

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

На правах рукопису
УДК 621.338

Добротворський Сергій Семенович

**Наукові основи процесу лазерної правки
шліфувальних кругів з надтвердих матеріалів**

Спеціальність 05.03.07 - процеси лазерної та фізико-технічної обробки

АВТОРЕФЕРАТ

**дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук**

Київ-1996

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському державному технічному університеті на кафедрі технології машинобудування та металорізальних верстатів.

Науковий консультант: академік АНТКУ, доктор технічних наук, професор Ю.Т.Костенко

Офіційні опоненти : доктор технічних наук, професор Л.Ф.Головко

академік АІНУ, доктор технічних наук А.П.Любченко

доктор технічних наук, професор Ю.К.Новоселов

Провідна організація - корпорація "ФЭД"
м.Харків

Захист відбудеться "14" ЖОВТНЯ 1996 р. о годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 01.02.09 при Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут" за адресою: 252056, м.Київ, пр.Перемоги, 37 корп. 1, ауд. 214.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий "6" ВЕРЕСНЯ 1996 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д 01.02.09 доктор технічних наук, професор

Н.С.Равська

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00759943 (.)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В умовах ринкових відносин конкурентноспроможність машинобудівельної продукції можна забезпечити тільки високим рівнем фінішної обробки і спроможністю безперервного розширення номенклатури виробів з зростанням їх випуску дрібними серіями. Створення підприємств, що забезпечують багатноменклатурність виробів, зв'язане з розвитком інтегрованих проектно-виробничих систем механообробки деталей (ІПВС МД) з наскрізним безпапірним циклом "проектування-виготовлення" і підвищеною концентрацією різноманітних методів обробки.

Найбільші труднощі виникли на шляху інтеграції в ІПВС МД технологій шліфування, оскільки для забезпечення необхідної якості і продуктивності обробки, а також для роботи з широкою гамою матеріалів, які обробляються, необхідні накопичення шліфувальних кругів (ШК) з різноманітними характеристиками та зміна інструменту навіть у межах одного технологічного циклу обробки, використання різноманітних способів правки і профілювання. При цьому практично немає змоги сумістити операції шліфування, контролю і керування ріжучою спроможністю круга. Наслідком цих труднощів є те, що до сьогоднішнього часу питання гнучкої перебудови процесу шліфування в залежності від матеріалу виробів і вимог до поверхні, яка обробляється, не знайшли певного вирішення. Але без інтеграції шліфування в гнучкі виробничі модулі (ГВМ) неможливе створення ІПВС МД.

З цього випливає, що проблема розширення технологічної гнучкості процесу шліфування має актуальний характер і потребує вирішення.

При розробці цієї проблеми у роботі використано підхід, який засновано на комплексному керуванні ріжучими якістьми і параметрами ШК в процесі його правки. Правка, з точки зору використання її в ГВМ, повинна легко автоматизуватися, а також відрізнятися повторюваністю і універсальністю для різних умов обробки і типів кругів.

Оскільки існуючі способи правки кругів, кожен зокрема, не від-

повідать усім переліченим вимогам, розробка нового, більш універсального способу правки, з розширеними технологічними спроможностями і відповідачого вимогам ІПВС МД, є актуальною науковою проблемою, що має важливе теоретичне і народногосподарське значення.

В дисертації для вирішення цієї проблеми було запропоновано спосіб правки ШК з використанням інтенсивного лазерного випромінювання (ЛВ).

Головним об'єктом досліджень були вибрані алмазні круги на металевих зв'язках, тому що вони дозволяють обробляти певний спектр матеріалів. Також розглядалися і інші ШК, як із надтвердих матеріалів (кубічний нітрид бору), так і з традиційних абразивних матеріалів (Al_2O_3).

Дисертаційна робота виконувалась відповідно до теми, яка належить до комплексної науково-технічної програми, затвердженої постановою ДКНТ України N 52 (завдання 05.43.01/023-93 "Лазерна правка шліфувальних кругів з надтвердих матеріалів"), а також тем, які належать до комплексної цільової науково-технічної програми "Технологія-96", затвердженої Міністерством машинобудування, військово-промислового комплексу та конверсії України від 10.03.93, розділ "Лазерна техніка і технологія" (п.3.17 - "Впровадження лазерних технологій правки та профілювання кругів з надтвердих матеріалів", п.8.7 - "Розробка та організація виробництва лазерних технологічних комплексів для правки та профілювання кругів з надтвердих матеріалів"), і державною програмою "Российская инженеринговая сеть технических нововведений" (постановление Правительства Российской Федерации от 13.07.91, N 396, п.2.5).

Мета роботи полягає в підвищенні ефективності і поширенні технологічних можливостей шліфування шляхом застосування лазерної правки шліфувальних кругів з надтвердих матеріалів.

Завдання дослідження. Для досягнення вказаної мети необхідно виконати дослідження:

- процесів взаємодії ЛВ з матеріалами кругів і оптимізації процесу лазерної правки;
- технологічних основ лазерної правки;

- критеріїв і алгоритмів контролю якості кругів;
- інтеграції лазерної правки і алмазного шліфування у наскрізний цикл: "Проектування, технологічна підготовка, виготовлення, контроль".

Методи дослідження. Для теоретичних досліджень використано апарат математичної фізики і теорії теплопровідності. Експериментальні дослідження проводились методами оптичної і растрової електронної мікроскопії, рентгенівської фотоелектронної спектроскопії, електронної оже-спектроскопії, мас-спектрометрії вторинних іонів, рентгенівського флуоресцентного аналізу, рентгеноструктурного аналізу, рентгенівської тензометрії, профілографування і п'єзотензометрії, емісії заряджених часток з використанням як серійних, так і виготовлених приладів. Технологічні процеси правки вивчалися на спеціальному та промисловому обладнанні, яке містило різноманітні лазери і системи діагностики.

Наукова новизна. У роботі вирішена важлива проблема побудови наукових основ лазерної правки і контролю якості шліфувальних кругів з надтвердих матеріалів, що дозволило значно розширити технологічні можливості шліфування та інтеграції його в ИПС МД. Вирішення цієї наукової проблеми має важливе теоретичне і народногосподарське значення.

1. Запропоновано і вивчено новий спосіб правки ШК, в якому якправлячий інструмент використовується інтенсивне ЛВ у інфрачервоному діапазоні довжин хвиль.

2. Запропонована і вирішена науково обгрунтована модель оптимального керування ЛВ, яка адекватно відображає різні боки взаємодії його з поверхнею ШК.

3. Розроблена методика оптимального керування ЛВ для досягнення заданої технологічної глибини правки.

4. Уперше виконані комплексні дослідження фізичних основ процесу лазерної правки ШК.

5. Сформульоване наукове положення про можливість комплексного керування абразивними властивостями поверхні ШК внаслідок модифікації її ЛВ.

6. Розроблені технологічні основи методу лазерної правки, підтверджена його універсальність.

7. На підставі теоретично-ймовірносного підходу при вивченні шорстких поверхнь здобуті вирази для дискретного і безперервного критеріїв якості. Запропоновано метод і алгоритм контролю якості поверхні ШК.

8. Уперше проведена інтеграція лазерної правки у наскрізний цикл ІПВС МД "проектування-виготовлення" з розробкою усіх необхідних підсистем ІПВС МД.

На захист виносяться основні положення:

1. Фізичні основи і концепція лазерної правки ШК з надтвердих матеріалів на металевій зв'язці, які впливають з комплексного вивчення процесів взаємодії ЛВ з поверхнею ШК і матеріалів, що їх складають.

2. Математична модель оптимального керування лазерною правкою і методологія її вирішення, заснована на модульному зображенні алгоритму зворотного зв'язку між тепловими і хімічними процесами.

3. Стратегія та алгоритм контролю якості поверхні ШК, засновані на статистико-ймовірносному підході, теорії прийняття рішень.

4. Технологічні основи процесу лазерної правки і модифікація абразивних якостей поверхнь алмазних кругів на металевих зв'язках.

5. Концепція і досвід інтеграції процесу лазерної правки у наскрізний цикл "проектування-виготовлення" при шліфуванні деталей складної форми.

Практична цінність :

Новий спосіб лазерної правки збільшує термін служби інструменту на 30-50%, знижує продуктивне витрачання алмазу на 20-30% та енерговитрати на 15-20%, зменшує час правки круга в 5-10 разів порівняно з електроерозійною правкою. При цьому підвищується якість обробки, досягається відновлення результатів правки і, внаслідок шліфування, поширюються їх технологічні можливості. Інтеграція методу у структуру ІПВС МД дозволяє автоматизувати процес правки і шліфування, з високою ефективністю шліфувати деталі складної форми.

Реалізація роботи.

Результати роботи впроваджено в Асоціації центрів інжинірингу і автоматизації (м. Санкт-Петербург) при створенні гнучкого багатоопераційного модуля з інтеграцією нового методу лазерної правки у структуру наскрізного циклу "проектування - виготовлення". ІПВС МД, що дозволило створити нову технологію шліфування деталей складної форми (пера лопатки турбіни) з важкообробної кераміки і скоротити цикл в 1,7 разів, гнучко керувати продуктивністю та шорсткістю ШК та деталей, що шліфуються. Вартість впровадження лазерної правки в ГВМ не перевищує 1% загальної вартості ІПВС МД.

Результати роботи також впроваджені в ХНДІТМ (м. Харків) при виконанні науково-дослідної роботи "Исследование и оптимизация процессов автоматизированной физико-механической обработки в ГПМ" згідно з договором N 69933 від 1.01.87 при розробці гнучких модулів механообробки площинних деталей, твердосплавних наплавок і газотермічних покриттів, відновлюваних валів роторів електричних турбін. Спосіб дозволив підняти якість шліфування на 0,5...1 клас та продуктивність порівняно з технологією, яка існувала на підприємстві, в 1,5 разів. Сумарний економічний ефект в цінах 1990 р. склав 527000 руб.

Апробація роботи.

Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідались на трьох Міжнародних конференціях "Нові технології в машинобудуванні", Харків, 1992, 1993, 1994, і Міжнародній конференції "InterGrind-91", Ленінград, 1991, чотирьох Всесоюзних конференціях "Разработка и промышленная реализация новых механических и физико-химических способов обработки", Москва, 1988, "Проблемы осуществления и внедрения гибких производственных и робото-технических комплексов на предприятиях машиностроения", Одеса, 1989, "Использование лазеров в народном хозяйстве", Шатура, 1989, "Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц", Свердловськ, 1991, і дванадцяти наукових конференціях (Харків, Київ, Санкт-Петербург, Донецьк, 1989-1994).

Матеріали роботи обговорювались на семінарах Асоціації тех-

нологів-машинобудівників України і засіданнях Експертної ради Мінмашпрому України.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 41 публікацію, серед них 2 монографії, 20 статей, 2 патента СРСР та 1 авторське свідоцтво (крім того, одержано три позитивних рішення на отримання патентів).

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, 6 розділів, загальних висновків, переліку використаної літератури та додатків. Робота викладена на 327 стор., має 97 мал., 7 табл. і бібліографію на 197 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

На початку роботи обґрунтована її актуальність та сформульовані загальні положення, які виносяться на захист, приведені наукова новизна і практична цінність роботи.

У літературному огляді проведено аналіз існуючих механічних, електрофізикохімічних та комбінованих способів правки алмазних кругів на металевих зв'язках, який показав, що незважаючи на значні досягнення, вони мають обмеження з точки зору використання їх у ГВМ. Поряд з цим огляд показав, що в галузі шліфування надто обмежений досвід використання лазерів. Тому у огляді розглянуто існуючі моделі руйнування матеріалів ЛВ та опису шорстких поверхнь, спектри поглинання ЛВ компонентами поверхні ШК. На підставі огляду сформульовано, що для вирішення загальної задачі правки ЛВ необхідно:

- вирішити задачу оптимального керування ЛВ для вибіркового видалення металевої зв'язки з поверхні алмазного круга на задану глибину при формуванні його мікропрофілю;

- вирішити проблему статистичного контролю якості мікропрофілю шліфувальних кругів та шліфованих поверхнь;

- провести теоретичні та експериментальні дослідження процесів взаємодії ЛВ з матеріалами ШК;

- розробити технологічні основи лазерної правки;

- провести інтеграцію лазерної правки і алмазного шліфування у наскрізний цикл: "Проектування, технологічна підготовка, виготовлення, контроль".

До теоретичної частини роботи належить задача оптимального керування ЛВ для вибіркового видалення металевої зв'язки з поверхні алмазного круга при формуванні його мікропрофілю.

Розгляд сьогоденних моделей стосовно процесів правки та профілювання ШК, при яких знімається дуже тонкий шар матеріалу, свідчить, що вони не ураховують для процесу розруйнування мішені вплив результату термохімічних реакцій на зростання поглинальної спроможності поверхні. Тим часом продукти реакції (наприклад, окисна плівка) можуть мати сильний вплив на ефективність поглинання ЛВ (Бункін Ф.В., Лук'ячук Б.С. та інш.). При цьому мається на увазі спроможність такого вибору параметрів випромінювання, при якому процес іде по траєкторії, що максимально наближена до необхідної.

В цілому математична модель для етапів керування дією ЛВ на поверхню ШК припускає модульне подання. На першому етапі вона містить математичну модель процесу нагріву поверхневого шару ШК з урахуванням впливу термохімічних реакцій і математичну модель нестационарного процесу теплопровідності в ШК для функції, яка вишукується, $T(\rho, t) = V(\rho, t)\exp(-b^2t)$, у вигляді

$$\frac{1}{a} \frac{\partial V}{\partial t} = \Delta V, \quad (1)$$

з наступними межовими умовами:

$$\left. \frac{\partial V}{\partial \rho} \right|_{R_1} = \frac{q_1(t)}{\lambda} \exp(-b^2t/a), \quad \left. \frac{\partial V}{\partial \rho} \right|_{R_2} = \frac{q_2(t)}{\lambda} \exp(-b^2t/a), \quad (1a)$$

$$V(\rho, 0) = V_0(\rho) = T_0,$$

де Δ - оператор Лапласа, b^2 - інтегральна характеристика відтоку тепла з бокових поверхнь, R_1 і R_2 - внутрішній та зовнішній радіус ШК відповідно, $q_1(t)$ - щільність витрат теплового потоку з внутрішньої поверхні, $q_2(t)$ - щільність падаючого теплового потоку, λ - коефіцієнт теплопровідності, a - коефіцієнт температуропровід-

ності. Точне розв'язання задачі (1) має вигляд

$$T(\rho, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \bar{T}_k C_k^{-1} \left[Y_1(\mu_k R_2) J_0(\mu_k \rho) - J_1(\mu_k R_2) Y_0(\mu_k \rho) \right],$$

де $\bar{T} = \exp(-\mu_k^2 a t) \times$

$$\times \left\{ \bar{T}_0 + (R_2 a / C_k) \left[Y_1(\mu_k R_2) J_0(\mu_k R_2) - J_1(\mu_k R_2) Y_0(\mu_k R_2) \right] \times \right.$$

$$\times \int_0^t \exp(\mu_k^2 a z) \frac{q_2(z)}{\lambda} dz - (R_1 a / C_k) \left[Y_1(\mu_k R_2) J_0(\mu_k R_1) - \right.$$

$$\left. - J_1(\mu_k R_2) Y_0(\mu_k R_1) \right] \int_0^t \exp(\mu_k^2 a z) \lambda^{-1} q_1(z) dz \left. \right\},$$

$$C_k = 2 \frac{J_1^2(\mu_k R_2) - J_1^2(\mu_k R_1)}{\pi^2 \mu_k^2 J_1^2(\mu_k R_1)},$$

а $J_1(\rho)$ та $Y_1(\rho)$ - функції Бесселя і Вебера.

Дослідження процесу нагріву поверхневого шару ШК на першому етапі керування ЛВ урахує вплив термохімічних реакцій згідно з моделлю Бункіна, коли при оптимальному керуванні процесом нагріву тонкої мішені величина енерговитрат може бути задана виразом :

$$E = \int_0^{t_f} P(t) dt \Rightarrow \min \quad (3)$$

при такій системі обмежень:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{d}{x} \exp\left[-T_d T^{-1}\right],$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{mc} \left[P(t) A(x) - P_{\text{пот}}(T) \right], \quad (3a)$$

$$T(t=t_f) = T_0, \quad x(0) = x_n, \quad T(0) = T_n.$$

де $P_{\text{пот}}(T)$ і P - потужність теплових витрат та ЛВ, падаючого на поверхню мішені, m і c - маса і теплоємність мішені, $A(x)$ - поглинальна спроможність мішені в процесі змінення її температури T , T_n - початкова температура, T_d та d - сталі параболічного закону окислення, t - час дії ЛВ. Характерною особливістю моделі (3) є зворотний зв'язок між тепловими та хімічними ступенями свободи :

нагрів мішені дуже впливає на темп росту товщини окисної плівки, від якої, у свою чергу, зростає поглинальна спроможність матеріалу, а як наслідок, і темп нагріву поверхні. Для $A(x)$ у залежності від товщини окисної плівки x користуються формулою

$$A(x) = A_0 + bx; \quad b = 4\pi^2(n^2 - 1)A_0/\lambda^2, \quad (4)$$

де A_0 - стартова поглинальна спроможність матеріалу; n - дійсна частка комплексної діелектричної проникливості окислу $\sqrt{\epsilon} = n + ik$; λ - довжина хвилі ЛВ.

Таким чином, на першому етапі керування сформульована задача, розглянута і проаналізована математична модель, яка більш точно відображає реальний процес та особливості просторової форми ШК і основні фізичні і хімічні процеси, що діють на поверхні ШК.

Крім того, для більш реального моделювання процесу руйнування поверхневого шару необхідно мати на увазі геометрію ШК і вирішити такі задачі:

1. Визначити час затримки росту температури поблизу стрибка поглинальної спроможності, тобто час, за який $T|_{\rho=R_2}$ залишається сталою і рівною температурі стрибка.

2. Дослідити процеси випаровування металу з поверхневого шару ШК і визначити швидкість фронту випаровування при побудові оптимального (за швидкодією та мінімальними за енерговитратами) керування процесами руйнування поверхневого шару ШК.

3. Визначити термін випаровування після закінчення імпульсу ЛВ з метою більш точного корегування технологічного циклу обробки поверхні ШК лазерною дією.

Ця проблема, як показав огляд вітчизняних та зарубіжних робіт, ще знаходиться в процесі інтенсивних досліджень. З метою ефективного вирішення цієї проблеми з урахуванням перелічених факторів збудуємо трьохступеневе керування процесом руйнування поверхневого шару ШК при його правці.

На першому етапі здійснюється однобічне оптимальне по швидкодії керування нагрівом ШК за мінімальний час t до температури плавлення $T_{пл}$ - при обмеженнях на енерговитрати та градієнти температур-

ного поля в поверхневому шарі круга з метов запобігання утворення тріщин. Урахування фізико-хімічних факторів задачі, що розглядається на першому етапі керування, здійснюється шляхом використання розподілу температури $T(R_2, t)$ на поверхні ШК за даними, отриманими Бункіним.

На першому етапі керування функцією керування є функція теплового потоку на поверхні ШК ($\rho=R_2$). Вона визначається з розв'язання інтегрального рівняння

$$T^*(R_2, t) = T(R_2, t, q_1(t), q_2(t)), \quad (5)$$

де $q_1(t)$ - функція, яка характеризує процес теплопередачі від круга до валу, $T(R_2, t, q_1(t), q_2(t))$ - точне аналітичне розв'язання нестационарної задачі теплопровідності (1) при $\rho = R_2$.

Рівняння (5) розв'язувалось відносно вишукуємої функції $q_2(t)$ спільним використанням методів кінцевих різниць та ітерацій. За цими даними обчислювався оптимальний часовий хід потужності випромінювання у тестовому варіанті при $A_0 = 0.07...$ Порівняння знайдених результатів з результатами Бункіна показало добре узгодження.

Побудова другого етапу керування нагрівом поверхні ШК урахує вплив поглинальної спроможності металів при плавленні на час затримки температури поблизу скачка поглинальної спроможності, тобто на час, вповодж якого $T|_{\rho=R_2}$ зостається сталов й рівною температурі скачка в зв'язку з тим, що поглинальна спроможність більшості металів при плавленні зростає у 2-3 рази через різке зниження електропровідності.

У роботі розглянуто вплив стрибкових змін оптичних сталих на характер теплової дії випромінювання. При $l/R_2 \ll 1$, де l - технологічна глибина обробки поверхні шару ШК, нелінійну задачу теплопровідності при поверхневому поглинанні ЛВ можна розглядати у одновірному наближенні :

$$\frac{\partial W}{\partial t} = a \frac{\partial^2 W}{\partial x^2}; \quad W = W(x, t); \quad x > 0, \quad (6)$$

$$W(x, 0) = W(\infty, t) = 0; \quad \left. \frac{\partial W}{\partial x} \right|_{x=0} = q_a A(u),$$

де $u = T|_{x=0}$, $q_e = q_0 / \lambda T_{пл}$, a - коефіцієнт температуропровідності матеріалу, $W = (T - T_0) T_c^{-1}$, T_c - температура, що відповідає стрибку поглинання, T_0 - стартова температура.

Залежність поглинальної спроможності $A(u)$ від температури задається функцією

$$A(u) = f(u, \beta) = \left[1 + \gamma \exp[\beta(u - u_c)] \right] \left[1 + \exp[\beta(u - u_c)] \right]^{-1},$$

яка при $\beta \rightarrow \infty$ переходить у ступеневу функцію. Тут β - безрозмірний параметр, γ - стала, пов'язана зі стрибком поглинання ($0 < \gamma < 1$).

Застосувавши інтегральний метод Гудмена з використанням додаткових межових умов на глибині проходження δ , отримаємо

$$\Delta t_A = \frac{2}{3aq_e^2} \lim_{\substack{\Delta u \rightarrow 0 \\ \beta \Delta u \rightarrow \infty}} \int_{u_c - \Delta u}^{u_c + \Delta u} \frac{d \left(\frac{u^2}{f(u, \beta)} \right)}{f(u, \beta)} = \frac{1}{3} \frac{u_c^2}{aq_e^2} \left[\gamma^{-2} - 1 \right]. \quad (7)$$

Якщо δ стрибок мав місце при температурі $u_c > u_{пл}$, то в формульованні задачі з'явилася б додаткова умова, пов'язана з фазовим переходом на межі $x = \delta$, що видозмінило б інтегральне рівняння балансу енергії і в кінцевому результаті збільшило б час затримки в

$$u_c^{-2} \left[u_c^2 + 2\varepsilon(u_c - u_{пл}) - \varepsilon \sqrt{2\varepsilon_c(u_{пл} - u_c^2)} + \varepsilon^2 + \varepsilon^2 \right] \quad (8)$$

разів. Тут $\varepsilon = L/cT_0$, c - теплоємність плавлення, L - прихована теплота плавлення, $T_{пл}$ - температура плавлення.

Таким чином, час перемикання керування з першого етапу на другий рівняється $t_c^* = t_1 + \Delta t_A$, де Δt_A визначається з урахуванням формул (7), (8).

При потужних теплових потоках $q = 10^8 - 10^9$ Вт/см² метал у зоні лазерної дії інтенсивно випаровується і фронт випаровування заглиблюється з деякою усталеною швидкістю v та температурою T^* . Відповідна теплофізична задача приводить до такого виразу для температурного поля в кінці імпульсу: $T(x) = T^* \exp(-\beta x)$, де $\beta^{-1} = av_0^{-1}$ - характерний розмір прогрітої області.

Для оцінювання необхідного терміну процесів випаровування металу з поверхні ШК розглянемо задачу Стефана у рухомій системі координат:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - v(t) \frac{\partial T}{\partial \rho} = a \left[\frac{\partial^2 T}{\partial \rho^2} + \rho^{-1} \frac{\partial T}{\partial \rho} \right] + T_0^* \exp(-\beta \rho) \delta(t), \quad (9)$$

$$T \Big|_{t=0} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial \rho} \Big|_{\rho=R_1} = \frac{q_1(t)}{\lambda}; \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial \rho} \Big|_{\rho=R} = -\rho \eta v(t),$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності середовища; a - температуро-провідність, η - питома теплота випаровування, ρ - щільність, $v(t)$ - швидкість фронту випаровування.

При $\tau \ll a\sqrt{\rho}$ конвективним додатком в рівнянні задачі (9) можна знехати.

Враховуючи також, що процес випаровування має місце у тонкому поверхневому шарі ШК при $l/R_2 \ll 1$, де l - задана технологічна глибина обробки поверхневого шару ШК, можна в цьому випадку прийняти $\rho \approx x$. Тоді для швидкості фронту випаровування отримаємо

$$v(t) = \frac{c\sqrt{a}}{\eta\sqrt{\pi}} \left\{ \frac{T_0^* - T^*}{\sqrt{t}} - T_0^* \beta \sqrt{\pi a} \exp(a\beta^2 t) \operatorname{erfc}(\beta\sqrt{at}) \right\}. \quad (10)$$

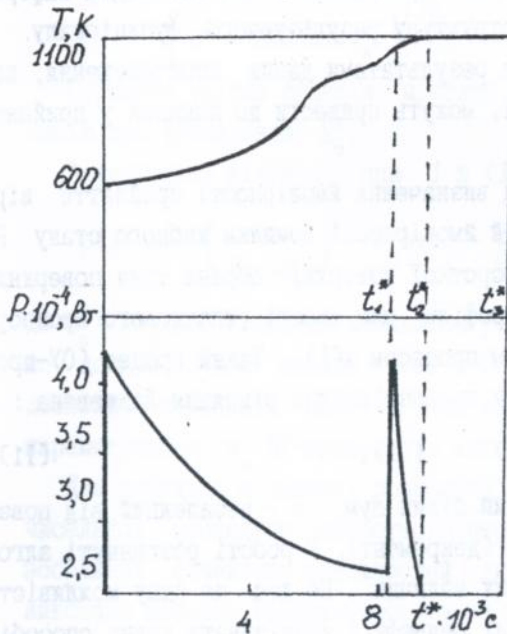
Розв'язання рівняння (10) при $T^* = T_{\text{пл}}$ та $v(t) = 0$ показує, що навіть для "критичних" теплових потоків величина $\Delta\tau_2$, яка характеризує термін випаровування після закінчення теплового імпульсу, досягає 10-50 мкс в залежності від виду матеріалу. Експериментальна перевірка випаровування методом емісії заряджених часток показала, що для мідного кругу з окисним шаром товщиною 5 мкм термін випаровування досягає 40 мкс.

Таким чином, час технологічного циклу обробки ШК дорівнює $t^* = t_1^* + \Delta\tau_1 + \Delta\tau_2$, де t_1^* та $t_1^* + \Delta\tau_1$ - моменти часу перемикання керуванням від першого до другого та від другого до третього етапів керування відповідно, $t_2^* = t_1^* + \Delta\tau_1$ - момент вимкнення керування по ЛВ при досягненні кінцевої мети нагріву.

Технологічна глибина обробки поверхні ШК складається з двох частин: $l = l_1 + l_2$, де $l_1 = v(t)\Delta\tau_1$ та $l_2 = v(t)\Delta\tau_2$.

Спочатку для партії ШК з заданими теплофізичними якістьми знаходяться $\Delta\tau_2$ та l_2 . Потім по заданій технологічній глибині обробки

поверхні ШК 1 визначається $l_1 = l - l_2$. Із рівняння $l_1 = v(t_1^* + \Delta t_1)$ знаходиться величина Δt_1 , яка характеризує час керування для другого етапу. На другому етапі функцією керування є функція $q_2(t) = -\rho\eta v(t)$. Момент відключення ЛВ: $t_2^* = t_1^* + \Delta t_1$.



Мал. 1. Залежність температури T на поверхні від поточного часу обробки t^* та оптимальна форма імпульсу для лазерної правки алмазного круга на бронзовій зв'язці.

У рамках сформульованої послідовності етапів запропоновано використати стратегію контролю, засновану на методах теорії оцінювання. Дослідження виконано на підставі аналізу ймовірностей хибного стану і вірного виявлення, які характеризують якість шорстких поверхнь. Змістом опису при моделюванні є апарат для дослідження профілограм поверхні, які добре інтерпретуються як реалізації випадкового поля, а її перетини – як реалізації випадкового процесу з нормальним розподілом амплітуд. У такій моделі параметри шорсткої

Результати, які наведені на мал. 1, відображають розподіл від часу оптимального ходу потужності $P(t)$ і відповідну зміну температури поверхні ШК. З цього малюнку видно, що оптимальний режим дії ЛВ на бронзову зв'язку з достатньою точністю апроксимується комбінованим режимом дії ЛВ, який є накладенням двох імпульсів на безперервне випромінювання із сталою потужністю.

Після теоретичного розгляду задачі правки при формуванні мікропрофілю, в рамках вирішення загальної задачі можна перейти до проблеми його опису та контролю.

поверхні будуть функціоналами, які задані на множині реалізацій випадкової функції. Експериментальні та обчислювальні труднощі обумовлюють те, що при аналізі, як правило, обмежуються розглядом тільки двох перших моментів розподілу функціоналів, які спостерігаються при вимірюванні, хоча для практичних задач необхідна інформація про всю статистичну структуру результуючого функціоналу. Ці функціонали визначаються за результатами даних спостереження, котрі, в силу їх випадковості, можуть привести до помилок у прийнятті рішень.

У роботі розвинуто метод визначення ймовірності прийняття вірного рішення D при заданій ймовірності помилки хибного стану F . При цьому в якості моделі шорсткої поверхні обрана така поверхня, у якої будь-який перетин профілю має якості випадкового процесу, що є нормальним марковським процесом $x(l)$. Такий процес (OU-процес) можливо повністю задати як розв'язання рівняння Ланжевена :

$$\frac{d}{dl} x(l) + \nu x(l) = f(l), \quad (11)$$

де $f(l)$ - дельта-корельований білий шум, ν - незалежний від повздожної координати параметр (декремент). У роботі розглянуті алгоритми вирахування необхідних величин. Це дає ще одну можливість описувати математичні моделі рельєфу і аналізувати вплив способів обробки на характеристики поверхнь.

У теорії випадкових функцій розроблені методи опису якісних характеристик шорстких кривих. З них найбільш розповсюдженим є функціонал R_q^2 середнього квадрату відхилень

$$R_q^2 = \frac{1}{L} \int_0^L x^2(l) dl, \quad (12)$$

де L - довжина реалізації OU-процесу (інтервал спостережень).

Функціонал R_q^2 має типовий адитивний вигляд і тому для опису його статистичних якостей зручно використовувати апарат, заснований на обчисленні його твірної функції $Q(\lambda)$

$$Q_x(\lambda) = \langle \exp(-\lambda R_q^2) \rangle, \quad (13)$$

де λ - допоміжний параметр, а дужками $\langle \cdot \rangle$ позначена операція

знаходження математичного сподівання. У роботі показано, що для ОУ-процесу функція $Q(\lambda)$ має наступний вигляд

$$Q_x(\lambda) = \langle \exp(-\lambda R_q^2) \rangle = \left[\frac{4\gamma v e^{\nu L}}{(\gamma+\nu)^2 e^{\gamma L} - (\gamma-\nu)^2 e^{-\gamma L}} \right]^{1/2}, \quad (14)$$

$$\gamma = \left[\nu^2 + 2(\lambda/L)\nu\sigma_x \right]^{1/2}.$$

Отримана твірна функція містить у собі усю статистичну інформацію про функціонал R_q^2 .

Асимптотика щільності при $J \gg \langle J \rangle$ така

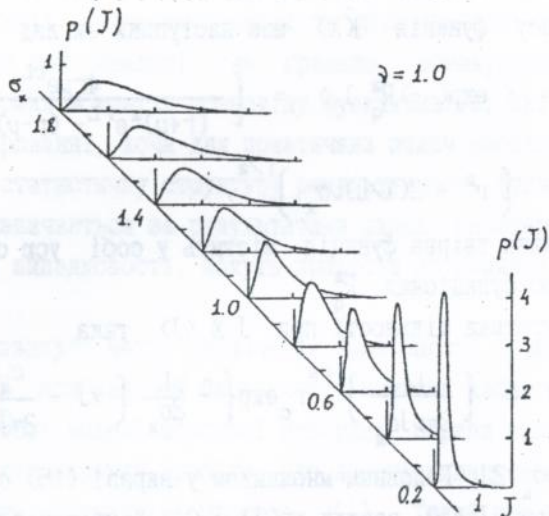
$$p(J) \approx \left[\frac{L}{2\pi\nu J\sigma_x} \right]^{1/2} \gamma_0 \exp\left\{ -\frac{\nu L}{2\sigma_x} \left[\sqrt{J} - \frac{\sigma_x}{2\sqrt{J}} \right]^2 \right\}, \quad (15)$$

де $\gamma_0 = \nu\sigma_x/2J$. Головним множником у виразі (15) є експонента. Видно, що при $J \rightarrow 0$ завжди $p(J) \rightarrow 0$. Комбінація знайдених виразів дозволяє порівняти спостережені характеристики функціоналу J_x з параметрами ν , σ_x ОУ-процесу та інтервальною довжиною L .

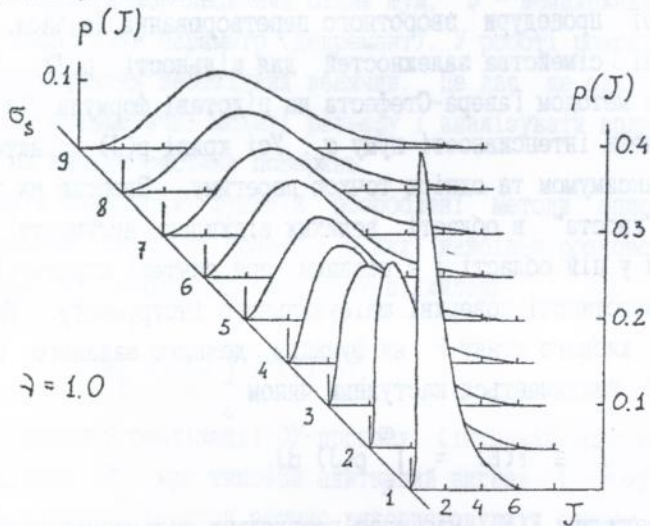
Для побудови щільності розподілу $p(J)$ необхідно використання чисельної процедури зворотного перетворення Лапласа. На мал. 2 зображені сімейства залежностей для щільності $p(J)$. Обчислення виконано методом Гавера-Стефеста на підставі формули (14) для різних значень інтенсивності шуму σ_x . Усі криві $p(J)$ характеризуються одним максимумом та однією точкою перегину. Звертає на себе увагу розмір "хвоста" в області великих відхилень аргументу. Саме ці значення у цій області і є певними при синтезі стратегії контролю якості шорсткості поверхні шліфувального інструменту. Ймовірність помилки хибного стану F як функція деякого заданого порогового рівня E визначається наступним чином

$$F \equiv F(E) = \int_E^{\infty} p(J) dJ. \quad (16)$$

Для величини $F(E)$ має сенс розглядати тільки малі значення помилки F , наприклад, $F = 10^{-1} - 10^{-4}$. Іншими словами, для таких значень F величина порогу E повинна бути достатньо великою порівняно з $\langle J \rangle$. Звідси випливає необхідність дослідження асимптотики щільності $p(J)$ в області великих відхилень аргументу.



Мал.2. Розподіл випадкових значень інтегрального критерія якості для різних інтенсивностей шумової компоненти, $\nu = 1.0$.



Мал.3. Розподіл випадкових значень інтегрального критерія якості для різних інтенсивностей регулярної компоненти, $\sigma_x = 1.0$; $\nu = 1.0$.

З виразу (14) маємо для вишукуємої ймовірності помилки хибного стану

$$F \approx \left[\frac{2\sigma_x}{\pi\nu LE} \right]^{1/2} \exp \left[- \frac{\nu L}{2\sigma_x} E \right]. \quad (17)$$

Залежність (17) дозволяє для заданої фіксованої величини помилки F , визначити відповідний їй рівень порогу E . Наприклад, ймовірності $F = 0.01$ відповідає рівень порогу $E = 2,8$ при $\nu = 2,5$ та $E = 3,5$ при $\nu = 2,0$. При фіксованому значенні E і регулярній функції заданого виду $s(l)$ можна визначити ймовірність вірного рішення D за правилом

$$D = \int_E^{\infty} p_{x+s}(\eta) d\eta. \quad (18)$$

Тут $p_{x+s}(\eta)$ - щільність розподілу функціоналу якості, зареєстрованого в умовах регулярної компоненти профілю $s(l)$, на яку накладена випадкова перешкода $x(l)$.

В роботі розглянуті визначені на реалізаціях процесу $x(l)$ функціонали спостережень, на яких накладено регулярний профіль. Цей профіль будемо описувати за допомогою детермінованої функції $s(l)$, для якої конкретний вигляд задається окремо.

А саме, вивчено такий квадратичний функціонал

$$R_q^2 = J_{s+x} = \frac{1}{L} \int_0^L [x(l) + s(l)]^2 dl. \quad (19)$$

Цей функціонал при $s(l) = 0$ переходить в J , для якого твірна функція була знайдена раніше, а тут має місце загальний випадок. Введемо твірну функцій функціоналу спостережень

$$\begin{aligned} Q_{x+s}(\lambda, L) &= \langle \exp \left\{ - \lambda J_{s+x}^2(L) \right\} \rangle = \\ &= \langle \exp \left\{ - \frac{\lambda}{L} \int_0^L [x(l) + s(l)]^2 dl \right\} \rangle. \end{aligned} \quad (20)$$

де λ - позитивний параметр. У роботі знайдено, що

$$Q_{x+s}(\lambda) = Q_x(\lambda) \exp \left\{ - \frac{\lambda}{L} \int_0^L s^2(l) dl \right\} +$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{2\lambda^2 \nu \sigma_x}{r^2 L} \int_0^L dt \int_0^L dl s(\tau) s(l) x \quad (21) \\
 & \times \frac{(\gamma + \nu)e^{rT} + (\gamma - \nu)e^{-rT}}{(\gamma + \nu)^2 e^{rL} - (\gamma - \nu)^2 e^{-rL}} \left[(\gamma + \nu)e^{r(L-1)} + (\gamma - \nu)e^{-r(L-1)} \right] \}.
 \end{aligned}$$

На мал.3 зображені результати обчислення щільностей $p(J)$. Сімейства кривих відокремлюються значенням декременту ν , іншими словами, радіусом кореляції $\rho = \nu^{-1}$. Аналіз залежностей дозволяє визначити ймовірність вірного рішення D регулярної компоненти $s(l)$ на довжині реєстрації. Знайдено, що більш надійно реєструються регулярні криві на фоні тих шорстких, у яких більший декремент, тому що шорстка крива з більшим радіусом кореляції є більш регулярною порівняно з шорсткою кривою з меншим радіусом кореляції.

Отримані залежності і вирази показують, що вимірвальний прилад, що реєструє середньоінтервальний відхил профілю поверхні відносно регулярного (нульового) рівня, зареєструє величину, дійсно пов'язану з випадковою шорсткістю (в середньому за ансамблем реалізацій). Ймовірність помилки F при цьому буде зв'язана з параметрами профілю, такими, як ν та σ_x , а також з довжиною інтервалу спостережень L та порогом E .

У роботі також вивчена статистика величин, які спостерігаються, та стратегія поточного контролю для випадку дискретного критерію якості. А саме, розглянуті дискретні квадратичні функціонали такого вигляду

$$R_q^2 = J_{x+s} = \sum_{n=0}^N \left(x(n\Delta) + s(n\Delta) \right)^2. \quad (22)$$

В (22) присутні відліки у наборі точок $l_n = n\Delta$, $0 \leq n \leq N$, $s_n = s(n\Delta)$, $x_n = x(n\Delta)$, узяті з кроком $\Delta = L/N$.

Показано, що основні результати, які отримані для інтегрального критерію якості (19), зберігаються і для дискретного критерію (22).

Знайдені залежності можуть бути використані при розробці нових методів контролю шорстких поверхнь.

Таким чином, на підставі виконаного теоретико-ймовірносного аналізу у роботі отримано закон, який описує статистичні якості квадратичного інтегрального функціоналу спостережень шорсткої поверхні з регулярною компонентою.

У роботі запропоновано, обґрунтовано та реалізовано у структурі ІПВС МД алгоритм контролю мікрогеометрії алмазних ШК, який можна описати такою послідовністю дій:

1) Вибір методу вимірювань.

На цьому етапі визначається базова довжина L (у випадку використання оптичних давачів) або число N точок вимірювання і інтервал між ними (контактний спосіб, тут $L = Nd$).

2) Виконання реперних вимірювань.

На цьому етапі визначаються технологічні характеристики ν та σ_x засаленої поверхні, яка не має алмазного абразиву.

3) Вибір режиму роботи.

На цьому етапі задається значення параметру F - допустимої ймовірності хибного стану. В залежності від ступеня відповідальності завдання, приймається $F = 10^{-1}$, 10^{-2} або 10^{-3} (для найбільш відповідальних виробів).

4) Чисельне визначення порогового рівня E .

Величина порогу E знаходиться на підставі значень L , ν , σ_x та F .

Перелічені етапи 1-4 мають попередній характер і виконуються для ШК один раз на початку виробничого процесу.

5) Контроль робочої поверхні.

На цьому етапі реєструється величина критерія якості поверхні R_q^2 (19) або (22) (у останньому випадку необхідне підсумовування квадратів амплітуд мікронерівностей виконується у влаштованій ЕОМ).

6) Порівняння зареєстрованого значення критерію R_q^2 з величиною порогового рівня E .

На цьому етапі приймається рішення (з ймовірністю довіри $D \geq 0.9$) про продовження роботи, якщо $R_q^2 > E$, або про переналадження (повторна правка алмазного круга), якщо $R_q^2 \leq E$.

Для експериментальних досліджень впливу дії ЛВ в оптимальному,

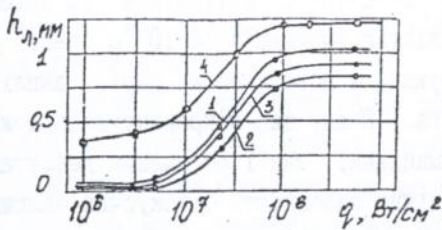
одноімпульсному та безперервному режимах на поверхню шліфувальних кругів та складавчих їх матеріалів використовувалися наведені вище методи та обладнання.

У роботі використовувалися установки з лазерами ЛТІ-502 ($\lambda = 1.06$ мкм та f до 50 кГц, які працюють у безперервному і в імпульсному режимі з модульованою добротністю, "Квант-12", ЛТІ ПЧ та CO_2 -лазери.

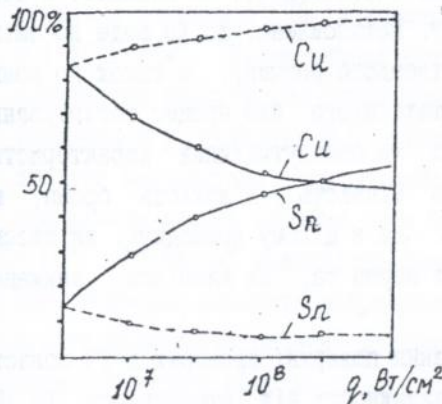
Як зразки використовувались бруски, вирізані з алмазоносного шару та алмазні круги промислового виробництва. Зразки відрізнялися типами зв'язки (М2-01, М1-01), зернами синтетичного (АС4, АС6, АС15) та натурального алмазу з різноманітною зернистістю. Досліджувалися також зразки кристалів алмазу, кубічного нітриду бору (КНБ), корунду та селеніду цинку як модельного матеріалу, прозорого в ІЧ-області спектру, який має мікродвійникову структуру, подібну до алмазної.

Дослідження лазерної дії довели можливість використання цього процесу для вибіркового зруйнування матеріалів зв'язки з метою правки, та всього поверхневого шару для профільвання кругів. Механізм вибіркового лазерного видалення зв'язки найкраще реалізується в імпульсному режимі ЛВ на довжині хвилі $\lambda = 1,06$ мкм при тривалості імпульсів $\tau = 2 \cdot 10^{-7} \dots 4 \cdot 10^{-3}$ с та зі щільністю потужності (q) до $5 \cdot 10^7$ Вт/см². Причому вибірковість полягає у тому, що видаляється тільки зв'язка або разом з цим йде часткове мікроскоплення поверхні алмазних зерен. Лазерна дія на цих режимах не веде до графітизації або повного зруйнування алмазів та втрати властивостей круга. Від цього відрізняється безперервне ЛВ, яке може приводити до графітизації алмазу і зі зростанням q - до поступового його руйнування шляхом графітизації.

Відзначено також, що масштаби руйнування зростають із збільшенням q випромінювання від 10^6 до 10^9 Вт/см². Причому залежність параметрів лунки від щільності потужності має нелінійний характер (мал. 4), що збігається з результатами теоретичних досліджень. Це пов'язано зі змінами механізмів зруйнування бронзових зв'язок. При щільності потужності ($10^7 \dots 10^8$ Вт/см²) залежність має най-



Мал.4. Залежність глибини лунки h_L від інтенсивності ЛВ q при обробці: 1 - сухої поверхні, 2 - у воді, 3 - у 5 % розчині Ca_2CO_3 , 4 - при оптимальному керуванні.



Мал.5. Залежність процентного складу міді та олова у поверхневому шарі від інтенсивності лазерного випромінювання :
 ----- - імпульсний режим;
 ————— - безперервний режим.

більшу крутизну, коли глибина лунки змінюється в інтервалі (0,15...0,85) мм, що дозволяє керувати глибиною шару, який видаляють.

При коротких тривалостях τ , відбувається більш інтенсивне термомеханічне мікросколювання поверхні алмазних зерен за рахунок поглинання ЛВ на домішках та дефектах мікродвійникової структури.

Результати хімічного та фазового аналізів дозволили встановити механізми зруйнування бронзових зв'язок.

Нагрівання поверхні олов'янистої бронзи (Cu - 80%, Sn - 20%) при $q = (1 \cdot 10^6 \dots 5 \cdot 10^7 \text{ Вт/см}^2)$ приводить до ерозії поверхні за рахунок видалення переважно однієї з компонент (мал.5). При цьому відбувається складні термохімічні реакції окислення, стимульовані ЛВ. При імпульсному ЛВ більш інтенсивно відбувається реакція утворення та видалення окислів олова, а при безперервному - окислів міді: Подальше збільшення q ЛВ веде до інтенсифікації процесів плавлення та випаровування і до зниження внеску у процес зруйнування поверхні термохімічних реакцій.

Дослідження показали, що термохімічні процеси при дії ЛВ з

тривалість імпульсів $4 \cdot 10^{-3}$ с і $2 \cdot 10^{-7}$ с збігається за якістю.

Встановлено, що ЛВ з тривалістю імпульсів $4 \cdot 10^{-3}$ с веде до зростання стискуєчих макронапружень у поверхневому шарі, амплітуда яких зменшується вглиб круга. Появу цих макронапружень можна пояснити як пластичними деформаціями, так і об'ємними дефектами структурних перетворень. Нелінійна залежність стискуєчих залишкових макронапружень при зростанні інтенсивності ЛВ впливає з порушень умови однофазності розчину. Встановлено, що ЛВ веде до зміни основних α - і β -фаз Cu-Sn - твердого розчину, а також до появи проміжних нових фаз. В результаті цього йде процес загартування бронзи та зміни її міцносних та експлуатаційних характеристик. Фазові перетворення зменшують міцність і в'язкість бронз, що робить їх крихкими та твердими. Це в цілому приводить, як звісно, до більш міцного закріплення зерен та, як наслідок, зниження втрат алмазів при шліфуванні.

Досліджена динаміка зруйнування поверхні прозорих в ІЧ-області матеріалів на прикладі ZnSe у залежності від інтенсивності ЛВ. Показано, що нагрівання та попереднє руйнування поверхні відбувається у декілька стадій з різноманітними енергіями активації процесу. Багаторазова дія ЛВ веде до накопичення дефектів та зниження порогу руйнування. Динаміка процесу руйнування поверхні також відрізняється різноманітністю механізмів випаровування. Спостерігаються як лінійний закон руху фронту випаровування, так і нелінійний рух фронту випаровування та автоколювання.

Здобуті результати дають змогу зробити висновок, що можливе цілеспрямоване керування руйнуванням ІЧ-прозорих кристалів за рахунок зміни параметрів ЛВ і багаторазової дії ЛВ. Така динаміка руйнування характерна і для алмазу, однак вона обумовлена рухом хвилі графітизації.

Важлива роль у формуванні субмікрорельєфу поверхні оптично прозорих кристалів (алмаз, ZnSe) належить мікродвійниковій структурі, тому що на межі мікродвійників має місце підвищена концентрація дефектів та домішок, які приводять до поглинання ЛВ, локального підвищення температури і крихкого мікросколу. У результаті цих

процесів на поверхні алмазу утворюється значне число додаткових ріжучих мікрорубців. Це, як відомо, підвищує якість та продуктивність шліфування.

Кубічний нітрид бору (КНБ) починає руйнуватися при q ЛВ менших, ніж при руйнуванні алмазу, тобто при вимогах, близьких до обставин руйнування бронзової зв'язки. Тому діапазон вибіркового видалення зв'язки менший, ніж у алмазних кругів. Ефективна правка кругів з зернами з КНБ імпульсним ЛВ має місце при потужності до $\approx 1 \cdot 10^7$ Вт/см². Більш високі потужності приводять до модифікації абразивних якостей. Це можна пояснити тим, що структура BN трансформується у структуру В₄С. Така модифікація якостей поверхні може бути використана при розробці технології шліфування з керованим рівнем якості обробки, без зміни ШК. З іншого боку, при $q = 10^6 \dots 10^7$ Вт/см² можливість дозованого руйнування поверхні зерен КНБ дозволяє виконати мікроправку зерен на малу глибину і організувати технології правки шляхом малих (мікронних) подач з метою зниження втрати кругів.

ЛВ є перспективним також для правки звичайних абразивних кругів на підставі корунду. Це обумовлено тим, що окрім звичайного руйнування абразивного зерна та зв'язки, необхідних для формування ріжучого мікропрофілю, можлива модифікація хімічного стану поверхневої частини абразивного зерна від стану Al₂O₃ до стану, близького до Al, що може дозволити, як і в випадку з КНБ, дозовано керувати абразивними якостями ріжучої поверхні.

Таким чином, у результаті комплексних досліджень вивчені головні закономірності руйнування і модифікації ріжучих якостей поверхнь різноманітних абразивних матеріалів та їх складачих ЛВ. Визначені необхідні параметри ЛВ для виконання процесу правки і розробки основ її технології.

Аналіз кінематичних схем правки для різноманітних ШК, що випускаються зараз промисловістю, показав, що лазерна правка придатна для усіх форм кругів. Для правки площинних ріжучих поверхнь більш переважним є використання схем з падінням променя по нормалі до поверхні, яка обробляється, а для складних поверхнь - по дотичній.

Для організації процесу правки треба мати багатокординатну систему взаємного руху променя та круга. Тому метод бажано використовувати у високоавтоматизованих системах з багатокординатною системою керування і пересування.

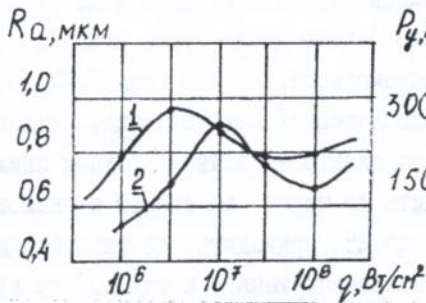
Дослідження якості поверхнь шліфувальних кругів після лазерної правки методами профілографування, оптичної і растрової електронної мікроскопії дало змогу встановити, що формування шорсткості залежить від потужності ЛВ, терміну лазерних імпульсів та коефіцієнту взаємного перекриття лунок (K). Шорсткість круга нелінійно зростає при лінійному зростанні потужності ЛВ. Максимальна шорсткість поверхні круга з максимальним виступом алмазів спостерігається при $0 < K < 0,3$. При коефіцієнті перекриття у діапазоні $0,7 < K < 1$ шорсткість поверхні мінімальна. Тому цей діапазон може бути рекомендовано для високоякісного шліфування.

Раціональним з енергетичної точки зору для правки і модифікації якостей поверхні алмазних кругів на бронзових зв'язках є діапазон потужності ЛВ від $5 \cdot 10^6 \text{ В/см}^2$ до $5 \cdot 10^8 \text{ Вт/см}^2$. В діапазоні від $5 \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2$ до $5 \cdot 10^7 \text{ Вт/см}^2$ реалізується переважно вибіркоче руйнування зв'язки на підставі термохімічних реакцій окислення без руйнування алмазу, тобто має місце ефективна правка на малу глибину.

Більш високі потужності ЛВ приводять до інтенсивного і більш глибокого розкриття поверхні і до часткової дії на алмаз.

Дослідження впливу режимів лазерної правки на якість шліфування деталей із сплавів ВК-8 показали, що при $\tau = 2 \cdot 10^{-7} \text{ с}$ із зростанням q до 10^7 Вт/см^2 шорсткість деталі нелінійно зростає (мал. 6). Це обумовлено зростанням глибини правки круга та нерівномірністю виступу алмазів. При $10^7 \leq q \leq 10^8 \text{ Вт/см}^2$ інтенсифікується процес мікророзколу зерен і з'являється часткова графітізація, що приводить до зниження шорсткості шліфованої поверхні. Подальше зростання q приводить до катастрофічного руйнування алмазів та втрати кругом ріжучих якостей.

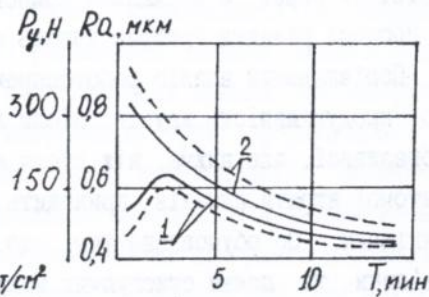
При правці круга з $\tau = 4 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ шорсткість шліфованої поверхні вища, ніж при більш коротких імпульсах, тому що ефективність мікрозруйнувань алмазу нижча, і різновисотність зерен більша.



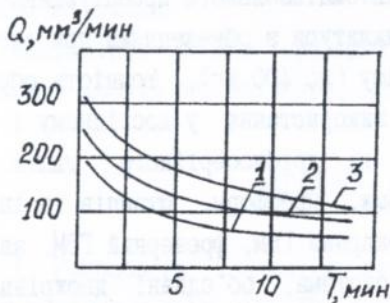
Мал. 6. Залежність параметра R_a шорсткості деталі з ВК-8 від щільності потужності ЛВ при правці круга 1А1 АС6 125/100 М2-01 100% з $t_{шл} = 1$ хв, $d_{л} = 0.12$ мм, $S = 0.12$ мм;

1 - $\tau_1 = 4 \cdot 10^{-3}$ с,

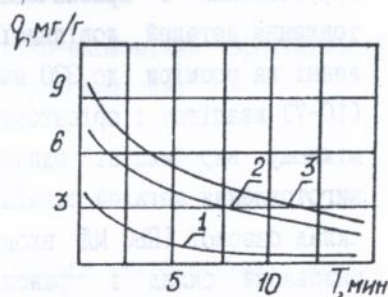
2 - $\tau_1 = 2 \cdot 10^{-7}$ с.



Мал. 7. Залежність нормальної складової сили різання P_y (1) та параметра шорсткості R_a (2) шліфованої поверхні деталі з ВК-8 кругом 1А1 АС6 125/100 М2-01 100% від тривалості обробки після лазерної (—) та електроерозійної (- - -) правки.



Мал. 8. Порівняння продуктивності шліфування при обробці деталі з ВК-8 після правки: 1-абразивної, 2-лазерної, 3-електроерозійної.



Мал. 9. Порівняння питомої втрати алмазів при обробці деталі з ВК-8 після правки: 1-абразивної, 2-лазерної, 3-електроерозійної.

Порівняльний аналіз якості поверхні та сил різання у залежності від терміну шліфування показав, що шорсткість деталі після лазерної правки вища, ніж після абразивної, але нижча, ніж після електроерозійної, тому що вона дозволяє сформувати меншу різнови-

сотність зерен, а нормальна компонента сили різання вища, тому що у процесі різання приймає участь більше число зерен (мал.7).

Порівняльний аналіз роботоспроможності кругів (мал.8,9) показав, що продуктивність кругів після лазерної правки вища, ніж після абразивної, але нижча, ніж після електроерозійної. Однак зниження питомої втрати алмазів приводить до того, що спосіб є економічно вигідним. Це обумовлено тим, що ЛВ приводить до термозміцнення зв'язки та появи стискуєчих макронапружень, а також, як відомо, стимулює лікування дефектів в алмазах, котрі потенційно змогли б стати джерелом їх руйнування при шліфуванні. Крім того оптимальне керування дією ЛВ дозволяє зменшити витрати енергії на правку на 30% порівняно з одноімпульсною обробкою.

Результати теоретичних, експериментальних та технологічних досліджень склали основу для інтеграції лазерної правки та алмазного шліфування в ІПВС МД. Створена типова тиражована ІПВС МД є інтегрованою системою з наскрізним безпалірним циклом проектування, виготовлення і призначена для автоматизованого проектування-виготовлення деталей довільної номенклатури з обмеженнями при виготовленні на розміри (до 320 мм), масу (до 400 кг), точність обробки (10-7) квалітет і орієнтована на використання у дослідному і допоміжному виробництві одиничного та дрібносерійного типів для виготовлення деталей складної форми, пресформ, штампів та ін. У склад базової ІПВС МД входять токарний ГВМ, фрезерний ГВМ, автоматизований склад і транспортна система, об'єднані двоохвівцевою локальною обчислювальною мережею на базі ЕОМ фірм SUN та IBM.

Потреба в розширенні функціональних та технологічних можливостей токарного ГВМ шляхом інтеграції і автоматизації лазерної правки та алмазного шліфування обумовлена тим, що у ГВМ з однієї установки проводиться не тільки механічна обробка, а й термозміцнення поверхні виробів плазмотроном, необхідна обробка твердих сплавів, кераміки. У зв'язку з цим у роботі проведено дослідження, розробку і технічну реалізацію всіх підсистем для інтеграції лазерної правки і алмазного шліфування у структуру ІПВС МД. Створена автоматизована підсистема технологічної підготовки виробництва

правки та шліфування працює у режимі експлуатації її технологом під керуванням монітору на базі розвинутої техніки "менд". У системі реалізовано такі функції: САПР операцій правки та шліфування; проектування та виготовлення керуваних програм; формування і одержання, при необхідності, технологічної документації; ведення баз даних по обладнанню, МОР, режимах обробки. Для автоматизованої системи керування розроблено алгоритми та програмне забезпечення. Проведена модернізація і обладнання токарного ГВМ для виконання операцій алмазного шліфування і лазерної правки. На ГВМ також реалізовано автоматизований спосіб контролю якості правки та зносу круга рефлектиметричним методом у відповідності з алгоритмом, який отримано у теоретичній частині, на основі інтегрального критерію якості. Переваги лазерної правки найбільше виявляються при шліфуванні важкообробних неелектропровідних матеріалів. Кінцевим результатом досліджень у ІПВС МД є створення нової технології виготовлення пера лопатки турбіни з важкообробної кераміки методом повного вишліфовування.

Наприкінці роботи приведені: техніко-економічна ефективність методу, досвід впровадження, практичні рекомендації.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблена концепція лазерної правки шліфувальних кругів, яка полягає у тому, що ЛВ дозволяє комплексно і цілеспрямовано модифікувати макро-, мікро-, субмікрорельєф та фізико-хімічні якості поверхні ШК, в результаті чого виникають нові можливості розширення технологічних спроможностей шліфування.

2. Побудована математична модель оптимального керування лазерною дією в процесі нагрівання та руйнування поверхні алмазного круга на бронзовій зв'язці, яка враховує кондуктивний і радіаційний теплообмін із середовищем, термохімічні реакції окислення і обмеження на максимальну температуру поверхні.

Розроблена нова методологія розв'язання задачі оптимального керування ЛВ, заснована на модульному поданні алгоритму розв'язання з

урахуванням зворотного зв'язку між тепловими і хімічними процесами. Запропоновано метод та алгоритм розв'язання трьохмірної теплової задачі з межовими умовами другого роду, яка є базовою основою для математичного моделювання процесу нагрівання шліфувального круга ЛВ.

3. Запропонована технологія лазерної правки шліфувальних кругів, яка враховує оптимальну форму і термін лазерного імпульсу, що дозволяє забезпечити мінімум енергетичних витрат на обробку. Розроблена методика визначення моментів увімкнення і вимкнення при керуванні лазерною дією для отримання заданої технологічної глибини правки з урахуванням часу затримки температури поблизу стрибка поглинальної спроможності, швидкості руху фронту випаровування і часу випаровування зв'язки після закінчення лазерного імпульсу. Розроблена також спрощена методика інженерного розрахунку параметрів правки для неоптимального керування лазерною дією, яка враховує дію процесів окислення зв'язки і внесок сусідніх імпульсів в інтегральну потужність випромінювання.

4. Проведене комплексне дослідження фізико-хімічних процесів, які протікають на поверхні ШК і складачих їх матеріалів (алмазу, кубічного нітриду бору, корунду, бронзи), а також прозорих в ІЧ-області модельних матеріалів (ZnSe, рубіну).

- Встановлено, що руйнування бронзової зв'язки супроводжується термохімічними реакціями окислення, фазовими перетвореннями і зростанням стискуваних напружень в поверхневому шарі.

- Доведена можливість вибіркового видалення зв'язки з міжзернових просторів алмазного круга без пошкодження алмазу імпульсним ЛВ, що дозволяє керувати макро- і мікрорельєфом круга.

- Показано, що руйнування поверхні прозорих в ІЧ-області матеріалів має загальні закономірності, які пов'язані з поверхневим поглинанням ЛВ структурними дефектами і протіканням термохімічних реакцій. Динаміка процесу руйнування зумовлена взаємодією хвиль поглинання і випаровування поверхневих цих матеріалів.

- Встановлено, що ЛВ дозволяє керувати субмікрорельєфом поверхні алмазу за рахунок руйнування мікродвійникової структури з утворенням додаткових ріжучих рубців.

- Показано, що ЛВ дозволяє правити і модифікувати поверхні абразивних матеріалів (КНБ, корунд) до станів з керованою абразивною спроможністю, що може бути використано для розширення технологічних можливостей шліфування кругами з цих матеріалів.

5. Розроблені технологічні основи процесу лазерної правки. Показано, що лазерна правка є універсальною, тому що дозволяє правити круги різних форм і з різноманітних матеріалів. Найбільш перспективним є її використання в інтегрованих проектно-виробничих системах механообробки деталей (ІПВС МД) при шліфуванні складних поверхнь, а також високоякісному шліфуванні керамічних оптичних і важкообробних матеріалів. Визначені раціональні технологічні режими лазерної правки.

6. На підставі теоретико-ймовірносного підходу при описі шорстких поверхнь, у тому числі алмазних кругів, отримані вирази для дискретного та безперервного критеріїв якості поверхні. Показана можливість контролю якості поверхні шліфувальних кругів (правки, зносу зерен, засаленості) по співвідношенню сигнальної та шумової компонент мікропрофілю з гарантованою точністю, а також оптимізації процесу спостережень за якістю круга й прийняття вірного рішення про його стан шляхом угруповання результатів вимірювань.

7. Розроблена і реалізована концепція зростання гнучкості інтегрованих проектно-виробничих систем за рахунок запровадження лазерної правки й контролю за станом ШК, які дозволяють розширити технологічні можливості шліфування і його автоматизації. Проведена інтеграція лазерної правки і шліфування в наскрізний безпапірний цикл "проекткування-виготовлення" з розробкою алгоритмічного і програмного забезпечення підсистем автоматизованої технологічної підготовки підприємства, гнучкого виробничого модуля при обробці деталей довільної номенклатури і контролю якості ШК.

Можливості даного комплексу були продемонстровані при шліфуванні пера лопатки турбіни з надтвердої кераміки.

Основні результати дисертації опубліковані у роботах:

1. Добротворский С.С., Лиферов А.А. Автоматизация программиро-

вания механообработки. - Киев: УМК ВО, 1989. - 140 с.

2. Добротворський С.С., Добровольська Л.Г., Євсюкова Ф.М. Практичне програмування. - Київ: УМК ВО, 1991. - 93с.

3. Сотников В.Т., Добротворский С.С., Гайдуков В.Ф. Радиационно-стимулированное дефектообразование в поверхностных слоях рубина. //Поверхность. Физика, химия, механика. 1983, N 4. - С.57-59.

4. Сотников В.Т., Добротворский С.С., Григорьева Л.Н. Гидролиз поверхности кристаллов селенида цинка, стимулированный лазерным излучением. //Поверхность. Физика, химия, механика. 1983, N5. - С.118-125.

5. Сотников В.Т., Добротворский С.С., Белан Н.В., Тучин О.В. Изменение элементного состава поверхности селенида цинка при механической обработке. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1983, N 10. - С.119-123.

6. Сотников В.Т., Добротворский С.С. Влияние окислительной среды и термообработки на стехиометрию поверхности кристаллов селенида цинка. //Поверхность. Физика, химия, механика. 1984, N 6. - С.145-152.

7. Сотников В.Т., Добротворский С.С., Жук В.А. Влияние кислорода и паров воды на термостимулированную экзoeлектронную эмиссию селенида цинка. //Украинский физический журнал. 1984, N 11. - С.48-54.

8. Сотников В.Т., Добротворский С.С., Запечельнюк Э.Ф. Пороговые эффекты в эмиссии заряженных частиц с поверхности под воздействием лазерного излучения. // Украинский физический журнал. 1986, т.11, N 5. - С.744-748.

9. Сотников В.Т., Добротворский С.С., Запечельнюк Э.Ф., Добротворская М.В. Автоколебания эмиссии заряженных частиц с поверхности оптических прозрачных сред при нелинейном поглощении лазерного излучения. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1986, N 9. - С.103-110.

10. Сотников В.Т., Добротворский С.С., Запечельнюк Э.Ф., Галий П.В. Добротворская М.В. Роль тепловых и электронных возбуждений в изменении стехиометрии поверхности щелочно-галогидных кристаллов при воздействии концентрированных потоков энергии. // Физика твердого тела. 1987, т.28, N7. - С. 2254-2257.

11. Добротворский С.С., Глухов Е.В., Коробко О.А. Алмазно-искровое шлифование в ГПС механообработки. // Вопросы оборонной техники.

Сер.2, 1989, вып. 5(212). - С.41-45.

12. Добротворский С.С., Гурьянов С.В., Добровольская Л.Г. Особенности правки шлифовальных кругов в условиях ГПС. // Вопросы оборонной техники. Сер.2, вып. 5(212), 1989. - С.46-49.

13. Добротворский С.С., Добровольская Л.Г., Скорописов В.П. Лазерная правка алмазных шлифовальных кругов. // Інформація та нові технології. Вып. 3-4, Киев, 1993. - С.45.

14. Патент SU N 1777579. АЗ Способ правки алмазных кругов. /Добротворский С.С., Добровольская Л.Г., Скорописов В.П. - Оpubл. 23.11.1992, Бюл. N 43.

15. Патент SU N 1787102. АЗ Способ абразивной обработки. /Добротворский С.С., Добровольская Л.Г. - Оpubл. 07.01.1993, Бюл. N1.

16. А.С. N 1380423 Способ анализа дефектов поверхностных слоев твердых тел методом термостимулированной экзoeлектронной эмиссии. /Добротворский С.С., Сотников В.Т., Добротворская М.В., Грицан В.А. - Выдан 08.10.1987.

17. Добротворский С.С., Гайдуков В.Ф., Нечепоренко А.А. Сверхвысоковакуумная установка. // В сб.: Источники и ускорители плазмы. - Харьков: ХАИ, 1981, вып.5. - С.179-183.

18. Добротворский С.С. Универсальная установка для исследования поверхностных свойств материалов. // В сб.: Источники и ускорители плазмы. - Харьков: ХАИ, 1982, вып.6. - С.127-132.

19. Сотников В.Т., Добротворский С.С. Влияние обработки поверхности на лазерный пробой оптически прозрачных сред. // В сб.: Источники и ускорители плазмы. - Харьков: ХАИ, 1982, вып.6. - С.132-138.

20. Добротворский С.С., Запечельнюк Э.Ф., Сотников В.Т. Установка для изучения эмиссии заряженных частиц под действием импульсного оптического излучения. // В сб.: Источники и ускорители плазмы. - Харьков: ХАИ, 1983, вып.7. - С.134-137.

21. Добротворский С.С., Запечельнюк Э.Ф., Сотников В.Т. О накопительных эффектах в лучевой эрозии оптических материалов. // В сб.: Источники и ускорители плазмы. - Харьков: ХАИ, 1984, вып.8. - С.113-117.

22. Добротворский С.С., Глухов Е.В. Влияние источника технологи-

ческого тока на плазмообразование при алмазно-искровом шлифовании. // В сб.: Источники и ускорители плазмы. - Харьков :ХАИ, 1988, вып 12. -С.64-73.

23. Добротворский С.С., Глухов Е.В., Евсюкова Ф.М., Пономарев В.В. О роли тепловых явлений в инициации электрического пробоя при алмазно-искровом шлифовании. // В сб.: Теплофизические процессы технологии авиадвигателестроения. - Харьков: ХАИ, 1988. - С.109-113.

24. Добротворский С.С., Добровольская Л.Г. Основы лазерной правки алмазных кругов. // В сб.: Резание и инструмент. - Харьков: ХПИ 1991, вып. 46. - С.135.

25. Dobrotvorskiy S.S. Laser dressing of superhard grinding wheels. // In Preceeding of VIII International Conference on grinding abrasive tools and materials, Leningrad, 1991. - P.35-38.

26. Добротворский С.С., Добровольская Л.Г., Скорописов В.П., Егиноглу К., Гюринг К. Лазерное профилирование и правка шлифовальных кругов из сверхтвердых материалов. // Новые технологии в машиностроении: Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Рыбачье-Харьков, 1992, - С.67-70.

27. Сотников В.Т., Добротворский С.С. Исследование экзоэмиссионных параметров с использованием оже-анализатора типа цилиндрического зеркала. // Экзоэлектронная эмиссия и ее применение: Тез. докл. II Всесозн. симп., Москва, МГУ, 1982. - С.48.

28. Добротворский С.С., Глухов Е.В., Мовшович И.Я. Повышение гибкости шлифовальных модулей в условиях ГПС на основе алмазно-искрового шлифования. // Автоматизация механосборочных процессов в машино- и приборостроении: Тез. докл. Всесоюз. конф., Москва, 1989. - С.75.

29. Добротворский С.С., Добровольская Л.Г. Применение лазеров в процессе механообработки деталей шлифованием. // Применение лазеров в народном хозяйстве: Тез. докл. Всесоюз. науч. - техн. конф., Шатура, 1989. - С.83.

30. Добротворский С.С., Добровольская Л.Г. Проблемы создания шлифовальных модулей и ГАУ для ГПС механообработки. // Проблемы внедрения гибких производственных и робототехнических комплексов

на предприятиях машиностроения: Тез. докл. Всесоюз. научн. - практ. конф., Одесса, 1989. - С. 51-52.

31. Добротворский С.С., Добровольская Л.Г., Лазаренко А.Г. Исследование физических особенностей разрушения связки алмазных кругов при воздействии лазерного излучения. // Прогрессивные технологические процессы в машиностроении и стимулирование их внедрения в производство: Тез. докл. Респ. научн. - практ. конф., Харьков, 1990. - С. 138.

32. Добротворский С.С., Добровольская Л.Г., Ковтун Р.Ю. Математическое моделирование оптимального управления лазерными воздействиями при лазерной правке шлифовальных кругов. // САПР конструкторской и технологической подготовки автоматизированного производства в машиностроении: Тез. докл. Респ. научн. - практ. конф., Харьков, 1990. - С. 20.

33. Мовшович И.Я., Добротворский С.С., Коробко О.А. Особенности проектирования ГПС механической обработки деталей технологической оснастки с электрофизическими модулями. // Вестник ХПИ, Харьков, 1990, N 273, вып. 1. - С. 19-22.

34. Добротворский С.С., Добровольская Л.Г. Изменение свойств алмазосодержащих материалов при воздействии концентрированных потоков энергии. // Модификация свойств конструкционных материалов пучками заряженных частиц: Тез. докл. научн. - техн. конф., Свердловск, 1991. - С. 68.

35. Добротворский С.С., Добровольская Л.Г. Лазерная правка алмазосодержащих шлифовальных кругов. // Пути повышения эффективности обработки материалов резанием в машиностроении: Тез. докл. научн. - техн. конф., Ленинград, 1991. - С. 92.

36. Добротворский С.С., Добровольская Л.Г., Скорописов В.П. Лазерная правка шлифовальных кругов как метод повышения гибкости шлифовальных модулей. // Тез. докладов научн. - техн. конф., Севастополь, 1991. - С. 55.

37. Добротворский С.С., Добровольская Л.Г. Лазерная правка алмазосодержащих шлифовальных кругов. // Прогрессивные технологические процессы в механообработывающем и сборочном производстве: Тез.

докл. науч.-техн. конф., Санкт-Петербург, 1992. - С. 92-93.

38. Добротворский С.С., Мазманишвили А.С., Сила В.В. Статистический анализ отсчетов на интервале и управление качеством шлифования поверхности. // Новые технологии и системы обработки в машиностроении: Тез. докл. науч.-техн. конф., Севастополь, 1994. - С. 43.

39. Добротворский С.С., Мазманишвили А.С., Сила В.В. Описание шероховатой поверхности шлифовальных кругов с использованием статистического анализа. // Новые технологии в машиностроении: Тез. докл. конф., Рыбачье-Харьков, 1994. - С. 242.

40. Добротворский С.С., Добровольская Л.Г. Лазерное профилирование шлифовальных кругов из сверхтвердых материалов. // Новые технологии и системы обработки в машиностроении: Тез. докл. науч.-техн. конф., Севастополь, 1994. - С. 44.

41. Добротворский С.С., Добровольская Л.Г. Особенности лазерного профилирования шлифовальных кругов из сверхтвердых материалов. // Новые технологии в машиностроении: Тез. докл. конф., Рыбачье-Харьков, 1994. - С. 241.

А Н Н О Т А Ц И Я

Добротворский С.С. Научные основы процесса лазерной правки шлифовальных кругов из сверхтвердых материалов. Диссертацией является рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.03.07 - Процессы лазерной и физикотехнической обработки. Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", Киев, 1996 г.

Защитаются теоретические и физико-технические особенности процесса лазерной правки шлифовальных кругов из сверхтвердых материалов. Предложен новый способ правки. Предложены модель оптимального управления лазерным излучением для правки, метод и алгоритм контроля шероховатых поверхностей. Приведены результаты физико-химических исследований влияния лазерного излучения на изменения в составе,

структуре и напряженно-деформированном состоянии связки и абразива, качества поверхности круга и детали, производительности правки и шлифования, сил резания, удельного расхода алмазов, сравнительного анализа с существующими методами правки.

Разработаны технологические основы правки. Проведена интеграция правки в интегрированную проектно-производственную систему механообработки. Результаты работы получили производственную апробацию.

SUMMARY

Dobrotvorskiy S.S. Scientific Basis of the Laser Forming Process of the Grinding Wheels from the Superhard Materials.

The dissertation for academic degree of Doctor of Technical Sciences, speciality 05.03.07 - The Process of Laser and Physics and Technical Treatment. The National Technical University of Ukraine "The Kyiv Polytechnical Institute", Kyiv, 1996.

Theoretical, physical and technical peculiarities of laser forming process of grinding wheels from superhard materials are being defended. A new method of forming process is proposed. The model of optimum governance of laser emission, the method of the control of wheel surface quality are proposed. The results of physical investigations of laser emission effect on chemical composition, structure and strained deformed state of base surface layer, quality of wheel and detail surfaces, forming process and grinding productivity, cutting forces, specific diamond consumption and comparative analysis with respect to existing forming processes are given.

The technology of laser forming process is developed and integrated in FMS. The results of the work have been approbated at industrial enterprises.

Ключові слова: лазерне випромінювання, правка, шлифування, алмазні круги, металева зв'язка, оптимальне керування, контроль шорсткості, гнучкі виробничі системи.



438861

АВ 35.517

Підписано до друку 23.08.96. Формат 60x84/16. Папір друк.
Ум. друк. арк. 2.0. Тираж 100. Зам. 15-29.

Харківський державний політехнічний університет
310002, м. Харків, МСП, вул. Фрунзе, 21.
надруковано ПФ "Поли-Експресс", м. Харків, вул. Весніна, 12