

ВІДГУК

офіційного опонента Купріянова Олександра Володимировича на дисертаційну роботу Полянського Володимира Івановича **«Основи забезпечення якості та зниження трудомісткості механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості»**, що подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування

Актуальність теми.

Однією із актуальних проблем машинобудування є виготовлення складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості. Це пов'язано із необхідністю забезпечення надзвичайно високих вимог до точності й якості оброблюваних поверхонь формуючої оснастки. Як показує практика, навіть незначне відхилення від заданих параметрів точності обробки поверхонь формуючої оснастки в умовах масового виробництва макаронних і кондитерських виробів приводить до значної невідповідності норм споживаних продуктів при їх виготовленні (перевитрати або економії), що неприпустимо. Крім того, ринок вимагає значного розширення номенклатури виробів харчових продуктів, що, в свою чергу, приводить до необхідності розширення номенклатури складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості. У зв'язку із цим актуальною є проблема розроблення та впровадження у виробництво ефективних технологічних процесів механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості за умови забезпечення високих показників якості, точності, продуктивності та трудомісткості обробки.

Перспективним напрямом вирішення цієї проблеми є застосування сучасних високооберткових металорізальних верстатів із ЧПУ типу «обробний центр» та прогресивних різальних лезових твердосплавних і керамічних інструментів зі зносостійкими покриттями закордонного виробництва, які зараз надходять на підприємства України. Завдяки цьому обладнанню та інструментам з'являється можливість виготовлення конкурентоспроможної машинобудівної продукції для підприємств харчової промисловості. Але для цього необхідно виконати умову забезпечення значного зниження трудомісткості обробки, оскільки виробництво складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості здійснюється в умовах дрібносерійного та одиничного виробництва, яке характеризується високою трудомісткістю та зниженням якості обробки. Необхідно здійснити математичне моделювання технологічних процесів механічної обробки, включаючи шліфування й різання лезовими інструментами, та оцінити їх технологічні можливості. Виходячи із цього, в роботі вирішується 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 закордонного виробництва.

Роботу виконано на кафедрі «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» НТУ «ХП» у відповідності 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» (м. Харків). 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.

Виходячи із наведеного, представлену дисертаційну роботу Полянського Володимира Івановича вважаю актуальною, яка має важливу наукову та практичну цінність.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі Полянського В. І., є достатньо високим і базується на аналізі науково-технічних джерел за даною проблемою, гармонійній постановці мети і задач дослідження, використанні сучасних підходів та методів наукового дослідження, зіставленні і критичному аналізу отриманих результатів у порівнянні з результатами інших дослідників, якісному формулюванні отриманих висновків.

Теоретичні дослідження виконано із використанням сучасного математичного апарату, фундаментальних положень технології машинобудування, теорії різання матеріалів, опору матеріалів та теплофізики, правильному розумінні використовуваних наукових підходів і фізичних явищ.

Отримані результати перевірені шляхом порівняння одержаних результатів з аналогічними даними, які наведено в літературних джерелах, що підтверджує обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі результатів дослідження.

Результати дисертаційної роботи пройшли широку апробацію: доповідалися на міжнародних науково-практичних конференціях, опубліковані у 64 наукових працях, впроваджені у виробництво ТОВ «Імперія металів» та у навчальні процеси Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» та Економіко-технологічного інституту імені Роберта Ельворті (м. Кропивницький).

Достовірність результатів досліджень.

Достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечується коректністю постановок математичних задач, застосуванням стандартних процедур математичного аналізу і методів математичної фізики при вирішенні задач теплофізики, відповідністю змісту математичних формулювань фізичній суті описуваних процесів, узагальненим аналізом отриманих результатів. Наукові результати здобувача і розроблені практичні рекомендації впроваджено у виробництво та у навчальний процес.

Достовірність отриманих наукових результатів досліджень підтверджено припустимою (до 12%) розбіжністю між теоретичними та експериментальними даними і використанням сучасного встаткування, різальних інструментів та вимірювальних засобів: переносного приладу для вимірювання шорсткості поверхні Hommel TESTER W5, нутромірів, цифрових штангенциркулів із ціною ділення 0,01 мм, портативного тестера твердості NOVOTEST.

До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

Вперше

– розроблено теоретичні підходи до підвищення якості та зниження трудомісткості механічної обробки за рахунок переходу на високошвидкісну механообробку інструментами з синтетичних надтвердих матеріалів та використання приривчастого глибинного шліфування, що дозволяє докорінно змінити методологію вибору раціональних структур і параметрів технологічних процесів механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості;

– проведено узагальнення теоретичних рішень щодо визначення параметрів теплового процесу при механічній обробці із урахуванням запропонованого кінцевого значення глибини проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі, що дозволяє побудувати модель розподілу тепла між поверхневим шаром оброблюваної деталі і стружкою, з урахуванням відводу тепла в охолоджуючу рідину, та з єдиних позицій встановити аналітичні залежності для прогнозування температури різання при шліфуванні й лезовій обробці та на цій основі виявити найбільш ефективні напрями її зменшення;

– 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;

– теоретично обґрунтовано технологічні можливості зниження температури різання при переривчастому шліфуванні за рахунок зниження наполовину довжин при підвищенні кількості робочих виступів переривчастого

круга, що дозволило встановити технологічні засади застосування переривчастого шліфування для високоякісної обробки;

- вдосконалено математичну 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, що представляють технологічний припуск, та уточнені розрахункові значення температури різання при лезовій обробці для узгодження експериментальними даними;

- 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 на переходах точіння, розточування та фрезування на 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.

Одержали подальший розвиток і поліпшення

- 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 уточнити на цій основі умови зниження енергоємності обробки, сили різання та максимальної температури різання;

- 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.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.

Значимість отриманих результатів для науки полягає в тому, що автором побудований баланс технологічних характеристик високошвидкісної механообробки із застосуванням запропонованого технологічного параметру – максимальної температури різання, яку отримано за умови переходу в стружку всього тепла, що виділяється при різанні. Встановлено, що цей параметр залежить від енергоємності обробки та змінюється в широких межах, може перевищувати температуру плавлення оброблюваного матеріалу. Автором обґрунтовано можливість значного підвищення продуктивності й зниження трудомісткості при забезпеченні високої якості обробки при переході від шліфування до лезової

обробки тврдосплавним інструментом з покриттями.

Розроблені в роботі математичні моделі визначення параметрів теплової та силової напруженостей механічної обробки та умов їх зниження дозволяють науково обґрунтовано підійти до визначення раціональних структур і параметрів технологічних процесів механічної обробки, включаючи параметри режимів різання, характеристики різальних інструментів і технологічної системи та ін.

Розроблені в роботі високопродуктивні технологічні процеси механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості із застосуванням сучасних високооберткових металорізальних верстатів із ЧПУ типу «оброблювальний центр» та різальних лезових тврдосплавних і керамічних інструментів зі зносостійкими покриттями впроваджено у виробництво ТОВ «Імперія металів» (м. Харків) із економічним ефектом 3,86 млн гривен. Це дозволило забезпечити виготовлення конкурентоспроможної 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 КОНФЕКШНЕРІ», ПАТ «Виробниче об'єднання «КОНТІ», ПрАТ «Харківська бісквітна фабрика», ТОВ «Виробничо-кондитерська група «Лісова казка», ЗАТ «Житомирські ласощі» та вийти із нею на міжнародні ринки. Завдяки впровадженню результатів дисертаційної роботи значно розширена номенклатура формуючої оснастки для харчової промисловості без збільшення штату персоналу.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень роботи використовуються в навчальному процесі в курсовому й дипломному проектуванні на кафедрі «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» НТУ «Харківський політехнічний інститут» та Економіко-технологічному інституті імені Роберта Ельворті (м. Кропивницький).

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Результати дисертаційної роботи опубліковано у 64 наукових працях, з яких 2 колективні монографії, 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. У цілому, рівень і кількість публікацій та апробації матеріалів дисертації на конференціях повністю відповідають вимогам МОН України.

Оцінка змісту дисертаційної роботи.

Дисертаційна робота Полянського Володимира Івановича складається з анотації двома мовами, вступу, 8 розділів, висновків, списку використаних джерел з 264 найменувань, 3 додатків. Загальний обсяг дисертації складає 406 сторінок, з яких 306 сторінки основного тексту, та містить 151 рисунок, 36 таблиць.

У вступі наведено загальну характеристику роботи, у якій обґрунтовано актуальність, наукову новизну і практичну значимість одержаних результатів, визначено об'єкт, предмет дослідження, сформульовано мету і задачі

досліджень. Наведено особистий внесок здобувача у виконану роботу, основні дані з апробації дослідження, наукові публікації, відомості про структуру дисертації.

У першому розділі автором проаналізовано досвід технологічного забезпечення високоякісної механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості. Проведено аналіз основних видів складнопрофільної формуючої оснастки та діючих технологій її механічної обробки.

Встановлено недоліки діючих технологій, які полягають у низькій якості й надзвичайно високій трудомісткості обробки, особливо після переходу в сучасних умовах від великосерійного до дрібносерійного і навіть одиничного виробництва, що продиктовано потребами ринку і необхідністю виробництва більш широкого асортименту складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості. Обґрунтовано необхідність забезпечення високих вимог до точності та якості її механічної обробки, а також умови їх досягнення, які полягають у використанні на фінішних операціях високооберткових металорізальних верстатів із ЧПУ типу «обробний центр» та прогресивних різальних лезових твердосплавних і керамічних інструментів зі зносостійкими покриттями закордонного виробництва. Показано, що при правильно обраних режимах різання для цих умов обробки можна суттєво підвищити продуктивність і знизити трудомісткість до необхідного рівня. Тому для ефективного використання зазначеного вище обладнання та різальних інструментів необхідно вирішити актуальну науково-прикладну проблему теоретичного визначення й обґрунтування умов суттєвого підвищення якості, точності, продуктивності й зниження трудомісткості механічної обробки шляхом зниження її теплової й силової напруженостей. Це дозволить розробити ефективні технологічні процеси 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 вирішення цієї проблеми необхідно розробити теоретичні підходи до визначення технологічних можливостей механічної обробки, включаючи шліфування та методи лезової обробки, обґрунтовано підійти до розрахунку і вибору раціональних структур і технологічних параметрів механічної обробки, включаючи параметри режимів різання, характеристики різальних інструментів та технологічної системи та ін.

На підставі проведеного аналізу сформульовано мету і завдання досліджень та обґрунтовано шляхи їх здійснення.

В другому розділі проведено обґрунтування напряму і загальної методики дослідження. Показано, що основним науковим напрямом досягнення поставленої мети і завдань дисертаційної роботи є теоретичне і експериментальне обґрунтування технологічних можливостей механічної обробки та встановлення раціональних структур і технологічних параметрів механічної обробки, включаючи параметри режимів різання, характеристики різальних інструментів

та технологічної системи та ін. Для цього в роботі вирішувалися задачі розроблення математичних моделей визначення параметрів теплової та силової напруженостей механічної обробки і проведення аналізу умов їх зменшення, зокрема, шляхом оптимізації технологічних параметрів обробки за критеріями максимально можливої продуктивності обробки, мінімальної температури різання. Для перевірки достовірності отриманих теоретичних рішень запропоновано виконати їх перевірку, зокрема, за відомими експериментальними даними, наведеними в науково-технічній літературі

Наведені приклади обладнання, які використовувалися в експериментальній частині роботи. Це виключно сучасне обладнання, із ЧПУ типу «обробний центр» різних моделей: QUASER MV204P із ЧПУ FANUC 31iB; TAKISAWA NEX-910; MV204P із ЧПУ FANUC – 31iB (Тайвань); EX910, TAKISAWA, TT-42, QUICKTECH (Тайвань); FANUC ROBODRILL α -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 LC59-1 (напівтвердої), берилієвої бронзи БрБНТ. Для здійснення механічної обробки застосовувалися сучасні різальні лезові твердосплавні та керамічні інструменти зі зносостійкими покриттями закордонного виробництва. Вимірювання технологічних параметрів механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки (параметрів шорсткості та точності оброблених поверхонь, твердості матеріалу деталі, потужності обробки) здійснювалося із застосуванням переносного приладу для вимірювання шорсткості поверхні Hommel TESTER W5, нутромірів, цифрових штангенциркулів із ціною ділення 0,01 мм, портативного тестера твердості NOVOTEST, струмовимірювальних кліщів. Обробка результатів експериментальних досліджень виконувалася із використанням апарату математичної статистики.

В третьому розділі запропоновані технологічні умови підвищення якості та продуктивності обробки при шліфуванні на основі зниження теплової напруженості процесу різання. Для вирішення поставлених завдань розроблено математичну модель визначення параметрів теплового процесу при шліфуванні з урахуванням досягнення нульового значення температури різання в поверхневому шарі оброблюваної деталі та аналітичного визначення умов розподілу тепла, що виділяється при різанні та надходить в оброблювану деталь, стружки і охолоджуючу рідину.

Встановлено аналітичну залежність, що погоджує відношення температури різання і максимальної температури різання з параметрами режиму шліфування, характеристиками оброблюваного матеріалу і шліфувального круга. Показано, що це відношення із часом контакту круга з оброблюваним матеріалом безперервно збільшується, асимптотично наближаючись до одиниці, що пов'язано зі збільшенням кількості тепла, що виділяється в процесі різання та надходить в стружки, що утворюються. При цьому кількість тепла, що надходить в оброблювану деталь, зменшується.

Встановлено, що максимальна температура різання визначається за умови

переходу в стружки всього тепла, що виділяється при різанні, аналітично описується відношенням енергоємності обробки до добутку питомої теплоємності й щільності оброблюваного матеріалу та змінюється в широких межах. При шліфуванні максимальна температура різання може значно перевищувати температуру плавлення оброблюваного матеріалу, що пов'язано, головним чином, із високою інтенсивністю тертя в зоні різання. Виходячи із цього, здобувач пропонує розглядати максимальну температуру різання новим універсальним технологічним параметром механічної обробки. На основі порівняння значень максимальної температури різання для різних методів механічної обробки можна здійснювати вибір найбільш ефективних з них за температурним критерієм, забезпечуючи високі показники якості та продуктивності обробки.

Розрахунками встановлено, що максимальна температура різання тим менше, чим інтенсивніше відводиться тепло із зони різання шляхом застосування охолоджуючої рідини або інших технологічних середовищ. Показано, що збільшити продуктивність при шліфуванні з урахуванням обмеження за температурою різання можна збільшенням глибини шліфування і зменшенням швидкості деталі, тобто застосуванням методу глибинного шліфування. Метод багатопрхідного шліфування ефективно застосовувати при відносно невеликій продуктивності, що пов'язано з обмеженням збільшення швидкості деталі. Зроблено також висновок про можливість зменшення температури різання при розрізанні матеріалів відрізним кругом з великою глибиною різання і невеликою швидкістю деталі. Такий же висновок здобувачем зроблений і щодо методів циліндричного і торцевого фрезерування і, особливо, 3D-фрезерування з шириною різання, що дорівнює діаметру фрези.

Таким чином, на основі розробленої математичної моделі визначення параметрів теплового процесу при шліфуванні встановлено температуру різання, глибину проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі і частки тепла, що надходять в поверхневий шар оброблюваної деталі, в стружки, що утворюються, і в охолоджувальну рідину. Це дозволяє проводити узагальнений аналіз технологічних закономірностей шліфування. Відзначається, що традиційно розподіл тепла в зоні різання встановлюють експериментально, а це, очевидно, обмежує можливості узагальненого аналізу технологічних закономірностей шліфування.

В розділі проведено оцінювання достовірності результатів розрахунків температури різання із застосуванням відомих експериментальних даних температури різання при плоскому шліфуванні сплаву ЖС6К, отриманих академіком Ящеріциним П. І. Показано на достатньо високу ступінь збіжності розрахункових та експериментальних даних (розбіжність не перевищує 11 %).

В розділі показано високу ступінь збіжності розрахункових значень температури різання з відомими експериментальними даними, наведеними в роботах професора Якимова О. В. Таким чином, розроблена в роботі математична модель визначення параметрів теплового процесу при шліфуванні може бути застосована для встановлення його технологічних можливостей із точки зору підвищення якості та продуктивності обробки.

В четвертому розділі визначено умови підвищення ефективності

застосування технології переривчастого шліфування.

Значну увагу приділено аналізу технологічних можливостей глибинного шліфування, яке дозволяє, як встановлено в роботі, підвищувати продуктивність обробки при забезпеченні високої якості обробки завдяки зменшенню градієнта температури. На прикладі зубошліфування за методом профільного копіювання, що реалізується в умовах глибинного шліфування, проведено розрахунки параметрів режимів шліфування. Встановлено, що досягти температуру різання $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ при глибині шліфування $0,4\text{ мм}$ можна при швидкості деталі 3 м/хв . Це відповідає експериментальним даним та вказує на достовірність отриманих в роботі теоретичних рішень щодо розрахунку температури різання.

Отримані теоретичні рішення застосовано також для визначення температури різання при переривчастому шліфуванні, який є прогресивним методом забезпечення високоякісної обробки. Розрахунками встановлено, що температура різання приймає найменше значення за умови рівності довжин робочих виступів та впадин переривчастого круга. При цьому температура різання тим менше, чим менше довжина робочих виступів круга та більше їх кількість на шліфувальному крузі. Це нове рішення, яке вказує на можливість подальшого вдосконалення цього перспективного методу шліфування з точки зору зниження температури та підвищення якості обробки при одночасному підвищенні й продуктивності обробки. Воно вказує також на значні технологічні можливості розробленої в роботі математичної моделі визначення температури різання при шліфуванні.

Заслуговує значної уваги проведене в роботі експериментальне оцінювання максимальної температури різання в залежності від енергоємності обробки, яка рівносильна умовному напруженню різання. Для цього застосовано відомі експериментальні значення енергоємності обробки, отримані для умов лезової обробці, мікрорізання одиничним абразивним зерном та шліфування. Виходячи із розрахункової залежності максимальної температури різання встановлено, максимальна температура різання більша при шліфуванні, і менша при лезовій обробці. Показано, що зменшити максимальну температуру різання при шліфуванні можна шляхом підвищення різальної здатності шліфувального круга, наприклад, застосуванням ефективних методів правлення круга (електроерозійного та електрохімічного правлення алмазного круга на металевій зв'язці). Однак найбільш ефективним шляхом її зменшення є ефективне застосування на фінішних операціях методів лезової обробки алмазними інструментами або сучасними збірними твердосплавними та керамічними інструментами зі зносостійкими покриттями закордонного виробництва.

В п'ятому розділі наведено результати визначення умов підвищення якості та продуктивності механічної обробки на основі зниження теплової та силової напруженостей процесу різання.

Основну увагу приділено визначенню температури різання при точінні. Показано, що застосування аналітичної залежності для визначення температури різання при шліфуванні в цьому випадку приводить до завищених значень

температури різання. Це пов'язано із тим, що при шліфуванні має місце безперервний процес тертя зв'язки круга з оброблюваним матеріалом, в результаті тепло рівномірно нагріває поверхневий шар оброблюваної деталі. При точінні, як відомо з теорії різання матеріалів, відбуваються періодичні зсуви елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу вздовж умовної площини зсуву. Розрахунками встановлено, що це приводить до періодичного (миттєвого) нагрівання поверхневого шару оброблюваної деталі, температура різання стає меншою, ніж при рівномірному нагріванні поверхневого шару оброблюваної деталі, що має місце при шліфуванні. Виходячи з цього, здобувачем розроблено уточнену математичну модель визначення температури різання при лезовій обробці із урахуванням періодичного характеру нагрівання поверхневого шару оброблюваної деталі, тобто при періодично – змінному переміщенні шліфувального круга вздовж оброблюваної поверхні. Проведено порівняння отриманих теоретичних рішень із відомими експериментальними даними, отриманими професором Коломійцем В. В., та наведеними в науково-технічній літературі. Встановлено, що їх розходження знаходиться в межах 5 %, що вказує на достовірність отриманих теоретичних рішень. На цій підставі зроблено висновок щодо ефективності застосування методів лезової обробки на фінішних операціях із метою зниження температури різання та підвищення якості обробки.

В розділі наведено також спрощений підхід до визначення температури різання при лезовій обробці, що доповнює розроблений уточнюючий підхід до розрахунку температури різання та дозволяє проводити її спрощений аналіз.

В шостому розділі обґрунтовано технологічні умови зменшення силової напруженості механічної обробки. Основну увагу приділено визначенню складових сили різання, енергоємності обробки та умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу при лезовій обробці. Це пов'язано із тим, що, відповідно до відомої формули професора Зворікіна К. О., умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу приймає значення, які значно перевищують експериментально встановлені значення. Оскільки він аналітично пов'язаний із енергоємністю обробки, то це не дозволяє встановити достатньо об'єктивні шляхи зниження енергоємності обробки (або умовного напруження різання) та, відповідно, шляхи зниження максимальної температур різання. Для вирішення цієї задачі здобувачем отримано нове теоретичне рішення щодо аналітичного визначення умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу, який приймає значення, близькі до експериментальних значень. Наукова новизна цього рішення полягає в тому, що у формуванні умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу переважає радіальна складова сили різання внаслідок інтенсивного тертя в зоні різання. Тому він приймає менші значення порівняно із аналогічними значеннями, отриманими за формулою професора Зворікіна К. О. Це дозволяє науково обґрунтовано підходити до визначення умов зниження енергоємності та дозволяє уточнити відому формулу професора Зворікіна К. О. щодо визначення умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу.

В розділі наведено розрахунки складових сили різання та енергоємності обробки при точінні, які з високою точністю співпадають із

експериментальними даними та вказують на можливість застосування отриманих аналітичних залежностей для визначення параметрів силової напруженості лезової обробки.

В розділі розглянуто умови підвищення ефективності високошвидкісного фрезування на основі зниження енергоємності обробки. Встановлено, що це досягається збільшенням відношення товщини зрізу до радіусу округлення ріжучого леза інструмента й зменшенні інтенсивності тертя в зоні різання за рахунок переходу в зону високошвидкісного фрезування.

В сьомому розділі обґрунтовано технологічні закономірності підвищення точності й продуктивності механічної обробки.

Здобувачем розроблено математичну 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. Це дозволило із єдиних позицій із урахуванням енергоємності обробки провести порівняння величин пружного переміщення для різних технологій механічної обробки та вибрати найбільш ефективні варіанти високоточної й високопродуктивної фінішної обробки.

На основі порівняння отриманих аналітичних залежностей встановлено, що в умовах високошвидкісної лезової обробки можна досягти менших значень пружного переміщення, виникаючого в технологічній системі, ніж при шліфуванні та забезпечити підвищення точності й продуктивності. Це пов'язано, в першу чергу, із суттєвим зниженням умовного напруження різання та збільшенням швидкості різання. Показано, що найбільш ефективно застосовувати високошвидкісну обробку на операціях розточування отворів різцями із синтетичних надтвердих матеріалів та твердих сплавів зі зносостійкими покриттями. Завдяки цьому досягається більш інтенсивне усунення похибок розміру та форми обробленої поверхні, ніж при внутрішньому шліфуванні, що дозволяє підвищити точність та продуктивність обробки.

В роботі проведено теоретичний аналіз закономірностей виникнення пружних переміщень при розсвердлюванні отворів. Встановлено, що зі збільшенням проходів свердла пружне переміщення зменшується, а це приводить до збільшення похибки форми отвору. Тому запропоновано обробку отвору здійснювати за один або декілька проходів із застосуванням свердел різного діаметру, збільшуючи їх діаметр на кожному наступному проході. Однак, як встановлено розрахунками, при розсвердлюванні отвору пружне переміщення, що визначає похибку форми оброблюваного отвору, більше ніж при його розточуванні, особливо при високошвидкісному розточуванні. Показано, що досягти значного зниження пружного переміщення та, відповідно, підвищення точності й продуктивності обробки можна в умовах високошвидкісного розфрезування отворів із застосуванням сучасних різальних інструментів зі зносостійкими покриттями. Таким чином, в роботі теоретично обґрунтовано ефективність застосування методів високошвидкісної лезової

обробки для підвищення точності та продуктивності за умов забезпечення значного зниження енергоємності обробки.

Восьмий розділ присвячений розробленню та впровадженню у виробництво ефективних технологічних процесів механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості. Для вирішення цих задач проведено експериментальні дослідження основних технологічних параметрів шліфування та лезової обробки спеціально виготовлених зразків та деталей формуючої оснастки. При обробці використовували сучасні різальні лезові твердосплавні та керамічні інструменти зі зносостійкими покриттями закордонного виробництва. Експериментальні дослідження здійснювали 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 α -D21iB (Японія). Досліджували 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 LC59-1 (напівтвердої), берилієвої бронзи БрБНТ. Експериментально оцінювали значення енергоємності обробки (умовного напруження різання) та максимальної температури різання. Встановлено, що при шліфуванні зразків, виготовлених із сталі 3 та сталі 45, ці параметри приймають надмірно великі значення у зв'язку із інтенсивним тертям зв'язки шліфувального круга з оброблюваним матеріалом. В результаті максимальна температура різання значно перевищує температуру плавлення оброблюваного матеріалу. Відношення температури різання та максимальної температури різання приймає значення в межах 0,055 ... 0,12, що вказує на незначне використання теплового балансу при шліфуванні.

Проведено експериментальні дослідження технологічного процесу розточування отворів діаметром 25 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 та різального інструменту, оснащеного змінною багатогранною пластиною, виготовленою із кермету зі зносостійким покриттям TiN, із частотою обертання 2000 об./хв. Встановлено, що максимальна температура різання приймає значення 568 °С, що менше температури плавлення оброблюваного матеріалу. Відповідно, відношення температури різання та максимальної температури різання дорівнює 0,75. 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.

Ще більший ефект досягнуто при точінні деталі «вал», виготовленої із латуні LC59. Відношення температури різання та максимальної температури різання дорівнює приблизно одиниці, а максимальна температура різання (рівна 71 °С) значно менше температури плавлення оброблюваного матеріалу.

Це вказує на те, що в енергетичному балансі обробки лезовим інструментом переважає енергія "чистого" різання над енергією тертя.

Проведено експериментальні дослідження технологічного процесу фрезування деталі – фільєра макаронна «мушля», виготовленої з латуні LC59, на сучасному верстаті FANUC ROBODRILL α -D21iB твердосплавною мікрофрезою LNE0808 ($D = 0,8$ мм, $n = 20000$ об./хв., ширина фрезування дорівнює діаметру мікрофрези $D = 0,8$ мм). Максимальна температура різання дорівнює 290 °С, тобто при фрезуванні вона вище, ніж при точінні, однак менша ніж температура плавлення оброблюваного матеріалу. Для зниження максимальної температури різання необхідно застосовувати охолоджувальну рідину. Експериментально встановлено, що при цьому шорсткість оброблених поверхонь знаходиться на рівні $R_a=0,8$ мкм, а точність розміру оброблених поверхонь в межах до $0,02$ мм. Це відповідає вимогам до якості та точності виготовлення деталей складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості.

Таким чином, експериментально підтверджено технологічні можливості підвищення якості, точності, продуктивності та, відповідно, зниження трудомісткості механічної обробки деталей складнопрофільної формуючої оснастки шляхом застосування сучасних різальних твердосплавних і керамічних інструментів зі зносостійкими покриттями. Це дозволило створити методологію розроблення ефективних високопродуктивних технологічних процесів лезової обробки для фінішних операцій. В результаті розроблено та впроваджено у виробництво ефективні технологічні процеси механічної обробки деталей 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. 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 гривень.

Висновки до розділів та за результатами роботи сформульовані достатньо чітко і виразно та відповідають змісту дисертаційної роботи.

У **додатках** наведено акти впровадження результатів дослідження у виробництво ТОВ «Імперія металів» і навчальний процес Економіко-технологічного інституту імені Роберта Ельворті (м. Кропивницький), список публікацій здобувача, матеріали з оцінювання технологічних можливостей різних схем механічної обробки за температурним критерієм.

Список використаних джерел досить повний і охоплює сучасні вітчизняні та зарубіжні публікації.

Зміст автореферату відображає основний зміст дисертації та достатньо

повно розкриває внесок здобувача в наукові результати та практичну цінність роботи.

В представленій докторській дисертації Полянського В. І. не використано результатів його кандидатської дисертації.

По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:

1. Хоча запропонований новий універсальний технологічний параметр – максимальна температура різання, при досягненні якої все тепло, що виділяється при різання, надходить в стружку – безперечно, зручний для практики призначення технологічних режимів, проте він може застосовуватися з певною похибкою. Все одно певна частина тепла надходить в поверхневий шар заготовки, що обробляється.

2. На рис. 3.22 – рис. 3.25 показано, що температура різання в залежності від параметрів режиму різання асимптотично збільшується до сталого значення. Чи витікає з цього, що за цих умов досягається максимальна температура різання у відповідності із залежністю (3.55)?

3. Не показано, як впливають характеристики шліфувального круга на значення температури різання, що розраховані за залежністю (3.55).

4. В розділі 4 наведено теоретичне рішення щодо розрахунку швидкості деталі за температурним критерієм при зубошліфуванні за методом профільного копіювання в умовах глибинного шліфування. Однак не показано, як можна забезпечити задану глибину шліфування, рівну 0,4 мм, із точки зору симетричного розташування круга посередині западини профілю зуба та, відповідно, не допустити при цьому значного підвищення температури шліфування.

5. Не показано, як змінюється максимальна температура різання при переривчастому шліфуванні внаслідок самозагострювання шліфувального круга в процесі його ударної взаємодії з оброблюваним матеріалом, та як це впливає на температуру різання.

6. В роботі недостатньо обґрунтовано питання щодо причин значного перевищення енергоємності шліфування над енергоємністю лезової обробки (при точінні) та шляхів зменшення енергоємності й, відповідно, максимальної температури різання при шліфуванні.

7. Не наведено порівняння параметрів точності обробки сучасними лезовими інструментами та шліфувальними кругами.

8. В роботі не наведено графіків зміни трудомісткості обробки від технологічних параметрів, замість неї розглядається продуктивність обробки. При цьому не показано, як впливає застосування сучасних металорізальних верстатів із ЧПУ типу «обробний центр» на трудомісткість обробки та які строки окупності мають ці верстати в умовах їх впровадження на підприємствах України.

9. Максимальна температура різання більш 11 тисяч °С, що розрахована на стор. 129 дисертації, лежить за межами значень, що можуть зустрічатися в експериментах. Така значна температура, отримана розрахунком, пропонує піддати сумніву математичний апарат підрозділу 3.4 дисертації.

Вказані зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота **Полянського Володимира Івановича** «Основи забезпечення якості та зниження трудомісткості механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості», що подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування, є завершеною науково-дослідною роботою, яка розв'язує важливу науково-практичну проблему, суть якої полягає у теоретичному визначенні та обґрунтуванні 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 високообертових металорізальних верстатів із ЧПУ типу «обробний центр» та прогресивних різальних лезових твердосплавних і керамічних інструментів зі зносостійкими покриттями.

Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності та вимогам п.п. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 567 щодо докторських дисертацій, а здобувач, **Полянський Володимир Іванович**, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування.

Офіційний опонент,
проректор з наукової роботи
Української інженерно-педагогічної
академії, м. Харків,
доктор технічних наук, доцент
26.04.2021



Ку
Олександр КУПРІЯНОВ