

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

**ПОЛЯНСЬКИЙ ВОЛОДИМИР ІВАНОВИЧ**



УДК 621.923:681.2

**ОСНОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ТА ЗНИЖЕННЯ  
ТРУДОМІСТКОСТІ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ СКЛАДНОПРОФІЛЬНОЇ  
ФОРМУЮЧОЇ ОСНАСТКИ ДЛЯ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ**

Спеціальність 05.02.08 – технологія машинобудування

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант** доктор технічних наук, професор  
**Новіков Федір Васильович**,  
Харківський національний економічний університет  
імені Семена Кузнеця, професор кафедри технологій  
та безпеки життєдіяльності.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Ковалевський Сергій Вадимович**,  
Донбаська державна машинобудівна академія,  
завідувач кафедри інноваційних технологій і  
управління;

доктор технічних наук, доцент  
**Купріянов Олександр Володимирович**,  
Українська інженерно-педагогічна академія,  
м.Харків, проректор з наукової роботи;

доктор технічних наук, доцент  
**Ліщенко Наталя Володимирівна**,  
Одеська національна академія харчових технологій,  
доцент кафедри фізики і матеріалознавства

Захист відбудеться 12 травня 2021 р. о 11 годині на засіданні вченої ради Д64.050.12 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розіслано 12 квітня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Ніна ЗУБКОВА

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** В даний час промислове виробництво складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості зазнало суттєвих змін, оскільки ринок вимагає значного розширення її номенклатури виробництва і, відповідно, переходу від великосерійного до дрібносерійного та навіть штучного виробництва. Це приводить до різкого збільшення трудомісткості виконання технологічних операцій механічної обробки, особливо на фінішних операціях шліфування. Реалізувати виготовлену в цих умовах складнопрофільну формуючу оснастку на світових ринках надзвичайно складно, оскільки за вартістю вона стає неконкурентоспроможною. Тому виникла проблема суттєвого підвищення продуктивності обробки при одночасному забезпеченні високих показників якості та точності оброблюваних поверхонь. Спроби вирішити цю проблему шляхом вдосконалення діючих технологій механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки виявилися малоефективними. Як показує практика, більш ефективним рішенням є застосування сучасних технологій механічної обробки на високооберткових металорізальних верстатах із ЧПУ типу "обробний центр" прогресивними різальними лезовими твердосплавними і керамічними інструментами зі зносостійкими покриттями зарубіжного виробництва. Завдяки цим технологіям з'явилася можливість суттєвого підвищення якості, точності та продуктивності обробки, виготовлення високоточних деталей машин. Тому в даний час на машинобудівних підприємствах України відбувається технічне переозброєння виробництва сучасними технологіями механічної обробки, обладнанням і різальними інструментами. В результаті продукція, що виготовляється, за якістю та собівартістю стає конкурентоспроможною на світових ринках. Однак, як встановлено на практиці, вказані технології недостатньо вивчені, фактично відсутні науково обґрунтовані рекомендації щодо вибору раціональних методів механічної обробки, режимів різання та характеристик різальних інструментів для їх ефективного застосування на вітчизняних промислових підприємствах. Це стримує їх впровадження у виробництво на підприємствах України. Тому дану роботу присвячено вирішенню важливої та актуальної науково-прикладної проблеми теоретичного визначення, обґрунтування та реалізації нових технологічних можливостей підвищення якості, точності, продуктивності та зниження трудомісткості механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки шляхом зниження її теплової та силової напруженостей за рахунок застосуванням сучасних високооберткових металорізальних верстатів із ЧПУ типу "обробний центр" та прогресивних різальних лезових твердосплавних і керамічних інструментів зі зносостійкими покриттями. Вирішення даної проблеми є важливим і актуальним напрямом розвитку як науки, так і вітчизняного машинобудування. Для вибору найкращих варіантів механічної обробки в роботі запроваджено теоретичне та експериментальне порівняння основних технологічних параметрів шліфування та лезової обробки.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.**

Виконання дисертаційної роботи пов'язане із науковою тематикою кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" НТУ "ХПІ". Дисертаційна робота виконана відповідно до визначених пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки на період до 2020 року Закону України "Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки". Розроблені здобувачем сучасні технологічні процеси механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості впроваджено у виробництво ТОВ "Імперія металів". Здобувач брав безпосередню участь як керівник тем у виконанні щорічно більше 250 господарсько-розрахункових робіт у ТОВ "Імперія металів" із розроблення та виготовлення складнопрофільної формуючої оснастки для підприємств харчової промисловості Міністерства аграрної політики та продовольства України.

**Мета і завдання дослідження** – теоретичне визначення й обґрунтування умов суттєвого підвищення якості, точності, продуктивності й зниження трудомісткості механічної обробки шляхом зниження її теплової й силової напруженостей та на цій основі розроблення ефективних технологічних процесів обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості із застосуванням сучасних високооберткових металорізальних верстатів із ЧПУ типу "обробний центр" та прогресивних різальних лезових твердосплавних і керамічних інструментів зі зносостійкими покриттями.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Аналіз предметної області та прийняття обмежень на область досліджень.

2. Розроблення узагальнених математичних моделей визначення параметрів теплових процесів при шліфуванні й лезовій обробці з урахуванням аналітично встановленого розподілу тепла, яке виникає при різанні та надходить в поверхневий шар оброблюваної деталі, стружки, що утворюються, та охолоджувальну рідину.

3. Теоретичне обґрунтування шляхів підвищення якості та продуктивності механічної обробки на основі зниження температури різання за умови досягнення глибиною проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі кінцевого значення.

4. Розроблення уточнюючої математичної моделі визначення параметрів силової напруженості лезової обробки та теоретичне обґрунтування умов зниження енергоємності та сили різання.

5. Розроблення уточнюючої математичної моделі визначення пружного переміщення, що виникає в технологічній системі при механічній обробці, та теоретичне обґрунтування умов підвищення точності й продуктивності механічної обробки.

6. Визначення технологічних можливостей підвищення якості, точності, продуктивності та зниження трудомісткості механічної обробки

складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості шляхом застосування технологій високошвидкісного різання.

7. Розроблення та впровадження у виробництво ефективних технологічних процесів механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості.

*Об'єкт дослідження* – технологічні процеси механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості.

*Предмет дослідження* – теоретичне та експериментальне обґрунтування та встановлення раціональних структур і параметрів технологічних процесів механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості, які забезпечують суттєве підвищення якості, точності, продуктивності та зниження трудомісткості обробки.

**Методи дослідження.** Теоретичні дослідження проводилися із використанням методів, що базуються на фундаментальних положеннях технології машинобудування, теорії різання матеріалів, опору матеріалів, теплофізики, математичного аналізу та математичного моделювання. Вирішення задач дисертаційної роботи забезпечувалося використанням системного підходу та раціональним поєднанням теоретичних і експериментальних досліджень, узагальненням та аналізом отриманих результатів. При проведенні експериментальних досліджень технологічних параметрів механічної обробки (параметрів шорсткості та точності оброблених поверхонь, твердості матеріалу деталі, потужності обробки) використовували апарат математичної статистики, застосовували переносний прилад для вимірювання шорсткості поверхні Hommel TESTER W5, нутроміри, цифрові штангенциркулі із ціною ділення 0,01 мм, портативний тестер твердості NOVOTEST, струмовимірювальні кліщі.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

##### ***Вперше:***

1. Розроблено теоретичні підходи до визначення технологічних можливостей підвищення якості та зниження трудомісткості механічної обробки за рахунок зниження її теплової й силової напруженостей, що дозволяє науково обґрунтовано підходити до встановлення та вибору раціональних структур і параметрів технологічних процесів механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості.

2. Проведено узагальнення теоретичних рішень щодо визначення параметрів теплового процесу при механічній обробці із урахуванням досягнення кінцевого значення глибини проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі, що дозволяє аналітично визначити розподіл тепла, яке надходить в поверхневий шар оброблюваної деталі, стружку й охолоджувальну рідину, та з єдиних позицій встановити аналітичні залежності для розрахунку температури різання при шліфуванні й лезовій обробці та на цій основі виявити найбільш ефективні напрями її зменшення.

3. Запропоновано новий універсальний технологічний параметр механічної обробки – максимальну температуру різання, при досягненні якої

все тепло, що виділяється при різанні, надходить в стружку, та яка визначається відношенням енергоємності обробки до добутку питомої теплоємності й щільності оброблюваного матеріалу, що дозволяє порівнювати цей технологічний параметр із температурою плавлення оброблюваного матеріалу та в разі перевищення застосовувати технологічні прийоми його зниження для різних технологій механічної обробки.

4. Теоретично обґрунтовано технологічні можливості зниження температури різання при переривчастому шліфуванні за рахунок суттєвого зниження довжин робочих виступів переривчастого круга, що дозволило уточнити технологічні умови ефективного застосування переривчастого шліфування із забезпеченням високоякісної бездефектної обробки.

5. Розширено технологічні можливості математичної моделі визначення температури різання при лезовій обробці, в якій враховано періодичні зсуви елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу в зоні різання шляхом періодичного переміщення в часі теплового джерела вздовж адіабатичних стержнів, які умовно розташовані перпендикулярно до оброблюваної поверхні та представляють технологічний припуск, що дозволило уточнити розрахункові значення температури різання при лезовій обробці та привести їх у відповідність до експериментальних значень.

6. Теоретично та експериментально обґрунтовано технологічні можливості суттєвого зниження максимальної температури різання та підвищення техніко-економічних показників механічної обробки на фінішних операціях шляхом переходу від шліфування до сучасних технологій високошвидкісного різання (точіння, розточування та фрезування на сучасних високооберткових металорізальних верстатах із ЧПУ типу "обробний центр" різальними твердосплавними і керамічними інструментами зі зносостійкими покриттями), що дозволило забезпечити високу якість та суттєво знизити трудомісткість механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості, забезпечити високий рівень її конкурентоспроможності на світових ринках.

#### ***Одержали подальший розвиток і поліпшення***

7. Математична модель визначення параметрів силової напруженості при лезовій обробці (енергоємності та сили різання), яка відрізняється від існуючих моделей тим, що у формуванні умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу переважає радіальна складова сили різання внаслідок інтенсивного тертя в зоні різання, що дозволило привести у відповідність розрахункові й експериментальні значення умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу та на цій основі обґрунтувати умови зниження енергоємності обробки та сили різання.

8. Математична модель визначення пружного переміщення, що виникає в технологічній системі при механічній обробці, яка відрізняється від існуючих моделей тим, що узагальнено аналітичний опис пружного переміщення при шліфуванні та лезовій обробці, що дозволило із єдиних позицій із урахуванням енергоємності провести порівняння величин пружного переміщення для різних

технологій механічної обробки та вибрати найбільш ефективні варіанти високоточної й високопродуктивної фінішної обробки.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що на основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень розроблено ефективні технологічні процеси механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості із застосуванням сучасних високооберткових металорізальних верстатів із ЧПУ типу "оброблювальний центр" та різальних лезових твердосплавних і керамічних інструментів зі зносостійкими покриттями закордонного виробництва, що дозволило суттєво підвищити якість, точність, продуктивність та знизити трудомісткість обробки. Розроблено методики розрахунку раціональних структур і параметрів технологічних процесів механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості, що дозволило визначити раціональні режими різання та характеристики різальних інструментів, які забезпечують значне підвищення продуктивності обробки для заданих значень температури та сили різання.

Розроблені технологічні процеси механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості впроваджено в основне виробництво ТОВ "Імперія металів" із економічним ефектом 3,86 млн гривень, що дозволило забезпечити виготовлення високоякісної складнопрофільної формуючої оснастки для підприємств харчової промисловості Міністерства аграрної політики та продовольства України: ПАТ "Вінницька кондитерська фабрика", ПАТ "Київська кондитерська фабрика "Рошен", ТОВ "Бісквітний комплекс "Рошен", ТОВ "АВК КОНФЕКШІНЕРІ", ПАТ "Виробниче об'єднання "КОНТІ", ПрАТ "Харківська бісквітна фабрика", ТОВ "Виробничо-кондитерська група "Лісова казка", ЗАТ "Житомирські ласощі".

Результати теоретичних і експериментальних досліджень роботи використовуються в навчальному процесі кафедри "Технологія машинобудування та металорізальні верстати" НТУ "Харківський політехнічний інститут" та Економіко-технологічному інституті імені Роберта Ельворті (м. Кропивницький).

**Особистий внесок здобувача** полягає у формулюванні робочої гіпотези, мети і завдань досліджень; розробленні математичних моделей визначення технологічних параметрів механічної обробки, що дозволяють на основі отриманих теоретичних рішень виявити, обґрунтувати та реалізувати нові технологічні можливості суттєвого підвищення якості, точності, продуктивності та зниження трудомісткості механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості.

Особистий внесок автора в роботах, що надруковані в співавторстві, полягає в наступному.

Особисто автору належать результати аналітичного визначення та аналіз параметрів силової та теплової напруженостей механічної обробки, встановлені технологічні умови зниження сили та температури різання [3, 5, 13, 26 – 32,

49 – 51, 52, 53, 55]; обґрунтування технологічних параметрів шліфування та абразивної обробки, їх взаємозв'язків та умов їх формування [4, 6 – 10, 46 – 48].

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові положення і результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на Міжнародних наукових конференціях та семінарах: "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (Харків, 2016); "Високі технології: тенденції розвитку" (Харків, 2020); "Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении" (Одеса, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020); "Фізичні та комп'ютерні технології" (Харків, 2016, 2017); "Качество, стандартизация, контроль: теория и практика" (Одеса, 2017, 2019); "Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте" (Свалява, 2017); "Високі технології: тенденції розвитку" (Одеса, 2018); "Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво" (Краматорськ, 2018); National scientific conference with international participation "CONFERENG 2018" (TARGU – IJU, Romania, 2018); "Современные вопросы производства и ремонта в промышленности и на транспорте" (Кошице, 2019; Тбілісі, 2020); "Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії" (Харків, 2019); 3<sup>rd</sup> International Conference on Design, Simulation, Manufacturing DSMIE-2020 (Kharkiv, 2020); 2-га Міжнародна конференція Грабченко з передових виробничих процесів (InterPartner-2020) (Одеса, 2020).

**Публікації.** Результати дисертаційної роботи опубліковано у 64 наукових працях, з яких 2 монографії (у співавторстві), 3 статті у виданнях, що належать до наукометричної бази Scopus, 37 статей у наукових фахових виданнях України, 6 публікацій у періодичних виданнях іноземних держав, 3 патенти України на корисну модель, 13 публікацій у матеріалах міжнародних конференцій.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертація складається з анотації двома мовами, вступу, 8 розділів, висновків і додатків. Загальний обсяг дисертації – 406 сторінок, з яких 264 сторінки основного тексту. Дисертація містить 151 рисунок, 36 таблиць, посилання до 264 літературних джерел та 3 додатки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** дана загальна характеристика роботи, у якій обґрунтована актуальність, новизна і практична значимість одержаних результатів, визначено об'єкт, предмет дослідження, сформульовані мета і задачі досліджень. Наведено особистий внесок здобувача у виконану роботу, основні дані з апробації дослідження, публікації, відомості про структуру дисертації.

**У першому розділі** проведено аналіз найбільш суттєвих проблем технологічного забезпечення високоякісної механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості. Для цього проведено аналіз основних видів складнопрофільної формуючої оснастки та діючих технологій її механічної обробки. Показано, що в умовах



дрібносерійного та штучного виробництва, які є характерними для обробки складнопрофільної формуючої оснастки, складно одночасно досягти високих показників якості, точності, продуктивності та трудомісткості. Як показує практика, забезпечення високоякісної обробки на фінішних операціях супроводжується підвищенням трудомісткості та зниженням продуктивності, а це підвищує собівартість обробки та знижує конкурентоспроможність оброблених виробів.

На основі аналізу літературних джерел і практичного досвіду встановлено, що основним шляхом вирішення цих завдань може бути перехід на фінішних операціях від технологій шліфування до технологій лезової обробки, особливо за рахунок застосування сучасних технологій механічної обробки, високооберткових металорізальних верстатів із ЧПУ типу "обробний центр" та прогресивних різальних лезових твердосплавних і керамічних інструментів зі зносостійкими покриттями закордонного виробництва. Однак, як показує практика, потенційні можливості цих технологій недостатньо вивчені. Це ускладнює їх ефективне використання на промислових підприємствах та вимагає проведення подальших досліджень і розроблення рекомендацій щодо їх раціонального практичного застосування. Тому у розділі розглядаються умови максимального використання потенційних можливостей цих технологій на основі зниження теплової й силової напруженостей механічної обробки. Показано, що в даний час відсутні достатньо надійні методи розрахунку параметрів теплової й силової напруженостей, оскільки вони засновані на використанні експериментальних даних і справедливі для конкретних умов обробки. Також відсутні узагальнюючі математичні моделі визначення температури та сили різання при шліфуванні й лезовій обробці. Це не дозволяє встановити їх дійсні технологічні можливості та провести вибір найбільш ефективних технологій механічної обробки, які забезпечують максимально можливі показники якості та трудомісткості за даних умов обробки. Все це вказує на необхідність розроблення ефективних технологічних процесів механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості на основі зниження її теплової й силової напруженостей, що дозволять забезпечити суттєве підвищення якості, точності, продуктивності та зниження трудомісткості обробки.

Проведений аналіз літературних джерел дозволив обґрунтувати актуальність поставленої проблеми та сформулювати мету роботи й завдання досліджень, які необхідно виконати для її досягнення.

**У другому розділі** обґрунтовано напрям і загальну методикку дослідження. Наведено структурну схему роботи. Сформульовано методичні підходи до створення математичних моделей визначення технологічних можливостей підвищення якості, точності, продуктивності та зниження трудомісткості механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки шляхом зниження її теплової та силової напруженостей. Показано, що експериментальні дослідження здійснювались на сучасних високооберткових металорізальних верстатах із ЧПУ типу "обробний центр" моделей: QUASER

MV204P із ЧПУ FANUC 31iB; TAKISAWA NEX-910; MV204P із ЧПУ FANUC – 31iB (Тайвань); EX910, TAKISAWA, TT-42, QUICKTECH (Тайвань); FANUC ROBODRILL  $\alpha$ -D21iB (Японія). Досліджувалися технологічні операції плоского та внутрішнього шліфування, розточування отворів, точіння та фрезерування деталей, виготовлених із сталі 3, сталі 45, сталі 40X, сталі 20X13, нержавіючої сталі 12X18H1T, титану BT-20, латуні ЛС59-1 (напівтвердої), берилієвої бронзи БрБНТ. При обробці використовувалися сучасні різальні лезові твердосплавні та керамічні інструменти зі зносостійкими покриттями закордонного виробництва. Для вимірювання технологічних параметрів механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки (параметрів шорсткості та точності оброблених поверхонь, твердості матеріалу деталі, потужності обробки) застосовувалися переносний прилад для вимірювання шорсткості поверхні Nommel TESTER W5, нутроміри, цифрові штангенциркулі із ціною ділення 0,01 мм, портативний тестер твердості NOVOTEST, струмовимірювальні кліщі. При проведенні експериментальних досліджень використовувався апарат математичної статистики.

У третьому розділі проведено теоретичне обґрунтування технологічних умов підвищення якості та продуктивності обробки при шліфуванні на основі зниження теплової напруженості процесу різання. Для цього на першому етапі роботи проведено аналіз спрощених розрахунків температури різання  $\theta$  при шліфуванні за координатою  $x$  із застосуванням розрахункової схеми, запропонованої проф. Якимовим О. В. (рис. 1, а).

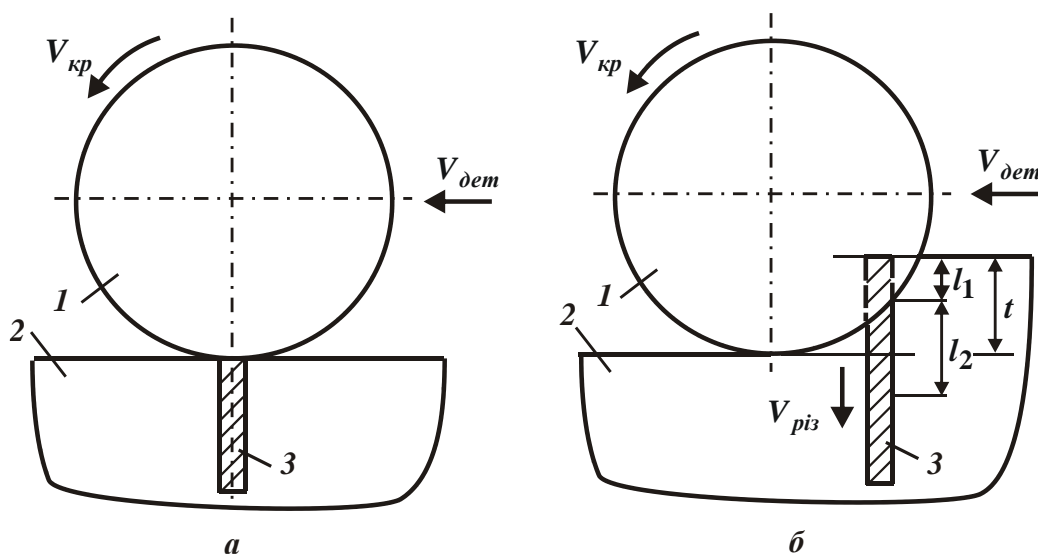


Рисунок 1 – Розрахункові схеми температури плоского шліфування:

1 – шліфувальний круг; 2 – деталь; 3 – адіабатичний стержень

Випадок 1. Диференційне рівняння теплопровідності матеріалу

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a^2 \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \text{ спрощено й подано у вигляді: } \frac{\theta}{\tau} = a^2 \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \text{ або } \frac{d^2 \theta}{dx^2} - \alpha \cdot \theta = 0,$$

де  $a = \lambda / c \cdot \rho$  – коефіцієнт температуропровідності оброблюваного матеріалу, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності оброблюваного матеріалу, Вт/м·К;

$c$  – питома теплоємність оброблюваного матеріалу, Дж/(кг·К);  $\rho$  – щільність оброблюваного матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – час обробки, с;  $\alpha = \frac{c \cdot \rho}{\lambda \cdot \tau}$ . За граничних

умов:  $\frac{d\theta}{dx}\Big|_{x=0} = -\frac{q}{\lambda}$ ;  $\theta|_{x \rightarrow \infty} = 0$ , маємо  $\theta = q \cdot \sqrt{\frac{\tau}{c \cdot \rho \cdot \lambda}} \cdot e^{-2z}$ , де  $z = \frac{x}{2 \cdot a \cdot \sqrt{\tau}}$ ;  
 $q$  – щільність теплового потоку, Вт/м<sup>2</sup>.

Випадок 2. Розглянуто відоме класичне рішення диференційного рівняння теплопровідності матеріалу із урахуванням початкової  $\theta|_{\tau=0} = 0$  та граничної

$$\frac{d\theta}{dx}\Big|_{x=0} = -\frac{q}{\lambda} \text{ умов: } \theta(z, \tau) = 2a\sqrt{\tau} \cdot \frac{q}{\lambda} \cdot \left[ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-z^2} - z \cdot (1 - \operatorname{erf}z) \right].$$

Випадок 3. Приймаючи диференціальне рівняння теплопровідності матеріалу  $\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a^2 \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2}$  у спрощеному вигляді  $\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} = 0$ , його рішення набуває

вигляду:  $\theta = q \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tau}{c \cdot \rho \cdot \lambda}}$ ;  $l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot \tau}{c \cdot \rho}}$ , де  $l_2$  – глибина проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі, м.

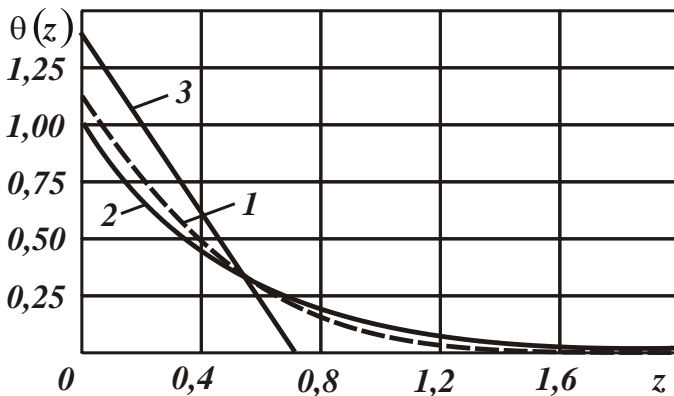


Рисунок 2 – Графіки функції  $\theta(z)$ :

1, 2, 3 – для випадків 1, 2, 3

за умови  $a \cdot \sqrt{\tau} \cdot q / \lambda = 1$

Недоліком наведених рішень у випадках 1 і 2 є невизначеність глибини проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі  $l_2$  (рис. 2), оскільки температура різання  $\theta$  не досягає кінцевого нульового значення, а лише асимптотично наближається до цього значення.

У випадку 3 температура різання  $\theta$  досягає нульового значення, що відповідає дійсності та дозволяє визначити кінцеве значення параметра  $l_2$ . При цьому

отримано:  $z = \frac{x}{2 \cdot a \cdot \sqrt{\tau}} = \frac{l_2}{2 \cdot a \cdot \sqrt{\tau}} = \frac{l_2 \cdot q}{2 \cdot \lambda} = \frac{\theta}{2} = \frac{1,414}{2} = 0,7071$ . Однак це

технологічне рішення справедливе при шліфуванні з незначною глибиною шліфування (рис. 1,а). Для більш точного визначення температури різання  $\theta$  в роботі отримала подальший розвиток математична модель визначення параметрів теплового процесу при шліфуванні, яка запропонована проф. Новіковим Ф. В. та Яценко С. М. Вона враховує перерізання шліфувальним кругом адіабатичних стержнів та рух теплового джерела углиб поверхневого шару оброблюваної деталі на задану глибину шліфування  $t$  із швидкістю  $V_{piz} = t/\tau$  (де  $\tau$  – час перерізання адіабатичного стержня, с, рис. 1.б). Зміна

температури в поверхневому шарі оброблюваного матеріалу підкоряється рішенню, отриманому у випадку 3 (рис. 2). Виходячи із цього, розрахунок температури різання  $\theta$  при шліфування виконано із урахуванням балансу тепла, яке надходить в стружки та в оброблювану деталь за рівнянням

$$c \cdot \rho \cdot S \cdot V_{\text{різ}} \cdot \int_0^{\tau} \theta \cdot d\tau + \int_0^{\tau} \frac{\lambda \cdot c \cdot \rho \cdot S^2}{N} \cdot \theta \cdot \frac{d\theta}{d\tau} \cdot d\tau = N \cdot \tau \quad (1)$$

або

$$c \cdot \rho \cdot V_{\text{різ}} \cdot \theta + \frac{\lambda \cdot c \cdot \rho}{\sigma \cdot V_{\text{різ}}} \cdot \theta \cdot \frac{d\theta}{d\tau} = \sigma \cdot V_{\text{різ}}, \quad (2)$$

де  $N = q \cdot S = \sigma \cdot V_{\text{різ}} \cdot S$  – потужність різання, Вт;  $S$  – площа поперечного перерізу адіабатичного стержня, м<sup>2</sup>;  $\sigma$  – умовне напруження різання, Н/м<sup>2</sup>;  $q = \sigma \cdot V_{\text{різ}}$ .

Рішення диференціального рівняння (2)

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{\text{max}}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{\text{max}}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{\text{різ}}^2 \cdot \tau}{\lambda}}, \quad (3)$$

де  $\theta_{\text{max}} = \sigma / (c \cdot \rho)$  – максимальна температура різання, град.

Розрахунками встановлено, що максимальна температура різання  $\theta_{\text{max}}$  досягається за умови надходження в стружки всього тепла, яке виділяється при шліфуванні. Вона цілком однозначно визначається умовним напруженням різання  $\sigma$ : чим менше  $\sigma$ , тим менше  $\theta_{\text{max}}$ . Тому максимальну температуру різання  $\theta_{\text{max}}$  слід розглядати новим універсальним технологічним параметром обробки, що визначає технологічні можливості не тільки методу шліфування, а й інших методів механічної обробки та дозволяє порівнювати їх за температурним критерієм і вибрати найбільш ефективні з них.

Встановлено, що у разі дії на зону різання охолоджувальної рідини або іншого технологічного середовища максимальна температура різання визначається залежністю  $\theta_{\text{max}} = \sigma \cdot (1 - k) / (c \cdot \rho)$ , де  $k < 1$  – частка тепла, що відводиться охолоджувальною рідиною із зони різання. Це принципово нове технологічне рішення, що показує, яким чином охолоджувальна рідина або інше технологічне середовище забезпечує зменшення температури різання  $\theta$  в результаті відведення тепла із зони різання. Виходячи із отриманої залежності, це досягається шляхом зменшення максимальної температури різання  $\theta_{\text{max}}$ . За певних умов охолодження зони різання максимальна температура різання  $\theta_{\text{max}}$  може стати менше температури плавлення оброблюваного матеріалу. Це забезпечить здійснення механічної обробки зі значною продуктивністю фактично без підвищення температури різання  $\theta$ , яка в цьому разі може дорівнювати максимальній температурі різання  $\theta_{\text{max}}$ .

При плоскому шліфуванні з урахуванням відомої залежності  $V_{\text{різ}} = V_{\text{дет}} \sqrt{t / 2R_{\text{кр}}}$  залежність (3) прийме вигляд

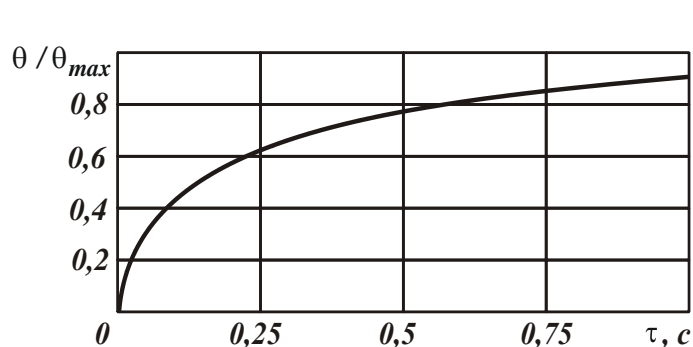


Рисунок 3 – Залежність відношення  $\theta/\theta_{max}$  від часу обробки  $\tau$

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho}{\lambda} Q_{num} \sqrt{\frac{t}{2 \cdot R_{кр}}}} \quad (4)$$

де  $V_{дет}$  – швидкість деталі, м/с;  
 $R_{кр}$  – радіус круга, м;  
 $Q_{num} = V_{дет} \cdot t$  – питома продуктивність обробки, м<sup>2</sup>/с.

На рис. 3 і в табл. 1 наведено значення параметрів теплового процесу при шліфуванні сталі ШХ15 ( $a = 8,4 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с), розраховані за залежністю (3) за умови  $V_{різ} = 3,33 \cdot 10^{-3}$  м/с. Як видно, зі збільшенням часу обробки  $\tau$  відношення  $\theta/\theta_{max}$  безперервно збільшується, асимптотично наближаючись до максимального значення  $\theta_{max} = \sigma/(c \cdot \rho)$ .

Таблиця 1 – Розрахункові значення параметрів теплового процесу шліфування

$\theta/\theta_{max}$		0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1
$e^{\theta/\theta_{max}}$		1,2214	1,4918	1,8221	2,2255	2,4596	2,7183
$(1 - \theta/\theta_{max}) \times$ $\times e^{\theta/\theta_{max}}$		0,9771	0,8951	0,7288	0,4451	0,24596	0
$V_{різ}^2 \cdot \tau / a$		0,02	0,11	0,32	0,81	1,4	$\infty$
$\tau, c$		0,0152	0,0833	0,2424	0,6136	1,061	$\infty$
$Q_{num} = 1000 \text{ мм}^2/\text{хв}$							
$t, \text{ мм}$		0,04	1,23	10,41	66,99	199,15	$\infty$
$V_{дет}, \text{ м/хв}$		25,0	0,813	0,096	0,015	0,005	0
$Q_{num} = 2000 \text{ мм}^2/\text{хв}$							
$t, \text{ мм}$		0,01	0,3075	2,602	16,665	49,788	$\infty$
$V_{дет}, \text{ м/хв}$		200,0	6,5	0,768	0,12	0,04	0
$Q_{num} = 4000 \text{ мм}^2/\text{хв}$							
$t, \text{ мм}$		0,0025	0,0769	0,6505	4,1663	12,447	$\infty$
$V_{дет}, \text{ м/хв}$		1600	52	6,144	0,96	0,32	0

Виходячи із табл. 1, в діапазоні зміни відношення  $\theta/\theta_{max} = 0 \dots 0,4$  в залежності від  $Q_{num} = V_{дет} \cdot t$  ефективно на практиці застосовувати технологічний процес багатопрохідного шліфування периферією круга зі збільшеною швидкістю деталі та незначною глибиною шліфування. Також ефективно зменшувати максимальну температуру шліфування  $\theta_{max} = \sigma/(c \cdot \rho)$

за рахунок зменшення параметра  $\sigma$  шляхом зменшення тертя зв'язки круга із оброблюваним матеріалом та підвищення різальної здатності круга.

В діапазоні зміни відношення  $\theta/\theta_{max} = 0,4 \dots 1,0$  ефективно застосовувати: технологічні процеси глибокого шліфування периферією круга із незначною швидкістю деталі та торцем круга із шириною шліфування, рівною діаметру круга; технологію розрізування матеріалів відрізним кругом; технологічні процеси фрезування циліндричною та торцевою фрезами, а також 3D-фрезування із шириною різання, рівною діаметру фрези.

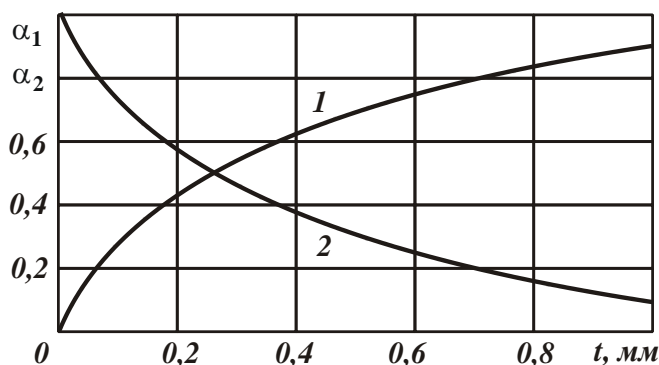


Рисунок 4 – Залежності  $\alpha_1$  (1) та  $\alpha_2$  (2) від глибини шліфування  $t$

Розрахунками встановлено, що частка тепла, яке надходить в стружки при шліфуванні, визначається виразом  $\alpha_1 = \theta/\theta_{max}$ , а частка тепла, яке надходить в поверхневий шар оброблюваної деталі, – виразом  $\alpha_2 = 1 - \theta/\theta_{max}$  (табл. 1, рис. 4). За умови  $\theta/\theta_{max} \rightarrow 1$  фактично все тепло, що виділяється при шліфуванні сталі ШХ15 ( $V_{det} = 15$  м/хв),

надходить в стружки. Для практичного здійснення цієї умови необхідно використовувати технології високошвидкісної обробки, які фактично виключають перенесення тепла, що утворюється при різанні, в поверхневий шар оброблюваної деталі та дозволяють підвищити якість та продуктивність обробки. Отже, використовуючи залежності (3) і (4), можна аналітично визначити кількість тепла, яке надходить в оброблювану деталь та в стружки. Це має велике практичне значення, оскільки при розрахунках температури різання характер розподілу тепла встановлюють на основі експериментальних даних, справедливих для конкретних технологічних умов обробки. В результаті не вдається в узагальненому вигляді визначити температуру різання в широких діапазонах зміни параметрів режиму різання, включаючи технології лезової обробки та шліфування.

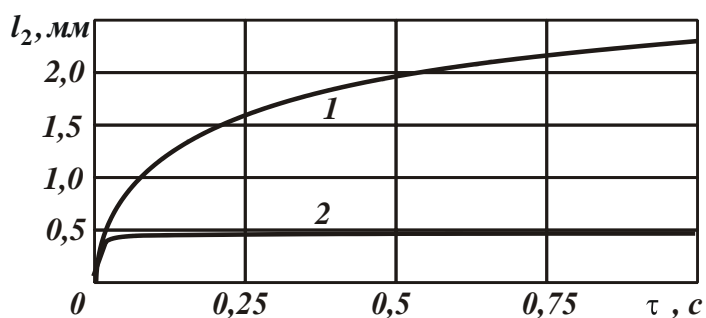


Рисунок 5 – Залежність параметра  $l_2$  від часу  $\tau$  при шліфуванні сталі ШХ15: 1; 2 –  $V_{різ} = 3,33 \cdot 10^{-3}$  м/с;  $16,65 \cdot 10^{-3}$  м/с

Розрахунками встановлено, що глибина проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі визначається залежністю

$$l_2 = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{V_{різ}} \cdot \frac{\theta}{\theta_{max}} \quad (5)$$

та змінюється за законом зміни відношення  $\theta/\theta_{max}$  (рис. 5).

Для оцінки достовірності отриманого рішення проведено порівняння розрахункових і експериментальних значень

параметрів теплового процесу  $\theta$ ,  $\theta_{max}$ ,  $\theta/\theta_{max}$  та  $l_2$ , отриманих академіком Ящерициним П. І. при шліфуванні сплаву ЖС6К із режимом різання:  $V_{dem}=0,1$  м/с;  $t=0,02$  мм;  $R_{кр}=0,1$  м та  $q=52 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup> (рис. 6).

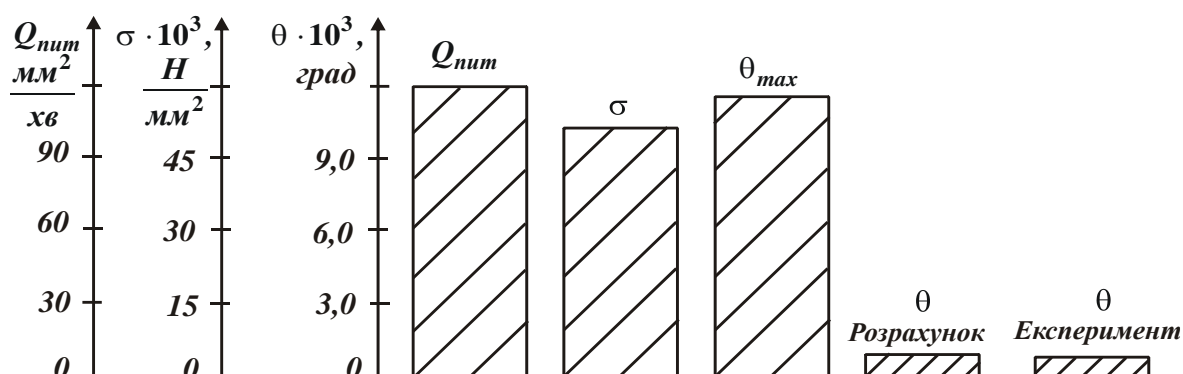


Рисунок 6 – Значення параметрів теплового процесу при шліфуванні

За залежностями (4) і (5) встановлено:  $\theta/\theta_{max}=0,095$ ;  $l_2=0,354$  мм. Розрахункове значення температури різання  $\theta=1109$  °С перевищує експериментальне значення  $\theta=1000$  °С на 11 %, що вказує на достовірність теоретичного рішення. В даному випадку максимальна температура різання  $\theta_{max}=11673,7$  °С значно перевищує температуру плавлення оброблюваного металу. Тому питому продуктивність обробки  $Q_{num}$  можна збільшувати лише в межах збільшення температури різання  $\theta$  до температури плавлення оброблюваного металу.

У четвертому розділі теоретично обґрунтовано умови розширення технологічних можливостей високопродуктивних методів шліфування за температурним критерієм. Виходячи із табл. 1, це досягається за рахунок застосування глибинного шліфування, оскільки при багатопрхідному шліфуванні зі збільшенням  $Q_{num}$  потрібно значно збільшувати  $V_{dem}$ , що не завжди можна здійснити. При глибинному шліфуванні також менше градієнт

температури  $\frac{\theta}{l_2} = \frac{\sigma}{\lambda} \cdot \frac{Q_{num}}{\sqrt{2t \cdot R_{кр}}}$  та більше параметр  $l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda \cdot t \cdot \sqrt{2t \cdot R_{кр}}}{c \cdot \rho \cdot Q_{num}}}$ ,

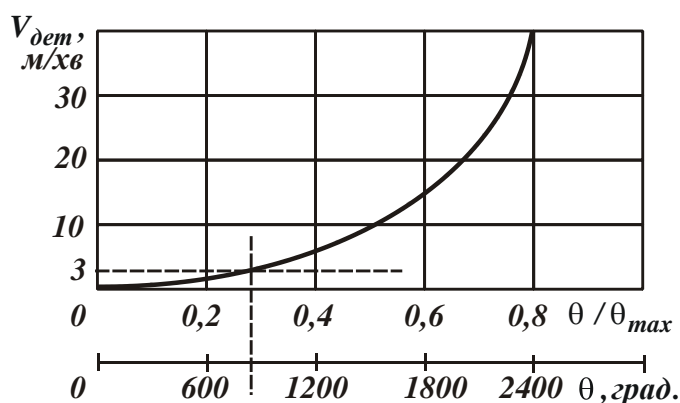


Рисунок 7 – Залежність  $V_{dem}$  від  $\theta/\theta_{max}$  і  $\theta$

що вказує на можливість підвищення якості обробки.

Для здійснення технології зубошліфування за методом профільного копіювання розраховано швидкість деталі  $V_{dem}$  за вихідних даних: оброблюваний матеріал – сталь 18ХГН2МФБ;  $t = 0,4$  мм; температура різання  $\theta = 1000$  °С. Встановлено  $V_{dem} = 3$  м/хв.

(рис. 7), тобто для здійснення цих умов обробки необхідно застосовувати технологію глибокого шліфування.

Отримані в роботі теоретичні рішення дозволили визначити умови підвищення ефективності застосування технології переривчастого шліфування (рис. 8). Розрахунками встановлено, що найменше значення температури різання досягається при однакових довжинах робочого виступу  $l_{вист}$  та вирізу  $l_{виріз}$  переривчастого круга

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{4 \cdot c \cdot \rho \cdot V_{piz0}^2 \cdot l_{вист}}{\lambda \cdot V_{кр}}}, \quad (6)$$

$V_{piz0}$  – швидкість перерізання адиабатичного стержня суцільним кругом, м/с;

$V_{кр}$  – швидкість круга, м/с.

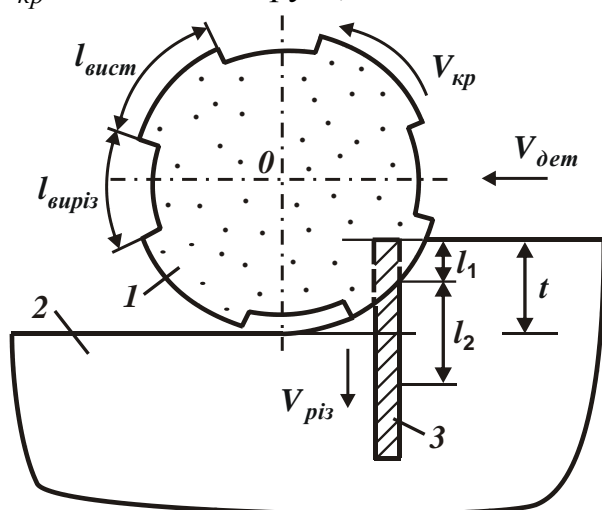


Рисунок 8 – Розрахункова схема температури різання при переривчастому шліфуванні: 1 – круг; 2 – деталь; 3 – адиабатичний стержень

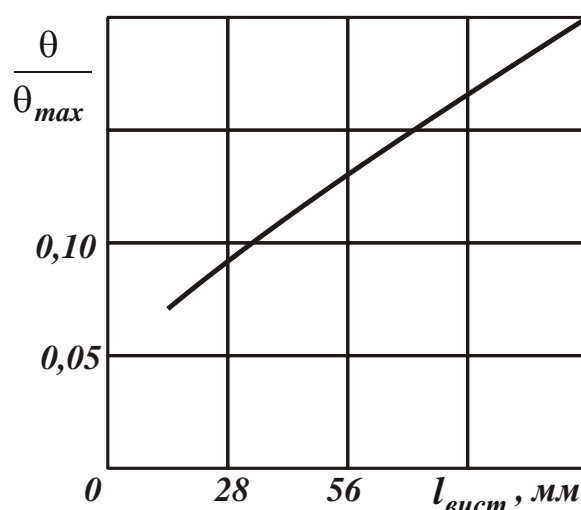


Рисунок 9 – Залежність відношення  $\theta/\theta_{max}$  від  $l_{вист}$  (оброблюваний матеріал – сталь ШХ15;  $V_{piz} = 3,33 \cdot 10^{-3}$  м/с;  $V_{кр} = 30$  м/с)

Таким чином встановлено, що для зменшення температури різання  $\theta$  при переривчастому шліфуванні, виходячи із залежності (6) необхідно зменшувати довжину робочого виступу переривчастого круга  $l_{вист}$  (рис. 9), збільшувати кількість робочих виступів на переривчастому крузі та швидкість круга  $V_{кр}$ . Це погодиться із відомими експериментальними даними професорів Якимова О. В. та Доброскока В. Л.

В роботі проведено оцінювання енергоємності обробки та максимальної температури різання за експериментальними даними. Для цього використано залежність для визначення енергоємності обробки (питомої роботи шліфування)

$$A_{num} = \frac{N}{Q} = \frac{P_z \cdot V_{кр}}{Q} = \frac{\sigma \cdot S_{сум} \cdot V_{кр}}{Q} = \sigma, \quad (7)$$

де  $N = P_z \cdot V_{кр}$  – потужність шліфування, Вт;  $Q = B \cdot t \cdot V_{дет}$  – продуктивність шліфування, мм<sup>3</sup>/с;  $P_z = \sigma \cdot S_{сум}$ ;  $S_{сум} = Q/V_{кр}$  – сумарна миттєва площа



поперечного перерізу зрізу всіма одночасно працюючими зернами шліфувального круга, м<sup>2</sup>.

На рис. 10 наведено розрахункові значення максимальної температури різання  $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$  із урахуванням відомих експериментальних значень

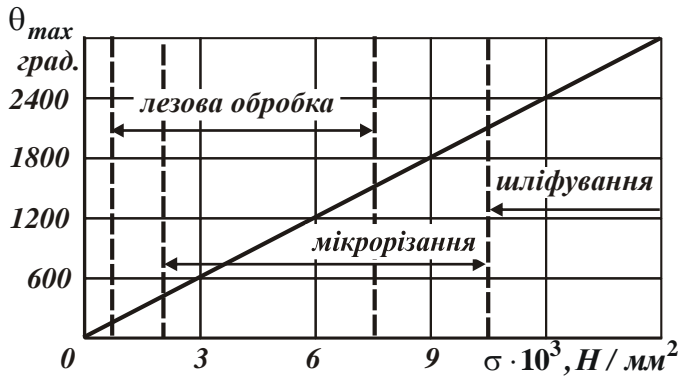


Рисунок 10 – Залежність  $\theta_{max}$  від  $\sigma$  для сталі 45 –  $c \cdot \rho = 5 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·град.)

умовного напруження різання  $\sigma$ , отриманих із застосуванням різних технологій лезової обробки, шліфування та при мікрорізанням одиничним зерном. При шліфуванні максимальна температура різання  $\theta_{max}$  приймає найбільші значення, що обумовлено інтенсивним тертям зв'язки круга із оброблюваним матеріалом.

Зменшити інтенсивність тертя в зоні різання,

максимальну температуру різання  $\theta_{max}$  та, відповідно, температуру різання  $\theta$  можна шляхом застосування прогресивної технології переривчастого шліфування, а також ефективних технологій електроерозійного та електрохімічного правлення алмазних кругів на металевих зв'язках, як це встановлено в роботах професорів Грабченко А. І. Беззубенко М. К., Федоровича В. О., Пижова І. М. Однак найбільш ефективним шляхом зменшення температури різання  $\theta$  є перехід від шліфування до сучасних технологій лезової обробки, які характеризуються значно меншими значеннями величин  $\sigma$  і  $\theta_{max}$ . Особливо це відноситься до технологій обробки різальними лезовими інструментами із синтетичних надтвердих матеріалів і сучасними збірними твёрдосплавними та керамічними інструментами зі зносостійкими покриттями закордонного виробництва.

**У п'ятому розділі** обґрунтовано технологічні умови підвищення якості та продуктивності механічної обробки на основі зниження її теплової й силової напруженостей. Для цього розглянуто два підходи до визначення температури різання при точінні: при рівномірному (рис. 11,а) та періодичному (рис. 11,б) переміщенні теплового джерела вздовж адіабатичного стержня.

При рівномірному переміщенні теплового джерела вздовж адіабатичного стержня (рис. 11,а) залежність для визначення температури різання (3), що справедлива при шліфуванні, в умовах точіння приймає вигляд

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot Q_{num} \cdot \tau \cdot \beta}, \quad (8)$$

де  $Q_{num} = V \cdot a_{зріз}$  – питома продуктивність обробки, м<sup>2</sup>/с;  $V$  – швидкість різання, м/с;  $a_{зріз}$  – товщина зрізу, м;  $\beta$  – умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу;  $\tau = a_{зріз} / V_{різ}$  – час обробки, с;  $V_{різ} = V \cdot \tau \cdot \beta$ .

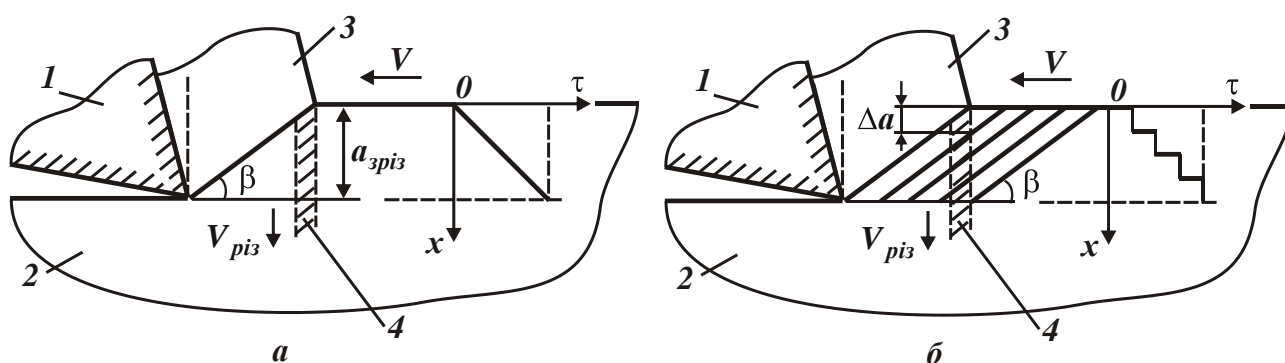


Рисунок 11 – Розрахункові схеми температури різання при точінні:  
1 – різець; 2 – деталь; 3 – стружка; 4 – адіабатичний стержень

Як випливає із залежності (8), температура різання при точінні визначається параметрами  $Q_{num} = V \cdot a_{zpiz}$  та  $\beta$ . Їх збільшення приводить до збільшення температури різання  $\theta$ . При цьому питома продуктивність обробки  $Q_{num}$  приймає відносно невеликі значення, які менше аналогічних значень, встановлених при шліфуванні (табл. 1). Це пов'язано із тим, що при шліфуванні має місце безперервний процес тертя зв'язки круга із оброблюваним матеріалом і рівномірне переміщення теплового джерела вздовж адіабатичного стержня. При точінні це переміщення відбувається періодично, що приводить до порушення закономірності зміни температури в часі (встановленої при шліфуванні) у зв'язку із періодичним відокремленням елементарних об'ємів матеріалу від його основної маси. В результаті значно більша частина тепла, що виникає в момент відокремлення елементарного об'єму матеріалу (порівняно із шліфуванням), надходить в стружку, а не в залишену частину адіабатичного стержня (рис. 11,б). Це приводить до зниження температури різання  $\theta$  при точінні, яка визначається на основі застосування залежностей

$$\frac{\theta}{\theta_{max}} = \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot V_{piz} \cdot l_2 ; \quad l_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot \tau_n ,$$

де  $\tau_n, \tau_{n-1}$  – час нагрівання адіабатичного стержня при його перерізанні на величини  $n \cdot V_{piz} \cdot d\tau$  та  $(n-1) \cdot V_{piz} \cdot d\tau$ , с;  $n$  – кількість перерізань стержня;  $d\tau = \tau/n$ ;  $\tau = a_{zpiz}/V_{piz}$  – час обробки, с;  $V_{piz} = V \cdot \operatorname{tg} \beta$ ;  $a_{zpiz} = S \cdot \sin \varphi$  – товщина зрізу, м;  $S$  – подача, мм/об.;  $\varphi$  – головний кут різця в плані.

Час нагрівання адіабатичного стержня при його перерізанні  $\tau_n$  визначається залежністю, наведеною в роботах проф. Новікова Ф. В.

$$\frac{\tau_n}{d\tau} = \left( \sqrt{1 + \frac{\tau_{n-1}}{d\tau}} - \alpha \right)^2 , \quad \text{де } \alpha = \frac{V_{piz} \cdot d\tau}{l_{20}} < 1 \text{ – безрозмірна величина; } l_{20} = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{c \cdot \rho}} \cdot d\tau \text{ –}$$

глибина проникнення тепла в адіабатичний стержень за час  $d\tau$ , м.

Для вихідних даних: точіння сталі 45 різцем із гексаніту-Р з  $\varphi = 45^\circ$ ;  $V = 100$  м/хв.;  $S = 0,07$  мм/об.;  $t = 0,2$  мм;  $a = 8 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с;  $\beta \approx 20^\circ$  (за даними

професора Коломійця В. В.), розрахунками встановлено:  $\tau = 0,824 \cdot 10^{-4}$  с;  $V_{\text{піз}} = 0,607$  м/с;  $a_{\text{піз}} = 0,05$  мм (табл. 2).

Виходячи із табл. 2 та рис. 12, встановлено, що зі зменшенням кількості перерізів  $n$  адіабатичного стержня температура різання  $\theta$  зменшується. При  $n \rightarrow \infty$  приходимо до розрахункової схеми температури різання із рівномірним переміщенням в часі теплового джерела вздовж адіабатичного стержня (рис.11,а), що має місце при шліфуванні. Однак це призводить до підвищених значень температури різання  $\theta$  при точінні. Тому розрахунок температури різання при точінні необхідно виконувати за схемою обробки із періодичним переміщенням в часі теплового джерела вздовж адіабатичного стержня (рис.11,б). Це відповідає експериментальним даним. При обробці сталі 45 встановлено, що  $\sigma = 7 \cdot 10^3$  Н/мм<sup>2</sup>;  $n = 4$ ;  $\theta_{\text{max}} = 1400$  °С. Тоді  $\theta/\theta_{\text{max}} = 0,522$  і  $\theta = 730,8$  °С. При  $V = 100$  м/хв експериментальне значення температури різання  $\theta = 700$  °С (за даними професора Коломійця В. В.), тобто досягається висока збіжність розрахункових та експериментальних значень температури різання.

Таблиця 2 – Розрахункові значення параметрів теплового процесу при точінні

$n$	$d\tau \cdot 10^{-4}$ , с	$\alpha$	$\tau_n \cdot 10^{-4}$ , с	$l_2$ , МКМ	$\theta/\theta_{\text{max}}$
1	0,824	1,377	–	–	–
2	0,412	0,9737	0,000285	0,675	0,1
3	0,275	0,795	0,0145	4,817	0,3658
4	0,206	0,6885	0,02961	6,883	0,522
5	0,165	0,6158	0,041	8,1	0,6158
6	0,137	0,562	0,05	8,944	0,6729
7	0,118	0,52	0,0562	9,483	0,7191
8	0,103	0,487	0,06206	9,965	0,7558
9	0,0916	0,459	0,06648	10,313	0,7823
10	0,0824	0,435	0,07027	10,6	0,8042
11	0,075	0,415	0,073	10,81	0,8205

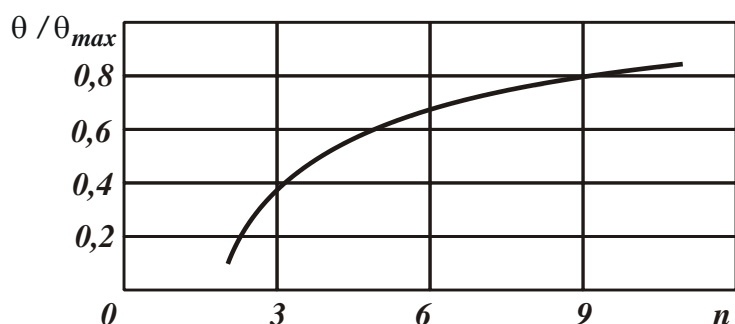


Рисунок 12 – Залежність  $\theta/\theta_{\text{max}}$  від кількості перерізів адіабатичного стержня  $n$

Зі зменшенням  $n$  збільшується кількість тепла, що надходить в стружку, та зменшується температура різання (табл. 2). Виходячи із цього, на фінішних операціях ефективно використовувати сучасні технології лезової обробки замість технологій шліфування із метою зниження температури різання

та забезпечення високих показників якості й продуктивності обробки.



Виходячи із залежності (10), умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу  $\beta$  для заданих значень  $P_z$  і  $P_y$  неоднозначно впливає на дотичне напруження  $\tau$ , тобто має місце екстремум (мінімум) функції  $\tau$  від кута  $\beta$ . Підкоряючи функцію  $\tau$  необхідній умові екстремуму:  $\tau'_\beta = 0$ , із урахуванням відомого відношення  $P_z / P_y = ctg(\psi - \gamma)$  отримано залежність для визначення кута  $\beta$

$$tg 2\beta = 0,5 \cdot ctg(\psi - \gamma). \quad (11)$$

Якщо при визначенні кута  $\beta$  враховувати дві складові сили різання  $P_z = P_{z1} + P_{z2}$ , то отримано залежність

$$tg 2\beta = ctg(\psi - \gamma), \quad (12)$$

яка після перетворень приймає вигляд формули професора Зворикіна К. О., тобто  $\beta = 45^\circ + (\gamma - \psi) / 2$ .

Розрахунками за залежністю (11) встановлено, що для умов точіння сталі 45 різцем із гексаніту-Р ( $\beta = 20^\circ$ ;  $\gamma = -11^\circ$ ), наведених в розділі 4, маємо:  $\psi = 20^\circ$ ;  $f = tg \psi = 0,364$ . Це відповідає експериментальним даним.

Розрахунками за залежністю (12) за цих умов встановлено:  $\psi = 61^\circ$ ;  $f = tg \psi = 1,8$ , що не відповідає дійсності, оскільки  $f > 1$ , а кут  $\psi > 45^\circ$ . Це пов'язано із тим, що кут  $\beta$  в даному випадку повинен приймати значення, більші  $20^\circ$ . Так, для вихідних даних:  $\gamma = -11^\circ$ ;  $\psi = 20^\circ$  розрахункове значення кута  $\beta = 29,5^\circ$ , що значно перевищує експериментально встановлене значення  $\beta = 20^\circ$ . Таким чином отримана залежність (11) дозволяє уточнити залежність (12), яка визначає формулу професора Зворикіна К. О., а, відповідно, і залежність для визначення енергоємності (умовного напруження різання) при механічній обробці:  $\sigma = \sigma_{cm} / tg \beta$ . Якщо при визначенні кута  $\beta$  враховувати лише першу складову сили різання  $P_{z1}$ , пов'язану із відокремленням елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу від основного матеріалу та рівною  $P_z / z$ , то залежність (11) прийме узагальнений вигляд

$$tg 2\beta = \frac{1}{z} \cdot ctg(\psi - \gamma), \quad (13)$$

де  $z$  – безрозмірна величина ( $z > 1$ ).

Випадок  $z=1$  відповідає формулі професора Зворикіна К. О. Із залежності (13) випливає, що чим більше безрозмірна величина  $z$ , тим менше кут  $\beta$  (рис. 14,а) і більше енергоємність (умовне напруження різання)  $\sigma = \sigma_{cm} / tg \beta$  порівняно із експериментальними значеннями (рис. 14,б). На цій основі теоретично обґрунтовано умови зменшення енергоємності й сили різання та, відповідно, значення максимальної температури різання  $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$ , які пов'язані, головним чином, зі зниженням інтенсивності тертя в зоні різання. Також визначено складові сили різання при точінні, обумовлені процесами "чистого" різання й тертя на передній і задній поверхнях різця в загальній

енергоємності механічної обробки, які дозволили привести у відповідність розрахункові та експериментальні дані.

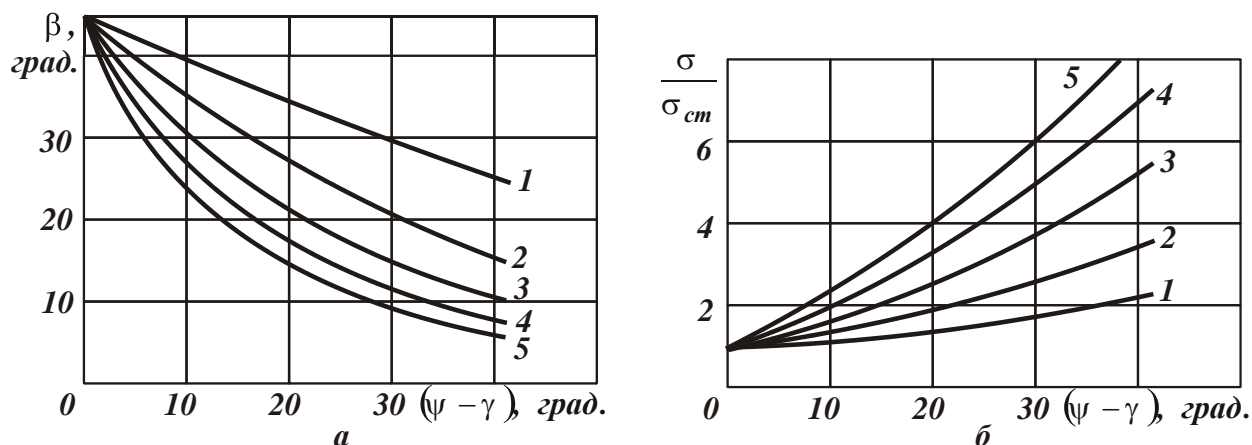


Рисунок 14 – Залежності кута  $\beta$  (а) та відношення  $\sigma / \sigma_{cm}$  (б) від кута  $(\psi - \gamma)$ : 1, ..., 5 –  $z = 1, \dots, 5$

У цьому розділі обґрунтовано технологічні закономірності підвищення точності та продуктивності механічної обробки. Для цього аналітично визначено пружні переміщення (похибки розміру та форми поверхні), які виникають при точінні, шліфуванні, розточуванні, свердлінні й фрезуванні та визначають точність обробки.

При точінні пружне переміщення  $y$  за проходами  $n$  визначається

$$y_1 = \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{piz}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)}; \quad y_2 = \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{piz}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} + \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{piz}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^2}; \quad y_n = \frac{\sigma \cdot Q \cdot \cos \varphi}{c \cdot K_{piz} \cdot V},$$

де  $c$  – приведена жорсткість технологічної системи, Н/м;  $K_{piz} = P_z / P_y$  – коефіцієнт різання;  $Q = S \cdot t \cdot V$  – продуктивність обробки, м<sup>3</sup>/с;  $S$  – подача, м/об.;  $V$  – швидкість різання, м/с;  $\varphi$  – головний кут різця в плані.

При круглому поздовжньому шліфуванні пружні переміщення  $y$  за  $n$  проходів круга визначаються аналогічними залежностями

$$y_1 = \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot H \cdot V_{дем}}\right)}; \quad y_2 = \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot H \cdot V_{дем}}\right)} + \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot H \cdot V_{дем}}\right)^2}; \quad y_n = \frac{\sigma \cdot Q}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}},$$

де  $Q = H \cdot t \cdot V_{дем}$  – продуктивність обробки, м<sup>3</sup>/с;  $H$  – ширина шліфування, м;  $V_{дем}$ ,  $V_{кр}$  – швидкості деталі та круга, м/с;  $K_{ш} = K_{piz}$ .

Оскільки відношення  $\sigma / K_{piz}$  при точінні значно менше ніж при шліфуванні, то, незважаючи на умову  $V_{кр} > V$ , при точінні можна досягти зменшення пружного переміщення  $y_n$  та, відповідно, підвищення точності й продуктивності обробки.

В роботі обґрунтовано умови підвищення точності механічної обробки отвору лезовими інструментами. Для цього визначено похибку форми оброблюваного отвору (як різницю найбільшого  $y_1$  і найменшого  $y_2$  пружного переміщень в 2 протилежних напрямках) при розточуванні (рис. 15) за проходами інструмента при розбіжності осей різця та отвору на величину  $\Delta$

$$\Delta y_1 = y_1 - y_2 = \frac{t_1}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{piz}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} - \frac{t_2}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{piz}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{piz}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)};$$

$$\Delta y_2 = \frac{t + y_1}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{piz}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} - \frac{t + y_2}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{piz}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)} = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{piz}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^2}; \Delta y_n = \frac{\Delta}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{piz}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^n},$$

де  $t_1 = t + \Delta$ ;  $t_2 = t - \Delta$  – максимальна й мінімальна глибини різання, м.

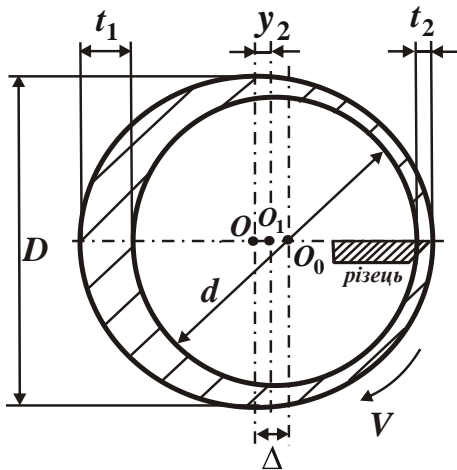


Рисунок 15 – Розрахункова схема пружного переміщення при розточуванні отвору із початковим діаметром  $d$

Як видно, зі збільшенням кількості проходів інструмента  $n$  величина  $y_n$  прагне до нуля. Це дозволяє похибку форми оброблюваного отвору у вигляді невісесиметричності усунути. За умови

$\left(\frac{c \cdot K_{piz}}{\sigma \cdot S \cdot \cos \varphi} > 1\right)$  можна значно швидше домогтися заданої точності форми оброблюваної поверхні. Це досягається застосуванням технологій розточування отворів різцями із синтетичних надтвердих матеріалів та сучасних збірних твердосплавних і керамічних різців зі зносостійкими покриттями закордонного виробництва.

Визначено похибку форми отвору при його розсвердлюванні зі зміщенням осі свердла відносно осі оброблюваного отвору на величину  $\Delta$ :

при його розсвердлюванні зі зміщенням осі свердла відносно осі оброблюваного отвору на величину  $\Delta$ :

$$y_1 = \frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi \cdot \Delta}{K_{piz} \cdot c}; \quad y_2 = \left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{K_{piz} \cdot c}\right)^2 \cdot \Delta; \quad y_n = \left(\frac{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}{K_{piz} \cdot c}\right)^n \cdot \Delta.$$

Сумарне уточнення  $\varepsilon_{\text{сум}}$  та уточнення на проході  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon_{\text{сум}} = \frac{\Delta}{y_n} = \left(\frac{K_{piz} \cdot c}{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}\right)^n; \quad \varepsilon = \frac{\Delta}{y_1} = \frac{y_1}{y_2} = \frac{y_2}{y_3} = \dots = \frac{y_{n-1}}{y_n} = \frac{K_{piz} \cdot c}{2 \cdot \sigma \cdot S \cdot \cos \varphi}.$$

Виходячи із отриманого рішення, встановлено, що зі збільшенням проходів свердла пружне переміщення зменшується, а це приводить до збільшення похибки форми отвору. Тому обробку слід здійснювати за 1 прохід або за кілька проходів свердлами із різними діаметрами, збільшуючи діаметр за

проходами. Встановлено, що при розсвердлюванні отвору пружне переміщення (похибка форми оброблюваного отвору) більше, ніж при його розточуванні.

Пружне переміщення при розфрезуванні отвору за  $n$  проходів:

$$y_1 = \frac{t}{\left(1 + \frac{c \cdot K_{piz} \cdot V_{фр}}{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}}\right)}; \quad y_n = \frac{\sigma \cdot Q}{c \cdot K_{piz} \cdot V_{фр}},$$

де  $Q = H \cdot t \cdot V_{дет}$  – продуктивність обробки, м<sup>3</sup>/с;  $H$  – ширина фрезування, м;  $V_{дет}$ ,  $V_{фр}$  – швидкості деталі та фрези, м/с.

Оскільки при високошвидкісному розфрезуванні отвору відношення  $\sigma / K_{piz}$  менше, ніж при шліфуванні, а  $V_{фр} \approx V_{кр}$ , то в цьому випадку величина  $y_n$  буде меншою, що приводить до підвищення точності та продуктивності обробки по відношенню до шліфування. Це вказує на ефективність застосування на фінішних операціях обробки отворів сучасних технологій лезової обробки замість технологій шліфування.

**У восьмому розділі** наведено результати розроблення та впровадження у виробництво ефективних технологічних процесів механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості. Для цього попередньо проведено експериментальне оцінювання умов зменшення енергоємності, температури різання та підвищення продуктивності й якості для різних технологій механічної обробки.

Встановлено, що при плоскому шліфуванні абразивним кругом ПП450х80х203 64С 40СМ деталі, виготовленої зі сталі 3, із режимом різання:  $t = 0,01$  мм;  $V_{дет} = 15$  м/хв;  $H = 25$  мм,  $V_{кр} = 35$  м/с, енергоємність обробки (умовне напруження різання)  $\sigma$  багаторазово перевищує межу міцності на стиск оброблюваного матеріалу, а максимальна температура різання  $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$  – температуру плавлення оброблюваного матеріалу (рис. 16).

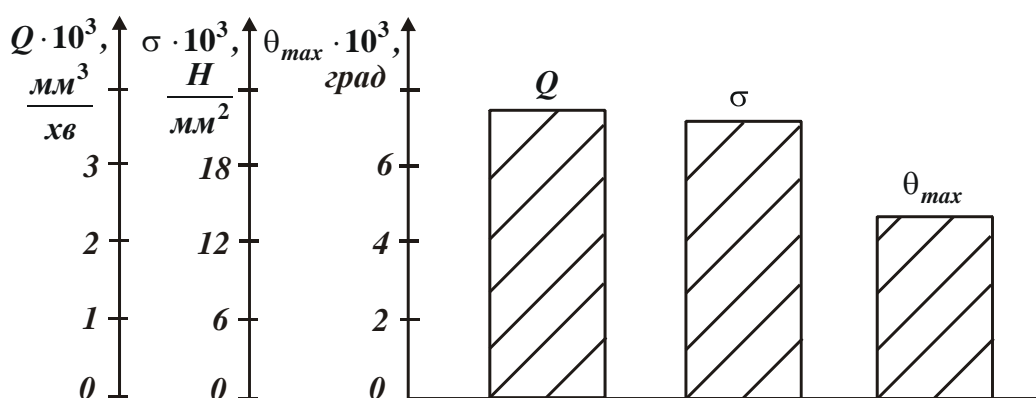


Рисунок 16 – Значення параметрів  $Q$ ,  $\sigma$  і  $\theta_{max}$  при шліфуванні деталі зі сталі 3

Це вказує на те, що основну частину енергетичного балансу при шліфуванні складає енергія, що витрачається на подолання сили тертя. Зі зміною  $t = 0,01 \dots 0,03$  мм відношення  $\theta / \theta_{max}$  і температура різання  $\theta$  змінюються в діапазонах:  $\theta / \theta_{max} = 0,055 \dots 0,12$  і  $\theta = 250 \dots 545$  °С (рис. 17),



тобто при шліфуванні використовується лише до 12 % його теплового балансу. Аналогічні експериментальні дані отримано при плоскому шліфуванні деталі зі сталі 45:  $t = 0,01 \text{ мм} \dots 0,05 \text{ мм}$ ;  $V_{det} = 15 \text{ м/хв}$ ;  $H = 15 \text{ мм}$ ;  $V_{кр} = 35 \text{ м/с}$  (рис. 18).

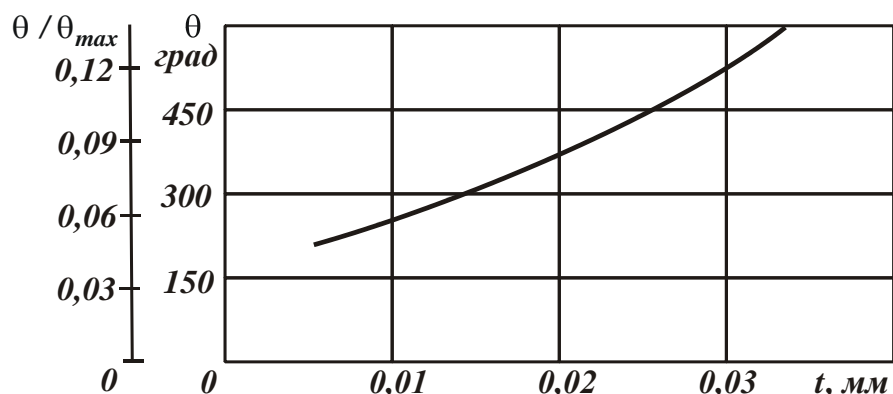


Рисунок 17 – Залежність температури різання  $\theta$  та відношення  $\theta / \theta_{max}$  від  $t$

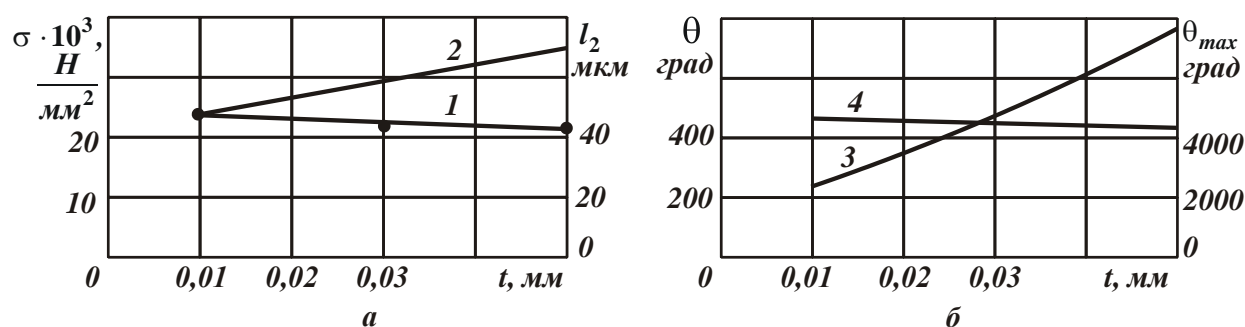


Рисунок 18 – Залежності параметрів  $\sigma$  (1),  $l_2$  (2),  $\theta$  (3) і  $\theta_{max}$  (4) від  $t$

Встановлено, що глибина проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі  $l_2$  при  $t = 0,01 \text{ мм}$  приймає невелике значення –  $0,047 \text{ мм}$ , а при  $t = 0,05 \text{ мм}$  – значення  $0,07 \text{ мм}$ . Це приводить до значного збільшення температури різання  $\theta$  зі збільшенням глибини шліфування  $t$  та появи температурних дефектів на оброблюваній поверхні, оскільки тепло, що виділяється при шліфуванні, зосереджується в незначному об'ємі поверхневого шару оброблюваного матеріалу. В даному випадку – це поява поверхневих температурних деформацій металу, які приводять до вигину зразка та зниженню точності обробленої поверхні.

Проведено експериментальні дослідження технологічного процесу розточування отворів  $\varnothing 25 \text{ мм}$  в деталі, виготовленої зі сталі 3, на верстаті QUASER MV204P із ЧПУ FANUC 31iB із застосуванням розточувальної головки TRM 50 із додатковим її балансуванням (рис. 19). Різальний інструмент оснащений змінною багатогранною пластиною TPGX09020LDC100T, виготовленою із кермету зі зносостійким покриттям TiN. Режим різання:  $V = 157 \text{ м/хв}$ ;  $t = 0,1 \text{ мм}$ ;  $S = 0,03 \text{ мм/об.}$ ; частота обертання  $n = 2000 \text{ об./хв}$ . Встановлено, що максимальна температура різання  $\theta_{max} = 568 \text{ }^\circ\text{C}$  менше температури плавлення оброблюваного матеріалу, відношення  $\theta / \theta_{max} = 0,75$ , а

температура різання  $\theta = 426$  °С. Це вказує на можливість суттєвого зниження теплової та силової напруженостей механічної обробки, забезпечення високої якості оброблюваної поверхні шляхом зменшення умовного напруження різання майже до межі міцності на стиск оброблюваного матеріалу – сталі 3. В цьому випадку з'являється можливість підвищення продуктивності обробки фактично без збільшення температури різання  $\theta$ , оскільки вона незначно відрізняється від максимальної температури різання  $\theta_{max}$  (рис. 19). При шліфуванні цього домогтися неможливо, оскільки відношення  $\theta/\theta_{max} \ll 1$ .

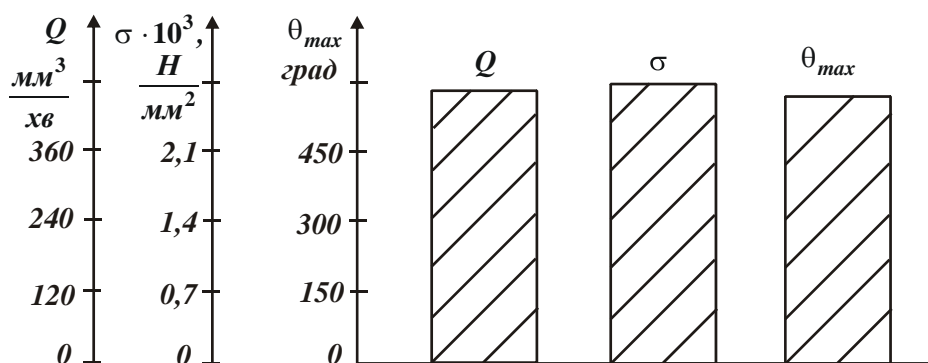


Рисунок 19 – Значення параметрів  $Q$ ,  $\sigma$  і  $\theta_{max}$  при розточуванні отворів

Проведено експериментальні дослідження технологічного процесу точіння деталі "вал", виготовленої із латуні ЛС59, на верстаті TAKISAWA NEX-910 (рис. 20). Режим різання:  $V = 175$  м/хв;  $t = 1,5$  мм;  $S = 0,6$  мм/об.

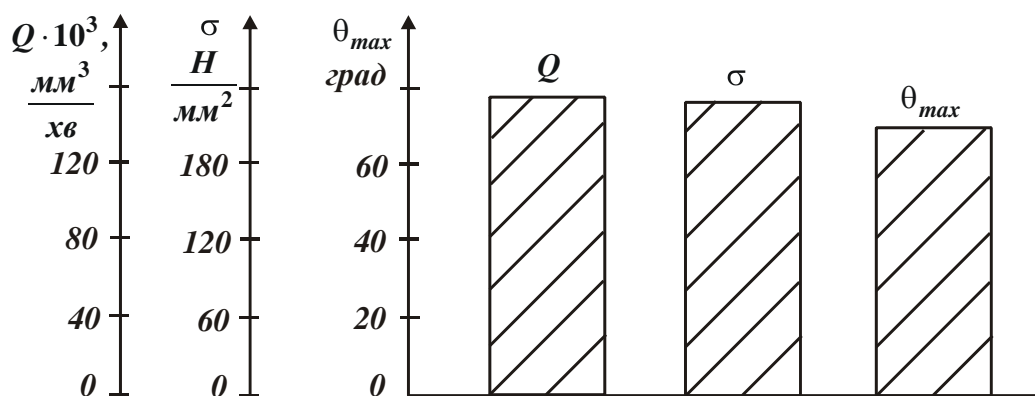


Рисунок 20 – Значення параметрів  $Q$ ,  $\sigma$  і  $\theta_{max}$  при точінні деталі "вал"

Максимальна температура різання  $\theta_{max} = 71$  °С, відповідно,  $\theta/\theta_{max} \approx 1$ ;  $\theta \approx 70$  °С. Ці значення  $\theta_{max}$  і  $\theta$  значно менше температури плавлення оброблюваного матеріалу (латуні ЛС59), яка дорівнює 900 °С. Це є ще одним підтвердженням того, що в енергетичному балансі обробки лезовим інструментом переважає енергія "чистого" різання над енергією тертя.

В роботі проведено експериментальні дослідження технологічного процесу фрезування деталі – фільсера макаронна "мушля", виготовленої з латуні ЛС59, на сучасному верстаті FANUC ROBODRILL  $\alpha$ -D21iB (рис. 21). Інструмент – твёрдосплавна мікрофреза LNE0808,  $D=0,8$  мм. Режим різання:

$V = 50$  м/хв;  $n = 20000$  об./хв.;  $t = 0,2$  мм;  $S = 1200$  мм/хв.; ширина фрезування дорівнює діаметру мікрофрези  $D = 0,8$  мм. Як видно, максимальна температура різання  $\theta_{max} = 290$  °С при фрезуванні вище, ніж при точінні (рис. 20). Тому для зменшення максимальної температури різання при фрезуванні необхідно застосовувати охолоджувальну рідину.

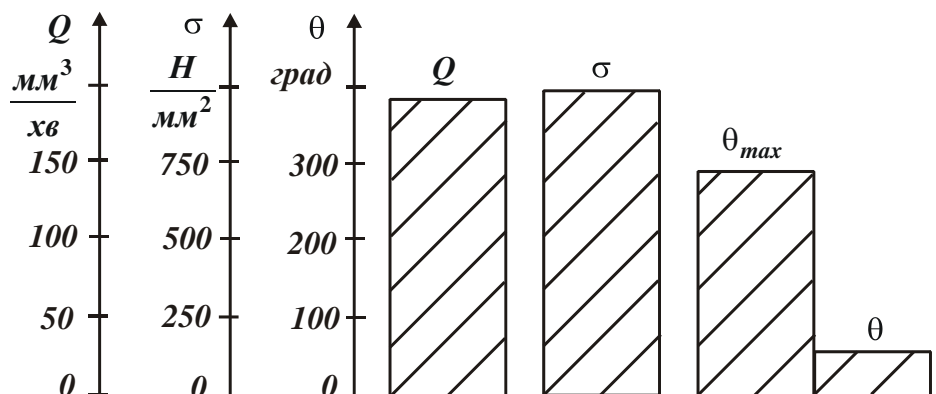


Рисунок 21 – Значення параметрів  $Q$ ,  $\sigma$ ,  $\theta_{max}$  і  $\theta$  при фрезуванні деталі – фільтра макаронна "мушля"

Експериментально встановлено, що поряд зі зниженням теплової та силової напруженостей процесу різання застосування сучасних технологій лезової обробки дозволяє стабільно забезпечити необхідні показники шорсткості оброблених поверхонь на рівні  $R_a = 0,8$  мкм та точності розміру оброблених поверхонь в межах до 0,02 мм. Це є важливим чинником досягнення високої точності й повторюваності форм складнопрофільної формуючої оснастки, особливо при виробництві печива. Наприклад, перехід від технології координатного внутрішнього шліфування до технології високошвидкісного розточування отворів діаметром 25 мм в деталі зі сталі 09Г2С дозволив вилучити вібрації, які виникали в технологічній системі, та появу "рваних місць" на оброблюваній поверхні, що забезпечило формування високоякісного і високоточного отвору. Високошвидкісне розточування здійснювалося твердосплавним інструментом із змінною багатогранною пластиною TPGX090202L DC100T (кермет зі зносостійким покриттям TiN), виробник D'ANDREA (Італія), із частотою обертання шпинделя  $n = 2000$  об./хв.;  $V = 155$  м/хв.;  $S = 60$  мм/хв. або 0,03 мм/об.;  $t = 0,2$  мм.

Необхідно зазначити, що застосування технології високошвидкісного розточування таким же твердосплавним інструментом, але без зносостійкого покриття, не забезпечувало високоякісної та високоточної обробки. На оброблюваній поверхні утворювалися "рвані місця", а в технологічній системі виникали вібрації. Це відбувалося в результаті виникнення адгезійних явищ в зоні різання внаслідок підвищення температури різання в результаті інтенсивного тертя різального інструменту із оброблюваним матеріалом.

На основі отриманих результатів теоретичних та експериментальних досліджень розроблено та впроваджено у виробництво ТОВ "Імперія металів"

сучасні технологічні процеси точіння, розточування та фрезування складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості. Вони засновані на застосуванні сучасних збірних лезових твердосплавних і керамічних різальних інструментів зі зносостійкими покриттями і сучасних високооберткових металорізальних верстатів із ЧПУ типу "обробний центр" закордонного виробництва. Це дозволило замінити малоефективні традиційні технологічні процеси шліфування й лезової обробки, до 10 разів підвищити продуктивність та знизити трудомісткість при забезпеченні високої якості та точності обробки. Це також дозволило до 200 разів збільшити асортимент виготовлених виробів, що важливо в сучасних умовах переходу від великосерійного до дрібносерійного і навіть штучного виробництва складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості.

У **Додатках** наведено акти впровадження результатів дослідження та список публікацій здобувача.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі одержаних нових науково обґрунтованих результатів вирішена актуальна для технології машинобудування науково-прикладна проблема теоретичного визначення й обґрунтування умов суттєвого підвищення якості, точності, продуктивності й зниження трудомісткості механічної обробки шляхом зниження її теплової й силової напруженостей та на цій основі розроблення ефективних технологічних процесів обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості із застосуванням сучасних високооберткових металорізальних верстатів із ЧПУ типу "обробний центр" та прогресивних різальних лезових твердосплавних і керамічних інструментів зі зносостійкими покриттями.

Основні висновки, наукові й практичні результати роботи:

1. Проведено аналіз предметної області та прийнято обмеження на область досліджень. Показано, що в даний час виготовлення складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості здійснюється в умовах дрібносерійного і навіть штучного виробництва, яке характеризується надзвичайно високою трудомісткістю, особливо, на операціях обробки різанням. Це підвищує собівартість виготовленої оснастки, знижує її конкурентоздатність і вимагає застосування більш досконалих технологій механічної обробки, які забезпечують підвищення продуктивності, якості та точності обробки. Встановлено, що найбільш ефективними в цих умовах є сучасні технології механічної обробки, що реалізуються на високооберткових металорізальних верстатах із ЧПУ типу "обробний центр" із застосуванням прогресивних різальних лезових твердосплавних і керамічних інструментів зі зносостійкими покриттями закордонного виробництва. Однак, як показує практика, ці технології недостатньо вивчені, фактично відсутні науково обґрунтовані рекомендації щодо вибору раціональних методів обробки, режимів різання та різальних інструментів в цих умовах. Тому дана робота

присвячена виявленню, обґрунтуванню та реалізації нових технологічних можливостей підвищення якості, точності та продуктивності при суттєвому зниженні трудомісткості обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості за рахунок застосування високооберткових металорізальних верстатах із ЧПУ типу "обробний центр" та прогресивних різальних лезових твердосплавних і керамічних інструментів зі зносостійкими покриттями.

2. Розроблено узагальнені математичні моделі визначення параметрів теплових процесів при шліфуванні й лезовій обробці з урахуванням аналітично встановленого розподілу тепла, яке виникає при різанні та надходить в поверхневий шар оброблюваної деталі, стружки, що утворюються, та охолоджувальну рідину. Це дозволило визначити основний напрям зниження температури різання та підвищення якості й продуктивності обробки, який полягає у зниженні максимальної температури різання до рівня температури плавлення оброблюваного матеріалу. Встановлено, що максимальна температура різання визначається за умови переходу в стружки всього тепла, що виділяється при різанні, та дорівнює відношенню енергоємності обробки до добутку питомої теплоємності й щільності оброблюваного матеріалу. Виходячи із цього, запропоновано максимальну температуру різання розглядати основним технологічним параметром механічної обробки, що визначає її потенційні можливості за температурним критерієм. Встановлено, що розходження розрахункових та експериментальних значень температури різання при шліфуванні не перевищує 12 %, що вказує на достовірність розробленої математичної моделі.

3. Проведено теоретичне обґрунтування шляхів підвищення якості та продуктивності механічної обробки на основі зниження температури різання за умови досягнення глибиною проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі кінцевого значення. Це дозволило встановити, що в реальних умовах шліфування відношення заданої й максимальної температур різання може змінюватися лише в межах  $0 \dots 0,4$  у зв'язку із перевищенням максимальною температурою різання температури плавлення оброблюваного матеріалу внаслідок значного збільшення умовного напруження різання. При точінні це відношення може змінюватися в значно більших межах  $0 \dots 1$ . Тому максимальна температура різання при точінні менше ніж при шліфуванні та може приймати значення, які менші температури плавлення оброблюваного матеріалу, що розширює технологічні можливості лезової обробки порівняно із шліфуванням;

розрахунками встановлено, що найбільш значного зниження температури різання при шліфуванні можна досягти при переривчастому шліфуванні за умов рівності довжин робочого виступу і вирізу переривчастого круга та збільшенні кількості робочих виступів круга. В цьому випадку температура різання може бути знижена більше ніж в 2 рази щодо температури різання при шліфуванні суцільним кругом. Однак максимальна температура різання при цьому приймає значення, які значно вищі температури плавлення оброблюваного матеріалу. Це

обмежує технологічні можливості переривчастого шліфування порівняно із лезовою обробкою;

розроблено уточнену математичну модель визначення температури різання при лезовій обробці. Вона заснована на урахуванні кількості виникаючих в зоні різання зсувних елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу. Розрахунками встановлено, що при їх значному збільшенні температура різання може збільшуватися до 10 разів. Це має місце при шліфуванні в умовах безперервного контакту зв'язки шліфувального круга із оброблюваним матеріалом. При лезовій обробці кількість виникаючих в зоні різання зсувних елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу незначна, що дозволяє знизити температуру різання і підвищити якість та продуктивність обробки, привести у відповідність розрахункові та експериментальні значення температури різання.

4. Розроблено уточнену математичну модель визначення параметрів силової напруженості лезової обробки на основі встановлення аналітичної залежності для визначення умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу, що дозволяє на відміну від відомих аналогічних залежностей привести у відповідність його розрахункові та експериментальні значення. Показано, що у формуванні умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу переважає радіальна складова сили різання, яка й приводить до його значного зменшення (у 1,5 разів) щодо розрахункових значень, отриманих за відомими аналогічними залежностями. Це дозволило уточнити розрахунок енергоємності обробки і сили різання та обґрунтувати умови їх зниження шляхом зниження інтенсивності тертя в зоні різання.

5. Розроблено уточнену математичну модель визначення пружних переміщень, які виникають в технологічній системі при механічній обробці, в якій на відміну від існуючих моделей узагальнено аналітичний опис пружного переміщення при шліфуванні та лезовій обробці. Це дозволило встановити, що найменші пружні переміщення можна забезпечити при шліфуванні шляхом суттєвого перевищення швидкістю круга швидкості різання при лезовій обробці. Однак при цьому енергоємність обробки значно більше (до 10 разів), ніж при лезовій обробці, що обмежує технологічні можливості шліфування. Виходячи із цього, на фінішних операціях ефективно використовувати технології лезової обробки, особливо, технології високошвидкісного різання, які з кінематичної точки зору не поступаються шліфуванню та одночасно забезпечують зниження пружних переміщень, енергоємності та підвищення точності й продуктивності обробки.

6. Визначено технологічні можливості підвищення якості, точності, продуктивності та зниження трудомісткості механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості шляхом застосування технологій високошвидкісного різання (точіння, розточування та фрезування сучасними різальними твердосплавними і керамічними інструментами зі зносостійкими покриттями). Встановлено, що при цьому можна досягти значно більшої продуктивності обробки при заданій температурі

різання, ніж при шліфуванні, що обумовлено суттєвим зменшенням максимальної температури різання. Це дозволило створити методологію розроблення ефективних високопродуктивних технологій лезової обробки, що забезпечують ефективний перехід від шліфування до технологій обробки сучасними лезовими інструментами на фінішних операціях.

7. Розроблено та впроваджено у виробництво ефективні технологічні процеси механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості із застосуванням сучасних високообертових металорізальних верстатів із ЧПУ типу "оброблювальний центр" та різальних лезових твердосплавних і керамічних інструментів зі зносостійкими покриттями закордонного виробництва. Це дозволило до 10 разів збільшити продуктивність та знизити трудомісткість обробки, до 200 разів розширити номенклатуру виготовлення даної продукції в умовах дрібносерійного та штучного виробництва із забезпеченням її високої якості та конкурентоспроможності на закордонних ринках. Економічний ефект від впровадження у основне виробництво ТОВ "Імперія металів" розроблених технологічних процесів механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості склав 3,86 млн гривен.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Монографії

1. Полянский В. И. Обоснование условий повышения эффективности механической обработки. *Технологии производства: проблемы и решения*: монографія. Дніпро: ЛІРА, 2018. Розд. 8. С. 356–398.

2. Полянский В. И. Повышение качества и производительности обработки на основе снижения тепловой и силовой напряженностей процесса резания. *Современные технологии и техническое перевооружение предприятий*: монографія. Днепр: ЛІРА, 2018. Розд. 5. С. 267–340.

### Статті в наукометричній базі даних Scopus

3. Novikov F., Polyansky V., Shkurupiy V., Novikov D., Hutorov A., Ponomarenko Ye., Yermolenko O. O., Yermolenko O. A. Determining the conditions for decreasing cutting force and temperature during machining. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Series: Engineering Technological Systems*. 2019. Vol. 6. No. 1(102). Pp. 41–50. <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/183882>

*Здобувачем розроблено теоретичний підхід до розрахунку та управління параметрами силової та теплової напруженостей процесів механічної обробки.*

4. Fedir Novikov, Viktor Marchuk, Irina Marchuk, Valentin Shkurupiy and Vladimir Polyansky. Technological Support of Surface Layer for Optical Metalware. *Advances Manufacturing Processes II. InterPartner 2020, Lecture Notes in Mechanical Engineering* / eds.: V. Tonkonogyi (et al.), pp. 412–421, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-68014-5\_41.

*Здобувачем обґрунтовано оптимальні параметри режимів абразивної обробки.*

5. Fedir Novikov, Vladimir Polyansky, Igor Riabenkov, Andrii Hutorov and Oksana Yermolenko. Theoretical analysis of conditions for improving the gear grinding accuracy and productivity. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering* / eds.: V. Ivanov (et al.). Cham : Springer, 2020. Pp. 305–314.

*Здобувачем отримано аналітичні залежності для визначення пружного переміщення в технологічній системі та обґрунтовано умови підвищення точності обробки при шліфуванні.*

#### **Статті в наукових періодичних виданнях інших держав**

6. Feodor Novikov, Vladimir Polyansky, Yury Gutsalenko, Vladislav Ivkin. Analytical determination of conditions for productivity improvement of diamond grinding. *Fiabilitate si Durabilitate – Fiability & Durability* №1(19)/2017 Editura "Academica Brancusi", Targu Jiu, ISSN 1844-640x. P. 280–286.

*Здобувачем обґрунтовано вплив величини зношування алмазного круга на продуктивність обробки.*

7. Feodor Novikov, Vladimir Polyansky, Yury Gutsalenko, Vladislav Ivkin. Introduction to the analysis of the mechanics of the diamond grinding process with the account of wear of wheel grains. *Fiabilitate si Durabilitate – Fiability & Durability* №2/2017 Editura "Academica Brancusi", Targu Jiu, ISSN 1844 – 640X. P. 142–148.

*Здобувачем проведено теоретичний аналіз параметрів процесу шліфування.*

8. Feodor Novikov, Vladimir Polyansky, Yury Gutsalenko. Mathematical model of high-performance diamond grinding / *Annals of "Constantin Brâncuși" University of Târgu Jiu. Engineering Series*, Issue 2/2018. Pp. 12-17.

*Здобувачем обґрунтовано зв'язок умовного напруження різання із параметрами процесу шліфування.*

9. Feodor Novikov, Vladimir Polyansky, Yury Gutsalenko. Conditions for energy capacity reducing of treatment at diamond grinding. *Fiabilitate si Durabilitate - Fiability & Durability* No 2/2018 Editura "Academica Brâncuși", Târgu Jiu, ISSN 1844 – 640X, p. 13-18.

*Здобувачем обґрунтовано умови зменшення енергоємності процесу глибинного шліфування.*

10. Feodor Novikov, Cătălin Iancu, Vladimir Polyansky, Yury Gutsalenko. Determination of temperature during depth grinding and conditions for its decrease. *Fiabilitate si Durabilitate - Fiability & Durability* No 1/ 2019 Editura "Academica Brâncuși", Târgu Jiu, - pp. 5-10. ISSN 1844 – 640X.

*Здобувачем проведено аналіз умов зменшення температури різання при глибинному шліфуванні.*

11. Полянский В. И. Концепции снижения температуры резания. *Инженер-механик: Республиканский межотраслевой производственно-практический журнал*. № 3 (84). Беларусь, Минск, 2019. С. 28–29.



### Статті в наукових фахових виданнях України

12. Полянский В. И. Повышение эффективности технологии механической обработки формующей оснастки для макаронной и кондитерской отраслей промышленности. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Технології в машинобудуванні*: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків: НТУ "ХПІ", 2018. № 34 (1310). С. 29–33.

13. Новиков Ф. В., Полянский В. И. Упрощенный расчет температуры резания при шлифовании и лезвийной обработке. *Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Технології в машинобудуванні*. Харків: НТУ "ХПІ", 2017. № 17 (1239). С. 87–92.

*Здобувачем отримано спрощені аналітичні залежності для визначення температури різання при шліфуванні та лезовій обробці.*

14. Полянский В. И. Математическая модель теплового процесса при шлифовании материалов. *Високі технології в машинобудуванні*: зб. наук, праць / під заг. ред. проф. О. М. Шелкового, редкол.: проф. І. М. Пижов (голова) та ін. Харків, НТУ "ХПІ", 2018. Вип. 1 (28). С. 120–130.

15. Полянский В. И. Определение максимально возможной производительности лезвийной обработки с учетом ограничения по температуре резания. *Резание и инструменты в технологических системах*: Междунар. науч.-техн. сб. / под общ. ред. проф. А. Н. Шелкового, редкол.: проф. А. И. Грабченко (отв. ред.) и др. Харьков: НТУ "ХПИ", 2018. Вып. 89 (101). С. 141–148.

16. Полянский В. И. Расчет температуры шлифования с учетом баланса тепла, уходящего в стружки и обрабатываемую деталь. *Сучасні технології в машинобудуванні*: зб. наук. праць / редкол.: В. О. Федорович (голова) [та ін.]. Харків: НТУ "ХПІ", 2018. Вип. 13. С. 51–59.

17. Полянский В. И. Технологические закономерности повышения точности и производительности обработки при шлифовании. *Наука та виробництво*: міжвуз. темат. зб. наук. пр. / ДВНЗ "ПДТУ". Маріуполь, ПДТУ, 2019. Вип. 20. С. 91–103.

18. Полянский В. И. Условия повышения эффективности прерывистого шлифования. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*: зб. наук. пр. Краматорськ: ДДМА, 2019. № 3 (47). С. 109–115.

19. Полянский В. И. Условия снижения силовой напряженности механической обработки. *Перспективні технології та прилади*: зб. наук. пр. Луцьк: Луцький НТУ, 2019. Вип. 14. С. 113–117.

20. Полянский В. И. Эффективное применение современных технологий механической обработки. *Машинобудування*: зб. наук. пр. Харків: УПА, 2018. Вип. 22. С. 28–33.

21. Полянський В. І. Закономірності формування і зниження температури різання при механічній обробці. *Вісник Приазовського державного технічного університету*: зб. наук. пр. Маріуполь: ДВНЗ "Приазов. держ. техн. ун-т", 2019. Вип. 39. С. 119–126. (Технічні науки). URL: DOI: 10.31498/2225-6733.38.2019.

22. Полянский В. И. Теоретическое обоснование условий высокоточной и высокопроизводительной механической обработки деталей машин. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*: зб. наук. пр. Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків: НТУ "ХПІ", 2019. № 11 (1336). С. 65–69.

23. Полянский В. И. Теоретический анализ параметров теплового процесса при шлифовании. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*: зб. наук. пр. Краматорськ: ДДМА, 2018. № 1 (43). С. 170–175.

24. Полянский В. И. Расширение технологических возможностей повышения точности механической обработки отверстий. *Перспективні технології та прилади*: зб. наук. пр. Луцьк: Луцький НТУ, 2017. №11 (2). С. 87–92.

25. Полянский В. И. Взаимосвязь параметров теплового процесса при глубинном шлифовании с качеством обработки. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Технології в машинобудуванні*: зб. наук. пр. Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків: НТУ "ХПІ", 2019. № 19 (1344). С. 28–33.

26. Новиков Ф. В., Полянский В. И. Закономерности управления тепловыми процессами при механической обработке. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. Харків: НТУ "ХПІ", 2020. № 1 (1) 2020. С. 13–18.

*Здобувачем встановлено взаємозв'язок температури різання із часткою тепла, що надходить в стружки при механічній обробці.*

27. Новиков Ф. В., Полянский В. И. Аналитическое определение температуры резания при лезвийной обработке. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Технології в машинобудуванні*. Харків: НТУ "ХПІ", 2016. № 33 (1205). С. 133–138.

*Здобувачем отримано аналітичні залежності для визначення температури різання при лезовій обробці та обґрунтовано умови її зменшення.*

28. Новиков Ф. В., Полянский В. И. Аналитическое определение технологических параметров механической обработки. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях*: зб. наук. пр. Харків: НТУ "ХПІ", 2019. № 8 (1333) 2019. С. 239–244.

*Здобувачем розроблено теоретичний підхід до визначення технологічних параметрів механічної обробки.*

29. Новиков Ф. В., Полянский В. И., Андилахай А. А. Расчет и анализ параметров силовой напряженности процесса резания. *Наука та виробництво: міжвуз. темат. зб. наук. пр. ДВНЗ "ПДТУ"*. Маріуполь, 2018. Вип. 19. С. 21–32.

*Здобувачем показано значення умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу в формуванні параметрів силової напруженості процесу різання.*

30. Новиков Ф. В., Полянский В. И., Андилахай А. А. Условия уменьшения температуры резания при точении. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*: зб. наук. праць. Маріуполь: ДВНЗ "Приазов. держ. техн. ун-т", 2016. Вип. 33. С. 87–92.

*Здобувачем розроблено математичну модель визначення температури різання при точінні.*

31. Новіков Ф. В., Полянський В. И. Визначення умов підвищення якості механічної обробки за температурним критерієм. *Перспективні технології та прилади: збірник наукових праць*. Луцьк: Луцький НТУ, 2020. Вип. 17. С. 99–106.

*Здобувачем обґрунтовано умови зменшення температури різання та підвищення якості механічної обробки.*

32. Новіков Ф. В., Полянський В. И., Дитиненко С. А., Крюк А. Г. Концепции высокоточной механической обработки деталей машин. *Вісник НТУ "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків: НТУ "ХПІ", 2017. № 43. С. 35–39.

*Здобувачем обґрунтовано умови підвищення точності обробки отворів.*

33. Полянський В. И. Технологические закономерности снижения энергоемкости при механической обработке деталей машин. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях: зб. наук. пр.* Харків: НТУ "ХПІ", 2019. № 22 (1347). С. 95–100.

34. Полянський В. И. Концепции высокоточной механической обработки отверстий в деталях машин. *Перспективні технології та прилади: збірник наукових праць*. Луцьк: Луцький НТУ, 2019. Вип. 15. С. 68–74.

35. Полянський В. И. Математическая модель теплового процесса при механической обработке и условия уменьшения температуры резания и повышения производительности обработки. *Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*, 2018. № 31(1306). С. 72–76.

36. Полянський В. И. Математическая модель управления упругими перемещениями при механической обработке. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях*. 2018. № 27 (1303). С. 105–110.

37. Полянський В. И. Определение оптимальных условий операции зубошлифования на основе температурного критерия. *Наука та виробництво: міжвуз. темат. зб. наук. пр. / ДВНЗ "ПДТУ"*. Маріуполь, ПДТУ, 2019. Вип. 2. С. 69–79.

38. Полянський В. И. Определение технологических возможностей механической обработки по температурному критерию. *Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць*. Маріуполь: ДВНЗ "ПДТУ", 2018. Вип. 36. С. 172–180.

39. Полянський В. И. Оценка технологических возможностей различных схем механической обработки. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки у матеріалів машинобудуванні та металургії*. 2018. № 23(1299). С. 57–61.

40. Полянський В. И. Повышение качества и производительности финишной абразивной и лезвийной обработки деталей машин. *Вісник*

*Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії:* зб. наук. пр. Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків: НТУ "ХПІ", 2020. № 2 (1356). С. 84–88.

41. Полянский В. И. Сравнительный анализ температуры резания при шлифовании и точении и условия ее уменьшения. *Машинобудування:* зб. наук. пр. Харків: УПА, 2019. Вип. 24. С. 24–32.

42. Полянский В. И. Теоретический анализ путей повышения качества и производительности механической обработки. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії:* зб. наук. пр. Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". Харків: НТУ "ХПІ", 2019. № 26 (1351). С. 42–46.

43. Полянский В. И. Теоретическое определение шероховатости поверхности при высокоскоростном фрезеровании и шлифовании. *Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії.* Харків: НТУ "ХПІ", 2018. № 30(1306). С. 58–62.

44. Полянский В. И. Условия повышения эффективности высокоскоростного фрезерования на основе снижения энергоемкости обработки. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем:* зб. наук. пр. Краматорськ, 2017. Вип. № 41. С. 18–24.

45. Полянский В. И. Основные направления уменьшения шероховатости поверхности при фрезеровании. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем:* зб. наук. пр. Краматорськ, 2017. Вип. № 40. С. 218–224.

46. Новиков Ф. В., Гуцаленко Ю. Г., Полянский В. И., Ивкин В. В. Механика и производительность алмазного шлифования с учетом износа зерен круга. *Резание и инструменты в технологических системах:* междунар. науч.-техн. сб. / редкол.: А. И. Грабченко (отв. ред.). Харьков: НТУ "ХПИ", 2018. Вип. 88. С. 142–157.

*Здобувачем показано взаємозв'язок параметрів різального рельєфу алмазного круга із продуктивністю обробки при шліфуванні.*

47. Новиков Ф. В., Новиков Г. В., Дитиненко С. А., Полянский В. И. Экологические преимущества применения при шлифовании электроэрозионной правки алмазных кругов на металлических связках взамен электрохимической правки. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії.* Харків: НТУ "ХПІ", 2016. № 38 (1210). С. 35–40.

*Здобувачем обґрунтовано вплив умов шліфування на продуктивність обробки та екологію виробництва.*

48. Новиков Ф. В., Новиков Г. В., Дитиненко С. А., Полянский В. И. Экологически безопасные технологии шлифования и заточки твердосплавных инструментов алмазными кругами на металлических связках. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Збірник наукових праць. Серія:*

*Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*. Харків: НТУ "ХПІ", 2015. № 48 (1167). С. 29–33.

*Здобувачем обґрунтовано вплив засалювання алмазного круга на продуктивність обробки.*

### **Патенти України**

49. Спосіб глибинного шліфування циліндричної деталі: пат. 141255 Україна. Ф. В. Новіков, М. Ф. Смирний, В. І. Полянський, І. О. Рябенков, Д. Ф. Новіков. Заявл. у 2019 10261, 09.10.2019, опубл. 25.03.2020, Бюл. № 6. 6 с.

*Здобувачем запропоновано вимірювати потужності, що витрачаються при шліфуванні й холостому ході стола верстата, та на їх основі встановлювати енергоємність обробки.*

50. Спосіб розсвердлювання отвору: пат. 141256 Україна. Ф.В. Новіков, М. Ф. Смирний, В. І. Полянський, І. О. Рябенков, Д. Ф. Новіков. Заявл. у 2019 10262, 09.10.2019, опубл. 25.03.2020, Бюл. № 6. 6 с.

*Здобувачем отримано аналітичні залежності для визначення подачі, кількості проходів свердел різних діаметрів при розсвердлюванні отвору.*

51. Спосіб шліфування циліндричної деталі: пат. 140930 Україна. Ф. В. Новіков, М. Ф. Смирний, В. І. Полянський, І. О. Рябенков, Д. Ф. Новіков. Заявл. у 2019 09840, 16.09.2019, опубл. 10.03.2020, Бюл. № 5. 6 с.

*Здобувачем запропоновано вимірювати максимальну довжину майданчика зносу на вершині різального зерна після правлення шліфувального круга.*

### **Наукові роботи, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

52. Новіков Ф. В., Полянський В. И., Коломиец В. В. Математическая модель определения температуры резания при лезвийной обработке. *Современные вопросы производства и ремонта в промышленности и на транспорте*: материалы 20-го Междунар. научн.-техн. семинара (г. Тбилиси, 23–28 марта 2020 г.). Киев: АТМ України, 2020. С.123–127.

*Здобувачем обґрунтовано закономірності формування температури різання при точінні.*

53. Новіков Ф. В., Полянський В. И. Упрощенный расчет температуры резания при шлифовании. *Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении*: материалы междунар. научн.-техн. конф. (г. Одесса, 21–23 сентября 2016 г.). Одесса: ОНПУ, 2016. – С. 143–146.

*Здобувачем наведено спрощені розрахунки температури різання при шліфуванні та обґрунтовано умови її зменшення.*

54. Полянський В. И. Закономерности формирования температуры резания при лезвийной обработке. *Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении*: материалы междунар. научн.-техн. конф. (г. Одесса, 23–25 сентября 2020 г.). Одесса: ОНПУ, 2020. С. 143–149.

55. Полянський В. И., Новіков Ф. В. Условия уменьшения максимальной температуры резания. *Современные проблемы производства и ремонта в промышленности и на транспорте*: материалы 17-го Междунар. научн.-техн. семинара (г. Свалява, 20–24 февраля 2017 г.). Киев: АТМ України, 2017. С. 236–239.

*Здобувачем показано вплив умовного напруження різання на максимальну температуру різання.*

56. Полянский В. И. Повышение качества и производительности механической обработки. *Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении*: материалы междунар. научн.-техн. конф. (г. Одесса, 26–29 сентября 2018 г.). Одесса: ОНПУ, 2018. С. 152–155.

57. Полянский В. И. Применение прогрессивных технологий механической обработки в производстве высокоточных деталей машин. *Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії*: матеріали XI Міжнар. наук.-техн. конф., присвяч. 90-річ. заснування кафедри обробки металів тиском (м. Харків, 20–22 листопада 2019 р.). Харків: НТУ "ХПІ", 2019. С. 128–129.

58. Полянский В.И. Производство формующей оснастки для макаронной и кондитерской отраслей промышленности. *Фізичні та комп'ютерні технології*: матеріали XXII Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Харків, 7–9 грудня 2016 р.). Дніпро: ЛПА, 2016. С. 82–88.

59. Полянский В. И. Разработка и изготовление высокоточной формующей оснастки для макаронной и кондитерской отраслей промышленности. *Качество, стандартизация, контроль: теория и практика*: материалы 17-й Междунар. научн.-практ. конф. (г. Одесса, 04–08 сентября 2017 г.). Киев: АТМ України, 2017. С. 140–143.

60. Полянский В.И. Технологическое обеспечение высокоскоростной механической обработки. *Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво*: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (31 жовтня – 02 листопада 2018 р.) / Під заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ: ДДМА, 2018. С. 164–166.

61. Полянский В. И. Упрощенные расчеты температуры резания. *Современные вопросы производства и ремонта в промышленности и на транспорте*: материалы 19-го Междунар. научн.-техн. семинара (г. Кошице, 18–22 февраля 2019 г.). Киев: АТМ України, 2019. С. 163–167.

62. Полянский В. И. Уточненный расчет параметров силовой напряженности процесса резания. *Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении*: материалы междунар. научн.-техн. конф. (г. Одесса, 20–22 сентября 2017 г.). Одесса: ОНПУ, 2017. С. 110–113.

63. Полянский В. И. Эффективность применения технологии зубошлифования по методу профильного копирования. *Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении*: материалы междунар. научн.-техн. конф. (г. Одесса 16–18 мая 2019 г.). Одесса: ОНПУ, 2019. С. 142–145.

64. Полянський В. І. Підвищення ефективності механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості. *Високі технології: тенденції розвитку*: матеріали XXVIII міжнар. наук.-техн. семінару (м. Харків, 3–5 листопада 2020 р.). Харків: Вид-во НТУ "ХПІ" (онлайн), "Курсор" (друк), 2020. С. 124–127.

## АНОТАЦІЇ

**Полянський В. І. Основи забезпечення якості та зниження трудомісткості механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування. Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут". – Харків, 2021.

Дисертацію присвячено вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми теоретичного визначення й обґрунтування умов суттєвого підвищення якості, точності, продуктивності й зниження трудомісткості механічної обробки шляхом зниження її теплової й силової напруженостей та на цій основі розроблення ефективних технологічних процесів обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості із застосуванням сучасних високооберткових металорізальних верстатів із ЧПУ типу "обробний центр" та прогресивних різальних лезових твердосплавних і керамічних інструментів зі зносостійкими покриттями. Для цього в роботі розроблено спрощені математичні моделі визначення температури різання при шліфуванні та лезовій обробці. Встановлено, що знизити температуру різання та підвищити якість і продуктивність обробки можна шляхом зниження максимальної температури різання до рівня та нижче температури плавлення оброблюваного матеріалу. Показано, що максимальна температура різання – це новий універсальний технологічний параметр механічної обробки, при досягненні якої все тепло, що виділяється при різанні, надходить в стружку, та яка визначається відношенням енергоємності обробки до добутку питомої теплоємності й щільності оброблюваного матеріалу. Встановлено, що максимальна температура різання при точінні менше, ніж при шліфуванні та може приймати значення, які менші температури плавлення оброблюваного матеріалу, що розширює технологічні можливості лезової обробки порівняно із шліфуванням. Розроблено уточнюючі математичні моделі визначення параметрів силової напруженості при лезовій обробці та пружних переміщень, які виникають в технологічній системі, що дозволило обґрунтувати технологічні можливості зниження енергоємності обробки і сили різання та підвищення точності обробки. На цій основі створено методологію розроблення та впровадження ефективних технологій лезової обробки, особливо високошвидкісного різання (точіння, розточування та фрезування). Це дозволило до 10 разів знизити трудомісткість обробки та до 200 разів розширити номенклатуру виготовлення складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості в умовах дрібносерійного та штучного виробництва із забезпеченням її високої якості та конкурентоспроможності.

*Ключові слова:* технологічний процес, дрібносерійне та штучне виробництво, оброблювальний центр, фінішні операції, математична модель, температура різання, точність обробки, продуктивність обробки, енергоємність обробки, пружне переміщення.

**Полянский В. И. Основы обеспечения качества и снижения трудоемкости механической обработки сложнопрофильной формующей оснастки для пищевой промышленности.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения. – Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2021.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-прикладной проблемы теоретического определения и обоснования условий значительного повышения качества, точности, производительности и снижения трудоемкости механической обработки путем снижения ее тепловой и силовой напряженностей и на этой основе разработки эффективных технологических процессов обработки сложнопрофильной формующей оснастки для пищевой промышленности с применением современных высокооборотных металлорежущих станков с ЧПУ типа "обрабатывающий центр" и прогрессивных режущих лезвийных твердосплавных и керамических инструментов с износостойкими покрытиями. Для этого в работе разработаны упрощенные математические модели определения температуры резания при шлифовании и лезвийной обработке. Установлено, что снизить температуру резания и повысить качество и производительность обработки можно путем снижения максимальной температуры резания до уровня и ниже температуры плавления обрабатываемого материала. Показано, что максимальная температура резания – это новый универсальный технологический параметр механической обработки, при достижении которой все тепло, выделяемое при резании, переходит в стружку, и которая определяется отношением энергоемкости обработки к производству удельной теплоемкости и плотности обрабатываемого материала. Установлено, что максимальная температура резания при точении меньше, чем при шлифовании и может принимать значения, которые меньше температуры плавления обрабатываемого материала, что расширяет технологические возможности лезвийной обработки по сравнению с шлифованием. Разработаны уточняющие математические модели определения параметров силовой напряженности при лезвийной обработке и упругих перемещений, возникающих в технологической системе, что позволило обосновать технологические возможности снижения энергоемкости обработки и силы резания и повышения точности обработки. На этой основе создана методология разработки и внедрения эффективных технологий лезвийной обработки, особенно высокоскоростного резания (точение, расточка и фрезерование). Это позволило в 10 раз снизить трудоемкость обработки и до 200 раз расширить номенклатуру производства сложнопрофильной формирующей оснастки для пищевой промышленности в условиях мелкосерийного и штучного производства с обеспечением ее высокого качества и конкурентоспособности.

*Ключевые слова:* технологический процесс, мелкосерийное и штучное производство, обрабатывающий центр, финишные операции, математическая



модель, температура резания, точность обработки, производительность обработки, энергоёмкость обработки, упругое перемещение.

**Polyansky V. I. Basics of quality assurance and reduction of labor intensity of machining of complex-shaped forming equipment for the food industry.** – Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of technical sciences on a specialty 05.02.08 – technology of mechanical engineering. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Kharkiv, 2021.

Dissertation is devoted to the solution of the actual scientific and applied problem of the theoretical definition and substantiation of the conditions for a significant increase in quality, accuracy, productivity and a decrease in the labor intensity of machining by reducing its thermal and power tensions and, on this basis, the development of effective technological processes for machining of complex molding equipment for the food industry using modern high-speed CNC metal cutting machines of the "machining center" type and progressive cutting blade carbide and ceramic tools with wear-resistant coatings. For this, the simplified mathematical models have been developed for determining the cutting temperature during grinding and blade processing, based on taking into account the balance of heat arising in the cutting zone and entering the facial layer of the work piece, and forming chips and coolant. The main direction of reducing the cutting temperature, improving the quality and productivity of processing has been established, which consists of reducing the maximum cutting temperature to the level and below the melting temperature of the material being processed. It is shown that the maximum cutting temperature is a new universal technological parameter of mechanical restoration/ tooling, upon reaching which all the heat generated during cutting goes to the chips, and which is determined by the ratio of the energy consumption of processing to the product of the specific heat and density of the processed material. It is shown that the difference between the calculated and experimental values of the cutting temperature during grinding does not exceed 12%, which indicates the reliability of the developed mathematical model for determining the cutting temperature. Calculations have established that in real grinding conditions, the ratio of the specified and maximum grinding temperatures can vary only within 0 ... 0.4 in connection with the excess of the maximum cutting temperature and the melting temperature of the processed material due to a significant increase of conventional cutting stress. This expands the technological opportunities of turning in comparison with grinding.

Calculations have established that the most significant reduction in the cutting temperature during grinding can be achieved with intermittent grinding under conditions of equality of the lengths of the working protrusion and the cutout of the intermittent wheel, and under increase in the number of working protrusions of the wheel. In this case, the cutting temperature can be reduced by more than 2 times compared to the cutting temperature when grinding with a continuous wheel. However, the maximum cutting temperature in this case takes on values that are

significantly higher than the melting temperature of the material being processed. This limits the technological possibilities of interrupted grinding in comparison with edge cutting machining.

A refined mathematical model for determining the cutting temperature during blade processing has been developed, which is based on the number of shearing elementary volumes of the processed material arising in the cutting zone. It was found that with their increase, the cutting temperature can increase up to 10 times. This is possible when grinding in conditions of continuous contact of the bond of the grinding wheel with the processed material. During blade processing, the amount of shearing elementary volumes of the processed material arising in the cutting zone is insignificant, which makes it possible to reduce the cutting temperature and increase the quality and productivity of processing. It has been established that in the conditions of finishing blade processing, especially in high-speed cutting operations (turning, boring and milling with modern cutting carbide and ceramic tools with wear-resistant coatings), it is possible to achieve a much higher processing performance at a given cutting temperature than when grinding. This is due to a significant decrease of the maximum cutting temperature.

A mathematical model was developed for determining the parameters of power tension during blade processing, taking into account the updated values of the conditional shear angle of the processed material. It is shown that the radial component of the cutting force prevails in the formation of the conditional shear angle of the machined material, which leads to its significant decrease (by 1.5 times) in comparison with the calculated values obtained on the basis of known dependencies. This made it possible to substantiate the conditions for reducing the energy consumption of processing and cutting force. A mathematical model has been developed for determining the elastic displacements arising in the technological system, and it has been established that they depend, first of all, on the method of mechanical treatment and its energy intensity. Therefore, the main way to increase the accuracy and productivity of processing is the use the modern technologies of high-speed blade processing in finishing operations instead of traditional technologies of grinding and blade processing.

On this basis, a methodology was created for the development and implementation of effective technologies for blade processing using modern high-speed metal-cutting machines with CNC of "machining center" type, and cutting blade carbide and ceramic tools with wear-resistant coatings of foreign production. It is shown that they allow to reduce energy consumption up to 10 times or more and to increase processing productivity while ensuring high quality and accuracy of the processed surfaces in comparison with grinding. This made it possible to reduce the labor intensity of processing up to 10 times and to expand the range of production of molding tooling for the food industry up to 200 times in the conditions of small batch and unit production, ensuring its high quality and competitiveness.

**Keywords:** technological process, small batch and unit production, machining center, finishing operations, mathematical model, cutting temperature, processing accuracy, process efficiency, process energy capacity, elastic displacement



Підписано до друку 7.04.2021 р. Формат 60x90/16.  
Папір Сору Рарег. Друк – ризографія. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 1,9.  
Наклад 125 прим. Зам. № 723

---

Надруковано у копії-центрі "МОДЕЛІСТ"  
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4№022953)  
м. Харків, вул. Містечтв, 3 літер Б-1  
Тел.+38 067-91-93-922  
**[www.modelist.in.ua](http://www.modelist.in.ua)**