

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Нежебовський Володимир Вікторович**

УДК 621.923: 621.90.17

**ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ОБРОБКИ ЗУБЧАСТИХ  
КОЛІС ПРИВОДІВ ШАХТНИХ КОНВЕЄРІВ НА ОПЕРАЦІЯХ  
ЗУБОШЛІФУВАННЯ**

05.02.08 – технологія машинобудування

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса – 2011

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в ВАТ Харківський машинобудівний завод "Світло шахтаря"  
Міністерства промислової політики України

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

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Лебедєв Володимир Георгійович,**  
Одеський національний політехнічний університет,  
професор кафедри "Технологія конструкційних  
матеріалів та матеріалознавства"

кандидат технічних наук, доцент  
**Анділахай Олександр Олександрович,**  
Приазовський державний технічний університет,  
завідувач кафедри "Технологія машинобудування"

Захист відбудеться "24" червня 2011 р. о 14.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.052.02 в Одеському національному політехнічному університеті за адресою: 65044, м. Одеса, просп. Шевченка, 1, ауд. 400-А

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеського національного політехнічного університету за адресою: 65044, м. Одеса, просп. Шевченка, 1

Автореферат розісланий "22" травня 2011 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

В.С. Кравчук

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** При виготовленні приводів шахтних конвеєрів виникають проблеми технологічного забезпечення якості обробки зубчастих коліс на фінішних операціях. У значній мірі це обумовлено утворенням на операціях зубошліфування температурних дефектів на оброблюваних поверхнях, а також відносно низькими показниками точності й шорсткості їх обробки. У результаті чого відбуваються часті поломки зубів коліс, знижується їхня зносостійкість і довговічність, а це вимагає ремонту приводів у важких шахтних умовах. Відомо, що підвищити якість обробки зубчастих коліс і відповідно їх надійність і ресурс роботи можна шляхом застосування ефективних технологій зубошліфування, які забезпечують зниження теплової й силової напруженості процесу й підвищення продуктивності обробки. Накопичено певний досвід удосконалювання технології зубошліфування, отримана значна кількість результатів експериментальних досліджень, аналіз яких підтверджує технологічні можливості і резерви зубошліфування. Однак, для їхнього максимального використання необхідні нові теоретичні розробки критеріїв визначення оптимальних режимів шліфування з урахуванням обмежень по температурі шліфування, точності й шорсткості оброблюваних поверхонь, оскільки експериментальних даних недостатньо для вибору оптимального варіанта обробки. Це вимагає проведення подальших досліджень по встановленню технологічних закономірностей формування параметрів якості обробки зубчастих коліс приводів шахтних конвеєрів і умов їхнього підвищення на операціях зубошліфування. У зв'язку з цим у роботі вирішується актуальне науково-практичне завдання технологічного забезпечення якості обробки зубчастих коліс приводів шахтних конвеєрів на операціях зубошліфування.

**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 тематичного плану робіт ВАТ Харківський машинобудівний завод “Світло шахтаря”. Здобувач брав безпосередню участь у виконанні робіт як відповідальний виконавець.

**Мета й завдання дослідження.** Метою дисертаційного дослідження є підвищення якості й продуктивності обробки зубчастих коліс приводів шахтних конвеєрів на фінішних операціях на основі науково обґрунтованого вибору оптимальних режимів зубошліфування й характеристик абразивних кругів.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися наступні завдання:

– аналітично описати основні параметри теплового процесу при зубошліфуванні й на цій основі визначити оптимальні режими шліфування з урахуванням обмеження по температурі шліфування;

– аналітично обґрунтувати умови зменшення похибок обробки при зубошліфуванні й визначити оптимальні режими шліфування з урахуванням обмежень по точності обробки й температурі шліфування;

– аналітично описати закономірності формування шорсткості поверхні при зубошліфуванні й на цій основі визначити умови зменшення шорсткості поверхні, оптимальні режими шліфування та характеристики абразивних кругів;

- провести експериментальні дослідження основних технологічних параметрів зубошліфування й оцінити вірогідність отриманих теоретичних результатів;
- розробити інженерну методику розрахунку оптимальних режимів шліфування й вибору характеристик абразивних кругів на операціях зубошліфування;
- розробити й впровадити у виробництво ефективні операції зубошліфування зубчастих коліс приводів шахтних конвеєрів.

*Об'єкт дослідження* – прогресивні технологічні процеси зубошліфування зубчастих коліс приводів шахтних конвеєрів.

*Предмет дослідження* – теоретичний аналіз закономірностей формування параметрів якості обробки на операціях зубошліфування зубчастих коліс приводів шахтних конвеєрів і на цій основі обґрунтування оптимальних режимів шліфування й характеристик абразивних кругів.

*Методи дослідження.* Теоретичні дослідження проводилися з використанням методів, які базуються на фундаментальних положеннях технології машинобудування, теорії різання матеріалів, опору матеріалів, фізики, математичного аналізу, теорії імовірностей, а також математичного моделювання. Експериментальні дослідження виконані з застосуванням сучасної координатно-виміральної машини GLOBAL Perfomance 122210, профілографа-профілометра, твердоміра Роквелла, мікроскопа МІМ-8.

**Наукова новизна одержаних результатів.** 1. Теоретично доведено, що підвищити якість обробки при шліфуванні на основі одночасного зменшення температури шліфування й глибини проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі можна за рахунок зменшення умовного напруження різання шляхом зниження інтенсивності тертя в зоні різання й підвищення ріжучої здатності круга.

2. Теоретично доведено, що за умови рівності основного й допоміжного часу обробки має місце екстремум (мінімум) штучного часу залежно від кількості проходів круга для заданої температури шліфування. Визначено оптимальні параметри обробки при багатопрхідному шліфуванні, включаючи кількість проходів круга, глибину шліфування й швидкість переміщення деталі.

3. Теоретично визначені умови підвищення точності обробки при зубошліфуванні внаслідок встановлення кількості проходів круга залежно від величини уточнення, реалізованого при шліфуванні.

4. Одержала подальший розвиток математична модель визначення шорсткості поверхні при абразивній обробці на основі порівняння досяжної й необхідної для формування заданої шорсткості поверхні кількості зерен з урахуванням імовірнісного характеру участі зерен в різанні й умов руйнування вершин мікронерівностей обробленої поверхні від контакту з ріжучими зернами й зв'язкою інструмента.

5. Уперше проведено класифікацію структур шорсткуватого шару поверхонь, які формуються при абразивній обробці, і розроблено науковий підхід до вибору оптимальних умов обробки з урахуванням обмеження по шорсткості поверхні.

6. Аналітично описані закономірності знімання припуску й формування шорсткості поверхні при шліфуванні кругом із двостороннім конічним профілем і на цій основі обґрунтована ефективність застосування даного круга на операції зубошліфування.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що на основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень розроблені ефективні операції зубошліфування зубчастих коліс приводів шахтних конвеєрів, які дозволяють підвищити якість і продуктивність обробки, виключити утворення температурних дефектів на оброблюваних поверхнях. Запропоновано інженерну методику розрахунку оптимальних режимів шліфування й вибору характеристик абразивних кругів на операціях зубошліфування. Розроблені операції зубошліфування впроваджені у ВАТ Харківський машинобудівний завод “Світло шахтаря” із загальним економічним ефектом 170851 гривень на рік. Результати теоретичних і експериментальних досліджень роботи використовуються в навчальному процесі на кафедрі “Техніка й технології” Харківського національного економічного університету.

**Особистий внесок здобувача.** Всі основні результати, які виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно. Постановка наукових завдань і обговорення результатів проводилися разом з науковим керівником. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать: [1] – експериментальна оцінка впливу режимів шліфування на шорсткість поверхні; [2] – встановлені умови підвищення продуктивності обробки; [3] – оцінка впливу основних параметрів шліфування на шорсткість поверхні; [9] – аналітичні залежності для розрахунку температури шліфування й обґрунтування умов її зменшення; [10] – результати експериментальних досліджень параметрів точності механічної обробки зубчастих коліс; [11] – встановлені оптимальні режими шліфування за критерієм основного часу обробки з урахуванням обмеження по температурі шліфування; [12] – методика розрахунку параметрів шорсткості поверхні; [15] – обґрунтування умов підвищення ресурсу роботи зубчастих коліс.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертації доповідалися й обговорювалися на XIV–XVI Міжнародних науково-технічних конференціях “Фізичні й комп’ютерні технології” (Харків, 2008–2010 р.р.); XVII Міжнародному науково-технічному семінарі “Високі технології: тенденції розвитку” (Харків-Алушта, 2008 р.); XVI і XVII Міжнародних науково-практичних конференціях “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я” (Харків, 2008–2009 р.р.); науково-технічній конференції “Нові й нетрадиційні технології в ресурсо- і енергозбереженні” (Одеса, 2009 р.); VI і VII Міжнародних науково-технічних конференціях “Сучасні інструментальні системи, інформаційні технології та інновації” (Курськ, Росія, 2008, 2010 р.р.); I Міжнародній науково-практичній конференції “Інновації, якість та сервіс в техніці та технологіях” (Курськ, Росія, 2009 р.); Міжнародній науково-практичній конференції “Актуальні проблеми сучасної промислової безпеки та екології” (Курськ, Росія, 2010 р.). Роботу в повному обсязі заслухано та схвалено на науково-технічному семінарі в ВАТ Харківський машинобудівний завод “Світло шахтаря” (2010 р.) та на розширеному науковому семінарі кафедри “Технологія машинобудування” Одеського національного політехнічного університету (2011 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковані в 16 наукових працях, у тому числі 11 наукових праць – у виданнях, затверджених ВАК України, а також у одному патенті України.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п’яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний об-

сяг дисертаційної роботи містить 249 сторінок, у тому числі 150 сторінок основного тексту, 87 рисунків на 46 сторінках, 18 таблиць за текстом, 35 таблиць на 17 сторінках, 6 додатків на 17 сторінках. Список використаних джерел складає 170 найменувань на 19 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета і задачі досліджень, визначені об'єкт і предмет досліджень, викладена наукова новизна та практичне значення одержаних результатів, наведено інформацію про апробації та публікації результатів досліджень.

У першому розділі на основі аналізу літературних джерел проведено аналіз операцій зубошліфування зубчастих коліс приводів шахтних конвеєрів і виявлені їхні основні недоліки: низька якість обробки, яка обумовлена утворенням на оброблюваних поверхнях температурних дефектів, і низька точність та шорсткість оброблюваних поверхонь. Відзначається, що виключити утворення температурних дефектів на оброблюваних поверхнях і підвищити якість обробки можна пониженням режимів різання, однак це веде до зменшення продуктивності обробки, що малоефективно. Проведено аналіз опублікованих у науково-технічній літературі робіт із установаження умов підвищення якості обробки при зубошліфуванні й визначення оптимальних режимів різання й характеристик кругів. Виявлено, що опубліковані рішення – емпіричні. Це не дозволяє, по-перше, в повній мірі розкрити технологічні закономірності формування параметрів якості, точності й шорсткості оброблюваних поверхонь, по-друге, виконати науково обґрунтований вибір ефективного варіанта обробки. Необхідно одержати теоретичні рішення, які дозволили б розкрити закономірності формування параметрів якості обробки й на цій основі виявити й обґрунтувати нові технологічні можливості операцій зубошліфування.

Науковими передумовами роботи стали результати теоретичних досліджень теплових процесів при шліфуванні, які отримані Якімовим О.В., Усовим А.В., Ларшиним В.П., Лебедєвим В.Г., Новіковим Ф.В. та іншими вченими. Підвищення точності обробки вирішувалося з використанням результатів досліджень Маталіна О.А. і Лінчевського П.А. Для визначення оптимальних умов шліфування з урахуванням обмеження по шорсткості поверхні застосовано теоретико-імовірнісний підхід, запропонований Новосьоловим Ю.К. і Корольовим А.В. і розвинутий у роботах Новікова Ф.В.

Відзначається, що одним із недоліків діючої технології зубошліфування є також складність виміру параметрів точності обробки зубчастих коліс і на цій основі налагодження верстата на розмір при остаточному шліфуванні й виходжуванні. У зв'язку із цим представляється актуальним застосування сучасних вимірювальних засобів, які забезпечують скорочення часу й підвищення точності вимірів. На підставі цього сформульована мета й завдання досліджень, які наведені вище.

У другому розділі теоретично обґрунтовані умови підвищення якості й продуктивності обробки при зубошліфуванні на основі температурного фактора. Встановлено аналітичний зв'язок між температурою шліфування  $\theta$  й глибиною  $l_2$

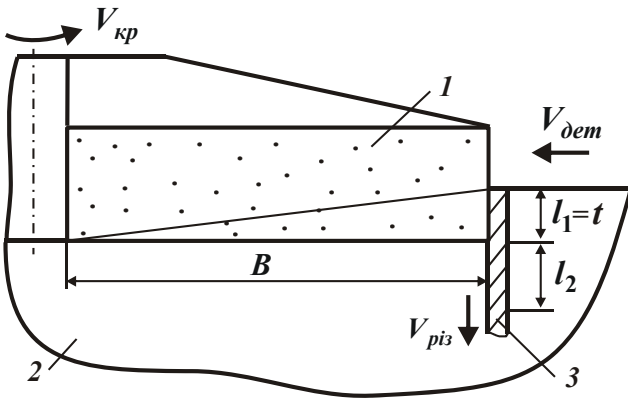


Рис. 1. Розрахункова схема торцевого шліфування: 1 – круг; 2 – оброблюваний матеріал; 3 – адіабатичний стержень

$V_{піз} = t \cdot V_{дем} / B$  – швидкість перерізання адіабатичного стержня, якими умовно представлений припуск, що знімається, м/с;  $V_{дем}$  – швидкість переміщення деталі, м/с;  $B$  – довжина робочої частини круга (довжина контакту круга з деталлю), м;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу, Вт/(м·град);  $Q_{num} = t \cdot V_{дем}$  – питома продуктивність обробки, м<sup>2</sup>/с.

Аналіз залежності (1) показує, що понизити температуру  $\theta$  можна за рахунок збільшення глибини  $l_2$ . Отже, одночасного зменшення параметрів  $\theta$  та  $l_2$  і відповідно підвищення якості обробки можна досягти за рахунок пониження умовного напруження різання  $\sigma$  в результаті зменшення інтенсивності тертя в зоні шліфування й підвищення ріжучої здатності круга. Розрахунками встановлено, що при шліфуванні сталі ШХ15 ( $c \cdot \rho = 5 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·град)) відношення  $l_1/l_2$  приймає значення менші одиниці (рис. 2,а). Установлено також, що забезпечення значень  $\theta$ , які менше температури плавлення сталі ШХ15 ( $\theta_{пл} = 1500$  °С), можливо при умові  $l_1/l_2 \ll 1$  (рис. 2,б). Це пов'язано з відносно великими значеннями умовного напруження різання при шліфуванні  $\sigma = \sigma_{cm} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{ш}^2}\right) / K_{ш}$ , де  $K_{ш} = P_z / P_y$  – коефіцієнт шліфування (0,1...1);  $P_z, P_y$  – тангенціальна й радіальна складові сили різання, Н;  $\sigma_{cm}$  – межа міцності на стиск оброблюваного матеріалу, МПа (для сталі ШХ15 –  $\sigma_{cm} = 2 \cdot 10^3$  МПа). Тому досить складно одночасно зменшити температуру шліфування  $\theta$  до необхідного рівня й виконати умову  $l_1/l_2 \rightarrow 1$  і домогтися підвищення якості обробки. Реально можна виконати лише одну умову: зменшити  $\theta$  за рахунок збільшення  $l_2$ . У цьому випадку виключається утворення на оброблюваних поверхнях припикань. Однак, у зв'язку зі збільшенням  $l_2$  можливі структурні зміни поверхневого шару оброблюваної деталі, які не завжди можна усунути на наступному проході круга для  $l_1/l_2 \ll 1$ . Тому, поряд із забезпеченням заданого значення  $\theta$ , необхідно зменшувати параметр  $l_2$  за рахунок пониження умовного напруження різання  $\sigma$ .

проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі при торцевому шліфуванні (рис. 1)

$$\theta = \frac{2 \cdot \sigma}{c \cdot \rho} \cdot \frac{l_1}{l_2}; \quad (1)$$

$$\frac{l_1}{l_2} = \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda} \cdot V_{піз}} \cdot l_1 = \sqrt{\frac{c \cdot \rho}{2 \cdot \lambda} \cdot \frac{t}{B} \cdot Q_{num}}, \quad (2)$$

де  $\sigma$  – умовне напруження різання, Н/м<sup>2</sup> (енергоємність обробки, Дж/м<sup>3</sup>);  $l_1$

– товщина шару знятого матеріалу, яка при торцевому шліфуванні дорівнює глибині шліфування  $t$ , м;  $c$  – питома теплоємність матеріалу, Дж/(кг·град);  $\rho$  – щільність матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;

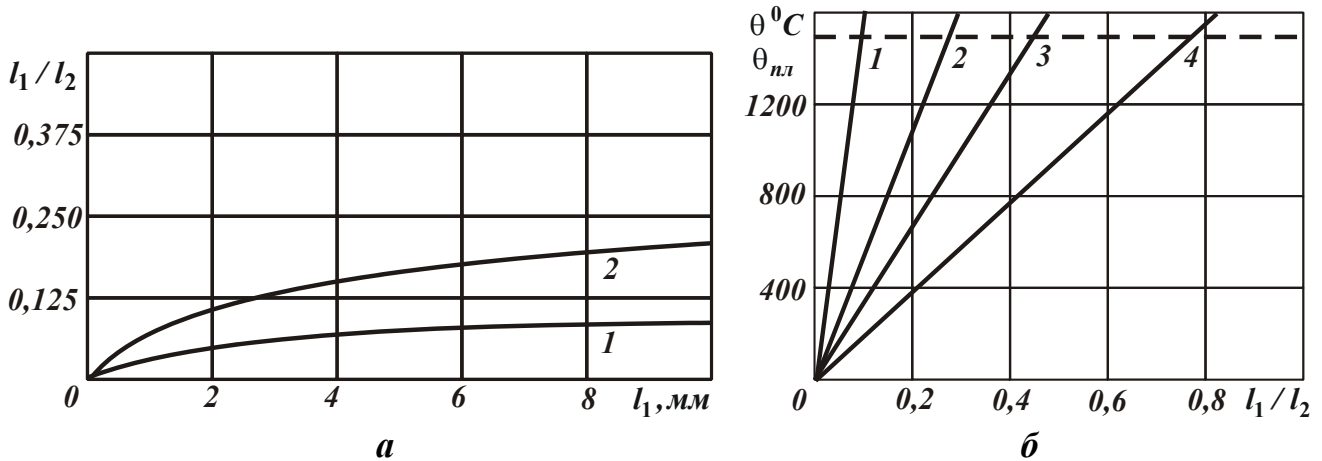


Рис. 2. Залежності  $l_1/l_2$  (а) від товщини знятого матеріалу  $l_1$  для швидкості перерізання адіабатичного стержня (1 –  $V_{piz}=2$  мм/хв; 2 –  $V_{piz}=10$  мм/хв) та температури шліфування  $\theta$  (б) від  $l_1/l_2$  для коефіцієнта шліфування (1 –  $K_{ш}=0,1$ ; 2 –  $K_{ш}=0,3$ ; 3 –  $K_{ш}=0,5$ ; 4 –  $K_{ш}=1$ )

При шліфуванні на оброблюваних поверхнях, крім припикань, утворюються мікротріщини, обумовлені високим градієнтом температури

$$\text{grad}\theta = \frac{\theta}{l_2} = \sigma \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{t}{B} \cdot V_{dem} \quad (3)$$

Зменшити  $\text{grad}\theta$  й виключити утворення мікротріщин можна пониженням температури шліфування  $\theta$  й збільшенням глибини  $l_2$ , що відповідає встановленій вище умові виключення припикань, і досягається зменшенням параметрів  $\sigma$ ,  $t$ ,  $V_{dem}$  і збільшенням  $B$ . Отже, одночасно зменшити  $\text{grad}\theta$ , температуру шліфування  $\theta$ , глибину  $l_2$  й таким чином виключити утворення мікротріщин і припикань на оброблюваній поверхні (при заданій продуктивності обробки) можна лише за рахунок зменшення умовного напруження різання  $\sigma$ .

У роботі виконана оптимізація параметрів режимів зубошліфування з урахуванням температурного фактора. Виходячи із залежностей (1) і (2), понизити температуру шліфування  $\theta$  при одній і тій же продуктивності обробки можна зменшенням глибини шліфування  $t$ , тобто збільшенням кількості проходів круга при зніманні заданого припуску  $\Pi$ . Однак, це веде до збільшення допоміжного часу обробки, пов'язаного з реверсуванням стола верстата. Тому існує оптимальна кількість проходів круга  $n_1$ , при якій штучний час  $T_{ум}$  (що дорівнює сумі основного  $T_{осн}$  й допоміжного  $T_{дон}$  часу обробки на операції зубошліфування) приймає мінімальне значення. Залежність для визначення  $T_{ум}$  приймає вид:

$$T_{ум} = T_{осн} + T_{дон} = 2 \cdot z \cdot n_1 \cdot k \cdot (\tau_{осн} + \tau_{дон}) = 2 \cdot z \cdot k \cdot \tau_{дон} \cdot \gamma_1, \quad (4)$$

де  $T_{осн} = 2 \cdot z \cdot n_1 \cdot k \cdot \tau_{осн}$ ;  $T_{дон} = 2 \cdot z \cdot n_1 \cdot k \cdot \tau_{дон}$ ;  $z$  – кількість зубів;  $k$  – кількість подвійних зворотньо-поступальних рухів круга уздовж оброблюваного зуба за один прохід;  $\tau_{осн} = L/V_{dem}$  – основний час обробки за один подвійний хід круга, с;  $L$  –



довжина поздовжнього ходу круга, м;  $\tau_{don}$  – допоміжний час обробки за один по-  
двійний хід круга, с;  $\gamma_1 = \left( \frac{n_{1екстр}^2}{n_1} + n_1 \right)$  – безрозмірна величина.



Рис. 3. Залежність безрозмірної величини  $\gamma_1$  від кількості проходів круга  $n_1$

Для необхідної умови екстремуму  $T'_{умn_1}=0$  за формулою (4) визначені екстремальні значення  $n_{1екстр}$  кількості проходів круга і швидкості  $V_{дет}$  переміщення деталі та мінімальне значення  $T_{ум}$  штучного часу:

$$n_{1екстр} = \frac{\sigma}{\theta} \cdot \Pi \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{L}{B \cdot \tau_{don}}}; \quad (5)$$

$$V_{дет} = \frac{L}{\tau_{don}}; \quad (6)$$

$$T_{умmin} = 2 \cdot z \cdot k \cdot n_{1екстр} \cdot (\tau_{don} + \tau_{don}) = 4 \cdot z \cdot k \cdot \frac{\sigma}{\theta} \cdot \Pi \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{L}{B} \cdot \tau_{don}}. \quad (7)$$

Перша й друга складові залежності (7) однакові, тобто рівні основний  $\tau_{осн}$  і допоміжний  $\tau_{don}$  часи обробки. Зменшити  $T_{умmin}$  можна, насамперед, пониженням параметрів  $\sigma$  і  $\Pi$  при заданому значенні  $\theta$ . При цьому екстремальне значення  $V_{дет}$  тим більше, чим менше допоміжний час  $\tau_{don}$ . Для вихідних даних:  $\rho=14,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $c=40$  кал/(кг·град);  $\lambda=14$  кал/(м·град);  $\sigma=10^5$  Н/мм<sup>2</sup>;  $\theta=1000$  °С;  $\Pi=0,4$  мм;  $L=100$  мм;  $B=30$  мм;  $\tau_{don}=1$  с, із урахуванням  $t = \Pi / n_1$ , отримано  $n_{1екстр}=9$ ,  $V_{дет}=6$  м/хв,  $t=0,045$  мм. Аналізуючи графік (рис. 3), можна зробити висновок про те, що безрозмірна величина  $\gamma_1$  несуттєво змінюється в діапазоні  $n_1=5 \dots 20$ . Це свідчить про ефективність знімання припуску за невелику кількість проходів круга (у межах 5 проходів). Таким чином, в роботі запропоновано нову методику розрахунку оптимальних умов обробки при шліфуванні за критерієм найменшого штучного часу обробки з урахуванням обмеження по температурі шліфування.

У роботі також визначені умови одночасного забезпечення вимог по точності і якості оброблюваних поверхонь при шліфуванні, обумовлених заданими значеннями величини пружного переміщення  $y_{np}$ , що виникає у технологічній системі, і температури шліфування  $\theta$ :

$$y_{np} = \frac{P_y}{C} = \frac{\sigma}{C \cdot K_{ui}} \cdot \frac{h \cdot t \cdot V_{дет}}{V_{кр}}, \quad (8)$$

$$\theta = \sigma \cdot t \cdot \sqrt{\frac{2}{c \cdot \rho \cdot \lambda} \cdot \frac{V_{дет}}{B}}, \quad (9)$$

де  $C$  – жорсткість технологічної системи, Н/м;  $h$  – ширина шліфування, м;  $V_{кр}$  – швидкість обертання круга, м/с.

Виходячи із залежностей (8) і (9), це досягається зменшенням параметрів  $\sigma$ ,  $t$ ,  $V_{dem}$  і відповідно продуктивності обробки. Причому, для забезпечення заданої величини  $y$  потрібно більш істотно зменшувати продуктивність обробки. Це вимагає застосування як попереднього, так і остаточного шліфування. При попередньому шліфуванні доцільно забезпечити задану температуру  $\theta$  за рахунок вибору оптимальної глибини шліфування  $t$ , яка задовольняє залежність (9). При остаточному шліфуванні необхідно забезпечити задану величину  $y_{np}$ , встановлюючи глибину шліфування  $t$  відповідно до залежності  $y_{np} = t / \varepsilon$ , і кількість проходів круга  $n_1$  при виходжуванні відповідно до залежності  $y_{np} = t / \varepsilon^{n_1}$ , де  $\varepsilon = (1 + \alpha)$  – уточнення;  $\alpha = \frac{C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot h \cdot V_{dem}}$  – безрозмірний параметр.

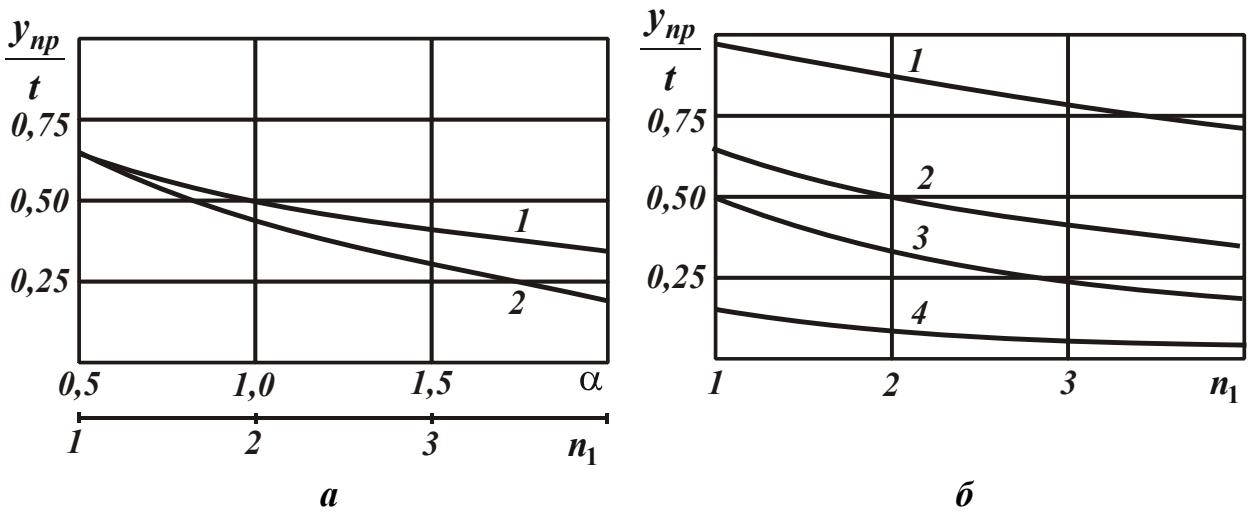


Рис. 4. Залежність безрозмірної величини  $y_{np}/t$  від параметра  $\alpha$  (1) і кількості проходів круга  $n_1$  (2) для  $\alpha_0=0,5$  (а) та від кількості проходів круга  $n_1$  при виходжуванні (б): 1 –  $\alpha_0=0,1$ ; 2 –  $\alpha_0=0,5$ ; 3 –  $\alpha_0=1$ ; 4 –  $\alpha_0=5$

Розрахунками встановлено, що зі збільшенням величин  $n_1$  і  $\alpha$  (зменшенням  $V_{dem}$ ) в однакову кількість разів (що відповідає однаковому зменшенню продуктивності обробки) безрозмірна величина  $y_{np}/t$  зменшується з різною інтенсивністю (рис. 4,а): більш інтенсивно – зі збільшенням  $n_1$ . Це свідчить про ефективність застосування схеми виходжування в порівнянні зі шліфуванням за жорсткою схемою. Установлено також, що при значенні  $\alpha = \alpha_0 \geq 1$  величина  $y_{np}/t$  зі збільшенням  $n_1$  зменшується по лінійній залежності (рис. 4,б). Це перевершує інтенсивність зменшення величини  $y_{np}/t$  зі збільшенням  $n_1$  за умови зменшення глибини шліфування  $t$ . Тому при  $\alpha < 1$  (або  $\varepsilon < 2$ ) доцільно використовувати шліфування за жорсткою схемою, а при  $\alpha \geq 1$  (або  $\varepsilon \geq 2$ ) – шліфування за схемою виходжування, виключаючи з технологічного процесу операцію остаточного шліфування. Таким чином, коефіцієнт  $\alpha$ , а, отже, і уточнення  $\varepsilon = (1 + \alpha)$  визначають оптимальний маршрут обробки (рис. 5). Однак для цього необхідно мати у своєму розпорядженні кількісні значення уточнення  $\varepsilon$ , які встановлюються розрахунково-експериментальним шляхом.

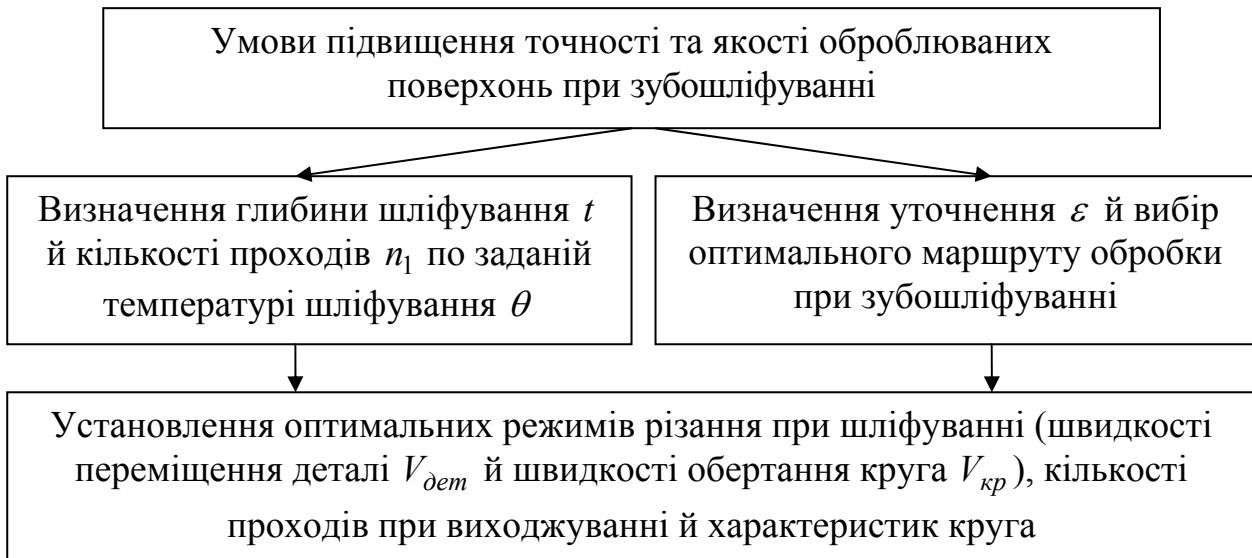


Рис. 5. Структурна схема умов підвищення точності та якості оброблюваних поверхонь при зубошліфуванні

У третьому розділі обґрунтовані закономірності знімання припуску й формування шорсткості поверхні при абразивній обробці з урахуванням імовірнісного характеру участі зерен у різанні. На основі розрахункової схеми (рис. 6) аналітично визначена функція  $\Phi(y)$  розподілу невилученого матеріалу на обробленій поверхні при обробці одновисотними (1) і різновисотними (3) зернами з урахуванням імовірності їхньої участі в різанні (рис. 7), а також при обробці одновисотними зернами (2), але без урахування імовірнісного характеру участі їх у різанні. У першому випадку

$\Phi(y) = e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n}{B} \cdot y}$ , а параметри шорсткості визначаються співвідношеннями  $R_a = \frac{0,367 \cdot B}{\text{tg} \gamma \cdot n}$ ;  $\frac{R_a}{a} = 0,734$ ;  $\frac{R_p}{R_a} = \frac{R_{\max} - a}{R_a} = \frac{R_{\max}}{R_a} - \frac{a}{R_a}$ , де  $2\gamma$  – кут при вершині конусоподібного ріжучого зерна;  $n$  – кількість зерен;  $y$  – поточна координата профілю поверхні, м;  $a$  – відстань до середньої лінії профілю поверхні, м.

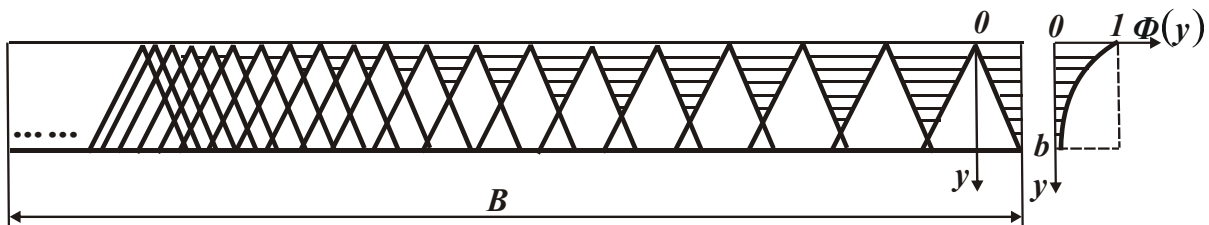
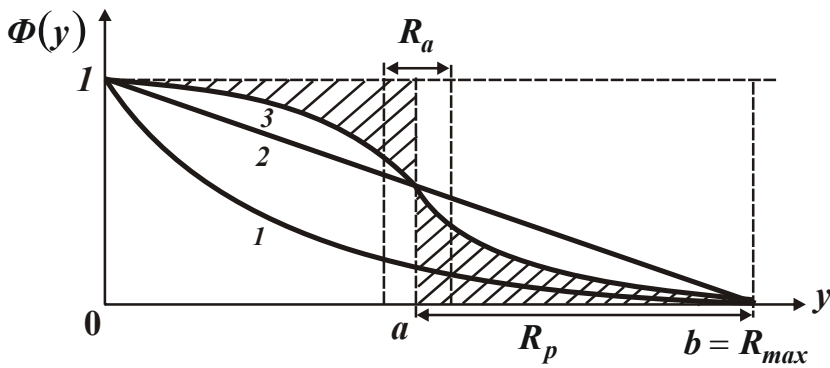


Рис. 6. До розрахунку функції  $\Phi(y)$  розподілу невилученого матеріалу на обробленій поверхні:  $B$  – ширина оброблюваної поверхні, м;  $b$  – висота виступання зерен, м

У третьому випадку функція  $\Phi(y)$  також описується експонентною залежністю, а в другому випадку – лінійною залежністю. За структурою побудови функція  $\Phi(y)$  відповідає класичній відносній опорній довжині мікропрофілю обробленої поверхні.

Рис. 7. Графік залежності функції  $\Phi(y)$ 

У першому й третьому випадках параметр шорсткості  $R_{max}$  однозначно визначити не можна, тому що імовірнісна функція  $\Phi(y)$  асимптотично наближається до нульового значення (рис. 7). Тому встановити параметр шорсткості  $R_{max}$  можна з умови міцності мікронерівності, яка утворюється на об-

роблювальній поверхні. На цій основі визначена довжина площадки на вершині мікронерівності  $l = \frac{0,5 \cdot P \cdot \text{ctg} \gamma}{\tau_{зсув}}$ , де  $P$  – сила різання, що приходить на одиницю ши-

рини мікронерівності, Н/м;  $\tau_{зсув}$  – межа міцності оброблюваного матеріалу на зсув, МПа;  $2\gamma$  – кут при вершині мікронерівності. Аналіз цієї залежності показує, що чим більше відношення  $P / \tau_{зсув}$ , тим менше параметр  $R_{max}$  і відношення  $R_{max} / R_a$ . Цим пояснюється розходження шорсткості поверхні при абразивній обробці різних за фізико-механічними властивостями матеріалів. Отже, існують два підходи до визначення параметрів шорсткості поверхні при абразивній обробці. Перший підхід полягає в кінематико-геометричному описі профілю поверхні з урахуванням імовірнісного накладення й перекриття проекцій зерен, другий підхід – в описі профілю мікронерівностей від їхнього руйнування під дією сил, що виникають у процесі різання. На основі першого підходу можна встановити відношення  $a / R_a$ , а на основі другого підходу – відношення  $R_{max} / R_a$ . У підсумку формується досить повне уявлення про структуру шорсткуватого шару обробленої поверхні.

Таблиця 1

Розрахункові значення відношень  $R_a / a$ ,  $R_{max} / R_a$ ,  $R_p / R_a$  і  $R_p / a$

Найменування параметрів	Випадок 1	Випадок 2	Випадок 3
$R_a / a$	0,734	0,5	< 0,5
$R_{max} / R_a$	> 4	4	4...8
$R_p / R_a$	> 3	2	< 2...6
$R_p / a$	> 2,2	1	< 1..3

У табл. 1 наведені розрахункові значення параметрів шорсткості поверхні для трьох розглянутих вище випадків (рис. 7). Видно, випадок 2 займає проміжне положення, тому що з переходом від випадку 1 до випадку 3 відношення  $R_a / a$  зменшується, а відношення  $R_{max} / R_a$  досягає мінімуму, рівного 4. Випадок 2 є свого роду границею, яка розділяє випадки 1 і 3. Порівнюючи експериментальні або розрахункові значення відношень  $R_a / a$ ,  $R_{max} / R_a$ ,  $R_p / R_a$  і  $R_p / a$  з відповідними значеннями відно-

шень для випадку 2, можна оцінити структуру шорсткуватого шару поверхні, яка утворюється при конкретному методі обробки.

У четвертому розділі визначені технологічні можливості зменшення шорсткості поверхні при абразивній обробці. Для цього спочатку виконано розрахунок параметрів шорсткості поверхні при шліфуванні плосковершинними зернами. Установлено, що при обробці одновисотними й різновисотними зернами параметр шорсткості поверхні

$R_a$  визначається відповідно залежностями  $R_a = \frac{0,367 \cdot B}{\text{tg} \gamma \cdot n} \cdot e^{-\frac{x \cdot n}{B}}$ ;  $R_a = \frac{0,734 \cdot B \cdot b}{n \cdot x}$ , де  $x$  –

довжина площадки на вершині зерна, м.

При шліфуванні периферією круга кількість зерен  $n$ , які приймають участь у формуванні шорсткості поверхні (досяжна кількість), визначається

$$n = B \cdot \sqrt{2 \cdot R_{кр} \cdot b} \cdot \frac{V_{кр}}{V_{дет}} \cdot \frac{3 \cdot m \cdot b}{100 \cdot \pi \cdot \bar{X}^3}, \quad (10)$$

де  $R_{кр}$  – радіус круга, м;  $m$  – об'ємна концентрація зерен круга;  $\bar{X}$  – зернистість круга, м.

Кількість зерен, яка необхідна для формування повного профілю оброблюваної поверхні  $\Phi(y = b = R_{max}) = 0,1$ , дорівнює

$$n = \frac{6,9 \cdot B}{\text{tg} \gamma \cdot b}. \quad (11)$$

Із зіставлення досяжної (10) та необхідної (11) кількості зерен  $n$  (рис. 8) визначається параметр шорсткості  $b = R_{max}$ , який потенційно може бути реалізований при шліфуванні для вихідних даних:  $B = 20$  мкм;  $V_{кр} = 30$  м/с;  $V_{дет} = 1$  м/хв;  $R_{кр} = 100$  мм;  $m = 100$ ;  $\bar{X} = 100$  мкм. В цьому полягає новизна запропонованого в роботі розрахунку параметрів шорсткості поверхні при

Рис. 8. Залежність досяжної (1) та необхідної (2) кількості зерен  $n$  при шліфуванні від параметру  $b$

шліфуванні, що, по суті, є подальшим розвитком відомого теоретико-імовірнісного підходу при шліфуванні.

Обґрунтовані закономірності знімання припуску й формування шорсткості поверхні при шліфуванні кругом із двостороннім конічним профілем і кутом при вершині  $\alpha$ . Доведено, що в цьому випадку умовний радіус шліфування  $R_{умов}$  (конічної частини круга) більше радіуса круга  $R_{кр}$  й визначається

$$R_{умов} = \frac{R_{кр}}{\sin \frac{\alpha}{2}}. \quad (12)$$

Очевидно, що при шліфуванні таким кругом (у порівнянні зі шліфуванням периферією круга) у формуванні шорсткості поверхні бере участь більша кількість зерен, що веде до зменшення шорсткості поверхні. При  $\alpha / 2 = 10 \dots 20^\circ$  (що

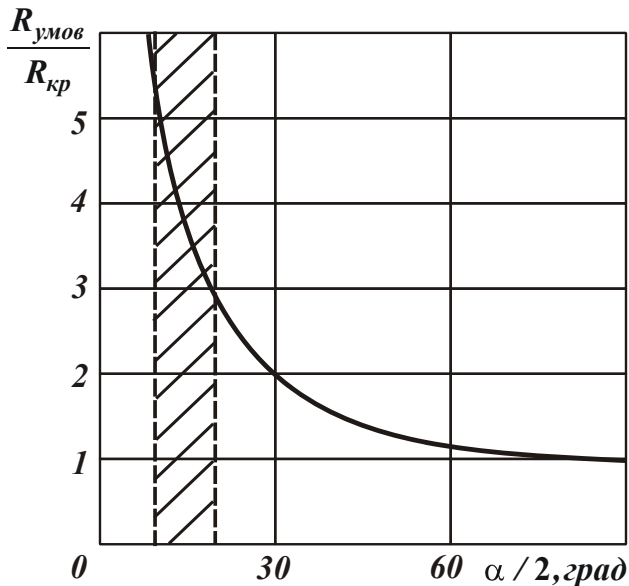


Рис. 9. Залежність відношення  $R_{умов} / R_{кр}$  від кута при вершині кінчного профілю круга  $\alpha/2$

має місце на практиці) умовний радіус  $R_{умов}$  може бути збільшений в 3...5,5 разів (рис. 9). При  $\alpha/2 \rightarrow 0^0$  умовний радіус  $R_{умов} \rightarrow \infty$ . Таким чином, шліфування торцем круга забезпечує найменшу шорсткість поверхні. Показано, що зі збільшенням кута  $\alpha/2$  відбувається перехід від шліфування периферією круга до шліфування кругом із двостороннім кінчним профілем і відповідно до шліфування торцем круга (рис. 10). При цьому досягається ефект зменшення шорсткості поверхні без збільшення площадок зношування на зернах круга, що є основною умовою зменшення шорсткості поверхні при шліфуванні периферією круга. Це обумовлює те, що шліфування торцевим і конусним кругами може здійснюватися гострими зернами, забезпечуючи таким чином високу ріжучу здатність круга й відповідно високі показники продуктивності та якості обробки. Важливо, що для зменшення шорсткості поверхні не обов'язково зменшувати зернистість круга (як у випадку шліфування периферією круга), а це свідчить про існування резервів підвищення ефективності шліфування.

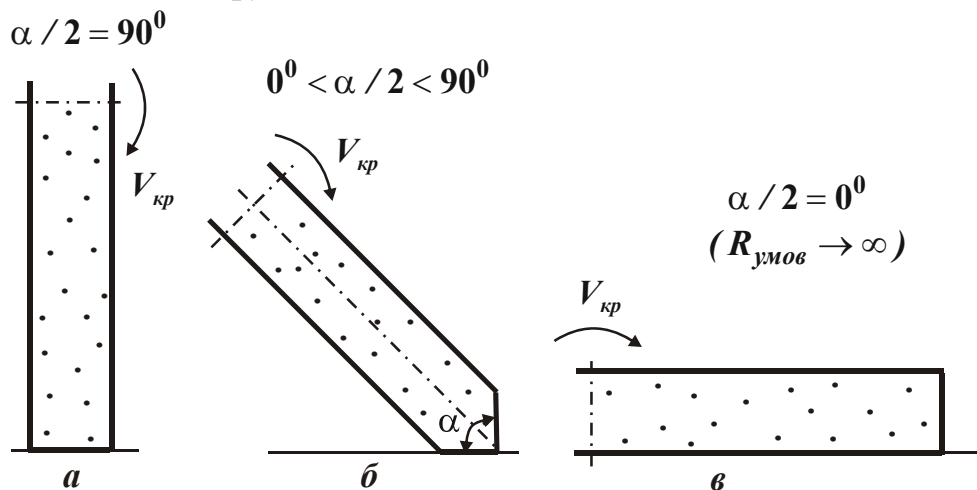


Рис. 10. Схема переходу від шліфування периферією круга (а) до шліфування кругом із двостороннім кінчним профілем (б) і шліфування торцем круга (в)

У п'ятому розділі наведені результати експериментальних досліджень, розробки й впровадження у виробництво ефективних операцій зубошліфування зубчастих коліс приводів шахтних конвеєрів. Експериментально встановлено, що при шліфуванні сталі 18ХГН2МФБ твердістю  $HRC\ 57...63$  умовне напруження різання (енергоємність обробки)  $\sigma$  змінюється в межах  $(13,117...16,964) \cdot 10^3$  МПа, а відношення  $l_1 / l_2$ , яке встановлено розрахунково-експериментальним шляхом (рис. 11), не перевищує

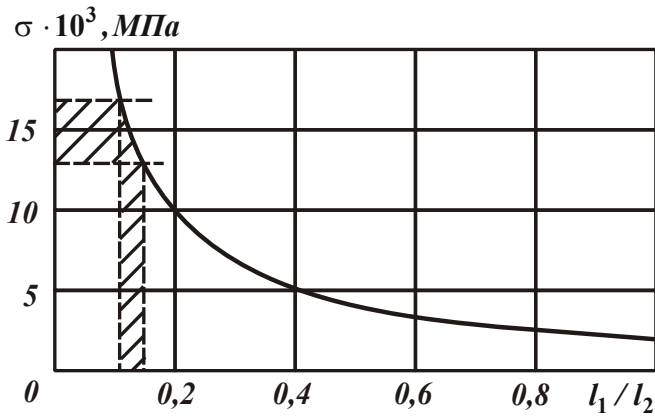


Рис. 11. Залежність умовного напруження різання  $\sigma$  від співвідношення  $l_1/l_2$  товщини знятого шару матеріалу  $l_1$  до глибини проникнення  $l_2$  тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі для температури шліфування  $\theta=800^\circ\text{C}$

ностями (5) і (6) оптимальних параметрів режиму зубошліфування зубчастого колеса зі сталі 18ХГН2МФБ твердістю  $HRC\ 57\dots 63$  за критерієм найменшого штучного часу обробки з урахуванням обмеження по температурі шліфування  $\theta$ . Теоретично встановлено, що при зубошліфуванні на верстаті мод. 5843ЕМ (що працює по методу обкатування кругом конічного профілю 2П 400х32х127 24А10СМ2К6) знімання припуску величиною 0,4 мм може бути виконано за 5 проходів круга із глибиною шліфування  $t=0,08$  мм і швидкістю переміщення деталі  $V_{дет}=12$  м/хв. Вихідні дані для розрахунку:  $c \cdot \rho=5 \cdot 10^6$  Дж/(м<sup>3</sup>·град);  $\lambda=42$  Вт/(м·град);  $\sigma=15 \cdot 10^3$  МПа;  $\theta=800^\circ\text{C}$ ;  $\Pi=0,4$  мм;  $L=100$  мм;  $\tau_{дон}=0,5$  с;  $B=6,32$  мм. Експериментальні дослідження показали, що виключити утворення припикань на оброблюваній поверхні при шліфуванні даним кругом можна при глибині шліфування, яка не перевершує 0,07 мм (рис. 12). Це вказує на незначну розбіжність

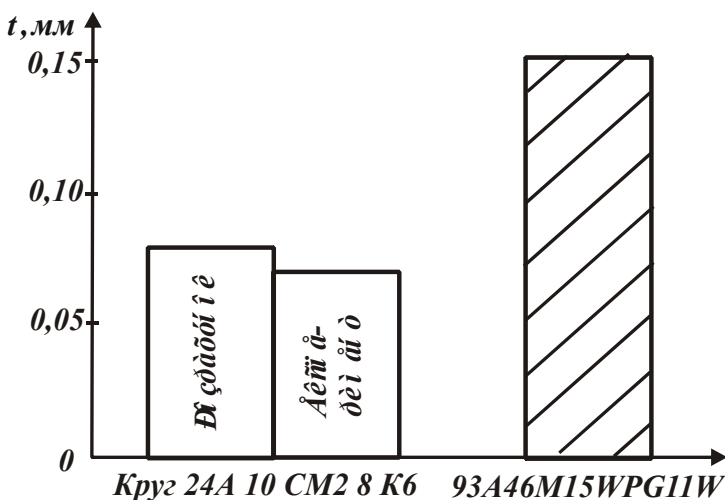


Рис. 12. Розрахункові та експериментальні значення граничної глибини шліфування  $t$

значення 0,2. Тому на кожному наступному проході круга не можна усунути пошкоджений на попередньому проході (у результаті теплового впливу) поверхневий шар деталі. Підвищити якість обробки в цих умовах можна лише за рахунок зменшення температури шліфування  $\theta$  шляхом зменшення енергоємності обробки, що досягається застосуванням кругів з більш високою ріжучою здатністю. Отримані експериментальні дані узгоджуються з теоретичними рішеннями, наведеними в розд. 2.

Використовуючи експериментальні значення енергоємності обробки, виконані розрахунки за залеж-

розрахункових і експериментальних даних (у межах 15 %) і свідчить про вірогідність отриманих теоретичних рішень.

Експериментально встановлено, що шліфування високопористим абразивним кругом T1ESP 400х32х127 93A46M15WPG11W, який характеризується підвищеною ріжучою здатністю, збільшує граничну глибину шліфування й швидкість обертання круга (при яких виключається утворення на оброблюваних поверхнях припикань) відповідно до значень 0,15 мм і 40 м/с.

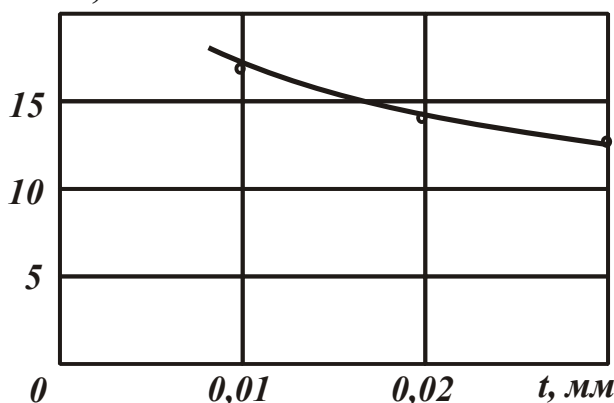
Застосування даного круга забезпечує знімання заданого припуску 0,4 мм за 4 проходи, виключаючи утворення припикань і мікротріщин на оброблюваних поверхнях. При цьому збільшуються стійкість круга між виправленнями з однієї до трьох робочих змін і строк роботи круга до його повного зношування з одного до трьох місяців. Отримані результати свідчать про збільшення продуктивності обробки й про можливість реалізації встановленого теоретично (у розд. 2) найменшого штучного часу обробки для заданої температури шліфування.

Експериментально встановлено, що зі зменшенням глибини шліфування енергоємність обробки  $\sigma$  збільшується, а уточнення  $\varepsilon$  зменшується (рис. 13). Таку ж закономірність маємо з отриманої (у розд. 2) залежності

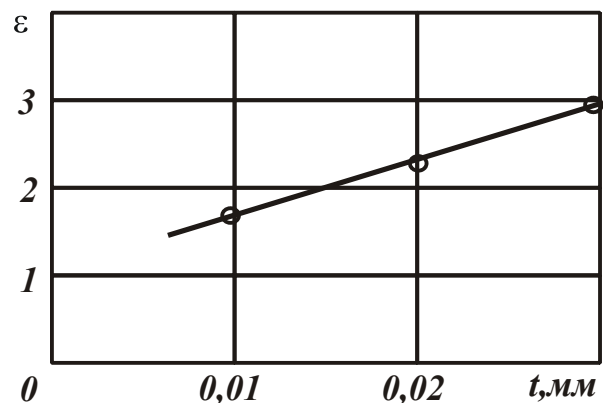
$$\frac{\sigma \cdot B \cdot V_{дет}}{C \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot (\varepsilon - 1) = 1. \quad (13)$$

Тобто, чим більша енергоємність обробки  $\sigma$ , тим менше уточнення  $\varepsilon$ . Цим пояснюється висока трудомісткість досягнення на практиці підвищених показників точності обробки за рахунок зменшення глибини шліфування. Аналіз показує, що найбільш повне уявлення про фізичну сутність і технологічні можливості шліфування можна одержати на основі залежності (13) двох взаємозалежних між собою параметрів: енергоємності обробки й уточнення, які визначають силову напруженість шліфування в напрямку дії тангенціальної й радіальної складових сили різання.

$\sigma \cdot 10^3, \text{МПа}$



а



б

Рис. 13. Залежності енергоємності обробки  $\sigma$  (а) та уточнення  $\varepsilon$  (б) від глибини шліфування  $t$

Експериментально встановлено, що застосування абразивного круга із двостороннім конічним профілем типу 2П при зубошліфуванні на зазначених вище режимах різання забезпечує стабільно параметр шорсткості обробки  $R_a < 0,6$  мкм. Це відповідає вимогам по шорсткості обробки й підтверджує отримані в розд. 4 теоретичні рішення.

У роботі обґрунтована ефективність застосування сучасної координатно-виміральної машини (КВМ) GLOBAL Perfomance 122210 виробництва італійської фірми DEA (концерн Hexagon) для виміру параметрів точності обробки зубчастих коліс. Установлено, що при цьому скорочується час і підвищується точність і стабільність вимірів, знижується потреба в додатковому контрольному



оснащенні, з'являється можливість виміру тих розмірів, які раніше було не можливо обміряти наявними технічними засобами. Розроблені "Правила користування протоколами КВМ для зубчастих передач", які ураховують різницю в даних між стандартом ISO і діючими Держстандартами, на основі яких розробляється заводська технічна документація. Установлено також, що, використовуючи результати вимірів параметрів зубчастих коліс за допомогою КВМ, можна скоротити строки й підвищити якість налагодження зубошліфувального верстата з метою забезпечення вимог по точності обробки зубчастих коліс. Це зменшує кількість проходів при остаточному шліфуванні й виходжуванні й відповідно знижує до 2-х разів трудомісткість обробки. Установлено, що знімання припуску величиною 0,4 мм може бути виконано за 3 чорнових проходи, 1 чистовий прохід і 1 прохід при виходжуванні. Відповідно до діючої технології зубошліфування обробка виконується за 5 чорнових проходів, 2 чистових і 1...2 проходи при виходжуванні.

Отримані в роботі результати досліджень були також використані при виборі оптимальних умов обробки при зубошліфуванні на верстаті мод. HOFLEER RAPID 1250, який забезпечує шліфування по методу профільного копіювання за рахунок застосування спеціального профільного абразивного круга.

Розроблені операції зубошліфування зубчастих коліс впроваджені в основне виробництво ВАТ ХМЗ "Світло шахтаря" на 4-х зубошліфувальних верстатах з економічним ефектом 170851 гривень на рік. При цьому гарантовано забезпечуються вимоги по якості, точності й шорсткості ( $R_a < 0,6$  мкм) оброблюваних поверхонь зубчастих коліс приводів шахтних конвеєрів, що дозволило підвищити ресурс їхньої роботи до рівня світових виробників аналогічної продукції.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі отриманих нових результатів вирішене актуальне науково-практичне завдання підвищення якості й продуктивності обробки зубчастих коліс приводів шахтних конвеєрів на фінішних операціях на основі вибору оптимальних режимів зубошліфування й характеристик абразивних кругів.

1. Одержала подальший розвиток математична модель визначення температури шліфування й глибини проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі. Установлено, що одночасно зменшити ці два параметри й тим самим підвищити якість обробки можна за рахунок зменшення умовного напруження різання шляхом зниження інтенсивності тертя в зоні різання й підвищення ріжучої здатності круга. Розрахунково-експериментальним шляхом доведено, що в реальних умовах шліфування неможливо зменшити глибину проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі до значення глибини шліфування й видалити на наступному проході порушений (у результаті теплового впливу на попередньому проході) поверхневий шар оброблюваної деталі. Тому основною умовою підвищення якості обробки матеріалів, схильних до утворення температурних дефектів, є зменшення температури шліфування.

2. Установлено, що найменший штучний час обробки для заданої температури шліфування досягається за умови рівності основного й допоміжного часу. Виявлена також незначна зміна штучного часу обробки при зміні кількості проходів кру-

га  $n_1=5...20$ , що свідчить про ефективність знімання припуску за кілька проходів круга. Розроблено методику розрахунку оптимальних режимів зубошліфування з урахуванням обмеження по температурі шліфування. Розбіжність розрахункових і експериментальних даних не перевищує 15 %.

3. Визначено умови одночасного забезпечення вимог по якості й точності оброблюваних поверхонь при зубошліфуванні. Ці умови зводяться до встановлення глибин шліфування, які забезпечують задані значення температури шліфування й пружного переміщення, що виникає в технологічній системі, відповідно при попередньому і остаточному шліфуванні. При цьому вибір оптимального маршруту обробки при остаточному шліфуванні, який забезпечує максимально можливу продуктивність і задану точність обробки, необхідно виконувати з урахуванням уточнення, що реалізується в технологічній системі. Установлено, що для уточнення  $\varepsilon < 2$  доцільно використовувати остаточне шліфування за жорсткою схемою, а для уточнення  $\varepsilon \geq 2$  – шліфування за схемою виходжування.

4. Одержала подальший розвиток математична модель визначення шорсткості поверхні при абразивній обробці з урахуванням імовірнісного характеру участі зерен у різанні, яка базується на порівнянні досяжної й необхідної для формування заданої шорсткості поверхні кількості зерен. Доведено, що все різноманіття кінематичних схем абразивної обробки можна звести до трьох принципових структур шорсткуватого шару оброблюваних поверхонь:  $R_{max}/R_a < 4$ ;  $R_{max}/R_a = 4$ ;  $R_{max}/R_a > 4$ . Це дозволило провести класифікацію структур шорсткуватого шару й установити значення параметрів шорсткості поверхні, які відповідають кожній із структур, що відкриває нові технологічні можливості пошуку ефективних шляхів зменшення шорсткості поверхні.

5. Розрахунково-експериментальним шляхом установлено, що формування шорсткості поверхні при шліфуванні відбувається внаслідок імовірнісної участі зерен у різанні і механічного руйнування вершин мікронерівностей від їхнього контакту з ріжучими зернами й зв'язкою інструмента. Доведено, що процес формування шорсткості поверхні з позиції імовірнісної участі зерен у різанні визначає відношення відстані від лінії впадин до середньої лінії профілю та параметра шорсткості  $R_a$ , а з позиції руйнування вершин мікронерівностей від дії механічних навантажень при обробці – відношення  $R_{max}/R_a > 4$ , яке залежить від механічних характеристик оброблюваного матеріалу.

6. Теоретично обґрунтовані можливості зменшення шорсткості поверхні при шліфуванні кругом із двостороннім конічним профілем. Показано, що ефект обробки досягається внаслідок збільшення умовного радіуса шліфування. Доведена ефективність зменшення шорсткості поверхні шляхом переходу від шліфування периферією круга до шліфування торцевим і конусним кругами, які використовуються при зубошліфуванні.

7. Проведено комплексну експериментальну оцінку вірогідності теоретичних рішень. Доведено, що з підвищенням ріжучої здатності круга (застосовуючи високопористі абразивні круги) можна здійснити знімання заданого припуску 0,4 мм при зубошліфуванні за 4 проходи й збільшити швидкість обертання круга з 30 до 40 м/с, знижуючи до 2-х разів трудомісткість обробки й гарантовано виключа-

ючи утворення припікань і мікротріщин на оброблюваних поверхнях. Це свідчить, по-перше, про підвищення продуктивності обробки, по-друге, про можливість реалізації встановленого теоретично найменшого штучного часу обробки для заданої температури шліфування.

8. Установлено, що застосування сучасної координатно-виміральної машини GLOBAL Perfomance 122210 (Італія) зменшує час і підвищує точність виміру параметрів зубчастого колеса. Це дозволяє виконувати якісне налагодження зубошліфувального верстата при остаточному шліфуванні й виходжуванні, забезпечити необхідну точність і шорсткість поверхні ( $R_a < 0,6$  мкм) і зменшити загальну кількість проходів і трудомісткість обробки.

9. На основі одержаних результатів досліджень розроблені й впроваджені в основне виробництво ВАТ ХМЗ “Світло шахтаря” ефективні операції зубошліфування, які забезпечують високоякісну бездефектну обробку зубчастих коліс приводів шахтних конвеєрів. Економічний ефект від впровадження склав 170851 гривень на рік.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Новиков Ф.В. Определение оптимальной структуры и параметров операции круглого наружного врезного шлифования / Ф.В. Новиков, А.Н. Ковальчук, В.В. Нежебовский // Вісн. Харків. нац. техн. ун-ту сільськ. госп-ва ім. Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ. – 2008. – Вип. 68. – С. 24-33.

2. Гасанов М.И. Определение условий повышения эффективности процесса шлифования / М.И. Гасанов, В.В. Нежебовский, А.В. Черненко // Вісн. НТУ”ХП”. Зб. наук. пр. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХП”. – 2008. – № 22. – С. 8-12.

3. Ковальчук А.Н. Расчет и анализ шероховатости поверхности при алмазном шлифовании / А.Н. Ковальчук, Р.А. Бережной, В.В. Нежебовский // Вісн. НТУ”ХП”. Зб. наук. пр. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХП”. – 2009. – № 2. – С. 60-67.

4. Нежебовский В.В. Технологическое обеспечение надежности изготовления деталей машин / В.В. Нежебовский // Вісн. Харків. нац. техн. ун-ту сільськ. госп-ва ім. Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ. – 2009. – Вип. 80. – С. 136-142.

5. Нежебовский В.В. Определение технологических возможностей уменьшения шероховатости поверхности при абразивной обработке / В.В. Нежебовский // Наук. пр. Донецьк. нац. техн. ун-ту. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ. – 2009. – Випуск 6 (154). – С. 64-71.

6. Нежебовский В.В. Выбор оптимальных условий шлифования по критерию шероховатости поверхности / В.В. Нежебовский // Вісн. Харків. нац. техн. ун-ту сільськ. госп-ва ім. Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ. – 2009. – Вип. 81. – С. 151-158.

7. Нежебовский В.В. Закономерности формирования шероховатости поверхности при абразивной обработке и условия ее уменьшения / В.В. Нежебовский // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ “ХПИ”. – 2009. – Вып. 76. – С. 126-132.

8. Нежебовский В.В. Классификация структур шероховатого слоя поверхностей деталей, формируемых при абразивной обработке / В.В. Нежебовский // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь. – 2009. – Вып. 11. – С. 256-263.

9. Новиков Ф.В. Теоретическое обоснование путей уменьшения температуры при шлифовании / Ф.В. Новиков, В.В. Нежебовский, А.Н. Ковальчук, Е.И. Иванов // Вісн. НТУ“ХП”. Зб. наук. пр. Тематичний випуск: Технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХП”. – 2010. – № 25. – С. 83-91.

10. Ковальчук А.Н. Эффективность применения координатно-измерительной машины GLOBAL PERFORMANCE 122210 для измерения деталей зубчатых передач / А.Н. Ковальчук, В.В. Нежебовский // Вісн. Харків. нац. техн. ун-ту сільськ. госп-ва ім. Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ. – 2010. – Вип. 101. – С. 214-225.

11. Новиков Ф.В. Оптимизация параметров режима шлифования зубчатых колес / Ф.В. Новиков, В.В. Нежебовский // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь, 2010. – Вып. 12. – С. 56-62.

12. Новиков Ф.В. Аналитическое определение параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке / Ф.В. Новиков, В.В. Нежебовский // Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении: материалы науч.-техн. конф., Одесса – Киев: АТМ України. – 2009. – С. 140-144.

13. Нежебовский В.В. Повышение эффективности технологии изготовления зубчатых передач / В.В. Нежебовский // Труды 15-й Междунар. науч.-техн. конф. Физические и компьютерные технологии. – Харьков: ХНПК “ФЭД”. – 2009. – С. 274-277.

14. Нежебовский В.В. Физические условия формирования структур шероховатого слоя обрабатываемой поверхности / В.В. Нежебовский // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф. – Курск: Курск. гос. техн. ун-т. – 2010. – С. 277-282.

15. Ковальчук А.Н. Повышение надежности работы редукторов шахтных конвейеров / А.Н. Ковальчук, В.В. Нежебовский // Труды 16-й Междунар. науч.-техн. конф. Физические и компьютерные технологии. – Харьков: ХНПК “ФЭД”. – 2010. – С. 99-105.

16. Пат. 86309 Україна, В 65 G 19/00. Тяговый орган дволанцюгового скребкового конвеєра / Бережний Р.А., Висоцький Г.В., Ковальчук О.М., Леусенко А.В., Нежебовський В.В., Поволоцький В.М., Сукач С.А. – № 200510385; заявл. 19.09.2007; опубл. 10.04.2009, Бюл. № 7.

**Нежебовський В.В. Технологічне забезпечення якості обробки зубчастих коліс приводів шахтних конвеєрів на операціях зубошліфування.** – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування. – Одеський національний політехнічний університет, Одеса, 2011.

У роботі аналітично описані основні параметри теплового процесу при зубошліфуванні й визначені оптимальні режими різання з урахуванням обмеження по температурі шліфування. Розрахунково-експериментальним шляхом доведено, що при шліфуванні неможливо зменшити глибину проникнення тепла в поверхневий шар оброблюваної деталі до значення глибини шліфування й видалити на наступному проході порушений поверхневий шар оброблюваної деталі. Тому ос-

новною умовою підвищення якості обробки матеріалів, схильних до утворення температурних дефектів, є зменшення температури шліфування. Теоретично визначені нові умови підвищення точності обробки при зубошліфуванні, які складаються у встановленні кількості проходів круга залежно від величини уточнення, що реалізується при шліфуванні. Аналітично описані закономірності знімання припуску й формування шорсткості поверхні при шліфуванні з урахуванням імовірнісного характеру участі зерен у різанні й умов руйнування вершин мікронерівностей обробленої поверхні, на цій основі проведена класифікація структур шорсткуватого шару поверхонь і обґрунтована ефективність застосування кругів із двостороннім конічним профілем при зубошліфуванні. Теоретичні рішення підтверджені експериментально, розбіжність розрахункових і експериментальних даних в межах 15 %. Установлено, що застосування оптимальних режимів шліфування й характеристик кругів дозволяє до 2-х разів збільшити продуктивність обробки й виключити утворення припикань та мікротріщин на оброблюваних поверхнях. Це дозволило розробити й впровадити у виробництво ефективні операції зубошліфування, які забезпечують високоякісну бездефектну обробку зубчастих коліс приводів шахтних конвеєрів.

**Ключові слова:** зубошліфування, абразивний круг, якість обробки, шорсткість поверхні, температура шліфування.

**Нежебовский В.В. Технологическое обеспечение качества обработки зубчатых колес приводов шахтных конвейеров на операциях зубошлифования. – Рукопись.**

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения. – Одесский национальный политехнический университет, Одесса, 2011.

Диссертация посвящена разработке эффективных операций зубошлифования зубчатых колес приводов шахтных конвейеров на основе научно обоснованного выбора оптимальных режимов шлифования и характеристик абразивных кругов. В работе теоретически доказано, что добиться существенного повышения качества обработки при шлифовании на основе одновременного уменьшения температуры шлифования и глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали можно исключительно за счет уменьшения энергоемкости обработки путем снижения интенсивности трения в зоне резания и повышения режущей способности круга.

Теоретически установлено, что при условии равенства основного и вспомогательного времени обработки имеет место экстремум (минимум) штучного времени в зависимости от количества проходов круга для заданной температуры шлифования. Это позволило произвести расчет оптимальных параметров обработки при многопроходном шлифовании, включая количество проходов круга, глубину шлифования и скорость детали.

Теоретически определены новые условия повышения точности обработки при зубошлифовании, состоящие в установлении количества проходов круга в зависимости от величины уточнения, реализуемого при шлифовании.

В работе получила дальнейшее развитие математическая модель определения шероховатости поверхности при абразивной обработке, основанная на сравнении достигаемого и необходимого для формирования заданной шероховатости поверхности количества зерен с учетом их вероятностного характера участия в резании и условий разрушения вершин микронеровностей обработанной поверхности от контакта с режущими зернами и связкой инструмента. Это позволило произвести классификацию структур шероховатого слоя поверхностей, формируемых при абразивной обработке, и научно обоснованно подойти к выбору оптимальных условий обработки с учетом ограничения по шероховатости поверхности. С этих позиций аналитически описаны закономерности съема припуска и формирования шероховатости поверхности при шлифовании кругом с двухсторонним коническим профилем и обоснована эффективность применения данного круга на операции зубошлифования.

Проведены экспериментальные исследования параметров качества и производительности обработки, позволившие проверить и уточнить полученные теоретические решения. Экспериментально установлено, что применение кругов с повышенной режущей способностью при зубошлифовании стали 18ХГН2МФБ твердостью HRC 57...63 позволяет съем заданного припуска 0,4 мм осуществить за 4 прохода и увеличить скорость круга с 30 до 40 м/с. Это хорошо согласуется с полученными теоретическими решениями и обеспечивает увеличение производительности обработки до 2-х раз при гарантированном исключении образования прижогов и микротрещин на обрабатываемых поверхностях. Установлено, что расхождение расчетных и экспериментальных данных находится в пределах 15%.

Расчетно-экспериментальным путем доказано, что в реальных условиях шлифования фактически невозможно уменьшить глубину проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали до значения глубины шлифования и удалить на последующем проходе нарушенный (в результате теплового воздействия на предыдущем проходе) поверхностный слой обрабатываемой детали. Поэтому основным условием повышения качества обработки материалов, склонных к образованию температурных дефектов, является уменьшение температуры шлифования.

Показано, что применение современной координатно-измерительной машины GLOBAL Perfomance 122210 (Италия) существенно снижает время и повышает точность измерения параметров зубчатого колеса. Это позволяет производить качественную наладку зубошлифовального станка при окончательном шлифовании и выхаживании, обеспечивая таким образом требуемую точность и шероховатость поверхности ( $R_a < 0,6$  мкм) и снижая общее количество проходов и трудоемкость обработки до 2 раз. На основе полученных результатов исследований разработаны и внедрены в производство эффективные операции зубошлифования, обеспечивающие высококачественную бездефектную обработку зубчатых колес приводов шахтных конвейеров и позволяющие повысить ресурс их работы до уровня мировых производителей аналогичной продукции.

**Ключевые слова:** зубошлифование, абразивный круг, качество обработки, шероховатость поверхности, температура шлифования.

**Nezhebovsky V.V. Technological ensuring of quality of treatment of gears of conveyors' drives for finishing operations.** – Manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.02.08 – engineering technology. – Odessa National Polytechnical University, Odessa, 2011.

The main parameters of the thermal process at gear grinding are described and the optimum cutting conditions, taking into account restrictions in temperature grinding are determined in this work. It is proved by experimentally calculated way that the grinding is virtually impossible to reduce the depth of penetration of heat into the surface layer of the workpiece to the value of grinding depth and remove in the subsequent pass of the damaged surface layer of the workpiece. Therefore, the main condition for increasing the quality of treatment of materials, disposed to the formation of thermal defects, is to reduce the temperature of grinding. New conditions for increasing the accuracy of treatment at gear grinding theoretically are defined which consisting in setting the terms of the number of passes depending on the specification, implemented during grinding. Rules of removal allowance and the formation of surface roughness in grinding are described analytically taking into account the probabilistic nature of the participation of grains in the cutting and conditions of the destruction of the vertices of the treated surface asperities, on this basis, a classification of the structures of the rough surface layer is done and the efficiency of application of circles with two-sided conical profile for gear grinding is proved. It is established that the application of optimal regimes of grinding and characteristics of circles allows up to 2 times to increase in the efficiency of treatment and avoid the formation of burns and microcracks on the treated surfaces.

**Keywords:** gear grinding, abrasive circle, quality of treatment, roughness of surface, temperature of grinding.