

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Рябенков Ігор Олександрович**

УДК 621.923

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ  
ДЕТАЛЕЙ ГІДРОАПАРАТУРИ НА ОСНОВІ ВИБОРУ  
РАЦІОНАЛЬНОЇ СТРУКТУРИ І ПАРАМЕТРІВ ОПЕРАЦІЙ**

Спеціальність 05.02.08 – технологія машинобудування

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса – 2009

Дисертація є рукописом

Робота виконана в Національному технічному університеті “Харківський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України та на Державному підприємстві Харківський машинобудівний завод “ФЕД” Міністерства промислової політики України

**Науковий керівник** доктор технічних наук, професор  
**Новіков Федір Васильович**,  
Харківський національний економічний університет,  
професор кафедри “Техніка і технології”

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Ларшин Василь Петрович**,  
Одеський національний політехнічний університет,  
професор кафедри “Технологія машинобудування”;

кандидат технічних наук, доцент  
**Умінський Сергій Михайлович**,  
Одеський державний аграрний університет,  
доцент кафедри “Експлуатації та ремонту МТП”

Захист відбудеться “ 25 ” вересня 2009 р. о 14.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.052.02 в Одеському національному політехнічному університеті за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Одеського національного політехнічного університету за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1

Автореферат розісланий “21 ” серпня 2009 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

В.С. Кравчук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** У сучасних машинах і системах широко використовуються гідроапаратура, яка складає основу командоапаратів і виконавчих механізмів. Створення високих тисків і забезпечення заданої гідрощільності вимагають високоякісного виготовлення деталей гідроапаратури, особливо деталей пар тертя, які працюють в умовах інтенсивного тертя й зношування. Однак, як показує виробничий досвід, виконати високі вимоги по якості й точності обробки зазначених деталей досить складно, тому що вони виготовлені з матеріалів з підвищеними фізико-механічними характеристиками і їх обробка приводить до утворення значних похибок і температурних дефектів на оброблюваних поверхнях. Це відноситься до операцій внутрішнього й плоского шліфування деталей інтегральних гідроприводів авіаційної техніки, виготовлених з матеріалів, схильних до утворення припиків і розтріскування (цементована сталь 16ХЗНВФМБ, ливарна зносостійка сталь В2Ж, швидкорізальні сталі, сталь ШХ15 й інші), а також до відповідальних, але досить трудомістких операцій обробки високоточних глухих і наскрізних отворів і дугових пазів у деталях, виготовлених, наприклад, із загартованих сталей 7ХГ2ВМФ і 20ХЗНВФА. Тому актуальним завданням є пошук нових технологічних рішень по підвищенню якості, точності й продуктивності обробки, які базуються на науково обґрунтованому виборі раціональної структури й параметрів операцій. Це вимагає, насамперед, визначення технологічних закономірностей формування параметрів точності та якості обробки на основі аналізу теплової й силової напруженості різних методів фінішної абразивної та лезової обробок, що дозволить більш повно оцінити їхні потенційні можливості й виявити умови істотного підвищення якості й продуктивності обробки. У зв'язку із цим, у роботі вирішується важливе науково-практичне завдання розробки й впровадження ефективних операцій фінішної механічної обробки деталей гідроапаратури на основі дослідження теплової й силової напруженості процесу обробки і науково обґрунтованого вибору раціональної структури й параметрів операцій.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана відповідно до наукового напрямку кафедри “Технологія машинобудування й металорізальні верстати” Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”, а також відповідно до Державної комплексної програми розвитку авіаційної промисловості до 2010 року (затвердженої Постановою Кабінету Міністрів 12.12.2001 р.), Закону України “Про державну підтримку літакобудівної промисловості в Україні” (№ 2660-3, 12.07.2002 р.) і програми розвитку Державного Підприємства Харківський машинобудівний завод “ФЕД” на період 2004-2005 р.р. (затвердженої наказом Мінпромполітики України №534 від 13.10.2004 р.). Здобувач брав безпосередню участь у виконанні робіт як відповідальний виконавець.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є підвищення якості, точності й продуктивності обробки деталей гідроапаратури на основі аналізу теплової й силової напруженості фінішної механічної обробки й науково обґрунтованого вибору раціональної структури й параметрів операцій.

Для досягнення зазначеної мети в роботі поставлені наступні задачі:

- обґрунтувати технологічні закономірності формування параметрів якості й точності при лезовій і абразивній обробках з урахуванням температурного й силового факторів;
- обґрунтувати умови підвищення якості й продуктивності фінішної механічної обробки на основі аналітичного визначення миттєвої й середньої температур і глибини проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі при шліфуванні;
- аналітично визначити похибки фінішної механічної обробки отворів і обґрунтувати умови їхнього зменшення;
- виконати науково обґрунтований вибір раціональної структури й параметрів операцій фінішної механічної обробки деталей гідроапаратури за критеріями якості, точності й продуктивності;
- виконати експериментальні дослідження основних технологічних параметрів фінішної механічної обробки деталей гідроапаратури;
- розробити й впровадити у виробництво ефективні операції фінішної механічної обробки деталей гідроапаратури.

*Об'єкт дослідження* – технологічні процеси механічної обробки деталей гідроапаратури.

*Предмет дослідження* – теоретичний аналіз технологічних закономірностей формування параметрів точності й якості обробки та умов їхнього підвищення на операціях абразивної й лезової обробок деталей гідроапаратури.

*Методи дослідження.* Методологічною основою роботи є системний підхід до вивчення і опису технологічних закономірностей формування параметрів якості й точності при абразивній і лезовій обробках та вибору раціональної структури й параметрів операцій. Теоретичні дослідження базуються на фундаментальних положеннях технології машинобудування, теорії різання матеріалів, опору матеріалів та фізики. При математичному моделюванні параметрів механічної обробки використані методи математичного аналізу. Експериментальні дослідження виконані із застосуванням профілографа-профілометра моделі 201, контрольновимірноювальної машини “Wenzel” і ротаметра, твердоміра ПМТ-3, мікроскопа металографічного “МІМ-7”.

**Наукова новизна отриманих результатів.** 1. Вперше з єдиних позицій обґрунтовані технологічні закономірності формування параметрів якості й точності при абразивній і лезовій обробках з урахуванням температурного й силового факторів, що дозволило зробити вибір раціональної структури й параметрів операцій.

2. Вперше на основі аналітичного визначення миттєвої й середньої температури й глибини проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі при шліфуванні обґрунтовані умови підвищення якості й продуктивності обробки, які складаються в істотному зниженні інтенсивності тертя зв'язки круга з оброблюваним матеріалом і збільшенні швидкості круга.

3. Вперше теоретично узагальнені результати досліджень температури при шліфуванні й показана визначальна роль у формуванні параметрів якості обробки середньої температури, обумовленої тертям зв'язки круга з оброблюваним матеріалом.

4. Дістало подальшого розвитку обґрунтування умов істотного підвищення якості, точності й продуктивності обробки отворів за рахунок застосування тех-

нології високошвидкісного фрезерування кінцевими фрезами, що є перспективним напрямком у механічній обробці.

5. Вперше аналітично обґрунтовані принципові відмінності у формуванні величини пружного переміщення в технологічній системі при внутрішньому поздовжньому і врізному шліфуванні, що дозволило виявити нові умови зменшення похибок обробки отворів, які складаються у встановленні безперервної в часі радіальної подачі й максимально досяжної на верстаті (на переході виходжування) швидкості деталі.

**Практична значимість отриманих результатів** полягає в тому, що на основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень розроблені ефективні операції фінішної механічної обробки деталей гідроапаратури, що дозволяють підвищити якість, точність і продуктивність обробки, вилучити утворення різного роду температурних дефектів на оброблюваних поверхнях. Запропоновано нові методики розрахунку оптимальних параметрів фінішної механічної обробки. Розроблені операції фінішної механічної обробки деталей гідроапаратури впроваджені в основне виробництво ДП Харківський машинобудівний завод “ФЕД” з економічним ефектом 118195 гривень на рік. Результати теоретичних і експериментальних досліджень роботи використовуються в навчальному процесі на кафедрі “Технологія машинобудування й металорізальні верстати” Національного технічного університету “ХПІ” і кафедрі “Техніка та технології” Харківського національного економічного університету.

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно та опубліковані в 14 наукових працях. Постановка наукових задач і обговорення результатів проводилися разом з науковим керівником. В роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать: [1] – визначення характеру зміни температури при мікрорізанні одиничним зерном та при шліфуванні; [2] – методика розрахунку температури шліфування й глибини проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі; [3] – оцінка температури при шліфуванні; [6] – умови підвищення продуктивності обробки без збільшення температури при шліфуванні та методика розрахунку мінімально можливої температури; [7] – порівняльний аналіз силової напруженості процесів шліфування і лезової обробки і умови її зменшення; [8] – методика розрахунку величини пружного переміщення при внутрішньому поздовжньому шліфуванні і умови підвищення точності обробки; [10] – теоретичний аналіз умов зменшення похибок обробки отворів і зроблений висновок про низьку ефективність процесу розсвердлювання; [11] – розрахунок температури при глибинному алмазному шліфуванні і умови її зменшення стосовно до шліфування канавок у заготовках для кінцевих фрез і свердел; [13] – умови зниження силової напруженості процесів шліфування і лезової обробки.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертації доповідалися й обговорювалися на X, XIII і XIV Міжнародних науково-технічних конференціях “Фізичні та комп’ютерні технології”, м. Харків, 2005, 2007, 2008 р.р.; XIV Міжнародному науково-технічному семінарі “Високі технології: тенденції розвитку”, м. Харків - м. Алушта, 2008 р.; XV і XVI Міжнародних науково-практичних конференціях “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я”, м. Харків, 2007, 2008 р.р.; V Міжнародній науково-технічній конференції “Су-

часні інструментальні системи, інформаційні технології та інновації”, м. Курськ, Росія, 2007 р.; Міжнародній науково-технічній конференції “Наукові дослідження, автоматика й міцність машин, інноваційні й середозахистні технології в техносфері”, м. Курськ, Росія, 2007 р. Роботу в повному обсязі заслухано та схвалено на розширених наукових семінарах кафедри “Технологія машинобудування й металорізальні верстати” Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” (2008 р.), кафедри “Технологія машинобудування” Одеського національного політехнічного університету (2008 р.) та науково-технічному семінарі технічної ради ДП Харківський машинобудівний завод “ФЕД” (2008 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковані в 14 наукових працях, у тому числі 10 наукових праць у виданнях, рекомендованих ВАК України.

Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків і двох додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи становить 219 сторінок, з них 114 ілюстрацій на 55 сторінках; 16 таблиць за текстом; 3 таблиці на 3 сторінках, 171 найменування використаних літературних джерел на 18 сторінках; 2 додатки на 4 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** розкрито стан і суть науково-технічної проблеми, визначена мета і задачі дослідження, обґрунтована актуальність, сформульована наукова новизна і практична значимість отриманих результатів.

**У першому розділі** проведений аналіз діючих технологічних процесів фінішної механічної обробки деталей гідроапаратури авіаційної техніки й виявлені їхні основні недоліки, що складаються в низькій якості оброблюваних поверхонь, обумовленій виникаючими температурними дефектами й похибками обробки. В особливій мірі це відноситься до операцій внутрішнього й плоского шліфування деталей, виготовлених з матеріалів, схильних до утворення припиків і розтріскування (цементована сталь 16ХЗНВФМБ, ливарна зносостійка сталь В2Ж, швидко-різальні сталі, сталь ШХ15 й інші), а також до масових операцій обробки високоточних глухих і наскрізних отворів і дугових пазів у деталях, виготовлених із загартованих сталей 7ХГ2ВМФ і 20ХЗНВФА. Ці операції характеризуються високою трудомісткістю і складністю забезпечення вимог по точності обробки.

Відзначається, що традиційно задачі підвищення якості обробки вирішуються за рахунок зниження режимів різання, однак це, як відомо, веде до зменшення продуктивності обробки й малоефективно. Набагато ефективніше використовувати більш прогресивні методи обробки, для чого необхідно знати їхні технологічні можливості, уміти проводити порівняння й вибір оптимальних варіантів операцій обробки на основі математичного (аналітичного) опису фізичних і технологічних параметрів обробки. Все це вимагає обґрунтування технологічних закономірностей формування параметрів якості й точності при абразивній і лезовій обробках з урахуванням температурного й силового факторів і науково обґрунтованого вибору раціональної структури й параметрів операцій. Важливими в цьому плані варто розглядати

результати досліджень теплофізики процесів механічної обробки, особливо миттєвої й середньої температур при шліфуванні, які (на думку проф. Маслова Є.М.) у сукупності дозволяють розкрити фізичну сутність теплових процесів при шліфуванні й визначити основні умови підвищення якості й продуктивності обробки, однак не досить повно вивчені й вимагають подальших досліджень. Важливими також варто розглядати результати досліджень похибок обробки, обумовлених пружними переміщеннями в технологічній системі, які отримані в останні роки багатьма ученими. Їхній подальший розвиток дозволить науково обґрунтовано підійти до вибору найбільш ефективних операцій фінішної механічної обробки деталей гідроапаратури. На підставі цього сформульована мета й задачі досліджень, які наведені вище.

**У другому розділі** аналітично визначені миттєва й середня температури при шліфуванні та глибина проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі. Це дозволило обґрунтувати технологічні закономірності формування параметрів якості при абразивній і лезовій обробках і зробити вибір раціональної структури й параметрів операцій. Рішення базуються на розрахункових схемах мікрорізання окремим зерном (різцем) і шліфування, рис. 1. Загальним у цих схемах є те, що припуск на обробку умовно представлений безліччю нескінченно тонких адіабатичних стержнів, які перерізуються зі швидкістю  $V_{piz}$ , що визначає швидкість переміщення теплового джерела вглиб поверхневого шару оброблюваної деталі. Відповідно до теоретичного підходу, запропонованого проф. Якімовим О.В., Новіковим Ф.В. і Яценко С.М., адіабатичний стержень розділений на дві ділянки з довжинами  $l_1$  і  $l_2$ . Довжина  $l_1$  визначає перерізану частину стержня й відповідно частку тепла, що йде в стружки. Довжина  $l_2$  дорівнює глибині поширення тепла в поверхневий шар оброблюваного матеріалу внаслідок його теплопровідності й визначає частку тепла, що йде в оброблювану деталь. На основі урахування балансу тепла, що утворюється при різанні, встановлено, що найбільша температура  $\theta$ , що досягається в точці  $A$  за умов  $l_1 = a$ ;  $l_1 = t$  (рис. 1), а також довжина  $l_2$  для схем мікрорізання окремим зерном (різцем) і шліфування описуються одними і тими ж аналітичними залежностями, які відрізняються лише параметрами  $l_1$ ,  $V_{piz}$  і  $\sigma$ :

$$\theta = \theta_{max} \cdot z, \quad (1)$$

$$l_2 = l_1 \cdot \frac{z}{\bar{l}_1}, \quad (2)$$

$$\bar{l}_1 = \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot l_1 \cdot V_{piz} = -\ln(1 - z) - z, \quad (3)$$

де  $\theta_{max} = \sigma / c \cdot \rho$  – максимально можлива миттєва температура, К;  $\sigma$  – умовне напруження різання, Н/м<sup>2</sup>;  $c$  – питома теплоємність оброблюваного матеріалу, Дж/(кг·К);  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності оброблюваного матеріалу, Вт/(м·К);  $\rho$  – щільність оброблюваного матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;  $z$  – відносна величина температури, змінюється в межах 0...1;  $\bar{l}_1$  – безрозмірна величина;  $a$  – товщина зрізу, м.

Встановлено, що при мікрорізанні окремим зерном  $V_{piz} = V_{кр} \cdot \operatorname{tg} \beta$ , а при шліфуванні  $V_{piz} = V_{дет} \cdot \sqrt{t / 2 \cdot R_{кр}}$ , де  $V_{кр}$  – швидкість круга, м/с;  $\beta$  – умовний кут сколю-

вання оброблюваного матеріалу;  $V_{дет}$  – швидкість деталі, м/с;  $t$  – глибина шліфування, м;  $R_{кр}$  – радіус круга, м. Параметр  $\sigma$  при шліфуванні більше, ніж при мікрорізанні окремим зерном, тому що в цьому випадку оброблюваний матеріал контактує не тільки з ріжучими зернами, але й зі зв'язкою круга, що спричиняє інтенсивне тертя в зоні різання. Тому температура, що виникає при шліфуванні, по фізичній суті є середньою, а при мікрорізанні окремим зерном – миттєвою. Наведені залежності (1), (2) та (3) дозволяють уперше з єдиних позицій встановити аналітичні зв'язки між миттєвою та середньою температурами, що відкриває нові технологічні можливості для виявлення, обґрунтування та реалізації резервів шліфування.

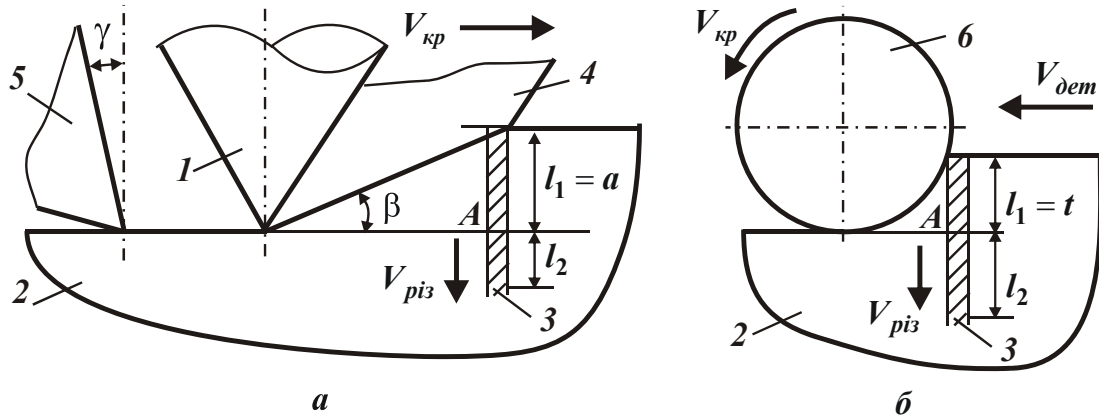


Рис. 1. Розрахункові схеми мікрорізання окремим зерном (різцем) (а) і шліфування (б): 1 – ріжуче зерно; 2 – оброблюваний матеріал; 3 – адіабатичний стержень; 4 – стружка; 5 – різець; 6 – шліфувальний круг.

Із залежностей (1), (2) та (3) випливає, що при мікрорізанні окремим зерном зі збільшенням швидкості  $V_{різ}$  (збільшенням швидкості круга  $V_{кр}$  і товщини зрізу  $a$ ) відносна величина температури  $z$  і відповідно миттєва температура безупинно збільшуються, асимптотично наближаючись до одиниці, рис. 2,а. У цьому випадку практично все тепло, що виділяється при різанні, іде в стружку. В оброблювану деталь іде незначна частина тепла. Параметр  $l_2$  зі збільшенням швидкості круга  $V_{кр}$  зменшується, а зі збільшенням товщини зрізу  $a$  збільшується, рис. 2,б. Із цього випливає, що зменшити параметр  $l_2$  і домогтися підвищення якості обробки можна за рахунок істотного збільшення швидкості круга  $V_{кр}$  – шляхом переходу в область високошвидкісного шліфування, забезпечуючи при цьому миттєву температуру  $\theta$  нижче температури плавлення оброблюваного матеріалу. Для виконання даної умови, виходячи із залежності (1), необхідно зменшити умовне напруження різання

$$\sigma = \sigma_{cm} \cdot \operatorname{tg} \left( 45^\circ + \frac{\psi - \gamma}{2} \right) = \sigma_{cm} \cdot \operatorname{ctg} \beta = \frac{\sigma_{cm}}{K_{різ}} \cdot \left( 1 + \sqrt{1 + K_{різ}^2} \right), \quad (4)$$

де  $\sigma_{cm}$  – границя міцності на стиск оброблюваного матеріалу, Н/м<sup>2</sup>;  $\gamma$  – позитивний передній кут інструмента (абразивного зерна);  $\psi$  – умовний кут тертя перед-



ньої поверхні інструмента зі стружкою;  $K_{різ} = P_z / P_y$  – коефіцієнт різання;  $P_z, P_y$  – відповідно тангенціальна й радіальна складові сили різання, Н.

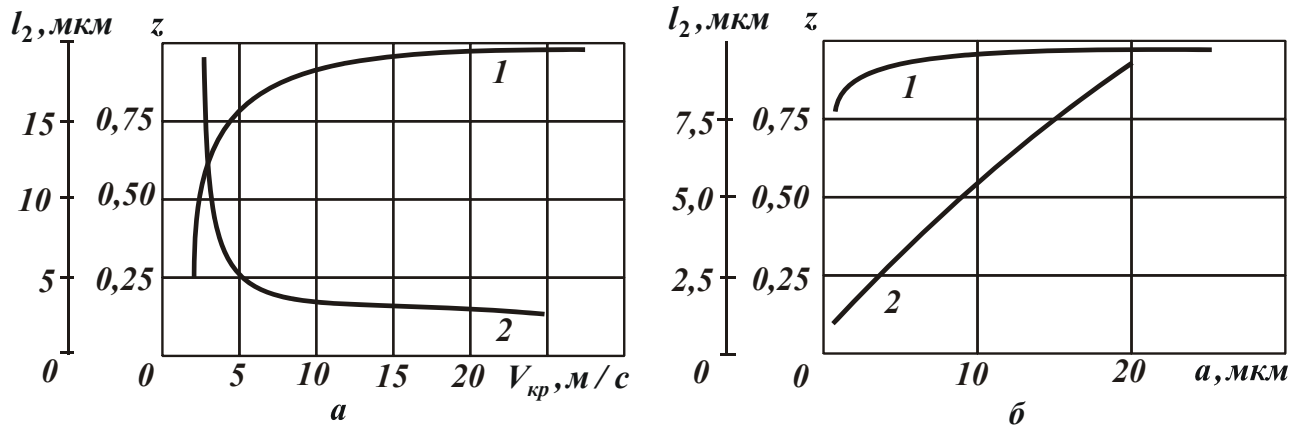


Рис. 2. Залежності відносної величини температури  $z$  (1) і параметра  $l_2$  (2) від швидкості круга  $V_{кр}$  (а) і товщини зрізу  $a$  (б): а –  $a=0,05$  мм; б –  $V_{кр}=27,5$  м/с.

Це досягається зменшенням різниці кутів ( $\psi - \gamma$ ) або відповідно збільшенням умовного кута сколювання оброблюваного матеріалу  $\beta$  (коефіцієнта різання  $K_{різ} > 1$ ). При негативних передніх кутах  $\gamma$ , що характерно для шліфування, різниця кутів  $\psi$  і  $\gamma$  визначається виразом ( $\psi + \gamma$ ), зменшити який можна, по-перше, зменшенням тертя зерна з матеріалом за рахунок застосування ефективних технологічних середовищ, по-друге, за рахунок підтримки високої гостроти зерен (зменшуючи негативний кут  $\gamma$ ). Встановлено, що при відносно невеликих значеннях коефіцієнта тертя  $f = \text{tg} \psi$  оброблюваного й інструментального матеріалів виконати умову  $K_{різ} > 1$  можна навіть при негативних передніх кутах інструмента, рис. 3,а. А це, виходячи з рис. 3,б, приводить до того, що миттєва температура  $\theta$  приймає значення менше температури плавлення  $\theta_{пл} = 1500^\circ\text{C}$  оброблюваного матеріалу (сталі ШХ15).

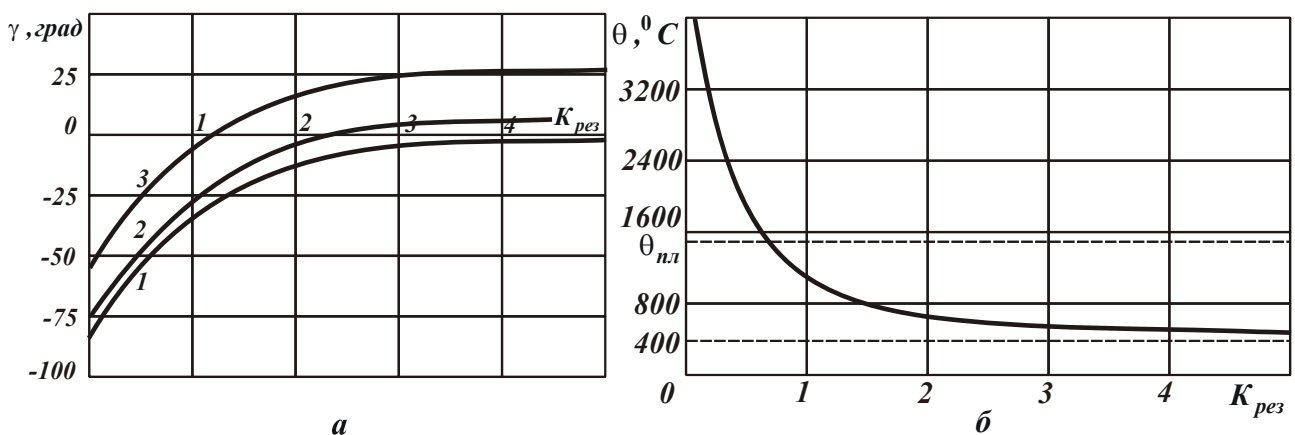


Рис. 3. Залежності кута  $\gamma$  (а) і миттєвої температури  $\theta$  (б) від  $K_{різ}$ : а – 1 –  $\psi = 10^\circ$  ( $f = 0,176$ ); 2 –  $\psi = 20^\circ$  ( $f = 0,364$ ); 3 –  $\psi = 40^\circ$  ( $f = 0,839$ ).

Із залежностей (2) і (3) випливає, що чим менше  $\sigma = \sigma_{cm} / \operatorname{tg}\beta$ , тим більше  $z$  і менше параметр  $l_2$ . Отже, за рахунок зменшення  $\sigma$  можна одночасно зменшити параметр  $l_2$  і миттєву температуру  $\theta$ , що підтверджується експериментальними даними, наведеними в науково-технічній літературі.

Як відомо, при шліфуванні ріжучі зерна круга контактують не з “холодним”, а з “гарячим” оброблюваним матеріалом, нагрітим зернами, які проробили раніше. Внаслідок цього, миттєва температура при шліфуванні й параметр  $l_2$  будуть більші, ніж при мікрорізанні окремим зерном. Це впливає із залежностей (1), (2) та (3), розглядаючи замість товщини зрізу  $a$  глибину шліфування  $t$ :

$$l_2 = t \cdot \frac{z}{\bar{l}_1}, \quad (5)$$

$$\bar{l}_1 = \frac{c \cdot \rho}{\lambda} \cdot t \cdot V_{кр} \cdot \operatorname{tg}\beta = -\ln(1-z) - z. \quad (6)$$

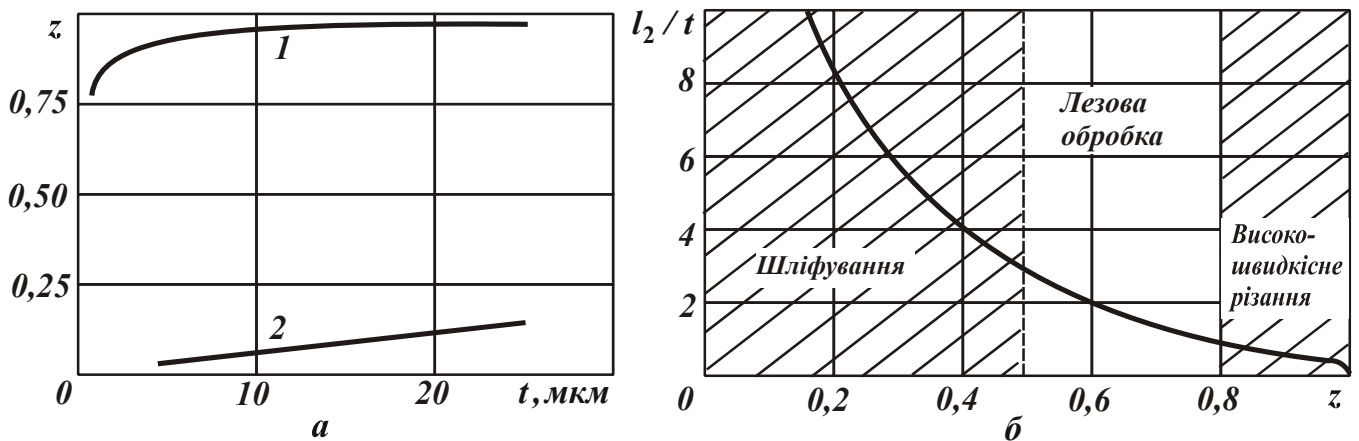


Рис. 4. Залежності  $z$  від  $t$  (а) і  $l_2/t$  від  $z$  (б): а – 1 –  $V_{кр} = 27,5$  м/с;  $\operatorname{tg}\beta = 0,25$ ; 2 –  $V_{дет} = 30$  м/хв; діаметр круга  $D_{кр} = 0,45$  м; оброблюваний матеріал – сталь ШХ15 (коефіцієнт теплопровідності  $a = \lambda / c \cdot \rho = 8,4 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с).

Розрахунками встановлено, що при мікрорізанні окремим зерном швидкість  $V_{різ} = V_{кр} \cdot \operatorname{tg}\beta$  завжди більше, ніж при шліфуванні:  $V_{різ} = V_{дет} \cdot \sqrt{t / 2 \cdot R_{кр}}$ . Відповідно, миттєва температура (крива 1 на рис. 4,а) при однаковому значенні  $\sigma$  більше середньої температури (крива 2 на рис. 4,а), а глибина проникнення миттєвої температури в поверхневий шар оброблюваної деталі  $l_2$ , навпаки, менше глибини проникнення середньої температури (рис. 4,б), яка може багаторазово перевищувати глибину шліфування  $t$ . Отже, підвищити якість обробки можна, по-перше, за рахунок зменшення миттєвої температури, що досягається, як показано вище, збільшенням швидкості круга  $V_{кр}$  і зменшенням параметра  $\sigma$  при мікрорізанні окремим зерном. По-друге, зменшенням глибини проникнення середньої температури  $l_2$  за рахунок зниження або навіть вилучення тертя зв'язки круга з оброблюваним матеріалом. Із цього зроблений висновок про те, що необхідною умовою підвищення якості обробки при шліфуванні є істотне зниження ін-

тенсивності тертя зв'язки круга з оброблюваним матеріалом, а достатньою умовою – збільшення швидкості круга  $V_{кр}$ . У роботі отримані наближені залежності (справедливі при  $z < 0,6$ ) для визначення середньої температури  $\theta$  і параметра  $l_2$ :

$$\theta = \frac{\sigma \cdot z}{c \cdot \rho} = \sigma \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot t \cdot V_{дет}} \cdot \sqrt{\frac{t}{2R_{кр}}}, \quad (7)$$

$$l_2 = \sqrt{2 \cdot \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \cdot \frac{\sqrt{2t \cdot R_{кр}}}{V_{дет}}}. \quad (8)$$

Як видно, зменшити середню температуру  $\theta$  і параметр  $l_2$  без зниження продуктивності обробки, обумовленої добутком параметрів  $V_{дет} \cdot t$ , можна збільшенням  $V_{дет}$  і зменшенням  $t$ . Враховуючи те, що при шліфуванні все-таки складно вилучити тертя зв'язки круга з оброблюваним матеріалом, важливою умовою зменшення параметра  $l_2$  при одночасному зменшенні температури є застосування лезової обробки, особливо високошвидкісного різання (високошвидкісного фрезерування). У цьому випадку, наприклад, на відміну від високошвидкісного шліфування вилучається середня температура, що дозволяє реалізувати умови високоякісної обробки:  $l_2 \rightarrow 0$  (або  $l_2 < t$ );  $z \rightarrow 1$ , рис. 5.

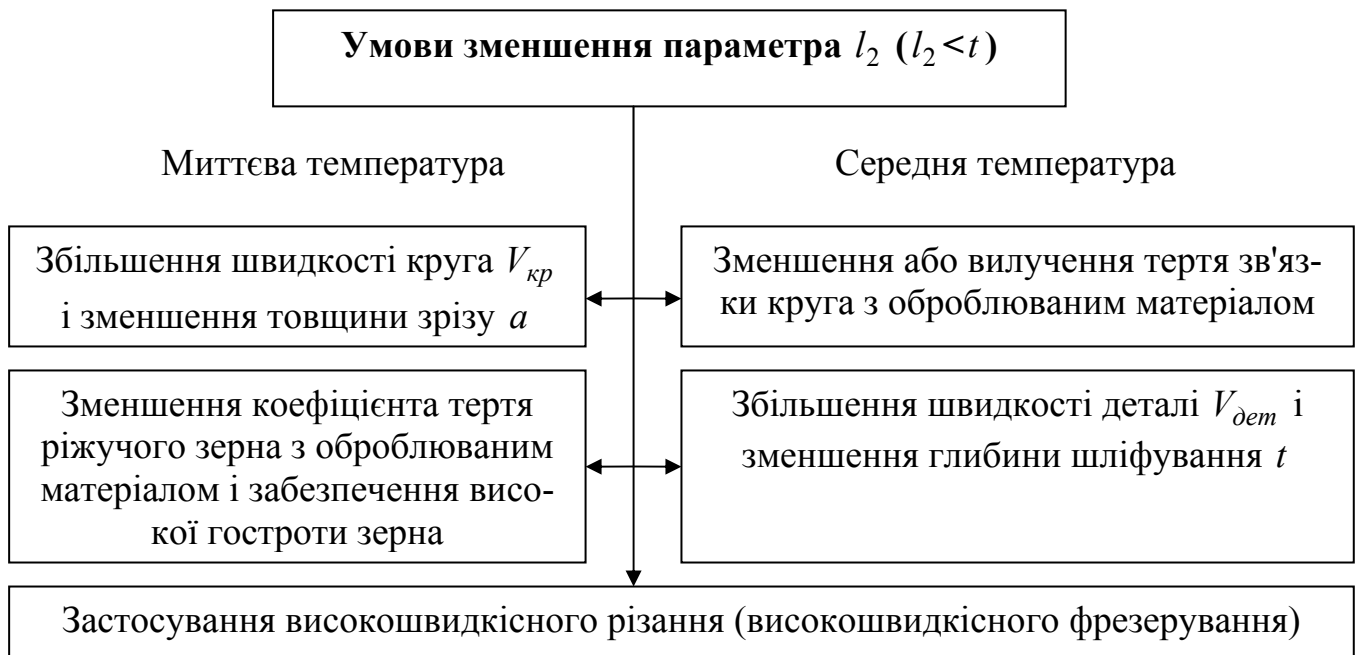


Рис. 5. Структурна схема умов зменшення параметра  $l_2$  ( $l_2 < t$ ).

Отримані результати дозволяють провести класифікацію теплових процесів, що виникають при абразивній і лезовій обробках, на основі відношення  $l_2 / t$  і параметра  $z$ . Як впливає з рис. 4,б, при  $l_2 / t > 3$  і  $z < 0,5$  реалізуються процеси шліфування, при  $1 < l_2 / t < 3$  і  $0,5 < z < 0,8$  – процеси лезової обробки, при  $l_2 / t < 1$  і

$z > 0,8$  – високошвидкісне різання лезовим інструментом. Фактично вилучаючи тертя зв'язки круга з оброблюваним матеріалом, тобто вилучаючи середню температуру, можна в діапазоні  $l_2/t < 1$  і  $z > 0,8$  реалізувати й високошвидкісне шліфування, забезпечуючи тим самим істотне підвищення якості й продуктивності обробки.

З метою оцінки вірогідності теоретичних результатів були проведені експериментальні дослідження відношення  $l_2/t$  при внутрішньому шліфуванні деталі “кожух”, виготовленої зі сталі 16ХЗНВФМБ після цементації, абразивним кругом ЧК 50х25х13 25А 25П СМ1 7 на режимах:  $V_{\text{дем}} = 36$  м/с,  $S_{\text{пад}} = 0,11$  мм/хв;  $t = 0,78$  мкм;  $V_{\text{кр}} = 20 \dots 35$  м/с. Установлено, що в процесі обробки в широких межах зміни режимів шліфування на оброблюваних поверхнях утворюються припіки глибиною  $l_2 = 100 \dots 200$  мкм. Отже, справедливі умови:  $l_2/t \gg 1$ ;  $z \ll 1$ , що відповідає теоретичним даним, наведеним на рис. 4,б. В роботі визначалося відношення  $l_2/t$  при високошвидкісному фрезеруванні твердосплавною кінцевою фрезою отворів у деталях, виготовлених зі сталі 7ХГ2ВМФ (HRC 51...56), з частотою обертання фрези  $n = 8000$  об/хв, глибиною різання  $t = 0,15$  мм, круговою подачею  $S = 0,25$  мм/об й вертикальною подачею – 125 мм/хв. Встановлено, що на оброблюваних поверхнях припіки не виникають, а відношення  $l_2/t = 0,5 \dots 1$ . Це добре узгоджується з теоретичними даними (рис. 4,б). Визначалися також значення  $l_2/t$  на основі експериментальних даних глибин залягання залишкових позитивних напруг в поверхневому шарі оброблюваного матеріалу, наведених у науково-технічній літературі. Так, за даними Філімонова Л.М. при круглому зовнішньому абразивному швидкісному шліфуванні сталі  $l_2/t = 3 \dots 8$ . За даними Якімова О.В. при плоскому абразивному шліфуванні сталі  $l_2/t = 4 \dots 8$ . За даними Попова С.О. при алмазному шліфуванні за пружною схемою твердого сплаву  $l_2/t > 10$ . За даними Грабченко А.І. при точінні сталі різцями із синтетичних надтвердих матеріалів  $l_2/t = 0,5 \dots 2$ . Як видно, наведені експериментальні результати добре узгоджуються з теоретичними (рис. 4,б), що свідчить про їхню вірогідність.

**У третьому розділі** обґрунтовані умови зменшення похибок обробки отворів, обумовлених зніманням нерівномірного припуску і пружними переміщеннями, які утворюються в технологічній системі. Для цього проведений теоретичний аналіз похибок обробки отвору при його розсвердлюванні на основі отриманої в роботі аналітичної залежності для визначення величини пружного переміщення:

$$y = \frac{\sigma}{K_{\text{різ}}} \cdot \frac{2 \cdot S \cdot A_0}{c} \cdot \cos \varphi, \quad (9)$$

де  $S$  – подача, м/об;  $A_0$  – величина відхилення між осями оброблюваного й обробленого отворів, м;  $K_{\text{різ}} = P_z / P_0$  – коефіцієнт різання;  $P_0 = \sqrt{P_y^2 + P_x^2}$  – рівнодіюча радіальної  $P_y$  й осьової  $P_x$  складових сили різання, що діє на лезо свердла, Н;  $c$  – наведена жорсткість технологічної системи в радіальному напрямку, Н/м;  $2\varphi$  – подвійний кут у плані свердла, град.

По фізичній суті величина пружного переміщення  $y$  дорівнює відхиленню осі обробленого отвору щодо її номінального положення. Основною умовою її зменшення є зменшення величини  $\Delta_0$ , тому що при  $\Delta_0=0$  справедливо  $y=0$ . Установлено, що величина  $\Delta_0$  і відповідно  $y$  можуть приймати відносно великі значення. Із цього випливає, що при розсвердлюванні отвору можуть утворюватися значні похибки, усунути які складно на наступних технологічних переходах зенкерування, розгортання й хонінгування, тобто при обробці мірними інструментами. Для їхнього усунення необхідно зменшити глибину різання за рахунок розподілу припуску по проходах, застосовуючи обробку немірними інструментами – шліфування, розточування і фрезерування. У зв'язку із цим визначена величина  $y$  при внутрішньому поздовжньому шліфуванні, розточуванні й фрезеруванні на основі отриманих аналітичних залежностей:

$$y = \frac{\sigma \cdot S \cdot t}{K_{piz} \cdot c} \cdot \frac{V_{dem}}{V_{кр}}, \quad (10)$$

$$y = \frac{\sigma \cdot S \cdot t \cdot \cos \varphi}{K_{piz} \cdot c}, \quad (11)$$

$$y = \frac{\sigma \cdot S \cdot t}{K_{piz} \cdot c} \cdot \frac{V_{dem}}{V_{фр}} \cdot \frac{\pi}{z} \cdot \sqrt{\frac{D}{t}}, \quad (12)$$

де  $S$  – поздовжня подача, м/об;  $t$  – глибина шліфування (різання), м;  $V_{dem}$ ,  $V_{кр}$  – швидкості деталі і круга, м/с;  $\varphi$  – кут різця в плані, град;  $z$  – кількість зубів фрези;  $V_{фр}$  – швидкість фрези, м/с;  $D$  – діаметр фрези, м.

Розрахунками встановлено, що істотно зменшити величину  $y$  можна в умовах високошвидкісного шліфування і фрезерування, тобто ефективно виконувати високошвидкісне “розфрезерування” отворів. Залежності (10), (11) та (12) описують сталі в часі процеси обробки. Щоб оцінити роль перехідних процесів у виправленні похибок обробки отворів, у роботі досліджений характер зміни величини пружного переміщення  $y$  із часом обробки  $\tau$  при внутрішньому поздовжньому шліфуванні. Встановлено, що при  $n$ -ному проході круга величина пружного переміщення  $y_n$  описується залежністю:

$$y_n = \frac{t + y_{n-1}}{\varepsilon} = y_1 \cdot \left( 1 + \frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{\varepsilon^2} + \dots + \frac{1}{\varepsilon^{n-1}} \right), \quad (13)$$

де  $y_1 = \frac{t}{\varepsilon}$ ;  $\varepsilon = 1 + \frac{K_{piz} \cdot c}{\sigma \cdot S} \cdot \frac{V_{кр}}{V_{dem}}$  – уточнення на проході.

Як видно, величина  $y_n$  підкоряється закону спадаючої геометричної прогресії, сума перших  $n$  членів якої дорівнює  $y_n = \frac{t}{(\varepsilon - 1)} = \frac{\sigma \cdot S \cdot t}{K_{piz} \cdot c} \cdot \frac{V_{dem}}{V_{кр}}$ . У підсумку прийшли до залежності (10), справедливої для сталого в часі процесу шліфування, коли фактична й номінальна глибини шліфування рівні між собою. Розрахунками встановлено, що величини  $y_n$  і  $y_1$ , а також фактична і номінальна глибини шліфування відрізняються в кілька разів (рис. 6). Це веде до зниження про-

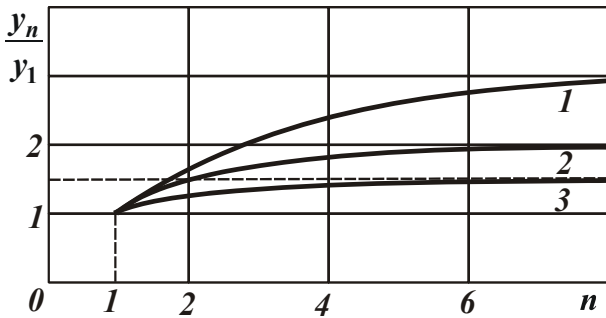


Рис. 6. Залежність відношення  $y_n / y_1$  від кількості проходів круга  $n$ : 1 –  $\varepsilon=1,5$ ; 2 –  $\varepsilon=2$ ; 3 –  $\varepsilon=3$ .

дуктивності обробки й вимагає пошуку технологічних можливостей по усуненню даної розбіжності. Найбільш ефективним рішенням у цьому плані, виходячи з отриманих залежностей, може бути підвищення ріжучої здатності круга (зменшення відношення  $\sigma / K_{різ}$ ) і збільшення швидкості круга  $V_{кр}$ . Дане рішення дозволяє також зменшити величину  $y_n$  й відповідно похибки обробки отвору.

У роботі виконано порівняння тривалості несталого процесу обробки для схем внутрішнього поздовжнього й врізного шліфування на основі одержаних двох різних аналітичних залежностей для визначення величин пружних переміщень:  $y_n = y_{cm} \cdot (1 - \varepsilon^{-n})$ ;  $y = y_{cm} \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot n})$ , де  $y_{cm} = \sigma \cdot Q / (K_{різ} \cdot c \cdot V_{кр})$  – значення пружного переміщення при сталому в часі процесі шліфування, м;  $Q$  – продуктивність обробки, м/с;  $\alpha = \varepsilon - 1$  – безрозмірна величина.

Розрахунками встановлено, що тривалість несталого процесу обробки при внутрішньому врізному шліфуванні менше. Отже, при внутрішньому шліфуванні доцільно використовувати безперервну замість дискретно змінюваною в часі радіальної подачі. При цьому шліфування можна виконувати як з поздовжньою подачею, так і без її. У роботі отримана нова залежність для визначення пружного переміщення  $y_n$  на етапі виходжування при внутрішньому поздовжньому шліфуванні:

$$y_n = \frac{y_{n-1}}{\varepsilon} = \frac{t}{\varepsilon^n}. \quad (14)$$

Показано, що на кожному проході круга реалізується одне і теж уточнення  $\varepsilon = \sqrt[n]{\varepsilon_{сум}}$ , де  $\varepsilon_{сум}$  – сумарне уточнення. Для зменшення основного часу обробки

$$\tau = \frac{\sigma}{K_{різ} \cdot c} \cdot \frac{\pi \cdot D_{дет} \cdot l_{дет} \cdot n}{V_{кр}} \cdot \left( \sqrt[n]{\varepsilon_{сум}} - 1 \right), \quad (15)$$

який забезпечує задане сумарне уточнення  $\varepsilon_{сум}$ , необхідно виконати умову  $n \rightarrow \infty$  ( $V_{дет} \rightarrow \infty$ ), рис. 7. Отже, шліфування ефективно здійснювати з максимально досяжної на верстаті швидкістю деталі й кількістю проходів круга  $n$ , встановлюваним із залежності:

$$\varepsilon = 1 + \frac{K_{різ} \cdot c}{\sigma \cdot S} \cdot \frac{V_{кр}}{V_{дет}} = \sqrt[n]{\varepsilon_{сум}}. \quad (16)$$

Проведено порівняння величин пружних переміщень на етапах виходжування при внутрішньому поздовжньому і врізному шліфуванні по залежностях:  $y_n = y_{cm} \cdot (1 + \alpha)^{-n}$ ;  $y = y_{cm} \cdot e^{-\alpha \cdot n}$ . Розрахунками встановлено, що застосування схеми внутрішнього врізного шліфування дозволяє інтенсифікувати процес виправлення похибок оброблюваного отвору.

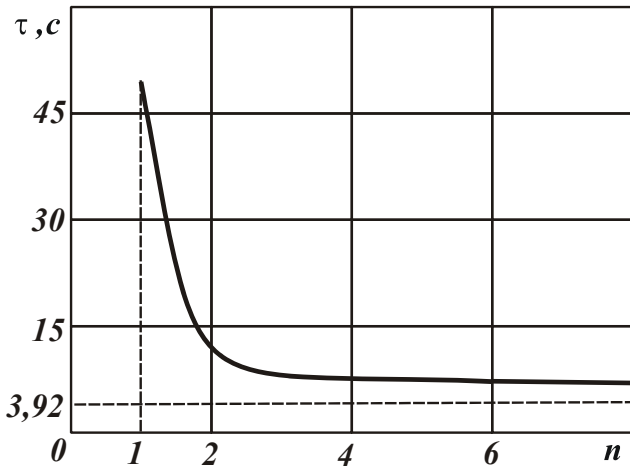


Рис. 7. Залежність основного часу обробки  $\tau$  від  $n$  для  $\varepsilon_{\text{сум}}=50$ .

У роботі також зроблена оцінка амплітуди коливань при шліфуванні на основі рішення диференціального рівняння руху маси  $m$  (наведеної маси системи шліфувального круга) у напрямку дії радіальної складової сили різання  $P_y = \frac{\sigma \cdot S}{K_{\text{різ}}} \cdot (t - y) \cdot \frac{V_{\text{дет}}}{V_{\text{кр}}}$  з урахуванням початкових умов  $y(\tau = 0) = 0$  і  $\dot{y}(\tau = 0) = 0$ :

$$y = y_{\text{стат}} \cdot (1 - \cos p\tau), \quad (17)$$

$$\text{де } y_{\text{стат}} = \frac{t}{\left(1 + \frac{K_{\text{різ}} \cdot c}{\sigma \cdot S} \cdot \frac{V_{\text{кр}}}{V_{\text{дет}}}\right)}; p = \sqrt{\frac{c_1}{m}}$$

– власна частота технологічної системи, 1/с;  $c_1 = c + \frac{\sigma \cdot S}{K_{\text{різ}}} \cdot \frac{V_{\text{дет}}}{V_{\text{кр}}}$ ;  $c$  – жорсткість технологічної системи, Н/м.

Встановлено, що амплітуда коливань  $y$ , описувана залежністю (17), може в 2 рази перевищувати статичне значення пружного переміщення  $y_{\text{стат}}$ . Із урахуванням того, що в межі  $y_{\text{max}} = 2 \cdot y_{\text{стат}} \rightarrow 2 \cdot t$ , за певних умов обробки круг буде періодично виходити з контакту з деталлю, викликаючи зниження якості обробки. Виходячи із залежності (13), зменшити амплітуду коливань можна зменшенням  $y_{\text{стат}}$  за рахунок підвищення ріжучої здатності круга (зменшення відношення  $\sigma / K_{\text{різ}}$ ), збільшення  $c$  і  $V_{\text{кр}}$ . При цьому частота коливань  $p$  буде тим більше, чим більше параметри  $c$ ,  $S$ ,  $V_{\text{дет}}$  і відношення  $\sigma / K_{\text{різ}}$ .

У четвертому розділі наведені результати розробки й впровадження ефективних операцій фінішної механічної обробки деталей гідроапаратури. Для цього спочатку були проведені експериментальні дослідження процесу фрезерування твердосплавними кінцевими фрезами отворів у деталях із загартованих сталей (сталі 7ХГ2ВМФ) твердістю  $HRC\ 51...56$  на сучасному високооборотному верстаті із ЧПУ моделі “Рісмах 60” і показана можливість підвищення точності, якості й продуктивності обробки за рахунок переходу в область високошвидкісного фрезерування. Це, по суті, є новим напрямком в механічній обробці й дозволяє з високою ефективністю замінити традиційно застосовувану технологію обробки глухих отворів у блоці циліндрів, яка включає розточування з наступним алмазним хонінгуванням і не забезпечує стабільно відхилення від циліндричності в межах 0,01 мм. Глухі отвори  $\varnothing 10,6$  мм і довжиною 26 мм, що мають на дні кільцеву канавку шириною 2,5 мм, обробляються під дифузійне зварювання із бронзовими втулками. Експериментально встановлено, що при високошвидкісному фрезеруванні даних отворів ( $n=8000$  об/хв) стабільно забезпечується відхилення від циліндричності 0,01 мм і шорсткість поверхні на рівні  $R_a=0,63$  мкм (рис. 8). При цьому до 2,5 разів збільшується продуктивність об-

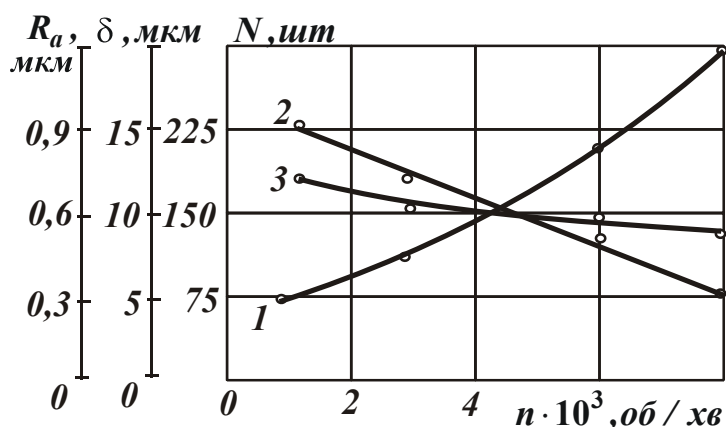


Рис. 8. Вплив частоти обертання фрези  $n$  на кількість оброблених однією фрезою отворів  $N$  (1), відхилення від циліндричності отвору  $\delta$  (2), параметр шорсткості обробки  $R_a$  (3): глибина різання  $t=0,15$  мм; кругова подача  $S=0,25$  мм/об; вертикальна подача – 125 мм/хв.

в другому й третьому розділах роботи висновки про можливість підвищення якості й точності оброблюваних поверхонь в умовах високошвидкісного фрезерування. На основі отриманих результатів розроблена ефективна технологія високошвидкісного фрезерування глухих отворів і дугових пазів шириною 2,5...5,0 мм у деталях із загартованих сталей твердістю  $HRC$  51...56, застосування якої дозволило вирішити складні задачі по підвищенню якості й продуктивності обробки.

Проведено експериментальні дослідження круглого внутрішнього шліфування на верстаті зі ЧПУ моделі “Studer” деталі “кожух” із цементованої сталі 16ХЗНВФМБ. Встановлено, що в широких діапазонах зміни параметрів режимів шліфування на оброблюваних поверхнях утворюються припіки й відбувається розтріскування оброблюваного матеріалу (круг ЧК 50x25x13 25А 25П СМ1 7;  $V_{dem}=36$  м/с,  $S_{pad}=0,11$  мм/хв;  $t=0,78$  мкм;  $V_{кр}=20...35$  м/с). Глибини проникнення припіків становлять 100...200 мкм. Це значно більше глибини шліфування, тобто справедливе співвідношення  $l_2/t > 1$ , що вказує на визначальну роль в утворенні припіків середньої температури, обумовленої тертям зв'язки круга з оброблюваним матеріалом. Показано, що вилучити температурні дефекти на оброблюваних поверхнях у процесі шліфування можна, застосовуючи середньом'які та імпрегновані (термооброблені) круги, тверді змащення та зменшуючи в умовах інтенсивного тертя в зоні різання швидкість круга до значень  $V_{кр}=18...20$  м/с. Це дозволило збільшити граничну швидкість радіальної подачі (до значення 0,22 мм/хв) і відповідно продуктивність обробки. Обґрунтована ефективність застосування схеми круглого внутрішнього врізного шліфування в плані підвищення точності обробки, що підтверджує аналітичні рішення, одержані в третьому розділі. В роботі також були експериментально визначені умови обробки, що вилучають утворення на оброблюваних поверхнях припіків і мікротріщин на операції плоского шліфування деталі “важіль” з ливарної зносостійкої сталі В2Ж ( $HRC_e \geq 58$ ). Вони складаються в зниженні інтенсивності

робки й до 4 разів стійкість твердосплавних кінцевих фрез, виключаються припіки й інші температурні дефекти на оброблених поверхнях.

Встановлено, що зі збільшенням частоти обертання фрези в межах 1000...8000 об/хв мікротвердість  $H_{100}$  обробленого отвору зменшується від 2300 до 1900 МПа. Це незначно відрізняється від вихідної мікротвердості 2450 МПа, що свідчить про домінування в механізмі формування параметрів якості обробки силового фактора й незначну роль теплового фактора. Експериментальні дані підтверджують зроблені



тертя зв'язки круга з оброблюваним матеріалом шляхом застосування м'яких кругів твердістю МЗ. Цим показано, що теплові процеси при шліфуванні обумовлені, головним чином, проявом середньої температури. Отже, проведений у роботі теоретичний аналіз миттєвої й середньої температур при шліфуванні й глибини проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі дозволив науково обґрунтовано підійти до визначення умов підвищення якості й продуктивності обробки.

Зроблено оцінку технологічних можливостей ефективного використання високошвидкісного фрезерування і алмазного хонінгування наскрізних отворів у сепараторах, виготовлених із загартованої сталі 20Х3НВФА, замість застосовуваного малопродуктивного ручного притирання алмазною пастою АСМ НОМГ зернистістю 14/10, 5/3, 3/2. Експерименти виконувалися на хонінгувальному верстаті фірми "Nagel", що працює в автоматичному режимі, з використанням хонінгувальної головки  $\varnothing 12,85_{-0,05}$  мм із двома хонінгувальними брусками 15x3,88x3x1 зернистістю 60/40, 100%-ної концентрації на металевій зв'язці М2-01. Встановлено, що алмазне хонінгування дозволяє підвищити продуктивність праці в 1,8 рази й стабільно забезпечити необхідну перпендикулярність отвору в межах 0,05 мм, тоді як по раніше застосовуваній технології досягалось значення лише 0,1 мм. Експериментально встановлено, що використання на даній операції високошвидкісного фрезерування дозволяє ще в більшій мірі підвищити продуктивність і точність обробки в порівнянні з алмазним хонінгуванням, наприклад, забезпечити перпендикулярність отвору в межах 0,01 мм.

Необхідно відзначити, що реалізація високошвидкісного фрезерування стала можливою також завдяки освоєнню виробництва на сучасному заточувальному верстаті зі ЧПУ моделі "Gemini" монолітних кінцевих фрез із твердих сплавів і швидкорізальних сталей. Для цього були теоретично й експериментально за температурним критерієм обґрунтовані умови здійснення операції вишліфування канавок у заготовках кінцевих фрез, а також свердел.

Проводилися експериментальні дослідження процесу вишліфування канавки глибиною 3,6 мм алмазним кругом 1А1 75x6x20x6 ЛКВ 100/80 100% при виготовленні кінцевої шестиперої фрези  $\varnothing 24$  мм зі швидкорізальної сталі Р18 ( $V_{дет} = 0,5$  м/хв;  $V_{кр} = 15,7$  м/с;  $t = 1$  мм) при інтенсивному охолодженні зони обробки (шляхом розпилення охолоджуваної рідини). Однак, як встановлено експериментально, на оброблюваних поверхнях з'являлися припіки, що свідчило про високий рівень температури шліфування. Для вилучення припиків і забезпечення високої якості обробки швидкість деталі  $V_{дет}$  була зменшена до значення 0,1 м/хв. У цьому випадку, виходячи із залежності (3), відносна величина температури  $z$  приймає значення 0,21 (табл. 1), а температура шліфування  $\theta$  – значення  $925,3^{\circ}\text{C}$ , що нижче критичної температури, при якій на оброблюваних поверхнях з'являються припіки. Цим показано, що теоретичні результати добре погодяться з експериментальними даними.

Таблиця 1

Розрахункові значення параметрів  $z$  і  $\theta$ 

$V_{дет}$ , м/хв	0,05	0,08	0,1
$z$	0,14	0,19	0,21
$\theta^{\circ}\text{C}$	616,8	837,1	925,3

Розроблені операції фінішної механічної обробки деталей гідроапаратури впроваджені в основне виробництво ДП Харківський машинобудівний завод “ФЕД” з економічним ефектом 118195 гривень на рік. Це дозволило підвищити якість і продуктивність обробки, поліпшити техніко-економічні показники виготовлених виробів до рівня світових виробників аналогічної продукції (фірми “Sundstrand”, США).

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі отриманих нових науково обґрунтованих результатів вирішене важливе й актуальне науково-практичне завдання створення ефективних операцій фінішної механічної обробки деталей гідроапаратури шляхом вибору раціональної структури й параметрів операцій на основі дослідження теплової й силової напруженості процесу обробки.

1. Вперше аналітично з єдиних позицій визначені миттєва й середня температури при шліфуванні та глибина проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі й на їх основі доведена визначальна роль у формуванні параметрів якості обробки середньої температури при шліфуванні, обумовленої тертям зв'язки круга з оброблюваним матеріалом. Це дозволило науково обґрунтовано підійти до виявлення й реалізації нових технологічних можливостей абразивної й лезової обробок за температурним критерієм, вибору раціональної структури й параметрів операцій.

2. Сформульовані необхідна й достатня умови підвищення якості й продуктивності обробки при шліфуванні. Вони складаються в зниженні або навіть вилученні тертя зв'язки круга з оброблюваним матеріалом і збільшенні швидкості круга, оскільки в цьому випадку фактично все тепло йде в стружки, а глибина проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі незначна – знаходиться на рівні товщини зрізу одиничним зерном круга.

3. Проведено класифікацію теплових процесів, що виникають при абразивній і лезовій обробках, на основі відношення глибини проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі та глибини шліфування ( $l_2/t$ ), а також відносної величини температури  $z$ . Теоретично та експериментально доведено, що при умові  $l_2/t > 3$  і  $z < 0,5$  реалізуються процеси шліфування, при  $1 < l_2/t < 3$  і  $0,5 < z < 0,8$  – процеси лезової обробки, а при  $l_2/t < 1$  і  $z > 0,8$  – високошвидкісне різання лезовим інструментом. Встановлено, що зменшення відношення  $l_2/t$  й збільшення величини  $z$  забезпечує підвищення якості та продуктивності обробки. Виходячи із цього був зроблений висновок про ефективність застосування високошвидкісного різання лезовим інструментом, зокрема, високошвидкісного фрезерування.

4. Аналітично визначені похибки обробки отворів, що обумовлені зніманням нерівномірного припуску і пружними переміщеннями, які утворюються в технологічній системі при різанні мірними й немірними лезовими й абразивними інструментами. Показано, що при обробці отворів немірними інструментами (при шліфуванні, розточуванні й фрезеруванні) за рахунок розбивки припуску по проходах можна істотно зменшити похибки при однаковій продуктивності обробки. Особливо це відноситься до високошвидкісного фрезерування отворів, що дозволяє розглядати його одним з

найбільш ефективних методів механічної обробки високоточних отворів в умовах знімання нерівномірних припусків.

5. Отримано нові аналітичні залежності величини пружного переміщення при внутрішньому шліфуванні від часу обробки. На їх основі обґрунтована ефективність здійснення внутрішнього шліфування не з дискретною, а з безперервною в часі радіальною подачею, реалізуючи при цьому на переході виходжування максимально досягну на верстаті швидкість деталі.

6. Проведено експериментальні дослідження параметрів якості, точності й продуктивності обробки, що дозволило перевірити й уточнити отримані теоретичні рішення та виконати науково обґрунтований вибір раціональної структури й параметрів операцій фінішної механічної обробки деталей гідроапаратури. Встановлено, що при лезовій обробці (високошвидкісному фрезеруванню) на відміну від процесів шліфування на оброблених поверхнях відсутні температурні дефекти, а мікротвердість обробленої деталі фактично відповідає вихідній мікротвердості. При цьому забезпечується висока точність обробки отворів (відхилення від циліндричності змінюється в межах 0,01 мм), підвищується в 2,5 рази продуктивність обробки та до 4 разів стійкість кінцевих фрез. На цій основі розроблені ефективні операції високошвидкісного фрезерування твердосплавними кінцевими фрезами глухих отворів і дугових пазів шириною 2,5...5 мм у деталях із загартованих сталей на сучасних високооборотних верстатах із ЧПУ типу "Рісوماх 60".

7. Експериментально встановлено, що основним шляхом усунення припиків і мікротріщин на оброблюваних поверхнях при шліфуванні за рахунок зниження інтенсивності тертя в зоні різання є застосування більш м'яких (з твердістю від СМ до М) та імпрегнованих (сполуками на основі стеарину) кругів. Це дозволило розробити ефективні операції внутрішнього й плоского шліфування відповідальних деталей гідроапаратури із загартованих сталей, а також обґрунтувати ефективність застосування високошвидкісного фрезерування (та алмазного хонінгування) замість притирання алмазною пастою наскрізних отворів у деталях із загартованої сталі. Визначено умови підвищення ефективності глибинного алмазного шліфування за температурним критерієм на операції шліфування канавок при виготовленні кінцевих фрез і свердел із твердих сплавів і швидкорізальних сталей на сучасному заточувальному верстаті із ЧПУ моделі "Gemini".

8. Розроблені операції фінішної механічної обробки деталей гідроапаратури авіаційного призначення впроваджено в основне виробництво ДП Харківський машинобудівний завод "ФЕД" з економічним ефектом 118195 гривень на рік. Це впровадження дозволило підвищити якість, точність та продуктивність обробки на фінішних операціях, поліпшити техніко-економічні показники виготовлених виробів до рівня світових виробників аналогічної продукції.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Рябенков И.А. Теоретический анализ условий повышения качества обработки по температурному критерию / Ф.В. Новиков, И.А. Рябенков // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ. – 2007. – Вип. 61. – С. 164-171.

2. Рябенков И.А. Расчет температуры шлифования и глубины ее проникновения в поверхностный слой обрабатываемой детали / Ф.В. Новиков, И.А. Рябенков // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2008. – №1/2 (31). – С. 9-12.
3. Рябенков И.А. Исследование теплонапряженности процессов шлифования / Ф.В. Новиков, И.А. Рябенков // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2008. – №2/4 (32). – С. 41-44.
4. Рябенков И.А. Определение условий образования погрешностей обработки при шлифовании / И.А. Рябенков // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2008. – №3/5 (33). – С. 6-9.
5. Рябенков И.А. Исследование погрешностей механической обработки отверстий / И.А. Рябенков // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2008. – №4/4 (34). – С. 55-59.
6. Рябенков И.А. Определение путей уменьшения температуры и повышения производительности при механической обработке / Ф.В. Новиков, И.А. Рябенков // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: машинобудування, машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ. – 2008. – Вип. 5 – С. 56-60.
7. Рябенков И.А. Условия снижения силовой напряженности процесса механической обработки / Ф.В. Новиков, С.А. Дитиненко, И.А. Рябенков // Резание и инструмент в технологических системах: междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2008. – Вып. 74. – С. 220-226.
8. Рябенков И.А. Расчет и анализ закономерностей изменения величины упругого перемещения при шлифовании с течением времени обработки / Ф.В. Новиков, И.А. Рябенков // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2008. – Вып. 75. – С. 299-305.
9. Рябенков И.А. Определение условий уменьшения температуры шлифования и глубины ее проникновения в поверхностный слой обрабатываемой детали / И.А. Рябенков // Вісник НТУ “ХП”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХП”. – 2008. – № 23. – С. 16-21.
10. Рябенков И.А. Теоретический анализ формирования погрешностей при обработке отверстия с начальной значительной некруглостью / Ф.В. Новиков, И.Е. Иванов, И.А. Рябенков // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ. – 2008. – Вип. 68. – С. 119-135.
11. Рябенков И.А. Глубинное алмазное шлифование быстрорежущей стали / Ф.В. Новиков, И.А. Рябенков, О.С. Кленов // Физические и компьютерные технологии: междунар. научн.-техн. конф., 19-20 апреля 2007 г.: труды – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2007. – С. 232-236.
12. Рябенков И.А. Разработка эффективных технологий финишной абразивной и лезвийной обработки с учетом температурного фактора / И.А. Рябенков // Физические и компьютерные технологии: междунар. научн.-техн. конф., 24-25 сентября 2008 г.: труды – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2008. – С. 125-132.
13. Рябенков И.А. Снижение силовой напряженности процессов механической обработки / Ф.В. Новиков, С.А. Дитиненко, И.А. Рябенков // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: міжнар. наук.-практ. конф., 4-6 червня 2008 р.: тези докладів у 2 ч. – Ч.1 – Харків: НТУ “ХП”, 2008. – С. 121.

14.Рябенков И.А. Физические условия осуществления процессов высокоскоростного резания и глубинного шлифования / И.А. Рябенков // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: межд. науч.-техн. конф., 23-25 мая 2007 г.: тезисы докладов в 2 ч. – Ч. 2. – Курск: КГТУ, 2007. – С. 179-185.

**Рябенков І.О. Підвищення ефективності фінішної обробки деталей гідроапаратури на основі вибору раціональної структури і параметрів операцій.** - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування. – Одеський національний політехнічний університет, Одеса, 2009.

Дисертація присвячена розробці ефективних операцій фінішної механічної обробки деталей гідроапаратури. Для цього обґрунтовано технологічні закономірності формування параметрів якості й точності при абразивній і лезовій обробках з урахуванням температурного й силового факторів, що дозволило зробити вибір раціональної структури й параметрів операцій. На основі аналітичного визначення миттєвої й середньої температури й глибини проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі при шліфуванні обґрунтовані умови підвищення якості й продуктивності обробки, які складаються в істотному зниженні інтенсивності тертя зв'язки круга з оброблюваним матеріалом і збільшенні швидкості круга. Теоретично узагальнені результати досліджень температури при шліфуванні й показана визначальна роль у формуванні параметрів якості обробки середньої температури при шліфуванні, обумовленої тертям зв'язки круга з оброблюваним матеріалом. Теоретично доведена можливість істотного підвищення якості, точності й продуктивності обробки отворів за рахунок застосування технології високошвидкісного фрезерування кінцевими фрезами. Проведено експериментальну перевірку теоретичних рішень. Розроблені і впроваджені ефективні операції високошвидкісного фрезерування глухих і наскрізних отворів і дугових пазів шириною 2,5...5 мм у деталях із загартованих сталей на сучасних верстатах із ЧПУ типу "Рісомат 60"; операції внутрішнього і плоского шліфування відповідальних деталей із загартованих сталей, що вилучають припіки і мікротріщини на оброблюваних поверхнях.

**Ключові слова:** якість обробки, процес шліфування, абразивний круг, високошвидкісне фрезерування, математичне моделювання.

**Рябенков И.А. Повышение эффективности финишной обработки деталей гидроаппаратуры на основе выбора рациональной структуры и параметров операций.** – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения. – Одесский национальный политехнический университет, Одесса, 2009.

Диссертация посвящена разработке эффективных операций финишной механической обработки деталей гидроаппаратуры. Для этого обоснованы технологиче-

ские закономерности формирования параметров качества и точности при абразивной и лезвийной обработках с учетом температурного и силового факторов, что позволило произвести выбор рациональной структуры и параметров операций. На основе аналитического определения мгновенной и средней температуры и глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали при шлифовании обоснованы необходимые и достаточные условия повышения качества и производительности обработки, которые состоят в существенном снижении интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом и увеличении скорости круга. Теоретически обобщены результаты исследований температуры при шлифовании и показана определяющая роль в формировании параметров качества обработки средней температуры при шлифовании, обусловленной трением связки круга с обрабатываемым материалом. Теоретически доказана возможность существенного повышения качества, точности и производительности обработки отверстий за счет применения технологии высокоскоростного фрезерования концевыми фрезами, что является перспективным направлением в механической обработке.

Аналитически обоснованы принципиальные отличия в формировании величины упругого перемещения в технологической системе при внутреннем продольном и врезном шлифовании, что позволило выявить новые условия уменьшения погрешностей обработки отверстий, состоящие в установлении непрерывной во времени радиальной подачи и максимально достижимой на станке (на переходе выхаживания) скорости детали.

Проведены экспериментальные исследования параметров качества и производительности обработки, позволившие проверить и уточнить полученные теоретические решения. Так, экспериментально установлено, что глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали при шлифовании значительно превышают глубины шлифования. А это свидетельствует о наличии интенсивного трения связки круга с обрабатываемым материалом и преобладании средней температуры при шлифовании в формировании параметров качества обработки. Показано также, что при лезвийной обработке, вследствие более низкой силовой напряженности процесса, глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали меньше, чем при шлифовании.

Экспериментально установлено, что при высокоскоростном фрезеровании в отличие от процессов шлифования на обработанных поверхностях отсутствуют температурные дефекты, а микротвердость обработанной детали соответствует исходной микротвердости. Обеспечивается высокая точность обработки отверстий – отклонение от цилиндричности в пределах 0,01 мм, чего, например, не достигалось ранее при растачивании и последующем хонинговании глухих отверстий  $\varnothing 10,6$  мм и длиной 26 мм в блоке цилиндров, изготовленном из стали 7ХГ2ВМФ твердостью *HRC* 51...56. Обеспечивается также увеличение в 2,5 раза производительности обработки и до 4 раз стойкости твердосплавных концевых фрез. На этой основе разработаны эффективные операции высокоскоростного фрезерования твердосплавными концевыми фрезами глухих и сквозных отверстий и дуговых пазов шириной 2,5...5 мм в деталях из закаленных сталей на современных высокооборотных станках с ЧПУ типа "Picomax 60".

Экспериментально установлено, что основным путем устранения прижогов и микротрещин на обрабатываемых поверхностях при шлифовании является снижение интенсивности трения в зоне резания за счет применения более мягких и импрегнированных абразивных кругов. На этой основе разработаны эффективные операции внутреннего и плоского шлифования деталей “кожух” и “рычаг” из закаленных сталей. Теоретически и экспериментально определены также условия повышения эффективности глубинного алмазного шлифования по температурному критерию на операции вышлифовки канавок при изготовлении концевых фрез и сверл из твердых сплавов и быстрорежущих сталей. Внедрение в производство разработанных финишных операций абразивной и лезвийной обработки позволило повысить точность, качество и производительность.

**Ключевые слова:** качество обработки, процесс шлифования, абразивный круг, высокоскоростное фрезерование, математическое моделирование.

**Riabekov I.A. Improving the finishing of hydraulic equipment parts effectiveness on the basis of choice of the operation rational structure and parameters.**  
– Manuscript.

The thesis for the scientific degree of the Candidate of engineering science on the specialty 05.02.08 – Machine Building Technology. – Odessa National Polytechnic University, Odessa, 2009.

The thesis is devoted to the hydraulic equipment parts finishing effective operations development. To this purpose technological characteristics of the quality and accuracy formation in grinding and cutting are grounded, taking into account the temperature and force factors, which make a rational choice of the operation structure and parameters. Necessary and sufficient conditions of machining quality and productivity improvement are proved on the basis of analytical definition of instant and average temperature and heat penetration depth to the surface layer in grinding. These conditions are determined by essential decreasing in wheel bond and processed material friction intensity and wheel speed increasing. Results of grinding temperature researches are theoretically generalized and the average grinding temperature defining role in formation of processing quality parameters is shown, while the temperature caused by the friction.

Possibility of essential improvement of quality, accuracy and productivity of processing of apertures at the expense of application of technology of high speed milling by spiral-end mills that is a perspective direction in machining is theoretically proved. The machining quality and productivity experimental research confirm the accuracy of the theoretical solutions. On the basis mentioned above effective operations of apertures and arc 2,5 ... 5 mm grooves high speed milling by hard alloy spiral-end mills in parts made from the hardened steels are developed while on modern high speed CNC machine tools, for example “Picomax 60” type. Besides internal and flat grinding operations components to machine works made from responsible hardened steels are also introduced.

**Key words:** quality of machining, grinding process, abrasive wheel, high speed milling, mathematical modeling.