

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

На правах рукопису
УДК 621.9.047:621.923.3/7

БЕРДНИК ВІТАЛІЙ ВАСИЛЬОВИЧ

ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОАБРАЗИВНОГО ШЛИФУВАННЯ
ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ ТА РЕМОНТІ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

Спеціальність 05.03.07. - Процеси лазерної
та фізико-технічної обробки

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ 1996



00755640 (R)

Київському інституті Військово-повітряних

Науковий консультант: доктор технічних наук,
професор В.С.Коваленко

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

доктор технічних наук,
професор А.І.Грабченко

доктор технічних наук,
професор О.О.Віноградов

Провідна установа: Запорізьке виробниче об'єднання
"Мотор - Січ".

Захист відбудеться "18" БЕРЕЗНЯ 1996 р. о 15⁰⁰ Годині
на засіданні спеціальної вченої ради Д 010209 при Національному
технічному університеті України "Київський політехнічний інсти-
тут" за адресою 252056, м.Київ, пр.Перемоги, 37, корпус І,
ауд. 214.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національно-
го технічного університету України "Київський політехнічний
інститут".

Автореферат розісланий "31" СІЧНЯ 1996 р.

Вчений секретар
спеціальної вченої ради Д 010209
доктор технічних наук, професор

Н.С.Равська

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

I. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми зумовлена потребою в процесі виробництва і ремонту техніки забезпечити високі показники якості та продуктивності. Проблема їх забезпечення полягає в тому, що, удосконалюючи від покоління до покоління конструкцію авіаційної техніки, використовують більш міцні матеріали, які традиційними методами механічної обробки обробляються з низькою продуктивністю й якістю.

До цього часу практично єдиною можливістю одержання високої точності геометричних розмірів є шліфування, і його обсяг в механічній обробці під час виготовлення і ремонту авіаційної техніки становить 10...60%. Але шліфування часто не забезпечує потрібної якості й продуктивності, що в значній мірі знижує показники надійності. Часто мають місце скриті дефекти: припінки, шліфувальні тріщини, структурні зміни, які зумовлюють відкази, утомні руйнування, аварії, катастрофи.

Перспективним розв'язанням проблеми забезпечення високої продуктивності й якості може бути використання замість звичайних механічних методів обробки нових, інтенсивних технологічних процесів, які ґрунтуються на використанні високих локальних енергій.

Найбільш прогресивним методом обробки, який дозволяє розв'язати проблему якості й продуктивності, є шліфування з накладенням електричного поля, або електрообразивне шліфування /ЕАШ/, але цей метод погано вивчений, не розроблені його технологічні основи. Маємо окремі роботи, які відбивають умови обробки в конкретних випадках, що в значній мірі стримує його широке впровадження.

Саме тому питання розробки технологічних основ шліфування струмопровідними кругами з накладенням електричного поля, поставлені в дисертаційній роботі, актуальні й сучасні.

Дисертаційні дослідження проводились відповідно до планових НДР "Хмельяр", "Точність Д", "Письменник І7", "Виточка 44".

Мета роботи - підвищення продуктивності і поліпшення якості на фінішних операціях механічної обробки під час виготовлення і ремонту авіаційної техніки.

Поставлена мета досягається шляхом розробки технологічних основ шліфування струмопровідними кругами з накладенням електричного поля, виявлення основних закономірностей управління якістю поверхні, що обробляється, та продуктивністю, а також впроваджен-

ням його в технологічний процес виготовлення і ремонту авіаційної техніки замість звичайного шліфування. При цьому вирішуються такі основні задачі:

1. Визначаються принципи управління якістю поверхні, що обробляється на фінішних операціях технологічного процесу, які відповідають експлуатаційним вимогам авіаційної техніки.

2. Науково обґрунтовуються методи оцінки використання досліджуваного процесу.

3. Розробляється технологія шліфування з накладенням електричного поля стосовно до виготовлення і ремонту авіаційної техніки в стаціонарних і польових умовах.

Наукова новина праці:

- розроблені технологічні основи шліфування струмопровідними кругами з накладенням електричного поля стосовно до виготовлення і ремонту авіаційної техніки в стаціонарних і польових умовах, а також поданий науково обґрунтований метод оцінки застосування дослідженого способу обробки /авторське свідоцтво № 246498/;

- розроблені наукові основи управління кількісними та якісними показниками при використанні електрообразивного шліфування в технологічному процесі виготовлення й ремонту високоміцних деталей і вузлів авіаційної техніки /авторське свідоцтво № 247612/;

- запропонований новий підхід до описання формоутворення поверхневого шару під час шліфування деталей з накладенням електричного поля з урахуванням динаміки стружкоутворення, впливу електричного поля й гідродинаміки течії електроліту, а також отримані рівняння, які відбивають умови формоутворення і дозволяють диференційовано визначати частки участі механічного різання й електричного поля у спільному зніманні оброблюваного матеріалу;

- установлені залежності, які відбивають теплофізичні процеси, що відбуваються в зоні шліфування, і критерії виникнення припків, а також вплив режимів обробки на показники продуктивності й якості;

- установлені критерії пропорціональності - приведена глибина різання t_{np} , який відбиває умови, коли динамічні процеси шліфування з накладенням електричного поля з глибиною, установленною за лібом t_n , пропорціональні процесам звичайного шліфування з глибиною t_{np} ;

- запропонований структурно-логічний метод оптимізації режимів обробки, який дозволяє оптимізувати режими в умовах відсутності складної обчислювальної техніки /військовий ремонт/.

Методи дослідження. В процесі дисертаційних досліджень використовувались детерміновані та стохастичні підходи створення математичної моделі, метод фізичного й математичного моделювання процесів, які відбуваються в міжелектродному просторі з урахуванням впливу на обробку електричного поля, гідродинаміки течії електроліту, механічного різання абразивними /алмазними/ зернами та умови тепломасопереносу.

Розв'язуючи диференціальні рівняння, використовували чисельний метод Рунге-Кутта. Обчислення проводилися на ЕОМ серії ЕС.

Теоретичні дослідження порівнювались з експериментальними даними, які оброблялись методами математичної статистики згідно з ГОСТ 8.207-76. Під час виконання експериментів дотримувались метрологічних вимог згідно з ГОСТ 1.25-76.

В роботі використані теоретичні основи планування експерименту, дисперсійний та регресійний аналізи.

На захист висуваються.

1. Фізична й математична модель формування поверхні при шліфуванні токопровідними кругами з накладенням електричного поля у різноманітних схемах обробки.

2. Технологічні основи шліфування токопровідними кругами з накладенням електричного поля, які містять вибір: технологічних параметрів шліфування та їх оптимізація; обладнання та методів його модернізації; ріжучого інструмента та методів його правки; електроліту та способів його подачі в зону різання під час обробки різноманітних сталей і сплавів, а також схем шліфування.

3. Експериментальні і теоретичні дослідження впливу технологічних параметрів на кількісні та якісні показники електроабразивного шліфування, а також експлуатаційні властивості оброблених цим методом поверхонь деталей.

4. Результати впробування шліфування токопровідними кругами з накладенням електричного поля під час виготовлення і ремонту авіаційної техніки.

Практичне значення роботи. Розроблений технологічний процес обробки дозволяє значно /в 2...6 разів/ підвищити продуктивність фінішних операцій із забезпеченням потрібної високої якості.

Гарантована висока якість, яка забезпечує досліджуваний метод, стабілізує початкові експлуатаційні фізико-механічні властивості поверхонь, які сприймають навантаження, що знижує ймовір-

ність випадкових відказів і сприяє переходу до експлуатації з технічного стану та різня надійності.

Отримані результати можуть бути основою для розробки технологічних процесів виготовлення та ремонту нових деталей і вузлів авіаційної техніки, виконаних з недосліджених високоміцних матеріалів.

Реалізація. Основні результати дисертаційних досліджень впроваджено в технологічний процес виготовлення та ремонту виробів на Запорізькому ВО "Мотор - Січ" під час виконання найбільш трудомістких операцій плоского та круглого шліфування деталей з конструкційних, титанових й жаростійких сталей і сплавів типу 30ХГСН2А, І2ХІВН9Т, ЖС6КП, ВТ-3. Обробляються зашки, полиці та профілі лопаток; елементи сотових удільнень, вали, корпуси /акт реалізації вх. №20/659 від 11 березня 1986 р./.

Результати досліджень впроваджено на Луцькому ремонтному заводі "Мотор" під час відбудовування знешкоджених вузлів соплових вінців на двигуні АЛ-21Ф-3 /акт реалізації вх. № ОІ96 від 6 вересня 1995 р./.

Проведено дослідження й отримані позитивні результати щодо використання методу під час ремонту деталей з високоміцними та в'язкими покриттями; "омолодження" поверхонь, які зазнали утомного експлуатаційного впливу; вирізанню ділянок з експлуатаційними пошкодженнями; ремонту сотових панелей.

За результатами досліджень Вказівкою № 810 /8099/ Головного інженера ВПС від 15 квітня 1981 року шліфування з накладенням електричного поля рекомендовано використовувати під час ремонту авіаційної техніки на авіаремонтних підприємствах, а також з навчальною метою у вузлах ВПС.

Апробація роботи. Основні положення роботи доповідались та обговорювались на Республіканському семінарі з електрохімічної розмірної обробки в машинобудуванні /м.Казань, 1970 р./, Республіканському семінарі з електрохімічної розмірної обробки металів /м.Уфа, 1971 р./, Загальносоюзному семінарі "Нові процеси в алмаз-ноелектрохімічній та електроерозійній обробці металів і сплавів" /м.Київ, 1976 р./, Всесоюзній конференції "ЕХО-80" /м.Тула, 1980 р./, Всесоюзній конференції з проблем ремонту авіаційної техніки /м.Київ, 1980 р./, Республіканській конференції "ЕРХО великогабаритних деталей" /м.Казань, 1980 р./, Нараді головних інженерів об'єднань ВПС /м.Київ, 1983 р./, Всесоюзній науковій нараді

з проблем міцності двигунів /м.Москва, 1984 р./.

Результати досліджень доповідались та обговорювались на постійно діючих семінарах в Казанському авіаційному інституті /1965 - 1972 рр./, Казанській філії НДАТ /1967 - 1974 рр./; Казанському моторобудівельному заводі /1965 - 1972 рр./, Казанському авіаційному заводі /1967 - 1973 рр./, Запорізькому об'єднанні "Моторобудівельник" /1981 р./, а також на нарадах спеціалізованих кафедр Казанського авіаційного інституту /1965 - 1972 рр./, Даугавпилського ВВАІУ /1975 - 1980 рр./, ВВІА ім.проф. М.Є.Жуковського /1979 - 1985 рр./, КІІЦА /1981 - 1982 рр./, Воронежському політехнічному інституті /1981 - 1982 рр./.

За результатами виконаних досліджень опубліковано три монографії: "Шлифование токопроводящими кругами с наложением электрического поля", К.: "Высшая школа", 1984, 124 с.; "Электроабразивное шлифование", К.: "Техника", 1981, 64 с.; "Электроабразивное шлифование при ремонте деталей и узлов авиационной техники", Управление Главного командующего ВВС, выпуск № 4947, 1983, 72 с., а також 40 статей. Результати роботи викладені в семи звітах з НДР, заданих Головнокомандуючим ВПС. Отримано два авторських свідоцтва на винаходи.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з чотирьох розділів, двадцяти одного підрозділу. Список літератури містить 214 найменувань. Усього в дисертації 385 сторінок, з них 83 сторінки - ілюстрації.

П. КОРОТКИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Перший розділ присвячений вивченню питання, постановці задачі дослідження та розробці методики досліджень.

В міру розвитку авіаційної техніки безперервно підвищуються її показники надійності. Але поряд із цим маємо серйозні відкази, які призводять до передчасного зняття її з експлуатації з виробленням ресурсу лише частково. Крім того, досягнення високої надійності пов'язано з підвищенням трудовитрат на виготовлення та ремонт. Через це зараз виникли умови, коли заводи авіаційної промисловості та ремонтні органи не можуть забезпечити все зростаючі потреби в авіаційній техніці. В зв'язку з цим виникає об'єктивна потреба збільшити продуктивність праці, зберігаючи або підвищуючи досягнений рівень якості виготовлення продукції.

Досвід експлуатації авіаційної техніки показує, що основними причинами відказів є втрата міцності через утомні впливи експлуатаційних факторів. Збільшення опору утомному руйнуванню досягається металургічними, конструктивними, технологічними та експлуатаційними методами. Найбільш ефективний - технологічний метод, тому що тільки технологічні засоби безпосередньо формують якість поверхні, яка зумовлює рівень сприймання експлуатаційних навантажень і від якої, в основному, залежать мінімісні характеристики деталей та вузлів.

Аналіз існуючих технологічних методів обробки показав, що вони не повністю задовольняють дедалі зростаючі вимоги до якості та продуктивності виготовлення і ремонту авіаційної техніки. Установлено, що якість обробленої поверхні, підпорядковується законам технологічної спадковості, в основному формується на фінішних операціях. Однією з найпоширеніших фінішних операцій є шліфування, яке часто супроводжується припіком, шліфувальними тріщинами, структурними змінами, розтягуючими залишковими напруженнями. Подібні дефекти призводять до контактного утомного викришування, зламу, відмовам, а заходи, які вживаються щодо їх усунення, недостатньо ефективні.

Перспективним в забезпеченні якості та продуктивності є використання нових прогресивних методів технологічної обробки. На фінішних операціях технологічного процесу механічної обробки доцільно замість звичайного шліфування використовувати шліфування з накладенням електричного поля. У цьому випадку зймання припуску і формування поверхневого шару деталі, яка обробляється, відбувається одночасно з дією електричного поля та механічного різання абразивними /алмазними/ зернами. Поліпшення якості та підвищення продуктивності досягається тим, що частина припуску, іноді навіть більша, знімається за рахунок дії електричного поля; при цьому різко знижуються сили різання і температура в зоні шліфування, а дефекти, які мають місце під час звичайного шліфування, практично відсутні.

Незважаючи на всі свої позитивні якості ЕАШ широко не впроваджено. Цьому заважає ряд невирішених проблем, пов'язаних з недостатнім вивченням фізики процесу, формування поверхневого шару, визначення граничних умов параметрів, які впливають на продуктивність і якість. Це стає на перешкоді їх управління.

Є окремі, розрізнені експериментальні праці, що утруднює аналіз отриманих даних і практичне їх використання. Теоретичні дослідження виконані з великими припущеннями і не відзначаються високою збіжністю з експериментом. Дослідження належать в основному до плоского і круглого зовнішнього шліфування.

Дослідники одночасно відмічають важливу роль розчину електроліту в процесі шліфування з накладенням електричного поля, але до єдиного погляду щодо методики вибору електроліту не приходять. Рекомендується експериментальне розв'язання даної проблеми в кожному конкретному випадку. Це призводить до великих економічних витрат.

Враховуючи стан виконаних досліджень необхідно було вирішити такі основні задачі:

1. Дослідити механізм формування поверхні в різних схемах шліфування з накладенням електричного поля на прямій полярності з урахуванням гідродинаміки течії електроліту.

2. Установити граничні умови існування електрохімічних, електроерозійних і механічних явищ в загальному обсязі процесу.

3. Обґрунтувати критерії вибору електроліту для обробки різних марок сталей і сплавів. Розробити методику вибору електроліту.

4. Вивчити гідродинаміку течії розчину електроліту у різних схемах шліфування та її вплив на основні показники процесу.

5. Описати теплові явища під час шліфування з накладенням електричного поля та їх вплив на критерії якості.

6. Дослідити вплив режимів шліфування на вихідні показники /економічність, якість, точність, продуктивність/ обробки.

7. Розробити науково обґрунтовану методику розрахунку й вибору технологічних режимів шліфування на прямій полярності.

8. Визначити технічні умови для включення в ТТТ дослідно-промислової установки.

В основі вирішення поставлених питань стоїть питання формування поверхні, що обробляється.

Другий розділ "Умови формування поверхневого шару під час шліфування струмопровідними кругами з накладенням електричного поля" присвячений дослідженню формування поверхні у різних схемах шліфування.

Новина у вирішенні цього питання полягає в тому, що формування розглядається з урахуванням впливу гідродинамічних клінів, які утворюються в зонах спряження поверхонь електродів, та

зміни електричного поля внаслідок знімання металу з поверхні анода, а також в дослідженні формоутворення поверхні під час обробки за всіма основними схемами шліфування.

Доведено, що шліфування з накладенням електричного поля - комбінований метод обробки, при якому в зонах гідродинамічних клинів знімання припуску t_{ex1} і t_{ex2} рис. 1 здійснюється внаслідок анодного розчинення, а в зоні контакту струмопровідного абразивного /алмазного/ круга з оброблюваною поверхнею - за рахунок комплексної дії механічного різання абразивними зернами та електрофізикохімічних явищ. Для керування процесом формоутворення і досягнення потрібних точнісних, якісних та експлуатаційних показників оброблюваної поверхні важливо знати частки участі перелічених явищ в загальному обсязі обробки.

Швидкість анодного розчинення пропорційна величині електричного поля й обернено пропорційна вазору між електродами. Згідно з цим в процесі досліджувань одержані диференційовані рівняння, які дозволяють розрахувати величину анодного розчинення припуску внаслідок дії електричного поля та наявності гідродинамічних клинів :

в загальному вигляді

$$\frac{dY_c}{d\tau} = \frac{AU}{L(R, \tau, V_{nn}) + Y_c(\tau)} \quad /1/$$

для плоского шліфування периферією круга

$$\frac{dY_c}{d\tau} = \frac{AU}{(R+a_3) - \sqrt{R^2 - V_{nn}^2 \tau^2} + Y_c(\tau)} \quad /2/$$

плоского шліфування торцем

$$\frac{dY_c}{d\tau} = \frac{AU}{a_3 + Y_c(\tau)} \quad /3/$$

круглого зовнішнього шліфування

$$\frac{dY_c}{d\tau} = \frac{AU}{R(1 - \cos \omega_x \tau) + r_g(1 - \cos \omega_g \tau) + a_3 + Y_c(\tau)} \quad /4/$$

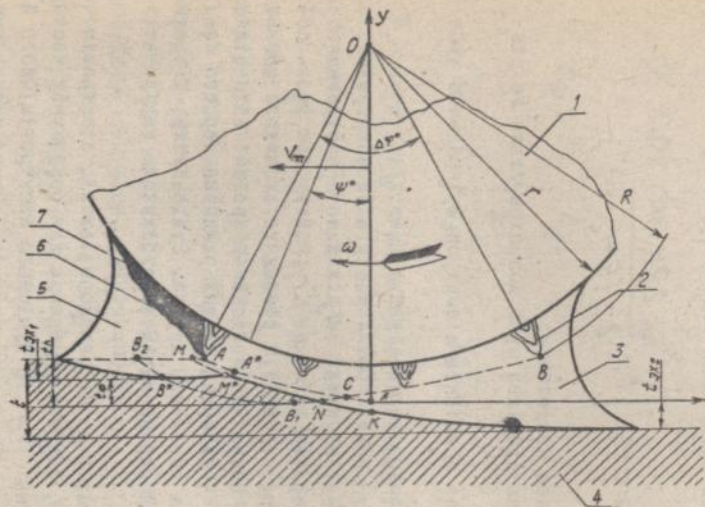


Рис. 1. Загальна схема формотворення поверхні під час шліфування струмо-
провідним кругом.

- 1 - струмопровідний абразивний круг /катод/;
- 2 - абразивне зерно;
- 3 - гідродинамічний клин поза кругом;
- 4 - деталь /анод/;
- 5 - гідродинамічний клин перед кругом;
- 6 - стружка + шлам;
- 7 - струмопровідна зв'язка

різбобшліфування:

а/ анодне знімання за внутрішнім діаметром різьби

$$\frac{dY_c}{d\tau} = \frac{AU}{(R-\Delta r)(1-\cos\omega_k\tau) + r_H(1-\cos\omega_g\tau) + a_3 + Y_c(\tau)} \quad 15/$$

б/ анодне знімання на боковій поверхні різьби аналогічне тому, що має місце під час шліфування торцем круга /рівняння 3/, при цьому

$$\tau = \frac{2\varphi_{gi}r_i}{V_g}; \quad \varphi_{gi} = \arccos \left[1 - \frac{2Rh - h^2}{2r_i(R+r_i-h)} \right]$$

Зубошліфування методом копіювання:

а/ анодне знімання за профілем зуба розраховується за рівнянням /3/;

б/ анодне знімання за зовнішнім діаметром і западиною зуба описується рівнянням /2/.

У рівняннях прийняті позначення: $\Delta r = r_H - r_B$; τ - час дії електричного поля; U - напруга на електродах; A - постійна; R - радіус круга; a_3 - висота виступання абразивних зерен над поверхнею зв'язки; r_i , r_H , r_B - поточний, зовнішній і внутрішній радіус різьби та зубчатого колеса; V_g , V_{np} - швидкість деталі та поздовжньої подачі відповідно.

Рівняння /2/ - /5/ - диференційовані рівняння першого порядку, які розв'язувались чисельним методом Рунге-Кутта. Теоретичні висновки перевірені експериментально, розбіжність результатів не перевищує 15%.

Враховуючи кінематику різання, електрофізичні, електрохімічні, гідродинамічні явища, одержані рівняння для розрахунку частки участі механічного різання K_M та сумісного електрохімічного й електрофізичного знімання K_{ex} , визначені граничні умови існування ерозійних явищ:

$$K_M = \frac{t_{np}}{t_A + t_{ex2}}; \quad 16/$$

$$K_{ex} = 1 - K_M \quad 17/$$

де t_A - глибина різання, встановлена за лібом;

$$t_{np} = \left(1 - \frac{a_{ex}}{a_m}\right) (t_n - t_{ex1}); \quad /8/$$

$$a_m = 2R \sin \frac{\Delta\varphi}{2} \cos \frac{2\psi + \Delta\varphi}{2}; \quad /9/$$

$$\psi = \arccos \left(1 - \frac{t_\varphi}{R}\right); \quad /10/$$

$$t_\varphi = t_n - t_{ex1}; \quad /11/$$

$$a_{ex} = \varepsilon \frac{U\alpha}{\gamma a_3} \eta \tau_1 \frac{1}{\sin \psi}; \quad /12/$$

ε - електрохімічний еквівалент оброблюваного металу; α - питома електропровідність електроліту; γ - щільність оброблюваного металу; η - вихід за струмом; τ_1 - час електрохімічної дії в зоні шліфування; $\Delta\varphi$ - кут між двома сусідніми зернами, які беруть участь в процесі різання; t_{ex1} , t_{ex2} - глибина електрохімічного знімання внаслідок наявності переднього і заднього гідродинамічних клинів. Їх значення обчислюються за однією з формул /2/ - /5/.

Глибину ерозійного знімання, відделеного на протязі часу τ_u існування імпульсу, визначаємо як:

$$t_{ep} = \frac{W^2 \tau_u - \pi \Pi}{2 q_p W \gamma}; \quad /13/$$

де W - потужність розряду; q_p - тепломісткість рідкого сплаву; Π - критерій Палатника.

Граничною умовою виникнення ерозійних розрядів, виходячи з рівняння /13/, буде $t_{ep} = 0$. Це випливає, коли

$$W^2 \tau_u - \pi \Pi = 0 \quad /14/$$

Підставляючи значення W і розв'язуючи /14/ відносно величини міжелектродного зазора /МЕЗ/ a_2 , находимо, що ерозійні

процеси виникають при значенні

$$a_2 = \frac{U^2 S}{\alpha} \sqrt{\frac{\tau_4}{\pi \Gamma}}, \quad /15/$$

де S - площа обробки.

Установлено, що якщо $K_{ex} = 1$, то ЕАШ перетворюється в електрохімічну розмірну обробку; якщо $K_M = 1$, то має місце звичайне шліфування; якщо $t_{ep} \gg t_{ex1}$, обробка стає ерозійною.

Відмічено велике практичне значення $t_{пр}$ /різання 8/. Воно є умовною величиною глибини різання ЕАШ, коли динамічні процеси ЕАШ пропорціональні динамічним процесам звичайного шліфування. Це дає широку можливість використання наукових, довідкових та експериментальних даних, які існують для звичайного шліфування.

Наведені технічні дані експериментальних установок, результати експериментальної перевірки теоретичних висновків. Вказано, що розбіжність результатів не перевищує 20%.

Дослідженнями встановлено, що при шліфуванні струмопровідними кругами з накладенням електричного поля важливу роль відіграє анодне розчинення, яке в значній мірі залежить від правильного вибору електроліту. Через це виникає необхідність обґрунтування впливу природи електроліту на продуктивність знодного розчинення.

Відомо, що анодне розчинення G_{ex} обумовлено швидкістю електрохімічних реакцій і підпорядковано закону електролізу Фарадея

$$G_{ex} = \mathcal{E} J \tau, \quad /16/$$

де \mathcal{E} - масовий електрохімічний еквівалент оброблюваного металу /сплаву/; J - сила струму; τ - час електрохімічної дії.

У рівнянні /16/ електрохімічні еквіваленти для сталей і сплавів визначаються достатньо точно за формулами, де враховується процентний склад лігуючих елементів та їх електрохімічні еквіваленти, а τ пропорціональне величині гідродинамічного клина й обернено пропорціональне швидкості $(V_d + V_{пл})$. Сила струму багато в чому зумовлюється швидкістю переміщення іонів.

У загальному випадку переміщення іонів може бути за рахунок дії дифузійних, міграційних і конвективних сил. В умовах ЕАШ застосовуються висококонцентровані розчини електролітів і здійс-

няється їх добре перемішування. Через це концентрація електроліту на границі електрода і в глибині міжелектродного простору мало чим відрізняються. Дифузійне перенесення в цьому випадку не можливе, тому що його основна умова - різниця концентрацій іонів в проміжку між електродами. Конвективне перенесення також незначне, тому що температура в міжелектродному просторі постійна в кожному проміжку часу, а складова швидкості переміщення електроліту за нормаллю до електродів мала. В цих умовах відсутня як вільна, так і примусова конвекція. Через це домінуючим перенесенням буде міграційне перенесення.

З умови статичної рівноваги сил електричного поля, тертя і переміщення, які діють на іони, визначаємо швидкість руху іонів V_i в міжелектродному просторі. Тоді сумарний струм, який протікає в міжелектродному просторі, визначиться кількістю позитивних і негативних іонів, що пересікають в одиницю часу міжелектродне січення S . З урахуванням ступеня електролітичної дисоціації електроліту α , він визначається за рівнянням:

$$J = \alpha Z C S (\lambda_+^0 + \lambda_-^0) \frac{\Delta U}{a_2} \quad /17/$$

де C - концентрація електроліту; Z - валентність іонів; $\lambda_+^0 = F \cdot V_i^+$, $\lambda_-^0 = F V_i^-$ - рухомість іонів і катіонів; F - число Фарадея.

Величини S , $\frac{\Delta U}{a_2}$ визначені умовами обробки, а вираз

$$\alpha = \alpha Z C (\lambda_+^0 + \lambda_-^0) \quad /18/$$

являє питому електропровідність. Через це аналіз сумарної величини струму, при постійних геометричних і електричних параметрах обробки, може бути зведений до аналізу питомої електропровідності розчину електроліту. α визначає відношення молекулярної електропровідності λ_{CT} до іонної λ_{OT} . Значення λ_{OT} відшукується в довідковій літературі, а λ_{CT} визначається за відомою формулою

$$\lambda_{CT} = \lambda_{OT} - (B_{1T} \lambda_{OT} + B_{2T}) \sqrt{C}$$

$$B_{1T} = f(D, T, \nu, Z_i); B_{2T} = f(D, T, \nu, Z_i, V_i^0) \quad /19/$$

де D - діелектрична проникність розчинника; ν - в'язкість

розчинника; T - температура розчинника; V_+^0 , V_-^0 - швидкості руху іонів при градієнті електричного поля, який дорівнює одиниці.

Аналіз виразу /19/ дозволяє зробити висновок, що із збільшенням концентрації електроліту молекулярна електропровідність, а отже, і ступінь електролітичної дисоціації розчину зменшується. Але питомо електропровідність пропорційна α та C /18/. В цьому випадку неминучи екстремум. Він з'являється тоді, коли збільшення α через збільшення C дорівнює його спаданню через зменшення λ . Максимальному значенню α відповідає максимальне зніження припуску β_{ex} , кількісне значення якого в значній мірі залежить від іонної електропровідності λ_0 . Що вище λ_0 , то більше β_{ex} . Через це основним критерієм під час вибору електролітів з метою досягнення максимальної продуктивності є їх висока іонна провідність.

Важливу роль у забезпеченні високої продуктивності відіграє в'язкість розчинника ν . З рівняння /19/ бачимо: чим більша ν , тим менше $\lambda_{ст}$. Це, в свою чергу, знижує ступінь електролітичної дисоціації α та в решті решт негативно впливає на продуктивність процесу. Ось чому другою основною вимогою під час вибору електроліту є низька кінематична в'язкість розчинника.

Аналогічні висновки можна зробити про вплив на продуктивність діелектричної проникності D та температури електроліту T . Як бачимо з рівняння /19/, із збільшенням цих параметрів молекулярна електропровідність зростає. Це сприяє збільшенню продуктивності. Звідси випливає третя та четверта умова виробу електроліту.

З аналізу виразу /19/ можна помітити, що із збільшенням кількості іонів n_i , на яке дисоціює електроліт, та їх валентності Z_i молекулярна електропровідність спадає, що негативно впливає на продуктивність. Цей факт необхідно враховувати під час вибору електролітів.

В основі електрохімічного формулювання лежить той факт, що під впливом електрорушійної сили /ЕРС/ на аноді електрони з поверхневого шару уходять у зовнішнє коло. Позитивно іонізовані атоми металу вступають у взаємодію з аніонами електроліту. В результаті цього процесу утворюються сполуки, які або осідають на поверхні електрода у вигляді окисної плівки, або розчиняються в електроліті, або випадають в осад.

Анодне розчинення протікає інтенсивніше, якщо на аноді відбувається реакція окислення аніонів та іонів гідроксиду OH^- .

Ця умова задовольняється, якщо рівноважний потенціал реакції окислення аніонів $\varphi_{ок} (A_j^{m-})$ більш позитивний, ніж стрибок потенціалів на межі подвійного пограничного шару. На катоді під дією ЕРС з'являється надлишок електронів, і катіони електроліту, отримуючи невідповідні заряди, відновлюються.

Катод в процесі роботи не повинен змінювати свою геометричну форму, в цьому полягає умова забезпечення високої точності обробки, тому необхідно виключити випадання катіонів з розчину. Цього можливо досягти, коли потенціал осадження катіонів $\varphi_{ос} (K_i^{n+})$ менший від потенціалу катода.

Для продуктивності анодного розчинення важливий і той факт, щоб кількісне співвідношення аніонів та катіонів в міжелектродному просторі не зменшувалось за рахунок утворення нерозчинних хімічних сполук катіонів з OH^- і Me^{n+} з аніонами електроліту. Бажано, щоб ці сполуки розчинялись або дисоціювались.

З рівняння I/t бачимо, що величина анодного розчинення залежить від часу t електрохімічної дії, який залежить від розмірів гідродинамічних клинів. Для їх визначення необхідно дослідити гідродинаміку течії електроліту.

Основне призначення розчину електроліту при ЕАШ полягає в забезпеченні протікання електрохімічних реакцій, а також у виконанні функцій змазувально-охолоджуючої рідини /ЗОР/. Це здійснюється тим, що розчин електроліту, володіючи силами зчеплення, залучається інструментом в зону шліфування. Крім того, за рахунок дії ряду сил, які діють на розчин, створюється його рівноважний стан в місцях спраження електрода - інструмента та оброблюваної поверхні. Форма цих концентрацій розчину електроліту являє собою клини, які сприяють протіканню електрохімічної реакції. Від розміру гідродинамічних клинів залежить продуктивність та якість обробки.

Розмір і форма клинів залежить від місця та умов подачі розчину. З усіх можливих варіантів подачі на практиці трапляються п'ять основних, коли розчин методом вільного поливу подається в одну із зон формування переднього і заднього гідродинамічних клинів, зон, які до них прилягають, а також комбінована подача.

При усталених режимах можна виділити чотири характерні зони течії електроліту: зона гідродинамічного клина, утворена за шліфувальним кругом, який рухається /I/; зона перед кругом /II/; зона шліфування /III/; решта частини поверхні електроде інструмента /IV/.

Математична модель списання основних зон течії електроліту виведена з умови рівноваги сил, які діють на зони, що розглядаються. При цьому враховувались сили швидкісного напору розчину; відцентрові; тертя; надлишкового тиску, обумовлені капілярними явищами; адгезійні та гравітаційні.

При шліфуванні з незначними глибинами врізання $t < 1$ мм і роботі кругами з $R > 50$ мм розміри переднього і заднього гідродинамічних клинів L можна обчислити за рівнянням

$$\rho g L^3 - \pi \sigma L + 2\mu U_{кр} R = 0 \quad /20/$$

де σ , ρ , μ - поверхневий натяг, густина, динамічний коефіцієнт в'язкості; $U_{кр}$ - лінійна швидкість обертання круга.

З умови рівноваги сил знаходимо, що на вільній поверхні електрода інструмента утворюється стійкий шар розчину завтовшки h_{IV} , який дорівнює

$$h_{IV} = \frac{P_1(b \cdot K_{аз} + a_3)}{\rho b \frac{U_{кр}}{R} + g}, \quad /21/$$

$$\text{де } K_{аз} = \frac{100}{C_{аз}} - 1; \quad U_{кр} = \sqrt{\frac{(P_1 S_{зц} - m_i g \cos \alpha) R}{m_i}};$$

$$m_i = \rho L'_{св} h; \quad L'_{св} = b K_{аз};$$

P_1 - сила зчеплення розчину електроліту з поверхнею зв'язки круга; $C_{аз}$ - концентрація абразивних зерен в крузі; b - середньомовірнісний розмір абразивного зерна $b = 10,6 N$, N - зернистість за ГОСТ 3647-71; $S_{зц}$ - площа зчеплення.

В зоні шліфування шар електроліту дорівнює

$$h_{II} = \frac{3\mu U_{кр} R}{P_k} + a_3 \left(1 - \frac{C_{аз}}{100} \right), \quad /22/$$

де P_k - тиск в зоні шліфування, який знаходиться з умови

$$\frac{dP_k}{dx} = 6\mu U_{кр} \frac{h_{ж} - h_0}{h_{ж}^3} \quad /23/$$

де

$$h_{ж} = -t + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{r} \right) X^2;$$

r - радіус кривизни оброблюваної поверхні; X - поточна координата; h_0 - товщина рідкого шару в точці максимального тиску.

Виходячи із загальної гідродинамічної картини, об'єм електроліту в зоні II розраховується за формулою

$$V_{II} = L B \left[h_{ж} + a_3 \left(1 - \frac{Ca_3}{100} \right)^2 \right] \quad /24/$$

а в зонах I і III як

$$V_I = V_{III} = t B h \left(1 - \frac{Ca_3}{100} \right)^2 \quad /25/$$

де $h = R - \sqrt{R^2 - t^2}$; B - ширина круга.

Тоді витрата електроліту визначається як

$$G_3 = K (V_I + V_{II} + V_{III}) \rho_{кр}, \quad /26/$$

де K - коефіцієнт, враховуючий витіки на розбризування електроліту $K = 2,5 - 6,0$.

Розрахунки і практика показують, що G_3 для робочих режимів ЕАШ коливаються у межах 5 - 12 л/хв. Слід відмітити, що для забезпечення більш повного заповнення міжзеренного простору шліфувального круга розчином електроліту, подачу електроліту рекомендовано здійснювати радіально до поверхні круга методом вільного поливу. Надмірне збільшення швидкості витікання розчину із сопла приводить до нераціонального його витрачання - збільшуються витіки, розбризування.

Важливе значення має і вибір місця подачі електроліту на абразивний круг. Якщо переслідувати мету найшвидшого і стабільного формування клинів, то необхідно, щоб вектор швидкості витікання розчину із сопла пересікав контури зони формування клинів. Якщо через які-небудь причини клини небажані /забезпечення високої точності/, то місце подачі електроліту слід вибирати далі від зони формування клинів.

Гідродинамічна картина обробки є однією з основних відправних пунктів розрахунку теплових явищ.

Установлено, що одним із шляхів вирішення питання температурного поля в зоні шліфування з накладенням електричного поля є аналітичний метод. Подібні задачі вирішено для умов контактної тертя та звичайного шліфування. академіком Н.І.Чудаковим, І.В.Крагельським, А.І.Ісєєвим, С.С.Силінін, В.А.Сипайловим та ін. Але для ЕАШ вони залишаються невирішеними.

Виходячи із загального рівняння теплопровідності професор Сипайлов В.А. дістав рівняння, яке описує температурне поле в зоні звичайного шліфування:

для точечного джерела тепла

$$T = \exp\left(-\frac{Vz}{2a}\right) \int \frac{Q}{2\lambda\pi^{3/2}R} \cdot \exp\left[-\left(\xi^2 + \frac{V^2 R}{16a^2 \xi^2}\right)\right] d\xi ; \quad 127/$$

для лінійного джерела тепла

$$T = \frac{Q}{4\pi\lambda} \exp\left(-\frac{Vz}{2a}\right) \int \frac{d\xi}{\xi} \exp\left[-\left(\xi^2 + \frac{V^2 R}{16a^2 \xi^2}\right)\right] d\xi ; \quad 128/$$

для плоского нескінченного джерела тепла

$$T = \frac{q}{c\sqrt{\pi}V} \exp\left[-\frac{V}{2a}(|Z|+Z)\right] \int_0^{\sqrt{V\xi/2V}} \exp\left[-\left(\frac{Vz}{4aU} - U^2\right)\right] dU ; \quad 129/$$

для плоского джерела тепла завширшки $2h$

$$T = \frac{qa}{\pi\lambda V} \int_{Z-H}^{Z+H} \exp(-\xi) K_0(m) (\sqrt{X^2 + \xi}) d\xi , \quad 130/$$

де

$$-\frac{V(z-z')}{2a} = \xi ; X = \frac{Vx}{2a} ; Z = \frac{Vz}{2a} ; H = \frac{Vh}{2a} ;$$

Q - лінійна густина теплового потоку; q - густина теплового потоку; X, Y, Z - поточні координати джерела тепла /з індексом позначені початкові значення/; λ - коефіцієнт теплопровідності; τ - час; c - питома теплоємність; a - коефіцієнт температуропровідності.

Оскільки схеми обробки в нашому випадку не відрізняються від звичайного шліфування, рівняння /27 - 30/ використано при описанні температурного поля в зоні шліфування з накладенням електричного поля. Проте для цього необхідно врахувати умови утворення теплового потоку, які характерні для ЕАШ. Цьому сприяє розроблена теорія формування поверхневого шару, описана вище.

Експериментальні дослідження і розрахунки показали, що зона контакту джерела тепла при всіх схемах шліфування, які найчастіше зустрічаються в практиці, смугова.

Як бачимо з наведених аналітичних залежностей /27 - 30/ температурне поле при всіх схемах шліфування знаходиться в прямій залежності від сумарної кількості тепла, яке виділяється в зоні шліфування Q .

В загальному випадку

$$Q = Q_M + Q_3 + Q_{3x} \quad /31/$$

де Q_M , Q_3 , Q_{3x} - кількість тепла, яке виділяється в зоні шліфування від механічної дії абразивних зерен, ерозійних і електрохімічних явищ.

В роботі прийнято, що Q_3 і Q_{3x} в основному витрачається на внутрішні процеси ерозії та електрохімічні явища, оскільки електрохімічна й ерозійна обробки практично є холодними і протікають без нагріву оброблюваної деталі й електродів інструмента. Тому, розраховуючи температурне поле оброблюваної поверхні, ними можна знехтувати. Тоді

$$Q = Q_M = P_2 U_{xp} \quad /32/$$

знаходимо з умов розглядення кінематики різання та стружкоутворення

$$P_2 = C_{P_2} \cdot P_2' \cdot L \cdot B \cdot n_3 \quad /33/$$

де C_{P_2} - коефіцієнт сили різання; P_2' - сила різання одним зерном; L - довжина лінії контакту; B - ширина шліфування; n_3 - кількість абразивних зерен, які беруть участь у різанні.

Слід звернути увагу, що в розрахунках фігурує приведена глибина різання t_{np} , яка визначається за рівнянням /8/.

При усталених режимах обробки абразивні зерна знаходяться в контакті з оброблюваною поверхнею в такій мірі, яка визначається шорсткістю поверхні обробки R_a . Тоді сили шліфування можна визначити за формулою

$$P_2 = 2R_a \cdot L \cdot \tau_{cp} \cdot n_3 \quad /34/$$

При виконанні розрахунків рівняння /34/ зручніше, ніж попереднє /33/.

Теоретичне обґрунтування температурного поля в зоні шліфування дозволило визначити послідовність його розрахунку. Отримано теоретичні залежності сил різання й температури від режимів шліфування, міцнісних властивостей оброблюваного матеріалу. Теоретичні залежності підтверджені експериментальними дослідженнями. Сили різання визначались шляхом заміру сумарної потужності на валі шпинделя з наступним перерахунком P_2 . Регістрація потужності здійснювалась приладом Н370. Температура в зоні шліфування визначалась методом фарб, термопарами і за мікроструктурами обробленої поверхні по косому зрізу. Розбіжність результатів теоретичних досліджень та експериментів не перевищує 20%.

З отриманих результатів встановлено, що сили шліфування менші у випадку обробки з накладенням електричного поля. P_2 значно збільшується при збільшенні радіуса круга R , за рахунок росту дуги контакту шліфувального круга з оброблюваною поверхнею. Однак різниця сил між звичайним шліфуванням та ЕАШ спадає із збільшенням R , оскільки виявляється позитивний вплив переднього гідродинамічного клина, який зростає із збільшенням радіуса круга і сприяє зростанню вродного розтравлювання до початку різання.

Найефективішу дію електричне поле справляє в межах швидкостей відносно переміщення V_{opt} від 1 м/хв до 6 м/хв. Збільшуючи швидкість поздовжнього переміщення вище 10 м/хв, можна помітити, що температурний режим ЕАШ нічим не відрізняється від звичайного шліфування.

Суттєвий вплив на динамічні та теплові характеристики ЕАШ справляє глибина шліфування. З її збільшенням зростають навантаження, стає жорсткішим тепловий режим. Аналогічні залежності отримано й при зростанні міцнісних характеристик оброблюваного матеріалу.

Аналіз результатів проведених досліджень показав, що сили шліфування й температурні режими з накладенням електричного поля відповідають цим величинам під час обробки без накладення електричного поля з глибиною шліфування $t_{пр}$ /рівняння 8/. Відхилення результатів не перевищує 10...15% при визначенні сил шліфування і 10...20% при визначенні температури. Це дозволяє в значній мірі використовувати результати досліджень і довідкові матеріали звичайного шліфування під час вибору оптимальних режимів обробки ЕАШ.

В третьому розділі "Якість, експлуатаційні властивості поверхневого шару і продуктивність обробки при шліфуванні з накладенням електричного поля" наведені дослідження впливу режиму шліфування струмопровідними кругами з накладенням електричного поля на основні показники якості поверхневого шару: точність за геометричними розмірами, шорсткості, взаємного розташування; мікроструктуру; припіки і шліфувальні тріщини, структурні зміни; залишкові напруги, а також оцінено їх вплив на експлуатаційні властивості: утомну міцність, корозійну стійкість, довготривкість.

Аналіз факторів, які впливають на точність шліфування з накладенням електричного поля показав, що похибки, пов'язані з роботою системи верстат - пристрій - інструмент - деталь /ВПІД/, мають рівні значення із звичайним шліфуванням. Позитивний вплив на показники точності справляють: анодне розчинення внаслідок наявності переднього гідродинамічного клина; незначний знос металобразивного круга; виділення в зоні шліфування газів і наявність шлему.

Додаткові похибки вносить електричне поле за умов обробки, коли час його дії на різних ділянках оброблюваної поверхні неоднаковий /шліфування пазів на врізання, шліфування до упору та ін./, а також коли воно діє на спряжені, остаточно оброблені поверхні внаслідок струмів розсіювання.

З метою зменшення й виключення похибок, викликаних наявністю електричного поля, слід кінцеві проходи виконувати на м'яких режимах $U = 4...6$ В або з вимкнутим джерелом струму.

Точність шліфування з накладенням електричного поля підвищується при ліквідації заднього /формуючого поверхню/ гідродинамічного клина шляхом установа спеціальних форсунок, через які подається стиснене повітря в зону формування заднього гідродинамічного клина. Найбільшу точність отримано при шліфуванні, коли

існує тільки передній гідродинамічний клин.

Установлено, що точність обробки спадєє при режимах шліфування, які забезпечують високу частку механічного знімання /високі: швидкість позовжньої подачі, глибина шліфування, концентрація абразивних зерен; низькі: робоча напруга, електропровідність електроліту/, а також при значній дії електричного поля, коли домінують ерозійні процеси.

Запропоновано теоретичні залежності визначення позовжньої та поперечної шорсткостей, які дозволяють оцінити їх значення в залежності від механічних режимів, величини електричного поля і гідродинаміки течії електроліту.

Установлено, що задній гідродинамічний клин сприяє згладжуванню мікронерівностей та зменшенню величини R_a , досягаючи мінімального значення в межах 0,1...0,2 мкм.

Аналіз теоретичних залежностей та експериментальних даних показує, що шорсткість обробки погіршується із збільшенням глибини шліфування і швидкості відносного позовжнього переміщення. Вона набуває мінімального значення при висоті виступання абразивних зерен над поверхнею струмопровідної зв'язки $a_3 = 0,02...0,05$ мм; концентрації абразивних зерен $C_{a3} = 25\%$ і максимальної електропровідності електроліту.

Напруга електричного поля в діапазоні $U = 6...12$ В на шорсткість поверхні справляє незначний вплив і в цьому діапазоні значення R_a , R_z мінімальні. При зменшенні значення U менше 6 В шорсткість збільшується і процес утворення мікронерівностей наближається до процесу звичайного шліфування. При збільшенні U більше 12 В шорсткість також збільшується за рахунок переважання та інтенсифікації електроерозійних процесів.

Досліджено умови виникнення в поверхневому шарі припиків і запропоновано теоретичну оцінку граничних умов їх існування, виходячи з того, що температура в зоні обробки не повинна перевищувати температуру структурних змін.

Теоретично та експериментально встановлено, що при обробці конструкційних сталей шліфувальні прилики й тріщини відсутні при обробці в діапазоні режимів $U = 6...12$ В; $C_{a3} = 15...25\%$; $a_3 = 0,025...0,05$ мм; $V_{m} \times t = 250...300$ мм²/хв.

Експериментальні дослідження показали, що в поверхневому шарі після електроабразивного шліфування мають місце стискальні заливкові напруги порядку 70...200 МПа при обробці сталей типу

12x2H4A; до 600 МПа при обробці жароміцних сплавів типу ВДЛ; до 200 МПа при обробці сплавів типу ЗИ437; КС6К і до 175 МПа при обробці титанових сплавів типу ВТ-3-І.

Це дозволяє рекомендувати в технологічному процесі виготовлення й ремонту деталей авіаційної техніки після шліфування струмопровідними кругами з накладенням електричного поля частково або повністю відмовитися від подальших операцій, пов'язаних з поверхнево-пластичним деформуванням.

В роботі висунуто гіпотезу, що залишкові стискальні напруги при електроабразивному шліфуванні виникають внаслідок переважання в процесі різання силових факторів, а також електроіскрових ефектів, які мають місце при електроіскровому зміцненні.

Результати випробувань на утомну міцність показали, що слід віддати перевагу як по верхній, так і по середній межі утоми, а також по тривкості зразкам з поверхнею, обробленою електроабразивним шліфуванням. Це досягається в основному за рахунок зменшення величини шорсткості обробки, а також забезпечення в процесі обробки стискальних залишкових напруг.

Значний вплив на утомну міцність справляють припідки і структурні зміни, які з'являються в процесі шліфування. Але їх кількісну оцінку зробити дуже складно, оскільки утомна міцність багато в чому зумовлена не тільки ступенем припідку чи структурних змін, а також місцем розташування на поверхні зразка. Ймовірність появи таких дефектів в поверхневому шарі після електроабразивного шліфування значно менша, ніж після звичайного, тому утомна міцність в першому випадку дещо вища.

Аналогічні пояснення можуть бути й тому, що корозійна стійкість зразків, оброблених шліфуванням з накладенням електричного поля значно /в 2...4 рази/ вища, ніж зразків, оброблених звичайним шліфуванням.

Установлено загальні закономірності продуктивності шліфування токопровідними кругами з накладенням електричного поля від режимів, умов обробки, а також характеристик шліфувального круга. Це дозволяє приймати оптимальні рішення щодо забезпечення максимальної продуктивності залежно від забезпечених вимог до якості поверхневого шару.

Установлено, що продуктивність обробки зростає із збільшенням глибини шліфування t , швидкості поздовжньої подачі $V_{пл}$; напруги на електродах U ; концентрації електроліту C_3 , а

також із зменшенням виступання абразивних зерен над поверхнею зв'язки.

Найбільша продуктивність ЕАШ одержана при лінійних швидкостях обертання шліфувального круга $V_{кр} = 20...30$ м/с і наявності переднього і заднього гідродинамічних клинів. В цьому випадку створюються оптимальні умови заповнювання електролітом міжелектродного простору.

ЕАШ інтенсифікують шляхом накладення осцилюючих рухів круга, а також ультразвукових коливань.

У четвертому розділі "Технологічні основи шліфування токопровідними кругами з накладенням електричного поля і практика його впровадження" відбиті питання реалізації досліджень.

При визначенні технологічних основ шліфування струмопровідними кругами з накладенням електричного поля вирішені проблеми розрахунку та призначення режимів обробки; розробки та вибору засобів технологічного оснащення; визначення технологічного маршруту обробки, його технологічної та технічної доцільності, а також економічної ефективності.

Важливим етапом у вирішенні цієї проблеми є вибір режимів обробки. Запропоновано їх вибір здійснювати в три етапи. На першому етапі за результатами досліджень потрібно:

1. Установити перелік основних вихідних параметрів і керуючі фактори /режими обробки/.
2. Визначити діапазон /множина/ керуючих факторів, які забезпечують задані значення вихідних параметрів.
3. Із визначеної множини керуючих факторів вибрати ті, які забезпечують максимальну продуктивність.

На основі проведених досліджень запропоновано взяти основними вихідними параметрами шорсткість поверхні; точність геометричних розмірів; припустиму силу різання, яка зумовлює структурні зміни в поверхневому шарі; продуктивність та собівартість.

Аналіз функціональних залежностей вихідних параметрів від режимів обробки показує, що для кожного вихідного параметра існує діапазон режимів обробки, які забезпечують їх потрібні розміри. З кількох сукупностей множин режимів обробки обираємо такі їх граничні значення, які забезпечують максимальну продуктивність.

На другому етапі вибору режимів обробки вони можуть уточнюватися для конкретних умов, згідно з результатами додаткових експериментів, проведених за оптимальним планом.

Остаточно режими обробки вибирають з умов найбільш високого критерія ефективності /цільової функції/, наприклад, собівартості.

В роботі наведено методику вибору оптимальних режимів шліфування.

Для виконання робіт по ЕАШ використовують звичайно спеціалізовані верстати. Але практика впровадження шліфування з накладенням електричного поля показує, що номенклатура існуючих верстатів не дозволяє виконувати увесь обсяг необхідних робіт. Тому виконано аналіз можливих варіантів модернізації устаткування для виконання робіт по шліфуванню з накладенням електричного поля. Проведені дослідження дозволили сформулювати основні вимоги до промислових установок. Для виконання слюсарно-механічних робіт запропоновано модернізацію ручної пневмошліфувальної машини, яка дозволяє здійснювати різання ушкоджених ділянок: зачистку зварних швів, нерівностей здійснювати новим методом обробки.

Виходячи з вимог ремонту авіаційної техніки, запроєктовано й виготовлено портативне універсальне джерело живлення струму, яке дозволяє ступінчасто /через 2 В/ регулювати напругу в діапазоні 4...16 В, а також в режимі 27 В і 65 В. Це дозволяє його використовувати в зварних і паяльних роботах.

При розробці рекомендації щодо вибору характеристик ріжучого інструмента використаний багатий матеріал ряду досліджувачів, а також автора роботи. При цьому значні труднощі виникали у забезпеченні потрібної геометричної точності ріжучих властивостей та продуктивності правки струмопровідного ріжучого інструмента. Тому в роботі проведено дослідження щодо можливостей правки струмопровідних кругів механічним різанням /різцем, шліфувальним кругом, шарошкою, алмазними голками, роліками/, а також з використанням електрофізичних та електрохімічних методів розмірної обробки.

Встановлено режими, точнісні характеристики й параметри продуктивності правки.

Дослідження показали, що правку струмопровідних кругів на металічній зв'язці необхідно виконувати в три етапи: попередня обробка /основне знімання припуску/ різанням або електроерозійними методами; остаточна обробка /для надання профілю заданої геометричної точності/ шліфуванням або електрообразивним шліфуванням; очищення зерек /для надання ріжучих властивостей/ електрохімічним розтравлюванням або електроерозійним руйнуванням.

Дослідження різноманітних схем шліфування струмопровідними кругами з накладенням електричного поля /пряма полярність, обернена полярність, багатопрохідна, глибинна/ показало, що основною схемою при чистській обробці деталей авіаційної техніки є багатопрохідна на прямій полярності. В цьому випадку забезпечується найвища точність геометричних розмірів, низький знос різучого інструмента /до 10%/ та висока продуктивність знімання припуску. Крім того, ця схема вимагає найменших витрат при модернізації звичайних шліфувальних верстатів під ЕАШ.

Важливе значення при виборі схеми шліфування має наявність гідродинамічних клинів, які утворюються нагромадженням розчину електроліту. Для досягнення найбільшої продуктивності кращою є схема, коли маємо гідродинамічні клини як перед кругом, так і за ним. При необхідності забезпечити високу точність обробки використовують схему шліфування, в якій відсутній задній гідродинамічний клин. Цю схему рекомендується використовувати на кінцевих проходах.

Однією з основних умов забезпечення проходу високої продуктивності й малої енергоємності ЕАШ є правильний вибір електроліту. При цьому слід вибирати хімічний склад електроліту, щоб він відповідав таким вимогам:

1. Електрохімічні реакції, які відбуваються на електродах, повинні бути оборотними, щоб усі катіони та аніони були сумісні з точки зору розчинності.
2. На катоді не повинно відбуватися осаду катіонів, тому необхідно, щоб вони мали за можливості максимальні негативні потенціали.
3. На аноді необхідно, щоб протікала реакція анодного розчинення. Для цього необхідно вибирати електроліти, які містять аніони з високим позитивним стандартним потенціалом, а також з урахуванням властивостей елементів, з яких складається оброблюваний сплав.
4. Для зниження гідравлічних втрат і швидкості процесів тепло- і масопереносу розчин електроліту повинен мати низьку кінематичну в'язкість та високу електропровідність.

Виходячи з наведеного в роботі аналізу, розроблено методику вибору електроліту та подано рекомендації щодо найбільш прийнятих електролітів для шліфування з накладенням електричного поля різноманітних сталей і сплавів.

Методика вибору електроліту зводиться до таких операцій:

1. Вибирається група аніонів з максимально можливим стандартним потенціалом.
2. Вибирається група катіонів з мінімально можливим стандартним потенціалом.
3. Оцінюється наявність хімічних сполук з вибраних груп аніонів і катіонів з легіруючими елементами оброблюваного металу.
4. З безлічі можливих сполук за п. 3 вибираємо ті, які швидко розчиняються.
5. З вибраних за п. 4 електролітів перевага надається електролітам з максимальною кількістю іонів, на які він дисоціює, і з найменшими їх валентностями, тобто бінарним, одновалентним.
6. З електролітів, вибраних за п. 5, залишаємо найбільш дешеві й нетоксичні.
7. Розчинник вибираємо з умови високого ступеня електролітичної дисоціації, діелектричної проникності й кінематичної в'язкості.

Виконана робота дозволила розробити технологічні процеси та впровадити їх на Запорізькому ВО "Мотор-Січ" при виготовленні лопаток турбін, виконаних з матеріалів в КС6К, КС6П, КС3ЛС, КС3ДК, ВХЛ /обробка замків, зигів, технологічних приливів, торців, зовнішнього діаметру облопаченого колеса турбіни/; при обробці сотових ущільнень, вставок, колекторів, втулок, виконаних з матеріалів ХН78Т, І2ХІ8Н9Т, а також на авіаремонтному заводі "Мотор" в м.Луцьку.

Проведено експериментальні дослідження і доказано доцільність впровадження шліфування з накладенням електричного поля під час обробки шліфових і зубчастих з'єднань; "ослодження" поверхонь, що зазнали експлуатаційних навантажень; вилучення ділянок з експлуатаційними uszkodженнями; обробки поверхонь з високоміцними та в'язкими покриттями, а також струмопровідних композиційних матеріалів.

У цих випадках досягається висока продуктивність, яка в 2...6 разів перебільшує традиційну, а також забезпечується потрібна згідно з технологічними умовами якість поверхневого шару.

Найбільш вагомими результатами впровадження одержані при обробці дискретних поверхонь /сотові ущільнення і зовнішні діаметри облопачених колес турбіни/. В цих випадках в схемах обробки за-

пропоновані додаткові електроди, які створюють передній гідродинамічний клин, що суттєво знижує зусилля різання та знос ріжучого інструмента і визначило ЕАШ як єдиний ефективний метод.

Ш. ВИСНОВКИ

1. В дисертації розроблені технологічні основи електрообробного шліфування /ЕАШ/ і вирішена важлива для авіаційної промисловості науково-технічна проблема забезпечення високої якості й продуктивності виготовлення та ремонту авіаційної техніки шляхом впровадження на фінішних операціях технологічного процесу механічної обробки шліфування з накладенням електричного поля замість звичайного шліфування, що дозволить поліпшити умови формування оброблюваної поверхні, підвищити її експлуатаційні якості, гарантуючи високу надійність виробів.

2. Проведено аналіз льотних пригод та передумов до них, який показує, що 25...40% відказів авіаційної техніки відбувається з причин конструктивно-виробничих недоліків, а значну їх частину становлять відкази, викликані втратою міцності через наявність припків і тріщин, які виникають при виконанні однієї з фінішних операцій - шліфування. Існуючі заходи боротьби з ними не ефективні. Перспективним напрямом у вирішенні даного питання, але недостатньо вивченим, є застосування шліфування з накладенням електричного поля, яке дозволяє значну частину припуску знімати за рахунок дії електричного поля, не вимагаючи сил, що породжують високу температуру в зоні обробки та структурні зміни.

3. Запропоновано новий підхід до описання картини формування поверхні при ЕАШ з урахуванням динаміки стружкоутворення, впливу електричного поля і гідродинаміки течії електроліту.

Теоретично встановлено та експериментально підтверджено, що формування поверхні при ЕАШ відбувається в трьох характерних зонах: в зоні переднього клина, зоні заднього клина і в зоні шліфування. У двох перших зонах знімання припуску здійснюється за рахунок анодного розчинення, а в зоні шліфування - внаслідок комбінованої дії електрофізикомеханічних явищ.

Одержано оригінальні рівняння, які відбивають фізичну сутність формування і дозволяють диференційовано визначити частки знімання за рахунок механічного різання і внаслідок дії електричного поля, а також пізнати граничні умови виникнення

ерозійних процесів. Це дає можливість грамотно регулювати електричні і механічні режими ЕАШ залежно від потрібних згідно з ТУ показників якості.

Встановлено критерії пропорціональності у вигляді приведеної глибини шліфування, який дозволяє оцінити кількісні та якісні характеристики електроабразивного шліфування за відомими даними досліджень звичайного шліфування. Це скорочує обсяг експериментальних досліджень при установленні режимів обробки нових марок оброблюваних сплавів з накладенням електричного поля.

4. Здійснено теоретичне та експериментальне обґрунтування впливу природи електроліту на продуктивність анодного розчинення при ЕАШ, що дозволило визначити критерії і розробити методику вибору електроліту. Встановлено, що електроліти, які дисоціюють на меншу кількість іонів і мають низьку валентність аніонних та катіонних груп, сприяють збільшенню продуктивності ЕАШ. Цьому сприяє також низька в'язкість, висока температура та діелектрична проникність розчинника. Найбільш ефективні, з точки зору продуктивності, водні розчини бінарних одно-одновалентних електролітів. Для інтенсифікації анодного процесу необхідно вибирати електроліти з високим стандартним потенціалом аніонної групи і низьким стандартним потенціалом катіонів, а для забезпечення низьких енергетичних витрат на електрохімічні реакції треба, щоб катіони електролітів були хімічно активніші за водень і складові компоненти оброблюваних сплавів.

Зроблено класифікацію схем подачі електроліту. Досліджено формування гідродинамічних клинів, їх розміри та вплив на кількісні показники продуктивності, точності, шорсткості. Визначено теоретично необхідні витрати електроліту.

5. Досліджено теплові явища в зоні шліфування з накладенням електричного поля. Доведено, що останнє в значній мірі впливає на температуру в зоні шліфування, яка зумовлює якісну структуру поверхневого шару.

Виведено рівняння для розрахунку температури в зоні шліфування з урахуванням параметрів обробки, зумовлених кінематикою різання абразивними зернами, гідродинамікою течії розчину електроліту, впливом електричного поля, яке дозволяє аналітично оцінити вплив режимів обробки на температуру в зоні шліфування і забезпечити її значення нижче температури структурних перетворень з метою виключення появи припків та шліфувальних тріщин.

6. Запропоновано новий метод розрахунку сил шліфування, заснований на тому, що при сталих режимах абразивні зерна знаходяться в контактi з оброблюваною поверхнею в такій мірі, яка визначається шорсткістю обробки R_a . Це дозволяє з високою мірою точності аналітично визначити сили шліфування з урахуванням міцнісних та якісних характеристик оброблюваної поверхні і шліфувального круга.

7. Досліджено основні показники якості і встановлено принципи його управління. Доведено, що новий метод обробки забезпечує високу точність /2...3 квалітет/ і низьку шорсткість / $R_a = 0,1...0,2$ мкм/; стискальні залишкові напруги та поверхню без структурних змін, що зрештою дозволяє одержати без додаткових технологічних операцій вищі експлуатаційні характеристики - довговічність, витривалість, корозійну стійкість. Це дозволяє рекомендувати використання ЕАШ як фінішної операції при обробці високоточних, високонавантажених деталей авіаційних конструкцій.

8. На підставі проведених досліджень автором розроблена технологія шліфування з накладенням електричного поля, подано науково обгрунтовані методи його застосування, встановлено технічні вимоги на дослідно-промислових установках, а також визначено методику вибору технологічних режимів обробки з їх оптимізацією, що забезпечує високу продуктивність та якість обробки.

Результати роботи реалізовані в промисловості, АРП МО, на початковому процесі. Досвід першого впровадження показав, що ЕАШ - високоефективний метод обробки, який дозволяє збільшити продуктивність праці на фінішних операціях механічної обробки в 2...6 разів і досягти високих показників якості поверхні, які забезпечують високу надійність.

9. Достовірність наукових положень підтверджується задовільним узгодженням натурних експериментів та аналітичних досліджень, а також промисловими випробуваннями на ВО "Мотор-Січ" /м.Запоріжжя/ при виготовленні та ремонті двигунів Д36, Д18Т, Д136, АІ25, авіаремонтному підприємстві "Мотор" /м.Луцьк/ на авіадвигуні АЛ-21Ф-3.

10. Основні результати дисертаційних досліджень можуть бути використані науково-дослідними та проектними організаціями при розробці технічних умов виготовлення, експлуатації і ремонту існуючих та перспективних виробів авіаційної техніки, а також підприємствами промисловості при створенні прогресивних технологічних процесів виготовлення й ремонту техніки.

IV. ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ ВИКЛАДЕНО
Й ОПУБЛІКОВАНО В ТАКИХ РОБОТАХ:

1. Бердник В.В., Безуглов Ю.Л., Шканов И.Н., Логинов В.З. Влияние электроабразивных методов обработки на усталостную прочность сталей.- В сб.: Применение электрохимической размерной обработки в машиностроении. Казань, ЦНТИ, 1970, с. 35...38.
2. Бердник В.В., Безуглов Ю.Л., Юнусов Ф.С. Выбор электролитов для электроабразивного шлифования.- В сб.: Применение электрохимической размерной обработки в машиностроении. Казань, ЦНТИ, 1970, с. 27...29.
3. Бердник В.В., Смоленцев В.П. Технологические особенности электроабразивного шлифования.- В сб.: Теория и практика размерной электрохимической обработки материалов. Уфа, Башкирское НТО машиностроительной промышленности, 1971, с. 71...73.
4. Бердник В.В., Смоленцев В.П. Гидродинамические явления при плоском электроабразивном шлифовании периферией круга.- Электронная обработка материалов, 1972, № 1, с. 23...27.
5. Бердник В.В. Чистота обработки при плоском электроабразивном шлифовании периферией круга.- В сб.: Технологические вопросы электрохимической обработки материалов. Казань, ЦНТИ, 1972, с. 122...124.
6. Бердник В.В., Смоленцев В.П. Методика выбора технологических режимов при плоском электроабразивном шлифовании периферией круга.- Электрофизические и электрохимические методы обработки, 1972, № 4, с. 17...25.
7. Бердник В.В., Смоленцев В.П. Электроабразивное шлифование цементированных сталей. Информационный листок № I23-73, Казань, ЦНТИ, 1973, с. 1...4.
8. Бердник В.В., Смоленцев В.П. Повышение точности формообразования при электроалмазной и электроабразивной обработке.- В сб.: Новое в алмазной, алмазно-электрической и электроэрозионной обработке металлов и сплавов. К.: Знание, 1976, с. 16.
9. Бердник В.В., Мамай А.В. Формообразование поверхности при плоском электрохимическом шлифовании.- В кн.: Размерная электрохимическая обработка деталей машин, Тула: Центральное Тульское областное правление НТО машпром, 1980, с. 77...80.
10. Бердник В.В. Расчет температурного поля обрабатываемой поверхности при электроабразивном шлифовании.- В кн.: Размерная

электрохимическая обработка деталей машин. Тула: Центральное Тульское областное правление НТО машпром, 1980, с. 87...90.

11. Бердник В.В. Оценка анодного растворения при различных схемах электроабразивного шлифования на прямой полярности.- В кн.: Электрохимическая размерная обработка крупногабаритных деталей из высокопрочных материалов, Казань, НИИТ, 1981, ДСП, с. 59...61.

12. Бердник В.В., Мамаи А.В. Электроабразивное шлифование. К.: Техника, 1981, -64 с.

13. Бердник В.В., Горшков Ю.Д. Электроабразивное шлифование при ремонте деталей и узлов авиационной техники. Выпуск 4947. М.: в/ч 75360, 1983. -72 с.

14. Бердник В.В. Шлифование токопроводящими кругами с наложением электрического поля. К.: Высшая школа, 1984, -124 с.

15. Бердник В.В. Перспективы применения электроабразивного шлифования при войсковом ремонте авиационной техники. Выпуск 5346, М.: в/ч 75360, 1985, с. 245...250.

16. Авторское свидетельство № 246498, 1986.

17. Бердник В.В. Эксплуатационные свойства и качество поверхности при шлифовании с наложением электрического поля.- В кн.: Поверхностный слой, точность и эксплуатационные свойства деталей машин и приборов. М.: Знание, 1986, с. 18...20.

18. Авторское свидетельство № 247612, 1987.

19. Бердник В.В., Челышев А.В. Модернизация шлифовальных станков для электроабразивного шлифования.- В сб.: Проблемы совершенствования ремонта авиационной техники. М.: МИИГА, 1990.

20. Бердник В.В., Челышев А.В. Повышение производительности и качества обработки поверхности электролитического хрома обработкой его электроалмазным шлифованием.- В сб.: Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов в авиационной промышленности. Казань: КАИ, 1991, с. 49...51.

Бердник

ABSTRACT

Berdnik V.V. Technological principles of electrical abrasive grinding under making and repair of aviation equipment.

Dissertation for degree of Doctor of Technical Sciences on speciality 05.03.07 - Processes of laser and physical technical processing. The defense will take place at NTUU of Kiev Polytechnical Institute, 1996, city of Kiev.

In dissertation the technological principles of electrical abrasive grinding are presented. The conditions of surface layer formation with taking into consideration electrical field influence, hydrodynamics of stream of electrolit as well as relative electrodes transference are determined. The analytical dependencies between productivity and parameters of processing are defined. Industrial implementation of the results into production was performed.

АННОТАЦИЯ

Бердник В.В. Технологические основы электроабразивного шлифования при изготовлении и ремонте авиационной техники, рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.03.07 - Процессы лазерной и физико-технической обработки. Защита состоится в НТУУ "Киевский политехнический институт", 1996 г., г.Киев.

В диссертационной работе представлены технологические основы электроабразивного шлифования. Определены условия формообразования поверхностного слоя с учетом влияния электрического поля, гидродинамики течения электролита, а также относительного перемещения электродов. Установлены аналитические зависимости между производительностью и параметрами обработки. Осуществлено промышленное внедрение результатов исследований в производство.

Ключові слова: електроабразивне шліфування, формоутворення; поверхневий шар.

453341

Ав 33.850

Підписано до друку 18.01.96. 1,86 друк. арк. Тир. 100.

Друкарня КІ ВПС Зам. 24