

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ  
СЕВАСТОПОЛЬСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ФАЛАЛЕЄВ АНДРІЙ ПАВЛОВИЧ

УДК 621.923: 621.90.47

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМБІНОВАНОГО ШЛІФУВАННЯ  
ДЕТАЛЕЙ З ТВЕРДОГО СПЛАВУ НА АВТОМАТИЗОВАНОМУ  
ОБЛАДНАННІ ОПТИМІЗАЦІЄЮ КЕРУВАННЯ

Спеціальність 05.13. 07 - Автоматизація технологічних процесів

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук



Севастополь - 1997



681.5  
Дисертацією є рукопис

Робота виконана на департаменті 'Систем автоматизованих виробництв' Севастопольського державного технічного університету

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор Новоселов Юрій Константинович директор департаменту САПР СевДТУ

Науковий консультант - кандидат технічних наук, доцент Братан Сергій Михайлович доцент департаменту САПР СевДТУ

Офіційні опоненти:

- доктор технічних наук, професор, Узунян Матвій Данилович, професор кафедри 'Різання матеріалів та режучі інструменти' Харківського державного політехнічного університету;
- кандидат технічних наук, доцент, Карлов Антон Георгієвич, директор департаменту 'Автоматизація технологічних процесів та виробництв' СевДТУ.

Провідна установа

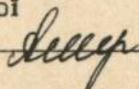
Чорноморський науково-дослідний інститут технології судобудування, Міністерство промисловості України, Севастополь.

Захист відбудеться 20 4 1997р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 11.03. 01. у Севастопольському державному технічному університеті за адресою: 335053, м. Севастополь, Стрелецька бухта, студентське містечко, корпус СевДТУ.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці СевДТУ.

Автореферат розісланий 20.10. 1997р.

Учений секретар спеціалізованої ради к. т. н., доцент

 А. Н. Шерешевський/

Однією з основних задач сучасного машинобудування є створення високоефективних технологічних процесів, що забезпечують отримання деталей із заданими параметрами якості при мінімальній собівартості обробки виробу та максимальній продуктивності процесу.

Задача особливо актуальна для фінішної обробки особливо тривких деталей (наприклад, з твердих сплавів), до яких подаються високі вимоги щодо точності, шорсткості, фізико-механічного стану поверхневого шару.

Досягнення заданих параметрів якості при високій продуктивності та низькій собівартості при обробці таких деталей можливо за рахунок використання комбінованих засобів.

Найбільш перспективним є алмазно-ерозійне шліфування (АЕШ), що позбавлене більшості недоліків, притаманних іншим засобам фінішної обробки, забезпечує високу точність формоутворення (4-7 квалітет) і низьку шорсткість поверхні ( $Ra=0,1$  мкм).

#### **АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ.**

На сучасному етапі розвитку виробництва в Україні та в умовах жорсткої конкуренції набуває великого значення не тільки просте вирішення технологічної задачі обробки матеріалу із заданою якістю, але виготовлення деталі необхідної якості з найменшими витратами. Високоефективне виробництво можливо на основі використання оптимального керування операцією, але існуючі дослідження не призводять комплексних рекомендацій щодо оптимального використання засобу АЕШ на автоматизованому обладнанні.

Актуальність теми підтверджується виконаними теоретичними та експериментальними дослідженнями, що доводять можливість підвищення продуктивності фінішної обробки твердих сплавів на автоматизованому обладнанні у 2-3 рази за рахунок оптимального керування алмазно-ерозійним шліфуванням.

#### **ЗВ'ЯЗОК РОБОТИ З НАУКОВИМИ ПРОГРАМАМИ, ПЛАНАМИ, ТЕМАМИ.**

Робота виконана на департаменті 'Системи автоматизованих виробництв' Севастопольського державного технічного університету і є складником комплексних наукових досліджень, проводимих департаментом у рамках наукової державної тематики "Розробка наукових основ оптимального керування при обробці заготівель на автоматизованому обладнанні" згідно наказу МО №37 от 13.02.97р.

#### **МЕТА І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.**

На підставі викладеного вище, метою роботи є підвищення

ефективності АЕШ деталей з твердого сплаву на автоматизованому обладнанні за рахунок оптимізації керування. Для досягнення мети, що сформулювалася у роботі, поставлені та вирішені наступні завдання:

1. Розглянути особливості управління процесом ерозійного шліфування алмазним інструментом, обґрунтована можливість та потреба утворення раціональних циклів обробки з урахуванням оптимального стану робочої поверхні інструменту.

2. Теоретично описана зміна стану робочої поверхні інструменту при алмазно-ерозійній обробці для будь-якого моменту часу його роботи.

3. Даний теоретичний опис формоутворення заготівлі на основі імовірнісного підходу, запропонована комплексна математична імітаційна модель, що дозволить прогнозувати продуктивність обробки та якість виробу.

4. Експериментально досліджена зміна вихідних параметрів системи при різноманітних режимах, проведена адаптація теоретичної моделі до реальних умов обробки.

5. Розроблена модель та опробовані у виробничих умовах алгоритми оптимального керування процесом обробки деталей при плоскому шліфуванні переферією кола, запропоновані методики розрахунку раціональних циклів операції, що забезпечують задану якість виробу при екстремальному значенні критерію якості.

#### **НАУКОВА НОВИЗНА ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ**

полягає в наступному:

1. Теоретична та експериментально обґрунтована можливість підвищення ефективності операції плоского алмазно-ерозійного шліфування шляхом оптимізації керування обробкою інструментом.

2. Запропонований єдиний підхід до моделювання механічного та ерозійного впливу на поверхню заготівлі та інструменту при алмазно-ерозійному шліфуванні на основі вдосконалення теорикоімовірнісного підходу.

3. Вперше розроблена комплексна імітаційна математична модель, що дозволить для будь-якого етапу процесу при різноманітних алгоритмах зміни режимів визначати фазові координати вектору станів технологічної системи, параметрів якості поверхні, що обробляється та вихідних параметрів процесу.

Модель побудована з урахуванням зміни стану робітничої поверхні інструменту, враховує стохастичний характер процесу, си-

лову взаємодію інструменту та заготівлі, дозволяє диференційовано оцінювати роль окремих чинників на параметри та якість деталей.

4. Вперше запропонована методика проектування раціональних циклів керування алмазно-ерозійним шліфуванням, що дозволяє мінімізувати собівартість обробки та підтримувати оптимальний стан ріжучого інструменту протягом всього періоду стійкості.

#### **ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ.**

Розглядувана наукова робота виконана на департаменті 'Систем автоматизованих виробництв' СевДТУ. Результати виконаних досліджень впроваджені на Мелітопольському моторному заводі з економічним ефектом 17187 руб./рік (жовтень 91р.) та опробовано на Керченському заводі 'Залив' з очікуваним економічним ефектом 4820 грн/р. Теоретичні та методичні розробки опрацьовані в учбовий процес на департаменті САПР СевДТУ.

#### **ОСОБИСТІЙ ВНЕСОК ЗДОБУВАЧА.**

Дана робота виконана автором самостійно, на основі особистих розробок та ідей. При використанні досліджень інших авторів зазначалося літературне джерело наукової інформації.

#### **АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ.**

Основні становища дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на Міжнародних і Всеукраїнських науково-технічних конференціях і семінарах:

- Автоматизація процесів механообробки і збірки в машиноталашуванні, Алушта, 1991р.
- Шляхи підвищення ефективності обробки матеріалів різанням в машинобудуванні, Санкт-петербург, 1991р.
- Високі технології в машинобудуванні: тенденції розвитку, менеджмент, маркетинг, Алушта, Інтерпартнер, ХДПУ, 1997р.
- Об'єднаний семінар кафедр 'Різання матеріалів і режучі інструменти' та 'Металоріжучі верстати і інструменти' Харківського державного політехнічного університету, 1997р.

#### **ПУБЛІКАЦІЇ.**

Результати дисертаційної роботи опубліковані у 7 (сеоми) роботах. 3(три) з них статті у збірках та брошурах, 2(дві) - авторське свідоцтво і Патент України, 2(дві) - тези доповідей науково-технічних конференцій.

#### **СТРУКТУРА І ОБСЯГ РОБОТИ.**

Дисертація складається з вступу, 5 розділів, списку літературних джерел і додатків. Вона містить 149 сторінок машинописного

тексту, 16 таблиць, 58 малюнків, список використаних джерел, включаючий 98 найменувань.

### ЗМІСТ.

Во вступу розкрита актуальність проблеми, проведена стисла анотація роботи.

В першому розділі даний стислий аналіз стану питання, зв'язаного з підвищенням ефективності засобів чистової та відділочної обробки важкообробляємих матеріалів.

Ці питання розглянуті в роботах Ю. Д. Аврутіна, Б. А. Артамонова, А. К. Байкалова, А. П. Гавріша, А. І. Грабченко, А. В. Корольова, С. Н. Корчака, В. І. Лавріненко, Б. Р. Лазаренко, Г. Б. Лурье, Ю. К. Новоселова, Л. Я. Попілова, Е. В. Рижова, Ф. В. Седикіна, М. Ф. Семко, М. Д. Узуняна, Л. Н. Філімонова, А. В. Якімова і ряду інших вітчизняних і зарубіжних вчених.

В виконаних дослідженнях розглянута фізична суттєвість процесів фінішної обробки, вказані гідності і недоліки обробки деталей машин механічним і електроерозійним шліфуванням, вказуються сучасні тенденції підвищення ефективності фінішних операцій важкообробляємих деталей.

В розділі показано, що питання оптимального керування на автоматизованому обладнанні ерозійним шліфуванням ще не розроблено, розглянуті переваги, що можуть бути отримані при автоматичному керуванні операцією з підтриманням профіля робітничої поверхні інструменту в оптимальному стані протягом всього циклу обробки.

В розділі розкритий сучасний стан питання і поставлені задачі досліджень. На основі критичного аналізу літературних даних визначені основні задачі роботи:

1. Розробити математичну модель операції алмазного ерозійного плоского шліфування, що враховує формоутворення заготівлі і зміна стану робітничої поверхні інструменту, дозволяє розраховувати стан параметрів системи протягом всієї операції. На основі отриманої моделі досліджувати можливість підвищення ефективності операції.

2. Провести перевірку адекватності математичної моделі реальним умовам шліфування.

3. Вибрати засіб оптимізації, розробити алгоритми керування і засіб розрахунку оптимальних циклів обробки.

4. Розробити алгоритми і програми для їхнього розрахунку.

5. Експериментально перевірити результати проектування оптимальної операції.

Другий розділ, присвячений аналітичному дослідженню, зміни параметрів стану процесу обробки.

Для рішення задач, поставлених в дисертаційній роботі, операція алмазного ерозійного шліфування розглянута як динамічна система, що є вектор керуючих і обурюючих дій. Особливістю такої системи є її внутрішня нестійкість, в процесі роботи відбувається зміна вектору параметрів стану системи до певної критичної межі, при якому експлуатація системи стає недоцільною.

Ряд параметрів системи вкрай інерційні і вимагають тривалого часу для їхньої зміни, тому найбільш ефективним при шліфуванні є імітаційне моделювання з метою вибору оптимальних режимів обробки. Щодо критеріїв ефективності в роботі прийняті наведені витрати на обробку і час виконання операції.

Для системи, що змінить свої параметри дискретно (від обороту до обороту, від проходу до проходу), залежності вектору станів і вихідних значень має вигляд:

$$S_{i(j)} = F[S_{i-1(j-1)}, x_{i-1}^n(j), w^n(\tau), u_{i-1}^n(j)] \quad (1)$$

$$Y_{i(j)} = \Phi[S_{i(j)}, x_{i-1}^n(j), w^n(\tau), u_{i-1}^n(j)] \quad (2)$$

де  $i$  - номер проходу;  $j$  - номер обороту кола;  $S$  - вектор параметрів стану системи;  $Y$  - вектор вихідних параметрів;  $F, \Phi$  - закони відображення;  $w^n(\tau)$  - вектор обурюючих дій;  $u^n(\tau)$  - вектор керуючих дій;  $x^n(\tau)$  - вектор вхідних параметрів.

Для автоматизованого обладнання без адаптивної системи керування необхідні жорсткі цикли керування, де параметри стану  $S_1$  і  $S_m$  повинні бути однакові. Зміни вхідних даних  $x_1$  системи компенсуються за рахунок керуючих дій  $u_m$ :

$$S_1 = F[S_0, x_1^n, w^n(\tau), u_1^n] = S_m = F[S_{m-1}, x_m^n, w^n(\tau), u_m^n] \quad (3)$$

Знаючи початковий  $X2$  і кінцевий стан об'єкту  $Y2$ , необхідно визначити таке оптимальне значення вектору станів системи (1) в допустимій області визначення, при якому критерій ефективності приймає екстремальне значення. Вибрати таке допустиме керування для об'єкту (2) при якому значення вектору станів (3) прагне або

рівно оптимальному.

Таким чином, підвищення ефективності операції досягається за рахунок визначення оптимального значення вектору станів системи на кожному етапі обробки, його реалізації і підтриманні.

Основна трудність полягає в створенні комплексної моделі, що дозволить оцінити раціональність всієї операції, а не окремих її елементів.

Безліч процесів, що відбуваються в зоні різання при шліфуванні, таких як, механічний вплив зерен, випадково розташованих на поверхні інструменту, і виникнення ерозійних розрядів між зв'язком інструменту і заготовлею носять стохастичний характер і можуть бути розглянуті як потоки випадкових подій. Зміну поверхні заготовки тоді характеризує повна імовірність вилучення будь-якої крапки її обсягу:

$$P(M \cdot \bar{E}) = 1 - P(\bar{M}) \cdot P(\bar{E}) \quad (4)$$

де  $P(\bar{M})$  - імовірність невилучення матеріалу в результаті дії абразивних зерен;  $P(\bar{E})$  - імовірність ерозійного неруйнування матеріалу;  $P(M \cdot \bar{E})$  - імовірність того, що розглядувану крапку заготовки буде усунено механічним впливом або ерозійним.

Імовірність вилучення матеріалу при механічному шліфуванні знайдена в роботах Новоселова Ю. К. Представляючи розташування лунок на поверхні заготовки найпростішим потоком отримаємо:

$$P(M \cdot \bar{E}) = 1 - \exp[-a_0(y, t) - a_{\text{мех}}(y, t) - a_{\text{ер}}(y, t)], \quad (5)$$

де  $a_{\text{мех}}(y, t)$  - показник, визначальний імовірність вилучення матеріалу від механічного впливу на рівні  $y$  через час  $t$  після входу в зону контакту, розраховується по залежностям Новоселова Ю. К.;  $a_0(y, t)$  - показник, визначальний імовірність вилучення на попередньому проході;  $a_{\text{ер}}(y, t)$  - показник, визначальний імовірність вилучення крапки заготовки від чинності ерозійних розрядів.

Показник  $a_{\text{ер}}(y, t)$  являє собою математичне очікуване сумарної ширини ерозійних лунок, минулих скрізь розглядуваний перетин (рис. 1):

$$a_{\text{ер}}(y) = \lambda_{\text{лун}} \cdot \bar{b}_{\text{ер}}(y) \quad (6)$$

де  $\lambda_{\text{лун}}$  - середня кількість лунок на одиницю довжини перетину заготовки;  $\bar{b}_{\text{ер}}(y)$  - ширина ерозійної лунки на рівні  $y$  заготовки.

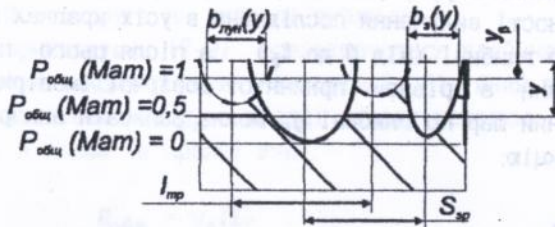


Рис. 1. Формування поверхні заготівлі

Кількість лунок на поверхні заготівлі знайдемо з затвердження, що розряди формуються передусім в місцях виникнення стружок. Ширина лунки одиничного розряду визначається при рішенні теплової задачі.

Підставляя знайдені значення в (6) і встановлюючи межі, виходячи з кінематики обробки отримаємо показник, визначальний імовірність ерозійного вилучення матеріалу заготівлі в крапці з координатою  $z$  зони контакту і на рівні  $y$ :

$$a_{\text{ер.з}}(y, z) = R \cdot C_r \cdot k \cdot \frac{V_k \pm V_n}{V_n} \cdot n_3 \cdot \int_0^{t(z) - y_B(z)} u^{z-1} \cdot du \cdot \int_0^L \sqrt{(h_{\text{л.з}} - y + y_B)} \cdot dz \quad (7)$$

де  $L$  - відстань від основної площини до пересічення рівня заготівлі з траекторією руху найбільш віддаленої від центру ріжучої кромки;  $t(z)$  - глибина різання найбільш виступаючим зерном в крапці  $z$  зони контакту;  $h_{\text{л.з}}$  - глибина ерозійної лунки;  $u$  - відстань від зовнішньої поверхні інструменту до розглядуваного перетину;  $V_k$ ,  $V_n$  - швидкість кола і швидкість заготівлі відповідно;  $n_3$  - середня кількість лунок на одиницю поверхні перетину заготівлі;  $R$  - показник, визначальний форму лунки;  $C_r$  - коефіцієнт, визначальний форму закону розподілу зерен в інструменті;

$k = k_c \cdot k_{\text{ер}}$  - коефіцієнт, що враховує кількість зерен без стружки і кількість стружок без розрядів;  $z$  - координата по довжині зони контакту;  $y_B(z)$  - висота усуненого матеріалу в крапці  $z$  зони контакту.

Інтегрування по  $z$  ускладнене тим, що для обчислення  $y_B$  в координаті  $z$  вимагається знання  $a_{\text{ер.з}}$  в що передує крапці зони контакту. Рішення рівняння (7) можливо як сума окремих інтегралів по  $z$ .

Для знаходження шару усуненого матеріалу необхідно знайти значення імовірності вилучення послідовно в усіх крапках перетину зони контакту по глибині (від 0 до  $t_{\phi}$ ), а після цього порівняти отримані величини з рівнем прийнятої довірчої імовірності  $\beta_M$ . Формально усунений шар по глибині  $y_B$  можна записати використовуючи одиничну функцію:

$$y_B(z) = \int_0^{t_{\phi}} \left( P_{обц}(y, z) - \beta_M \right) \cdot dy \quad (8)$$

де  $1(P_{обц}(y, z) - \beta_M)$  - одинична функція, що при досягненні  $P_{обц}(y, z)$  величини  $\beta_M$  приймає значення, рівне одиниці;  $P_{обц}(y, z)$  - сумарна імовірність вилучення матеріалу заготовлі на рівні  $y$  в перетині, що досліджується зони контакту;  $\beta_M$  - прийнятий рівень довірчої імовірності, (0.8 - 0.99).

Для обчислення (7), (8) було змодельоване утворення одиначної ерозійної лунки глибиною  $h_{л.з}$ . При розрахунку зараховувалося, що:

- під чинністю теплового потоку в каналі розряду матеріал плавиться і по мірі плавлення викидається за рахунок парових струмів;

- розряд під час свого існування ковзає по поверхні заготовлі і кола зі швидкостями  $V_{ск.з}$ ,  $V_{ск.кр}$ ;

- на плавлення заготовлі іде лише частина енергії розряду, що характеризується коефіцієнтом  $\beta$ ;

- розряд формується в момент генерації стружки абразивним зерном і припиняється при виході з зони контакту або по закінченню імпульса генератора;

$$h_{л.з} = \frac{\beta \cdot z_n \cdot U^2 \cdot \pi \cdot k_r^2}{\rho_z \cdot [c_T \cdot (\theta_{пл} - \theta_0) + L_{пл} + 0.5 \cdot V_p^2]} \times \frac{1}{(\pi \cdot k_r^2 + 2 \cdot V_{ск.з} \cdot r_{к.ср}) \cdot (z^2/D_{св} + x_{ск} - t_{\phi} + y_B)} \quad (9)$$

де  $V_p$  - швидкість розльота часток;  $c_T$  - питома теплопровідність заготовлі;  $L_{пл}$  - теплота плавлення електрода;  $\theta_0$  - початкова температура електрода;  $\theta_{пл}$  - температура плавлення електрода;  $\rho_z$  - щільність заготовлі;  $V_{ск.з}$  - швидкість ковзання плями розряду

по заготівлі;  $r_k$  - радіус каналу розряду;  $z_{\Pi}$  - електропровідність плазми;  $U$  - напруга на джерелі живлення.

Використовуючи (7-9) розраховується глибина усуненого матеріалу в будь-якому перетині заготівлі. Лінійний зйом після проходження визначається як  $y_{\beta}$  в кінці виходу перетину заготівлі з зони контакту з колом (в кінці  $z=L$ ):

$$Q_{обд} = y_{\beta}(L) \quad (10)$$

Імовірнісна модель руйнування дозволяє також визначити шорсткість деталі. Вона представляється як відносна опорна довжина профіля  $t_p(y)$  на будь-якому рівні  $y$ :

$$t_p(y) = P(y, L) \quad (11)$$

і висота шару в якому розподілена шорсткість  $R_{max}$ :

$$R_{max} = t_{\phi} - Q_{обд} \quad (12)$$

Для оптимізації процесу шлифування необхідна комплексна модель, що дозволить визначити як параметри деталі, так і інструменту. Інструмент на струмопровідній зв'язці наражається з боку еозійних розрядів теплового впливу, викликаючого вилучення зв'язального матеріалу і висування зерен робітничої поверхні. Цей ефект перешкоджає засмичуванню інструменту і дозволяє підтримувати його ріжучу спроможність. Інтенсивне руйнування зв'язки призводить до підвищеного ізнос кола і зниження ефективності операції.

Використання імовірнісного підходу дозволило описати зміну стану поверхні інструменту, при описі враховувалося, що:

- Розряд ковзає по поверхні зв'язки від його утворення і до припинення чинності;
- Зв'язка займає лише частину поверхні інструменту;
- Розташування лунок на поверхні після великої кількості оборотів являє собою найпростіший потік випадкових подій;
- Механізм утворення лунки в зв'язці подібний руйнуванню заготівлі і залежить тільки від енергії, що надійшла і властивостей матеріалу.

Для розрахунку глибини руйнованого шару інструменту було от-

римане вираження імовірності вилучення зв'язки  $P_{CB}(q, n_k)$  на будь-якому рівні  $q$  після  $n_k$  оборотів кола:

$$a_{CB}(q, n_k) = \sum_{i=1}^{n_k} \frac{k_{зр} \cdot k_c \cdot n_{з} \cdot C_r \cdot R_1 \cdot \mu_{CB} \cdot V_{СК.К} \cdot \tau_D}{ae} \cdot t_{\phi}^{ae \times} \quad (13)$$

$$\times \sqrt{\frac{\beta_{CB} \cdot z_{п} \cdot \pi \cdot k_r^2 \cdot U^2}{M_1 \cdot (\pi \cdot k_r^2 + 2 \cdot V_{СК.К} \cdot r_{К.СР}) \cdot (x_{СК} - t_{\phi} + a_{обн})}} - (q - a_B)$$

$$M_1 = \rho_{CB} \cdot [c_{т.СВ} \cdot (\theta_{пл.СВ} - \theta_{0.СВ}) + L_{пл.СВ} + 0.5 \cdot V_D^2],$$

$$P_{CB}(q, n_k) = 1 - \exp[-a_{CB}(q, n_k)], \quad (14)$$

де  $c_{т.СВ}$  - питома теплопровідність зв'язки;  $L_{пл.СВ}$  - теплота плавлення зв'язки;  $\theta_{0.СВ}$ ,  $\theta_{пл.СВ}$  - початкова температура і температура плавлення зв'язки;  $\rho_{CB}$  - щільність зв'язки;  $\beta_{CB}$  - доля енергії розряду, що надходить на зв'язку.

Розрахунок висоти профіля робітничої поверхні інструменту  $\delta_{CB}(n_k)$  після  $n_k$  оборотів здійснювався на підставі виразів (5-14) і розмірного аналізу (рис. 2):

$$\delta_{CB}(n_k) = x_{СК} - \sum_{i=1}^{n_k} (h_{зi} - a_{СВ.зpi}), \quad (15)$$

де  $a_{СВ.зpi}$  - висота шару усуненої зв'язки на  $i$ -м обороті;  $h_{зi}$  - ізнас

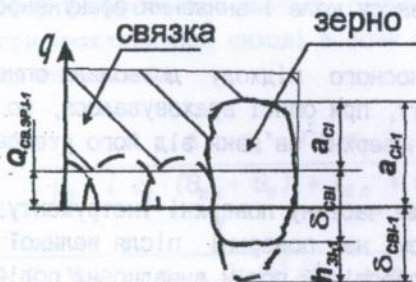


Рис. 2. Динаміка ізнасу робітничого шару інструменту виступаючого зерна визначається з роботи Новоселова Ю. К. на підставі імовірності контакту з матеріалом  $1-P_{обн}(y, z)$ ;  $x_{СК}$  - ви-

сота випередження зерна з зв'язці після виправлення інструменту визначається з робіт Королева А. В.

Глибина ув'язнення зерна  $a_c$  дасть можливість розрахувати силу закріплення одиничного зерна і визначити момент його випадіння. В цілому моделі, розроблені в роботі, дозволяють оцінювати поведінку всіх елементів системи заготівля-інструмент, враховувати ступінь впливу окремих чинників на поведінку процесу обробки, на вихідні параметри операції і імітувати алмазно-ерозійне шліфування при різноманітних алгоритмах зміни керуючих дій.

Запропоновані моделі можуть бути використані для моделювання еозійного руйнування при обробці периферією і торцем кола на операціях плоского і врізного шліфування.

Для здійснення розрахунків необхідно визначити розподіл енергії розряду між електродами  $\beta_{св}$ ,  $\beta_3$ . Ці залежності можуть бути отримані шляхом експериментальних досліджень.

В третьому розділі, вироблені експериментальні дослідження для знаходження залежностей відносно ерозійної стійкості електродів різноманітних матеріалів на прямій і зворотній полярності при різноманітній тривалості імпульсів генератора. Це й дозволило оцінити розподіл між електродами частини енергії, що іде на плавлення і випаровування матеріалу.

Вивчений вплив технологічної напруги, швидкості кола, швидкості подачі заготівлі, глибини різання і часу обробки на швидкість і величину лінійного зйому, висоту шорсткості, висоту профіля робітничої поверхні інструменту, радіальний ізнос і сили різання. Експерименти проводилися по методиці дробового факторного експерименту з застосуванням стандартних алгоритмів оцінки.

По результатах експериментів, адаптована до реальних умов, теоретична модель шляхом вибору оптимальних значень рівнів довірчої імовірності вилучення матеріалу заготівлі і зв'язки  $\beta_{заг} = 0,91$ ,  $\beta_{св} = 0,86$ . При їхньому використанні в розрахунках отримана найбільша адекватність моделей, оцінка яких вироблялася по критерію Фішера. При дослідженні точності моделі використовувались також результати експериментів інших авторів. Найбільша відносна помилка результатів - 14% дозволяє використати теоретичні моделі для імітації процесу алмазно-ерозійного шліфування з метою оптимізації операції.

У четвертому розділі, описана методика розрахунку раціональних циклів управління обробкою, що забезпечують отримання заданої

якості виробів при максимальній продуктивності або мінімальній собівартості процесу. На основі отриманих в другому і третьому розділах залежностей проаналізовані особливості побудови функціоналів, зміна фазових координат, що описують об'єкт, технічні обмеження та критерій ефективності для окремих підсистем і системи в цілому, запропонована динамічна оптимізаційна модель, наведена в таблиці 1.

Таблиця 1

Порушення задачі раціонального управління процесом.

Назва залежн.	Залежності математичної моделі
Зміни вектора стану системи	$H_{деті} = H_{деті-1} - Q_{обці}$ $R_{махі} = t_{\phi i} - Q_{обці}$ $D_{крj} = D_{крj-1} - 2 \cdot h_{эj-1}$ $\delta_{свj-1} = \delta_{свj} - (h_{эj} - a_{св.зрj})$ $h_{э} = 2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau \cdot \frac{T - T_{сп}}{T} \cdot \ln \frac{T - T_{сп}}{2 \cdot T_{сп}}}$ $P_i = P_{i-1} - Q_{обці}$
технічні обмеження	$0 < t_{\phi i} < \delta_{сві} ; \quad h_{эi} < h_{э.доп} + P_i ;$ $P_{ген} < I_{max}$ $U < \frac{P_{ген}}{I_{max}} ; \quad V_{и} < V_{и.мах}$ $P < A_{мах} \cdot j_{ст} ; \quad Ra_i < Ra_{доп} + P_i ;$ $R_{махі} < R_{махдоп} + P_i ;$ $\delta_{свj} > \delta_{св.доп} ;$
критерії оптимізації	$C_{шт.к} = R \cdot t_{шт.к} + q \cdot P \cdot B \cdot L \cdot C_{и}$ $P \cdot B \cdot L$ $t_{шт.к} = \frac{P \cdot B \cdot L}{Q_{обці}} (1 + K_{п}) + T_{уст} + t_{пер.кр}$

$H_{дет}$  - висота деталі;  $D_{кр}$  - діаметр кола;  $h_{ц}$  - дефектний шар деталі;  $T_{сш}$  - температура фазових перетворень;  $A_{max}$  - допустима погрішність виготовлення;  $P$  - сила різання;  $C_{шт.к}$  - собівартість виготовлення однієї деталі;  $t_{шт.к}$  - час виготовлення деталі.

Критерії оптимізації є функціями від керуючих дій і параметрів стану системи:

$$K = G(S, F(U, V_k, V_n, S_n, f_{ген})) , \quad (16)$$

де  $S$  - вектор стану системи;  $K$  - критерій оптимальності.

Дослідження функцій  $F$  та  $G$  (16) показало, що  $F$  нелінійна і не має локальних екстремумів, а  $G$  нелінійна і має локальні екстремуми. Для оптимізації функції  $F$  був використаний засіб прямого пошуку - покоординатного спуску. Вектор стану системи характеризували параметром  $\delta_{св}$ . Для оптимізації функції  $G$  знаходили екстремуми функції  $F$  при послідовно змінних значеннях  $\delta_{св}$ . Оптимізація була проведена за допомогою розроблених програм до ЕОМ.

Грунтуючись на отриманій моделі, результатах оптимізації і аналізі існуючих устаткувальних систем для використання операції алмазно-ерозійного шліфування були запропоновані декілька алгоритмів керування процесом обробки деталей, що використовують часткову і повну оптимізацію операції.

$$1. \delta_{св.i} > \delta_{св.i-1} ,$$

де  $\delta_{св.i-1}$ ,  $\delta_{св.i}$  - значення виліт зерен на попередньому і наступних оборотах кола відповідно.

$$2. \delta_{св.i} = \delta_{св.i-1}$$

$$3. \delta_{св.i} = \delta_{св.опт} - \text{найбільш оптимальний стан.}$$

1,2 - алгоритми, які вже існують на виробництві, 3- що запропоновані у цій роботі.

Проведені дослідження показують, що в випадку малих припусків на обробку і нетривалих циклів алгоритм 3 вироджується в 2, що можна розглядати як приватний випадок.

Запропоновані методики і алгоритми дозволили виробити розрахунки високопродуктивних циклів алмазно-ерозійного шліфування деталей з твердого сплаву з урахуванням можливого рівня оптимізації обробки.

В п'ятому розділі, викладені експериментальні дослідження, наведені дані практичного впровадження основних положень роботи в виробництво. Розроблена математична модель і методики розрахунку

покладені в основу програми для автоматизованої розробки керуючих циклів операції плоского зовнішнього алмазно-ерозійного шліфування. Алгоритм раціонального управління процесом, описаний в четвертому розділі, і програма аналітичного розрахунку високопродуктивних циклів опробовані на Мелітопольському моторному заводі і Керченському судобудівному заводі 'Залив'.

Іспити запропонованого програмного забезпечення проводили при шліфуванні матриць вирубних штампів. У порівнянні з обробкою по алгоритму 2 собівартість знизилася в 1.2 раза і в 2 рази у порівнянні з 1.

Виконані експериментальні дослідження підтвердили високу ефективність розроблених циклів, а також можливість широкого застосування запропонованих методик в автоматизованому виробництві. Очікуваний економічний ефект на один верстат склав 4820 грн./рік.

#### ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ.

1. Доведена можливість підвищення ефективності обробки прецизійних виробів в 1.2-3 рази за рахунок обробки на автоматизованому обладнанні по раціональним циклам.

2. Досліджений механізм вилучення припуску при плоскому алмазно-ерозійному шліфуванні периферії кола як чинника, визначального продуктивності обробки.

3. Досліджений механізм формування робітничої поверхні алмазного інструменту на струмопровідному зв'язку і динаміка його іносу при АЕШ.

4. Розроблена комплексна імітаційна модель АЕШ, що дозволить для будь-якого проходу при різноманітних алгоритмах зміни режимів визначати фазові координати вектору станів технологічної системи (взаємне розташування інструменту та заготовлі, параметри зони контакту 'інструмент-заготівля', ріжучу спроможність кола), параметри якості обробленої поверхні (шорсткість, розмір, фізико-механічний стан поверхневого шару), вихідні параметри процесу (швидкість зйому припуску, інос інструменту, питомий видаток алмазів). Комплексна модель побудована з урахуванням ерозійного вилучення матеріалу і механічного різання, враховуючи стохастичний характер процесів, що протікають

В зоні різання, зумовлених випадковою будівлею інструменту.

При описі ерозійної і механічної дій на поверхню заготовлі і кола збережений „диний підхід на основі теорії імовірності і масового обслуговування, що дозволило адекватно описати вза„модію інструменту і заготовлі. Структура і склад моделі дозволяють використати „ при моделюванні АЕШ різноманітних матеріалів як перифері„ю кола, так і торцем.

5. Аналіз отриманих залежностей показав, що ефективність обробки залежить від характеристики і станів інструменту, режимів обробки, параметрів обладнання. Модель дозволя„ вирішувати задачі автоматизації керування процесом з урахуванням найбільш важливих технологічних чинників. При перевірці адекватності залежностей реального процесу встановлено, що найбільш істотними параметрами, визначальними ефективність обробки, „ висота робітничого профіля ріжучої поверхні інструменту, технологічна напруга, подача шліфувальної бабки, швидкість переміщення стола, тривалість імпульсів генератора і полярність обробки, що дозволя„ ох використати при параметричній оптимізації процесу АЕШ перифері„ю кола.

6. Запропонована методика розрахунку циклів керування процесом АЕШ забезпечу„ отримання виробів заданої якості при мінімальних витратах або максимальній продуктивності. Методика заснована на використанні динамічної моделі і засобу покоординатного спуску.

7. В результаті проведених досліджень отримані високоєфективні цикли обробки прецизійних деталей, що забезпечують задану якість виробів при мінімальних витратах або максимальній продуктивності. Результати виконаних досліджень впроваджені на Мелітопольському моторному заводі з економічним ефектом 17187 карбованців в рік (1991 р.) та опробувані на ОАО 'Судобудівний завод 'Залив' з очікуваним економічним ефектом 4820 грн/рік (1996 р.).

#### СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ

По результатам виконаних теоретичних і експериментальних досліджень опубліковане:

1. Новоселов Ю.К., Фалалеев А.П., Петров Д.В.  
Механизм износа зерен при анодно-механическом шлифовании// Вестник СевГТУ, Моделирование и эксперимент в инженерных задачах, 1995, №1, с 59-62.
2. Фалалеев А.П.  
Моделирование износа алмазного инструмента при комбиниро-

- ванном шлифовании твердых сплавов с целью оптимизации расхода алмазосодержащего слоя рабочей поверхности круга// Оптимизация производственных процессов :Научно-технический сборник, Выпуск 5, Севастополь, 1997г., с. 130-136
3. Братан С. М., Фалалеев А. П.  
Моделирование распределения зерен в рабочем слое абразивного инструмента// СФРДЭНТП общества знание "Украины", СВВМИУ, СПИ, " Интенсификация машиностроительного производства. -1993г. /Брошюра/
  4. Новоселов Ю. К., Харченко А. О., Харчин В. Л., Братан С. М., Сопин П. К., Фалалеев А. П. Способ плоского шлифования /А.С. №1796414 от 08.10.92г.
  5. Харченко А. О., Торлин С. В., Фалалеев А. П. Многооперационный верстат/Патент Украины №... (рішення про надання по заявці 94053269 від 16.05.97р.
  6. Сопин П. К., Харчин: В. Л., Фалалеев А. П.  
Расчет режимов алмазноэрозионного шлифования для станков с ЧПУ // Автоматизация процессов механообработки и сборки в машино- и приборостроении, Общество "Знание" Украины. РДЭНТП. - 1991г. /Тезисы докладов научно-технического семинара
  7. Новоселов Ю. К., Сопин П. К., Братан С. М., Фалалеев А. П.  
Автоматизация процессов абразивной и комбинированной обработки с обеспечением требуемого качества деталей// Пути повышения эффективности обработки материалов резанием в машиностроении, ЛДНТП. - 1991г. /Тезисы докладов научно-технического семинара/

Фалалеев А. П. Підвищення ефективності комбінованого шліфування деталей з твёрдого сплаву на автоматизованому обладнанні оптимізацією керування. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.07 - автоматизація технологічних процесів. - Севастопольський державний технічний університет, Севастополь, 1997.

Дисертацію присвячено питанням оптимального керування алмазно-ерозійним шліфуванням на основі розробки комплексної математичної моделі операції. Щодо опису формоутворення поверхні заготовів та алмазного інструменту в праці використовується теоретико-імовірносний підхід. Оптимізація створеної моделі дозволила запропонувати нові методики розрахунку високопродуктивних циклів шліфування на автоматизованому обладнанні. Основні результати роботи знайшли промислове застосування у створенні оптимальних циклів обробки для автоматизованих систем.

Ключові слова: алмазно-ерозійне шліфування, імовірносний підхід, оптимальне керування, автоматизація.

Фалалеев А. П. Повышение эффективности комбинированного шлифования деталей их твердого сплава на автоматизированном оборудовании оптимизацией управления. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 - автоматизация технологических процессов. - Севастопольский государственный технический университет, Севастополь, 1997.

Диссертация посвящена вопросам оптимального управления алмазно-эрозионным шлифованием на основе разработки комплексной математической модели операции. Для описания формообразования заготовки и алмазного инструмента в процессе работы используется теоретико-вероятностный подход. Оптимизация созданной модели позволила предложить новые методики расчета высокопроизводительных циклов шлифования на автоматизированном оборудовании. Основные результаты работы нашли промышленное применение в создании оптимальных циклов обработки для автоматизированных систем.

Ключевые слова: алмазно-эрозионное шлифование, вероятностный подход, оптимальное управление, автоматизация.

AB 38.709

Falaleev A.P. The efficiency of hard alloys details on automatic processing. Manuscript.

Thesis for a candidate of technical science degree by speciality 05.13.07 - automatization of technological processes. The Sevastopol state technical universitete, Sevastopol, 1997.

The dissertation is devoted to dealing frontier topics that are connected with optimal management in diamond-erosive grinding based on the complex mathematical model of process developing. For the workpiece and diamond tool condition description the theoretical-probable method was used. Optimization of such models allows to propose new methods of high efficiency cycles for automatization equipment creation.

The results of the work have found as industrial utility in the optimal cycles for automatization system design.

Key words: diamond-erosive grinding, probable method, optimal management, automatization.

Подписано в печать 17.10.97г.

Формат бумаги 60x84 1/16

Объем 1 уч. изд. л. Заказ

Тираж 100 экз.

Отпечатано в НПЦ "Экоси-Гидрофизика"

335000, Севастополь, ул. Ленина 28