

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Ковальчук Олександр Миколайович**

УДК 621.923

**ОПТИМІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ І ПАРАМЕТРІВ ОПЕРАЦІЙ  
ШЛІФУВАННЯ ВІДПОВІДАЛЬНИХ ВАЛІВ ПРИВОДІВ  
ШАХТНИХ КОНВЕЄРІВ**

Спеціальність 05.02.08 – технологія машинобудування

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса – 2008

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в ВАТ Харківський машинобудівний завод “Світло шахтаря” Міністерства промислової політики України (м. Харків).

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Новіков Федір Васильович,**  
Харківський національний економічний університет,  
професор кафедри “Техніка і технології” (м. Харків).

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Якімов Олександр Васильович,**  
Одеський національний політехнічний університет,  
професор кафедри “Технологія машинобудування”  
(м. Одеса);

кандидат технічних наук  
**Ліщенко Наталя Володимирівна,**  
Одеська національна академія харчових технологій,  
асистент кафедри “Фізика та матеріалознавство”  
(м. Одеса).

Захист відбудеться “18” квітня 2008 р. о 14.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.052.02 в Одеському національному політехнічному університеті за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1.

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

Автореферат розісланий “14 ” березня 2008 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Оборський Г.О.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** На машинобудівних підприємствах параметри точності і якості обробки деталей машин традиційно формуються на операціях остаточного шліфування. Тому вдосконалювання даних операцій має велике наукове й практичне значення. В значній мірі це відноситься до шліфування відповідальних деталей типу вал (східчастих валів, валів–шестірней й інших) приводів шахтних конвеєрів – планетарних редукторів потужністю більше 200 кВт, що виготовляються з низьковуглецевих легованих сталей, загартованих до твердості HRC 62–65. Дані деталі працюють в умовах значних навантажень і до них пред'являються високі вимоги по точності і якості обробки. Наприклад, точність розміру вала діаметром 200 мм – у межах 0,002...0,008 мм, а шорсткість обробки –  $R_a=0,2$  мкм. Це викликає значні труднощі їхньої обробки як з погляду стабільного забезпечення точності й шорсткості, так і збільшення продуктивності обробки, оскільки застосовувані операції круглого урізного й поздовжнього шліфування характеризуються досить високою трудомісткістю.

Підвищити точність, якість і продуктивність обробки можна, як відомо, за рахунок застосування автоматизованого технологічного обладнання й оптимальних за структурою й параметрами операцій круглого зовнішнього шліфування. При цьому важливо знати технологічні можливості операцій шліфування, мати у своєму розпорядженні математичні моделі основних параметрів обробки, що дозволить науково обґрунтовано вибирати оптимальний маршрут обробки й параметри операцій. Однак, на практиці рішення оптимізаційних технологічних задач як і раніше виконується на основі емпіричних залежностей, отриманих для цілком конкретних умов обробки, що не дає загального уявлення про технологічні можливості операцій шліфування по підвищенню точності, якості й продуктивності обробки. У зв'язку із цим у роботі вирішується важливе й актуальне науково-практичне завдання розробки і впровадження ефективних операцій круглого зовнішнього шліфування відповідальних валів приводів шахтних конвеєрів на основі оптимізації їхньої структури й параметрів за критерієм найменшого основного часу обробки з урахуванням обмежень по точності й шорсткості оброблюваної поверхні.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України № 516 від 18.04.2006 р. “Державна програма розвитку машинобудування на період 2006-2011 р.р.” і тематичних планів робіт ВАТ Харківський машинобудівний завод “Світло шахтаря”.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є підвищення ефективності операцій круглого зовнішнього шліфування відповідальних валів приводів шахтних конвеєрів на основі оптимізації їхньої структури й параметрів за критерієм найменшого основного часу обробки з урахуванням обмежень по точності й шорсткості оброблюваної поверхні.

Для досягнення даної мети в роботі поставлені наступні задачі:

– розробити новий теоретичний підхід до оптимізації структури й параметрів операцій круглого зовнішнього шліфування за критерієм найменшого основного

часу обробки з урахуванням обмеження по точності розміру оброблюваної поверхні;

– на основі розробленого теоретичного підходу визначити оптимальну кількість переходів, значення швидкостей подач і величин припусків, що знімаються, на кожному переході, вибрати й обґрунтувати оптимальні за структурою операції круглого зовнішнього шліфування;

– розробити математичну модель визначення параметрів точності обробки на операціях круглого зовнішнього шліфування на основі урахування балансу переміщень у технологічній системі;

– провести експериментальні дослідження параметрів операцій круглого зовнішнього урізного й поздовжнього шліфування для оцінки вірогідності отриманих теоретичних рішень і виявлення потенційних можливостей розглянутих операцій шліфування;

– провести теоретичні й експериментальні дослідження з обґрунтування умов зменшення шорсткості обробки на операціях круглого зовнішнього шліфування;

– розробити й впровадити у виробництво ефективні операції круглого зовнішнього шліфування відповідальних валів приводів шахтних конвеєрів.

*Об'єкт дослідження* – операції круглого зовнішнього урізного й поздовжнього шліфування відповідальних валів приводів шахтних конвеєрів.

*Предмет дослідження* – оптимізація структури й параметрів операцій круглого зовнішнього урізного й поздовжнього шліфування відповідальних валів приводів шахтних конвеєрів за критерієм найменшого основного часу обробки з урахуванням обмежень по точності і шорсткості оброблюваної поверхні.

*Методи дослідження.* Застосовувалися теоретичні методи, що базуються на фундаментальних положеннях технології машинобудування, теорії різання матеріалів, математичного аналізу, опору матеріалів і теорії пружності; математичне моделювання; експериментальні методи із застосуванням профілографа-профілометра, твердоміра Роквелла, мікроскопа ММР-4.

**Наукова новизна отриманих результатів.** 1. Розроблено новий теоретичний підхід до оптимізації структури й параметрів операцій круглого зовнішнього шліфування за критерієм найменшого основного часу обробки з урахуванням обмеження по точності розміру оброблюваної поверхні, що дозволив визначити оптимальну кількість переходів, значення швидкостей подач і величин припусків, що знімаються на кожному переході, й на цій основі виявити, обґрунтувати і реалізувати нові технологічні можливості операцій круглого урізного й поздовжнього шліфування відповідальних валів приводів шахтних конвеєрів.

2. Визначена оптимальна за структурою й параметрами операція круглого урізного шліфування із дискретно зменшуваною у часі швидкістю радіальної подачі, у якій зміна по переходах швидкості радіальної подачі підкоряється закону убутної геометричної прогресії, а кількість переходів встановлюється рівною натуральному логарифму від сумарного уточнення.

3. Теоретично доведена можливість суттєвого зменшення основного часу обробки на операції круглого урізного шліфування за рахунок переходу від дискретно до безупинно зменшуваної у часі за експонентним законом швидкості радіальної подачі.

4. Теоретично обґрунтована оптимальна за структурою операція круглого поздовжнього шліфування, що виконується у два переходи (чорнове шліфування й виходжування) з однаковою максимально досяжною на верстаті швидкістю поздовжньої подачі й із глибиною шліфування на першому переході, рівною величині припуску, що знімається.

5. Теоретично обґрунтована й експериментально доведена можливість значного підвищення ефективності операцій круглого зовнішнього шліфування валів за рахунок застосування схеми шліфування послідовними врізаннями – із радіальною подачею уступами, що характеризується найменшим основним часом обробки при забезпеченні заданої точності розміру оброблюваної поверхні.

6. Розроблено математичну модель визначення параметрів точності обробки на операції круглого урізного шліфування з урахуванням балансу переміщень у технологічній системі й на її основі обґрунтовані можливості підвищення точності й продуктивності обробки за рахунок зменшення постійної часу утворення пружного переміщення в технологічній системі.

**Практична значимість отриманих результатів** полягає в тому, що на основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень розроблені ефективні операції круглого зовнішнього шліфування відповідальних валів приводів шахтних конвеєрів, що дозволяють підвищити продуктивність і знизити собівартість обробки при забезпеченні необхідної точності й шорсткості оброблених поверхонь. Розроблені операції шліфування впроваджені у ВАТ Харківський машинобудівний завод “Світло шахтаря” із загальним економічним ефектом понад 145 тисяч гривень у рік. Результати теоретичних і експериментальних досліджень роботи використовуються в навчальному процесі на кафедрі “Техніка і технології” Харківського національного економічного університету.

**Особистий внесок здобувача** полягає в тому, що їм розроблений теоретичний підхід до оптимізації структури і параметрів операцій круглого зовнішнього шліфування за критерієм найменшого основного часу обробки з урахуванням обмеження по точності розміру оброблюваної поверхні. Визначено оптимальну кількість переходів і значення швидкостей подач і величин припусків на кожному переході, обґрунтовані оптимальні за структурою операції круглого урізного й поздовжнього шліфування. Зроблено експериментальну оцінку вірогідності отриманих теоретичних рішень. Визначено умови зменшення шорсткості обробки. Розроблені і впроваджені у виробництво ефективні операції круглого зовнішнього шліфування відповідальних валів приводів шахтних конвеєрів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертації доповідалися й обговорювалися на X–XIII Міжнародних науково-технічних конференціях “Фізичні та комп'ютерні технології”, м. Харків, 2005 – 2007 р.р.; XIV Міжнародному науково-технічному семінарі “Високі технології: тенденції розвитку”, м. Харків – м. Алушта, 2005р.; XIII–XV Міжнародних науково-практичних конференціях “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я”, м. Харків, 2005–2007р.р.; III і IV Міжнародних науково-технічних конференціях “Сучасні інструментальні системи, інформаційні технології та інновації”, м. Курськ, Росія, 2005, 2006р.р. Роботу в повному обсязі заслухано та схвалено на розширеному науковому семінарі кафедри “Технологія машинобудування” Оде-

ського національного політехнічного університету (2007р.) та науково-технічному семінарі в ВАТ Харківський машинобудівний завод “Світло шахтаря” (2007р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 17 наукових працях, у тому числі 9 наукових праць у виданнях, рекомендованих ВАК України, та 2 патенти України.

**Структура й обсяг дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків і двох додатків. Повний обсяг дисертаційної роботи становить 204 сторінки, з них 88 ілюстрацій на 38 сторінках; 16 таблиць за текстом; 161 найменування використаних літературних джерел на 17 сторінках; 2 додатки на 3 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** дана загальна характеристика роботи, у якій обґрунтована актуальність, новизна і практична значимість отриманих результатів, сформульовані мета і задачі досліджень. Показано особистий внесок здобувача у виконану роботу і результати апробації дисертації.

**У першому розділі** проведено аналіз рівня діючих технологічних операцій круглого зовнішнього урізного й поздовжнього шліфування відповідальних валів приводів шахтних конвеєрів і показані їхні основні недоліки, що складаються в нестабільності забезпечення заданих вимог по точності й шорсткості оброблюваних поверхонь і високій трудомісткості обробки у зв'язку з виникненням у технологічній системі значних пружних переміщень. Відзначається, що завдяки зусиллям багатьох учених у науково-технічній літературі складено досить повне уявлення про закономірності формування параметрів точності й шорсткості обробки при шліфуванні, розроблені ефективні автоматизовані високопродуктивні цикли круглого зовнішнього шліфування, що дозволяють зменшити негативну роль пружних переміщень у процесі обробки. Разом з тим, фактично відсутні аналітичні рішення про оптимальні структури операцій (або циклів) шліфування, що враховують пружні властивості технологічної системи. Це не дозволяє виявити, обґрунтувати й реалізувати в повній мірі їхні потенційні можливості, що вимагає проведення комплексу досліджень по оптимізації структури й параметрів операцій круглого зовнішнього шліфування відповідальних валів приводів шахтних конвеєрів, у першу чергу на основі критерію найменшого часу обробки з урахуванням обмежень по точності розміру (обумовленого пружними переміщеннями в технологічній системі) і шорсткості оброблюваної поверхні. Виходячи із цього, сформульована мета і задачі досліджень, які наведені вище.

**У другому розділі** наведено розроблений теоретичний підхід до оптимізації структури й параметрів операцій круглого зовнішнього урізного шліфування за критерієм найменшого основного часу обробки з урахуванням обмеження по точності розміру оброблюваної поверхні. Розглянуто три принципові схеми круглого зовнішнього урізного шліфування (рис.1): з дискретно змінюваною в часі

швидкістю радіальної подачі й з дискретним характером контакту круга з оброблюваною деталлю; з безупинно змінюваною в часі швидкістю радіальної подачі й з постійним контактом круга з оброблюваною деталлю; з дискретно змінюваною в часі швидкістю радіальної подачі й з постійним контактом круга з оброблюваною деталлю. Установлено, що в першому випадку при шліфуванні в  $n$  переходів основний час обробки  $\tau$  визначається:

$$\begin{aligned} \tau &= \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \dots + \tau_n = \frac{\Pi_1}{V_1} + \frac{\Pi_2 + \delta_1}{V_2} + \frac{\Pi_3 + \delta_2}{V_3} + \dots + \frac{\Pi_n + \delta_{n-1}}{V_n} = \\ &= B \cdot \left( \frac{\Pi_1}{\delta_1} + \frac{\Pi_2 + \delta_1}{\delta_2} + \frac{\Pi_3 + \delta_2}{\delta_3} + \dots + \frac{\Pi_n + \delta_{n-1}}{\delta_n} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

де  $\tau_n$ ,  $\Pi_n$ ,  $V_n$ ,  $\delta_n = P_y / c = B \cdot V_n$  – відповідно основний час обробки, величина припуску, швидкість радіальної подачі й величина пружного переміщення, що виникає в технологічній системі, на  $n$ -ному переході;

$\Pi_1 + \Pi_2 + \Pi_3 + \dots + \Pi_n = \Pi$  – сумарний припуск, м;  $B = \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$  – постійна часу

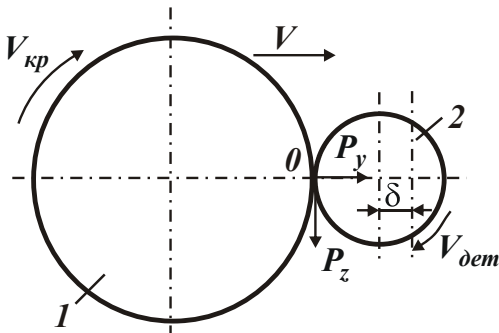


Рис. 1. Розрахункова схема параметрів круглого урізного шліфування: 1 – круг; 2 – деталь.

утворення пружного переміщення в технологічній системі, с;  $\sigma$  – умовна напруга різання при шліфуванні, Н/м<sup>2</sup>;  $c$  – жорсткість технологічної системи в радіальному напрямку, Н/м;  $K_{ш} = P_z / P_y$  – коефіцієнт шліфування;  $P_z, P_y$  – тангенціальна і радіальна складові сили різання, Н;  $V_{кр}$  – швидкість круга, м/с;  $F = \pi \cdot D_{дет} \cdot H$  – площа оброблюваної поверхні, м<sup>2</sup>;  $D_{дет}, H$  – діаметр деталі і висота круга, м.

Із залежності (1) випливає нескінченна безліч екстремумів (мінімумів) основного часу обробки  $\tau$  від величин пружних переміщень  $\delta_1$ ,

$\delta_2, \delta_3, \dots, \delta_{n-1}$ , виникаючих у технологічній системі на кожному переході, а також те, що найменше значення  $\tau$  досягається за умови  $\Pi_1 = \Pi$ ;  $\Pi_2 = \Pi_3 = \dots = \Pi_n = 0$ . Підкоряючи функцію  $\tau$  необхідній умові екстремуму, тобто  $\tau'_{\delta_1} = 0$ , установлено, наприклад, що при шліфуванні у два переходи екстремальні значення основного часу обробки  $\tau_{min}$  і пружного переміщення на першому переході  $\delta_1$  (рис. 2,а) визначаються залежностями:

$$\tau_{min} = B \cdot \left[ \sqrt{\frac{\Pi_1}{\delta_2}} + \sqrt{\frac{\Pi_1}{\delta_2}} + \frac{(\Pi - \Pi_1)}{\delta_2} \right], \quad \delta_1 = \sqrt{\Pi_1 \cdot \delta_2}. \quad (2)$$

При цьому найбільше й найменше значення основного часу обробки відрізняються в 5 разів (рис. 2,б), що свідчить про важливість дослідження функції  $\tau$  на екстремум і визначення екстремальних значень параметрів шліфування. При шліфуванні в  $n$  переходів екстремальне (мінімальне) значення  $\tau_{min}$  визначається:

$$\tau_{min} = B \cdot n \cdot \varepsilon_{сум}^{1/n}, \quad (3)$$

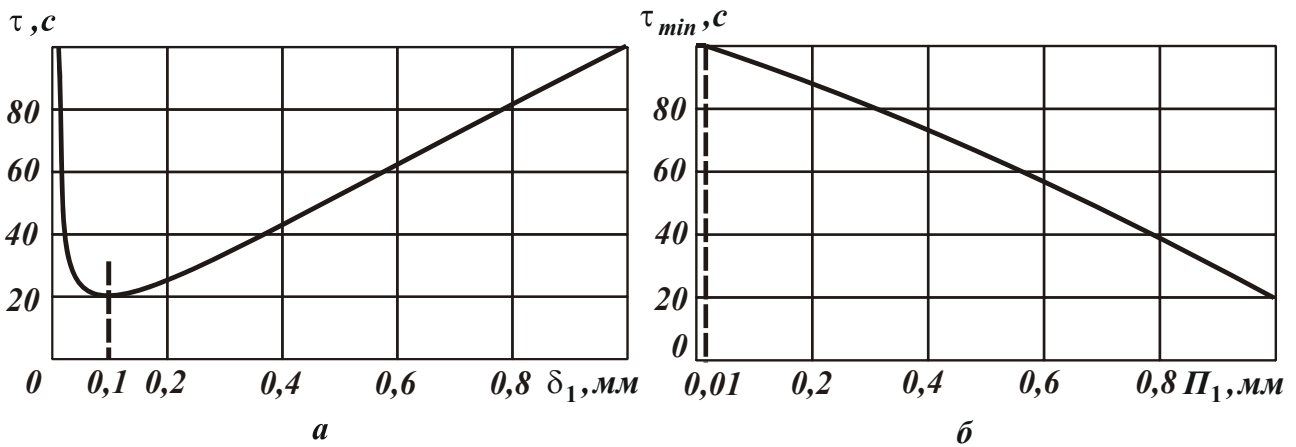


Рис. 2. Залежність  $\tau$  від  $\delta_1$  для  $B=1c$ ,  $\Pi_1=\Pi=1$  мм,  $\delta_2=0,01$  мм (а) і залежність  $\tau_{min}$  від  $\Pi_1$  для  $B=1c$ ,  $\Pi=1$  мм,  $\delta_2=0,01$  (б).

де  $\varepsilon_{сум} = \Pi / \delta_n$  – сумарне уточнення на розмір оброблюваної поверхні.

При цьому доведено, що по тривалості всі переходи однакові:  $\tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_n = B \cdot \varepsilon_{сум}^{1/n}$ . Отже, відношення величин пружних переміщень, що виникають на попередньому й наступному переходах, однаково для кожного переходу й дорівнює уточненню на розмір оброблюваної поверхні  $\varepsilon_n = \varepsilon_{сум}^{1/n}$ . Це означає, що з кожним наступним переходом величини пружного переміщення й відповідно швидкості радіальної подачі убувають по геометричній прогресії зі знаменником, обернено пропорційним уточненню  $\varepsilon_n$ :

$$\varepsilon_n = \frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{\delta_2}{\delta_3} = \dots = \frac{\delta_{n-1}}{\delta_n} = \varepsilon_{сум}^{1/n}; \quad \varepsilon_n = \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_2}{V_3} = \dots = \frac{V_{n-1}}{V_n} = \varepsilon_{сум}^{1/n}. \quad (4)$$

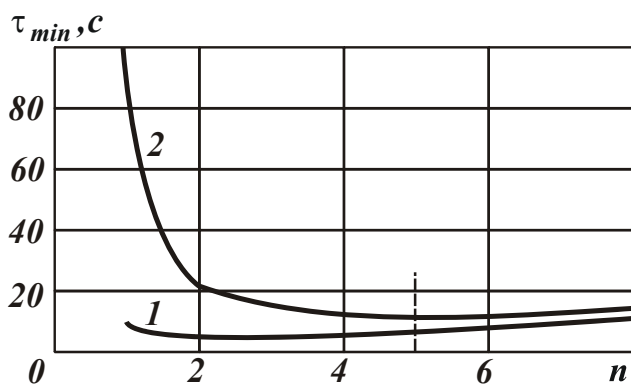


Рис. 3. Залежність  $\tau_{min}$  від  $n$  для різних значень  $\varepsilon_{сум}$ : 1 –  $\varepsilon_{сум}=10$ ; 2 –  $\varepsilon_{сум}=100$  ( $B=1c$ ).

Виходячи із залежності (3) встановлено, що функція  $\tau_{min}$  від числа переходів  $n$  має екстремум (мінімум, рис. 3), що досягається за умови:

$$n = \ln \varepsilon_{сум} \quad \text{або} \quad \varepsilon_{сум} = e^n. \quad (5)$$

Як видно, екстремальне (оптимальне) число переходів  $n$  визначається лише сумарним уточненням  $\varepsilon_{сум}$ , а на кожному переході реалізується оптимальне уточнення  $\varepsilon_n$ , рівне числу  $e \approx 2,72$ . Отже, знаменником убутної геометричної прогресії є величина  $1/e \approx 0,36$  і справедливі співвідношення (4):

$$\frac{\delta_1}{\delta_2} = \frac{\delta_2}{\delta_3} = \dots = \frac{\delta_{n-1}}{\delta_n} = e; \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{V_2}{V_3} = \dots = \frac{V_{n-1}}{V_n} = e. \quad (6)$$

Найменший основний час обробки при цьому дорівнює:

$$(\tau_{min})_{min} = B \cdot \ln \varepsilon_{сум} \cdot e. \quad (7)$$



Очевидно, зменшити  $(\tau_{min})_{min}$  можна за рахунок зменшення параметра  $B$ .

Таблиця 1

Розрахункові значення  $\varepsilon_{сум}$  і  $(\tau_{min})_{min}$  залежно від числа переходів  $n$  ( $B = 1с$ )

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8
$\varepsilon_{сум}$	2,72	7,4	20,1	54,7	148,9	405	1101	3000
$(\tau_{min})_{min}, с$	2,72	5,4	8,1	10,8	13,6	16,3	19,0	21,7

Із табл. 1 випливає, що зі збільшенням сумарного уточнення  $\varepsilon_{сум}$  кількість переходів  $n$  збільшується, однак не істотно. Наприклад, у діапазоні зміни  $\varepsilon_{сум} = 2,72 \dots 54,7$  (що має місце на практиці) кількість переходів  $n$  змінюється в діапазоні 1...4. Даний висновок справедливий і у випадку, якщо розглядати замість переходів операції. Отримана вище залежність  $n = \ln \varepsilon_{сум}$  погодиться з відомою і широко застосовуваною на практиці емпіричною залежністю для визначення кількості операцій або переходів при обробці конкретної поверхні:

$$k_j = \frac{\lg \varepsilon_{d0}}{a} \quad \text{або} \quad \varepsilon_{d0} = 10^{a \cdot k_j} \approx 3,1^{k_j}, \quad (8)$$

де  $a$  – коефіцієнт ( $a = 0,45 - 0,5$ );  $\varepsilon_{d0} = Td_{заг} / Td_{дем}$  – сумарне уточнення;  $Td_{заг}$ ,  $Td_{дем}$  – допуски відповідно на розмір заготовки й готової деталі.

Із залежності (1) випливає, що зменшити основний час обробки  $\tau$  можна також за рахунок вилучення величин  $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_{n-1}$  із чисельників всіх доданків. Це досягається застосуванням схеми круглого урізного шліфування з постійним у часі контактом круга з оброблюваною деталлю і з безупинно змінюваною швидкістю радіальної подачі, описуваною диференціальним рівнянням:

$$-\frac{d\tau}{B} = \frac{dV}{V}, \quad (9)$$

де  $V$  – середня швидкість радіальної подачі на “умовному” переході;  $d\tau$  – час “умовного” переходу.

Рішення диференціального рівняння (9) з урахуванням початкової умови  $\delta(\tau = 0) = \delta_1$ , де  $\delta_1$  – початковий натяг у технологічній системі:

$$V = \frac{\delta_1}{B} \cdot e^{-\frac{\tau}{B}}, \quad \delta = \delta_1 \cdot e^{-\frac{\tau}{B}}. \quad (10)$$

На відміну від шліфування з дискретно змінюваною в часі швидкістю радіальної подачі, коли пружне переміщення й швидкість радіальної подачі підкоряються закону убутної геометричної прогресії, при шліфуванні з безупинно змінюваною в часі швидкістю радіальної подачі ці величини підкоряються експонентному закону. При цьому встановлено, що мінімум основного часу обробки  $\tau_{min}$  досягається за умови створення в технологічній системі початкового натягу, рів-

ного величині припуску, тобто  $\delta_1 = \Pi$ :

$$\tau_{min} = B \cdot \ln \varepsilon_{сум}. \quad (11)$$

Порівнюючи залежності (7) і (11) для визначення мінімуму основного часу обробки  $\tau_{min}$ , видно, що вони відрізняються лише числом  $e$ , тобто при шліфуванні з безупинно змінюваною в часі швидкістю радіальної подачі продуктивність більше в 2,72 рази. Якщо в технологічній системі не можна створити початковий натяг  $\delta_1$ , рівний величині припуску  $\Pi$ , то кругле урізне шліфування варто виконати у два переходи. Перший перехід – з постійною швидкістю радіальної подачі  $V_1 = B \cdot \delta_1$ , а другий перехід – зі змінною швидкістю  $V$ , обумовленою залежністю (10). Тоді основний час обробки  $\tau$  виразиться:

$$\tau = \frac{\Pi}{V_1} - B \cdot \ln \frac{\delta}{\delta_1} = B \cdot \left( m - \ln m + \ln \frac{\Pi}{\delta} \right). \quad (12)$$

Таблиця 2

Розрахункові значення  $\tau$  (у секундах) для  $B=1$ с

$m$	$e^0$	$e^1$	$e^2$	$e^3$	$e^4$	$e^5$	$e^6$	$e^7$
$\tau(\Pi/\delta = e^2)$	3,0	3,72	7,4	19,2	52,7	145,9	341	1097
$\tau(\Pi/\delta = e^4)$	5,0	5,72	9,4	21,2	54,7	147,9	343	1099
$\tau(\Pi/\delta = e^6)$	7,0	7,72	11,4	23,2	56,7	149,9	345	1101

В даному випадку величина  $\delta$  визначає точність розміру оброблюваної поверхні, і вона задана, а  $m = \Pi / \delta_1$  – змінна величина, що змінюється в межах  $1 \dots \infty$ . Із залежності (12) випливає, що зменшити  $\tau$  можна за рахунок зменшення  $m \rightarrow 1$ , табл. 2. Відношення встановленого значення  $m$  до значення  $m=1$  дозволяє кількісно оцінити в скільки разів основний час обробки  $\tau$  більше мінімально можливого значення  $\tau_{min}$ , тобто на скільки ефективна застосовувана схема круглого урізного шліфування у два переходи. Наприклад, для  $\Pi=0,5$  мм,  $\delta=0,008$  мм,  $\delta_1=0,02$  мм, маємо  $\Pi/\delta = e^4$ ,  $m = \Pi/\delta_1 \approx e^3$ . Виходячи з табл. 2, у цьому випадку  $\tau$  дорівнює 21,2 с, а мінімальний основний час обробки  $\tau_{min}$  (при  $m=e^0=1$ ) дорівнює 5 с. Відповідно їхнє відношення дорівнює 4. Цим показано, що для даної технологічної системи найбільш ефективною схемою круглого урізного шліфування є схема, що включає переходи чорнового шліфування й виходжування. У порівнянні з оптимальною схемою обробки, що реалізує лише перехід виходжування й забезпечує мінімум основного часу обробки, дана схема в 4 рази менш продуктивна. Це обумовлено досить великими значеннями  $\Pi/\delta$  й  $m = \Pi/\delta_1$ . Отримані теоретичні рішення погодяться з експериментальними даними, наведеними на рис. 4. Так експериментально встановлено, що параметр  $B = \delta/V$  не залежить від швидкості радіальної подачі  $V$  при круглому урізному шліфуванні й змінюється в межах 1,2 ... 1,28 с, тобто в першому наближенні па-

раметр  $B$  можна розглядати постійною величиною. Установлено також, що зі збільшенням швидкості радіальної подачі  $V$  сумарний основний час обробки  $\tau_{\text{сум}}$  на переходах чорнового шліфування й виходжування (при заданій точності розміру обробленої поверхні) зменшується. Це пов'язано зі збільшенням величини пружного переміщення на початку переходу виходжування.

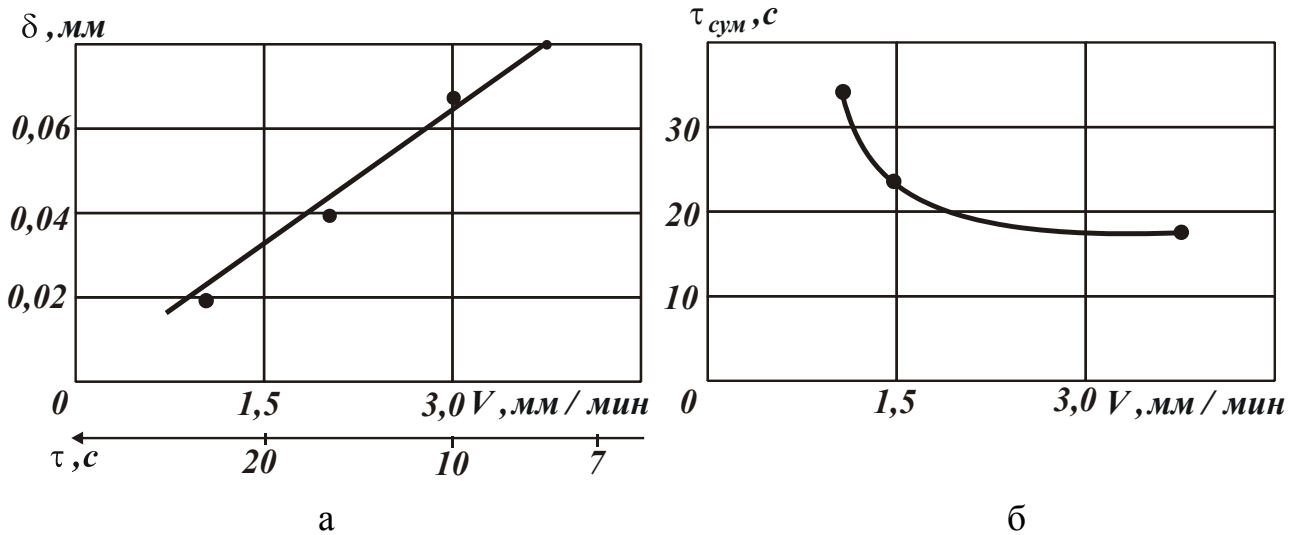


Рис. 4. Залежності величин  $\delta$  (а) і  $\tau_{\text{сум}}$  (б) від швидкості радіальної подачі  $V$  при круглому урізному шліфуванні: круг – 1А1 400х80х203 24А 40 СМ1 К6; оброблювальний матеріал – сталь 45;  $V_{\text{кр}}=35$  м/с;  $V_{\text{дет}}=13,2$  м/хв.

У третьому розділі на основі розробленого теоретичного підходу до оптимізації структури й параметрів операцій круглого зовнішнього урізного й поздовжнього шліфування зроблений вибір найбільш ефективної операції. Для цього проведений аналіз операції круглого урізного шліфування з дискретно змінюваною в часі швидкістю радіальної подачі й постійним контактом круга з оброблюваною деталлю по критерію основного часу обробки  $\tau$ :

$$\tau = B \cdot \left( \frac{\Pi}{\delta_1} + \frac{\delta_1}{\delta_2} + \frac{\delta_2}{\delta_3} + \dots + \frac{\delta_{n-1}}{\delta_n} - n \right), \quad (13)$$

де  $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_n$  – величини пружних переміщень, що виникають у технологічній системі відповідно на першому, другому, третьому й  $n$ -ному переходах, м.

Підкоряючи функцію  $\tau$  необхідній умові екстремуму від змінних величин  $\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_{n-1}$ , отримано екстремальне (мінімальне) значення  $\tau_{\text{min}}$ :

$$\tau_{\text{min}} = n \cdot B \cdot \left( \varepsilon_{\text{сум}}^{1/n} - 1 \right). \quad (14)$$

При цьому аналітично встановлено, що справедлива умова:  $\tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_n = B \cdot \left( \varepsilon_{\text{сум}}^{1/n} - 1 \right)$ . Отже, відношення величин пружних переміщень, що виникають на попередньому й наступному переходах, однаково для кожного переходу й дорівнює уточненню на розмір оброблюваної поверхні  $\varepsilon_n = \varepsilon_{\text{сум}}^{1/n}$ . Тому, з кожним наступним переходом величини пружного переміщення й відповід-

но швидкості радіальної подачі убувають по геометричній прогресії зі знаменником, обернено пропорційним уточненню  $\varepsilon_n$ . Установлено, що функція  $\tau_{min}$ , на відміну від аналогічної функції  $\tau_{min}$ , описуваної залежністю (2), не має екстремуму від кількості переходів  $n$ , табл. 3. Вона безупинно зменшується зі збільшенням  $n$  (рис. 5), асимптотично наближаючись до значення  $\tau_{min} = B \cdot \ln \varepsilon_{сум}$ , яке визначається із залежності (9) для схеми круглого зовнішнього урізного шліфування з безупинно змінюваною в часі швидкістю радіальної подачі й постійним контактом круга з деталлю, тобто при  $n \rightarrow \infty$  схеми (II) і (III) рівносильні.

Таблиця 3

Розрахункові значення  $\tau_{min}$  для  $B=1c$  і  $\varepsilon_{сум}=100$

$n$	1	2	3	4	5	6	10	20
$\tau_{min}, c$	99,0	18,0	10,8	8,6	7,5	6,9	6,0	5,4

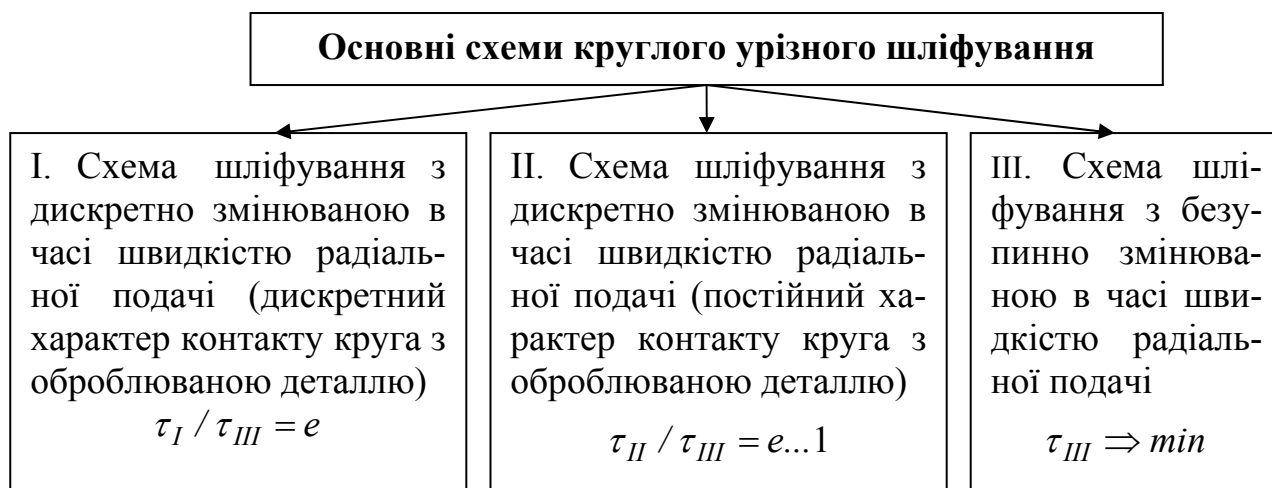
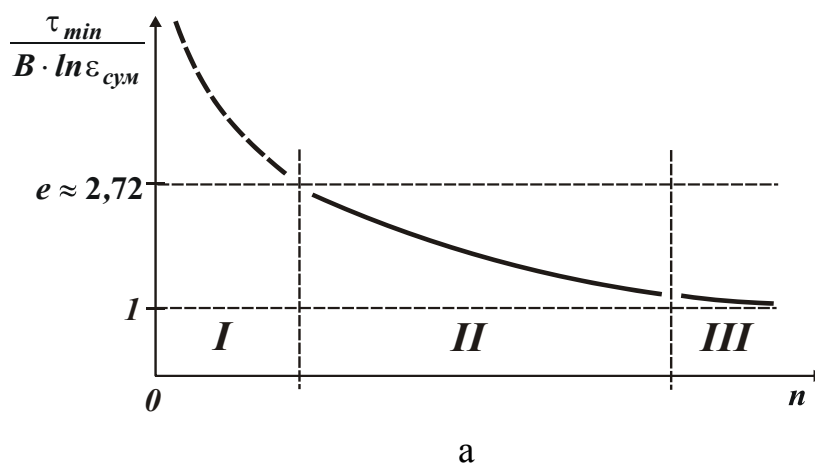


Рис. 5. Залежність функції  $\tau_{min} / B \cdot \ln \varepsilon_{сум}$  від кількості переходів  $n$  (а) і класифікація основних схем круглого урізного шліфування (б).

При невеликій кількості переходів  $n=1 \dots 4$  залежності (3) і (14) фактично ідентичні й підкоряються залежності (7). Тому зі збільшенням  $n$ , по суті, має мі-

ще перехід від схеми (I) круглого урізного шліфування з дискретно змінюваною в часі швидкістю радіальної подачі і дискретним характером контакту круга з оброблюваною деталлю до розглянутої вище схеми шліфування (II). Отже, схема (II) по тривалості обробки займає проміжне положення між схемами (I) і (III), рис. 5,а. Функція  $\tau_{min} / B \cdot \ln \varepsilon_{сум}$  зменшується від  $e \approx 2,72$  до 1 (при  $n \rightarrow \infty$ ), тобто застосування схеми (II) круглого урізного шліфування з дискретно змінюваною в часі швидкістю радіальної подачі й постійним контактом круга з оброблюваною деталлю дозволяє зменшити основний час обробки. На цій основі запропонована класифікація схем круглого зовнішнього урізного шліфування, рис. 5,б.

У роботі проведена аналітична оптимізація структури й параметрів операції круглого поздовжнього шліфування (що включає два переходи: чорнове шліфування й виходжування) на основі отриманої аналітичної залежності для визначення мінімального основного часу обробки  $\tau_{min}$  й значень швидкості поздовжньої подачі  $S_{noz1}, \dots, S_{noz_n}$  на різних проходах:

$$\tau_{min} = n \cdot B \cdot \frac{l_{dem}}{H} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon_{сум}^n} - 1 \right); \quad S_{noz1} = \dots = S_{noz_n} = \frac{H}{B \cdot \left[ \frac{1}{\varepsilon_{сум}^n} - 1 \right]}, \quad (15)$$

де  $l_{dem}$  – довжина оброблюваної деталі, м;  $H$  – висота круга, м.

Установлено, що величина  $\tau_{min}$  тим менша, чим більша швидкість поздовжньої подачі й кількість проходів круга при виходжуванні, а також чим менша кількість проходів при чорновому шліфуванні. При цьому доведено, що швидкість поздовжньої подачі  $S_{noz}$  необхідно на всіх  $n$  проходах (включаючи чорнове шліфування й виходжування) установлювати однаковою, максимально досяжною для даного верстата. Це добре погодиться із практикою застосування круглого поздовжнього й плоского шліфування і свідчить про вірогідність отриманих теоретичних результатів. Зроблено порівняння основного часу обробки  $\tau_{min}$  при круглому зовнішньому поздовжньому і урізному шліфуванні по залежностях:

$$\tau_{min_{noz}} = m \cdot n \cdot B \cdot \frac{l_{dem}}{H} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon_{сум}^n} - 1 \right); \quad \tau_{min_{ур}} = n \cdot B \cdot \frac{l_{dem}}{H} \cdot \left[ \left( m \cdot \varepsilon_{сум} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right], \quad (16)$$

де  $m = \Pi / t_{zp}$  – кількість проходів круга;  $t_{zp}$  – гранична глибина шліфування, м;  $\varepsilon_{сум} = t_{zp} / \delta_n$ .

Установлено, що при однаковій заданій точності розміру оброблюваної поверхні, обумовленої величиною  $\delta_n$ , застосування схеми круглого зовнішнього урізного шліфування дозволяє зменшити основний час обробки, рис. 6,а. Отже, при обробці циліндричних поверхонь варто рекомендувати схему шліфування послідовними врізаннями – з радіальною подачею уступами, як найбільш продуктивну схему. Це погодиться з експериментальними даними, рис. 6,б.

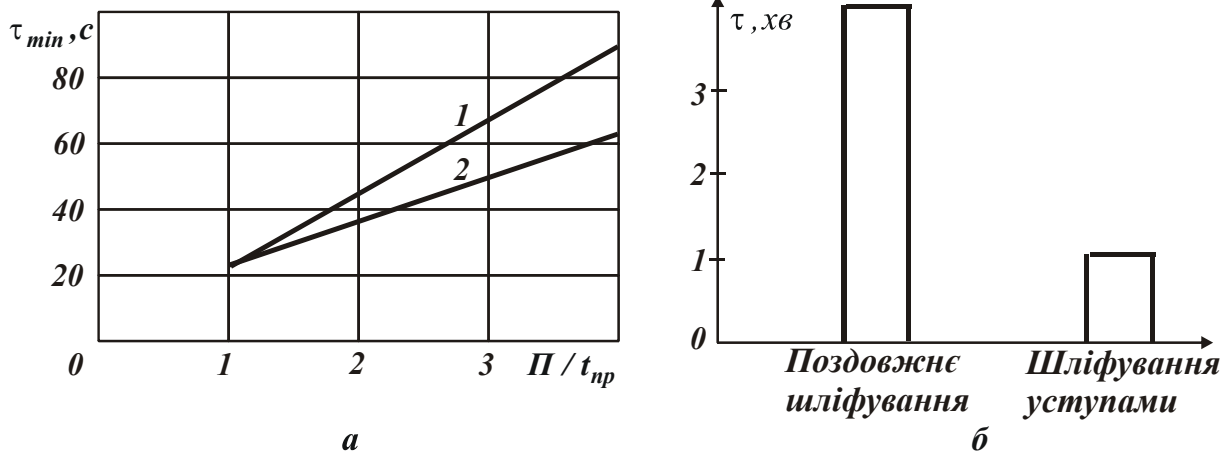


Рис. 6. Залежності  $\tau_{min}$  від  $\Pi/t_{np}$  для круглого поздовжнього (1) і урізного (2) шліфування (а) і діаграма розподілу основного часу обробки  $\tau$  для круглого поздовжнього шліфування й шліфування послідовними врізаннями – з радіальною подачею уступами (б): круг – 1А1 400х80х203 24А 40 СМ1 К6; оброблювальний матеріал – сталь 45;  $V_{кр}=35$  м/с;  $V_{дем}=13,2$  м/хв.

У четвертому розділі наведена розроблена математична модель визначення параметрів точності обробки на операції круглого урізного шліфування на основі урахування балансу переміщень у технологічній системі. Для цього складені рівняння балансу переміщень у технологічній системі відповідно на переходах чорнового шліфування й виходжування:

$$\frac{dV(\tau)}{d\tau} + \frac{1}{B} \cdot V(\tau) = \frac{1}{B} \cdot V_0, \quad (17)$$

$$\frac{dV(\tau)}{d\tau} + \frac{1}{B} \cdot V(\tau) = 0, \quad (18)$$

де  $\tau$  – час обробки, с;  $V(\tau)$  – лінійна швидкість знімання припуску, м/с;  $V_0$  – швидкість радіальної подачі шліфувального круга, м/с.

Рішення диференціального рівняння (17):

$$V(\tau) = V_0 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{1}{B} \cdot \tau} \right); \quad \delta(\tau) = B \cdot V_0 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{1}{B} \cdot \tau} \right) = \delta_{уст} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\Pi}{\delta_{уст}}} \right), \quad (19)$$

де  $\delta(\tau)$  – величина пружного переміщення, м;  $\delta_{уст} = B \cdot V_0$  – величина пружного переміщення, що виникає в технологічній системі в сталому в часі процесі шліфування, м;  $\Pi = V_0 \cdot \tau$  – поточне значення припуску, що знімається, м.

Рішення диференціального рівняння (18):

$$V(\tau) = \frac{\delta_1}{B} \cdot e^{-\frac{1}{B} \cdot \tau}; \quad \delta(\tau) = \delta_1 \cdot e^{-\frac{1}{B} \cdot \tau}, \quad (20)$$

де  $\delta_1$  – натяг у технологічній системі на початку переходу виходжування, м.

Величина пружного переміщення  $\delta(\tau)$  визначає точність розміру оброблюваної поверхні. Як видно, на переході чорнового шліфування величина  $\delta(\tau)$  збільшується, а на переході виходжування – зменшується із часом обробки  $\tau$ . Це

свідчить про те, що виконання операції круглого зовнішнього шліфування у два переходи (чорнове шліфування й виходжування) забезпечує задану точність розміру оброблюваної поверхні. При цьому доведено, що при умові  $\delta_1 / \Pi = 0,05 \dots 1,0$  фактично реалізується максимально можлива продуктивність обробки з урахуванням обмеження по точності розміру оброблюваної поверхні (де  $\Pi$  – величина припуску, що знімається, м). В роботі отримані аналітичні залежності для встановлення величини  $\delta_1 - \delta_2$ , що визначає похибку форми оброблюваної деталі, відповідно на переходах чорнового шліфування й виходжування:

$$\delta_1 - \delta_2 = B \cdot V_0 \cdot e^{-\frac{1}{B} \cdot \tau} \cdot \left( e^{\frac{1}{B} \cdot \tau_\phi} - 1 \right); \quad \delta_1 - \delta_2 = (\delta_{1нач} - \delta_{2нач}) \cdot e^{-\frac{1}{B} \cdot \tau}, \quad (21)$$

де  $\tau_\phi$  – час знімання припуску, рівного величині вихідної похибки форми оброблюваної деталі на переході чорнового шліфування, с;  $(\delta_{1нач} - \delta_{2нач})$  – вихідна похибка форми оброблюваної деталі на переході виходжування, м.

Доведено, що із часом обробки  $\tau$  величина  $\delta_1 - \delta_2$  на двох переходах зменшується, причому, більш інтенсивно на переході виходжування. Отримані також аналітичні залежності для визначення сумарного уточнення  $\varepsilon_{сум}$  відповідно на переходах чорнового шліфування й виходжування:

$$\varepsilon_{сум} = \frac{\delta_1(\tau_\phi)}{(\delta_1 - \delta_2)} = e^{\frac{1}{B}(\tau - \tau_\phi)}; \quad \varepsilon_{сум} = \frac{(\delta_{1нач} - \delta_{нач})}{(\delta_1 - \delta_2)} = e^{\frac{1}{B} \cdot \tau}. \quad (22)$$

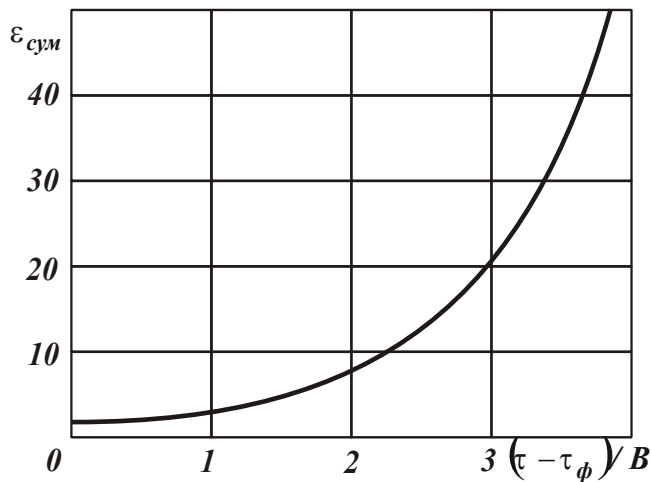


Рис. 7. Залежність  $\varepsilon_{сум}$  від  $(\tau - \tau_\phi) / B$ .

Як видно, за рахунок збільшення часу обробки  $\tau$  або  $(\tau - \tau_\phi)$  до значень, що перевищують у кілька разів параметр  $B$ , можна реалізувати значні величини сумарного уточнення  $\varepsilon_{сум}$ , рис.

7. Із цього зроблений висновок про необхідність зменшення параметра  $B$  з метою зменшення припуску, що залишається для виправлення похибки форми оброблюваної деталі, і зниження часу обробки. В роботі теоретично показано, що отримані аналітичні залежності для визначення сумарного уточнення  $\varepsilon_{сум}$  справедливі як для шліфування,

так і для інших методів механічної обробки, зокрема, точіння. Їхня відмінність складається лише в тому, що при шліфуванні параметр  $B$  визначається швидкістю круга, а при точінні – швидкістю деталі. У зв'язку із цим, обґрунтовані шляхи зменшення параметра  $B$  при шліфуванні й точінні, а також визначені умови, при яких при точінні параметр  $B$  може бути меншим, ніж при шліфуванні. Вони складаються в зменшенні силової напруженості процесу обробки й збільшенні швидкості деталі до значень, близьких до швидкості круга при шліфуванні.

У п'ятому розділі наведені результати теоретичних і експериментальних досліджень шорсткості поверхні при круглому зовнішньому шліфуванні. Теоретично встановлено, що однією з основних умов зменшення шорсткості поверхні при шліфуванні є збільшення числа одночасно працюючих зерен круга. Це досягається застосуванням абразивних (алмазних) інструментів із одношаровим (одновисотним) розташуванням зерен на їх робочій поверхні, наприклад, шліфувальних кругів, що допускають “утопання” ріжучих зерен у зв'язку при шліфуванні, і створенням площадок на вершинах зерен круга при його правленні. У зв'язку із

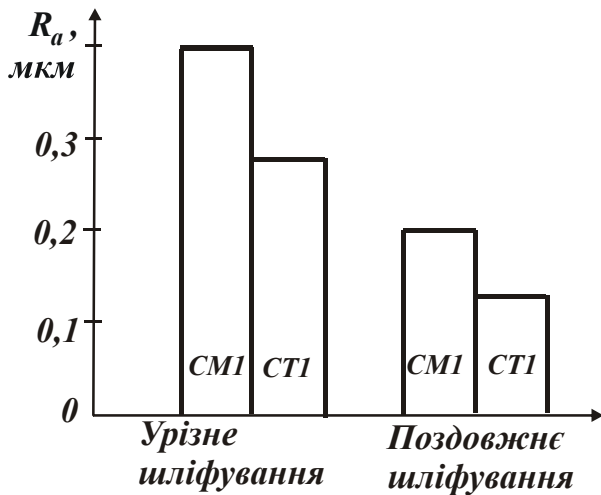


Рис. 8. Діаграма розподілу значень параметра шорсткості обробки  $R_a$  при круглому зовнішньому урізному й поздовжньому шліфуванні абразивними кругами твердістю СМ1 і СТ1.

цим розроблено математичну модель формування площадок на ріжучих зернах круга під впливом механічного навантаження. Установлено, що на зерні утворюється площадка, нахилена під невеликим кутом до напрямку дії тангенціальної складової сили різання, а ріжуча частина зерна приймає форму, близьку до симетричної.

Експериментально встановлено, що при круглому поздовжньому шліфуванні шорсткість поверхні менша, ніж при круглому урізному шліфуванні, рис. 8. Застосування абразивного круга більш високої твердості (СТ1) у порівнянні з кругом твердістю СМ1 дозволяє зменшити шорсткість поверхні, що пов'язано з утворенням на ріжучих зернах у процесі виправлення більших площадок. Однак, даний круг досить швидко втрачає ріжучу здатність і його

необхідно часто правити, що істотно підвищує трудомісткість обробки й витрати круга. Тому для здійснення операцій круглого зовнішнього шліфування валів ефективніше використовувати абразивний круг твердістю СМ1, що працює в режимі самозагострювання. Він забезпечує підвищення продуктивності обробки при виконанні вимог по точності й шорсткості оброблюваних поверхонь валів.

Обґрунтовано умови практичного використання отриманих результатів в ВАТ Харківський машинобудівний завод “Світло шахтаря” на операціях круглого зовнішнього шліфування відповідальних валів приводів шахтних конвеєрів. Показано, що застосування операції шліфування послідовними врізаннями – з радіальною подачею уступами (при виконанні умови  $\delta_1 / P = 0,05 \dots 1,0$ ) замість операції круглого поздовжнього шліфування, яка застосовувалася раніше, дозволило більш ніж у два рази підвищити продуктивність обробки при гарантованому забезпеченні необхідних високих показників точності і шорсткості оброблюваних поверхонь. При цьому виключаються припіки й інші температурні дефекти, твердість оброблених поверхонь валів відповідає їхній твердості до обробки, що свідчить про незначний вплив температурного фактора. Застосування розроблених операцій круглого зовнішнього шліфування дозволило зменшити відсоток поправного браку оброблюваних валів приводів шахтних конвеєрів і на 25% знизити



витрати абразивних кругів. Підвищення якості обробки валів дозволило довести ресурс роботи приводів шахтних конвеєрів до рівня світових виробників аналогічної продукції, наприклад, фірми Wolfgang preinfalk GMBH (Німеччина). Економічний ефект від впровадження в основне виробництво ВАТ Харківський машинобудівний завод “Світло шахтаря” розроблених операцій круглого зовнішнього шліфування відповідальних валів приводів шахтних конвеєрів склав 145624 гривень на рік. Розроблені операції шліфування рекомендується застосовувати як для підвищення працездатності відповідальних валів приводів шахтних конвеєрів, так і інших відповідальних валів, що працюють в умовах значних циклічних навантажень та зносу.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі отриманих нових науково обґрунтованих результатів вирішена важлива і актуальна науково-практична задача створення ефективних операцій круглого зовнішнього шліфування відповідальних валів приводів шахтних конвеєрів шляхом оптимізації їхньої структури й параметрів за критерієм найменшого основного часу обробки з урахуванням обмежень по точності й шорсткості оброблюваної поверхні.

1. Розроблено новий теоретичний підхід до оптимізації структури й параметрів операцій круглого зовнішнього шліфування за критерієм найменшого основного часу обробки з урахуванням обмеження по точності розміру оброблюваної поверхні. Основу підходу становлять виявлені екстремальні залежності основного часу обробки від величин пружних переміщень, що виникають у технологічній системі, і номінальних припусків, що видаляються на кожному переході. З використанням даних залежностей визначені оптимальна кількість переходів, значення швидкостей подачі і величин припусків, що знімаються, на кожному переході, що дозволило виявити, обґрунтувати й реалізувати нові технологічні можливості операцій круглого зовнішнього урізного й поздовжнього шліфування.

2. Теоретично доведено, що в оптимальній за структурою операції круглого урізного шліфування з дискретно змінюваною в часі швидкістю радіальної подачі й з дискретним характером контакту круга з оброблюваною деталлю кількість переходів дорівнює натуральному логарифму від сумарного уточнення, а зменшення швидкостей радіальної подачі й величин припусків, що знімаються, на кожному наступному переході підкоряється закону убутної геометричної прогресії зі знаменником 0,36. Установлено, що для забезпечення сумарного уточнення в межах 2,72...55 (реалізованих на практиці) оптимальна за структурою операція шліфування повинна включати 1...4 переходи. Це погодиться із практичними даними, зокрема, з відомої в технології машинобудування емпіричною залежністю для визначення кількості переходів.

3. Установлено, що закономірності знімання припуску й формування пружних переміщень у технологічній системі при круглому зовнішнім урізному шліфуванні з дискретно й безупинно змінюваною в часі швидкістю радіальної подачі математично описуються на основі єдиної розрахункової схеми. Доведено, що перехід від дискретно до безупинно зменшуваної у часі за експонентним законом

швидкості радіальної подачі дозволяє до 2,72 разів зменшити основний час обробки при забезпеченні заданої точності розміру оброблюваної поверхні.

4. Теоретично доведено, що в оптимальній за структурою операції круглого урізного шліфування з дискретно змінюваною в часі швидкістю радіальної подачі й з постійним контактом круга з оброблюваною деталлю зменшення швидкостей радіальної подачі й величин припусків, що знімаються, на кожному наступному переході підкоряється закону убутної геометричної прогресії зі знаменником, обернено пропорційним сумарному уточненню в ступені, що обернено пропорційна кількості переходів. Установлено, що зі збільшенням кількості переходів мінімум основного часу обробки безупинно зменшується (до 2,72 разів), асимптотично наближаючись до значення, рівного основному часу обробки на операції шліфування з безупинно змінюваною в часі швидкістю радіальної подачі. Цим показано, що найменший основний час обробки досягається на операції круглого урізного шліфування з безупинно змінюваною в часі швидкістю радіальної подачі, потім – у порядку збільшення основного часу обробки – на операції шліфування з дискретно змінюваною в часі швидкістю радіальної подачі й з постійним контактом круга з оброблюваною деталлю і на операції шліфування з дискретно змінюваною в часі швидкістю радіальної подачі й з дискретним характером контакту круга з оброблюваною деталлю.

5. Теоретично обґрунтована оптимальна за структурою операція круглого поздовжнього шліфування. Доведено, що її доцільно виконувати у два переходи (чорнове шліфування й виходжування) з однаковою на кожному проході шліфувального круга, максимально досяжною на верстаті швидкістю поздовжньої подачі. При цьому перший перехід доцільно здійснювати за один прохід круга, установлюючи глибину шліфування, рівною величині припуску, що знімається. Отримане теоретичної рішення добре погодиться з експериментальними даними й практикою застосування круглого поздовжнього і плоского шліфування.

6. Проведено порівняння основного часу обробки операцій круглого урізного і поздовжнього шліфування і показано, що найбільш продуктивним є шліфування послідовними врізаннями – з радіальною подачею уступами, що дозволяє знімання значних припусків із забезпеченням високої точності обробки.

7. На основі урахування балансу переміщень у технологічній системі розроблена математична модель визначення параметрів точності обробки на операції круглого урізного шліфування. Показано, що основною умовою підвищення точності й зниження основного часу обробки, а також реалізації на переходах чорнового шліфування й виходжування значного сумарного уточнення є зменшення постійної часу утворення пружного переміщення в технологічній системі – узагальненого параметра, обумовленого ріжучою здатністю круга, жорсткістю технологічної системи, площею оброблюваної поверхні й швидкістю круга. Доведено, що для забезпечення максимально можливої продуктивності обробки при круглому урізному шліфуванні з урахуванням обмеження по точності розміру оброблюваної поверхні відношення величини пружного переміщення (після переходу чорнового шліфування) до величини припуску, що знімається, повинно змінюватися в межах 0,05...1,0.

8. Проведено порівняння постійної часу утворення пружного переміщення в технологічній системі при шліфуванні і точіння і доведено, що за певних умов дана величина може бути менша при точінні. Це відкриває нові можливості інтенсифікації процесу виправлення похибок обробки лезовими інструментами.

9. Проведено комплекс експериментальних досліджень параметрів операцій круглого зовнішнього шліфування відповідальних валів приводів шахтних конвеєрів, що підтвердив вірогідність отриманих теоретичних рішень. Показано, що застосування операції шліфування послідовними врізаннями – з радіальною подачею уступами і оптимальних умов обробки замість операції круглого поздовжнього шліфування дозволило більш ніж у два рази підвищити продуктивність обробки при гарантованому забезпеченні необхідних високих показників точності й шорсткості оброблюваних поверхонь, вилучити припіки і інші температурні дефекти. При цьому твердість оброблених поверхонь валів відповідає їхній твердості до обробки. У результаті застосування розроблених операцій круглого зовнішнього шліфування зменшився відсоток поправного браку оброблюваних валів приводів шахтних конвеєрів і на 25% знизилася витрати абразивних кругів. Підвищення якості обробки валів дозволило довести ресурс роботи приводів шахтних конвеєрів до рівня світових виробників аналогічної продукції.

10. Розроблені ефективні операції круглого зовнішнього шліфування відповідальних валів приводів шахтних конвеєрів впроваджені у ВАТ Харківський машинобудівний завод “Світло шахтаря” із загальним економічним ефектом понад 145 тисяч гривень на рік.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Новиков Ф.В., Ковальчук А.Н. Условия разрушения режущих зерен алмазного круга при шлифовании // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Х.: НТУ “ХПІ”. – 2004. – № 44. – С. 111-117.

2. Новиков Ф.В., Ковальчук А.Н. Оптимизация структуры процесса съема припуска при механической обработке // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Х.: НТУ “ХПІ”. – 2005. – № 37. – С. 169-176.

3. Новиков Ф.В., Ковальчук А.Н. Механизм формирования площадок на вершинах режущих зерен алмазного круга при его специальной механической обработке // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. – Х.: ХНТУСГ, 2005. – Вип. 33. – С. 16-22.

4. Ковальчук А.Н. Оптимизация структуры технологического процесса съема припуска при механической обработке // В кн.: Физико-математическая теория процессов обработки материалов и технологии машиностроения. В десяти томах. – Т.10. “Концепции развития технологии машиностроения ” – Одесса: ОНПУ, 2005. – С. 5-39.

5. Новиков Г.В., Ковальчук А.Н., Яценко С.М. Исследование структуры и параметров рабочей поверхности алмазно-абразивных инструментов // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. – Х.: НТУ “ХПІ”. – 2005. – № 12. – С. 110-118.

6. Новиков Ф.В., Ковальчук А.Н. Формирование плосковершинных зерен алмазного круга для улучшения шероховатости обработки цилиндрических поверхностей твердосплавных изделий // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Х.: НТУ "ХПІ". – 2005. – № 23. – С. 170-175.
7. Новиков Ф.В., Ковальчук А.Н. Напряженное состояние режущего зерна алмазного круга при шлифовании // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Х.: НТУ "ХПІ". – 2005. – № 24. – С. 158-164.
8. Ковальчук А.Н. Оптимизация структуры и параметров процесса съема припусков при шлифовании с непрерывно изменяющейся во времени скоростью радиальной подачи круга // Високі технології в машинобудуванні: Збірник наукових праць Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Х.: НТУ "ХПІ". – 2006. – Вип. 2 (13). – С. 41-47.
9. Новиков Ф.В., Яценко Е.С., Ковальчук А.Н., Иванов И.Е. Математическая модель определения экономически выгодных режимов резания // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Х.: НТУ "ХПІ". – 2006. – № 41. – С. 33-36.
10. Ковальчук А.Н. Повышение производительности и точности обработки на операциях круглого наружного шлифования // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Х.: ХНТУСХ. – 2007. – Вип. 61. – С. 207-213.
11. Ковальчук А.Н., Кохановский В.И., Липовецкий Л.С., Федоренко Г.Л. Опыт внедрения компьютерных технологий сквозного цикла на машиностроительном предприятии // Труды 10-й Международной научно-технической конференции. Физические и компьютерные технологии. – Х.: ХНПК "ФЭД". – 2004. – С. 197-199.
12. Новиков Ф.В., Дитиненко С.А., Ковальчук А.Н. Финишная обработка твердосплавных изделий алмазными кругами на металлических связках // Труды 11-й Международной научно-технической конференции. Физические и компьютерные технологии. – Х.: ХНПК "ФЭД". – 2005. – С. 8-10.
13. Ковальчук А.Н. Разработка технологии окончательного шлифования ответственных деталей приводов шахтных конвейеров и твердосплавных инструментов, используемых для их механической обработки // Труды 12-й Международной научно-технической конференции. Физические и компьютерные технологии. – Х.: ХНПК "ФЭД". – 2006. – С. 99-102.
14. Ковальчук А.Н. Структурно-параметрическая оптимизация операции круглого продольного шлифования // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції. – Х.: Вид-во "Курсор". – 2007. – С. 93-102.
15. Ковальчук А.Н. Исследование параметров точности обработки при круглом врезном шлифовании // Труды 13-й Международной научно-технической конференции. Физические и компьютерные технологии. – Х.: ХНПК "ФЭД". – 2007. – С. 236-247.
16. Патент №52815, Україна, В65 G 19/22. Скребокний конвеєр / Бабенко М.П., Висоцький Г.В., Ковальчук О.М., Коган К.К., Леусенко А.В. – 2000084814; Заявл. 14.11.2000; Опубл. 16.01.2003, Бюл. № 1. – 5 с.

17. Патент №77095, Україна, В65 G 23/00. Пристрій для натягування ланцюгів скребкового конвеєра / Висоцький Г.В., Ковальчук О.М., Литвак Г.О., Рікман І.В., Леусенко А.В., Волчинський О.Г. – а200500440; Заявл. 17.01.2005; Опубл. 16.10.2006, Бюл. № 10. – 5 с.

**Ковальчук А.Н. Оптимізація структури і параметрів операцій шліфування відповідальних валів приводів шахтних конвеєрів.** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения. – Одесский национальный политехнический университет, Одесса, 2008.

Диссертация посвящена разработке эффективных операций круглого наружного шлифования ответственных валов приводов шахтных конвейеров. Для этого разработан новый теоретический подход к оптимизации структуры и параметров операций круглого наружного шлифования по критерию наименьшего основного времени обработки с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности, позволивший определить оптимальное количество переходов, значения скоростей подач и величин снимаемых припусков на каждом переходе и на их основе оценить технологические возможности различных операций круглого врезного и продольного шлифования.

Теоретически определена оптимальная по структуре и параметрам операция круглого врезного шлифования, в которой изменение по переходам скорости радиальной подачи подчиняется закону убывающей геометрической прогрессии со знаменателем, обратно пропорциональным уточнению на размер обрабатываемой поверхности на переходе. Доказана возможность существенного уменьшения основного времени обработки на операции круглого врезного шлифования за счет перехода от дискретно к непрерывно уменьшающейся во времени по экспоненциальному закону скорости радиальной подачи. Теоретически обоснована оптимальная по структуре операция круглого продольного шлифования, которая выполняется в два перехода (черновое шлифование и выхаживание) с одинаковой максимально достижимой на станке скоростью продольной подачи и с глубиной шлифования на первом переходе, равной величине снимаемого припуска.

Установлено, что наиболее эффективной схемой обработки цилиндрических поверхностей является схема шлифования последовательными врезаниями – с радиальной подачей уступами, позволяющая обеспечить наименьшее основное время обработки с учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности. Разработана математическая модель определения параметров точности обработки на операции круглого врезного шлифования с учетом баланса перемещений в технологической системе и на ее основе обоснованы условия повышения точности, снижения основного времени обработки и реализации на переходах чернового шлифования и выхаживания значительного суммарного уточнения за счет уменьшения постоянной времени образования упругого перемещения в технологической системе. Доказано, что для обеспечения максимально возможной производительности обработки при круглом врезном шлифовании с

учетом ограничения по точности размера обрабатываемой поверхности отношение величины упругого перемещения (после перехода черного шлифования) к величине снимаемого припуска должно изменяться в пределах  $0,05 \dots 1,0$ . Произведено сравнение постоянной времени образования упругого перемещения в технологической системе при шлифовании и точении. Определены условия, при которых при точении данная постоянная меньше, чем при шлифовании, что, в частности, открывает новые технологические возможности исправления погрешности формы обработанной детали при лезвийной обработке.

Проведен комплекс экспериментальных исследований параметров операций круглого наружного шлифования ответственных валов приводов шахтных конвейеров, подтвердивший достоверность полученных теоретических решений. Показано, что применение схемы шлифования последовательными врезаниями – с радиальной подачей уступами и реализующих ее оптимальных условий обработки взамен применявшейся ранее схемы круглого продольного шлифования позволило более чем в два раза повысить производительность обработки при гарантированном обеспечении требуемых высоких показателей точности и шероховатости обрабатываемых поверхностей, исключить прижоги и другие температурные дефекты. При этом твердость обработанных поверхностей валов соответствует их твердости до обработки. В результате внедрения разработанных операций круглого наружного шлифования уменьшился процент исправимого брака обрабатываемых валов приводов шахтных конвейеров и на 25% снизился расход абразивных кругов.

**Ключевые слова:** технологический процесс, операция шлифования, основное время обработки, точность обработки, математическая модель.

**Ковальчук О.М. Оптимізація структури і параметрів операцій шліфування відповідальних валів приводів шахтних конвеєрів.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування. – Одеський національний політехнічний університет, Одеса, 2008.

Дисертація присвячена розробці ефективних операцій круглого зовнішнього шліфування відповідальних валів приводів шахтних конвеєрів. Для цього розроблений новий теоретичний підхід до оптимізації структури й параметрів операцій круглого зовнішнього шліфування за критерієм найменшого основного часу обробки з урахуванням обмеження по точності розміру оброблюваної поверхні, що дозволив визначити оптимальну кількість переходів, значення швидкостей подач і величин припусків, що знімаються, на кожному переході й на цій основі оцінити технологічні можливості різних операцій круглого урізного й поздовжнього шліфування. Теоретично визначена оптимальна за структурою й параметрами операція круглого урізного шліфування, у якій зміна по переходах швидкості радіальної подачі підкоряється закону убутної геометричної прогресії зі знаменником, обернено пропорційним уточненню на розмір оброблюваної поверхні на переході. Доведено можливість істотного зменшення основного часу обробки за рахунок переходу від дискретно до безупинно зменшуваної у часі за експонентним законом швидкості радіальної подачі. Обґрунтована оптимальна за структу-

рою операція круглого поздовжнього шліфування, що виконується у два переходи (чорнове шліфування й виходжування) з однаковою на кожному переході максимально досяжною на верстаті швидкістю поздовжньої подачі. Установлено, що найбільш ефективною схемою обробки циліндричних поверхонь є схема шліфування послідовними врізаннями – з радіальною подачею уступами. Проведено експериментальні дослідження операцій шліфування, що підтвердили вірогідність отриманих теоретичних рішень. Впровадження розроблених ефективних операцій шліфування у виробництво дозволило більш ніж у два рази підвищити продуктивність обробки при гарантованому забезпеченні необхідних показників точності й шорсткості оброблюваних поверхонь.

**Ключові слова:** технологічний процес, операція шліфування, основний час обробки, точність обробки, математична модель.

**Kovalchuk A.N. Optimization of structure and parameters of operations of polishing of responsible billows of drives of mine conveyers.** – Manuscript.

Dissertation on competition of graduate degree of candidate of engineering sciences on speciality 05.02.08 – technology of mashinebuilding. – Odessa national polytechnic university, Odessa, 2008.

Dissertation is devoted to the development of effective operations of the round external polishing of responsible billows of drives of mine conveyors. For this purpose the new theoretical approach to the optimization of structure and parameters of operations of the round external polishing is developed on the criterion of the least basic time of treatment taking into account limitation on exactness of size of the processed surface, allowing to define the optimum amount of transitions, values of speeds of serves and sizes of taken off allowances on every transition and on their basis to estimate technological possibilities of different operations of the round mortise and longitudinal polishing. In theory the optimum operation on structure and parameters of the round mortise polishing is defined, in which a change on the transitions of speed of radial feed submits the law of decreasing geometrical progression with a dominator, inversely proportional clarification on the size processed surface on a transition. Possibility of the substantial diminishing of basic time of treatment is proved owing to a transition from discretely to continuously declining in time on the exponential law of speed of radial feed. The optimum operation on a structure of the round longitudinal polishing, which is executed in two transitions (draft and nursing) with identical speed of longitudinal feed on every transition maximally attaining on a machine-tool. It is set that the most effective chart of treatment of cylindrical surfaces is a chart of polishing successive threading, ledges with radial feed. The experimental analyses of polishing operations were conducted confirming the truth of got theoretical decisions. Applying of the developed operations of polishing in industry allowed more than in two times to increase the productivity of treatment at the assured providing of the required of exactness and roughness of the processed surfaces.

**Keywords:** technological process, operation of polishing, basic time of treatment, exactness of treatment, mathematical model.

Підписано до друку 07.03.2008 р. Формат 60x90 1/16.  
Папір офсетн. Друк – ризографія. Ум. – друк. арк. 0,9  
Гарнітура Times New Roman. Наклад 100 прим. Зам. № 62

---

Надруковано у БРП СКБ ВАТ “Світло шахтаря”  
Свідоцтво 6/3<sup>а</sup> №278 від 25. 05. 2006 р.

---

61001, м. Харків, вул. Світло шахтаря, 4/6