сплавами, армированными нитевидными кристаллами.

Новые керамические сплавы представлены сериями пластин для токарных и фрезерных операций, а также для обработки канавок (рис. 2). Так, сплав TC3020 идеально подходит для обработки жаропрочных сплавов и работает в тех же условиях, что и армированные керамические пластины. Высокостабильный керамический сплав TC3020, характеризующийся высокой износостойкостью, обеспечивает превосходную стойкость к выкрашиванию по боковой и задней поверхностям по сравнению с аналогичными решениями других производителей. Кроме того, этот керамический сплав обладает высокими показателями термической стойкости и ударной вязкости.

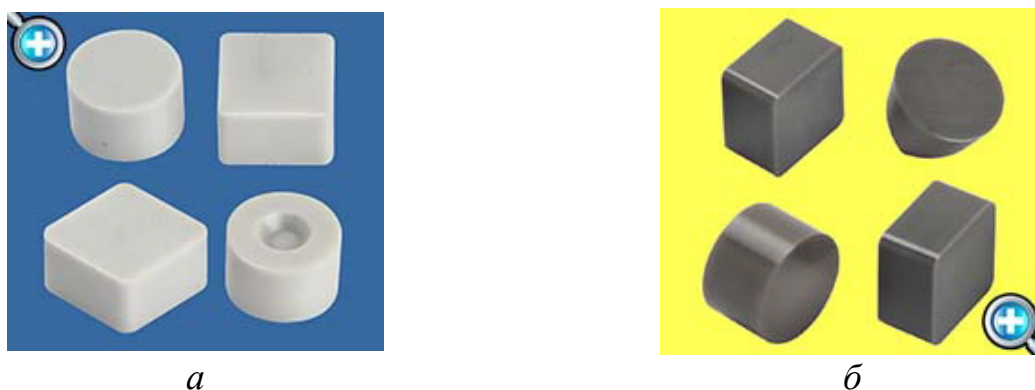


Рисунок 2. – Пластины из керамических сплавов TC3020 (а) и TC3030 (б)

Керамический сплав TC3030 также создан для обработки жаропрочных сплавов, с той лишь разницей, что предел жесткости TC3030 открывает больше возможностей для работы на более высоких подачах и глубинах резания. Сплав TC3030 можно применять для снятия окалины и черновой обработки, обеспечивая высокую термостойкость и теплопроводность.

Благодаря сочетанию нитрида кремния и оксида алюминия, керамический сплав на основе SiAlON характеризуется высокой химической стабильностью, снижает выкрашивание при выполнении ответственных операций, и может производить обработку со скоростью резания, в 4 – 6 раз превышая скорость резания обычными твердосплавными пластинами. Технические испытания новых сплавов в производственных условиях продемонстрировали высокие показатели производительности обработки и стойкости инструмента. Так, при непрерывной обработке канавок на корпусе двигателя, изготовленного из материала инконель 718, производительность обработки с использованием сплава TC3020 увеличилась на 40 % по сравнению с аналогичным керамическим сплавом другого производителя. При наружном прерывистом точении и прерывистой обработке канавок на корпусе двигателя, изготовленного из того же материала – инконель 718, применение керамического сплава TC3030 позволило увеличить стойкость инструмента на 23 % и 56 % соответственно. Наибольший эффект на фоне ана-

логичных инструментальных решений был достигнут с применением керамического сплава TC3030 на операции торцового фрезерования заготовки корпуса, изготовленного из сплава Рене 108, увеличив стойкость инструмента на 100 %.

*Жовтобрюх В.А.*

ООО «Технический Центр «ВариУс», Днепр, Украина

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ЧУГУНА РЕЗАНИЕМ**

В настоящее время обработка чугуна резанием является одной из сложнейших задач в машиностроении. Чугун широко используется во многих отраслях промышленности, особенно в такой инновационной и прогрессивной области, как автомобилестроение для изготовления ответственных частей: блока цилиндров, тормозных барабанов и дисков, картеров дифференциала, стержней, маховиков и многих других технологично сложных деталей. В промышленности используют практически все виды чугунов: ковкий, белый, серый и высокопрочный с шаровидным графитом. Одним из основных недостатков обработки чугуна резанием является непостоянная стойкость режущего инструмента, что приводит к различному расходу инструмента на одну деталь: при обработке одной партии стойкость может составлять 100 деталей на режущую кромку, для другой партии – 60 деталей. Одни специалисты утверждают, что причина такого результата – неоднородное содержание углерода в структуре чугуна, другие ссылаются на случайный фактор во время получения заготовки из чугуна. Поэтому важно обеспечить стабильную стойкость инструмента при обработке различных партий деталей. Это достигается применением разработанных компанией TaeguTec новых сплавов, отличающихся повышенной ударной вязкостью и прочностью в сочетании с сопротивлением к износу. Они эффективны как при прерывистом черновом резании, так и чистовой обработке чугуна.

Для изготовления автомобильных комплектующих наиболее часто используются серый и высокопрочный чугун. На обработку высокопрочного чугуна, как правило, затрачивается в три раза большее количество инструмента, чем на обработку серого чугуна. Это объясняется тем, что высокопрочный чугун содержит больше кремния и легирующих элементов в виде труднообрабатываемых карбидов. В высокопрочном чугуне графитовые включения имеют форму шара, окруженного оболочкой из карбида кремния. В сером же чугуне графит представлен в виде чешуек и достаточно легко обрабатывается резанием. Поэтому при обработке высокопрочных чугунов выделяется значительное количество теплоты. Для эффективной обработки в этих условиях на все твердосплавные пластины (рис. 1, а), предназначенные для обработки чугуна, наносится достаточно толстое многослойное покрытие (около 20 мкм), включающее слой  $Al_2O_3$  (оксида алюминия), который защищает основу твердосплавной пла-

стины от перегрева. Кроме того, оксид алюминия химически стабилен: он не вступает в реакцию с чугуном, что позволяет избежать химического износа пластины. Часто используют покрытия, в которых слой  $Al_2O_3$  чередуются с толстыми слоями TiCN (карбонитрид титана) (рис. 1, б).

Компания TaeguTec располагает множеством подобных решений как при токарной, так и при фрезерной обработке. Одним из них является применение инструментальных материалов нового поколения: TT7310, TT1300, TT6290, TT6030 (твердые сплавы); AW20, AB20, AB30, AS10, SC10 (керамика); TB650, KB90A и KB90 (кубический нитрид бора). Необходимо выделить новый фрезерный сплав TT6290, сочетающий двойное покрытие (рис. 2,а) CVD (MTCVD TiCN/Alumina/TiN) и PVD (AlTiN). Такая упрочненная подложка гарантирует повышенную стойкость инструмента. Традиционные фрезерные сплавы используются для обработки чугуна со скоростью резания ниже 250 м/мин, а сплав TT6290 способен производить обработку со скоростью 400 м/мин.



Рисунок 1. – Фрезерные пластины для обработки чугуна (а) и микроструктура сплава и покрытия (б)

Для улучшения механических свойств и уменьшения веса производимых деталей без потери их твердости в производстве применяют ковкий и CGI чугуны. Однако данное преимущество имеет и свои недостатки. Ковкий чугун содержит в своем составе больше кремния, чем серый чугун, который повышает абразивные характеристики, что, в свою очередь, значительно снижает стойкость инструмента при обработке. Кроме того, структура этого чугуна отличается от серого чугуна наличием частиц графита в виде хлопьев, окружающих феррит. Как следствие – при обработке ковкого чугуна затрачивают втрое больше времени (занижают режимы) и увеличивают число режущих пластин.



Рисунок 2. – Микроструктура фрезерного сплава TT6290 (а) и токарного сплава TT7310 (б)

Для обработки ковкого чугуна рекомендуется применять сплавы: ТТ7310, ТТ1300, ТТ6060, ТТ6030 (твердые сплавы); АW20, АВ20, АВ30, АS10, SC10 (керамика); ТВ650, KB90А и KB90 (кубический нитрид бора). Выбор конкретного материала пластины зависит от химических и физических свойств обрабатываемого материала и условий обработки. Так, для обработки ковкого чугуна рекомендуется использовать сплав ТТ7310 (рис. 2,б), который был разработан для точения ковкого и серого чугуна и способен увеличивать стойкость инструмента. Этот сплав имеет более широкую область применения и используется для машинной обработки ковкого чугуна в диапазоне скоростей от 150 м/мин до 350 м/мин и для серого чугуна – от 150 м/мин до 420 м/мин. На сплав ТТ7310 нанесено толстое покрытие с прочной твердосплавной подложкой, которая гарантирует обеспечение наилучшего сочетания износостойкости и стойкости к повреждению стружкой. Новый универсальный сплав применяется как для наружной токарной обработки, так и для расточки деталей на черновой и чистовой операциях. Он обеспечивает улучшенную стойкость инструмента, качество поверхности и надежность при работе на высоких подачах и скоростях для достижения высокопроизводительных результатов. Дополнительной и известной проблемой при обработке чугуна резанием является образование пыли графита. Данная ситуация возникает, когда обработка осуществляется без применения СОЖ. Графит оседает в виде пыли и загрязняет все рабочее пространство станка и, главное, – аккумулируется в легких станочника. Этого можно избежать путем использования СОЖ. С другой стороны, при обработке "всухую" повышается производительность и стойкость инструмента.

Однако обработка чугунов без применения СОЖ приводит к нагреву заготовки, что способствует выходу ее размеров за пределы поля допуска. Чтобы избежать данной проблемы, необходимо увеличивать подачу при обработке – в этом случае деталь просто не будет успевать нагреваться.



*Рисунок 3. – Пластина и державка серии HEX-TURN*

Для решения задачи эффективной финишной обработки чугунов компания TaeguTec рекомендует использовать керметы. Специально разработанный сплав кермет СТ3000 для высокоскоростной чистовой обработки, по сравнению с традиционными сплавами, обладает высокой теплопроводностью и низкой адгезией, что способствует увеличению стойкости пластин к износу по задней поверхности и к образованию зубцов (выемок). Благодаря однородной микроструктуре, сплав СТ3000 обеспечивает более длительный срок службы инструмента и улучшенную чистоту поверхности по сравнению с металлокерамическими сплавами других производителей для чистовой фрезерной и токарной



обработок. Используются данные сплавы на пластинах серии HEX-TURN (рис. 3), которые позволяют сократить затраты на токарную обработку.

Преимущество пластин серии HEX-TURN состоит в использовании пластин с 12 режущими кромками, полученными с применением технологии Wireg, которые позволяют увеличить производительность или получить высокое качество обработанной поверхности. Угол в плане на пластинах этого типа равен  $120^\circ$ , что повышает прочность и сопротивляемость к выкрашиванию.

*Жовтобрюх В.А.*

ООО «Технический Центр «ВариУс», Днепр, Украина

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЧЕРНОВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ

При значительной глубине резания возникает широкая стружка, которая способствует резкому увеличению сил резания в процессе фрезерования. Поэтому компанией TaeguTec предложена новая линейка пластин типа SPLITTER для достижения максимальной производительности без значительного увеличения сил резания в процессе обработки. SPLITTER – это специальная стружколомающая геометрия пластин с маркировкой SM (рис. 1), представляющая собой наличие специальных «секторных» канавок на режущих кромках, которые позволяют ломать стружку на несколько частей при большой глубине резания. Мелкая стружка лучше выводится из зоны резания, снижая нагрузку, вибрации и шумы в процессе фрезерования.



*Рисунок 1. – Пластины с геометрией SM*



*Рисунок 2. – Схема чередования пластин*

Каждая режущая кромка имеет две либо три секторные канавки. Для максимально эффективного использования режущих пластин серии SPLITTER необходимо чередовать кромки (рис. 2). Для удобства использования (чередования) пластины помечены черным цветом (рис. 3) по задней поверхности, что гарантирует безошибочную их установку на корпус фрезы.



Рисунок 3. – Метки на пластинах

Пластины положительно зарекомендовали себя при работе с большими вылетами и с большой глубиной фрезерования за один проход. Простое правило оценки целесообразности применения данной серии пластин – глубина резания должна быть не менее значения «d1» (рис. 4).

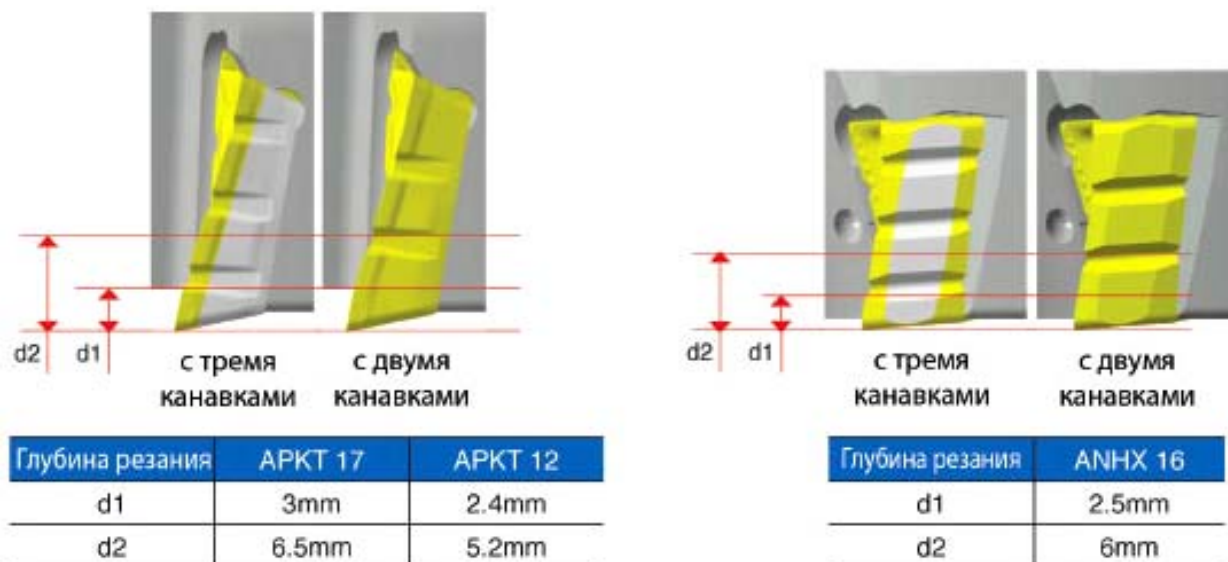
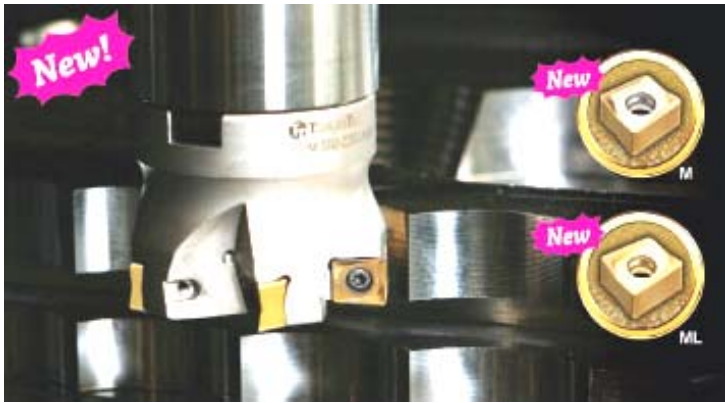


Рисунок 4. – Область применения режущих пластин серии SPLITTER

Размерный ряд серии для чернового фрезерования состоит из пластин:

- 1) APKT 1204 PER-SM;
- 2) APKT 1705 PER-SM;
- 3) ANHX 160708R-SM.

Пластины устанавливаются на стандартные корпуса фрез CHASEMILL и CHASE2MILL. Две первые пластины имеют по две режущие кромки, а последняя пластина является двухсторонней (4 кромки). Максимальная глубина резания для каждой из пластин может достигать: APKT 1204 PER-SM – 12,5 мм; APKT 1705 PER-SM – 16,1 мм; ANHX 160708R-SM – 15 мм. Следующая концептуально новая серия фрез CHASE2PLUNGE (рис. 5, а) предназначена для высокопроизводительного плунжерного фрезерования, связанного с удалением больших объемов металла за минимальное время.



*a*



*б*

*Рисунок 5. – Серия фрез CHASE2PLUNGE(a) и пластина PLNG (б)*

Главной режущей пластиной данной серии фрез является геометрия PLNG 090408R-M/ML (рис. 5, б) – это квадратная двухсторонняя пластина с четырьмя режущими кромками. В процессе плунжерного фрезерования часто возникают повышенные вибрации, с которыми в данном случае хорошо справляется позитивная передняя поверхность пластины, снижающая нагрузку на оборудование до 30 %. Существуют два исполнения передней поверхности режущих пластин: 1) М – для общего применения; 2) ML – для обработки таких вязких материалов, как низкоуглеродистая и нержавеющая сталь, а также для других труднообрабатываемых сплавов. Пластины крепятся к корпусу инструмента с помощью увеличенного винта с резьбой М3, позволяя гарантированно задействовать все 4-е кромки в обработке. При классическом использовании данного инструмента, например, при обработке уступа либо при подрезке гребешков после черновой плунжерной обработки, максимальная глубина резания составляет всего 2,8 мм, а при плунжерном фрезеровании глубина резания может достигать до 9 мм.

Номенклатура используемых корпусов разнообразна и состоит из концевых фрез (диапазон режущих диаметров  $\varnothing 25 - 40$  мм), торцевых фрез (диаметры  $\varnothing 40 - 66$  мм) и модульных головок (диаметры  $\varnothing 25 - 42$  мм).

При использовании инструмента CHASE2PLUNGE можно достичь более чем пятикратной производительности по объему снимаемого материала в сравнении с ранее применявшимся инструментом. Таким образом, невероятно популярная в мире и в Украине линейка фрез серии CHASE2FEED в очередной раз обновилась, пополнившись новой пластиной BLMP 0904R-M (рис. 6), предназначенной для чернового фрезерования с чрезвычайной производительностью. Наибольшая эффективность ее применения проявляется в следующих областях индустрии: энергетика, авиация и космос, общее машиностроение, в частности при изготовлении прессформ и штампов.

Основной идеей этого решения является небольшая глубина резания при экстремально больших значениях подач на зуб. Лучшее решение для предприятий, инвестировавших средства в высокоскоростное прецизионное оборудование без акцента на его мощность.



*Рисунок 6. – Пластина VLMP 0904R-M*

VLMP 0904R-M – это двухсторонняя пластина (рис. 6) с 4-мя режущими кромками, позволяющая работать на глубине резания до 1,5 мм, но при очень высокой подаче до 4 мм/зуб. За счет специальной криволинейной геометрии кромки силы резания направлены почти радиально в сторону шпинделя – это позволяет работать инструментом с большим вылетом, не снижая режимную часть. При такой геометрии оптимальный программируемый радиус при вершине составляет R2,5. Эта пластина устанавливается при помощи утолщенного винта M3,5 на новые корпуса, такие как: концевые фрезы (диаметры Ø25 - 40 мм), торцевые фрезы (диаметры Ø32 - 100 мм) и модульные головки (диаметры Ø25 - 42 мм).

*Кленов О.С.*

Фирма «ДиМерус Инженеринг» ООО, Харьков, Украина

## **ЭФФЕКТИВНЫЕ УСЛОВИЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО РЕЗАНИЯ**

Высокоскоростное резание является одним из основных направлений интенсификации процесса резания и обеспечения высококачественной обработки деталей машин. Для его осуществления разработаны высокооборотные металлорежущие станки с ЧПУ типа «обрабатывающий центр» и прогрессивные конструкции сборных режущих инструментов из твердых сплавов с износостойкими покрытиями, которые все шире используются на предприятиях Украины. Вместе с тем, на практике технологические возможности высокоскоростного резания используются не в полной мере, поскольку рекомендуемые и применяемые в производственных условиях скорости резания не столь существенно отличаются от традиционных. Это связано в первую очередь с высокими затратами на режущие инструменты и высокой себестоимостью изготавливаемой машиностроительной продукции, что снижает ее конкурентоспособность. Поэтому изыскание новых технологических возможностей эффективного применения высокоскоростного резания является актуальной задачей. Для ее решения следует режимы резания устанавливать из условия обеспечения минимума технологической себестоимости обработки  $C_{\min}$  в зависимости от производительности

сти обработки  $Q$  (рис. 1). В работе [1] показано, что в точке минимума  $C_{\min}$  затраты на заработную плату рабочего в  $(m_1 - 1)$  раз больше затрат на режущий инструмент, где  $m_1$  – показатель степени при скорости резания  $V$  в зависимости стойкости режущего инструмента  $T = \frac{C_4}{V^{m_1} \cdot t^q \cdot S^p}$  [2];  $t$  – глубина резания, м;  $S$  – подача, м/об;  $C_4, m_1, q, p$  – постоянные ( $m_1 > p > q; m_1 > 1$ ).

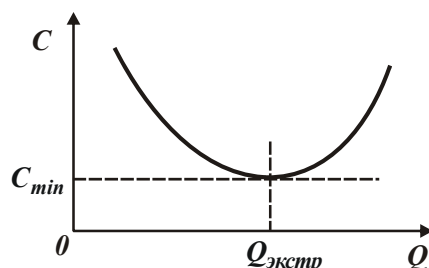


Рисунок 1. – Зависимость  $C$  от  $Q$

Для проверки этого положения экспериментально установлены рациональные условия обработки на различных технологических операциях, включая суммарные затраты  $Z = Z_{инстр} + Z_{оборуд} + Z_{з/н} + П_{расх}$  на обработку 1 детали (где  $Z_{инстр}$ ,  $Z_{оборуд}$ ,  $Z_{з/н}$  – затраты на инструмент, оборудование, заработную плату;  $П_{расх}$  – прочие расходы). На этой основе произведено сравнение статей затрат на заработную плату рабочего и на режущий инструмент с точки зрения обеспечения минимума технологической себестоимости обработки  $C_{\min}$ .

В табл. 1 приведены суммарные затраты  $Z$  на выполнение токарной операции отрезки (пруток из стали 45 диаметром  $D = 50$  мм) традиционным инструментом – твердосплавным резцом (применяемым на предприятии) и сборным твердосплавным резцом с износостойким покрытием фирмы Iscar. Режим резания традиционным инструментом (предприятие):  $V = 62,8$  м/мин; обороты шпинделя  $n = 400$  об/мин; подача на оборот  $S_0 = 0,15$  мм/об.; подача  $S_{мин} = 60$  мм/мин;  $t = 5$  мм; количество проходов – 1. Режим резания инструментом фирмы Iscar:  $V = 117,8$  м/мин;  $n = 750$  об/мин;  $S_0 = 0,15$  мм/об.;  $S_{мин} = 112,5$  мм/мин;  $t = 5$  мм; количество проходов – 1. Как видно, отношение затрат на заработную плату и затрат на инструмент  $Z_{з/н} / Z_{инстр}$  при обработке традиционными инструментами равно 2,65, а при обработке инструментами фирмы Iscar равно 13. Отношение, равное  $(m_1 - 1)$ , при обработке традиционными инструментами ( $m_1 \approx 5$ ) принимает значение 4, а при обработке инструментами фирмы Iscar ( $m_1 \approx 3$ ) – значение 2. Следовательно, для данных условий обработки традиционными инструментами и инструментами фирмы Iscar минимум технологической себестоимости обработки  $C_{\min}$  не достигается, т.к. реализуется левая ветвь зависимости  $C - Q$  (рис. 1). Поэтому уменьшить технологическую себестоимость обработки до минимального значения  $C_{\min}$  можно увеличением производительности обработки  $Q$ .

Таблица 1. – Суммарные затраты  $Z$  на выполнение токарной операции отрезки

Статьи расходов (показатели) на 1 деталь	Ед. изм.	Вариант 1 (базовый)	Вариант 2 (внедряемый)	Доля статей расходов, %	
		Предприятие	Iscar	Предприятие	Iscar
Трудоемкость обработки $T$	час.	0,090	0,037		
Затраты на инструмент $Z_{инстр}$	грн.	0,72	0,08	8,65	1,97
Затраты на оборудование $Z_{оборуд}$	грн.	1,73	0,70	20,74	17,52
Затраты на заработную плату $Z_{з/п}$	грн.	1,91	1,04	22,89	26,1
Прочие расходы $P_{расх}$	грн.	3,97	2,18	47,72	54,42
Суммарные затраты $Z$	грн.	<b>8,33</b>	<b>4,00</b>	100	100
Экономия затрат на 1 деталь	грн.		4,33	или	51,94

Таблица 2. – Суммарные затраты  $Z$  на выполнение операции точения вала

Статьи расходов (показатели) на 1 деталь	Ед. изм.	Вариант 1 (базовый)	Вариант 2 (внедряемый)	Доля статей расходов, %	
		Предприятие	Iscar	Предприятие	Iscar
Трудоемкость обработки $T$	час.	2,112	0,986		
Затраты на инструмент $Z_{инстр}$	грн.	47,68	38,36	22,96	29,62
Затраты на оборудование $Z_{оборуд}$	грн.	59,25	27,65	28,53	21,36
Затраты на заработную плату $Z_{з/п}$	грн.	44,56	28,08	21,46	21,7
Прочие расходы $P_{расх}$	грн.	56,17	35,40	27,05	27,34
Суммарные затраты $Z$	грн.	<b>207,66</b>	<b>129,48</b>	100	100
Экономия затрат на 1 деталь	грн.		78,18	или	37,65

В табл. 2 приведены суммарные затраты  $Z$  на выполнение операции точения вала из стали 20X2H4A диаметром  $D_{max} = 180$  мм,  $D_{min} = 150$  мм твердосплавным резцом (применяемым на предприятии) и сборным твердосплавным резцом с износостойким покрытием фирмы Iscar. Режим резания традиционным

инструментом (предприятие):  $V = 56,5$  м/мин;  $n = 100$  об/мин;  $S_0 = 0,6$  мм/об.;  $S_{мин} = 60$  мм/мин;  $t = 5$  мм; количество проходов – 3. Режим резания инструментом фирмы Iscar:  $V = 113,0$  м/мин;  $n = 200$  об/мин;  $S_0 = 0,8$  мм/об.;  $S_{мин} = 160,0$  мм/мин;  $t = 5$  мм; количество проходов – 3.

Как видно, отношение  $Z_{з/н}/Z_{инстр} = 0,93$  при обработке традиционными инструментами (предприятие) и  $Z_{з/н}/Z_{инстр} = 0,73$  при обработке инструментами фирмы Iscar. Это означает, что и в данном случае технологическая себестоимость обработки превышает значение  $C_{мин}$ , однако реализуется правая ветвь зависимости  $C - Q$  (рис. 1), т.е.  $Q > Q_{экстр}$ .

В табл. 3 приведены суммарные затраты  $Z$  на выполнение операции точения вала из стали 12X18H10T диаметром  $D = 75$  мм твердосплавным резцом (применяемым на предприятии) и сборным твердосплавным резцом с износостойким покрытием фирмы Iscar. Режим резания традиционным инструментом (предприятие):  $V = 47,1$  м/мин;  $n = 200$  об/мин;  $S_0 = 0,2$  мм/об.;  $S_{мин} = 40$  мм/мин;  $t = 2$  мм; количество проходов – 1. Режим резания инструментом фирмы Iscar:  $V = 146,0$  м/мин;  $n = 620$  об/мин;  $S_0 = 0,2$  мм/об.;  $S_{мин} = 124,0$  мм/мин;  $t = 2$  мм; количество проходов – 1.

Таблица 3. – Суммарные затраты  $Z$  на выполнение операции точения вала

Статьи расходов (показатели) на 1 деталь	Ед. изм.	Вариант 1 (базовый)	Вариант 2 (внедряемый)	Доля статей расходов, %	
		Предприятие	Iscar	Предприятие	Iscar
Трудоемкость обработки $T$	час.	0,158	0,058		
Затраты на инструмент $Z_{инстр}$	грн.	0,49	0,19	3,57	2,94
Затраты на оборудование $Z_{оборуд}$	грн.	3,03	1,10	21,89	17,34
Затраты на заработную плату $Z_{з/н}$	грн.	3,34	1,64	24,16	25,8
Прочие расходы $P_{расх}$	грн.	6,97	3,42	50,38	53,88
Суммарные затраты $Z$	грн.	<b>13,83</b>	<b>6,34</b>	100	100
Экономия затрат на 1 деталь	грн.		7,49	или	54,14

Отношение  $Z_{з/н}/Z_{инстр} = 69,38$  при обработке традиционными инструментами (предприятие) и  $Z_{з/н}/Z_{инстр} = 8,63$  при обработке инструментами фирмы Iscar. В этом случае применение инструментов фирмы Iscar приближает технологическую себестоимость обработки к минимальному значению  $C_{мин}$ , что и предопределяет эффективность обработки.

В табл. 4 приведены суммарные затраты  $Z$  на выполнение операции фрезерования детали «корпус» из стали 3Л традиционным инструментом – твердосплавной фрезой  $D = 100$  мм (предприятие) и сборной твердосплавной фрезой  $D = 100$  мм с износостойким покрытием фирмы Iscar. Режим резания традиционным инструментом (предприятие):  $V = 39,9722$  м/мин;  $n = 127,2$  об/мин; количество зубьев фрезы  $z = 5$ ; подача на зуб  $S_z = 0,06$  мм/зуб; подача на оборот  $S_0 = 0,3$  мм/об.; подача  $S_{мин} = 38,19$  мм/мин;  $t = 4$  мм; ширина резания  $B = 40$  мм; количество проходов – 2. Режим резания сборной твердосплавной фрезой с износостойким покрытием фирмы Iscar:  $V = 149,9978$  м/мин;  $n = 477,7$  об/мин;  $z = 5$ ;  $S_z = 0,2$  мм/зуб;  $S_0 = 1$  мм/об.;  $S_{мин} = 477,7$  мм/мин;  $t = 4$  мм;  $B = 40$  мм; количество проходов – 1. Отношение  $Z_{z/n} / Z_{инстр} = 1,31$  при обработке традиционными инструментами (предприятие) и  $Z_{z/n} / Z_{инстр} = 0,3$  при обработке инструментами фирмы Iscar. Следовательно, производительность обработки  $Q > Q_{эстр}$  и реализуется правая ветвь зависимости  $C - Q$  (рис. 1). Поэтому для обеспечения требуемого значения отношения  $Z_{z/n} / Z_{инстр}$  необходимо производительность обработки уменьшать. Это позволит научно обоснованно выбирать рациональные режимы резания для осуществления эффективной высокоскоростной обработки.

Таблица 4. – Суммарные затраты  $Z$  на выполнение операции фрезерования детали «корпус»

Статьи расходов (показатели) на 1 деталь	Ед. изм.	Вариант 1 (базовый)	Вариант 2 (внедряемый)	Доля статей расходов, %	
		Предприятие	Iscar	Предприятие	Iscar
Трудоемкость обработки $T$	час.	0,45	0,10		
Затраты на инструмент $Z_{инстр}$	грн.	<b>4,63</b>	<b>6,14</b>	14,94	46,87
Затраты на оборудование $Z_{оборуд}$	грн.	11,85	2,57	38,27	19,59
Затраты на заработную плату $Z_{z/n}$	грн.	6,06	1,84	19,59	14,04
Прочие расходы $P_{расх}$	грн.	8,42	2,55	27,20	19,50
Суммарные затраты $Z$	грн.	<b>30,96</b>	<b>13,10</b>	100	100
Экономия затрат на 1 деталь	грн.		17,86	или	57,69

Полученные результаты использованы при внедрении сборных твердосплавных лезвийных инструментов с износостойкими покрытиями фирмы Iscar взамен традиционных отечественных инструментов на различных предприятиях Украины. Достигнуто многократное увеличение производительности и снижение себестоимости обработки, что позволило повысить конкурентоспособность изготавливаемой продукции.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Жовтобрюх В.А. Повышение эффективности механической обработки деталей гидравлических систем путем выбора рациональных параметров операций по критерию себестоимости: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения» / В.А. Жовтобрюх. – Мариуполь, 2012. – 21 с.
2. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.

*Клименко С.А., Клименко С. Ан., Манохин А. С.,  
Копейкина М.Ю.*  
Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля  
НАН Украины, Киев, Украина

## НАПРЯЖЕНИЯ НА ПЕРЕДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ИНСТРУМЕНТОВ С ПСТМ НА ОСНОВЕ cBN

Согласно стандарта ISO 513-2012, композиты на основе cBN делятся на две группы – *BH*, *BL*. Композиты группы *BH* содержат 70–95 об. % cBN, к группе *BL* относятся композиты с 40–65 об. % cBN.

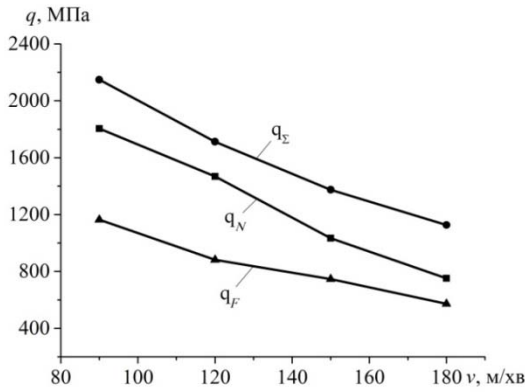
Целью данной работы являлось исследование напряжений на передней поверхности инструментов с ПСТМ на основе cBN с различным содержанием последнего при точении стали ШХ16 (60–64 HRC).

Для определения напряженного состояния инструментов в зоне контакта со стружкой использован метод определения средних значений касательных ( $q_F$ ) и нормальных ( $q_N$ ) напряжений по экспериментально определенным составляющим силы резания и длине контакта стружки с передней поверхностью ( $L$ ). Напряжения рассчитывались по зависимостям  $q_F = \frac{F}{b \cdot L}$ ;  $q_N = \frac{N}{b \cdot L}$ , где  $N$ ,  $F$  – нормальная сила  $N$  и сила трения  $F$ , действующие на передней поверхности инструмента, соответственно.

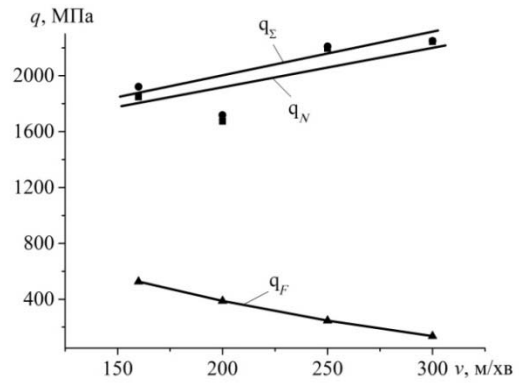
При использовании инструментов с ПСТМ группы *BL* имеет место уменьшение длины контакта при увеличении подачи по сравнению с инструментами с композитом группы *BH*, что объясняется комплексным изменением параметров процесса резания – увеличением температуры обработки и изменением условий трения на контактных участках инструмента.

Зная размер пятна контакта и значение главных составляющих силы резания можно определить уровень напряжений, действующих на передней поверхности режущего инструмента.

Результаты расчетов приведены на рис. 1.

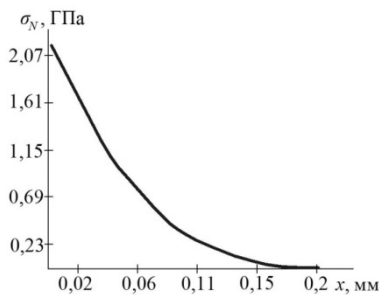


а

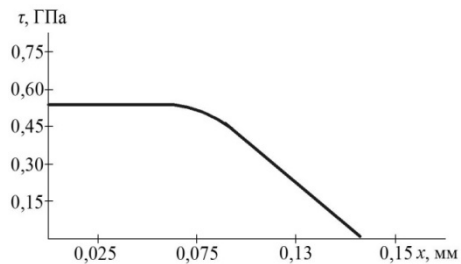


б

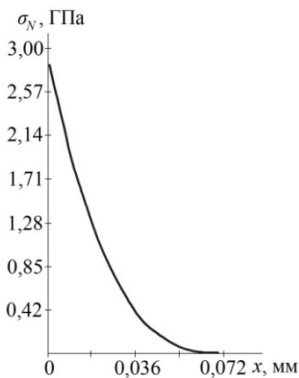
Рисунок 1. – Зависимость максимальных нормальных ( $q_N$ ), касательных ( $q_F$ ) и эквивалентных ( $q_\Sigma = \sqrt{q_N^2 + q_F^2}$ ) напряжений от скорости резания при точении ( $S = 0,14$  мм/об;  $t = 0,2$  мм) инструментами с композитами групп BH (а) и BL (б)



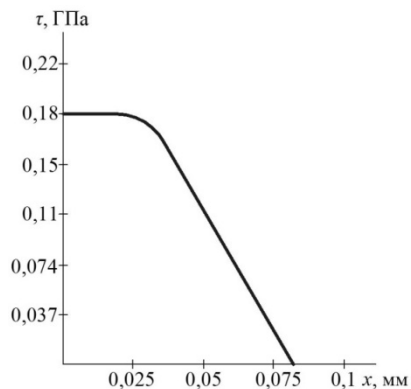
а



б



в



г

Рисунок 2. – Распределение нормальных (а, в) и касательных (б, г) напряжений на передней поверхности инструментов с ПСТМ на основе сBN: а, б – группы BH ( $v = 100$  м/мин); в, г – группы BL ( $v = 200$  м/мин)

В случае использования инструментов с ПСТМ группы BH, величина максимальных нормальных напряжений в диапазоне скоростей 90–180 м/мин монотонно снижается и находится в пределах 1,80–0,75 ГПа. Тангенциальная составляющая контактных напряжений также монотонно снижается при увеличении скорости резания и составляет 1,2–0,5 ГПа в зависимости от скорости обработки. Для инструментов с ПСТМ с низким содержанием сBN уровень

эквивалентных ( $q_{\Sigma}$ ) и нормальных ( $q_N$ ) напряжений монотонно возрастает с ростом скорости резания и они в среднем на 30 % больше по сравнению с напряжениями при работе инструментами, оснащенными композитом группы *BH*. При этом следует отметить, что инструменты с ПСТМ группы *BL* работают со значительно большими скоростями резания. Зная размер участков контакта и уровень напряжений можно построить эпюры распределения нормальных и касательных напряжений на передней поверхности инструментов (рис. 2).

Анализ эпюр распределения напряжений на передних поверхностях для инструментов с ПСТМ на основе *cBN* групп *BH* и *BL* показал, что при точении инструментами с композитом с низким содержанием *cBN* в зоне контакта возникают нормальные напряжения до 3,0 ГПа и касательные – 0,18 ГПа, при точении инструментом с композитом с высоким содержанием *cBN* – 2,1 ГПа и 0,58 ГПа соответственно. Увеличение нормальных напряжений связано с уменьшением длины контакта стружки, а касательные напряжения имеют меньшие значения в связи с увеличением температуры резания.

*Ковальов В.Д., Васильченко Я.В.*

Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, Україна

*Антонюк В.С.*

Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

*Волошин О.І.*

ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод»,

Краматорськ, Україна

*Клочко О.О.*

Національний технічний університет

«Харківський політехнічний університет», Харків, Україна

*Рябченко С.В.*

Інститут надтвердих матеріалів імені В.М. Бакуля

НАН України, Київ, Україна

## **НАУКОВІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА КРУПНОГАБАРИТНИХ РЕДУКТОРІВ**

Ефективна експлуатація крупногабаритних редукторів (рис. 1) виробів важкого машинобудування ПАТ НКМЗ в значній мірі залежить від контактної міцності зубчастих коліс, яка збільшується з підвищенням поверхневої твердості зубів. Несуча здатність зубчастих передач по контактній міцності збільшується з підвищенням поверхневої твердості зубів. Підвищення твердості по-

верхні зубів з HRC32 до HRC60 дозволяє вдвічі зменшити габарити редуктора і в 3 рази зменшити його масу.

Висока трудомісткість виготовлення загартованих крупномодульних зубчастих коліс обмежує їх застосування через значні припуски, які призначають на операціях зубошліфування для усунення дефектів після термообробки, можливість утворення припиків і мікротріщин, обмеження в розмірах зубчастих коліс, що установлюються на зубошліфувальних верстатах.



*Рисунок 1. – Рудорозмельний млин з зубчастими передачами виготовлений по інноваційній технології*

Розробка технологічних основ забезпечення продуктивності, точності та якості обробки загартованих крупномодульних зубчастих коліс є актуальною проблемою важкого машинобудування [1].

На основі використання сучасних наукових положень технології машинобудування і узагальнення наукових досягнень в зубообробці загартованих крупномодульних зубчастих коліс і вимог до важконавантажених та відповідальних зубчастих передач вперше сформульовані і реалізовані загальні принципи розробки нових інноваційних технологій та схем формоутворення зубчастих коліс з використанням сучасних можливостей числового програмного керування та розробкою нового верстатного обладнання. Це забезпечує підвищення якості та точності зубчастих коліс діаметром до 12 м, модулем до 65 мм та продуктивності обробки в 3-6 раз (рис. 2).

Реалізація інноваційних технологій обробки загартованих крупномодульних зубчастих коліс виконується: на оброблювальному центрі з нарізанням зубців на вінцях зубчастих коліс діаметром до 12 м (суміщення технологічних операцій токарно-карусельної і зубофрезерної); на токарному оброблювальному центрі виконується нарізання зубців на вал-шестернях, в т.ч. і з закритими шевронами діаметром до 1500 мм і довжиною до 8 м, виконується нарізка витків глободних і архімедівських черв'яків (суміщення технологічних операцій токарної і зубофрезерної); на розточувальному верстаті з ЧПК – виконується

нарізання зубців черв'ячних глобоїдних і архімедівських коліс; на поздовжньо-фрезерному оброблювальному центрі (суміщення технологічних операцій токарної, зубофрезерної і будь-якої операції, що вимагає свердлильно-фрезерно-розточувальну групу обладнання); на зубошліфувальному верстаті виконується обробка деталей конічного зачеплення; на вертикально-фрезерному верстаті з ЧПК – виконується нарізування зубців на колесах зубчастих діаметром до 5 м.



*Рисунок 2. – Приклади обробки зубчастих коліс за інноваційними технологіями*

Впровадження інноваційних технологій обробки крупномодульних зубчастих коліс дозволило вивести з експлуатації близько 15 одиниць застарілих верстатів.

Нова технологія реалізована з використанням комплексу обладнання, що включає: фрезерно-токарний оброблювальний центр, зубошліфувальні верстати з ЧПК, контрольно-обкатний верстат з ЧПК; контрольно-вимірювальну машину з ЧПК, об'єднує всі етапи підготовки виробництва і безпосередньо етапи виготовлення конічних передач в наскрізний потік.

Впроваджено нові процеси шліфування крупномодульних зубчастих коліс на зубошліфувальних верстатах «Gleason-Pfauter». розроблені та впроваджені спеціальні шліфувальні круги з хромтитаністого рубін-корунду форми Т2 (форма кільця) діаметром від 178 мм до 564 мм та висотою до 90 мм. Перспективним інструментом для шліфування зубчастих коліс є високопористі абразивні

круги з монокристалічного корунду для профільного шліфування на верстатах «Gleason-Pfauter» [2].

Розроблені інноваційні технології можуть використовуватись в оборонній промисловості при виготовленні приводів важкої броньованої техніки з забезпеченням роботи на форсованих режимах.

Вперше у світовій практиці розроблені інноваційні технології виготовлення зубчастих коліс з гідродинамічними карманами для утворення рідинного режиму змащування в зоні контакту з використанням пружно-нестисливої рідини. Такі зубчасті циліндричні передачі забезпечують високе демпфування пульсаційного навантаження зубчастих коліс крупногабаритних редукторів виробів важкого машинобудування, дозволяють зменшення технологічного усадковування похибок обробки спряжених поверхонь зубчастих коліс та корпусів редукторів. Практичне значення отриманих результатів для машинобудівельної галузі полягає в розроблені та виготовлені гами крупногабаритних редукторів для виробів важкого машинобудування, які за своїми технічними характеристиками знаходиться на рівні кращих закордонних аналогів *BEML*, *BUCYRUS*, *HEC*, *P&H*, *SENNEBOGEN*, *CNcrusher Us*, *Caterpillar* и др.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Технологические основы зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес: монография / А.А. Клочко [и др.]. – Краматорск: ДГМА, 2014. – 479 с.

2. Рябченко С.В. Обработка шлифованием зубчатых колес тарельчатыми кругами из СТМ / С.В. Рябченко // Процеси механічної обробки в машинобудуванні: зб. наук. праць. – Житомир : ЖДТУ, 2013. – Вип. 14. – С. 145-154.

*Ковалевська О.С.*

Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

*Ковалевський С.В., Ємець В.В.*

Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, Україна

## МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧОЇ ОБЛАСТІ МОБІЛЬНОГО ВЕРСТАТА–РОБОТА НА БАЗІ ДЕЛЬТА–МЕХАНІЗМУ

Серед методів діагностики об'єктів і процесів, що активно розвиваються, слід виділити методи їх акустичної діагностики і створення на цій базі систем управління [1, 3, 4]. У зв'язку з цим, метою представленого дослідження є підтвердження можливості багатокомпонентного аналізу параметрів об'єктів (процесів і обладнання). Як інформативне джерело діагностичного сигналу, слід ви-

користувати його амплітудно-частотну характеристику власних коливань об'єкта в акустичному діапазоні.

Для досліджень використано алгоритм швидкого обчислення дискретного перетворення Фур'є [2] за допомогою FFT-аналізатора.

Оцінка спектральної щільності проводиться за відомою реалізації  $XP(t)$  сигналу шляхом формування з неї дискретної послідовності  $x(n)$ ,  $n \rightarrow 0, 1, \dots, N$  і обробки цієї послідовності відповідно до заданого квантування.

Управління виконавчими рухами технологічних машина з механізмами паралельної структури являє собою складну задачу, рішення якої може бути отримано на основі рішення задач кінематики та динаміки виконавчих механізмів. В результаті можуть бути створені умови для точного позиціонування робочих органів виконавчих механізмів при оптимальних швидкостях і прискореннях їх рухів по заданій траєкторії. Для цих цілей системи управління повинні бути оснащені інформативними системами ідентифікації об'єктів. Для підтвердження цього пропонуються результати експериментальних досліджень, які дають підстави для створення систем діагностики кінематики і динаміки механізму, на базі якого авторами створюються мобільні верстати-роботи для застосування в реконфігурованих виробничих системах механічної обробки.

Методика експериментальних досліджень.

Мета досліджень – побудувати нейромережевому еталонну модель для діагностики поточних характеристик об'єкта. Вибір діагностованих характеристик об'єкта визначається завданнями управління об'єктами:

- підвищення точності позиціонування виконавчого механізму об'єкта;
- забезпечення динамічного настроювання виконавчого механізму;
- оптимізація траєкторій переміщень робочого органу.

Устаткування для проведення експериментальних досліджень:

– експериментальний стенд у вигляді дельта-механізму, що представляє собою групу механізмів на основі паралельної кінематики, який оснащений системою числового програмного керування на базі плати MEGA 2650, що забезпечує програмування управління стендом за допомогою G-кодів;

– дві звукові карти, встановлені а двох комп'ютерах з операційною системою Windows XP;

– п'єзоелектричні випромінювач і датчик;

– підсилювач сигналу збудження «білим шумом», потужністю 2 Вт.

Програмне забезпечення:

– комп'ютерний пакет Spectrolab;

– комп'ютерний пакет NeuroPro-0,25;

– комп'ютерний пакет Statistica 10.

Планом експериментів передбачалося залежності між параметрами спектра акустичного сигналу із заданою дискретністю, порушеної возмущаючим впливом у вигляді «білого шуму». Авторами висунуто припущення про можливість діагностики характеристик досліджуваних об'єктів, інваріантної стосовно похибок, що вносяться апаратною частиною системи діагностики. Це припущення ґрунтується на тому, що діагностичний сигнал має початкові значення

ступенів акустичного спектру, що формуються «білим шумом» тими ж інформаційними каналами і тими ж апаратними засобами, що і основний збуджений діагностичний сигнал.

Кожен вимір мало максимально можливий захист від випадкових флуктуацій сигналу. Це досягалося тим, що при кожній реалізації елементів плану експерименту вимірювання усереднюються в циклі з 100 послідовних сканувань спектра з дискретністю спектра в 172,3 від 10 до 20000 Гц. Повнофакторний експеримент з рандомізації факторів дозволив сформувати базу даних, де факторами були координати позиціонування виконавчого механізму експериментального стенду ( $X_i, Y_i, Z_i$ ).

За показниками створеної експериментальної бази були побудовані нейромережеві моделі діагностики:

- конфігурації механізму;
- геометричних параметрів механізму при працюючому мотор-шпинделя;
- динаміки переміщення вузлів механізму експериментального стенду зі змінною швидкістю і навантаженням на привід;
- зміни температури об'єкта.

Це дозволило вирішувати такі завдання управління об'єктами:

- підвищення точності позиціонування виконавчого механізму об'єкта;
- забезпечення динамічного настроювання виконавчого механізму;
- оптимізація траєкторій переміщень робочого органу.

Математична модель створена в комп'ютерному пакеті NeuroPro-0,25, що реалізують принцип коннекційності:

Створені нейромережеві моделі були піддані перевіряти на адекватність за критерієм Фішера.

Адекватність моделей підтверджена многократним перевищенням розрахункового значення критерію Фішера над його табличним значенням для заданої ймовірності помилки для моделей  $m$  входів – частотних діапазонів акустичного спектру, побудованих на  $n$  рядків кортежу вихідних даних.

**Висновки.** Розроблено методику акустичної діагностики для механізмів технологічних машин (верстатів-роботів), що дозволяють діагностувати різні їх стану в різних умовах. Показана можливість використання запропонованого підходу до управління складними технологічними машинами, такими, як верстати з механізмами на основі паралельної кінематики для підвищення точності позиціонування виконавчих механізмів, забезпечення їх динамічної настройки і оптимізації траєкторій переміщень робочих органів обладнання (в тому числі – ріжучого інструменту). Все це дозволяє розширити діапазон можливостей підвищення точності і продуктивності їх роботи.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Size control products using spectrum of natural vibrations and neural networks machining / S.V. Kovalevskyy, P Dašić, I.N. Starodubcev, O.S. Kovalevska // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ: ДДМА, 2012. – № 2 (27). – С. 38-43.



2. Интернет-ресурс <http://prosound.ixbt.com/education/spektr-analys.shtml>

3. Ковалевский С.В. Акустический контроль размеров и показателей шероховатости поверхностей деталей с применением нейросетевых моделей / С.В. Ковалевский, Е.С. Ковалевская, А.И. Нагиева // Нейросітьові технології та їх застосування : збірник праць міжнародної наукової конференції. – Краматорськ : ДДМА, 2014. – С. 24-35.

4. Ковалевский С. В. Разработка и исследование метода контроля деталей машин на основе эффекта акустической эмиссии / С.В. Ковалевский, В.И. Тулупов, Е.В. Тулупова // Науковий Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ : ДДМА, 2014. – № 3 (15Е). – С. 49-54.

*Ковалевський С.В.*

Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, Україна

*Ковалевська О.С.*

Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

*Кошевой А.О.*

PRAMET Tools, представництво в Україні (Прамет UA),  
Дніпро, Україна

## **СПЕКТРАЛЬНА ДІАГНОСТИКА НЕПЕРЕТОЧУВАНИХ ПЛАСТИН ДЛЯ СКЛАДНИХ ФРЕЗ**

Виробнича діяльність є основою економіки, але тільки в тому випадку, якщо продукція зберігає свої товарні ознаки, будучи конкурентоспроможною. У цих умовах обмеженість ресурсів, необхідних для такої виробничої діяльності, набуває ключового значення і тому будь-які засоби вишукування додаткових резервів дозволяють поліпшити показники конкурентоспроможності продукції. Зокрема, одним з актуальних завдань підвищення ефективності застосування металорізального інструменту є підвищення періоду його стійкості. Традиційно, його рішення досягається шляхом застосування нових інструментальних матеріалів, зносостійких покриттів, оптимізації режимів різання, тощо. Особливе значення це набуває для багатолезових збірних ріжучих інструментів – таких, як фрези різного конструктивного виконання. Для таких інструментів ідентичність комплекту ріжучих пластин, якими вони оснащуються, дозволяє досягати одночасний знос інструменту, оскільки нерівномірність зносу комплекту ріжучих пластин в інструментальній збірці призводить до зниження періоду стійкості збірних багатолезових фрез. Це подовжує період стійкості інструмента і знижує технологічну собівартість обробленої деталі, що має переважно фрезерну обробку.

Відомі способи, методи і методики оцінки якості ріжучих пластин, якими оснащуються збірний металообробний інструмент. Це такі, як контроль за геометричними параметрами, за фізико-механічними характеристиками за результатами стойкостних випробувань і т.п. [1, 2].

Авторами роботи запропонована методика оцінки якості об'єктів на основі спектра акустичного сигналу, наведеного в ріжучому інструменті в результаті відгуку на вимушені коливання у вигляді «білого шуму».

Такий підхід дозволяє виявити інструменти або їх елементи (ріжучі пластини з зміцнюючими покриттями), подібні за спектрами акустичних сигналів відгуку [3].

Виходячи з постановки задачі, авторами роботи виконані дослідження, цілями яких були:

- відпрацювання методики визначення спектральної характеристики власних акустичних коливань непереточуваних ріжучих пластин для ріжучого інструменту;
- оцінка якості партій змінних пластин ріжучих інструментів за ступенем схожості їх властивостей;
- формування подібних по акустичному спектру груп непереточуваних ріжучих пластин в багатолезовий збірному інструменті.

Випробування проводилися для збірних дліннокромочних фрез фірми Pramet типів SAD16E і S90AD16E (рис. 1), призначених для обробки складнопрофільних деталей відповідального призначення пластинами ADMX 16, параметри яких представлені в табл. 1.

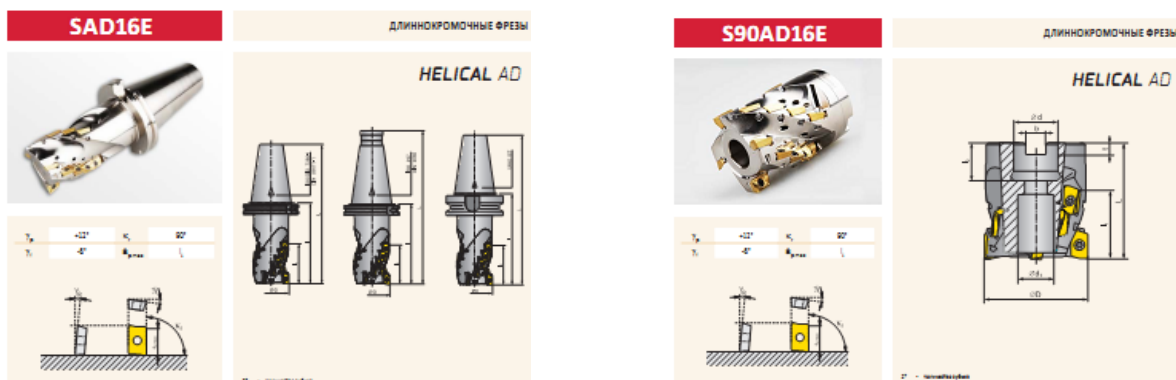


Рисунок 1 – Дліннокромочні фрези фірми Pramet

Таблиця 1 – Пластини ADMX 16 для дліннокромочних фрез фірми Pramet

Тип пластини	re	f min	f max	ap	ap
ADMX 070202SR-M	0,2	0,03	0,12	0,1	5
ADMX 070204SR-M	0,4	0,03	0,12	0,1	5
ADMX 070208SR-M	0,8	0,03	0,12	0,1	5
ADMX 070220SR-M	2,0	0,03	0,12	0,1	5

На рис. 2 наведені результати обробки оцифрованих спектрів партії пронумерованих ріжучих пластин в кількості 30 штук з кроком 172,3 Гц. частотно-го діапазону 10-20000 Гц. за допомогою пакета Statistica 10. Тут показані ре-

зультати групування ріжучих пластин за двома, трьома і чотирма групами, сформованих методом кластерного аналізу.

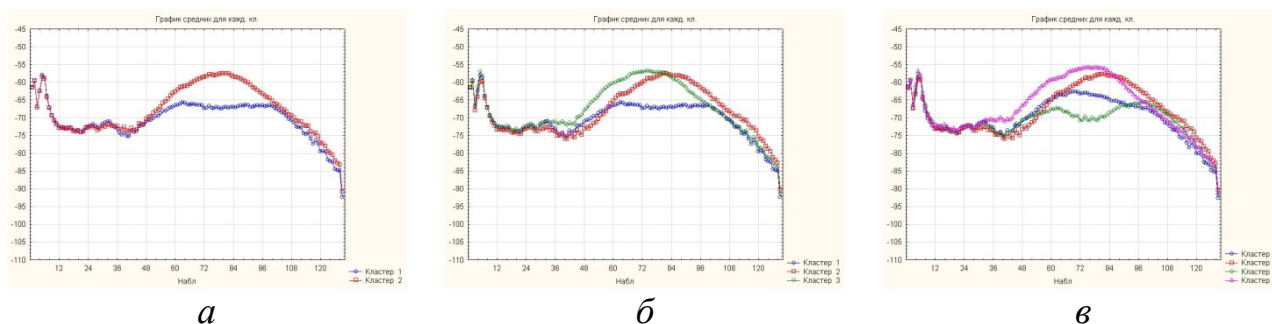


Рисунок 2 – Приклади групування пластин за спектрами коливань пластин, вимушених «білим шумом»: а - групування за двома кластерами, б - групування за трьома кластерами, в - групування за чотирма кластерами.

Представлений приклад ілюструє нерівномірність розподілу властивостей ріжучих пластин однієї партії поставки, але дозволяє зменшити розкид параметрів за рахунок групування пластин всередині однієї партії поставки. В табл. 2 наведені номери непереточуваних пластин відповідно до приналежності до того чи іншого кластеру.

Таблиця 2 – Склад кластерів, визначених за акустичними спектрами

№, пп	2 кластера		3 кластера			4 кластера			
	1-й	2-й	1-й	2-й	3-й	1-й	2-й	3-й	4-й
1	1	2	1	8	2	1	2	7	3
2	4	3	4	9	3	4	8	12	5
3	6	5	6	15	5	6	9	13	10
4	7	8	7	16	10	19	15	17	11
5	12	9	12	20	11	21	16	18	14
6	13	10	13	23	14	25	20	24	22
7	17	11	17	26	19	27	23		
8	18	14	18	29	22	28	26		
9	21	15	21		28	30	29		
10	24	16	24						
11	25	19	25						
12	27	20	27						
13	30	22	30						
14		23							
15		26							
16		28							
17		29							

Результати дозволяють сформувати варіанти груп пластин для комплектування збірних фрез, які мають в своєму складі:

- 1) 17 пластин (2-й кластер при розбитті всієї партії на 2 кластера);

2) 13 пластин (1-й кластер при розбитті всієї партії на 2 кластера або 1-й кластер при розбитті всієї партії на 3 кластера);

3) 9 пластин (3-й кластер при розбитті всієї партії на 3 кластера або 1-й та 2-й кластери при розбитті всієї партії на 4 кластери);

4) 8 пластин (2-й кластер при розбитті всієї партії на 3 кластера);

5) 6 пластин (3-й і 4-й кластери при розбитті всієї партії на 4 кластери).

При формуванні комплектів ріжучих пластин перевагу слід віддавати групам з великою кількістю кластерів розбиття. Випробування кінцевих фрез, укомплектованих пластинами чотирьох варіантів показали зростання стійкості збірних фрез на 30-45%.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Ravska N.S. Cutting tool wear heavy lathe / N.S. Ravska, G.P. Klymenko, M.A. Tkachenko // Energy and environmental aspects of tribology. – Cracow: AGH University of Science and Technology, 2010. – С. 137-147.

2. Клименко Г.П. Підвищення надійності технологічної системи при механообробці на важких токарних верстатах / Г. П. Клименко, А. Ю. Андронов // Сучасні технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ «ХПІ», 2009. – Вип. 3. – С. 49-54.

3. Діагностика технологічних систем и виробів машинобудування (з використанням нейромережевого підходу): монографія / С.В. Ковалевський, О.С. Ковалевська, Є.О. Коржов, А.О. Кошовий; за заг. ред. д.т.н., проф. С.В. Ковалевського. – Краматорськ: ДДМА, 2016. – 186 с.

*Коновалов И.П.*

НПП Интех, Одесса, Украина

## ИМПЛЕМЕНТАЦИЯ СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ ИНСТРУМЕНТА ПРИ СОЗДАНИИ САПР РАСКРОЙ

**Предмет.** Структура технологической операции (ТО) является основой при определении входных и выходных данных, спецификации требуемого функционала, используемого в математическом обеспечении (МО) САПР Раскрой в момент проектирования траектории инструмента. Важными практическими задачами на этом этапе являются: определение перечня «решателей», при помощи которых пользователь, находящийся за пультом САПР, может управлять процессом проектирования траекторий, определение степени автоматизации каждого решателя, и делегирование функций принятия решений либо пользовательскому интерфейсу (UI) либо автоматическому решателю. Делегирование по сути означает распределение функций между человеком и компью-

тером, и может быть осуществлено только с учетом ограничений применяемого оборудования, инструмента и известной технологии обработки.

**Терминология и обозначения.** Рассматривается область применительно к построению карт раскроя для вырезки фигурных деталей на плазменных, газовых, лазерных станках. ТО – последовательность движений инструмента по вырезанию однородной группы деталей из плоского листа с учетом технологических возможностей инструмента, материала, станка. Обработка подразумевает прорезку торцев контуров детали из плоского листа, вертикальным или наклонным резами (с формированием одно, 2х или 3х-поверхностных фасок). Решателями являются запрограммированные модули, получающие на вход соответствующие исходные данные, вызывающие алгоритмы проектирования, и создающие фрагменты результата. Идеальная и производственная технологические системы (ТС).

Рассмотрим идеальную ТС для выявления стратегической структуры или «скелета обработки». Идеальная ТС позволяет выполнить обработку без специальных технологических приемов. Состоит из идеального инструмента, позволяющего разрезать любой материал и идеального станка, способного выполнять любые кинематические движения, требуемые для формообразования кромок детали. Идеальная ТС позволяет определить основные моменты, характеризующие обработку деталей из листа в целом, общие для всех видов инструментов, станков и обрабатываемых материалов. Такими моментами являются необходимости «пробивки» листа перед обработкой и обхода инструментом всех поверхностей контура. Соответственно, структура траектории определяется цик-

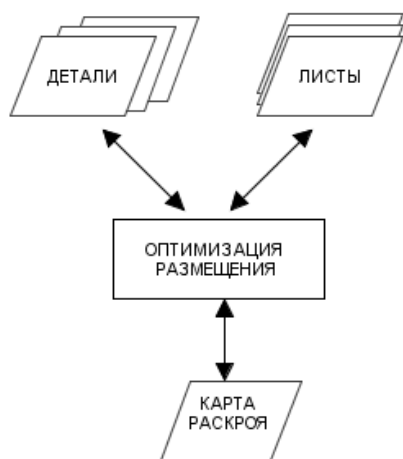


Рисунок 1.

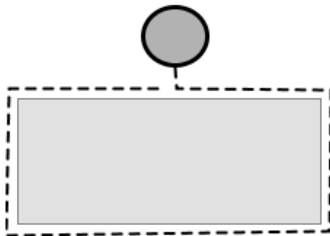
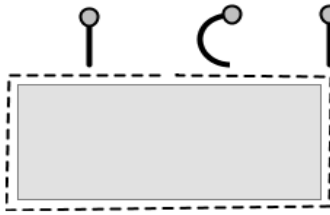

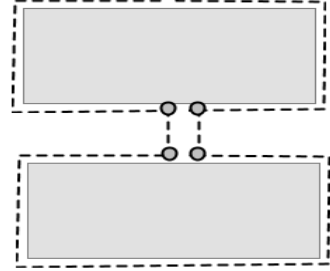
лически повторяемой для каждого контура последовательностью: холостой подход к началу обработки, пробивка листа, обход поверхностей контура. Таким образом, для задачи многодетальной траектории, искомый состав ТО определяется только процессом геометрического размещения номенклатуры исходных деталей на исходном листе. Т.е. требуется только один «решатель» – для оптимального размещения. Для более простой задачи одно-детальной траектории, не требуется ни одного решателя. В обоих случаях результирующая траектория, т.е. выход, практически полностью соответствует входу, т.к. траектория повторяет без изменений геометрию исходных деталей (рис. 1). Производственная ТС в

отличие от идеальной привносит ряд требований к обработке, которые определяются множеством факторов, начиная от производительности обработки, возможностей способа резки и до температурного режима.

**Формализация построения траектории.** Производственная ТС не отменяет структуру обработки, но накладывает множество ограничений на допускаемые действия, что приводит к существенному видоизменению вырезки отно-

сительно обработки для идеальной ТС. И как следствие, приводит к проектированию существенно отличающихся траекторий и карт раскроя.

Таблица 1. – Ограничения производственной ТС

Ограничения ТС	Допустимое решение	Эскиз
<p>Перегрев, расплескивание металла в месте пробивки листа. При газовой резке площадь этой зоны значительна. По мере уменьшения толщины, перехода к использованию плазмы или лазера, размер уменьшается.</p>	<p>Формировать область пробивки, отдалять ее от детали, запрещать размещение других деталей в этой зоне</p>	
<p>Пережег в месте касания, необходимость эквидистантной коррекции траектории, ограничения СЧПУ в способах выхода на контур обработки</p>	<p>Форма подхода к обработке должна быть построена по нормали либо с использованием гладкого касания. Длина учитывает ширину резания и удаленность пробивки от контура</p>	
<p>Тепловая деформация металла, коробление листа, «обрыв» или коробление тяжелой детали в конце вырезки</p>	<p>Подбор «правильных» мест для точки врезки и направления обхода вырезки детали. Разрыв траектории пропусками, размещение деталей с гарантированными отстоянием друг от друга</p>	
<p>Высокая степень износа инструмента плазменной резки в момент пробивки листа. Существенно снижает показатели стойкости инструмента относительно вырезки на одной карте раскроя</p>	<p>Соединение деталей «мостиками» для уменьшения фактического количества точек пробивки</p>	
<p>Недостаток производительности процесса</p>	<p>Разделение деталей на несколько групп и па-</p>	<p>—</p>

резки при обработке листов больших толщин	параллельная обработка каждой. Использование «совмещенных» резов, т.е. формирование 2-х поверхностей разных деталей за один ход резака	
---	--	--

Для построения таких траекторий средствами САПР требуются дополнительные технологические «решатели»: совмещенного, непрерывного резов, построения пропусков, мостиков, учета тепловых деформаций, учета геометрии пробивки, и др. Некоторые наиболее распространенные ограничения производственной ТС перечислены в табл. 1.

Полный перечень ограничений составляет длинный список, каждому элементу которого можно сопоставить одно или несколько решений. Такая информация фиксирует приемы технологии и методы резки. Что является первым шагом в процессе формализации технологических знаний и преобразования их в функционал САПР. Однако, детальная разработка такой таблицы с целью попытки сопоставить каждому требованию со стороны производственной ТС свой алгоритмический решатель в качестве функционала ПО, не позволяет достичь результата. Причина в том, что ограничения производственной ТС противоречивы, возможные решения многовариантны, технологии резки сильно зависимы от используемых материалов и типов инструментов. Все это приводит к «информационному взрыву» в количестве решателей, запутанности алгоритмов, в худшем случае невозможности учета некоторых требований ТС.

Соответственно, на 2-ом этапе формализации технологических знаний, необходимо найти и оставить только те решатели, из которых можно непротиворечиво сформировать любое технологическое решение. Тогда простые требования к построению траекторий будут решаться вызовом только одного подходящего решателя. Для более сложных траекторий потребуется «сложить» как из кубиков результат последовательного вызова нескольких одиночных решателей.

Вызов нескольких одиночных решателей имеет важный побочный эффект – показывает место возможного будущего повышения уровня автоматизации САПР, который можно обеспечить отделением теперь уже известных исходных данных для такого алгоритма и построением самого автоматического алгоритма. Следующим, 3-м этапом формализации, является определение делегирования, т.е. назначение выполнения той или иной функции пользователю (посредством UI) или алгоритмическому «решателю». Решение основывается на возможности «конструирования» человеком сложного решения из комбинации более простых решений. Следовательно, базовыми «решателями» в САПР должны оказаться алгоритмы, без использования которых нельзя обойтись. К таким базовым задачам построения траекторий относятся:

- расчет и подключение к траектории дополнительных элементов, таких как подходы, отходы, пропуски и петли;

- построение совмещенных траекторий;
- построение непрерывных траекторий;
- назначение последовательности траекторий обработки.

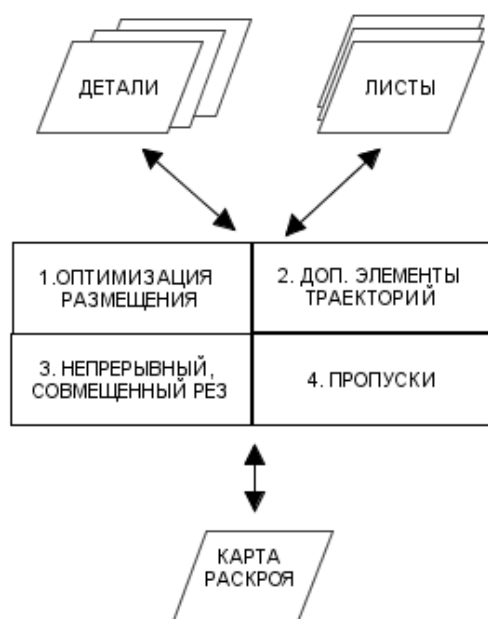


Рисунок 2.

Схема с базовыми решателями содержит минимально возможный перечень решателей (рис. 2). Если имплементация решателей ограничивается этим списком, пользовательский интерфейс (UI) должен обеспечить произвольный порядок вызова этих решателей и комбинацию их использования для каждого контура. Таким образом на этом этапе решается вопрос распределения функций между человеком и компьютером.

**Выводы.** Предлагаемый подход описывает этапы формализации технологических знаний, приводящие к выявлению «решателей» САПР, определению их свойств, построению непротиворечивой структуры математического обеспечения с элементами, допускающими будущее развитие (повышение автоматизации), распределение функций между человеком и компьютером, на примере построения подсистемы расчета траекторий для САПР Раскрой.

развитие (повышение автоматизации), распределение функций между человеком и компьютером, на примере построения подсистемы расчета траекторий для САПР Раскрой.

*Корзун А.Е., Волотовский Ф.А., Пынькин А.М.*  
 ОАО «ОКБ Академическое» НАН Беларуси,  
 Минск, Республика Беларусь

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ ХИМВОДОПОДГОТОВКИ ДЛЯ БЕЛОРУССКОЙ АЭС

Современные условия всевозрастающего энергопотребления и грядущего истощения мировых запасов нефти и газа, приводящего к обострению конкуренции на рынке энергоресурсов, диктуют необходимость обеспечения энергобезопасности государства. Строительство Белорусской АЭС является приоритетным направлением национальной стратегии устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь.

Все большее количество стран развитых и развивающихся приходят к необходимости освоения атомной энергетики. Сегодня в мире обозначилась тенденция, получившая название «ядерный ренессанс». Самые сдержанные



прогнозы говорят о том, что в перспективе 2030 года на планете будет эксплуатироваться до 500 энергоблоков (сейчас их насчитывается 435).

Ежегодно атомные станции в Европе позволяют избежать эмиссии 700 миллионов тонн  $\text{CO}_2$ , а в Японии – 270 миллионов тонн  $\text{CO}_2$ . Действующие АЭС бывшего Советского Союза ежегодно предотвращают выброс в атмосферу 210 млн. тонн углекислого газа. По этому показателю страны СНГ находятся лишь на четвертом месте в мире.

Больше всего АЭС (63 АЭС, 104 энергоблока) эксплуатируется в США. На втором месте идет Франция (58 энергоблоков), на третьем – Япония (50 блоков). Для сравнения: в России эксплуатируется 10 АЭС (33 энергоблока).

Атомная станция в любой стране обычно представляет собой комплекс зданий, в которых размещено соответствующее технологическое оборудование. Система химической подготовки воды – одна из основных систем на атомных электростанциях, она является составляющей комплекса оборудования АЭС и обеспечивает безопасность работы АЭС. Наличие различных примесей в природной воде является причиной приготовления воды для подпитки и заполнения контуров АЭС на химподготовке воды для АЭС. Для очистки вод реакторных АЭС используются в больших количествах иониты. Вода для подпитки и заполнения контуров АЭС должна быть обессоленной, из исходной природной воды должны быть удалены катионы и анионы. Кроме схемы ионитного обессоливания могут использоваться установки для приготовления умягченной воды.

Внутриконтурные физико-химические процессы на АЭС обусловлены одновременным воздействием на водный теплоноситель высоких давлений, температур и мощных радиационных полей. Уменьшения концентрации продуктов коррозии достигают правильным выбором конструктивных материалов оборудования и трубопроводов в различных контурах АЭС, оптимальным водно-химическим режимом и глубокой очисткой воды контуров.

В цикле работы АЭС используются 4 вида конструкционных материалов: сплавы циркония, сплавы содержащие медь, углеродистые стали, нержавеющие стали. Такой набор конструктивных материалов и возможность активации корректирующих добавок, используемых для регулирования показателя pH, регулирования реактивности и подавления радиолиза, определяет основную особенность водно-химического режима АЭС. Совокупность всех показателей водно-химического режима должна обеспечивать регламентный срок работы оборудования АЭС не менее 60 лет.

Оборудование системы химводоподготовки предназначено для хранения, дозирования, фильтрации, сбора различных химических веществ и реагентов, приготовления растворов и рабочих сред и подачи их в различные технологические линии. Оборудование систем химводоподготовки представляет собой сложнотехническую конструкцию, которая изготовлена из специально подобранных нержавеющих сталей, обеспечивающих высокую надежность, сейсмостойчивость и долговечность в соответствии с требованиями, предъявляемых к ядерным объектам.

Высокая надежность, сейсмоустойчивость и долговечность оборудования систем химводоподготовки обеспечивается использованием листового металлопроката определенных толщин, специально разработанной технологией формообразования и высокоточной сваркой элементов конструкции.

Оборудование систем химводоподготовки должно отвечать требованиям по сейсмостойкости, коррозионной стойкости, прочности, виброустойчивости, и 2-4 категории обеспечения качества, входящих в компетенцию Госпромнадзора и Департамента по ядерной и радиационной безопасности МЧС РБ.

В настоящее время Госкорпорация «Росатом» сооружает 7 энергоблоков АЭС в России и 34 энергоблока в странах дальнего зарубежья: АЭС «Аккую» (Турция), АЭС «Бушер» (Иран), АЭС «Куданкулам» (Индия), АЭС «Ниньтхуан» (Вьетнам), АЭС «Руппур» (Бангладеш), Тяньваньская АЭС-2 (Китай). Объем закупок емкостного оборудования и оборудования для приготовления растворов применяемого для систем химводоподготовки, дезактивации и других систем атомной станции составляет ориентировочно 30-45 млрд. росс. руб.

До настоящего времени в Республике Беларусь отсутствовали предприятия, имеющие опыт разработки и производства оборудования системы химводоподготовки и других систем для АЭС. Поэтому основными поставщиками оборудования, применяемого при эксплуатации строящейся Белорусской атомной электростанции являлись предприятия-изготовители из России, Чехии, Испании, Италии, Франции и др. стран.

Главным достоинством организации производства сложно-технического оборудования для систем химводоподготовки и других систем АЭС на территории республики является возможность импортозамещения при поставках для строящейся Белорусской АЭС и получение выручки при поставках оборудования на экспорт.

Учитывая значимость строящейся Белорусской АЭС, ОАО «ОКБ Академическое» НАН Беларуси был реализован инновационный проект по разработке типовых конструкций и освоению производства импортозамещающего оборудования для системы химводоподготовки и других систем, применяемого при эксплуатации Белорусской атомной электростанции и поставках на экспорт.

В 2012-2013гг. ОАО «ОКБ Академическое» провело комплекс мероприятий по лицензированию, разработке и верификации прототипов оборудования, разработке и согласованию программы обеспечения качества оборудования (ПОКАС), прохождению ряда аудитов по готовности системы качества и производства к поставкам оборудования для АЭС. В результате проведения данных мероприятий ОАО «ОКБ Академическое» в 2013 году было включено в Единый Отраслевой Номенклатурный Каталог Оборудования и Материалов АО «НИАЭП» и приступило к наполнению каталога.

На постоянной основе ОАО «ОКБ Академическое» сотрудничает с ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны» по вопросам проектирования и изготовления оборудования объектов атомной энергетики.

Наиболее крупные проекты последних лет:

- проектирование и изготовление оборудования для приемки, испытаний и хранения ядерного топлива для критического стенда «Гиацинт» – установка для испытаний ТВЭЛов и топливных кассет на динамические нагрузки, экспериментальная установка для измерения содержания и распределения урана в ТВЭЛлах, установка для испытаний ТВЭЛов на герметичность;

- разработка проекта и реконструкция хранилища необлученных ядерных материалов, изготовление специальных контейнеров для упаковки твердых радиоактивных отходов и контейнеров для хранения необлученных ядерных материалов;

ОАО «ОКБ Академическое» впервые в республике, разработало и создало сложно-техническое импортозамещающее оборудование, в том числе и для химводоподготовки, для предприятий концерна «Белнефтехим». В период 2012-2017г. ОАО «ОКБ Академическое» было разработано и изготовлено технологическое оборудование на общую сумму порядка 4,2 млн. руб. (колонное оборудование, аппараты теплообменные, деаэраторы различных типов, реакторы химических процессов, комплекс оборудования по обеспечению радиационно-безопасного процесса приготовления и закачки в скважины радонового индикатора и др.)

В период 2013-2014г. предприятием заключен ряд экспортных контрактов на поставку оборудования с АО «Атомстройэкспорт», РФ, который является генеральным подрядчиком по строительству Белорусской АЭС.

В настоящее время генеральным подрядчиком по строительству Белорусской АЭС АО «НИАЭП», ОАО «ОКБ Академическое» рассматривается в качестве потенциального поставщика оборудования для других АЭС, строящихся организациями ГК «Росатом» в России, странах СНГ, странах ближнего и дальнего зарубежья.

В целях расширения номенклатурного ряда поставляемого оборудования для Белорусской АЭС и других объектов ядерной энергетики ОАО «ОКБ Академическое» в настоящее время решает вопрос освоения проектирования и изготовления оборудования 2-3 класса безопасности для атомных электростанций.

Для решения ОАО «ОКБ Академическое» задачи по освоению проектирования и изготовления оборудования систем химводоподготовки 2-3 класса безопасности проведено обучение специалистов, участвующих в процессе проектирования и изготовления, по нормам и правилам атомной энергетики (ПНАЭ Г), освоены методики соответствующих расчетов на прочность, сейсмостойкость, виброустойчивость.

Это позволит предприятию оперативно выполнять заказы предприятий ГК «Росатом» на поставку оборудования для химводоподготовки и других систем АЭС.

Решение данной задачи позволит ОАО «ОКБ Академическое» получить возможность поставки импортозамещающего оборудования 2-4 класса безопасности для белорусских монтажных организаций, участвующих в строительстве Белорусской АЭС.

*Кремнев Г.П.*  
Одесский национальный политехнический университет,  
Одесса, Украина  
*Бердичевский Е.Г.*  
Государственный университет им. Ярослава Мудрого,  
Великий Новгород, Российская Федерация

## **ПОДГОТОВКА БАКАЛАВРОВ-МЕХАНИКОВ С РАСШИРЕНИЕМ ВОЗМОЖНОСТЕЙ В БАЗОВЫХ ДИСЦИПЛИНАХ**

В структуре подготовке бакалавров по прикладной механике со специализацией по технологии машиностроения или компьютерному проектированию технологий, как сейчас называется эта специализация по современному, особое место занимают дисциплины по формообразованию поверхностей деталей и деталей в целом. Они относятся к базовым дисциплинам подготовки механиков. На подготовительном этапе технологического процесса эти дисциплины связаны с проектированием заготовок и методами их воспроизведения. В некоторых предшествующих дисциплинах (технология конструкционных материалов, материаловедение, могут быть и другие) вопросы получения заготовок как-то затрагивались, но скорее информативно, т.к. в них говорилось о литейном, кузнечно-штамповочном и других производствах современных машиностроительных заводов, т.е. базах заготовительного производства, но не о технологии получения заготовок.

Сегодня основная масса студентов – это школьники, у которых, к сожалению, нет никаких представлений о современном машиностроительном производстве, его структуре, подразделениях, процессах получения заготовок, деталей машин и машин в целом, современном оборудовании и др., а отсюда в дальнейшем будут возникать серьезные проблемы при изучении курсов проектирования инновационных технологий. Отсутствие нормальных условий проведения производственных практик (а зачастую в учебных планах их просто нет или они сведены до смешного минимума) позволяет частично решить эту проблему путем создания новых учебных пособий и не только по дате их выхода, но и по содержанию и форме подачи материалов.

Авторы полагают, что в современных учебных пособиях эти проблемы могут быть частично компенсированы написанием более подробных разделов, частей, обоснований, которые не планировались ранее, учитывая другой контингент набора студентов. Это может привести к серьезному росту объемов пособий. Кроме этого, пособия ориентированы на рабочие планы подготовки бакалавров с весьма ограниченным количеством кредитов по курсам заготовок или формообразования деталей.

Мы решили, что пособия следовало бы сделать такими, чтобы они помогали формировать компетенции, умения и навыки бакалавра по его специальности в той части, которая имеет отношение к проблеме. Для этого, в общей части

к каждой работе дается краткое описание, особенности, схемы и режимы работы вариантов, расширяющие информационные рамки студентов, пришедших из школы в ВУЗ.

В соответствии с требованиями стандарта образования [1] после обучения по указанной выше специализации бакалавр должен обладать интегральными, общими и специальными (профессиональными или предметными) компетенциями и практическими навыками. Некоторые из них необходимо сформировать и при изучении курса формообразования деталей, например, способность описывать и классифицировать широкий круг технических объектов и технологических процессов, способность проводить технологическую и технико-экономическую оценку эффективности использования новых технологий и технических средств; умение проводить оптимальный выбор технологического оснащения; показать способность использовать нормативные и справочные данные для контроля соответствия технической документации стандартам, ТУ и другим документам; владение знаниями и умениями в области информационных технологий для практического использования систем CAD/CAM/CAE.

Тщательный анализ приведенного выше набора компетенций позволяет сделать вывод, что под него попадает не только цикл формообразования, но и многие дисциплины технологического направления, включая и основы САПР, и ряд других. Попробуем сузить наши аппетиты и посмотрим, допустим, с позиции какого-то руководителя технологического подразделения, которое занимается заготовками, что мы будем требовать от бакалавра, пришедшего к нему на работу в это подразделение, чисто в профессиональном плане, не затрагивая морально-этические, социально-психологические и другие вопросы (они важны, нужны, но в этой статье не о них разговор!). Итак, цель работы Вашего специалиста – обеспечить технической и технологической документацией производственную базу, помочь в ее имплементации и постоянном обновлении, корректировке, замене в оговоренные сроки и всех необходимых обоснованиях принятых решений, сопровождении технологических процессов, периодическом их контроле; ведении делопроизводства по месту работы (в подразделении).

Если изложить эту цель работнику, например, технологу 3 категории бюро заготовок в первые дни его работы и попросить что-то реализовать, то результатов без подсказки не последует.

На месте думающего начальника бюро заготовок следовало бы разработать должностную инструкцию, в которой в подразделе «Компетенции, умения и навыки» указать следующее (это мнение авторов).

1. Компетенции, умения и навыки технолога 3 категории БЗ ОГТ ООО «XYZ».

1.1. Круг вопросов (у тебя до прихода на работу уже сформированы способности читать техническую и технологическую документацию и разрабатывать основные объекты, используя действующие стандарты и программные продукты информационных технологий, а также справочно-техническую литературу):

- изделия, выпускаемые предприятием (машины, сборочные чертежи, детали);
- рабочие чертежи изделий, находящиеся в производстве;
- технологические процессы получения заготовок изделий, находящихся в производстве:
  - рабочие чертежи изделий, которые готовятся к производству на предприятии в текущем году и в последующем;
  - нормативная база для разработки чертежей заготовок;
  - нормативная база для разработки технологических процессов получения заготовок на самом предприятии;
  - нормативная база для разработки технологических процессов получения заготовок по кооперации (предприятия-смежники);
  - технические документы, используемые на предприятии между подразделениями;
  - контроль качества продукции на предприятии и используемая для этого документация;
  - рекомендуемая справочно-техническая литература и стандарты;
  - различные технологические инструкции, базы данных, обзоры, отчеты.

## 1.2. Алгоритмы твоих действий, если ты делаешь:

1.2.1. Чертеж детали (оговорен ПП xxxxxxxxxx) (ты умеешь в условиях автоматизированной компьютерной системы разрабатывать рабочие чертежи деталей и их 3Д модели).

1.2.2. Чертеж заготовки (ты умеешь в условиях автоматизированной компьютерной системы разрабатывать рабочие чертежи заготовок, их 3Д модели, вести расчеты припусков, размеров заготовок и находить их стоимость).

1. Анализ объекта – чертежа детали и установление её типа, габаритов, материала, программы выпуска, особых требований к детали и заготовке (если имеется).

2. Анализ аналогов детали в заготовках (если они есть).

3. Выбор решения – сделать новый чертеж заготовки или изменить аналог.

4. Анализ базы данных заготовок и ПП xxxxxxxxxx, используемого на предприятии.

5. Конструирование чертежа заготовки и проведение необходимых для этого расчетов (припусков, размеров, прочностных и др.).

6. Контроль чертежа заготовки, его утверждение.

1.2.3. Технологический процесс получения заготовки (ты умеешь разрабатывать как в ручном, так и в автоматизированном варианте технологические операции получения порезок из проката, отливок, штамповок и других заготовок и вести расчет режимов работы на этих операциях).

1. Выбор вариантов, если он не оговорен чертежом заготовки, из существующих на предприятии (или на предприятии-смежнике).

2. Технико-экономическое обоснование варианта, анализ производственных возможностей, график загрузки оборудования с учетом нового изделия на календарный период времени.

3. Разработка маршрутного документа процесса (ПП хxxxxxxxxx).  
Согласование МК, КТП или иной формы технологии с подразделением предприятия.

4. Нормирование процесса, заполнение ведомостей, заявок, заданий и их рассылка.

Примечание. Если ТП заготовки не был апробирован ранее, то последует, возможно, изготовление опытных образцов заготовок (партии заготовок) и, при необходимости, корректировка документации (см.п. 3 и 4).

1.2.4. Сопровождение действующих процессов (ты способен вести контроль качества изделий, составлять акты контроля, вносить в действующую документацию изменения как в ручном, так и в автоматизированном вариантах).

1. Контроль качества изделий – заготовок и процессов в соответствии с СТП, составление актов и карт контроля.

2. Корректировка действующих чертежей и процессов, внесение изменений в документацию или её перевыпуск.

3. Анализ состояния оборудования и средств оснащения в соответствии с графиками ППР и подготовка актов, докладных и других документов.

1.2.5. Усовершенствование, модернизация действующего оборудования и технологических процессов (ты знаешь основы проведения исследований и способен их вести сам, разрабатывая для этого необходимую документацию и выполняя известные тебе расчеты и обоснования).

1. Выбор аналогов заменяемых объектов, их оценка по принятым на предприятии критериям.

2. Опытно-экспериментальная проверка предлагаемых новаций, подготовка документации на предполагаемую замену (заявки, карты заказа, графики поставки).

3. Разработка заменяемой документации (см. xxx 2.2; xxx 2.3 и xxx 2.4).

4. Установка, монтаж, переделка заменяемых технических средств или процессов, их сдача комиссии. Составление актов, отчетов, рекламаций и других документов.

Из этого набора требований в курсе формообразования у бакалавра должны быть сформированы специальные компетенции:

– способности разрабатывать чертежи деталей и заготовок на существующей информационной базе;

– способности разрабатывать технологические операции и процессы получения заготовок и вести технологические расчеты;

– умения разрабатывать документацию и вести её (сопровождать) в реальном производстве.

Авторы считают, что на каждом занятии необходимо было бы сформировать всю компетенцию или, что чаще всего будет иметь место при многообразии вариантов процессов, это будет реализовано на нескольких занятиях. Учебные пособия для этой подготовки авторы решились разработать и издать.

Из множества способов и методов получения заготовок мы остановились на наиболее широко применяемых сегодня в машиностроении: заготовки, по-

лучаемые в холодном состоянии материала и в нагретом до определенной температуры или доведенном до расплавления. Обычно такие заготовки мы называем штамповками, поковками, отливками и порезками из проката. Отдельная группа – заготовки, полученные специальными методами.

При выборе критериев оценки результатов выбранных методов авторы решили ограничиться такими показателями: производительность метода, его технологическая себестоимость, показатель потерь (материалоемкость), хотя их число можно и расширить, но мы учитывали т.н. учебное время.

В пособии [2] имеются различные разработки (назовем их традиционными) к практическим или лабораторным занятиям, часть из которых посвящена методам литья и штамповки, часть – методам разделки проката на части и часть – специальным методам.

Главный упор, мы считаем, необходимо сделать на реальную базу предприятий и, отталкиваясь от неё, учить студента анализировать и выбирать решение не интуитивно, а с цифрами в руках.

Из 16 работ в 10 студент должен произвести миниисследование: сравнить 2 метода или 2 варианта одного метода и доказать себе эффективность выбора при заданных значениях программы. Исследование, на наш взгляд, состоит в кратком описании, достоинствах и недостатках методов, расчете указанных выше параметров, их сравнении и оценке результатов.

Прогресс XXI века в машиностроении затронул всерьез заготовительное производство, в котором имеются технологические комплексы (ТК) по формованию плоских и объемных заготовок источниками энергии высокой концентрации, точность изделий в которых может быть доведена до 10-11 качества, а в некоторых специальных – до 6-7. Естественно, выбирая варианты для учебных целей, мы можем позволить себе определенные фантазии, но это допустимо в ограниченной дозировке.

На примере 4 работ, связанных с высокоэнергетическими методами получения заготовок из листового проката: раскрой на газо-, плазморежущих комплексах, лазерных станках и установках резки водной струей, авторы сделали попытку осовременивания информации.

Особенностью этих работ является процесс формирования карты раскроя материала (КР) на ТК. Эти машины и станки автоматизированы, могут выполнять работы без участия оператора, а данные КР можно ввести в систему ОЧПУ.

Для сопоставления с современными методами в пособии имеются работы по обычным методам холодной штамповки, и студент после выполнения всех работ может сопоставить полученные данные и сделать для себя рациональный выбор [3].

В специальных методах получения заготовок авторы позволили себе разработать тематику занятий, связанную с получением заготовок из порошковых металлических материалов, пластмасс и резины, как традиционное, но эффективное направление получения заготовок с минимальными потерями материала, что очень важно в условиях ресурсосбережения.



Ети пособія можуть бути полезні не тільки при изученні заготовок, но і там, где речь идет о проектировании технологий, а заготовительный процесс – часть технологического, ресурсо- и энергосберегающих технологий [3].

Кроме указанных выше пособий авторы считают очень важным и эффективным средством компенсации практики создание видеоматериалов – видеофильмов по нескольким направлениям: получение отливок; получение штамповок в горячем состоянии; штамповки из листа; порезки проката на части. Эти разработки – важное дополнение как для лекционного материала, так и для практических занятий. Но эта работа требует дополнительных усилий и специальных технических средств.

Мы рады сотрудничать со всеми заинтересованными лицами и просим выходить на связь с нами так: Украина, 65044, г. Одесса, пр-т Шевченко, 1 ОНПУ, кафедра технологии машиностроения, тел.0487058382 или 0674804285.

1. Стандарт вищої освіти України. Спеціальність 131 «Прикладна механіка», ступінь вищої освіти – бакалавр. Київ, МОН України, 2016. – 10 с.

2. Кремнев Г.П., Бердичевский Е.Г. Ресурсо- и энергосберегающие технологии в машиностроении. Учебное пособие. – Вел. Новгород: Вел.Новг. ГУ им. Ярослава Мудрого, 2015. – 123 с.

3. Кремнев Г.П., Бердичевский Е.Г. Формообразование деталей машин. Учебное пособие. – Вел. Новгород: Вел. Новг. ГУ им. Ярослава Мудрого, 2017. – 110 с.

*Лавінський Д.В., Морачковський О.К.*

Національний технічний університет

«Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

## **АНАЛІЗ ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ СКЛАДЕНОГО ІНДУКТОРА ПРИ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНІЙ ОБРОБЦІ МАТЕРІАЛІВ**

Електромагнітне поле (ЕМП) є умовою функціонування багатьох технічних і технологічних систем. Взаємодія ЕМП з електропровідними тілами приводить до їх руху або деформації. При цьому рівні енергії ЕМП можуть бути настільки значними, що призведуть до незворотної деформації або руйнування конструктивних елементів. Широкий клас технологічних процесів обробки матеріалів тиском використовує енергію імпульсних магнітних полів. При цьому силовому впливу піддається як заготовка так і джерело ЕМП – індуктор. Ефективність технологічних систем магнітно-імпульсної обробки матеріалів (МІ-ОМ) визначається працездатністю індуктора, оцінювання якої є можливим лише на основі аналізу розподілу векторних характеристик ЕМП та тензорних характеристик напружено-деформованого стану (НДС). У роботі [1] запропоновано ефективний комплексний підхід до подібного аналізу. Один із класів тех-

нологічних операцій МІОМ передбачає притягнення металевих заготовок. Для притягнення електропровідних заготовок із не феромагнітних матеріалів (із відносною магнітною проникністю менше одиниці) у роботі [2] показано, що можна використовувати індуктор із допоміжним екраном. На рис. 1 наведено модельний варіант одновиткового індуктора із допоміжним екраном.

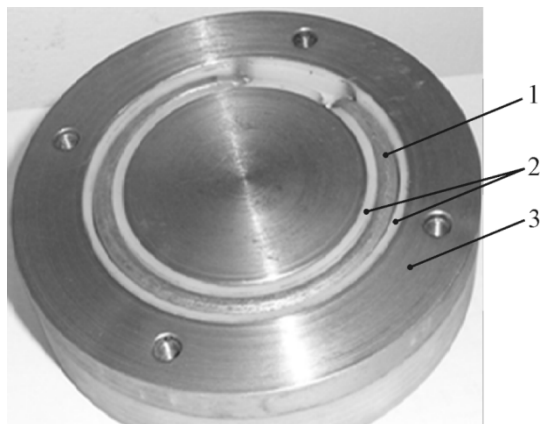


Рисунок 1. – Одновитковий індуктор із допоміжним екраном.  
1 – струмопровід індуктора,  
2 – ізоляція струмопровіда,  
3 – допоміжний екран

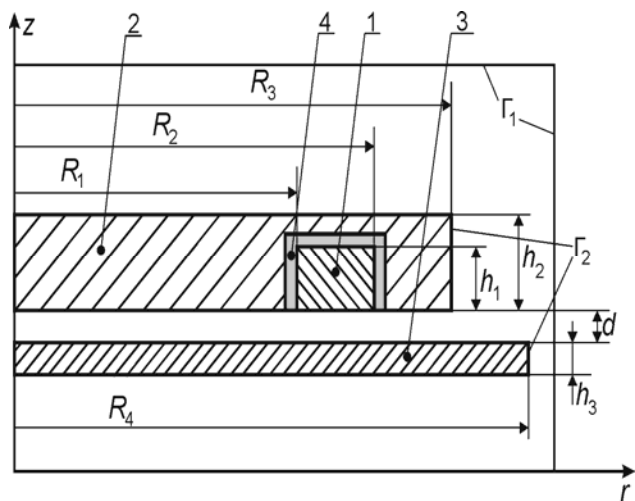


Рисунок 2. – Розрахункова схема індуктора разом із заготовкою.  
1 – струмопровід індуктора, 2 – допоміжний екран, 3 – заготовка,  
4 – ізоляція струмопроводу

Проаналізуємо пружно-пластичне деформування індуктора із заготовкою в рамках вісесиметричної розрахункової схеми, наведеної на рис.2. Розрахункова схема містить окрім елементів технологічної системи та заготовки також оточуюче середовище (повітря). Зазор, що розглядається поміж індуктором та заготовкою, повинен імітувати наявність вм'ятини (дефекту) на заготовці. Геометричні параметри системи є наступними:  $R_1 = 150 \text{ mm}$ ,  $R_2 = 167 \text{ mm}$ ,  $R_3 = 175 \text{ mm}$ ,  $R_4 = 200 \text{ mm}$ ,  $h_1 = 10 \text{ mm}$ ,  $h_2 = 15 \text{ mm}$ ,  $h_3 = 1 \text{ mm}$ ,  $d = 1 \text{ mm}$ , товщина ізоляції струмопроводу –  $1 \text{ mm}$ . Розміри оточуючого середовища варіювались із метою досягнення умов затухання компонентів ЕМП на віддалені від джерела поля. У даному випадку виявилось, що для зменшення компонентів ЕМП у 5 разів, достатньо обирати розміри оточуючого середовища рівними подвійній товщині індуктора  $h_2$ . Джерелом ЕМП обирався струм, що був рівномірно розподілений по перерізу струмопроводу, у часі густина струму змінювалась за законом:  $j(t) = I_m e^{-\delta 2\pi f t} \cdot \sin(2\pi f t)$ , де амплітуда сили струму  $I_m = 40 \text{ kA}$ , частота  $f = 2 \text{ kHz}$ , відносний коефіцієнт затухання  $\delta = 0,3$ .

Скінчено-елементна модель була створена із застосуванням чотирьох-вузлового скінченого елемента із білінійною апроксимацією переміщень та окружної компоненти векторного магнітного потенціалу. Використання скінченого елемента даного типу дозволяє автоматично задовольняти умовам на границях розділу середовищ із різними електрофізичними властивостями.

Таблиця 1. – Фізико-механічні параметри елементів системи

	Струмopрoвід, мідь	Дoпoмiжний eкpан, cтaль	Зaгoтoвкa, cтaль	Ізoляцiя, кaпpoлoн	Пoвiтpя
$\mu_r$	1	1	1	1	1
$\gamma, (\Omega\text{m})^{-1}$	$7 \times 10^7$	$0,2 \times 10^7$	$0,2 \times 10^7$	0	0
$E, \text{ГПа}$	180	215	200	2,5	–
$\nu$	0,33	0,27	0,29	0,3	–
$\sigma_T, \text{МПа}$	200	270	220	–	–
$\sigma_B^+, \text{МПа}$	–	–	–	70	–
$\sigma_B^-, \text{МПа}$	–	–	–	90	–

Розв'язання було проведене для нульових початкових умов, граничні умови відображали затухання ЕМП на віддаленні від джерела, а також закріплення торців індуктора та заготовки:

$$A|_{\Gamma_1} = 0; \quad u_r|_{\Gamma_2} = 0; \quad u_z|_{\Gamma_2} = 0. \quad (1)$$

На першому етапі розв'язання були одержані просторово-часові розподіли векторних компонент ЕМП та компонент електромагнітної сили уздовж поверхні заготовки. Максимальні значення нормальної компоненти електромагнітної сили спостерігаються у околі витка індуктора.

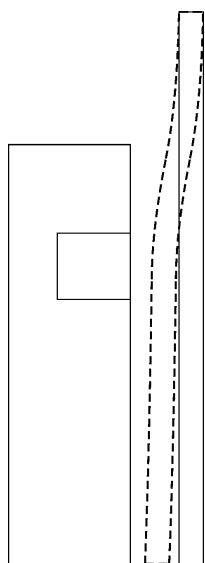


Рисунок 3. – Деформований стан індуктора та заготовки. Суцільна лінія – початковий стан, штрихова лінія – деформований стан

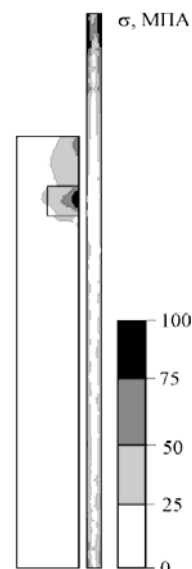


Рисунок 4. – Інтенсивність напружень у індукторі та заготовці

Далі розглянемо сумісне деформування індуктора та заготовки, результати надані для часового максимуму. На рис. 3 наведений деформований стан системи, видно, що переміщення заготовки значно перевищують переміщення індуктора. Максимальні значення переміщень заготовки спостерігаються в околі її центру. На рис. 4 наведено розподіл інтенсивності напружень у індукторі та заготівці. Максимальні значення інтенсивності напружень у заготівці спостерігаються в околі

торцевої зони, що обумовлюється заданими там умовами закріплення. «Другий» максимум спостерігається у центрі, що обумовлене максимальними переміщеннями у цій зоні. Відзначимо, що максимальні значення інтенсивності напружень у заготовці не досягають межі текучості, тобто незворотна формозміна за даних умов не досягається. У індукторі максимальна інтенсивність спостерігається в околі витка, причому її значення майже досягають межі текучості міді та межі міцності на розтяг для капролона. Таким чином, за розглянутих умов ціль технологічної операції не досягається. При збільшенні величини сили струму будуть збільшуватись і величин напружень, при цьому інтенсивність напружень досягне опарних значень спершу у індукторі. Для досягнення цілій технологічної операції можна використовувати багатовитковий варіант індуктора.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Altenbach H., Morachkovsky O., Naumenko K., Lavinsky D. Inelastic deformation of conductive bodies in electromagnetic fields. *Continuum Mechanics and Thermodynamics*. 27 (12), 1-13 (2015).
2. Batygin Y. V., Golovashchenko S. F., Gnatov A. V. Pulsed electromagnetic attraction of nonmagnetic sheet metals. *Journal of Materials Processing Technology*. 214 (2), 390-401 (2014).

*Ларшин В.П.*

Одесский национальный политехнический университет,  
Одесса, Украина

*Лищенко Н.В.*

Одесская национальная академия пищевых технологий,  
Одесса, Украина

*Рябченко С.В.*

Дочернее предприятие «БЕСТ-БИЗНЕС», Киев, Украина

## ИСПЫТАНИЯ ВЫСОКОПОРИСТОГО ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА

Испытания проводили в заводских условиях на плоскошлифовальном станке мод. 3E711B1 [1] в ходе экспериментальных исследований эксплуатационных характеристик высокопористых шлифовальных кругов, предназначенных для профильного зубошлифования на станке с ЧПУ [2]. Испытывались следующие абразивные круги-представители (samples) из белого корунда с прямоугольным профилем производства Волжского абразивного завода (ВАЗ) и фирмы «BEST-BUSINESS a.s.» (BEST, Чехия):

- 1) 250x25x76 A9960Js12V (BEST, цвет красный, высокопористый рис. 1, а);
- 2) 250x40x76 25A40CM28K5 (ВАЗ, цвет белый, рис 1, б).



*a*



*б*

*Рисунок 1 – Шлифовальные круги A9960Js12V (a) и 25A40CM28K5 (б)*

Для исследования процесса шлифования были изготовлены образцы призматической формы размером 15x15x35 мм. Материал 12X2H4A после цементации и закалки, HRC 58-60 (рис.2).



*Рисунок 2. – Образцы для исследования высокопористого круга*

Методика исследований:

- 1) правка круга, подготовка поверхности образца под рабочий ход шлифованием с поперечной подачей при вертикальной глубине шлифования 0,01 мм до полного касания кругом обрабатываемой поверхности;
- 2) осуществление рабочего хода на заданном режиме шлифования с одновременным измерением мощности шлифования;
- 3) повторение опыта 2 или 3 раза, в зависимости от разброса получаемых отсчётов.

Для определения фактической глубины шлифования  $t_{\phi}$  на каждом образце оставляли не шлифованную на рабочем ходе полоску (рис.2), по отношению к поверхности которой позднее определяли  $t_{\phi}$  (рис.3,б).

Лимбовая глубина шлифования на рабочем ходу  $t_n = 50$  мкм и  $t_n = 30$  мкм на разной скорости детали  $V_d$ , на каждом круге 2-3 опыта в одном режиме. При испытаниях фиксировали мощность шлифования  $P$  (рис.3,а) на приборе ПАМ (разработка ОНПУ). Измерение фактического съёма материала  $t_{\phi}$  производили на контрольном приспособлении (рис.3,б) часовым индикатором ЛИЗ с ценой деления 2 мкм.

Для каждого опыта найдена удельная интенсивность шлифования  $Q'_w$  (мм<sup>3</sup>/мм·с), т.е. интенсивность шлифования  $Q_w$  (мм<sup>3</sup>/с) в расчёте на 1 мм активной ширины профиля круга, причём

$$Q'_w = t_\phi V_\delta, \quad (1)$$

$$Q_w = t_\phi b V_\delta, \quad (2)$$

где  $t_\phi$  – усредненная фактическая глубина шлифования, мм;  $b$  – усредненная ширина контакта, мм.



а



б

Рисунок 3. – Преобразователь активной мощности (а) и приспособление для измерения фактического съёма (б)

Удельную работу шлифования  $A_{уд}$  (Дж/мм<sup>3</sup>) определяли по формуле

$$A_{уд} = \frac{P}{Q_w}. \quad (3)$$

Таблица 1 – Результаты измерений и расчёта параметров шлифования

Шлифовальный круг <b>25A40CM28K5</b>							
$V_\delta$ , м/мин	Номер обр.	$t_\phi$ , мкм	$t_\phi$ ср., мкм	$P$ , Вт	$P$ ср., сред, Вт	$Q'_w$ , мм <sup>3</sup> /мм·с	$Q'_w$ ср., мм <sup>3</sup> /мм·с
4,76	1 верх.	32,33	32,75	849,56	683,14	2,56	2,6
	1 бок.	33,17		516,71		2,63	
10,90	2 верх.	19,32	24,25	529,39	627,66	3,51	4,4
	2 бок.	29,17		725,93		5,30	
Шлифовальный круг <b>A9960Js12V</b>							
4,76	3 верх.	42,67	42,67	1268	1071,12	3,39	3,4
	3 бок.	40		842,2		3,17	
	5 верх.	45,33		1103,16		3,59	
10,90	4 верх.	29,5	34,17	653,62	756,35	5,36	6,2
	4 бок.	38,83		859,07		7,05	

Результаты измерений параметров  $t_\phi$  и  $P$ , а также расчёта параметров  $Q'_w$ ,  $Q_w$  (табл.1) и  $A_{y\phi}$  (табл.2) позволяют выполнить сравнительный анализ эксплуатационных характеристик шлифовальных кругов.

Таблица 2 – Определение интенсивности и удельной работы шлифования

Шлифовальный круг 25A40CM28K5						
$V_\phi$ , мм/с	Номер обр.	$t_\phi$ ср., мм	$b$ , мм	$b$ ср., мм	$Q_w$ , мм <sup>3</sup> /с	$A_{y\phi}$ , Дж/мм <sup>3</sup>
79,33	1 верх.	0,03275	11,5	11,35	29,5	23,16
	1 бок.		11,2			
181,67	2 верх.	0,02425	10,97	10,885	47,9	13,1
	2 бок.		10,8			
Шлифовальный круг A9960Js12V						
79,33	3 верх.	0,04267	11,3	11,47	38,8	27,6
	3 бок.		11,23			
	5 верх.		11,87			
181,67	4 верх.	0,03417	11,67	11,52	71,5	10,57
	4 бок.		11,37			

Примечание: 1) обр. и ср. – образец и среднее; 2) верх. и бок. – верхняя и боковая поверхности

Исследовали влияние лимбовой глубины резания  $t_\lambda$  на  $A_{y\phi}$  при  $V_\phi = 4,76$  м/мин (табл. 3).

Таблица 3 – Влияние глубины шлифования на удельную работу

Номер обр.	Шлифовальный круг A9960Js12V						
	$t_\lambda$ , мкм	$t_\phi$ , мкм	$b$ , мм	$P$ , Вт	$Q'_w$ , мм <sup>3</sup> /мм·с	$Q_w$ , мм <sup>3</sup> /с	$A_{y\phi}$ , Дж/мм <sup>3</sup>
5 верх.	50	45,33	11,87	1103,16	3,59	38,13	28,1
5 бок.	30	11,67	11,13	469,16	1,48	16,74	28,0

**Выводы:** 1. С увеличением скорости детали  $V_\phi$ :

– фактическая глубина шлифования  $t_\phi$  уменьшается при одной и той же лимбовой глубине  $t_\lambda$ , но при шлифовании высокопористым кругом  $t_\phi$  больше на 23...29 %, что означает уменьшение отжатий круга (табл.1);

– удельная интенсивность шлифования  $Q'_w$  повышается и для высокопористого круга она принимает большие значения: 2,6 против 3,4 мм<sup>3</sup>/(мм с) и 4,4 против 6,2 мм<sup>3</sup>/(мм с) (табл.2);

– для обоих кругов средняя мощность шлифования уменьшается (табл.1), параметры  $Q'_w$  и  $Q_w$  увеличиваются (табл.1 и табл.2),  $A_{y\phi}$  уменьшается (табл.2).

2. Для высокопористого круга  $Q_w$  принимает большие значения, например, 38,8 против 29,5 мм<sup>3</sup>/с и 71,5 против 47,9 мм<sup>3</sup>/с (табл.2) .

3. С увеличением глубины шлифования  $t_n$  удельная работа для высокопористого круга практически не меняется: 28,0...28,1 Дж/мм<sup>3</sup>.

4. Высокопористый шлифовальный круг A9960Js12V, по сравнению с обычным кругом 25A40CM28K5, имеет лучшую эксплуатационную характеристику по производительности шлифования.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Лищенко Н.В. Испытания высокопористых шлифовальных кругов на плоскошлифовальном станке / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, С.В. Рябченко // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: материалы международной научн.-техн. конф. 21-23 сентября 2016 года, Одесса. – Одесса: ОНПУ, 2016. – С. 111-115.

2. Ларшин В.П. Шлифование зубчатых колёс высокопористыми абразивными кругами из монокристаллического корунда / В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко, С.В. Рябченко, Серета Г.В. // Оборудование и инструмент. – №2(194). –2017. – С. 26-28.

*Лищенко Н.В.*

Одесская национальная академия пищевых технологий,  
Одесса, Украина

*Ларшин В.П.*

Одесский национальный политехнический университет,  
Одесса, Украина

*Ковальчук А.Н., Нежебовский В.В.*

ПАО «Свет шахтера», Харьков, Украина

## ЗУБОШЛИФОВАНИЕ ВЫСОКОПОРИСТЫМИ КРУГАМИ НА СТАНКЕ С ЧПУ

Высокопористые шлифовальные круги обладают хорошей самозатачиваемостью, являются технологичными при профилировании и правке. Они позволяют шлифовать зубчатые колеса с меньшим выделением тепла в зоне резания (микропрерывистое шлифование) [1,2].

Шлифование производили на зубошлифовальном станке с ЧПУ модели ЧПУ HÖFLER RAPID 1250 в период 15-20 августа 2016 г. (рис.1,*а*) в соответствии с разработанной программой испытаний. Измерение параметров зубчатого колеса выполняли непосредственно на станке (измерительная система Renishaw) и на координатно-измерительной машине (КИМ) GLOBAL (рис.1,*б*).

Изучали эксплуатационные характеристики высокопористых кругов со следующими характеристиками:

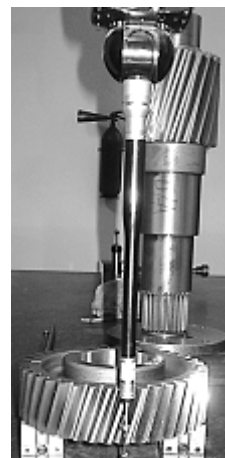
1) 400x32x127 WG946 Hs12 VS – монокорунд (рис.2, *а*);



- 2) 400x32x127 3SG46Hs 12 VS – золь-гелевый корунд (рис.2, б);
- 3) 400x32x127 A9946Hs 12 VS – белый электрокорунд (рис.2, в);
- 4) 400x40x127 25A F46 L6 V – обычный белый электрокорунд ВАЗ.



а

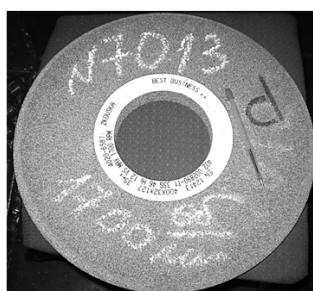


б

Рисунок 1. – Шлифование зубчатого колеса на станке с ЧПУ HÖFLER RAPID 1250 (а) и контроль его точности на КИМ GLOBAL (б)



а



б



в

**WG9 46Hs12Vs**  
Монокорунд

**3SG 46Hs12Vs**  
Золь-гелевый

**A99 46Hs12Vs**  
Электрокорунд

Рисунок 2. – Высокопористые зубошлифовальные круги

Таблица 1 – Мощность зубошлифования обычным и золь-гелевым кругом

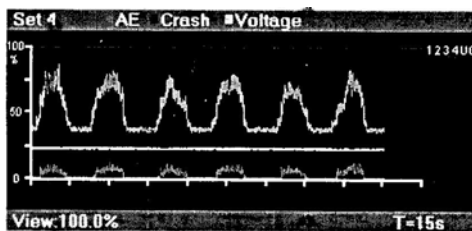
Характеристика этапа зубошлифования	Шлифовальный круг	
		400x40x127 мм 25AF46L6V Волжский абразивный завод, ВАЗ
Этап 2 (правка через 6 впадин)	1811,15 Вт (2411,15 – 600) Вт	566,5 Вт (1166,5 – 600) Вт
Этап 3 (правка через 10 впадин)	1333,3 Вт (1933,3 – 600) Вт	400 Вт (1000 – 600) Вт
Примечание: мощность холостого хода $P_{xx}$ – 600 Вт.		

При зубошлифовании на станке с ЧПУ HÖFLER RAPID 1250, например, золь-гелевый круг сравнивали с обычным кругом ВАЗ. Для этого фиксировали: 1) сигнал мощности шлифования (индикатор на мониторе ЧПУ, табл.1); 2) сиг-

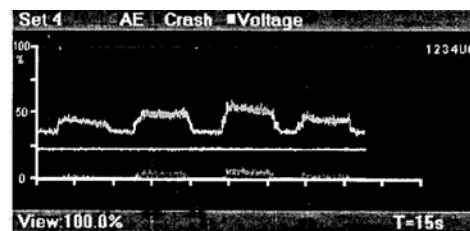
нал акустической эмиссии (АЕ, табл.2, рис.3, рис.4); 3) параметры точности обработанных зубчатых колёс (встроенная измерительная система Renishaw, табл.3).

Таблица 2 – Акустическая эмиссия при зубошлифовании

Этап (проход) 2					
25AF46L6V (обычный)			3SG46Hs12VS (золь-гелевый)		
Номер впадины	АЕ, %	АЕ – АЕ <sub>хх</sub> , %	Номер впадины	АЕ, %	АЕ – АЕ <sub>хх</sub> , %
4	87,5	50	8	37,5	25,5
6	55	17,5	12	37,5	25,5
19	100	62,5	13	50	38
24	87,5	50	14	50	38
28	95	57,5	15	18,5	6,5
			22	18,5	6,5
			28	50	38
		Ср. 37,5%			Ср. 25,4%
Этап (проход) 3					
Номер впадины	АЕ, %	АЕ – АЕ <sub>хх</sub> , %	Номер впадины	АЕ, %	АЕ – АЕ <sub>хх</sub> , %
5	55	17,5	1	18,5	6,5
9	62,5	25	4	15	3
12	60	22,5	10	15	3
21	60	22,5	15	15	3
		Ср. 21,87%			Ср. 7,75%
Примечание: АЕ на холостом ходу АЕ <sub>хх</sub> – 37,5 %; Ср. – среднее					

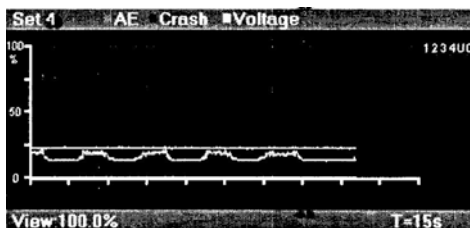


а

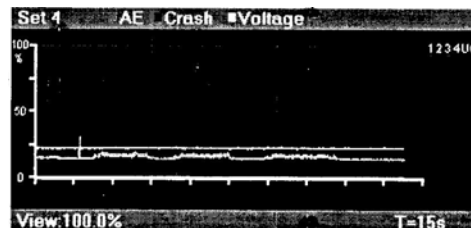


б

Рисунок 3. – АЕ-сигнал при зубошлифовании обычным кругом: а – этап 2, впадина 24, рабочий ход 9; б – этап 3, впадина 5, рабочий ход 5



а



б

Рисунок 4. – АЕ-сигнал при зубошлифовании золь-гелевым кругом: а – этап 2, впадина 15, рабочий ход 1; б – этап 3, впадина 15, рабочий ход 1

Например, обрабатывали зубчатые колеса типа В1318В 41.002 (далее ЗК №1 и ЗК № 2). Наружный диаметр  $da = 233,4$  мм;  $z = 29$ ;  $m = 7$ ;  $\beta = -18^\circ$ ;  $x = 0,545$ ; ширина венца  $B = 60$  мм. Припуск на обработку  $z = 0,510$  мм. Число этапов – 3.

Припуск на 1 этап –  $z_1 = 0,24$  мм:  $i = 16$ ;  $t = 0,015$  мм;  $S_{\text{рад}} = 0,032$  мм;  $V_{i=1} = 500$  мм/мин;  $V_{i=2\dots16} = 5000$  мм/мин.

Припуск на 2 этап –  $z_2 = 0,24$  мм:  $i = 16$ ;  $t = 0,015$  мм;  $S_{\text{рад}} = 0,032$  мм;  $V_{i=1\dots16} = 5000$  мм/мин.

Припуск на 3 этап –  $z_3 = 0,03$  мм:  $i = 4$ ;  $t_{i=1,2} = 0,010$  мм;  $S_{\text{рад } i=1,2} = 0,022$  мм;  $V_{i=1,2} = 2000$  мм/мин;  $t_{i=3,4} = 0,005$  мм;  $S_{\text{рад } i=3,4} = 0,011$  мм;  $V_{i=3} = 2000$  мм/мин;  $V_{i=4} = 1500$  мм/мин.

Запись осциллограмм АЕ сигнала показывает преимущество зольгелевого круга (рис. 3 и рис. 4).

**Выводы.** 1. Мощность шлифования на этапе 2 на 68,7 % ниже у зольгелевого круга по сравнению с обычным кругом, на этапе 3 – на 70 % ниже. Акустическая эмиссия на этапе 2 на 32 % ниже, на этапе 3 – на 64 % ниже.

2. Погрешности профиля и линии зуба в целом ниже после шлифования золь-гелевым кругом. Накопленная погрешность шага  $Fp$  по левой и правой сторонам впадин и радиальное биение  $Fr$  ниже после шлифования золь-гелевым кругом.

Таблица 3 – Результаты измерений параметров ЗК с помощью измерительной системы Renishaw на станке с ЧПУ HÖFLER RAPID 1250

Контролируемые параметры	Шлифовальный круг			
	25AF46L6V Волжский абразивный завод, ВАЗ		3SG46Hs12VS West-Business a.s. золь-гелевый	
	ЗК №1		ЗК №2	
	Левая сторона	Правая сторона	Левая сторона	Правая сторона
Параметры профиля				
$F\alpha$ , мкм	2,8	4,0	3,5	2,5
$ff\alpha$ , мкм	2,2	2,5	2,0	2,7
$fH\alpha$ , мкмкм	-2,7	2,8	-3,5	-1,2
Параметры линии зуба				
$F\beta$ , мкм	5,3	8,5	5,0	3,5
$ff\beta$ , мкм	1,8	3,7	1,3	0,8
$fH\beta$ , мкм	5,7	-8,7	5,3	-4,7
Параметры шага и биение				
$fp$ , мкм	3,0	4,0	3	5
$Fp$ , мкм	13	12,5	6,5	10,5
$Fr$ , мкм	9,5		7,5	
Примечание: параметры профиля и параметры линии зуба измеряли на 3-х впадинах, равномерно расположенных по окружности (впадины № 1, 10, 20).				

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ларшин В.П. Профильное шлифование зубчатых колёс высокопористыми абразивными кругами / В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко, С.В. Рябченко, В.В. Нежебовский, Г.В. Серeda // Оборудование и инструмент. – №5(190). –2016. – С.20-23.

2. Ларшин В.П. Шлифование зубчатых колёс высокопористыми абразивными кругами из монокристаллического корунда / В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко, С.В. Рябченко, В.В. Нежебовский, Г.В. Серeda // Оборудование и инструмент. – №2(194). –2017. – С.26-28.

*Лищенко Н.В.*

Одесская национальная академия пищевых технологий,  
Одесса, Украина

*Ларшин В.П.*

Одесский национальный политехнический университет,  
Одесса, Украина

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПРИПУСКА НА ЗУБОШЛИФОВАНИЕ

Теория определения припуска на механическую обработку является одним из основных разделов технологии машиностроения и связана с общей проблемой моделирования технологических процессов с целью повышения их эффективности [1]. Ранее было установлено, что припуск на зубошлифование содержит постоянную  $z_0$  и переменную  $\Delta z$  составляющие [2], причем переменная составляющая содержит систематическую  $\Delta z_{сист}$  и случайную  $\Delta z_{случ}$  компоненты, т.е.

$$\Delta z = \Delta z_{сист} + \Delta z_{случ} \quad (1)$$

Известно, что систематическая компонента припуска для деталей призматической формы (плоские поверхности) соответствует погрешности установки (базирования) при возможности измерения последней на станке, в противном случае она рассматривается как случайная. Для деталей типа «тела вращения» (цилиндрические поверхности) эта компонента становится периодической применительно к диаметру. Например, для делительной окружности зубчатого колеса (ЗК) с эксцентриситетом  $e$  по отношению к оси вращения планшайбы стола зубошлифовального станка возникает колебание  $\Delta y$  диаметрального размера, причём

$$\Delta y = e \sin \varphi, \quad (2)$$

где  $\varphi$  – центральный угол делительной окружности в интервале  $0 \dots 2\pi$ .

Это приводит к колебанию  $\Delta z_{сист}$  (по нормали к поверхности) боковых поверхностей впадин зубчатого колеса ЗК [3]

$$\Delta z_{cuct} = \pm e \sin(\varphi \pm \alpha_o), \quad (3)$$

где  $\alpha_o$  – угол профиля ЗК.

В формуле (3) разные знаки соответствуют разным сторонам впадин ЗК. Таким образом, при возможности измерения припуска на зубошлифовальном станке погрешность установки ЗК, приводящая к эксцентриситету  $e$ , является причиной систематической периодической составляющей припуска.

Заводская практика показывает, что число измерений припуска по периферии ЗК изменяется от минимального (2-3 измерения) до  $N_{\max}$  (число впадин ЗК). При минимальном числе измерений велика доля случайной компоненты в величине припуска, поскольку количество получаемой информации недостаточно для выделения систематической компоненты. При максимальном числе измерений случайная компонента припуска находится в суперпозиции с систематической синусоидальной компонентой от векторной суммы кинематического и геометрического эксцентриситетов [3]. Таким образом, случайная составляющая припуска имеется всегда, но её удельный вес уменьшается по мере увеличения числа измерений и в пределе ( $N \rightarrow N_{\max}$ ) эта составляющая стремится к погрешности измерения (десятые доли мкм).

В соответствии с теоретико-вероятностным подходом будем рассматривать переменную составляющую припуска  $\Delta z$ , предполагая наличие в ней систематической (периодической)  $\Delta z_{cuct}$  и случайной (апериодической)  $\Delta z_{случ}$  компонент. Следовательно, структурная формула для определения припуска  $z(n)$  на зубошлифование для обеих сторон профиля впадины имеет вид

$$z(n) = z_0 + \Delta z(n) = z_0 + \Delta z_{cuct}(n) + \Delta z_{случ}(n). \quad (4)$$

где  $n$  – текущий номер впадины ЗК,  $1 \leq n \leq N_{\max}$ .

Распределение припуска по левой  $z^L(n)$  и правой  $z^R(n)$  сторонам впадин ЗК имеет синусоидальный характер изменения по измерительной окружности. Мгновенные значения этих припусков представляют собой сумму постоянной ( $z_0^L$  или  $z_0^R$ ) и переменной ( $\Delta z^L(n)$  или  $\Delta z^R(n)$ ) составляющих этого припуска. Причём, мгновенная величина переменной составляющей припуска в формуле (4) может быть положительной и отрицательной. В первом случае мгновенное значение соответствующего припуска (по правой или левой стороне впадин) больше его постоянной составляющей, во втором – меньше. Следовательно,

$$z^L(n) = z_0^L + \Delta z^L(n) = z_0^L + [\Delta z_{\beta}^L(n) + \Delta z_{\gamma}^L(n)], \quad (5)$$

$$z^R(n) = z_0^R + \Delta z^R(n) = z_0^R + [\Delta z_{\beta}^R(n) + \Delta z_{\gamma}^R(n)], \quad (6)$$

где  $\Delta z_{\beta}^L(n)$  и  $\Delta z_{\gamma}^L(n)$  – систематическая и случайная компоненты переменной составляющей левостороннего припуска, мм;  $\Delta z_{\beta}^R(n)$  и  $\Delta z_{\gamma}^R(n)$  – систематическая и случайная компоненты переменной составляющей правостороннего припуска, мм. В уравнениях (5) и (6) систематическую компоненту переменной составляющей припуска можно заменить первой гармоникой соответствующего ряда Фурье, т.е.

$$\Delta z_{\beta}^L(n) = A_1^L \cos(\omega_1 t) + B_1^L \sin(\omega_1 t), \quad (7)$$

$$\Delta z_{\beta}^R(n) = A_1^R \cos(\omega_1 t) + B_1^R \sin(\omega_1 t), \quad (8)$$

где  $A_1^L$ ,  $B_1^L$ ,  $A_1^R$ ,  $B_1^R$  – коэффициенты Фурье;  $0 \leq \omega_1 t \leq 2\pi$ .

Полученные уравнения не зависят от положения на ЗК начальной впадины, в которой выполняют начальное центрирование профиля шлифовального круга. После выполнения принятого метода выравнивания припусков, например, выравнивания минимальных припусков, в зависимостях (5) и (6) изменяются только постоянные составляющие припусков  $z_0^L$  и  $z_0^R$ . Следовательно, эти зависимости при выравнивании припусков одним из известных методом перемещаются по оси ординат в противоположных направлениях, не изменяя своей формы.

Например, если до выравнивания припусков  $z_{\min}^L < z_{\min}^R$ , то после выравнивания минимальных припусков зависимость  $z^L(n)$  переместится вверх на величину  $0,5(z_{\min}^R - z_{\min}^L)$ , а зависимость  $z^R(n)$  переместится вниз на эту же самую величину. При этом

$$z_0 = 0,5(z_0^L + z_0^R) = \text{const}, \quad (9)$$

где  $z_0$  – среднее значение припуска по всем впадинам ЗК (взаимное среднее).

Причём для любого  $N$  из интервала  $1 \leq N \leq N_{\max}$

$$z_0 = \frac{1}{N} \left( \sum_{n=1}^N z^L(n) + \sum_{n=1}^N z^R(n) \right). \quad (10)$$

Одним из параметров диагностики состояния технологической системы зубошлифования является фактическая величина припуска на обработку, зависящая от индивидуальных особенностей ЗК, в частности максимальная величина припуска. Установлено, что максимальная величина припуска на левой  $z_{\max}^L$  и правой  $z_{\max}^R$  стороне впадин зависит от метода его выравнивания, причем  $z_{\max}^L \neq z_{\max}^R$  для всех методов, кроме метода выравнивания максимальных значений припуска. Поэтому для распределения на этапы и рабочие хода выбирают максимальную величину  $\text{maximax}$  из двух указанных максимальных величин припуска. Например,  $\text{maximax} = z_{\max}^L$  или  $\text{maximax} = z_{\max}^R$ . Необходимо разработать теорию определения максимального припуска  $\text{maximax}$ , учитывающую фактические измерения припуска на станке с ЧПУ при  $N \leq N_{\max}$ . Эти измерения производят в автоматическом режиме на этапе наладки зубошлифовального станка с ЧПУ после установки ЗК на планшайбу станка.

Таким образом, мгновенные распределения лево- и правостороннего припуска, полученные путём его измерения на зубошлифовальном станке с ЧПУ, содержат систематическую и случайную компоненты. Априорно предполагается, что систематическая компонента является синусоидальной с периодом равным длине измерительной окружности зубчатого колеса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лищенко Н.В. Анализ способов определения припуска на механическую обработку / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин, С.Н. Макаров // *Праці Одеського політехнічного університету: Науковий та науково-виробничий збірник*. – Одеса, 2011. – Вип. 1(35). – С.36-42.
2. Лищенко Н.В. Определение припуска на зубошлифование / Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин // *Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві: збірник наукових праць [Текст]*. – Вип. 2(13). – О.: Наука і техніка, 2016. – С.130-137.
3. Тайц Б.А. Точность и контроль зубчатых колёс / Б.А. Тайц. – М.: Машиностроение, 1972. – 368 с.

*Марчук В.І., Марчук І.В.*

Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

## ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ В ПЕРЕНАЛАГОДЖУВАЛЬНОМУ ПІДШИПНИКОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Мета і завдання: 1. Провести дослідження залежності розмірних параметрів оброблюваних деталей від режимів шліфувальної операції, впливу супроводжуючих чинників та характеристик використовуваного обладнання і, на основі виявлених залежностей та взаємозв'язків розробити модель формування технологічної операції в автоматизованих системах управління точністю обробки кілець підшипників (рис. 1).

2. Дослідити вплив режимів різання та їх циклової послідовності у формоутворюючих операціях на кінцеві розмірні параметри поверхонь деталей підшипників.

Для системного аналізу ефективно використовується багат шарова ієрархія вирішень (рівнів складності) і організаційна ієрархія. Перша визначає вертикальну декомпозицію комплексної задачі на підзадачі, друга – встановлює міжелементні й підсистемні зв'язки та описує її структуру [1].

На рис.2 подано узагальнену недекомпозиціоновану блок-схему АТК [1]. Цією схемою визначаються первинні поняття про алгоритм і засоби контролю та діагностування технологічного об'єкта управління (ТОУ).

Як випливає зі схеми (рис. 2), важливе місце в автоматизованих технологічних комплексах займає контроль та вимірювання параметрів на всіх рівнях [2]. Для гарантованого забезпечення якості продукції виникає необхідність різкого підвищення рівня технологічної точності, що вимагає подальшого розвитку управління та регулювання, тобто всебічного розвитку активного контролю, який є одним з ефективних методів технологічного забезпечення якості [2].

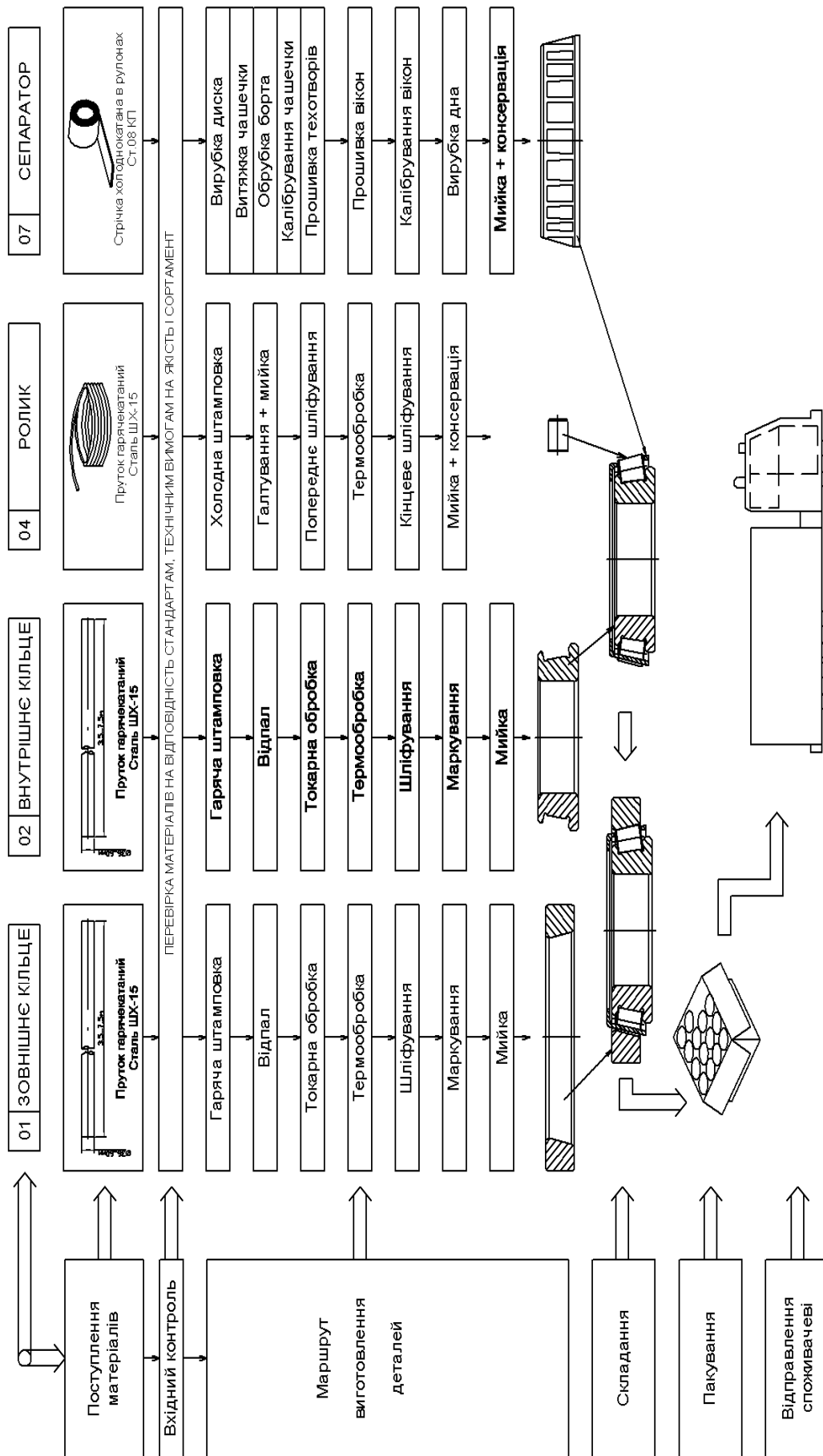


Рисунок 1 – Технологія виготовлення підшипника



Щоб ні одна з бракованих деталей не була помилково признана придатною, необхідно зменшити допуск  $T$  до значення технологічного допуску:

$$T_{\text{тех}} = T - 4\Delta_{\text{мет}} \quad (1)$$

Це пояснюється тим, що засіб контролю може бути налагоджений на граничні значення похибки  $\Delta_{\text{мет}}$ , тобто на границі  $E_1'$  і  $E_2'$ . Щоб не звужувати виробничий допуск, необхідно або зменшувати допустиму похибку  $\Delta_{\text{мет}}$ , або зміщувати налагодження, розширивши допуск до гарантованого  $T_G$ . Практичне поєднання похибок контролю та вимірюваного параметра є подією випадковою. З врахуванням закону нормального розподілу обох складових можна записати

$$T = \sqrt{T_{\text{тех}}^2 + (2\Delta_{\text{мет}})^2}, \quad (2)$$

де  $\Delta_{\text{мет}}$  – допустима частина похибки.

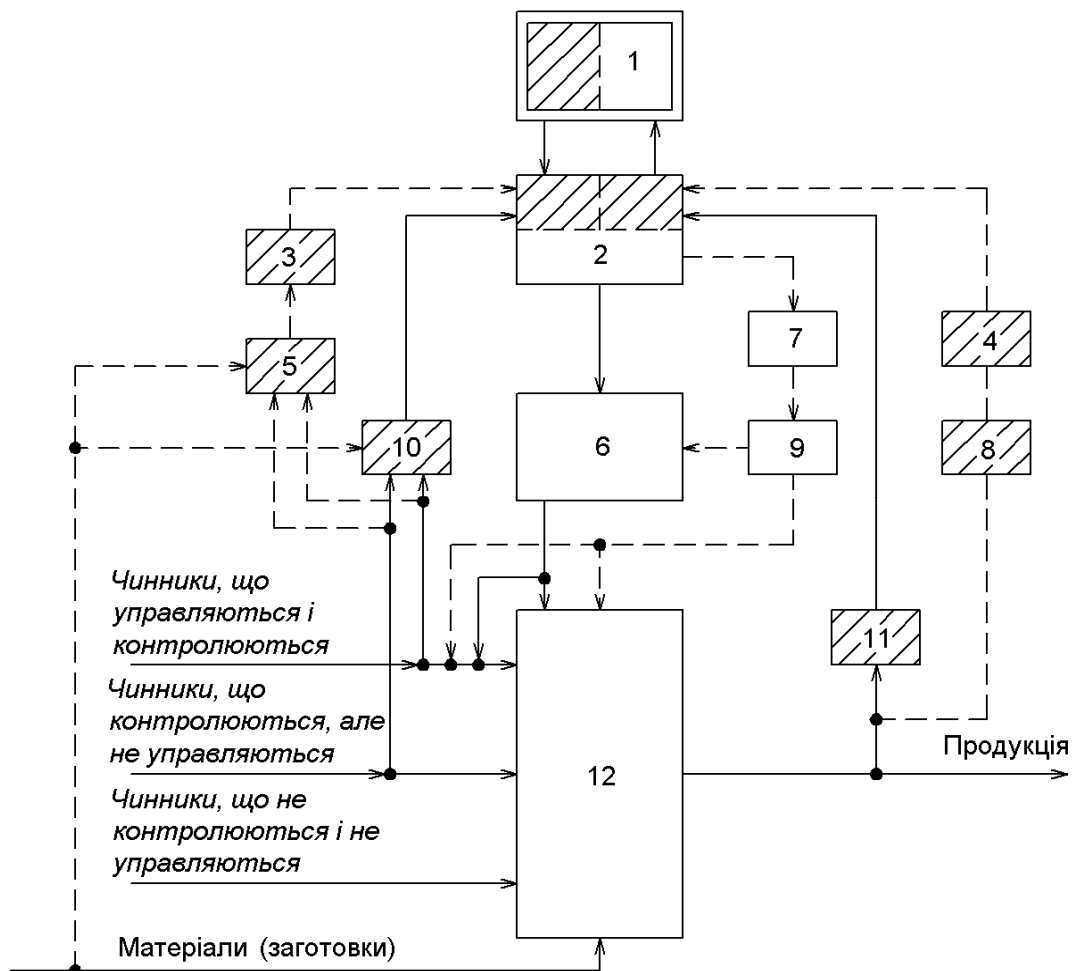


Рисунок 2 – Підсистема контролю в узагальненій блок-схемі АТК: 1 – електронно-обчислювальна машина; 2 – комплекс пристроїв вводу-виводу; 3, 4, 9 – оператор-технолог; 5, 8 – засоби візуального контролю (вимірювань); 6 – виконавчі органи; 7 – дисплей; 10, 11 – датчики параметрів процесу; 12 – технологічний об'єкт управління – ТОУ (елементи з функціями контролю позначені штриховкою).

Аналіз формул (1) і (2) показує, що якщо  $2\Delta_{\text{мет}}/T=0,1$ , то практично увесь допуск відводиться на компенсацію технологічних похибок, так як при цьому

$T_{\text{тех}}/T=0,9 - 0,995$ . Навіть якщо прийняти  $2A_{\text{мет}}/T=0,4$ , то і тоді на компенсацію технологічних похибок можна виділити  $(0,6 - 0,917)T$ .

Отже, виходячи із вищезазначеного, були зроблені наступні висновки:

1. Дослідженні залежності розмірних параметрів оброблюваних деталей від режимів шліфувальної операції, впливу супроводжуючих чинників та характеристик використовуваного обладнання і, на основі виявлених залежностей та взаємозв'язків розробити модель формування технологічної операції в автоматизованих системах управління точністю обробки кілець підшипників.

2. Досліджено вплив режимів різання та їх циклової послідовності у формоутворюючих операціях на кінцеві розмірні параметри поверхонь деталей підшипників.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Марчук В.І. Корекція деформаційних похибок при управлінні точністю механічної обробки / В.І. Марчук, В.Т. Михалевич // Наукові нотатки: міжвузівський збірник (за напрямом «Інженерна механіка»). – Луцьк: Луцький державний технічний університет, 2000. – Вип. 7. – С. 143-145.

2. Михалевич В.Т. Вплив параметрів заготовки на роботу автоматизованих систем управління точністю обробки деталей підшипників / В.Т. Михалевич // Наукові нотатки: міжвузівський збірник (за напрямом "Інженерна механіка") – Луцьк: Луцький державний технічний університет, 2007. – Вип. 19. – С. 237-244.

3. Високопродуктивне шліфування: навч. посібник / О.В. Якімов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, О.О. Якімов – К.: ІСДО, 1995. – 180 с.

*Новиков Г.В.*

Научный центр НТК «Эльбор», Харьков, Украина

## НОВЫЕ МОНОГРАФИИ О СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ

В этом году в издательстве «Лира», г. Днепр, вышли из печати три монографии: «Современные экологически безопасные технологии производства» (объем 372 стр.), «Основы повышения качества и производительности механической обработки» (объем 452 стр.) и «Оптимальные решения в металлообработке» (объем 476 стр.), подготовленные авторским коллективом в составе Новикова Ф.В., Жовтобрюха В.А., Новикова Г.В. В них приведены в обобщенном виде результаты разработки и внедрения в производство современных эффективных технологических процессов механической и физико-технической обработки деталей машин, а также других изделий, изготовленных из материалов повышенной твердости.

В монографии «Современные экологически безопасные технологии производства» обоснованы оптимальные условия алмазного электроэрозионного шлифования различных металлических и неметаллических материалов повышенной твердости, включая электрические и механические параметры обработки, которые обеспечивают высокие технико-экономические показатели шлифования при одновременном улучшении экологии производства. На их основе разработаны и внедрены в производство эффективные экологически чистые и безопасные технологии алмазного электроэрозионного шлифования и электроэрозионной правки алмазных кругов на металлических связках при обработке изделий из твердых сплавов, износостойких наплавов и покрытий, керамик и ферритов, технического стекла и хрусталя, при огранке натуральных алмазов в бриллианты и т.д. Приведены современные эффективные технологии механической обработки лезвийными режущими инструментами и обобщен практический опыт их внедрения в производство, накопленный в Техническом Центре «ВариУс» (г. Днепр). Теоретически обоснованы оптимальные условия осуществления высокоскоростного резания, предложены новые конструкции металлорежущих станков с ЧПУ типа «обрабатывающий центр» и сборных твердосплавных режущих инструментов с износостойкими покрытиями, в частности, производства южно-корейской компании TaeguTec. Даны практические рекомендации по их рациональному использованию в промышленности на различных операциях механической обработки деталей, в частности, в ПАО «Свет шахтера» (г. Харьков), ГП ХМЗ «ФЭД», ПАО «Днепрполимермаш» (г. Днепр) и на многих других предприятиях Украины.



В монографии «Основы повышения качества и производительности механической обработки» теоретически с единых позиций рассмотрены закономерности формирования силовой напряженности процессов резания и шлифования и сформулированы условия ее уменьшения с целью повышения качества и производительности обработки. Значительное внимание уделено закономерностям формирования упругих перемещений, возникающих в технологической системе, которые, как правило, определяют погрешность обработки и точность

изготовления деталей машин. Предложены новые теоретические решения, направленные на уменьшение возникающих упругих перемещений, а также на их управление в процессе обработки для повышения производительности обработки с учетом ограничения по точности обрабатываемых поверхностей. Аналитически с позиции теории вероятностей описаны закономерности формирования шероховатости поверхностей при абразивной обработке и определены основные условия ее уменьшения. Показана эффективность управления величиной линейного износа зерен в процессе формирования шероховатости поверхности при шлифовании, в особенности, при обработке алмазными кругами на металлических связках с применением эффективной электроэрозионной правки. Теоретически и экспериментально доказана целесообразность применения схемы глубинного шлифования с относительно небольшой скоростью детали с целью повышения производительности и качества обработки.

Приведены аналитические зависимости для определения температуры резания при обработке лезвийными и абразивными инструментами, что позволило обосновать условия ее уменьшения без снижения производительности и ухудшения качества обрабатываемых поверхностей. Определены условия уменьшения температуры резания при глубинном шлифовании, позволяющие совместить операции предварительного и окончательного шлифования в одну операцию, обеспечивая достижение высоких показателей обработки.

Значительное внимание уделено решению задач по определению условий повышения производительности обработки с учетом ограничений по точности и качеству обрабатываемых поверхностей. На этой основе разработаны новые технологии шлифования и лезвийной обработки, например, крупногабаритных деталей металлургического назначения, рабочие поверхности которых упрочнены высокотвердыми износостойкими наплавочными материалами. Показано, что при обработке деталей с низкой жесткостью технологической системы эффективно использовать схему шлифования с заданным натягом. Теоретически доказана перспективность применения круглого многопроходного и глубинного шлифования со скоростью детали, близкой или превышающей скорость круга. В работе обобщен опыт применения на предприятиях эффективных технологий механической обработки, металлорежущих станков с ЧПУ типа «обрабатывающий центр» и прогрессивных инструментов зарубежного производства, накопленный в Техническом центре «ВариУс» (г. Днепр).

В монографии «Оптимальные решения в металлообработке» приведены новые математические модели себестоимости механической обработки, определены условия ее уменьшения, оптимальные режимы резания и характеристики инструментов. Приведена математическая модель теплового баланса и температуры, возникающей при резании в условной плоскости сдвига материала, на передней и задней поверхностях инструмента, обоснованы экстремальный характер зависимости себестоимости обработки от скорости резания и условия повышения стойкости инструмента и производительности обработки.

Не менее важной в технологии машиностроения является проблема финишной обработки деталей машин, изготовленных из материалов с повышен-

ными физико-механическими свойствами, где требуется применение износостойких кругов из синтетических сверхтвердых материалов (СТМ). Как показывает производственный опыт, использование этих кругов приводит к их повышенному износу и, как правило, делает обработку экономически нецелесообразной. В результате приходится использовать обычные абразивные круги, что снижает качество обработки – на обрабатываемых поверхностях образуются прижоги, микротрещины и другие дефекты. Поэтому в работе получены оптимальные решения, направленные на повышение производительности и качества обработки, снижение износа прогрессивных кругов из СТМ. В особой мере это относится к операциям шлифования изделий с прерывистыми поверхностями (в частности, твердосплавных и быстрорежущих многолезвийных инструментов), характеризующихся низкой производительностью и повышенным износом круга из СТМ в связи с его ударно-циклическим взаимодействием с обрабатываемыми элементами изделия. В этом случае обрабатываемое изделие выполняет, по сути, функцию правящего элемента, что является положительным фактором при шлифовании обычным абразивным кругом, обеспечивающим его высокую режущую способность. Однако при шлифовании кругом из СТМ этот фактор снижает работоспособность круга и, соответственно, производительность обработки. Поэтому повысить эффективность шлифования изделий с прерывистыми поверхностями можно путем исключения ударно-циклического взаимодействия круга из СТМ с обрабатываемыми элементами изделия за счет строгого соблюдения определенных (оптимальных) соотношений между параметрами режима шлифования. Для их определения разработана математическая модель процесса шлифования на уровне микросрезов, позволившая выйти на создание эффективных способов высокопроизводительного глубинного и многопроходного шлифования (на уровне изобретений) и решить проблему обработки кругами из СТМ твердосплавных и быстрорежущих многолезвийных инструментов. Полученные результаты внедрены в производство на операциях лезвийной и абразивной обработки деталей машин.

*Новиков Д.Ф.*

Харьковский национальный экономический университет  
имени Семена Кузнеця, Харьков, Украина

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ ВНЕДРЕНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО МЕНЕДЖМЕНТА**

Все больше предприятий применяют у себя принцип Just In Time (JIT). Это наиболее распространенный в мире логистический принцип, при котором перемещения изделия в процессе его производства и поставки от поставщиков тщательно спланированы во времени так, что на каждый этап процесса следу-

ющая партия прибывает для обработки точно в тот момент, когда изготовление предыдущей партии завершено. Одним из неперенных условий успешной реализации этого принципа на промышленных предприятиях является применение эффективного инструментального менеджмента, который позволяет оптимизировать процесс металлообработки [1]. Инструментальный менеджмент (Tool Management) – это комплекс процессов, направленных на решение вопросов выбора инструмента, организации его учета, закупок, восстановления, настройки и эксплуатации, а также анализа затрат на инструмент [2]. Задачи инструментального менеджмента можно разделить как минимум на 4 блока: логистика; выбор формы и геометрии инструмента; стратегия обработки; оптимизация процесса обработки.

Рассматривая эти задачи, очевидно, наиболее актуальным является расчет режимов резания, которые в большинстве случаев устанавливаются произвольно, исходя из опыта технолога, а стойкость инструмента остается неизвестной до окончания обработки. Все это снижает эффективность обработки деталей и, соответственно, работы всего предприятия. Также нет четких критериев, определяющих эффективность выбранных режимов резания и стойкости инструмента. Классическая технология машиностроения, которая является основой при выборе режимов резания, предлагает следующие критерии эффективности: высокое качество обработанной поверхности детали и/или уменьшение машинного времени обработки [3, 4]. Однако критерий «качество» целесообразно рассматривать в качестве ограничения. Отдельно рассматривается второй критерий, предусматривающий максимально возможное снижение времени обработки. Однако при этом одновременное влияние этих двух критериев на снижение себестоимости обработки не рассматривается.

Решение этого и подобных вопросов становится возможным за счет более тщательной подготовки нового производства или оптимизации существующего производства на основании применения математических моделей, описывающих процесс работы инструмента (с технической стороны), и описывающих влияние окружающей среды – экономики и организации производства на предприятии.

Примером математического описания экономических показателей обработки можно рассматривать полученное уравнение для расчета оптимальной стойкости инструмента с учетом курса валюты, напрямую влияющего на закупочную цену инструмента и заработную плату рабочего. Установленная оптимальная стойкость инструмента соответствует минимальной себестоимости обработки. В случае, когда реальная стойкость инструмента меньше или больше стойкости, установленной на основе указанного уравнения, то целесообразно произвести корректировку режимов резания, что позволяет выйти на требуемый уровень стойкости инструмента. В табл. 1 – табл. 3 приведены результаты корректировки режимов резания на основании применения математической модели.

Испытание производилось на станке СТХ-310 с применением японского инструмента Tungaloy CNMG 120408 SA AN120, обрабатываемый материал – сталь 12X18H10T. В результате установлено, что производительность обработ-

ки остается неизменной (табл. 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 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
Испытуемый	80	0,38	1,5	83,6	37,21

*Таблица 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
Испытуемый 1	144	0,15	1,0	20,88	0,12
Испытуемый 2	216	0,10	1,0	20,76	0,22

Следующее испытание 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. 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 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 проводилось испытание на станке 16K20T1 с применением инструмента Pramet CNMG 120408E RM, обрабатываемый материал – сталь 20X3МВФ-Ш. В результате установлено, что производительность обработки увеличилась на 2 % (табл. 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, исключая использование различных махинаций при изготовлении и продвижении продукции на рынке.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Гриньова В.М. Організація виробництва: підручник / В.М. Гриньова, М.М. Салун. – Х.: ВД «ІНЖЕК», 2007. – 576 с.
2. Инструментальный менеджмент: от входного контроля до протокола износа [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)
3. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
4. Маталин А.А. Технология машиностроения: учебник / А.А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.

*Новиков Ф.В.*

Харьковский национальный экономический университет  
имени Семена Кузнеця, Харьков, Украина

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЯ**

Изготовление высокоточных отверстий является актуальной задачей машиностроения. В работе [1] приведено теоретическое решение о величине смещения оси обрабатываемого отверстия при рассверливании относительно ее номинального положения  $\Delta$  (равной величине упругого перемещения в технологической системе) вследствие нарушения условия равновесия радиальных составляющих сил резания, действующих на оба режущих лезвия сверла (рис. 1):



$$\Delta = \frac{\Delta P_y}{c} = \frac{\sigma \cdot S \cdot \Delta t \cdot \cos \varphi}{K_{рез} \cdot c}, \quad (1)$$

где  $\Delta P_y$  – наибольшая разница радиальных составляющих сил резания, действующих на оба лезвия сверла, Н;  $K_{рез} = P_z / P_0$  – коэффициент резания;  $P_0 = \sqrt{P_y^2 + P_x^2}$ ;  $P_z, P_y, P_x$  – тангенциальная, радиальная и осевая составляющие силы резания при сверлении, Н;  $S$  – подача, м/об;  $\Delta t = t_1 - t_2$  – наибольшая разница глубин резания, приходящихся на оба лезвия сверла, м;  $2\varphi$  – двойной угол в плане сверла;  $c$  – жесткость технологической системы, Н/м.

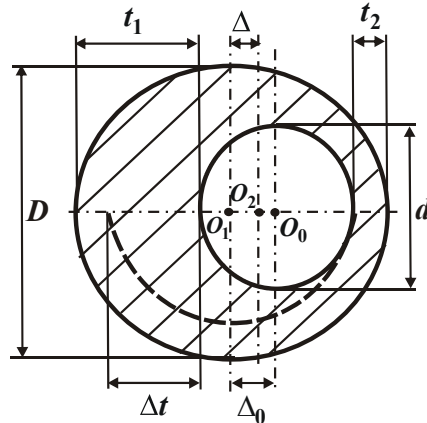


Рисунок 1. – Расчетная схема величины смещения оси обработанного отверстия относительно ее номинального положения  $\Delta$

С учетом:  $t_1 = 0,5 \cdot (D - d) + \Delta_0$ ;  $t_2 = 0,5 \cdot (D - d) - \Delta_0$  имеем  $\Delta t = 2 \cdot \Delta_0$ , где  $D$  – диаметр сверла, м;  $d$  – диаметр рассверливаемого отверстия, м;  $\Delta_0$  – отклонение между осями рассверливаемого отверстия и сверла, м.

При повторном проходе тем же инструментом величину  $\Delta$  обозначают  $\Delta_2$  в зависимости (1). Вместо  $\Delta_0$  рассматривают  $\Delta_1$  в зависимости (1) для первого прохода сверла, т.к.  $\Delta t = t_1 - t_2 = \left(\frac{D}{2} + \Delta_1\right) - \left(\frac{D}{2} - \Delta_1\right) = 2 \cdot \Delta_1$ . Тогда

$$\Delta_2 = \frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta_1}{c \cdot K_{рез}} = \left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{рез}}\right)^2 \cdot \Delta_0. \quad (2)$$

Поскольку  $\left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{рез}}\right) < 1$ , то множитель  $\left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{рез}}\right)^2$  будет еще меньше. Это приведет к уменьшению величины  $\Delta_2$  после второго прохода сверла. При третьем проходе сверла величина  $\Delta_3$  опишется зависимостью (2), рассматривая в ней вместо  $\Delta_1$  величину  $\Delta_2$ . В результате получено:

$$\Delta_3 = \frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta_2}{c \cdot K_{рез}} = \left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{рез}}\right)^3 \cdot \Delta_0. \quad (3)$$

Справедливо неравенство  $\Delta_3 < \Delta_2$ . После  $n$ -го прохода сверла имеем:

$$\Delta_n = \frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta_{n-1}}{c \cdot K_{рез}} = \left( \frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{рез}} \right)^n \cdot \Delta_0, \quad (4)$$

где  $\Delta_{n-1}$  – смещение оси обрабатываемого отверстия относительно ее номинального положения после  $n-1$ -го прохода сверла, м.

Отношение  $\Delta_0 / \Delta_n$  определяет суммарное уточнение [2]:

$$\varepsilon_{сум} = \frac{\Delta_0}{\Delta_n} = \left( \frac{c \cdot K_{рез}}{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} \right)^n. \quad (5)$$

По мере увеличения  $n$  суммарное уточнение  $\varepsilon_{сум}$  увеличивается, а уточнение на каждом проходе сверла  $\varepsilon = \sqrt[n]{\varepsilon_{сум}}$  остается одинаковым:

$$\varepsilon = \frac{c \cdot K_{рез}}{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}. \quad (6)$$

Уточнение  $\varepsilon$  тем больше, чем больше жесткость  $c$ , угол  $\varphi \rightarrow 90^\circ$  и меньше отношение  $\sigma / K_{рез}$  и подача  $S$ . Зависимости (4) и (5) описывают затухающий процесс выхаживания. При  $n \rightarrow \infty$  справедливо условие  $\Delta_n \rightarrow \Delta_{n-1}$ .

Отношение  $\sigma / K_{рез}$  увеличивается по мере увеличения количества проходов сверла  $n$ , что приведет к прекращению съема металла. Чтобы исключить данное явление, необходимо с каждым последующим проходом сверла увеличивать его диаметр. О необходимости применения сверл разного диаметра указывает также тот факт, что уменьшение величины  $\Delta_n$  (с увеличением  $n$  при обработке сверлом одного диаметра) будет приводить к увеличению диаметра отверстия на величину  $\Delta_n$ . С одной стороны, будет уменьшаться величина  $\Delta_n$  с увеличением количества проходов сверла  $n$ , а с другой – увеличиваться диаметр отверстия на величину  $\Delta_n$ , что не позволит устранить начальную погрешность обработки. Поэтому устранить погрешность обработки можно применением сверл разных диаметров. С увеличением количества проходов сверла величина  $\Delta_n \rightarrow 0$  и обеспечивается требуемая точность отверстия.

Из зависимости (4) следует, что величина  $\Delta_n$  определяется количеством проходов сверла  $n$ . В связи с этим определим оптимальное количество проходов сверла  $n$  из условия обеспечения наименьшего основного времени обработки  $\tau$ , которое можно выразить зависимостью:  $\tau = n \cdot L / S$ , где  $L$  – длина обрабатываемого отверстия, м. Подачу  $S$  определим из зависимости (5). Тогда

$$\tau = \frac{2 \cdot n \cdot L \cdot \sigma \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{рез}} \cdot \sqrt[n]{\varepsilon_{сум}} = A \cdot n \cdot \sqrt[n]{\varepsilon_{сум}}, \quad (7)$$

где  $A = \frac{2 \cdot \sigma \cdot L \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{рез}}$ .

Как видно, количество проходов сверла  $n$  неоднозначно влияет на основное время обработки  $\tau$ , т.е. существует экстремум функции  $\tau$  от  $n$ . Для его определения подчиним функцию  $\tau$  необходимому условию экстремума:  $\tau'_n = 0$ .

После соответствующих преобразований получено  $n = \ln \varepsilon_{\text{сум}}$ . Таким образом установлено, что экстремальное количество проходов сверла  $n$  вполне однозначно определяется суммарным уточнением  $\varepsilon_{\text{сум}}$ : чем оно больше, тем больше  $n$ . Установлено, что вторая производная в точке экстремума функции  $\tau$  всегда положительна, т.е. имеет место минимум функции  $\tau$ . Это указывает на то, что количество проходов сверла  $n$ , определяемое зависимостью  $n = \ln \varepsilon_{\text{сум}}$ , является оптимальным, обеспечивающим наименьшее основное время обработки  $\tau_{\text{min}}$ .

Таблица 1. – Расчетные значения суммарного уточнения  $\varepsilon_{\text{сум}}$

$n$	1	2	3	4	5	6
$\varepsilon_{\text{сум}}$	2,72	7,4	20,1	54,7	148,9	405

В табл. 1 приведены расчетные значения суммарного уточнения  $\varepsilon_{\text{сум}}$  для различного количества проходов сверла  $n$ . Нетрудно видеть, что с увеличением  $n$  суммарное уточнение  $\varepsilon_{\text{сум}}$  изменяется в широких пределах. Следовательно, для обеспечения заданного значения  $\varepsilon_{\text{сум}}$ , даже достаточно большого, например, равного 150, необходимо произвести всего 5 проходов сверла. Для обеспечения значений  $\varepsilon_{\text{сум}} = 20 \dots 150$ , которые реально реализуются на практике, достаточно произвести 3–4 прохода сверла, что согласуется с известными экспериментальными данными, а также с опытом применения механической обработки.

Представляя зависимость  $n = \ln \varepsilon_{\text{сум}}$  в виде  $\varepsilon_{\text{сум}} = e^n$ , а  $\varepsilon_{\text{сум}} = \varepsilon^n$ , справедливо условие:  $\varepsilon = e$ . Следовательно, оптимальное значение уточнения на проходе сверла  $\varepsilon$  равно числу  $e \approx 2,72$ . Данное условие можно выполнить на основе установления параметров обработки по зависимости (6), например, путем выбора оптимальной подачи  $S$  для заданных значений  $c$ ,  $\varphi$  и  $\sigma / K_{\text{рез}}$ . Минимальное основное время обработки  $\tau_{\text{min}}$  определяется:

$$\tau_{\text{min}} = \frac{2 \cdot L \cdot \sigma \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{\text{рез}}} \cdot e \cdot \ln \varepsilon_{\text{сум}} \quad (8)$$

В данном случае  $\tau_{\text{min}}$  зависит от суммарного уточнения  $\varepsilon_{\text{сум}}$ : чем оно больше, тем больше  $\tau_{\text{min}}$ . Таким образом, получено общее теоретическое решение определения оптимальных условий по уменьшению погрешностей обработки отверстия при рассверливании. Доказано, что существует оптимальное количество проходов сверла  $n$ , при котором заданную погрешность обработки отверстия  $\Delta_n$  можно достичь за минимальное основное время обработки  $\tau_{\text{min}}$ . Установлено, что в этом случае уточнение на проходе сверла  $\varepsilon$  должно быть равно числу  $e \approx 2,72$ . Это достигается установлением соответствующей подачи  $S$ . На рис. 1 приведены рассчитанные по зависимости (7) графики основного времени обработки  $\tau$  в зависимости от  $n$ . Как видно, основное время обработки  $\tau$ , начиная с  $n=2$  (для  $\varepsilon_{\text{сум}}=100$ ), изменяется несущественно.

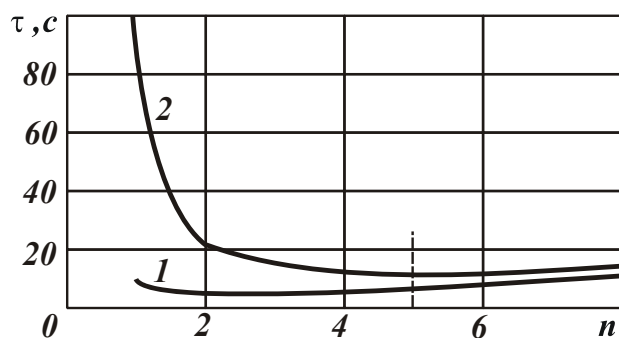


Рисунок 1. – Зависимость  $\tau_{min}$  от  $n$  для разных значений  $\varepsilon_{сум}$ : 1 –  $\varepsilon_{сум} = 10$ ;  
2 –  $\varepsilon_{сум} = 100$  ( $A = 1с$ )

Следовательно, принимая количество проходов сверла  $n$  близким к оптимальному значению, можно достичь приблизительно одинакового результата по основному времени обработки  $\tau$ . Этим, по-видимому, можно объяснить то, что на практике рекомендуется для реализации определеннй диапазон изменения количества проходов инструмента  $n$ , обеспечивающий требуемую точность обработки с учетом достижения наименьшего основного времени обработки  $\tau$ .

На основе приведенных зависимостей определены оптимальные условия обработки отверстия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов И.Е. Технологическое обеспечение точности и стабильности изготовления резьбовых отверстий в баллонах в условиях массового производства: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения» / И.Е. Иванов. – Мариуполь, 2008. – 21 с.

2. Маталин А.А. Технология машиностроения: учебник / А.А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.

*Пермяков А.А., Шелковой А.Н., Клочко А.А.,  
Гасанов М.И., Набока Е.В.*

Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСОВ КРУПНОГАБАРИТНЫХ РЕДУКТОРОВ

Корпусные детали редукторов горнодобывающих машин, рудоразмольных мельниц машин отличает конструктивная сложность и высокие требования к качеству изготовления. Для многих из них характерно наличие нескольких конструкторских баз, соответственно и технологических, и измерительных,

расположенных под различными углами друг к другу, посадочных поверхностей с точностью, например, диаметральных размеров по качеству точности *H5-H6* ГОСТ 25346–89, значительного числа точных геометрических элементов и отверстий, сложно расположенных в пространстве с учетом номинальных размеров, которые служат началом отсчета отклонений и относительно которого определяются предельные размеры. Обозначаются:  $D_n, d_n, L_n, l_n, B_n, b_n$ . Номинальный размер определяют, исходя из функционального назначения корпуса редуктора, в результате расчета деталей на прочность. Действительный размер, установленный измерением с допускаемой погрешностью. Обозначается:  $D_o, d_o, L_o, l_o, B_o, b_o$ . Предельные размеры – два предельно допустимых размера элемента, между которыми находится или которым может быть равен действительный размер годной детали, например межосевое расстояние. Большой из них является наибольшим предельным размером, меньший – наименьшим предельным размером. Обозначают предельные размеры:  $D_{max}, d_{max}, L_{max}, l_{max}, B_{max}, b_{max}$ , наименьшие предельные диаметры:  $D_{min}, d_{min}, L_{min}, l_{min}, B_{min}, b_{min}$ .

Изготовление корпусов крупногабаритных редукторов включает значительное число технологических операций, выполняемых на обрабатывающих центрах (ОЦ) высокой и особо высокой точности с значительными затратами на подготовку производства. Существует актуальная научно-техническая задача сокращения затрат на подготовку производства и в процессе производства при изготовлении корпусных деталей на ОЦ с использованием автоштабелеров и столов спутников, обеспечивающих точностные параметры корпусов крупногабаритных редукторов массой до 50 тн.

Обоснованное построение технологических операций изготовления корпусных деталей на ОЦ учитывает инструментальные переходы, позволяющие обрабатывать несколько различных комплексов поверхностей одним инструментом, что обеспечивает снижение затрат на их выполнение в среднем на 20%.

Технологические возможности современных ОЦ характеризуют: число управляемых координат 5...6; достижимую точность изготовления рстачивания отверстий корпусов крупногабаритных редукторов *IT6, IT5*; достижимая шероховатость основных поверхностей деталей  $R_a 0,16...0,32$  мкм; допуски отклонений формы и взаимного расположения обработанных поверхностей – не более 0,005...0,008 мм; количество инструментов в магазине – до 150; габариты обрабатываемых корпусов до 2000×2500×3200мм.

Эффективность технологических систем на базе ОЦ определяется с учетом точности и качества обрабатываемых крупногабаритных корпусов, производительности обработки, затрат по оснащению оснасткой и инструментом. Существуют методики определения границ эффективного использования ОЦ при достижении требуемой точности в зависимости от номенклатуры изготавливаемых деталей – корпусов. Введено понятие «технологическая сложность детали», которую предложено оценивать количественно с учетом технологической сложности, конструктивной сложности; обрабатываемого материала, вида исходной заготовки, величины снимаемого припуска, технологичности конструкции. Так же известна методика выбора ОЦ на основе алгоритма отработки корпусов на

технологичность (по элементам конструкции корпуса, точности обработки, наличию унифицированных элементов, свойств обрабатываемого материала). Количественно определяется обобщенный критерий технологичности.

Содержание и последовательность выполнения технологических переходов определяют действительную точность при обработке корпусов. Стабильное обеспечение качества прецизионных позволяет принципиально изменить построение процессов изготовления корпусных деталей и изготавливать такие поверхности за один установ заготовки, исключив ряд возможных технологических операций чистовой и окончательной обработки. Такой подход повышает концентрацию технологических переходов в операциях, выполняемых на ОЦ и позволяет за счет использования сложных переходов снизить затраты на инструмент, а также повысить точность взаимного расположения обработанных поверхностей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пермяков А.А. Анализ погрешностей технологических процессов обработки отверстий с перекрещивающимися и пересекающимися осями корпусных деталях тяжелых токарных станков / А.А. Пермяков, А.А. Клочко, М.И. Гасанов // Обладнання і технології сучасного машинобудування: матеріали Всеукраїнської науково практичної конференції, Україна, м. Тернопіль, 11-12 травня 2017 – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. – С. 188.

2. Степанов М.С. Многокритериальная регламентация параметров поверхностного слоя деталей / М.С. Степанов, А.А. Клочко, А.Н. Кравцов // Физические и компьютерные технологии: труды 21-й Международной научно-практической конференции, 24-25 декабря 2015, г. Харьков. – Д.: Лира, 2015. – С. 68-76.

*Полянский В.И.*

ООО «Империя металлов», Харьков, Украина

## УТОЧНЕННЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

Параметры качества и точности обрабатываемых поверхностей при резании обусловлены силовым и температурным факторами. Однако до настоящего времени в научно-технической литературе отсутствуют достаточно точные зависимости для расчета параметров силовой напряженности процесса резания. Так, расчет по формуле профессора Зворыкина К.А. условного угла сдвига материала  $\beta = 45^{\circ} + (\gamma - \psi) / 2$  приводит к его повышенным значениям по отношению к экспериментальным данным, где  $\gamma$  – передний угол резца;  $\psi$  – условный угол трения передней поверхности резца с образующейся стружкой

( $\operatorname{tg} \psi = f$  – коэффициент трения). Следовательно, и расчет силы и температуры резания на основе этой формулы, также приводит к определенным погрешностям. В связи с этим в работе предложен уточненный расчет параметров силовой напряженности процесса резания с учетом действия на передней поверхности резца (вместо традиционно рассматриваемой сосредоточенной силы) распределенной нагрузки интенсивностью  $q = \sqrt{q_z^2 + q_y^2}$ , где  $q_z$ ,  $q_y$  – составляющие распределенной нагрузки в горизонтальном и вертикальном направлениях,  $q_y / q_z = \operatorname{tg} \psi = f$  (рис. 1).

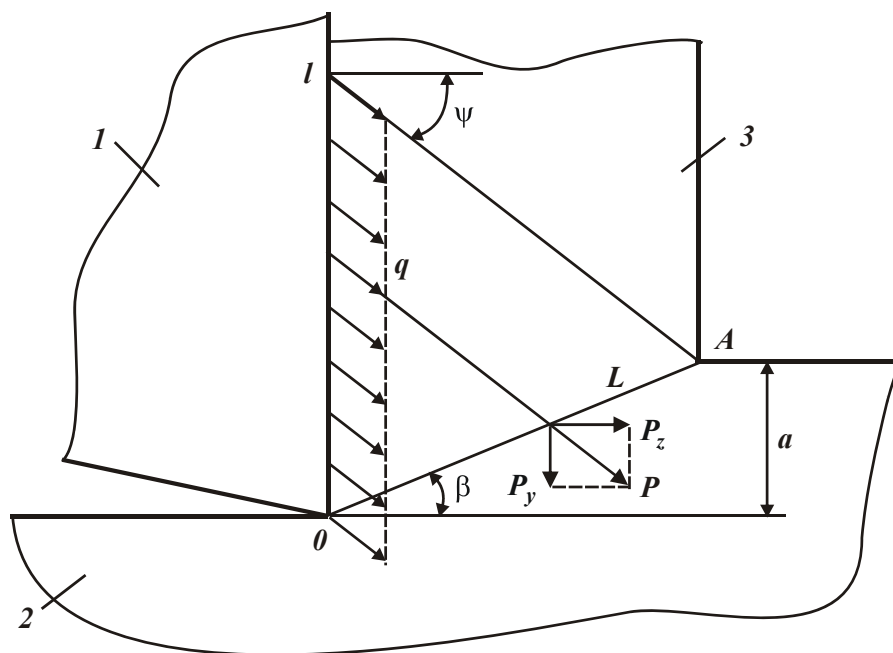


Рисунок 1. – Расчетная схема параметров силовой напряженности процесса резания: 1 – резец; 2 – обрабатываемый материал; 3 – образующая стружка

Проецируя суммарную силу резания  $P = q \cdot v \cdot l$  на условную плоскость сдвига обрабатываемого материала ОА длиной  $L = a / \sin \beta$ , расположенной под углом  $\beta$ , для условия  $\gamma = 0$  определено касательное напряжение

$$\tau = \frac{P \cdot \cos(\beta + \psi)}{v \cdot L} = q \cdot \left( 1 + \frac{\operatorname{tg} \psi}{\operatorname{tg} \beta} \right) \cdot \cos(\beta + \psi) \cdot \sin \beta = \frac{q}{2} \cdot \frac{\sin 2(\beta + \psi)}{\cos \psi}, \quad (1)$$

где  $a$ ,  $v$  – толщина и ширина среза, м;  $l = a + a \cdot \frac{\operatorname{tg} \psi}{\operatorname{tg} \beta}$  – длина контакта образующейся стружки с передней поверхностью резца, м.

Из зависимости (1) видно, что имеет место экстремум функции  $\tau$  от угла  $\beta$ . Максимальное значение функции  $\tau = \tau_{\text{сдв}}$  достигается при условии  $\sin 2(\beta + \psi) = 1$  (где  $\tau_{\text{сдв}}$  – предел прочности на сдвиг обрабатываемого материала,  $\text{Нм}^2$ ), тогда экстремальное значение условного угла сдвига материала  $\beta = 45^\circ - \psi$ . Угол между вектором силы резания  $P$  и условной плоскостью сдвига обрабатываемого материала ОА равен  $\beta + \psi = 45^\circ$ , что соответствует

теории сопротивления материалов и отражает закономерности разрушения материала от действия механической нагрузки.

Полученная зависимость отличается от формулы профессора Зворыкина К.А., которая при переднем угле резца  $\gamma = 0$  принимает вид  $\beta = 45^\circ - \psi / 2$ . Следовательно, полученная зависимость  $\beta = 45^\circ - \psi$  позволяет получить меньшие значения угла  $\beta$ , что лучше согласуется с экспериментальными данными и приводит в соответствие теорию и практику процесса резания. При этом отношение  $l/a$  тем больше, чем больше отношение  $tg\psi / tg\beta$ . Для  $\psi = 0^\circ; 22,5^\circ; 35^\circ; 40^\circ$  соответственно отношение  $l/a = 1; 2; 5; 9,6$ .

Используя полученную зависимость, определены сила резания  $P$ , тангенциальная  $P_z$  и радиальная  $P_y$  составляющие силы резания и условное напряжение резания (энергоёмкость обработки)  $\sigma = P_z / a \cdot v$ :

$$P = \frac{\sigma_{сж} \cdot a \cdot v}{\cos\psi \cdot (1 - tg\psi)}; P_z = \frac{\sigma_{сж} \cdot a \cdot v}{(1 - tg\psi)} = \frac{\sigma_{сж} \cdot a \cdot v}{(1 - f)}; P_y = \frac{\sigma_{сж} \cdot a \cdot v}{\left(\frac{1}{f} - 1\right)}; \sigma = \frac{\sigma_{сж}}{(1 - f)},$$

где  $\sigma_{сж} = 2\tau_{сдв}$  – предел прочности на сжатие материала,  $\text{Нм}^2$ .

Как видно, основным условием уменьшения параметров силовой напряженности процесса резания является уменьшение коэффициента трения  $f$ . При условии  $\psi = 0$  или  $f = 0$  параметры  $P$ ,  $P_z$ ,  $P_y$  и  $\sigma$  принимают наименьшие значения, а при условии  $\psi \rightarrow 45^\circ$  или  $f \rightarrow 1$  – бесконечные значения. При условии  $f = 0$  условное напряжение резания  $\sigma = \sigma_{сж}$ , что соответствует условию разрушения прямолинейного бруса при его одноосном сжатии.

С учетом положительного переднего угла резца  $\gamma > 0$  в приведенных зависимостях для определения параметров силовой напряженности процесса резания  $\beta$ ,  $P$ ,  $P_z$ ,  $P_y$  и  $\sigma$ , исходя из рис. 1, вместо угла  $\psi$  необходимо рассматривать угол  $(\psi - \gamma)$ :

$$\beta = 45^\circ - (\psi - \gamma); P = \frac{\sigma_{сж} \cdot a \cdot v}{\cos(\psi - \gamma) \cdot [1 - tg(\psi - \gamma)]};$$

$$P_z = \frac{\sigma_{сж} \cdot a \cdot v}{[1 - tg(\psi - \gamma)]}; P_y = \frac{\sigma_{сж} \cdot a \cdot v}{[ctg(\psi - \gamma) - 1]}; \sigma = \frac{\sigma_{сж}}{[1 - tg(\psi - \gamma)]}.$$

Поэтому с увеличением переднего угла резца  $\gamma$  условный угол сдвига материала  $\beta$  увеличивается, а значения параметров  $P$ ,  $P_z$ ,  $P_y$  и  $\sigma$ , наоборот, уменьшаются, что способствует снижению силовой напряженности процесса резания. При условии  $(\psi - \gamma) = 0$  параметры  $P$ ,  $P_z$ ,  $P_y$  и  $\sigma$  принимают наименьшие значения, а при условии  $(\psi - \gamma) \rightarrow 45^\circ$  – наибольшие значения. Следовательно, эффективно использовать лезвийные твердосплавные инструменты с износостойкими покрытиями, характеризующимися минимальными значениями коэффициента трения с обрабатываемым материалом, например, режущие инструменты с алмазными покрытиями его рабочих поверхностей.



С учетом отрицательного переднего угла резца  $\gamma < 0$  (что характерно для абразивной обработки) в приведенных зависимостях для определения параметров  $\beta$ ,  $P$ ,  $P_z$ ,  $P_y$  и  $\sigma$ , исходя из рис. 1, вместо угла  $\psi$  необходимо рассматривать угол  $(\psi + \gamma)$ :

$$\beta = 45^\circ - (\psi + \gamma); \quad P = \frac{\sigma_{сж} \cdot a \cdot v}{\cos(\psi + \gamma) \cdot [1 - \operatorname{tg}(\psi + \gamma)]};$$

$$P_z = \frac{\sigma_{сж} \cdot a \cdot v}{[1 - \operatorname{tg}(\psi + \gamma)]}; \quad P_y = \frac{\sigma_{сж} \cdot a \cdot v}{[\operatorname{ctg}(\psi + \gamma) - 1]}; \quad \sigma = \frac{\sigma_{сж}}{[1 - \operatorname{tg}(\psi + \gamma)]}.$$

С увеличением отрицательного переднего угла резца  $\gamma$  условный угол сдвига материала  $\beta$  уменьшается, а значения параметров  $P$ ,  $P_z$ ,  $P_y$  и  $\sigma$  увеличиваются, что приводит к повышению силовой напряженности процесса резания. При условии  $(\psi + \gamma) \rightarrow 45^\circ$  параметры  $P$ ,  $P_z$ ,  $P_y$  и  $\sigma$  принимают наибольшие (бесконечные) значения. Поэтому следует уменьшать угол  $\gamma \rightarrow 0$ , например, при шлифовании за счет применения эффективных методов правки шлифовальных кругов, обеспечивающих удаление с рабочей поверхности круга затупившихся абразивных зерен и вскрытие новых неизношенных зерен. Добиться существенного уменьшения угла  $\gamma$  можно путем использования кругов из синтетических сверхтвердых материалов, которые обладают высокой твердостью и остротой режущих кромок зерен и обеспечивают за счет этого снижение силы и температуры резания, повышение качества, точности и производительности обработки, особенно материалов с повышенными физико-механическими свойствами. Синтетические сверхтвердые материалы характеризуются наименьшим коэффициентом трения, что способствует снижению силовой напряженности процесса шлифования. Результаты исследований использованы при разработке эффективных технологий механической обработки.

*Рябенков И.А.*

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства имени Петра Василенко, г. Харьков, Украина

## **ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ**

Вопросы повышения качества обработки высокоточных деталей машин на операциях шлифования требуют проведения дальнейших исследований температуры резания. В связи с этим в работе предложены новые упрощенные подходы к расчету температуры резания с учетом отвода тепла из зоны резания в поверхностный слой обрабатываемой детали ( $W_1$ ) и нагревания стружек ( $W_2$ ).

Первоначально рассмотрен случай плоского шлифования, когда плотность теплового потока не изменяется по глубине поверхностного слоя обрабатываемой детали. При этом максимальная температура резания определяется:

$$\theta_{\max} = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\left(1 + 0,84 \cdot \sqrt{\frac{a}{t \cdot V_{\text{дем}}}} \cdot \sqrt{\frac{R_{\text{кр}}}{t}}\right)}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – условное напряжение резания, Н/м<sup>2</sup>;  $c$  – удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К);  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $a = \lambda / (c \cdot \rho)$  – коэффициентом температуропроводности обрабатываемого материала, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала, Вт/м·К;  $R_{\text{кр}}$  – радиус шлифовального круга, м;  $t$  – глубина шлифования, м;  $V_{\text{дем}}$  – скорость детали, м/с.

Если бы все образующееся при шлифовании тепло уходило в стружки, т.е.  $W_1=0$ , то зависимость для определения  $\theta_{\max}$  приняла бы вид  $\theta_{\max} = \sigma / c \cdot \rho$ . Следовательно, первый множитель зависимости (1), равный  $\sigma / c \cdot \rho$ , определяет температуру нагрева образующихся стружек, а второй множитель – долю тепла, уходящего в обрабатываемую деталь. Это вытекает также из условия, что если бы все образующееся при шлифовании тепло уходило в обрабатываемую деталь, т.е.  $W_2=0$ , то зависимость для определения  $\theta_{\max}$  приняла бы вид

$$\theta_{\max} = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \sqrt{\frac{V_{\text{дем}} \cdot t}{a}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot t}{R_{\text{кр}}}}, \text{ который соответствует зависимости (1) без учета}$$

первого слагаемого в знаменателе, равного 1 и обусловленного теплом, уходящим в образующиеся стружки.

Для исходных данных:  $R_{\text{кр}}=0,15$  м;  $V_{\text{дем}}=1$  м/с;  $t=0,01 \cdot 10^{-3}$  м; удельная производительность обработки  $Q_{\text{уд}}=V_{\text{дем}} \cdot t=600$  мм<sup>2</sup>/мин =  $10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с;  $a=8,4 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с (шлифование стали ШХ15) второй множитель зависимости (1) принимает небольшое значение, равное 0,105. Поэтому наличие второго множителя в зависимости (1) позволяет уменьшить значения  $\theta_{\max}$ , что приводит в соответствие теорию и практику шлифования. Следовательно, основная часть образующегося при многопроходном шлифовании тепла, уходит в обрабатываемую деталь, а в образующиеся стружки уходит небольшая часть тепла. В данном случае 89,5 % тепла уходит в обрабатываемую деталь, а 10,5 % – в образующиеся стружки.

В случае плоского шлифования, когда плотность теплового потока по глубине поверхностного слоя обрабатываемой детали уменьшается по линейному закону, максимальная температура резания при шлифовании определяется:

$$\theta_{\max} = \frac{\sigma}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{\left(1 + 0,97 \cdot \sqrt{\frac{a}{t \cdot V_{\text{дем}}}} \cdot \sqrt{\frac{R_{\text{кр}}}{t}}\right)}. \quad (2)$$

Отличие значений температуры резания при шлифовании, рассчитанных по зависимостям (1) и (2) не превышает 13 %. Это указывает на то, что характер изменения плотности теплового потока вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали мало влияет на характер изменения температуры вглубь поверхностного слоя обрабатываемой детали и ее абсолютные значения. Поэтому при расчете температуры резания можно использовать обе зависимости.

С учетом доли тепла, уходящего в образующиеся стружки, расхождение значений температур резания, рассчитанных по двум зависимостям, будет небольшим – в пределах 10 %, что вполне приемлемо для практических расчетов. Вместе с тем, отличие значений глубины  $l_2$  проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали для двух случаев будет больше. Поэтому важно экспериментально оценить достоверность полученных теоретических решений на основе использования приведенных в научно-технической литературе экспериментальных значений  $l_2$ . На рис. 1 [1] показан характер изменения температуры по глубине поверхностного слоя обрабатываемой детали, изготовленной из сплава ЖС6К, при плоском шлифовании для следующих условий обработки:  $a=3,73 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $V_{\text{дем}}=0,1 \text{ м/с}$ ;  $R_{\text{кр}}=0,3 \text{ м}$ .

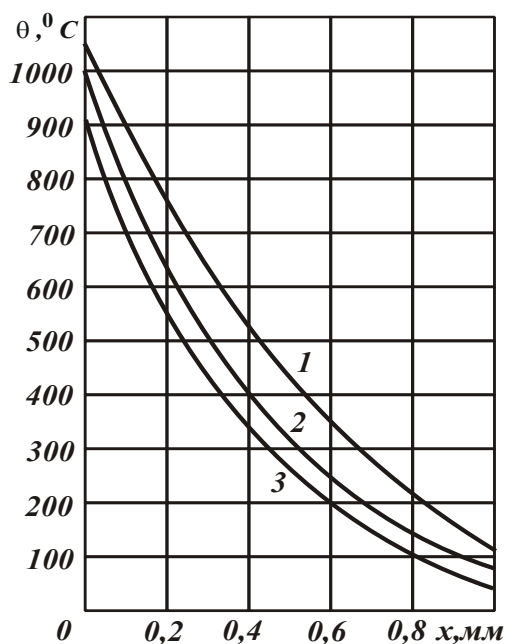


Рисунок 1. – Кривые распределения температуры по сечению тела в зависимости от глубины шлифования сплава ЖС6К: 1 –  $t=0,03 \text{ мм}$ ; 2 –  $t=0,02 \text{ мм}$ ; 3 –  $t=0,01 \text{ мм}$  ( $V_{\text{дем}}=0,1 \text{ м/с}$ ) [1].

Параметр  $l_2$  для 2 случаев определяется аналитическими зависимостями:

$$l_2 = 1,414 \cdot \sqrt{a \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{2 \cdot R_{\text{кр}} \cdot t}}{V_{\text{дем}}}}; \quad (3)$$

$$l_2 = 2,45 \cdot \sqrt{a \cdot \frac{2 \cdot \sqrt{2 \cdot R_{\text{кр}} \cdot t}}{V_{\text{дем}}}}. \quad (4)$$

В табл. 1 и в табл. 2 приведены рассчитанные по зависимостям (3) и (4) значения  $l_2$  для разных глубин шлифования  $t$ . Значения  $l_2$  (табл. 2) незначительно отличаются от экспериментальных значений (рис. 1 [1]) – в пределах 10-15 %, т.е. можно использовать зависимость (4) для расчета  $l_2$  и зависимости (2) и (1) для расчета максимальной температуры при шлифовании.

Исходя из зависимости (2), основным условием уменьшения температуры резания при шлифовании  $\theta_{\max}$  следует рассматривать уменьшение условного напряжения резания  $\sigma$ , которое оказывает наибольшее влияние на  $\theta_{\max}$ .

Таблица 1. – Расчетные значения параметра  $l_2$

$t$ , мм	0,01	0,02	0,03
$l_2$ , мм	0,606	0,721	0,798

Таблица 2. – Расчетные значения параметра  $l_2$

$t$ , мм	0,01	0,02	0,03
$l_2$ , мм	1,05	1,25	1,382

При заданной удельной производительности обработки  $Q_{y\partial} = V_{\partial em} \cdot t$ , согласно зависимости (2), уменьшить температуру резания при шлифовании  $\theta_{\max}$  можно уменьшением глубины шлифования  $t$ , т.е. применением многопроходного шлифования, что свидетельствует о достоверности полученной зависимости (2). Полученные результаты использованы при создании и внедрении в производство эффективных технологий шлифования на финишных операциях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ящерицын П.И. Тепловые явления при шлифовании и свойства обработанных поверхностей / П.И. Ящерицын, А.К. Цокур, М.Л. Еременко. – Минск: Наука и техника, 1973. – 184 с.

*Савченко Н. Ф.*

Харьковский национальный экономический университет  
имени Семена Кузнеця, Харьков, Украина

## ТЕХНОЛОГИЯ ПЛАСТИНИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КОРРОЗИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ИЗДЕЛИЙ

Известно несколько способов защиты от коррозии внутренней поверхности изделий, в том числе при их восстановлении. Наиболее часто применяются следующие способы: металлизация, гальванические способы, запрессовка коррозионно-износостойких пластин, наплавка на внутреннюю поверхность по-

рошков, восстановление нагревом и т.д. Основными характерными недостатками приведенных выше способов являются:

- металлизация – низкая адгезионная прочность, использование дорогих материалов, сложность и высокий уровень шума;
- осталивание – низкая износостойкость, сложность механической обработки, высокая трудоемкость;
- хромирование – низкая производительность, высокая стоимость процесса, недостаточная смачиваемость и прирабатываемость поверхности;
- центробежное напекание – значительные деформации, высокая стоимость материалов, сложность механической обработки.

Для устранения недостатков существующего технологического процесса (длительность работ в случае выхода из строя дефицитных изделий, сложность их замены) предлагается использование для коррозионной стойкости или при восстановлении изделий метод пластинирования или футеровки [1, 2], особенность которого – использование специальной формы пластин или обечаек, плотно (с натягом) прижатых к основной детали.

В соответствии со способом, описанным в работе [2], внутренняя поверхность детали футеруется обечайкой. При использовании предложенного способа (А.С. №1453712) в полости детали 1 размещают тонкостенную обечайку 2, периметр которой выбирают из условий создания плотного контакта соприкасающихся поверхностей обечайки и внутренней поверхности детали. Для этого при создании распирающих усилий для прижатия обечайки к стенкам поверхности используется одно или несколько специальных технологических устройств (для фиксации положения обечайки в процессе ее деформирования и закрепления кромок). Состав операций предлагаемого технологического процесса (типового):

- 000 – Слесарная (разборка конструкции).
- 010 – Токарная (при необходимости).
- 015 – Изготовление обечайки для пластинирования.
- 020 – Пластинирование (футеровка).
- 025 – Технический контроль.
- 025 – Токарная (или тонкое шлифование).

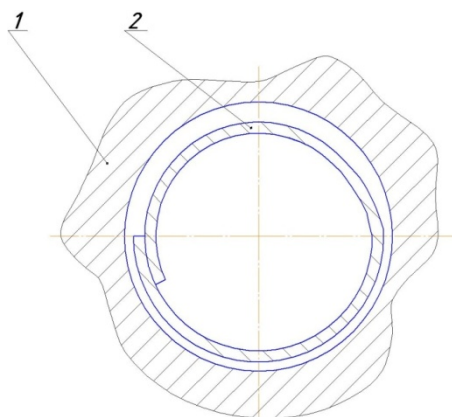


Рисунок 1. – Схема пластинирования (футеровки)

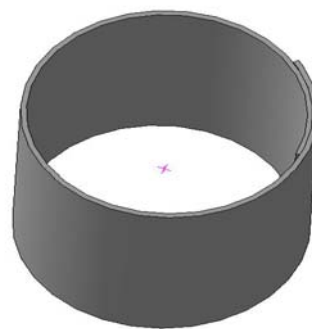


Рисунок 2. – 3D-модель заготовки (обечайки)

Величина натяга обеспечивается искусственным увеличением периметра обечайки на величину, большую (в пределах упругости) величины периметра внутреннего отверстия детали. В соответствии с особенностями технологии (как ее преимущество) возможен широкий выбор вариантов выполнения заготовки. Количество вариантов определяется ассортиментом имеющихся в распоряжении марок сталей и цветных сплавов и выбираемых для тонкостенной обечайки по конструктивным и технологическим соображениям (минимальное количество доработок конструкции, надежность и безопасность, коррозионная стойкость).

В качестве материала обечайки наиболее предпочтительно использование нержавеющей сталей (например, 12Х18Н10Т), а также алюминиевых сплавов (например, Амц, Амг2 и др.), которые имеют высокие коррозионные свойства и малый разброс по толщине (разнотолщинность менее 5 %), высокое качество поверхности (шероховатость  $Ra$  менее 5), что во многих случаях позволяет исключить необходимость последующей обработки внутренней поверхности детали. При выборе размеров толщины листа  $t$  можно воспользоваться зависимостью:  $t - \delta_t = \Delta + \delta_n$ , где  $\delta_t$  – допуск по толщине листа (отрицательный, не более 5 % от толщины листа);  $\Delta$  – разность между диаметрами детали и обечайки;  $\delta_n$  – величина, выбираемая для обеспечения требуемой величины натяга; по условиям эксплуатации величина натяга должна находиться в пределах 5 – 10 МПа, а  $\delta_n$  – в пределах  $(0,5 - 1,0) \cdot \delta_t$ , для  $\Delta = 1$  мм принимаем, что  $\delta_n = \delta_t = 0,05$  мм.

В этом случае толщина листа составит:  $t = \Delta + 2 \delta_n = 1 + 0,1 = 1,1$  мм.

Длина листовой заготовки больше периметра отверстия детали на величину упругой деформации и составит:  $L = 2 \pi R (1 + \delta_y)$ , где  $R$  – радиус отверстия детали;  $\delta_y$  – величина упругой деформации, задается с учетом создания требуемой величины натяга и устойчивости тонкостенной обечайки при ее упругом сжатии в процессе пластинирования (футеровки), ее значение:  $\delta_y \leq \frac{\sigma}{E}$ ,

здесь  $\sigma$  – допустимое по соображениям потери устойчивости напряжение в тонкостенной обечайке, для стали 12Х18Н10Т  $\sigma \leq 35$  МПа, а  $E$  – модуль упругости, для стали  $= 2 \cdot 10^5$  МПа. Тогда длина вырезаемой полосы составит:  $L = 2 \pi R (1 + \delta_y)$ . Таким образом, определены основные размеры заготовки, необходимые для пластинирования детали.

Для определения величины натяга можно использовать формулу Лапласа для тонкостенного сосуда цилиндрической формы. Откуда получено, что величина натяга  $q$  равна:  $q = \frac{Et\delta}{R}$ , т.е. прямо пропорционально зависит от толщины

материала обечайки  $t$  и величины упругой деформации  $\delta$  и обратно пропорциональна размерам (радиусу  $R$ ) отверстия детали.

Благодаря возможности в более широких пределах по сравнению с замкнутыми оболочками осуществлять выбор обечаек для пластинирования (по толщине и материалу), могут быть обеспечены более широкие диапазоны и значения натягов между стенками обечайки и ремонтируемого изделия. Например, при использовании в качестве обечайки алюминиевой полосы из Амц–л2,

величина натяга может составить значение 5 – 10 МПа. Перспективно также и использование неметаллических материалов [4].

Таким образом, можно считать, что определены наиболее важные технологические параметры процесса, которые подтверждают осуществимость восстановления работоспособности ответственных конструкций и узлов дорогостоящего оборудования. Однако в последнее время в развитии технологии финишной обработки деталей наметились три перспективных направления: усовершенствование чистовых процессов резания лезвийным и абразивным инструментом; замена резания процессами тонкого пластического деформирования; замена резания химическими, электрохимическими процессами и обработка в магнитном поле ферромагнитными порошками. Наиболее перспективным с точки зрения технико-экономических показателей является второе направление, которое значительно превосходит по многим показателям абразивные и другие виды чистовой обработки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Соболев Н.И. Пластинирование деталей машин / Н.И. Соболев, Б.А. Титунин. – Л.: Машиностроение, 1987. – 224 с.
2. Савченко Н.Ф. Способ импульсной футеровки сосудов / Н.Ф. Савченко, В.Т. Абрамов и др. – А.С. №1453712, В21Д 26/06, 08.12.86.
3. Намаконов Б.В. Металлоплакирующая обкатка – технология, повышающая ресурс изделия / Б.В. Намаконов, Н.В. Зоренко // Автомобильная промышленность. – 2000. – №4. – С. 32-33.
4. Применение современных материалов для изготовления и ремонта деталей машин / Н.Р. Шоль, В.Д. Люосев, Л.Я. Иконникова, В.Ю. Прохоров. – Ухта: УГТУ, 2004. – 251 с.

*Самотугин С.С., Христенко О.А.*

ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет»,  
Мариуполь, Украина

### ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННОГО ПЛАЗМЕННОГО НАГРЕВА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РЕЗЬБОНАРЕЗНОГО ИНСТРУМЕНТА

Известно применение традиционных методов поверхностного упрочнения для повышения работоспособности резьбонарезного инструмента: дробеструйная обработка [1] и нанесение покрытий на резьбообразующий инструмент [2, 3]. Наиболее перспективным для упрочнения такого инструмента можно считать обработку высококонцентрированными источниками нагрева: лазер-

ным лучом [4] и плазменной струей [5]. При этом плазменная обработка имеет ряд технико-экономических преимуществ [5]:

1) возможность получения на поверхности изделия упрочненного слоя глубиной до 5 мм при однократной или многократной обработке, как без оплавления поверхности, так и с оплавлением, что значительно превосходит такие способы, как лазерное и электронно-лучевое упрочнение, химико-термическую обработку, осаждение покрытий вакуумным или ионными методами;

2) возможность получения в упрочненном слое скорости охлаждения порядка  $10^{05} \text{C/s}$  и высокодисперсных закалочных структур с твердостью до HV 1100 на сталях и чугунах до HV 1700 на спеченных твердых сплавах, что находится на уровне, достигаемом при лазерном и электронно-лучевом упрочнении и значительно превосходит такие способы, как закалку ТВЧ, газопламенную и объемную печную закалку, цементацию;

3) повышение износостойкости упрочненных материалов в 1,5...5 раз в зависимости от их химического состава, условий трения и технологии обработки;

4) возможность использования в комплексе с объемной термической обработкой (закалкой, отпуском) или восстановительной наплавкой при практически любом сочетании операций;

5) возможность регулирования в широких пределах трещиностойкости упрочненных изделий при различных технологических вариантах упрочнения, а также при использовании совместно с предварительной наплавкой или объемной термической обработкой;

6) возможность локального упрочнения наиболее изнашиваемых участков рабочей поверхности изделия;

7) сохранение требуемой шероховатости рабочей поверхности при упрочнении без оплавления, что допускает применение плазменной обработки в качестве финишной операции; возможность создания определенного поверхностного рельефа при упрочнении с оплавлением;

8) высокие экономические показатели благодаря низкой стоимости, простоте и доступности оборудования, высокой производительности процесса;

9) возможность замены дорогостоящих инструментальных материалов (в особенности наплавочных) на менее легированные и дефицитные.

Выбор оптимальных режимов плазменной обработки резьбонарезного инструмента конкретных типов выполняется с использованием математических моделей на основании решения уравнения теплопроводности в нелинейной постановке с использованием метода конечных элементов [6]. На рис. 1 в качестве примера показан характер распределения тепловых полей при плазменной обработке резьбонарезной гребенки.

В заключении следует отметить, что задачей плазменной обработки резьбонарезного инструмента является не только повышение твердости и износостойкости режущих элементов, но и получение благоприятных значений других характеристик (см. выше факторы, определяющие стойкость инструмента [1]) – шероховатости поверхности, остаточных напряжений и т.д.



В этой связи целесообразно использовать термин «поверхностное модифицирование» взамен термина «поверхностное упрочнение».

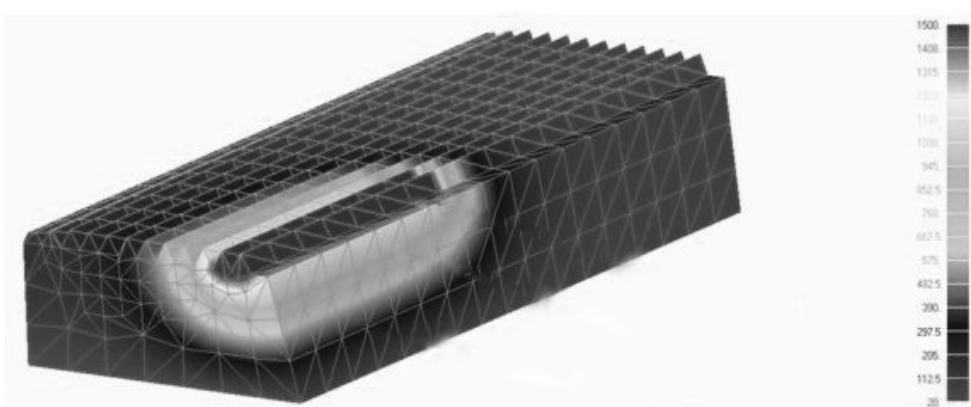


Рисунок 1. – Распределение температуры плазменного нагрева по глубине упрочненной зоны

#### **Выводы.**

1. Выполнен анализ условий эксплуатации и причин выхода из строя резбонарезного инструмента. Показана перспективность использования поверхностной обработки высококонцентрированной плазменной струей.

2. Разработаны оптимальные технологические схемы плазменного модифицирования основных типов резбонарезного инструмента – резцов, метчиков, гребенок. Толщина модифицированного слоя в общем случае должна превышать критерий износа по задней поверхности  $L \geq h_{3\max}$ .

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Кургузов С.А. Исследование влияния дробеструйной обработки резбообразующего инструмента / С.А. Кургузов, Т.Ш. Галиахметов // Известия Тульского государственного университета: Серия «Инструментальные и технологические системы». – 2006. – Вып. 2. – С. 157-161.

2. Геранюшкин А.В. Особенности эксплуатации твердосплавных резбонарезных пластин и методы повышения их надежности / А.В. Геранюшкин // Мир техники и технологий. – 2008. – №2. – С. 34-35.

3. Табаков В.П. Разработка многослойных покрытий для токарных резбовых резцов / В.П. Табаков, Д.И. Сагитов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – №5. – С. 42-47.

4. Справочник по технологии лазерной обработки / В.С. Коваленко, В.П. Котляров, В.П. Дятел, Л.Ф. Головкин, В.В. Романенко. – К.: Техника, 1985. – 167 с.

5. Самотугин С.С. Плазменное упрочнение инструментальных материалов / С.С. Самотугин, Л.К. Лещинский. – Донецк: Новый мир, 2003. – 338 с.

6. Самотугин С.С. Математическая модель процесса поверхностного плазменного упрочнения резбообразующей гребенки / С.С. Самотугин, В.А. Мазур, О.А. Христенко // Захист металургійних машин від поломок. – Мариуполь, 2014. – Вип. 16. – С. 14-18.

## **ВЛИЯНИЕ МЕХАНОАКТИВАЦИИ И ЛЕГИРОВАНИЯ УГЛЕРОДОМ ГЕКСАГОНАЛЬНОГО НИТРИДА БОРА НА СТРУКТУРУ СПЕЧЕННОГО НА ЕГО ОСНОВЕ МАТЕРИАЛА**

Известно, что эффективным способом, позволяющим снизить технологические параметры синтеза сверхтвердых материалов на основе нитрида бора (BN) с высокодисперсной структурой и повысить свойства получаемых материалов, является применение механической активации исходного порошка гексагонального BN (hBN) [1]. Экспериментальные исследования [2, 3] показали значительное воздействие сдвиговых деформаций на структурные и фазовые превращения в процессе синтеза плотных модификаций нитрида бора. Они приводят, в частности, к существенному уменьшению давления фазовых превращений, в том числе без применения катализаторов синтеза. В то же время известно, что легирование hBN углеродом приводит к формированию в системе B-N-C твердого раствора, на основе которого в условиях высоких давлений и температур был получен сверхтвердый карбонитрид бора, превосходящий по твердости кубический BN (cBN) [4]. Поэтому разработка технологий получения материалов на основе BN с использованием механоактивированного hBN, легированного углеродом, является важной практической задачей.

В работе изучалось влияние атриторной механоактивации и легирования (модифицирования) углеродом hBN на структуру и фазовый состав материала, спеченного в аппарате высокого давления (АВД). В качестве исходного материала в исследованиях использовался технический микропорошок hBN производства Запорожского абразивного комбината.

Механоактивацию порошка hBN осуществляли в атриторе вертикального типа при соотношении массы размольных тел к массе порошка 50:1 со скоростью вращения импеллера 500 об/мин в течение 30 мин. Термобарическую обработку порошка выполняли в аппарате высокого давления (АВД) "наковальня с лункой" при давлениях до 4,5 ГПа в диапазоне температур 1000 – 1600 °С [1]. Легирование (модифицирование) hBN углеродом проводили методом химико-термической обработки порошка в восстановительной атмосфере, содержащей CO<sub>2</sub>, при температуре 900 °С. Легирование порошка hBN осуществляли как до, так и после механоактивации. Структурные исследования полученных материалов проводили на сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения "Mira" фирмы "Tescan" (Чехия). Рентгеноструктурные исследования выполняли на дифрактометре общего назначения ADVANCE 8 фирмы BRUCKER в CuK<sub>α</sub>-монохроматизированном излучении. Удельную поверхность порошков измеряли по теории БЭТ методом сорбции азота на приборе «Аку-сорб-2100D».

В результате легирования и механоактивации порошка hBN образуются конгломераты (гранулы) на основе частиц BN размерами до 5 мкм, рис. 1. Структура полученных гранул порошка позволяет предположить, что в процессе механоактивации происходит взаимодействие углерода с частицами нитрида бора с образованием субмикронных частиц BN, соединенных между собой в гранулы пленкой аморфного углерода. Отдельные частицы размерами от 250 до 500 нм и толщиной около 100 нм имеют пластинчатую форму с четко выраженными скругленными гранями.

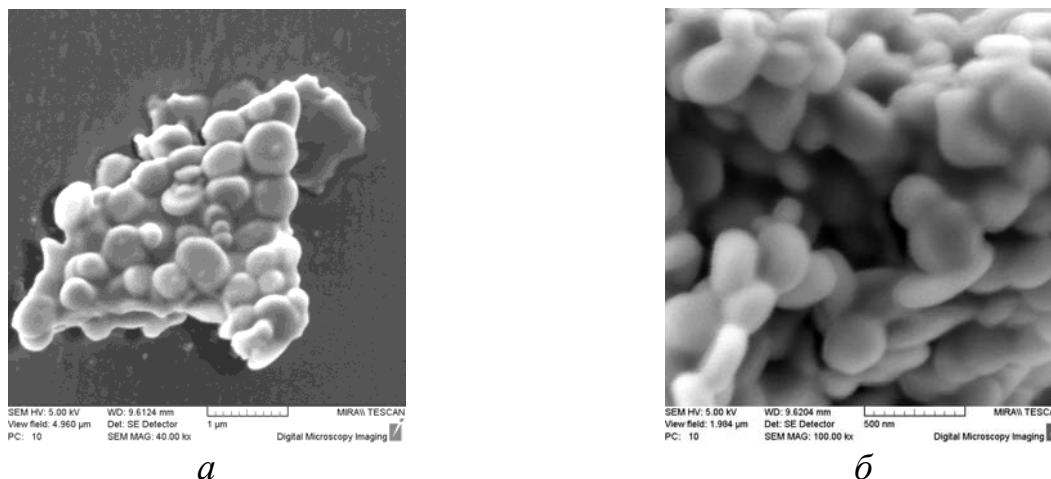


Рисунок 1. – Морфология образца hBN после легирования углеродом и механоактивации: а)  $\times 40\ 000$ ; б)  $\times 100\ 000$

Полученные гранулы из порошка hBN+C спекали при высоких давлениях и температурах. В результате спекания в условиях высоких статических давлений 2,5–4,0 ГПа в диапазоне 1000–1300 °С при изотермической выдержке 15 с получен компактный материал на основе плотноупакованных конгломератов частиц, в котором практически сохранены размеры и морфология частиц hBN+C, сформированных после механоактивации, рис. 2, а. По данным рентгеноструктурного анализа, спеченный материал представлен в основном гексагональной фазой BN. При дальнейшем росте температуры спекания при давлениях до 4 ГПа на рентгенограммах фиксируется возрастание интенсивности рефлекса (002) hBN.

На втором этапе работ легировали углеродом предварительно механоактивированный порошок hBN. После механоактивации был получен наноструктурный порошок BN на основе агрегатов размерами 0,5–2 мкм, состоящих из отдельных частиц полиэдрической формы с размерами от 50 до 200 нм [5]. Порошок обрабатывали в расплаве NaOH, затем промывали в дистиллированной воде и высушивали. При этом удельная поверхность порошка увеличилась с 15 до 100 м<sup>2</sup>/г при уменьшении его веса на 50 %. Затем проводили легирование остатка углеродом в углеводородной атмосфере, содержащей также диоксид углерода.

Далее легированный наноструктурный порошок BN спекали в АД при давлениях 2,5–5,5 ГПа. В этом случае были получены образцы, существенно отличающиеся по своей морфологии от материала на основе hBN+C после механоактивации.

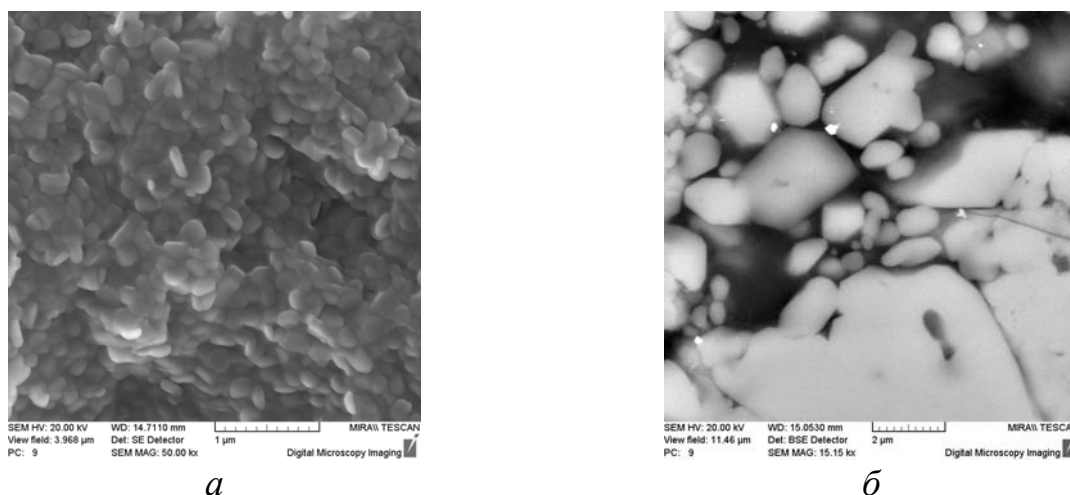


Рисунок 2. – Морфология спеченного материала: а–после механоактивации  $hBN+C$  и  $p$ ,  $T$ -спекания; б– после легирования углеродом механоактивированного  $hBN$  и  $p$ ,  $T$ -спекания

Анализ структуры материала показал наличие в нем областей светлого цвета, равномерно распределенных в матрице и состоящих из кристаллов размерами от десятых долей мкм до 15–20 мкм, рис. 2, б. Исследования фазового состава спеченного материала показали присутствие  $sBN$ , количество которого растет с увеличением давления термобарического спекания.

Таким образом, в результате механоактивации легированного углеродом порошка  $hBN$  получен гранулированный материал, состоящий из субмикронных пластинчатых частиц  $hBN$  толщиной порядка 100 нм. Также показано, что наряду с режимами  $p$ ,  $T$ -спекания, последовательность технологических операций механоактивации и легирования также позволяет регулировать структуру и фазовый состав полученного компактного материала.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Facilitated synthesis of cubic boron nitride by a mechanochemical effect. Noriuchi S., Huang J.Y., He L.L. et al // *Phil. Mag. A.* – 1998. – Vol. 78, №5. – pp. 1065–1072.
2. Петруша, И.А. Фазовые превращения в массивных пиролитических материалах  $VN$ : термодинамический и структурный аспекты // *Сверхтвердые материалы: Моногр.: В 6 т. Т. 1: Синтез алмаза и подобных материалов.* Киев: «АЛКОН», 2003. – С. 119–154.
3. Бланк, В.Д. Фазовые превращения в твердых телах при высоком давлении / В.Д. Бланк, Э.И. Эстрин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 412 с.
4. Соложенко, В.Л. К вопросу о твердости кубического карбонитрида бора / В.Л. Соложенко, С.Н. Дуб, Н.В. Новиков // *Сверхтвердые материалы.* – Киев, 2001. – №4. – С. 72–73.
5. Сенють, В.Т. Исследование структурных особенностей нитрида бора после механоактивации в атриторе и планетарной мельнице / В.Т. Сенють, С.А. Ковалева, Т.В. Гамзелева, Т.Ф. Григорьева // *Химия в интересах устойчивого развития.* – 2016, Т. 24, №2. – С. 169–175.

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕДЛЕННЫХ СКОРОСТЕЙ ПОДАЧ РАБОЧИХ ОРГАНОВ В СТАНОЧНЫХ ГИДРОПРИВОДАХ**

Для обеспечения точности и качества обработки на прецизионных станках необходима стабильность величины скорости подачи рабочего органа. Стабилизация скорости движения независимо от величины внешней нагрузки и других случайных факторов имеет особое значение при медленных скоростях рабочего органа станка на финишных операциях. В агрегатных, отделочно-расточных и шлифовальных станках движения подач обычно реализуются с помощью гидроприводов.

Стабильность подачи гидропривода во время цикла обработки определяется прежде всего неизменностью потока рабочей жидкости, поступающей в рабочую полость гидроцилиндра, и зависит как от стабильности потока дозируемого регулятором, так и от изменения во времени утечек из гидросистемы в дозируемую полость гидроцилиндра [1]. При растачивании длинных отверстий скорость рабочей подачи снижается из-за возрастания утечек жидкости через уплотнения поршня гидроцилиндра и кольцевые щели гидравлических аппаратов. Перед сборочными операциями необходим контроль величины утечек в гидравлической аппаратуре и отбор экземпляров с лучшими характеристиками. Существенное влияние на плавность хода могут оказывать перекосы и защемления в направляющих стола и гидроцилиндра подачи.

Даже при условии качественного изготовления и сборки привода подачи возникают релаксационные автоколебания основными причинами которых являются падающая характеристика сил трения в направляющих и уплотнениях гидроцилиндра стола в сочетании с низкой жесткостью гидропривода и механической связи штока гидроцилиндра со столом, а также недостаточное демпфирование гидропривода и наличие нерастворенного воздуха в гидросистеме. В этих случаях повышение равномерности движения столов может быть обеспечено за счет:

- повышения жесткости и демпфирования гидропривода путем выбора рациональных схемных решений и значений конструктивных параметров, обеспечивающих устойчивость движения стола;
- принятия мер, направленных на снижение нерастворенного воздуха в гидросистеме;
- применения масел с антикачковыми добавками и рациональных схем смазывания направляющих или накладных направляющих из пластмасс типа фторопласта;
- использования дополнительного демпфирования, например, с помощью управляемых демпферов с магнитными жидкостями.

Исследования показали, что характеристика суммарного трения в приводе подач отделочно-расточных станков в основном определяется силой трения в гидроцилиндре, которая в области скоростей 0...300 мм/мин в 6...8 раз превышает силы трения в направляющих стола. В связи с этим необходимо принимать меры к снижению сил трения в подвижных уплотнениях гидроцилиндров. В качестве таких мероприятий можно рекомендовать:

- применение для уплотнения поршня вместо резиновых манжет чугунных поршневых колец, которые характеризуются не только пониженным и более стабильным трением, но и большей долговечностью;

- использование в качестве уплотнений штока эластичных манжет из современных материалов (полиамида угленаполненного, полиуретана, фторопласта коксонаполненного и т. п.) [2] ;

- выбор гидроцилиндров с малым диаметром штока, что позволяет уменьшить трение в штоковом уплотнении и компенсировать погрешности монтажа за счет податливости тонкого и достаточно длинного хвостовика штока;

- для уменьшения влияния смещения и перекоса оси деталей гидроцилиндра необходимо обеспечить податливость его гильзы в радиальном направлении за счет гарантированного зазора между гильзой и отверстием опоры;

- при сборке и монтаже привода подачи обеспечить контроль затяжки крепежных соединений, проверку гидроцилиндра как по утечкам, так и по величине давления холостого хода.

Принципиально новые возможности в сверхпрецизионном станкостроении

открывает использование мехатроники, в частности, широкодиапазонных цифровых электрогидравлических приводов [2]. Так, применение достаточно жестких гидро- или аэростатических направляющих позволяет практически полностью исключить механическое трение между твердыми телами (в том числе в гидроцилиндрах) и, следовательно, обеспечить безизносность базисных и несущих поверхностей. Тонкое регулирование расхода непрерывно дозируемой жидкости, которая поступает в гидродвигатели достаточно большого объема, дает возможность осуществлять перемещения с шагом 0,08 мкм. Совмещение функций двигателя и направляющего устройства в минимальном количестве деталей (корпус гидроцилиндра – поршневая группа), а также реализация непосредственного контроля положения рабочего органа с помощью высокоточных датчиков позволяют обеспечивать стабильные перемещения с малыми скоростями.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Тихенко В.Н. Исследование равномерности движения гидропривода стола отделочно-расточного станка / В.Н. Тихенко, А.А. Волков // Промислова гідроліка і пневматика. – Вінниця, 2012, №1(35). – С. 55-58.

2. Свешников В.К. Станочные гидроприводы. – М.: Машиностроение, 2008. – 640 с.

## **БІОМАТЕРІАЛИ НА ОСНОВІ ГІДРОКСИПАТИТУ**

На сьогоднішній день важливим питанням лишається розробка нових біоматеріалів в стоматології та щелепно-лицьовій хірургії. Саме в цій галузі найчастіше виникає потреба у реставрації дефектів кісткової тканини, які є результатами травм, онкології, патологічною деградацією, запальних процесів.

У сучасній реконструктивній хірургії широке використання знаходять ортофосфатні матеріали, і зокрема, гідроксиapatит (ГАП), завдяки, передусім, його хімічному складу, що є аналогом мінеральної складової кісткової тканини, й повній біосумісності та корозійній стійкості. Водночас, через незадовільні механічні властивості (крихкість та жорсткість) всі відомі фосфати кальцію знаходять обмежене застосування в якості основних матеріалів для ортопедії та стоматології.

Одним зі шляхів вирішення цієї проблеми є створення нових дисперсно-зміцнених матеріалів на основі ортофосфатів кальцію, і зокрема, ГАП. Через власні незадовільні механічні властивості ортофосфати кальцію знаходять обмежене застосування в якості основних матеріалів для ортопедії та стоматології: вони дуже крихкі та жорсткі [1, 2]. Покращення механічних властивостей матеріалів на основі ГАП можна досягти шляхом синтезу композитів. На сьогоднішній день дану задачу, в основному, вирішують застосуванням домішок біологічно сумісних металів (таких як кобальт – хромові сплави, титан та його сплави, нержавіюча сталь марки 316L). Але в такому випадку виникають проблеми зі стійкістю таких матеріалів до стресових навантажень та при контакті з біологічними рідинами протягом тривалого терміну експлуатації в організмі людини. Всі вище зазначені метали хоча й не токсичні, але завжди біоінертні, тому не можуть безпосередньо утворювати зв'язки з кістковою тканиною. А. Nakahira, М. Tamai, S. Miki в своїх дослідженнях зміцнювали ГАП за допомогою нейлону. При витримуванні ГАП-каркасу з пористістю 54% в розчині нейлону коефіцієнт тріщиностійкості збільшувався з 0,4 до 1,65 МПа. Проте нейлон, так само як і ПВХ, не піддається біодеградації в організмі. В своїй патентній роботі В.С. Комлев та С.М. Барінов пропонують просочувати пористу керамічну матрицю з кальцій-фосфатної кераміки зі співвідношенням Ca/P від 1,5 до 1,67 розчинами колагену, желатину та полівінілового спирту (концентрацією від 4 до 10 % під вакуумом від 0,1 до 3,0 Па з витримкою від 10 до 30 хвилин при температурному режимі розчину від 10 до 75 °С з подальшою сушкою композиції до 24 годин), завдяки чому міцність матеріалу збільшується в 5-6 разів. Водночас, недоліками цього способу є відносно низька міцність отриманих композиційних матеріалів. Також V.S. Komlev, S.M. Barinov, F. Rustichelli в своїй роботі отримували композиційний матеріал за рахунок просочування в керамічний пористий матрикс на основі ГАП розчину полімерів-

желатину та полівінілового спирту (ПВС). Було встановлено, що при просоченні матриксів з пористістю 50% розчинами желатину або ПВС (із концентрацією 10%) міцність під час розтягу збільшувалась в 5 та в 3 рази відповідно. Недоліками цього способу є використання ПВС, який не проявляє біологічної активності, не піддається біодеградації.

Було проведено дослідження зі зміцнення біогенного гідроксиапатиту за рахунок введення в нього  $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3$ -скла в шихту композитів на основі біогенного ГАП. В результаті отримали два види композиційних матеріалів на основі біогенного гідроксиапатиту, зміцненого натрійборосилікатним склом. Відрізняються отримані системи температурним режимом обробки скла. Підвищення механічних властивостей було незначне, але встановлено, що використання готового скла для зміцнення біогенного ГАП призводить до створення високопористих зразків зі значними резорбними властивостями [3].

На базі Інституту проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича була розроблена дисперсно-зміцнена базальтовою лускою (БЛ) композиційна система на основі гідроксиапатиту (ГАП), котра задовольняє механічні вимоги до остеопластичних матеріалів [4].

Провівши ряд досліджень встановлено, що найбільшу фізико-хімічну стабільність в біологічних середовищах виявлено для систем ГАП+БЛ з масовими частками базальтової луски 5 % та 10 % при температурному режимі обробки 900 °C та 1200 °C [5, 6].

## ЛІТЕРАТУРА

1. Путляев В. И. Новое поколение кальцийфосфатных биоматериалов: роль фазового и химического составов / В. И. Путляев, Т. В. Сафронова // Стекло и керамика. – 2006. – № 3. – С. 30-33.
2. Ginebra M. Calcium Phosphate Cements as Bone Drug Delivery Systems: a Review / M. Ginebra, T. Traykova, J. Planell // J. Controlled Release. – 2006. – Vol. 113, No 2. – P. 102-110.
3. Aryal S. Synthesis and Characterization of Hydroxyapatite Using Carbon Nanotubes as a Nano-Matrix / S. Aryal, K. Bahadur, N. Dharmaraj at al. // Scripta Materialia. – 2006. – № 54. – P. 131-135.
4. Каплуненко Н.В. Дисперсно-зміцнений базальтовою лускою гідроксиапатит // Н.В. Каплуненко, Н.В. Ульянович, В.Д. Кліпов, В.Ф. Горбань // Порошкова металургія. – 2016. – №5. – С. 70-76.
5. Федоренко Ю.О. Порівняльна характеристика фізико-хімічної стабільності базальтової луски різної модифікації у фізіологічних розчинах // Ю.О. Федоренко, Н.В. Бошицька, І.В. Уварова та інші // Доповіді Національної академії наук України. – 2015. – №5 – С. 78.
6. Федоренко Ю.О. Взаємодія компонентів композиційних систем гідроксиапатит-базальтова луска з біологічними середовищами // Ю.О. Федоренко, Н.В. Бошицька, І.В. Уварова та інші // Доповіді Національної академії наук України. – 2016. – №5 – С. 67-73.



## КОМПЛЕКСНА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ВАЛКОВОГО ФОРМУВАННЯ ПЕРІОДИЧНИХ ЗАМКНУТИХ ГОФРІВ

Як для листових виробів, так і сортових або спеціальних гнутих профілів з великими величинами розгортки однією з можливостей підвищення загальної або місцевої стійкості, жорсткості, а, отже, і зниження металоємності являється їх посилення формуванням на відповідних ділянках періодичних гофрів. З урахуванням експлуатаційних властивостей, новий вид металопродукції – листові профілі з нанесеними на них подовжніми або поперечними періодичними гофрами дістав назву «Профілі високої жорсткості», а гнуті профілі з посиленими періодичними гофрами елементами – «Тонкостінні профілі високої жорсткості».

Слід зазначити, що кінематичні, силові і технологічні параметри формоутворення на листовій заготовці і плоских елементах гнутих профілів замкнутих гофрів формуванням у валках високопродуктивних профілезгинальних станів і штампуванням на пресах принципово відрізняються один від одного [1]. Тому використати при розробці нових технологічних процесів виготовлення профілів високої жорсткості і тонкостінних профілів високої жорсткості відомі залежності листового штампування, що визначають основні технологічні параметри і граничні можливості технологічного процесу формування, не є можливим.

Основні результати досліджень нової технології формоутворення за рахунок місцевого витягу металу на листах і плоских елементах гнутих профілів гофрів жорсткості, що періодично повторюються, формуванням у валках, наведені в роботі [2]. З урахуванням даних цієї роботи для ефективного проектування нового технологічного процесу слід дотримуватися наступних основних етапів розрахунку його найважливіших технологічних параметрів.

*Визначення технологічності формування гофрів по висоті.* Для визначення цього граничного стану процесу формоутворення (можливості отримання гофрів без надривів і тріщин) слід керуватися кількістю питомої енергії, що витрачається при руйнуванні металу ( $A_{кр}$ ), яку визначають за результатами випробувань на розтягування до руйнування. Залежність для визначення критичної висоти формування ( $A_{кр}$ ), використання якої дозволяє отримувати гофри без порушення суцільності металу:

$$H_{кр} = \frac{2\sqrt{3b_2}}{\pi} m+1 \sqrt{\frac{A_{кр}}{K}}$$

де  $b_2$  – половина ширини перерізу гофру;  $K$  і  $m$  – коефіцієнти ступеневої функції, що враховують зміцнення металу при деформації.

При цьому повинна виконуватися умова:

$$H + \Delta H < H_{кр},$$

де  $\Delta H$  – величина, що враховує пруження гофру після формування, визначається за залежністю:

$$\Delta H = H - \frac{4b_2}{\pi} \sqrt{\frac{H^2 \pi^2}{16b_2^2} - \frac{K}{E} \left( \frac{H^2 \pi^2}{16b_2^2} \right)^2},$$

де  $E$  – модуль пружності.

Для попередньої оцінки технологічності формування профілів без порушення суцільності періодичних гофрів можна також користуватися розробленою номограмою (рис.1), яка дозволяє визначати допустиму висоту формованих гофрів за їх шириною залежно від механічних властивостей формованої заготовки і охоплює практично усі марки сталей, які використовують при виробництві профілів високої жорсткості.

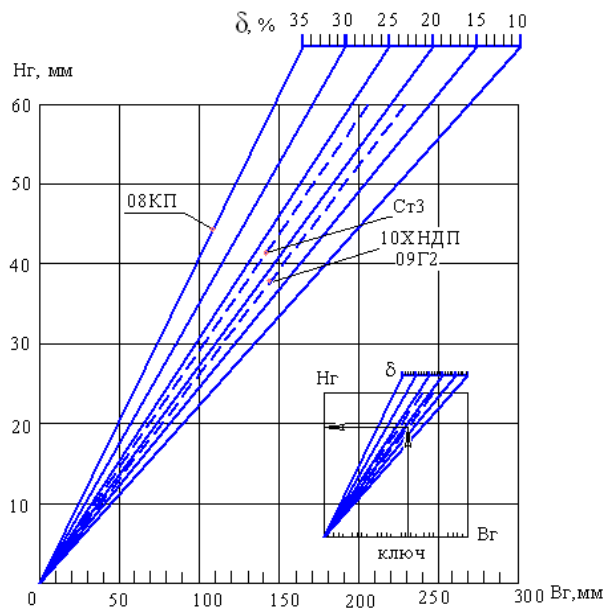


Рисунок 1. Номограма для визначення допустимої висоти гофрів, що формуються

У разі, якщо максимальна висота гофру, визначена за наведеними залежностями або ж за номограмою (рис. 1), перевищує критичну висоту за умовами формування без порушень суцільності металу, необхідно скорегувати ширину формованого гофру і перевірочний розрахунок повторити.

Визначення технологічності формування профілів за умовами відсутності хвилястості на плоских бокових елементах. Умовою відсутності при формотворенні гофрів хвилястості на плоских бокових елементах профілів є неперевищення величини залишкової деформації, що утворюється на цих елементах, яку визначають за залежністю:

$$e_{ост} = \frac{2\delta_{max}^2}{(L_2 - l_{упр})^2 - \delta_{max}^2} - \frac{K}{E_{упр}} \left[ \frac{2\delta_{max}^2}{(L_2 - l_{упр})^2 - \delta_{max}^2} \right]^m,$$

де  $\delta_{max}$  – максимальна величина утягування плоского бокового елемента;  $L_2$  – повна довжина осередку деформації гофру;  $l_{упр}$  – протяжність пружної зони осередку деформації гофру.

Значення критичної деформації визначається за формулою:

$$e_{кр} = \left\{ \left[ \frac{\pi^2}{12(1-\nu)^2} \right]^2 \left( \frac{S}{b_n} \right) k_{уст}^2 \frac{mE_{унр}}{K} \right\}^{\frac{1}{m+1}}$$

де  $\nu = 0,5$  – коефіцієнт Пуассона для пластичної деформації;  $k_{уст} = 1,277$  – коефіцієнт стійкості, що враховує вид закріплення по контуру довгої пластинки;  $b_n$  – ширина плоского бокового елемента профілю; тобто  $e_{осн} \leq e_{кр}$ .

У разі невиконання наведеної вище умови, необхідно змінити один з основних геометричних розмірів гофру – висоту або ширину і повторити розрахунок за наведеною методикою.

*Визначення можливості виробництва профілів високої жорсткості на існуючому устаткуванні.* Після вирішення питання про доцільність виготовлення профілю методом валкового формування і його технологічності необхідно встановити можливість виготовлення профілю на наявному устаткуванні. Для цього слід порівняти розміри профілю і заготовки, механічні властивості матеріалу, з якого має бути виготовлений профіль, з технічною характеристикою вибраного для освоєння продукції агрегату. Крім того, необхідно порівняти величини зусилля формування гофрів і моменту, що крутить, визначені за приведеними нижче залежностями, зі значеннями енергосилових параметрів, максимально допустимими для вибраного агрегату. При цьому повинні виконуватися наступні умови. Для профілів з подовжніми періодичними гофрами:

$$P = \frac{1,12KH\pi^2 S b_2}{6m} \left( \frac{\sqrt{3}}{12} H\pi \right)^{m-1} \times$$

$$\times \left( 0,0391 + 0,0388 \frac{H}{R} - 0,0003H - 0,0001R - 0,0276 \frac{b_2}{R} \right) \leq [P]$$

$$M_{кр} = 0,975 \frac{A_n \pi D_{осн}}{L_2} \leq [M_{кр}].$$

Для профілів з поперечними гофрами, що періодично повторюються:

$$P = \frac{1,12KS}{6} \left[ \frac{2b_2}{m} \left( \frac{\sqrt{3}}{12} H\pi \right)^{m-1} \left( 0,0391 + 0,0388 \frac{H}{R} - 0,0003H - 0,0001R - 0,0276 \frac{b_2}{6} \right) + \right.$$

$$\left. + L_2 \left( \frac{H\pi}{b_2} \right)^m \left( \frac{\sqrt{3}}{6} \right)^{m-1} \right] \leq [P]$$

$$M_{кр} = 0,975 \frac{A \cdot 360^\circ}{n \cdot \arccos \frac{R_{осн}}{R_{\max}} - r} \leq [M_{кр}],$$

де  $P$  і  $M_{кр}$  – максимальні допустимі зусилля формування і момент, що крутить, для цього агрегату;  $S$  – товщина металу;  $H$  – висота формованого гофру;  $R$  – максимальний радіус елемента, що формує,  $R_{осн}$ ,  $D_{осн}$  – основний радіус і діаметр валка, що формує.

Викладені положення щодо визначення основних технологічних параметрів процесу виготовлення профілів високої жорсткості є основою комплексної методики проектування технологічного процесу валкового формування профілів з гофрами, що періодично повторюються, яка використовується в роботі при освоєнні нових типів профілів. Використання розробленої методики дозволяє понизити відсоток переточувань валків і корегувань їх розмірів при освоєнні нових профілів, що призводять до втрат робочого часу, а також ліквідувати підвищені витрати металу.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Тришевский О.И. Способы усиления тонкостенных конструкций и области применения профилей высокой жёсткости / О.И. Тришевский, Ю.А. Плеснецов, А.Б. Юрченко // Сталь.– 1981. – №.3 – С.56-57.

2. Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения / Под общей редакцией Ф.В. Новикова и А.В. Якимова. В десяти томах.– Одесса: ОНПУ, 2004.– Т.5 «Обработка металлов методами пластического деформирования» – 522 с.

*Шелковой А.Н., Клочко А.А., Набока Е.В.*

Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

*Новиков Ф.В.*

Харьковский национальный экономический университет

имени Семёна Кузнецова, Харьков, Украина

## СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ТОЧНОСТИ, КАЧЕСТВА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЗУБООБРАБОТКИ ЗАКАЛЕННЫХ КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Задачи синергетического моделирования технологических процессов оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес предлагается решать методами технологического воздействия с учетом специфических условий формообразования зубчатых колес.

При зубофрезеровании эвольвентной поверхности зубчатого колеса перемещение режущего лезвия инструмента из начального положения в конечное

положение под действием управляющих воздействий и может быть осуществлено по различным траекториям в рамках технологических и технико-экономических ограничений. Каждой траектории соответствует определенное значение критерия оптимальности. Математическое моделирование оптимального управления параметрами точности, качества и производительности зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес выходит на изменение процессов формообразования поверхностного слоя зубчатых колес во времени и рассматривается в динамике в виде схемы двухпараметрического адаптивного управления процессом скоростного зубофрезерования при формировании поверхностного слоя (рис. 1).

Задача оптимального управления процессом зубообработки закаленных крупномодульных зубчатых колес дифференциально аппроксимируется на два этапа: первый связан с обоснованием выбора значений технологических параметров режима резания, удовлетворяющим заданному критерию качества, параметрами формирования толщины срезаемого слоя глубины резания; второй – предполагает управление режимами резания с целью поддержания оптимального значения показателя критерия качества в условиях действия на процесс возмущающих воздействий. В том случае, когда основными показателями оценки режимов резания является обеспечение точность обработки и качества поверхностного слоя, в качестве критерия оценки процесса используют коэффициент функционального формирования поверхностного слоя –  $K_p$ . Период стойкости  $T$  инструмента определяется глубиной резания  $t$ , подачей  $S_o$ , скоростью  $V$  и радиусом округления режущей кромки зубьев фрезы  $\rho$ , т.е. параметрами режима резания и условиями формирования с учетом параметра функционального формирования поверхностного слоя при зубофрезеровании  $K_p = f(a/\rho, R_z, t_m(k), H, \mu_0, \sigma_0, h, H, \mu)$  и обрабатываемости материала  $C_v$ .

Теоретически при встречном зубофрезеровании толщина срезаемого слоя ( $a_i = S_z \cdot \sin \Psi_{ск} \cdot \sin \phi$ , где  $S_z$  – подача на зуб;  $\phi$  – угол профиля зуба фрезы в нормальном сечении) изменяется от «0» до «max», при попутном от «max» до «0». Фактически прерывистый характер резания, нестабильность процесса съема металла с обрабатываемой поверхности, наличие СОЖ или ее отсутствие, радиус округления  $\rho$  режущего лезвия фрезы создают условия образования стружки и формирования состояния поверхностного слоя с учетом наличия скольжения зуба фрезы относительно обрабатываемой поверхности, когда съема стружки не происходит. Определение угла скольжения ( $\Psi_{ск}$ ) зуба фрезы как раз и определяет условия при котором начинается процесс резания согласно установленным теоретическим зависимостям, базирующихся на основополагающих научных принципах трибологии и теории резания:

$$\Psi_{ск} = \arcsin \frac{0,5 \cdot \rho}{S_z \cdot \sin \phi} \text{ без СОЖ}, \quad \Psi_{ск} = \arcsin \frac{0,31 \cdot \rho}{S_z \cdot \sin \phi} \text{ с СОЖ}.$$

Впервые установлены условия для определения углов скольжения зуба фрезы, которые позволяют на основе синергетического подхода изучения процесса формообразования определить стабильные режимы резания и повысить стойкость фрезы.



При этом обеспечивается полная занятость зубьев фрезы в процессе резания и исключается полное скольжение, когда зуб фрезы работает как индентор без съема металла. Изменение толщины срезаемого слоя при достижении минимального угла скольжения  $\psi_{ск}$  изменяет коэффициент трения при наличии обязательного всплеска (скачка), что неблагоприятно сказывается на динамике процесса резания и качества обработанной поверхности. Соотношение между углом скольжения  $\psi_{ск}$  и наибольшим углом контакта зуба фрезы  $\psi_{max}$  с обрабатываемой поверхностью позволяет установить эффективность процесса формирования поверхностного слоя через коэффициент  $K_p$  (без применения СОЖ и с СОЖ) и получить удобные для теоретических и экспериментальных исследований выражение коэффициента эффективности формирования поверхностного слоя.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Имитационное моделирование в задачах машиностроительного производства в 2-х томах, Т. 2: учеб. пособие / А.В. Беловол, А.А. Ключко, Е.В. Набока, А.О. Скоркин, А.Н. Шелковой; под редакцией А.Н. Шелкового – Х.: НТУ «ХПИ», 2016. – 323 с.

2. Шелковой А.Н. Технологическое обеспечение заданной системы параметров поверхностного слоя цилиндрических закаленных крупномодульных зубчатых колес / А. Н. Шелковой, Ю. В. Тимофеев, А. А. Ключко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: зб. наук. пр. Тематичний випуск : Різання та інструмент в технологічних системах. – Харків : НТУ «ХПІ», 2013. – № 83. – С. 286-295.

*Шкурупий В.Г., Новиков Ф.В.*

Харьковский национальный экономический университет  
имени Семена Кузнеця, Харьков, Украина

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ

Для обеспечения высокой отражательной способности поверхностей металлических изделий используют механическую обработку, электрохимическое или химическое полирование, которые в силу специфики процесса создают поверхностные слои с благоприятной тонкой структурой и обеспечивают максимальные значения контактной разности потенциалов (КРП). В настоящее время традиционными методами получения высокой отражательной способности лазерных зеркал из различных материалов (медь, алюминий и его сплавы, молибден и др.) является обработка резанием, как лезвийная - точение резцами из природных алмазов, так и обработка свободными абразивами – полирование (доводка) с применением смоляных полировальников и технологических сред,

содержащих алмазные микропорошки. Цель работы – разработка рекомендаций по обеспечению качества поверхности оптических металлоизделий.

Предлагается следующая последовательность циклов технологии обработки поверхностей с малыми значениями параметров шероховатости. Первый цикл обработки следует проводить алмазными микропорошками зернистостью 5/3 с применением как поверхностно-активного вещества поливинилового спирта, который способствует увеличению скорости съема материала к величине съема, как и в случае применения абразива большей зернистости, а это уменьшает длительность протекания цикла обработки. Второй цикл необходимо проводить с использованием алмазных микропорошков зернистостью 2/1 с аналогичными условиями обработки, что и в первом цикле. На третьем цикле обработки рекомендуется использовать нанопорошки  $Al_2O_3$ , с условиями обработки первого и третьего циклов. После алмазного точения зеркал из алюминиевого сплава АМгЗ отражательная способность (при длине волны излучения лазера  $\lambda = 10,6$  мкм) имела значения 96,6%, а после алмазного полирования – 92,6%. Значение коэффициента поглощения составляло 0,1 и 0,20.

Повышению отражательной способности поверхностей, обработанных точением алмазным инструментом, способствует благоприятное сочетание физико-химических свойств природного алмаза и обрабатываемых поверхностей, снижение интенсивности воздействия химически активных веществ, что приводит к уменьшению различного рода неоднородностей в двойном электрическом слое поверхности и уменьшает величину работы выхода электронов. На поверхности алюминиевого образца величина КРП составляет 1050 - 1100 мВ, а после полирования с применением алмазных микропорошков - около 880 - 900 мВ. Этот недостаток абразивной обработки проявляется в результате влияния применяемых в настоящее время абразивных составов на физико-химические свойства обрабатываемой металлической поверхности, связанное с процессами окисления. Это объясняется тем, что при этом виде обработки свободные электроны приводят к окислению поверхностного слоя. Толщина образующейся при этом оксидной пленки, как правило, значительно больше, чем высота неровностей на реальной металлической поверхности

При абразивном полировании обрабатываемая поверхность адсорбирует химически активные вещества, содержащиеся в технологических фазах и кислород воздуха, что оказывает влияние на развитие химико-механических явлений, сопровождающих пластическое деформирование микровыступов поверхности. Процесс адсорбции интенсифицируется при механическом снятии пленок окислов с поверхности, что обеспечивается относительным изменением контакта полировальника и обрабатываемой поверхности.

При сопоставлении снимков поверхностей образцов из сплава АМгЗ после точения алмазным инструментом и абразивного полирования обнаружены значительные различия. На полированных поверхностях, кроме следов абразивных зерен, имеется большое количество мелких точек «ряби», которые отсутствуют на поверхности, обработанной точением. Наличие «ряби», видимо, является результатом взаимодействия органических компонентов полирующих



составов, абразивных зерен и обрабатываемой поверхности. На поверхности, обработанной точением, могут наблюдаться следы резца глубиной 0,1-0,2 мкм и шириной 60 мкм, склоны гладкие, почти отсутствуют неровности, соизмеримые с длинами волн падающего излучения. После абразивного полирования поверхность деформирована меньше, чем после алмазного точения. Однако химическая активность алюминия на воздухе, неабразивные составляющие рабочей среды, а также шаржирование поверхности абразивом образуют субструктуру в виде конгломерата окислов металла, осколков абразивных зерен, соединений щелочных металлов. Для определения гетерогенных веществ и других примесей, не относящихся к основному материалу, а образующихся в процессе обработки поверхности, применили масс- и оже-спектроскопию.

Применение поверхностного пластического деформирования также как и алмазного точения обеспечивает образование поверхности с улучшенными физико-химическими параметрами. Однако ограничения в технологии обработки этого метода дают возможность эффективно применять его только на жестких поверхностях. Установлено, что лезвийная обработка зеркал из меди Моб приводит к значительным пластическим деформациям поверхностных слоев металла. Точение твердым сплавом и алмазом приводит к значительному наклепу обрабатываемой поверхности. Полирование абразивной суспензией вносит в структуру поверхностных слоев значительно меньше изменений, распределяющихся в поверхностном слое толщиной до 60 мкм при обработке алмазным микропорошком АСМ 5/3. Последующее полирование алмазным микропорошком АСМ 2/1 снимает уровень структурных искажений и уменьшает глубину деформируемого слоя. Более однородное распределение структурных искажений поверхностных слоев образуется при полировании мелкозернистых образцов. Уменьшение величины КРП при алмазном точении по сравнению с абразивным полированием связано с тем, что в результате деформации искажается структура поверхностного слоя, наличие деформации подтверждено рентгеноструктурным анализом поверхности. Ухудшение субструктуры поверхности при полировании приводит к увеличению работы выхода электрона.

Для уменьшения неоднородности и степени структурных искажений по поверхности и сечению образцов целесообразно после предварительной лезвийной обработки проводить термическую обработку (отжиг). Режимы термической обработки следует подбирать так, чтобы при рекристаллизации в поверхностном слое образовалась мелкозернистая структура (размер зерен 10 мкм). В связи с тем, что шаржирование в процессе полирования алмазными зернами влияет на физико-химическое состояние и тем самым уменьшает отражательную способность, исследовали характер расположения шаржированных частиц и плотность их распределения на образце. Как показал металлографический анализ, плотность шаржированных частиц от участка к участку изменяется по разному (от  $10^2$  до  $10^4$  зерен на  $1 \text{ мм}^2$ ), закономерностей в распределении шаржированных частиц не обнаружено. Вокруг места внедрения алмазной частицы на первом этапе полирования материал деформируется более интенсивно, плотность рисок в несколько раз больше в этом районе, чем в сред-

нем по поверхности. Послойный анализ поверхности показал, что частицы абразива распределяются в нем на глубину до 5 мкм. Размеры внедренных частиц от 3 до 5 мкм. При температурном воздействии (градиент температур по сечению образца до 50 К/мм) на шаржированной поверхности происходит вспучивание в местах внедрения шаржированных частиц. Удаление поверхностного слоя толщиной 1 – 3 мкм электрополированием и последующее полирование поверхности привело к снижению плотности шаржированных частиц  $10^2 - 10^3$  зерен на  $1 \text{ мм}^2$ . Другим средством предотвращения шаржирования является применение для полирования овализированных зерен абразива. Предварительные результаты полирования округленными зернами алмазного абразива АСМ 2/1 показали не только снижение плотности шаржированных частиц, но и улучшение геометрических характеристик обработанной поверхности. Установлено, что шаржирование обрабатываемой поверхности алмазными зернами на первых стадиях обработки способствует повышению неоднородности распределения структурных искажений в поверхностных слоях.

Особенность формирования поверхностного слоя медных зеркал абразивной обработкой, определяется, по-видимому, разной геометрией зерен алмазных и абразивных микропорошков на уровне субмикрорельефа поверхностей граней, от которой зависит эффективность процесса резания-царапания, развитие локальных температур и др. Для микрограней алмазных зерен характерно микрорезание, а для электрокорунда – микросмятие с локализацией и увеличением затрачиваемой энергии (возникновение на полированной поверхности кометообразных углублений). Локальное активное контактирование зерна с обрабатываемой поверхностью эффективно, пока геометрические размеры зерен не становятся соизмеримыми с отделившимися частицами металла, что в последующем приводит к потере эффекта полирования. Обеспечение высокой отражательной способности на зеркалах из молибдена обработкой резанием также как и на меди связано с наличием дефектного слоя большой глубины.

*Щербаков В.Г., Астрашаб Е.В., Одарченко, В.И.,  
Казначеева Д.А.*  
Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь

## **ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ РОСТА ДИФФУЗИОННЫХ СЛОЕВ НА ЖЕЛЕЗНЫХ СПЛАВАХ ПРИ БОРИРОВАНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ**

Борирование – один из наиболее эффективных и перспективных методов упрочнения поверхности для повышения срока службы деталей [1]. Упрочнение при борировании металлов и сплавов происходит в результате образования

на обрабатываемой поверхности металлоподобных соединений – боридов. Насыщение бором значительно увеличивает поверхностную твердость, жаростойкость и коррозионную стойкость [1].

Наиболее распространена технология борирования в контейнерах, заполненными порошками аморфного бора, карбида бора, ферробора, ферроборала и буры.

Целью данной работы являлось исследование кинетики роста диффузионных слоев на углеродистых сплавах при низкотемпературном однофазном борировании в порошковых средах и исследование последующего низкотемпературного диффузионного легирования металлических порошковых материалов.

Насыщение проводили на образцах-свидетелях из армко-железа, стали У8, чугуна СЧ20 и стали Х12, а также на стальной, чугунной и высокохромистой колотой дроби фракцией 315...630 мкм. Температура насыщения – 650, 750, 850 и 950 °С, продолжительность выдержки – 4 часа. Температура насыщения колотой дроби составляла 750 °С, время – 4 часа. Насыщающей средой являлась порошковая смесь для термодиффузионного однофазного борирования, разработанная сотрудниками НИЛ упрочнения стальных изделий, Белорусского национального технического университета [2].

Микрошлифы для микроанализа изготавливались по стандартным методикам. Анализ микроструктуры проводили на микроскопе Altamі с различными увеличениями.

Микротвердость измеряли с помощью микротвердомера ПМТ-3.

Анализ литературных данных [3, 4] позволил установить, что при борировании на углеродистых сплавах существенное влияние оказывает исходный химический состав сплава и температурно-временные параметры обработки. Микротвердость боридов FeB и Fe<sub>2</sub>B в двухфазном боридном слое на армко-железе (при нагрузке на инденторе 0,98Н) составляет 19200...20600 и 13500...14200 МПа. Увеличение содержания углерода в стали снижает твердость боридов FeB и практически не влияет на твердость Fe<sub>2</sub>B. Микротвердость боридов Fe<sub>2</sub>B в однофазном боридном слое несколько выше, чем в двухфазном, и составляет 13700...16200 МПа. С увеличением содержания углерода в стали поверхностная твердость однофазного боридного слоя понижается. Борирование чугунов получило значительно меньшее промышленное распространение, чем борирование сталей, поэтому и закономерности их насыщения бором изучены менее детально [4]. Борированный слой серых, ковких и высокопрочных чугунов состоит из двух зон: боридной, имеющей характерное игольчатое строение, и переходной, включающей в себя α-фазу, выделения борного цементита Fe<sub>3</sub>(C, B) и графита.

Твердость однофазных диффузионных слоев на армко-железе составляет 14000...16000 МПа, на стали У8 – 12000...14000 МПа, на чугуне СЧ20 – 10000...12000 МПа и на стали Х12 9000...11000 МПа. Установлено, что при росте температуры борирования существенно возрастает толщина диффузионного слоя на обрабатываемых сплавах (рис. 1).

Отдельно стоит отметить особенности диффузионного легирования (ДЛ) микрообъектов [5]. Основным классификационным признаком является степень легированности полученного порошка. Эффективным является более широкое использование дисперсных металлоотходов в качестве сырья для ДЛ-процессов [6-7]. Традиционно при борировании стараются получать максимальные толщины диффузионных слоев (150...300 мкм). Однако, получение максимальной толщины диффузионного слоя при борировании не всегда является целесообразным. В отдельных случаях на обрабатываемой детали достаточно наличие диффузионного слоя небольшой толщины.

Толщина полученных диффузионных слоев на колотой дроби различного состава составляет 5...30 мкм, микротвердость существенно зависит от степени легированности насыщаемого материала и находится в диапазоне 8000...15000 МПа (Рис. 2). Микротвердость основы после диффузионного легирования составляет 4000...6000 МПа.

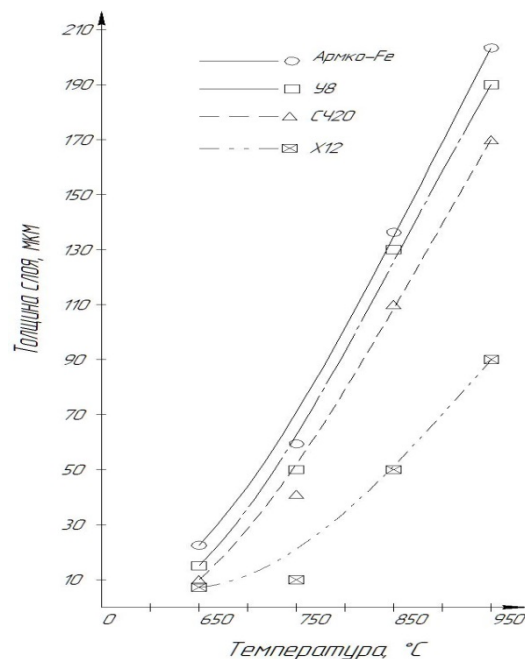


Рисунок 1. – Толщины диффузионных слоев на сплавах после борирования в порошковой смеси для однофазного борирования

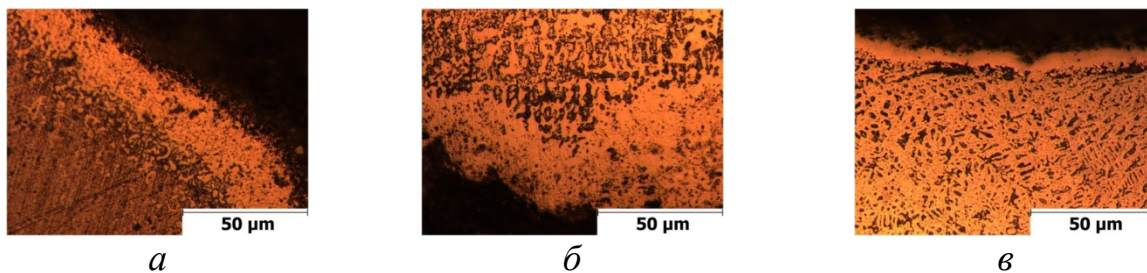


Рисунок 2. – Микроструктура диффузионных слоев после однофазного борирования, 750°С, 4 часа (а – стальная дробь, б – чугунная дробь, в – высокохромистая дробь)

Установлено, что одним из возможных методов регулирования толщины диффузионных слоев на обрабатываемых материалах является снижение температуры насыщения. Данная обработка целесообразна для деталей специфического назначения и порошковых материалов, условия, работы которых подразумевают наличие диффузионного защитного боридного слоя определенной толщины. Полученный на стальной и чугунной колотой дроби однофазный диффузионный поверхностный слой имеет микротвердость в 1,5...2,5 раза выше микротвердости основы, что придает значительно лучшую износостойкость. Таким образом, низкотемпературное борирование в порошковых насыщающих

средах позволяет регулировать температурно-временными параметрами насыщения и достаточно точно формировать диффузионные слои заданной толщины на обрабатываемых материалах.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Борисенко Г.В. Химико-термическая обработка металлов и сплавов. Справочник / Г.В. Борисенко [и др.] М.: Металлургия, 1981. – 424 с.
2. Термодиффузионная поверхностная обработка [Электронный ресурс] / Борирование – режим доступа: <http://www.besto.by/vidy-obrabotok/borirovanie> – Дата доступа 15.02.2017.
3. Лабунец В.Ф. Износостойкие боридные покрытия / В.Ф. Лабунец, Л.Г. Ворошнин, М.В. Киндрачук. – К.: Техника, 1989. – 158 с.
4. Ворошнин Л.Г. Борирование промышленных сталей и чугунов: (Справ. пособие) / Л.Г. Ворошнин – Мн.: Беларусь, 1981. — 205 с.
5. Ворошнин Л.Г. Состояние и перспективы диффузионного легирования микрообъектов /Л.Г. Ворошнин, Ф.И. Пантелеенко, В.М. Константинов // Перспективы развития поверхностного и объемного упрочнения сплавов: сборник научных трудов, посвященный 40-летию кафедры «Материаловедение в машиностроении» / Под ред. Ворошниной Л.Г – Минск: БНТУ, 2004. – С. 106-114.
6. Пантелеенко Ф.И. Самофлюсующиеся диффузионно-легированные порошки на железной основе и защитные покрытия на них / Пантелеенко Ф.И. – Минск, УП «Технопринт», 2001. – 300 с.
7. Ворошнин Л. Г. Теория и практика получения защитных покрытий с помощью ХТО / Л. Г. Ворошнин, Ф. И. Пантелеенко, В. М. Константинов. 2-е изд., перераб. и доп. – Минск: ФТИ; Новополоцк: ПГУ, 2001. – 148 с.

*Ярова І.А., Яровий Ю.В.*

Одеський національний політехнічний університет, Одеса, Україна

### КОНЦЕПЦІЯ КУРСУ «БЕЗПЕКА ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ»

Виробнича сфера зазвичай розглядається як система «Людина – Машина – Середовище». Однак сучасне виробництво, зокрема, машинобудування, являє собою складний комплекс систем, які виконують різноманітні функції. Окрім технологічного устаткування необхідно брати до уваги підйомно-транспортні засоби, засоби колективного захисту робітників, які можуть бути частиною архітектурно-будівельних рішень. Поняття «технічна система» є більш широким, а тому більш доцільним, ніж поняття «машина». Збереження життя і здоров'я робітників під час виконання трудових обов'язків щільно пов'язано із забезпеченням безпеки технічних систем.

Студентоорієнтоване навчання створює умови для розвитку культури безпеки майбутнього фахівця як частини загальної культури людини. Для реалізації цих умов в межах магістерського рівня освіти необхідне створення окремого навчального циклу курсів з безпеки праці із урахуванням професійного спрямування [1]. Курс «Безпека технічних систем» має своєю метою формування у майбутніх фахівців магістерського рівня освіти умінь і компетентностей, які відповідають державним стандартам освіти, для рішення завдань професійної діяльності на первинних посадах з обов'язковим дотриманням вимог безпеки праці; забезпеченні ефективного управління охороною праці та поліпшення умов праці з урахуванням досягнень науково-технічного прогресу та міжнародного досвіду збереження життя, здоров'я і працездатності робітників і третіх осіб, а також в усвідомленні нерозривної єдності успішної професійної діяльності з обов'язковим дотриманням усіх вимог безпеки праці у конкретній галузі.

В умовах професійної діяльності фахівець із вищою освітою звичайно виступає в ролі керівника або управлінця. Одним з його професійних обов'язків є відповідальність за забезпечення комфортних і безпечних умов праці для підлеглих. Тому завданням курсу «Безпека технічних систем» є формування відповідальності у посадових осіб і фахівців за колективну та власну безпеку; а також забезпечення безпеки людини від впливу чинників техногенних аварій, раціонального рішення питань щодо безпечного розміщення й застосування засобів забезпечення безпеки, порятунку і захисту людини від техногенних і антропогенних впливів.

Основоположним методологічним принципом дослідження проблем безпеки технічних систем є принцип системності. Відповідно до нього кожний об'єкт розглядається як цілий, відносно самостійний. Будь-який цілий об'єкт може розглядатися як той, що складається з ряду об'єктів меншого масштабу, і в той же час як частина більшого об'єкту, яка піддається його впливу і сама впливає на нього. Вивчаючи питання безпеки технічних систем, в якості цілого слід розглядати систему «Суб'єкт небезпеки – Об'єкт захисту – Система безпеки» для будь-яких об'єктів, рівнів і масштабів. Суб'єктом (джерелом) небезпеки є досліджувана технічна система. Об'єкт захисту – те, на що небезпека спрямована. В якості об'єкту небезпеки може розглядатися окрема особистість, група осіб, населення, об'єкти народного господарства, елементи природного середовища. Система безпеки – комплекс заходів і засобів, спрямованих на досягнення безпечного стану об'єкту захисту.

Таким чином, безпека технічних систем може розглядатися як комплекс заходів і засобів, спрямованих на досягнення безпечного стану технічних систем любого рівня складності. Відповідно із принципом системності заходи і засоби безпеки поділяються на наступні групи, які послідовно розглядаються в курсі лекцій:

- правові і нормативно-технічні заходи;
- соціально-економічні заходи;
- організаційні заходи;

- засоби і заходи забезпечення гігієнічних і ергономічних умов праці із технічними системами;
- інженерно-технічні заходи і засоби забезпечення безпеки технічних систем в штатних умовах;
- заходи і засоби забезпечення безпеки технічних систем в надзвичайних ситуаціях.

Набуття компетентностей за курсом «Безпека технічних систем» продовжується під час самостійної роботи студента, під час консультацій із навчальним персоналом, а також під час виконання розрахунково-графічної роботи, спрямованої на здобуття знань щодо забезпечення безпечних умов праці та навколишнього середовища при проведенні досліджень та у виробничій діяльності за професійним спрямуванням.

Перевірка результатів навчання за курсом здійснюється шляхом проведення поточних опитувань, модульних контролів; захистом розрахунково-графічної роботи; підготовкою та здачею усного екзамену [2].

Підготовка розділу «Охорона праці і безпека технічних систем» в дипломних роботах магістрів є завершальним кваліфікаційним етапом щодо набуття компетентностей з культури безпеки взагалі і з курсу «Безпека технічних систем» зокрема.

#### **ЛІТЕРАТУРА:**

1. Гогунський В.Д. Принципи формування компетентностей з культури безпеки у студентів ВНЗ. / В.Д Гогунський, І.А. Ярова // Проблеми цивільного захисту населення та безпеки життєдіяльності: сучасні реалії України: Матеріали III Всеукраїнської заочної науково-практичної конференції. – К.: НПУ ім. М.П. Драгоманова, 2017. – С. 37 – 38.

2. Оборський Г.О. Підходи до оцінювання компетентностей та вимірювання результатів навчання освітніх програм / Г.О. Оборський, Л.М. Перпері, Г.М. Голобородько // Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – №19 – С. 157 – 162.

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Адашевський В.М.</i> ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ БІОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРСТИК СИСТЕМИ «СПОРТСМЕН-ЖЕРДИНА»	3
<i>Анділахай О.О.</i> РОЗРОБКА УСТАНОВОК ДЛЯ АБРАЗИВНОЇ ОБРОБКИ ЗАТОПЛЕНИМИ СТРУМЕНЯМИ	6
<i>Анкуда С.Н., Хейфец И.М., Алексеева Т.А., Федоров В.П.</i> ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	9
<i>Антончик К.А., Грецкий Н.Л., Пынькин А.М., Семенов Д. В., Хейфец М.Л.</i> МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ	13
<i>Беломитцев А.С., Дружинін Є.І., Морачковський О.К.</i> АЛГОРИТМ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕДІНКИ НЕЛІНІЙНИХ СИСТЕМ	16
<i>Витязь П.А., Сенють В.Т., Ивашко В.С., Лойко В.А., Хейфец М.Л., Чигилейчик В.А., Колмаков А.Г.</i> ПОСЛОЙНЫЙ СИНТЕЗ ГРАДИЕНТНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ БРОНЗЫ С ДОБАВКОЙ НАНОАЛМАЗОВ	19
<i>Гуцаленко Ю.Г., Севидова Е.К.</i> ИНСТРУМЕНТЫ ИЗ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ И ТОКОЗАЩИТОЙ КОРПУСА ДЛЯ АЛМАЗНО-ИСКРОВОГО ШЛИФОВАНИЯ НА УНИВЕРСАЛЬНЫХ СТАНКАХ	22
<i>Гуцаленко Ю.Г., Ивкин В.В., Руднев А.В., Севидова Е.К., Степанова И.И.</i> НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННОГО МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ ПОСАДОЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ АЛМАЗНЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ КРУГОВ С АЛЮМИНИЕВЫМИ КОРПУСАМИ	25
<i>Гущин А.М., Зелинский С.А.</i> ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЛИНЕЙНЫХ МОТОР-ШПИНДЕЛЕЙ	28
<i>Дерев'янченко О.Г.</i> АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОТРИМАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ТЕКСТУРИ ЗОН ЗНОШУВАННЯ ТА РУЙНУВАННЯ ІНСТРУМЕНТІВ З ПОЗИЦІЙ ПОБУДОВИ ВІДПОВІДНИХ КЛАСИФІКАТОРІВ	30
<i>Дерев'янченко А.Г., Гнатюк А.П., Жеглова В.М., Паленый Ю.Г., Скачко И.В.</i> КОМПЛЕКСНЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ	33



<i>Дитиненко С.А.</i> ОКОНЧАТЕЛЬНОЕ ШЛИФОВАНИЕ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ ИЗДЕЛИЙ АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СВЯЗКАХ	36
<i>Жовтобрюх В.А.</i> СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ	39
<i>Жовтобрюх В.А.</i> ВЫСОКОЭФФЕКТИВНАЯ ОБРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ И ЖАРОПРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ	43
<i>Жовтобрюх В.А.</i> ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ ЧУГУНА РЕЗАНИЕМ	46
<i>Жовтобрюх В.А.</i> ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЧЕРНОВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ	49
<i>Кленов О.С.</i> ЭФФЕКТИВНЫЕ УСЛОВИЯ ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО РЕЗАНИЯ	52
<i>Клименко С.А., Клименко С.Ан., Манохин А.С., Копейкина М.Ю.</i> НАПРЯЖЕНИЯ НА ПЕРЕДНЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ИНСТРУМЕНТОВ С ПСТМ НА ОСНОВЕ СВН	57
<i>Ковальов В.Д., Васильченко Я.В., Антонюк В.С., Волошин О.І., Клочко О.О., Рябченко С.В.</i> НАУКОВІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА КРУПНОГАБАРИТНИХ РЕДУКТОРІВ	59
<i>Ковалевська О.С., Ковалевський С.В., Ємець В.В.</i> МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧОЇ ОБЛАСТІ МОБІЛЬНОГО ВЕРСТАТА- РОБОТА НА БАЗІ ДЕЛЬТА-МЕХАНІЗМУ	62
<i>Ковалевський С.В., Ковалевська О.С., Кошевой А.О.</i> СПЕКТРАЛЬНА ДІАГНОСТИКА НЕПЕРЕТОЧУВАНИХ ПЛАСТИН ДЛЯ СКЛАДНИХ ФРЕЗ	65
<i>Коновалов И.П.</i> ИМПЛЕМЕНТАЦИЯ СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ТРАЕКТОРИИ ИНСТРУМЕНТА ПРИ СОЗДАНИИ САПР РАСКРОЙ	68
<i>Корзун А.Е., Волотовский Ф.А., Пынькин А.М.</i> ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ СИСТЕМ ХИМВОДОПОДГОТОВКИ ДЛЯ БЕЛОРУССКОЙ АЭС	72
<i>Кремнев Г.П., Бердичевский Е.Г.</i> ПОДГОТОВКА БАКАЛАВРОВ-МЕХАНИКОВ С РАСШИРЕНИЕМ ВОЗМОЖНОСТЕЙ В БАЗОВЫХ ДИСЦИПЛИНАХ	76

<i>Лавінський Д.В., Морачковський О.К.</i> ДО АНАЛІЗ ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНОГО ДЕФОРМУВАННЯ СКЛАДЕНОГО ІНДУКТОРА ПРИ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНІЙ ОБРОБЦІ МАТЕРІАЛІВ	81
<i>Ларшин В.П., Лищенко Н.В., Рябченко С.В.</i> ИСПЫТАНИЯ ВЫСОКОПОРИСТОГО ШЛИФОВАЛЬНОГО КРУГА	84
<i>Лищенко Н.В., Ларшин В.П., Ковальчук А.Н., Нежебовский В.В.</i> ЗУБОШЛИФОВАНИЕ ВЫСОКОПОРИСТЫМИ КРУГАМИ НА СТАНКЕ С ЧПУ	88
<i>Лищенко Н.В., Ларшин В.П.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПРИПУСКА НА ЗУБОШЛИФОВАНИЕ	92
<i>Марчук В.І., Марчук І.В.</i> ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТОЧНОСТІ ДЕТАЛЕЙ В ПЕРЕНАЛАГОДЖУВАЛЬНОМУ ПІДШИПНИКОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ	95
<i>Новиков Г.В.</i> НОВЫЕ МОНОГРАФИИ О СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ МАШИНОСТРОЕНИЯ	98
<i>Новиков Д.Ф.</i> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА НА ОСНОВЕ ВНЕДРЕНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО МЕНЕДЖМЕНТА	101
<i>Новиков Ф.В.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЯ	104
<i>Пермяков А.А., Шелковой А.Н., Клочко А.А., Гасанов М.И., Набока Е.В.</i> ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСОВ КРУПНОГАБАРИТНЫХ РЕДУКТОРОВ	108
<i>Полянский В.И.</i> УТОЧНЕННЫЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СИЛОВОЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ	110
<i>Рябенков И.А.</i> ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ	113
<i>Савченко Н.Ф.</i> ТЕХНОЛОГИЯ ПЛАСТИНИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КОРРОЗИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ИЗДЕЛИЙ	116
<i>Самотугин С.С., Христенко О.А.</i> ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННОГО ПЛАЗМЕННОГО НАГРЕВА	

ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РЕЗЬБОНАРЕЗНОГО ИНСТРУМЕНТА	119
<i>Сенють В.Т.</i> ВЛИЯНИЕ МЕХАНОАКТИВАЦИИ И ЛЕГИРОВАНИЯ УГЛЕРОДОМ ГЕКСАГОНАЛЬНОГО НИТРИДА БОРА НА СТРУКТУРУ СПЕЧЕННОГО НА ЕГО ОСНОВЕ МАТЕРИАЛА	122
<i>Тихенко В.Н., Волков А.А.</i> ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕДЛЕННЫХ СКОРОСТЕЙ ПОДАЧ РАБОЧИХ ОРГАНОВ В СТАНОЧНЫХ ГИДРОПРИВОДАХ	125
<i>Федоренко Ю.О., Тихенко В.М.</i> БИОМАТЕРИАЛИ НА ОСНОВІ ГІДРОКСИПАТИТУ	127
<i>Тришевський О.І.</i> КОМПЛЕКСНА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ ВАЛКОВОГО ФОРМУВАННЯ ПЕРІОДИЧНИХ ЗАМКНУТИХ ГОФРІВ	129
<i>Шелковой А.Н., Клочко А.А., Набока Е.В., Новиков Ф.В.</i> СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ ТОЧНОСТИ, КАЧЕСТВА И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЗУБООБРАБОТКИ ЗАКАЛЕННЫХ КРУПНОМОДУЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС	132
<i>Шкурутий В.Г., Новиков Ф.В.</i> ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОПТИЧЕСКИ ФУНКЦИО- НАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ	135
<i>Щербаков В.Г., Астрашаб Е.В., Одарченко, В.И., Казначеева Д.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ РОСТА ДИФФУЗИОННЫХ СЛОЕВ НА ЖЕЛЕЗНЫХ СПЛАВАХ ПРИ БОРИРОВАНИИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ	138
<i>Ярова І.А., Яровий Ю.В.</i> КОНЦЕПЦІЯ КУРСУ «БЕЗПЕКА ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ»	141

# **НОВЫЕ И НЕТРАДИЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В РЕСУРСО- И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИИ**

(Материалы международной научно-технической  
конференции, 20–22 сентября 2017 года, г. Одесса)

Редакторы: Яровой Ю.В.  
Новиков Ф.В.

Подписано в печать 15.08.2017  
Формат 60×84 × 1/16  
Бумага типографская  
Печать офсетная. Уч. изд. л. 9,1  
Тираж 200 экз.

Одесский национальный политехнический университет  
65044, г. Одесса, проспект Шевченко, 1