

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
„ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

Телегін Олексій Васильович

УДК 621.923

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ПЛОСКОГО  
ТОРЦЕВОГО ШЛІФУВАННЯ ВАЖКООБРОБЛЮВАНИХ  
МАТЕРІАЛІВ ЗА РАХУНОК КІНЕМАТИКИ**

Спеціальність 05.03.01 – процеси механічної обробки,  
верстати та інструменти

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків-2009

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного Національної академії наук України.

Науковий керівник: член-кор. НАН України  
доктор технічних наук, професор,  
**Тарелін Анатолій Олексійович**,  
Інститут проблем машинобудування ім. А.М.  
Підгорного НАН України, м. Харків,  
заступник директора з наукової роботи;

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор,  
**Доброскок Володимир Ленінмирович**,  
Національний технічний університет "Харківський  
політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки  
України, м. Харків, кафедра інтегрованих технологій  
машинобудування ім. М.Ф. Семка;

кандидат технічних наук  
**Пасічний Олег Олегович**,  
Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН  
України, м. Київ

Захист відбудеться «14» травня 2009 р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.12 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий «10» квітня 2009 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Пермяков О. А.

## **ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ**

**Актуальність теми.** У сучасних умовах розвитку машинобудування України найважливішим фактором успішної діяльності підприємств є підвищення якості, зниження енергоємності, ресурсоємності й собівартості продукції. У виробництві авіаційних двигунів й енергетичних установок ці фактори нерозривно пов'язані з інтенсифікацією механічної обробки деталей й елементів проточних частин з важкооброблюваних матеріалів (ВОМ), яка в значній мірі складається з операцій шліфування.

Останні досягнення теорії впливу технологічних середовищ на процеси абразивного диспергування матеріалів показали, що ефективним напрямом удосконалення абразивної обробки є створення нових способів шліфування, за яких забезпечуються умови для максимального прояву фізичних явищ, що сприяють зниженню міцності оброблюваного матеріалу. З таких явищ варто виділити адсорбційно-пластифікуючий ефект, для якого розроблені вимоги прояву при абразивному диспергуванні металів та виділено кінематичний шлях удосконалення формоутворення для забезпечення цих вимог. Таким чином, перспективним шляхом зниження енергетичних та силових показників шліфування, є удосконалення кінематики формоутворення.

Зниження енергетичних, силових та температурних показників одного із самих теплонапружених видів шліфування – торцевого, за рахунок удосконалення кінематики є актуальною науковою й практичною задачею, та складає напрямок дисертаційних досліджень. Вирішення задачі дасть змогу підвищити ефективність, якість та розширити технологічні можливості плоского торцевого шліфування важкооброблюваних матеріалів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження виконувалися у відділі загальнотехнічних досліджень в енергетиці Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України при виконанні бюджетної теми МОН України: «Створення технологічних та технічних основ підвищення продуктивності та якості шліфування плоских та складних поверхонь деталей із важкооброблюваних матеріалів», (№ Д.Р. 0103U004890) та у рамках програмами НАН України «Розробка науково-технічних основ енергозберігаючих технологій шліфування важкооброблюваних матеріалів» у договорах: «Розробка фізичного подання мікромеханізму формування ядер дислокацій при виникненні пластичного зрушення в умовах впливу різних середовищ та явищ фізичного, хімічного та електрофізичного впливу. Математичне моделювання теплових процесів, що супроводжують шліфування важкооброблюваних матеріалів» (№ Д.Р. 0106U008604), «Розробка способів керування енергоємністю шліфування за допомогою фізичного та математичного моделювання» (№ Д.Р. 0107U008042), «Розробка способів та конструктивних схем пристроїв для високоефективного енергозберігаючого шліфування важкооброблюваних виробів» (№ Д.Р. 0107U008042), в яких здобувач був виконавцем окремих розділів.

**Мета і задачі досліджень.** Метою роботи є підвищення ефективності та виключення теплових дефектів плоского торцевого шліфування важкооброблюваних матеріалів за рахунок удосконалення кінематики

мікрорізання та формоутворення, націленого на зниження енергетичних та силових показників процесу.

Для досягнення мети роботи вирішені такі задачі:

1. Виконано аналіз джерел щодо підвищення ефективності плоского шліфування важкооброблюваних матеріалів. Розглянути методологічні підходи до моделювання й удосконалення кінематики процесів шліфування плоских поверхонь.

2. Створено математичну та 3D геометричну модель системи "оброблювана заготовка – абразивний інструмент". Провести теоретичні дослідження впливу вихідних параметрів на показники процесу.

3. Удосконалено планетарний спосіб шліфування плоских поверхонь і запропоновано пристрої для його реалізації, що забезпечують зниження енергетичних та силових параметрів процесу.

4. Визначено раціональні конструктивно-технологічні параметри і ефективні області процесу плоского торцевого планетарного шліфування з метою досягнення максимальної продуктивності обробки за умови відсутності теплових дефектів.

5. Створено дослідний зразок торцевої планетарно-шліфувальної головки й провести експериментальні дослідження впливу умов обробки та режимів різання на показники процесу плоского торцевого планетарного шліфування важкооброблюваних матеріалів.

*Об'єкт дослідження* – процес шліфування плоских поверхонь важкооброблюваних матеріалів.

*Предмет дослідження* – кінематика мікрорізання й формоутворення при торцевому планетарному шліфуванні плоских поверхонь.

*Методи дослідження.* Робота виконана на основі фундаментальних положень теорії шліфування матеріалів, останніх досягнень теорії впливу поверхнево-активних речовин на процеси абразивного диспергування матеріалів. Методи математичного й комп'ютерного моделювання використані при встановленні закономірностей формоутворення планетарної обробки. Для рішення задачі параметричної оптимізації конструктивних і технологічних параметрів був запропонован метод сканування. При розрахунках і синтезі конструкцій пристроїв використані комп'ютерні технології та сучасне програмне забезпечення. Експериментальні дослідження проведені з використанням розроблених пристроїв, вимірювальної апаратури, методів пірометрії, дюротрії та металографії. При обробці результатів досліджень застосовували методи математичної статистики.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Вперше теоретично визначено кінематику процесу торцевого планетарного шліфування, яка створює можливість поліпшення основних показників та виключення теплових дефектів обробки за рахунок покращення умов роботи зерен шляхом забезпечення неперекриття одиничних зрізів керованої довжини. При цьому:

1. Вперше визначена можливість та отримані закономірності роздільного керування довжиною та взаємним розташуванням одиничних зрізів, розмірами та швидкістю переміщення зони контакту, напрямком мікронерівностей в

умовах удосконаленого торцевого планетарного шліфування шляхом регулювання кута нахилу кругів й співвідношень між швидкостями власного та додаткових обертань кругів, що дозволяє підвищити ефективність обробки.

2. Вперше визначені теоретично та підтверджені експериментально співвідношення між різними складовими рухів торцевого планетарного шліфування, за яких забезпечується зниження енергетичних та силових показників процесу та виключається імовірність виникнення теплових дефектів за рахунок зменшення витрат на утворення нових поверхонь та пластичну деформацію при різанні важкооброблюваних матеріалів.

3. Дістало подальший розвиток визначення закономірностей впливу параметрів елементів систем "оброблювана поверхня – зерно" та "оброблювана заготовка – абразивний інструмент" на показники процесу торцевого планетарного шліфування шляхом математичного та комп'ютерного 2D й 3D геометричного моделювання, що дозволило науково обґрунтовано вибирати схеми та призначати режими обробки.

4. Розроблено принципи створення планетарних шліфувальних пристроїв, які полягають у встановленні закономірностей впливу кінематичних зв'язків на процес мікрорізання та формоутворення та їх використання при розробці багатошпindelних головок для плоского шліфування важкооброблюваних матеріалів.

**Практичне значення одержаних результатів.** Показано перспективний спосіб енергоресурсозберігаючого бездефектного планетарного шліфування деталей, що виготовляються зі схильних до утворення шліфувальних тріщин та припалин важкооброблюваних матеріалів.

Розроблено кінематичні схеми планетарних шліфувальних пристроїв, які дозволяють реалізувати кінематику й режими, що забезпечують зниження енергетичних та силових показників процесу та виключають імовірність виникнення теплових дефектів. Розроблено схеми чорнового шліфування, групової обробки, а також чистового шліфування за допомогою планетарних шліфувальних пристроїв, при яких забезпечується підвищення ефективності обробки важкооброблюваних матеріалів.

Запропоновано методику визначення області раціональних конструктивно-технологічних параметрів процесу торцевого планетарного шліфування, які забезпечують досягнення максимальної продуктивності з відсутністю теплових дефектів при плоскому шліфуванні важкооброблюваних матеріалів.

Створено дослідний зразок торцевої планетарно-шліфувальної головки. Проведені випробування показали, що забезпечується підвищення продуктивності шліфування в 1,5...2 рази, зниження питомої енергоємності шліфування більше ніж в два рази, зниження температури обробки, зменшення на порядок витрат мастильно-охолоджувальних технологічних середовищ.

Практичні результати роботи використано на ДП ЗМКБ "Івченко-Прогрес" (м. Запоріжжя) при розробці технологічних процесів виготовлення деталей й елементів проточних частин перспективних авіадвигунів й енергетичних установок. Впроваджено технологію торцевого планетарного шліфування плоских поверхонь на виробництві ДП НПКГ "Зоря-Машпроект" (м. Миколаїв) при виготовленні деталей з важкооброблюваних матеріалів

газотурбінних двигунів. Очікуваний економічний ефект від впровадження технології становить 107 тис. грн на рік.

**Особистий внесок здобувача.** Всі наукові положення дисертації, виносяться на захист отримані здобувачем особисто: кінематика торцевого планетарного шліфування, закономірності керування формоутворенням, співвідношення за яких забезпечується поліпшення показників обробки, принципи створення планетарних шліфувальних пристроїв. Експериментальні дослідження виконані разом зі співробітниками кафедри інтегрованих технологій машинобудування НТУ "ХПІ". Постановка задач і обговорення наукових результатів виконані разом із науковим керівником.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертаційної роботи доповідалися на конференціях молодих учених і фахівців "Сучасні проблеми машинобудування" (Харків, 2005 - 2007 рр.); науково-технічному семінарі "Семковські молодіжні наукові читання" (Харків, 2006 р.); 12-й міжнародній науково-технічній конференції "Фізичні та комп'ютерні технології" (Харків, 2006 р.); міжнародних наукових семінарах "Високі технології в машинобудуванні" - "Інтерпартнер" (Харків - Алушта, 2007, 2008 рр.).

У повному обсязі дисертація докладалася на міжнародному науковому семінарі "Високі технології в машинобудуванні" - "Інтерпартнер", засіданні науково-технічної проблемної ради "Теплофізика та енергомашинобудування" Інституту проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, засіданні кафедри "Інтегровані технології машинобудування" ім. М.Ф.Семка НТУ "ХПІ".

**Публікації.** За результатами дисертації опубліковано 13 наукових праць, серед них 8 робіт у фахових виданнях ВАК України, 1 патент на винахід.

**Структура й обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновків, додатків. Повний обсяг дисертації становить 202 сторінки 77 рисунків по тексту, 31 рисунок на 10 сторінках, 17 таблиць по тексту, додатки на 17 сторінках, 122 використаних літературних джерел на 11 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**Вступ.** У вступі обґрунтована актуальність роботи, її зв'язок з науковими програмами, сформульовані мета й завдання досліджень, наведені наукова новизна, апробація результатів досліджень і практична цінність отриманих результатів.

У першому розділі проведено аналіз ефективності процесу плоского торцевого шліфування ВОМ. Розглянуті існуючі методи формалізації й визначення геометричних і кінематичних параметрів процесу одиничного мікрорізання. Показано, що висока інтенсивність теплових процесів є основним чинником, що стримує ріст продуктивності обробки й призводить до виникнення шліфувальних дефектів.

Аналіз робіт відомих учених, таких як Байкалов А. К., Верезуб М. В., Грабченко А.І., Доброскок В. Л., Євсєєв Д. Г., Корчак С. М., Лоладзе Т. М., Маслов Є. М., Резников А. Н., Сілін С. С., Сіпайлов В. А., Узунян М.Д., Федорович В. О., Філімонов Л. М., Філімонов Л. Р., Хрульков В.А., Шальнов В. О., Юнусов Ф. С., Якімов О. В., Якубов Ф. Я., Ящерицин П. І. та

багато ін. показує, що теорія абразивної обробки глибоко пророблена й досить точно описує елементи процесу шліфування. У роботах Сурду М. В. розглянутий мікромеханізм впливу технологічних середовищ на процеси абразивного диспергування матеріалів і розроблені критеріальні умови для забезпечення зниження енергоємності процесу шліфування з урахуванням адсорбційно-пластифікуючого ефекту. Показано, що застосовувані на практиці режими плоского шліфування не забезпечують їхнього виконання. Встановлено, що для підвищення ефективності та якості шліфування плоских поверхонь необхідна зміна умов роботи зерен та умов стружкоутворення шляхом вдосконалення кінематики формоутворення із використанням планетарних шліфувальних пристроїв.

Проведений аналіз дозволив сформулювати мету й задачі досліджень.

**Другий розділ** присвячений методичному забезпеченню теоретичних й експериментальних досліджень процесів торцевого шліфування. У розділі викладена загальна методика проведення досліджень, обґрунтовано вибір оброблюваних матеріалів, характеристик шліфувальних кругів, базового устаткування, реєструвальних приладів. Розроблено методику комп'ютерного моделювання систем "оброблювана поверхня – зерно" та "оброблювана заготовка – абразивний інструмент", яка дозволяє проводити імітаційне 2D й 3D геометричне моделювання формоутворення способу торцевого планетарного шліфування на рівні одиничного зрізу, мікро- і макрорельєфів.

У роботі досліджувалися зразки з нержавіючої сталі 12Х18Н10Т аустенітного класу, хромистої сталі 20Х13 мартенситного класу; титанового  $\alpha$ -сплаву ВТ5 і жароміцного сплаву на нікелевій основі ЖС6К, які належать до ВОМ і мають схильність до засалювання абразивного інструменту й виникнення шліфувальних тріщин, припалін, та найбільш часто використовуються для виготовлення відповідальних деталей. Для шліфування використовували вітчизняні стандартні круги чашкового конічного та циліндричного типу з нормального електрокорунду та карбїду кремнію зеленого, зернистості від 16 до 40, твердості СМ1 та М3, структур 5...7, на керамічних зв'язках. Експериментальні дослідження проводилися на стенді для дослідження процесів торцевого шліфування, зібраному на базі універсального фрезерного верстата 6Т80Ш, на вертикальний шпиндель якого встановлювалася шліфувальна голівка або шліфувальний круг чашкового типу. Обробка зразків здійснювалася із глибиною  $t = 0,01 \div 0,15$  мм, подачею  $S_{det} = 20 \div 1000$  мм/хв. Швидкість різання змінювалася в межах можливостей верстата  $V_p = 6 \dots 14$  м/с. Як МОТС використовували 3...5 %-вий водяний розчин харчової соди  $\text{NaHCO}_3$ , який подавали на оброблювану поверхню в кількості 5...10 мл/хв.

Потужність електропривода шпинделя вимірювалася комплексом К505. Температура оброблюваної поверхні вимірювалася безконтактним способом за допомогою пірометра інфрачервоного випромінювання "Німбус 530", межа вимірів  $500^\circ\text{C}$  з похибкою  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

Зміна фізико-механічних властивостей металу по глибині формованого поверхневого шару оцінювалася зміною мікротвердості, що визначалася за загальноприйнятою методикою за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 на косих шліфах. Значення мікротвердості визначалося як середнє з десяти відбитків.

Результати зазнавали статистичної обробки, визначався довірчий інтервал, з вірогідністю 0,95. Металографічні дослідження проводили за стандартними методиками на мікроскопі МІМ-7. Структура поверхневого шару (ПШ) оброблених зразків досліджувалася на глибину до 1 мм, для чого робили травлення косих шліфів.

**Третій розділ** присвячено моделюванню та теоретичним дослідженням способів торцевого шліфування для встановлення зв'язків між вихідними параметрами та показниками процесів. Наводяться удосконалені способи торцевого планетарно-вихрового (ТПВШ) і торцевого планетарного (ТПШ) шліфувань, в основу кінематики яких покладена можливість регулювання довжиною та взаємним розташуванням одиничних зрізів. Суть розроблених способів полягає в такому.

Рис. 1 Кінематика процесу ТПВШ

При ТПВШ шліфувальний круг установлюють під кутом  $\alpha$  до оброблюваної поверхні (рис. 1) і задають йому обертання  $\omega_1$  навколо першої осі  $O_1-O_1$ , яка співпадає з віссю круга, а також додатково задають обертання  $\omega_2$  навколо другої осі  $O_2-O_2$ , що є перпендикулярною до оброблюваної площини й перетинається з віссю круга, і переносне обертання  $\omega_3$  навколо третьої осі  $O_3-O_3$ , що є перпендикулярною до оброблюваної площини і не перетинається з віссю круга. Це дозволяє регулювати час між повторними актами знімання матеріалу з однієї й тієї самої ділянки оброблюваної поверхні. Зазначене досягається тим, що за певного співвідношення швидкостей обертання  $\omega_1$  й  $\omega_2$  різальне зерно, яке йде вслід за першим, увійде в контакт з оброблюваною поверхнею поза ділянкою, обробленою першим зерном. Співвідношення швидкостей обертання, за якого це забезпечується повинні задовольняти вимогу

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} \leq \frac{l_p - D_k \cdot \cos \alpha \cdot \arccos \left( 1 - \frac{2a_z}{D_k \sin \alpha} \right) \cdot \left( \frac{D_k}{\sin \alpha} - 2H \right) \operatorname{tg} \alpha}{D_k \cdot \arccos \left( 1 - \frac{2a_z}{D_k \sin \alpha} \right) \cdot D_k}. \quad (1)$$

При цьому характер перекриття рядків різання буде залежати від вибору параметрів конструктивних елементів, а його регулювання може здійснюватися шляхом вибору співвідношення швидкостей обертання  $\omega_2$  й  $\omega_3$ , що виражається залежністю

$$\omega_3 \geq \frac{\omega_2 \cdot k \cdot B}{R}, \quad (2)$$

де  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$ , – відповідно швидкості обертання шліфувального круга навколо першої, другої та третьої осей;  $l_p$  – середньостатистична відстань між різальними зернами, розташованими в площині обертання одне за одним;  $l_k$  – довжина дуги контакту інструменту з деталлю;  $D_k$  – діаметр чашкового шліфувального круга;  $\alpha$  - кут перетинання першої й другої осей обертання;  $H$  – відстань від площини різання до точки перетинання першої й другої осей;  $a_z$  –



глибина різання одиничним зерном;  $k \in (0, 2 \dots 1)$  – коефіцієнт перекриття рядків різання;  $B$  – ширина рядка різання;  $R$  – відстань від другої до третьої осі обертання.

Рис. 2 Кінематика процесу ТПШ

Процес ТПШ є спрощеним видом розглянутого процесу ТПВШ. Він забезпечує умови для прояву АПЕ, але не дозволяє регулювати характер перекриття рядків різання. Суть його полягає в наступному. Шліфувальний круг установлюють під кутом  $\alpha$  до оброблюваної поверхні (рис. 2) і задають йому обертання  $\omega_1$  навколо першої осі  $O_1-O_1$ , яка співпадає з віссю круга, а також додатково задають обертання  $\omega_2$  навколо другої осі  $O_2-O_2$ , що є перпендикулярною до оброблюваної площини. Співвідношення швидкостей обертання, повинні задовольняти вимогу

$$\omega_2 \geq \omega_1 \cdot \frac{l_k \cdot \cos \alpha}{l_p \cdot \cos \alpha - l_k} \cdot \frac{D_k}{D_{шл}} \quad (3)$$

Для реалізації способу ТПВШ розроблено два варіанти кінематичних схем торцевих планетарно-шліфувальних головок (ТПШГ), які відрізняються організацією передачі крутних моментів.

Рис. 3 Кінематика схема ТПШГ (варіант 1)

Пристрій (рис. 3) працює в такий спосіб. Корпус 1, зазнаючи обертання від шпинделя верстата 10, приводить у кругове обертання планетарні шпинделі 2, які за рахунок обкатування сонячним колесом 4 жорстко закріплених на шпинделях 2 шестірень 3 приводять їх у планетарне обертання. Крім того, корпус 1 так само приводить у кругове обертання встановлені в ньому сателітні шестірні 6, що, обкатуються по нерухомому сонячному колесу 7, та приводять через шарнірний механізм 8 у планетарне обертання похило встановлені в планетарних шпинделях 2 вали 9. Тим самим різальні абразивні інструменти 5 одержують задане обертання навколо своєї осі. У випадку виконання ТПШГ за другим варіантом різальні абразивні інструменти зазнають заданого обертання навколо власної осі за допомогою складених зубчастих коліс, які одним зубчастим вінцем обкатуються нерухомим сонячним колесом, а за допомогою конічного зубчастого зачеплення через конічні шестірні передають обертання валам. У результаті різальні абразивні інструменти 5 зазнають обертання, відмінного від обертання планетарних шпинделів 2, і ці обертання перебувають у строгому кінематичному взаємозв'язку, що у першому варіанті (див. рис. 3) визначається співвідношенням

$$\frac{z_3/z_4 + 1}{z_1/z_2 + 1} \geq \frac{l_k \cdot R_k \cdot \cos \alpha}{(R_k - H \cdot \sin \alpha)(l_p - l_k)}, \quad (4)$$

де  $z_1, z_3$  – кількість зубів на вінцях сонячних коліс 7 й 4;  $z_2, z_4$  – кількість зубів на вінцях сателітних шестірень 6 й 3;

У другому варіанті коли передача крутного моменту й забезпечення

необхідних співвідношень швидкостей обертання досягається за допомогою тільки зубчастих передач, виконання вимоги (1) забезпечиться при виконанні співвідношення

$$\frac{z_3/z_4 + 1}{(z_1/z_2 + 1)z_6/z_5 + (z_3/z_4 + 1)(z_6/z_5 - 1)} \geq \frac{l_k \cdot R_k \cdot \cos\alpha}{(R_k - H \cdot \sin\alpha)(l_p - l_k)}, \quad (5)$$

де  $z_4$  – кількість зубів на вінцях сателітних шестірень 3;  $z_2$  – кількість зубів на вінці складеного колеса, що входить у зачеплення з нерухомим сонячним колесом;  $z_5$  – кількість зубів зубчастого колеса, що через вал пов'язане з різальним абразивним інструментом;  $z_6$  – кількість зубів на конічному вінці складеного зубчастого колеса.

Рис. 4 Кінематична схема ТПШГ

Пристрій (рис. 4) для реалізації способу ТПШ працює в такий спосіб. Корпус 1, зазнає обертання від шпинделя верстата й приводить у кругове обертання сателіти 5, що, обкатуються по нерухомому сонячному колесу 6, та приводять у планетарне обертання похило встановлені в планетарних шпинделях 2 вали 4. Тим самим різальні абразивні інструменти 3 одержують задане обертання навколо своєї осі, відмінне від обертання корпусу 1, і ці обертання перебувають у строгому кінематичному взаємозв'язку, що визначається співвідношенням

$$\frac{d_1}{d_2} \leq \frac{l_p \cdot \cos\alpha - l_k}{l_k \cdot \cos\alpha} \cdot \frac{D_{шл}}{D_k} - 1, \quad (6)$$

де  $d_1$  – діаметр сателітів 5;  $d_2$  – діаметр нерухомого сонячного колеса 6.

Запропоновані схеми обробки за допомогою ТПШГ для чистового шліфування (рис. 5 а), групової обробки (рис. 5 б), чорнового шліфування зі зніманням припуску будь-якої величини за один або кілька проходів (рис. 5 в). Для всіх розглянутих схем визначена методика розрахунку режимів обробки.

Рис. 5 Схеми шліфування плоских поверхонь із застосуванням ТПШГ  
(всі подачі  $S$  належать заготовці)

Розроблено математичну модель процесу. Визначено межі зміни конструктивних і режимних параметрів. Формалізовано конструктивні й режимні обмеження. Створено 3D геометричну комп'ютерну модель системи "оброблювана заготовка – абразивний інструмент". Проведено імітаційне комп'ютерне моделювання обробки, що включає 2D й 3D геометричне моделювання взаємодії "оброблювана поверхня – зерно" та "оброблювана заготовка – абразивний інструмент" на рівні одиничного зрізу (рис. 6), мікрорельєфу (рис. 7, 8) та макрорельєфу (рис. 9)

Рис. 6 Порівняння форми й розмірів одиничних зрізів, отриманих зернами різної зернистості  
а) №16; б) №25; в) №40; г) №50; д) №63

Рис. 7 Розташування одиничних зрізів, отриманих шліфувальними кругами різної зернистості  
а) №16; б) №25; в) №40; г) №50; д) №63

Визначено ступінь впливу вихідних параметрів на довжину одиничних зрізів  $L_k$ , що виражається експонентно-степенною функцією:

$$L_k = 0,727 e^{0,0129N} \cdot \alpha^{-0,5038} \cdot D_k^{0,4715} \cdot (\omega_1/\omega_2)^{-0,329} \quad (7)$$

Довжина одиничних зрізів становить 1,38...4,06 мм. Кількість сателітів  $n_{cam}$ , у малому ступені впливає на довжину одиничного зрізу  $L_k$ . Так довжина одиничного зрізу  $L_k$  при  $n_{cam} = 3$  на 4,4 %, а при  $n_{cam} = 4$  на 11,7 % більше, ніж при  $n_{cam} = 2$ .

Результати 3D геометричного моделювання мікрорельєфу (рис. 7) доводять, що при співвідношенні швидкостей обертання згідно (1) або (2) одиничні зрізи не перекриваються при однократному проходженні шліфувального круга по обробленій поверхні.

Шляхом 2D геометричного моделювання мікрорельєфу встановлено, що співвідношення  $\omega_3/\omega_2 = 0,1...0,25$ , яке відповідає конструктивним параметрам  $z_3/z_4 = 4...9$  (схема пристрою рис. 3), забезпечує кут перетину строчок різання  $\chi$  близький до  $90^\circ$  (рис. 8а), а коректування співвідношення  $\omega_3/\omega_2$  на  $0,01...0,001$  дозволяє отримувати рівномірне знімання матеріалу у зоні обробці (рис. 8б).

Рис. 8 Картина рядків різання на оброблюваній поверхні при ТПВШ для  $n_{cam} = 2$

За результатами моделювання формоутворення макрорельєфу при чорновій обробці (рис. 9), побудовано діаграму (рис. 10) для визначення похибки обробленої поверхні – увігнутості  $\Delta_i$  в залежності від глибини шліфування  $t$ , відносної ширини обробки  $\bar{H} = H/D_{шл}$  та відносної подачі  $\bar{S} = S_{non}/D_{шл}$ . Це дозволяє призначати режими, які забезпечують задану точності обробки. Показано, що за ширини обробки  $H$  або поперечної подачі  $S_{non}$  менше половини  $D_{шл}$ , увігнутість обробленої поверхні  $\Delta_i$  в 15...20 разів менше глибини  $t$ .

Рис. 9 Картина формоутворення обробленої поверхні при ТПВШ  
( $H > D_{шл}$ )

Рис. 10. Залежність увігнутості  $\Delta$  від глибини шліфування  $t$ , відносної ширини обробки  $\bar{H}$  та відносної подачі  $\bar{S}$

Таким чином, у ході комп'ютерного моделювання підтверджено, що запропонована кінематика планетарних способів забезпечує неперекриття одиничних зрізів та дозволяє роздільно керувати наступними показниками мікрорізання та формоутворення: довжиною та взаємним розташуванням одиничних зрізів, розмірами та швидкістю переміщення зони контакту, напрямком мікро нерівностей. Це досягається шляхом регулювання кута нахилу кругів й співвідношень між швидкостями власного та додаткових обертань кругів. Виявлені особливості формоутворення при планетарному способі обробки плоских поверхонь дозволили науково обґрунтовано вибрати

схеми та призначати режими обробки.

Рис. 11. Кут нахилу  $\Theta$ , нормальна подача  $S_n$ , теоретична продуктивність  $W$  в залежності від глибини шліфування  $t$  та зернистості кругів  $N$  ( $n_{cam} = 2$ )

Досліджено вплив режимів різання на вихідні показники процесу ТПШ. На рис. 11 представлені отримані залежності на прикладі шліфувального пристрою з двома сателітами.

У **четвертому розділі** викладена оптимізація конструктивних і технологічних параметрів процесу ТПШ для досягнення максимальної продуктивності  $W$  і забезпечення відсутності шліфувальних дефектів, викликаних тепловим фактором. Оскільки якість одержуваної поверхні досягається самою кінематикою мікрорізання й буде забезпечуватися завжди при штатному протіканні процесу, то це дозволяє звести двокомпонентну задачу (якість поверхні + продуктивність) до однокомпонентної за критерієм продуктивності  $W$ .

Для дослідження процесу досліджено моделюючий алгоритм, імітаційну модель процесу, яка включає систему співвідношень для розрахунку параметрів обробки й моделюючий алгоритм, що забезпечує правильне функціонування системи.

Для пристроїв, які реалізують процеси ТПШ конструктивними варійованими параметрами є:  $\alpha$  – кут нахилу чашкових шліфувальних кругів;  $D_k \times d_k$  – розмір чашкових шліфувальних кругів;  $n_{cam}$  – кількість сателітних шпинделів. Для схеми врізного шліфування (див. рис. 5 б) режимними варійованими параметрами будуть  $n_e$  – швидкість обертання голівки;  $S_n$  – величина нормальної подачі. Також задача включає різні конструктивні й режимні обмеження.

Рис. 12 Конструктивно - технологічна діаграма.

Залежність продуктивності  $W$  і режимних параметрів  $\omega_e$  й  $S_n$  від основних конструктивних параметрів  $D_k \times d_k$ ,  $\alpha$ ,  $d_1/d_2$  для  $N=63$ ,  $n_{cam} = 2$  з урахуванням обмежень  $\omega_e \leq 314$  рад/с,  $V_p \leq 30$  м/с і  $0,3 \leq d_1/d_2 \leq 3,0$

Отримана діаграма конструктивно-технологічних параметрів (рис. 12) дозволяє сумісно враховувати конструктивні й технологічні параметри й обмеження. Відповідно до побудованих діаграм параметри оптимальних точок для різних конструктивів  $n_{cam} = 2, 3, 4$  зведені в табл. 1

Таблиця 1– Рациональні параметри та показники процесу ТПШ

$D_k \times d_k$ , мм	Параметри процесу	Кількість сателітів		
		$n_{cam} = 2$	$n_{cam} = 3$	$n_{cam} = 4$
150×130	$W_{MAX}, \times 10^3$ , мм <sup>3</sup> /хв	121	186	252
	$\alpha_{opt}$ °	18,4°	17,4°	16,1°
	$d_1/d_{2opt}$	0,3	0,3	0,3
	$n_e$ , об/хв	1613	1518	1375
	$S_n$ , мм/хв	13,22	18,67	22,54

125×88	$W_{MAX}, \times 10^3, \text{ мм}^3/\text{ХВ}$	217	331	414
	$\alpha_{opt}^\circ$	15,2°	14,4°	13,4°...15,3°
	$d_1/d_{2opt}$	0,3	0,3	0,3...0,57
	$n_6, \text{ об}/\text{ХВ}$	1925	1805	1500
	$S_n, \text{ мм}/\text{ХВ}$	15,78	22,19	24,6
100×80	$W_{MAX}, \times 10^3, \text{ мм}^3/\text{ХВ}$	98,2	133	149
	$\alpha_{opt}^\circ$	12,1°	11,5°...13,6°	10,6°...16,8°
	$d_1/d_{2opt}$	0,3	0,3...0,62	0,3...1,3
	$n_6, \text{ об}/\text{ХВ}$	2387	2000	1500
	$S_n, \text{ мм}/\text{ХВ}$	19,56	24,6	24,6
80×65	$W_{MAX}, \times 10^3, \text{ мм}^3/\text{ХВ}$	92	101	113
	$\alpha_{opt}^\circ$	9,6°	9,1°...14,9°	8,5°...18,8°
	$d_1/d_{2opt}$	0,3	0,3...1,31	0,3...2,24
	$n_6, \text{ об}/\text{ХВ}$	2953	2000	1500
	$S_n, \text{ мм}/\text{ХВ}$	24,2	24,6	24,6
50×40	$W_{MAX}, \times 10^3, \text{ мм}^3/\text{ХВ}$	40,5	43,5	48,5
	$\alpha_{opt}^\circ$	5,9...11,05°	5,6°...16,6°	5,2...14,6°
	$d_1/d_{2opt}$	0,3...1,62	0,3...3	0,3...3
	$n_6, \text{ об}/\text{ХВ}$	3000	2000	1500
	$S_n, \text{ мм}/\text{ХВ}$	24,6	24,6	24,6

**П'ятий розділ.** У розділі представлено конструкцію дослідної ТПШГ (рис. 13), яка була спроектована за раціональними конструктивними параметрами ( $D_k \times d_k = 50 \times 40$ ,  $\alpha = 11^\circ$ ,  $d_1/d_2 = 1,62$ ), отриманими у розділі 4.

Рис. 13 Пристрій і конструкція експериментальної ТПШГ

Наведено результати експериментальних досліджень умов обробки й режимів різання торцевого планетарного шліфування, торцевого переривчастого й торцевого шліфування на продуктивність, силові, енергетичні, температурні показники процесу, шорсткість обробленої поверхні та стан формованого ПШ.

*Особливості стружкоутворення при ТПШ.* При дослідженні стружок, отриманих при ТПШ для всіх матеріалів і на всіх режимах, виділена значна кількість спіралеподібних стружок, аналогічних формі зливальних стружок, одержуваних при лезовій обробці. Стружки, відібрані в процесі торцевого та ТПШ стали 12Х18Н10Т, показані на рис. 14.

Рис. 14 Форма стружок при шліфуванні сталі 12Х18Н10Т

Дослідження мікрофотографій показує, що при ТПШ стружки срібlistого кольору з характерним блиском, що свідчить про невисоку температуру стружкоутворення. При цьому їхня довжина значно більша, ніж при торцевому шліфуванні, а товщина й усадка значно менші. Мінімальна усадка стружок показує невисокий вплив адгезійної складової тертя стружки з різальною поверхнею абразивних зерен. Із цього випливає, що процес стружкоутворення при ТПШ якісно відрізняється від стружкоутворення при традиційних видів шліфування.

*Енергосилові показники.* У таблиці 2, 3 та на рисунках 15, 16 наведені показники шліфування різних матеріалів. Зразки з різних матеріалів відрізнялися за формою й жорсткістю, тому порівняння коректно в межах однієї таблиці.

Таблиця 2 – Енергосилові показники шліфування 12Х18Н10Т

Показник	Вид шліфування			
	ТПШ	ТПШ + МОТС	переривчасте	торцеве
$W, \text{мм}^3/\text{хв}$	< 1728	< 1728	< 1160	< 945
$\bar{Q}_{\text{уд}} \text{мм}^3/\text{Н} \cdot \text{хв}$	56,2...205	283...576	82,8...133,6	36,3...75,7
$\bar{N}_{\text{эф}} \text{Вт}/(\text{мм}^3/\text{хв})$	7,3...26,7	2,6...11,2	31,2...37,4	62,4...67,6
$V_p, \text{м/с}$	11,9...13,6		6,8...7,4	11,3...13,6
$\Delta\tau_p, \text{с}$	$(2,2...2,6) \cdot 10^{-2}$		$(4,5...4,9) \cdot 10^{-4}$	$(2,0...2,6) \cdot 10^{-4}$

Наведена питома інтенсивність  $\bar{Q}_{\text{уд}}$  ТПШ широких зразків з 12Х18Н10Т у 2,5...4 разів вище торцевого. Застосування малої кількості МОТС доводить це співвідношення до 4...6 разів. Енергоємність  $\bar{N}_{\text{эф}}$  ТПШ 12Х18Н10Т у 1,5...2, а із застосуванням МОТС в 3,5...5 разів нижче показників торцевого.

Рис. 15. Залежність енергоємності  $\bar{N}_{\text{эф}}$  від продуктивності  $W$  шліфування ВОМ

Рис. 16. Залежність питомої тангенціальної сили  $\bar{P}_z$  від продуктивності  $W$  шліфування ВОМ

За енергосиловими показниками переривчасте шліфування займає проміжне положення між торцевим і ТПШ. Його питома інтенсивність  $\bar{Q}_{\text{уд}}$  до 3 разів нижче ТПШ, а енергоємність  $\bar{N}_{\text{эф}}$  до 2 разів вище показників ТПШ. Це підтверджує, що основний вплив на енергосилові параметри диспергування здійснює прояв АПЕ, а не переривчастий характер протікання процесу.

Таблиця 3 – Енергосилові показники шліфування ВОМ

Показник	Вид шліфування	
	торцеве	ТПШ
	20Х13	
$W, \text{мм}^3/\text{хв}$	< 208	< 277
$\bar{Q}_{\text{уд}} \text{мм}^3/\text{Н} \cdot \text{хв}$	23,3...38,2	58,7...117,3
$\bar{N}_{\text{эф}} \text{Вт}/(\text{мм}^3/\text{хв})$	63,2...72,0	12,8...19,2
	ВТ5	
$W, \text{мм}^3/\text{хв}$	< 176	< 454
$\bar{Q}_{\text{уд}} \text{мм}^3/\text{Н} \cdot \text{хв}$	19,9...28,5	60,1...500,0
$\bar{N}_{\text{эф}} \text{Вт}/(\text{мм}^3/\text{хв})$	65,7...77,8	3,0...25,0
	ЖС6К	
$W, \text{мм}^3/\text{хв}$	< 130	< 200
$\bar{Q}_{\text{уд}} \text{мм}^3/\text{Н} \cdot \text{хв}$	12,4...14,6	26,7...46,7
$\bar{N}_{\text{эф}} \text{Вт}/(\text{мм}^3/\text{хв})$	83,0...88,2	32,1...56,3
$V_p, \text{м/с}$	11,3...13,6	
$\Delta\tau_p, \text{с}$	$(1,98...2,62) \cdot 10^{-4}$	$(2,24...2,56) \cdot 10^{-2}$

Порівняння енергосилових показників ТПШ і торцевого шліфування вузьких зразків з ВОМ із близькою продуктивністю показує, що силове навантаження в 1,6...4,7 разів, а енергоємність в 1,5...3,2 разів вище при торцевому шліфуванні.

*Контактна температура зони обробки.* Як показують результати вимірів, при ТПШ ВОМ контактна температура  $\Theta_k$  підвищується зі збільшенням питомої

продуктивності, досягаючи максимальних значень для ЖС6К – 70,1°C. Застосування малої кількості МОТС зменшує енергоємність й дозволяє знизити контактну температуру на 3...7°C.

*Оброблюваність та коефіцієнт шліфування.* При дослідженні загальних закономірностей протікання процесу ТПШ встановлено: продуктивність обробки ВОМ підвищується в 1,5...2 рази. Застосування малої кількості МОТС (5...10 мл/хв) розширює область стабільного протікання процесу ТПШ і дозволяє підвищити продуктивність за рахунок збільшення поздовжньої подачі. З діаграми (рис. 17) видно, що при ТПШ різниця в оброблюваності досліджених матеріалів менша ніж при традиційному шліфуванні. При ТПШ коефіцієнт шліфування  $K$  змінюється від 26 до 54 та майже не залежить від інтенсивності обробки.

Рис. 17 Порівняння продуктивності  $W$  шліфування різних ВОМ

*Шорсткість обробленої поверхні.* При шліфуванні на режимах максимальної продуктивності  $S_{dem} = 400...1000$  мм/хв кругами 25А 25 СМ1 5К для всіх матеріалів шорсткість відповідала  $Ra$  0,63...1,25, кругами 63С 25 М3 5К –  $Ra$  0,32...0,63. При шліфуванні ЖС6К шорсткість була на один клас краще ніж для інших матеріалів. Зниження подачі деталі  $S_{dem}$  с 400 до 31,5 мм/хв покращило шорсткість на один клас. Таким чином режими ( $t$  й  $S_{dem}$ ) слабо впливають на шорсткість, і не спостерігається зниження шорсткості при виходжуванні. Це пояснюється тим, що довжина дуги контакту й довжина одиничного зрізу при ТПШ на порядок менше, ніж при торцевому шліфуванні.

*Мікротвердість і мікроструктура ПШ.* Аналіз результатів вимірів мікротвердості дозволяє зробити такі висновки. Процес ТПШ незначно впливає на фізико-механічні властивості формованих ПШ, і вони зберігають мікротвердість основного матеріалу зразка. Вплив ТПШ на фізико-механічні властивості проявляється лише для мікрочарів товщиною до 3...5 мкм.

Металографічні дослідження не виявили зміни мікроструктури від поверхні до глибини 1 мм для всіх досліджуваних матеріалів на всіх режимах обробки ТПШ.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу підвищення ефективності та виключення теплових дефектів плоского торцевого шліфування важкооброблюваних матеріалів за рахунок зниження енергетичних, силових та температурних показників процесу шляхом удосконалення кінематики мікрорізання та формоутворення.

1. На підставі аналізу процесу торцевого шліфування встановлено, що забезпечення неперекриття одиничних зрізів керованої довжини покращує умови роботи зерен та дозволяє знизити енергетичні та силові показники процесу стружкоутворення. Визначена кінематика планетарних способів формоутворення, яка забезпечує зазначені умові мікрорізання.

2. Науково обґрунтовано, досліджено й удосконалено високоефективний спосіб торцевого планетарного шліфування, кінематика якого дозволяє роздільно керувати довжиною та взаємним розташуванням одиничних зрізів, розмірами та швидкістю переміщення зони контакту, напрямком мікронерівностей шляхом регулювання кута нахилу кругів й співвідношень між швидкостями власного та додаткових обертань кругів. Визначені теоретично та підтверджені експериментально співвідношення між різними складових рухів торцевого планетарного шліфування, за яких забезпечується зниження енергетичних та силових показників процесу та виключається імовірність виникнення теплових дефектів, за рахунок зменшення витрат на утворення нових поверхонь, пластичну деформацію та нагрів металу при різанні важкооброблюваних матеріалів.

3. Наведено методики математичного й комп'ютерного моделювання цілісної моделі "оброблювана заготовка – абразивний інструмент". За результатами імітаційного 2D й 3D геометричного моделювання встановлено закономірності формоутворення одиничних зрізів та формування картини мікронерівностей, отримано розподіл інтенсивності знімання матеріалу у зоні обробки; визначено величини увігнутості при чорновій обробці. Виявлені особливості формоутворення дозволили науково обґрунтовано вибирати схеми та призначати режими обробки.

4. Теоретично визначено області раціональних конструктивних параметрів планетарних шліфувальних пристроїв і режимів різання, які забезпечують досягнення максимальної продуктивності з відсутністю теплових дефектів. Результати наведено у вигляді діаграм конструктивно-технологічних параметрів з отриманими максимальними значеннями продуктивності й околами точок оптимуму в наочній формі для конструкторів і технологів.

5. Створено дослідний зразок торцевої планетарно-шліфувальної головки з раціональними конструктивними параметрами й експериментально встановлено підвищення ефективності обробки за такими показниками:

- зниження питомої енергоємності в два і більше разів;
- зростання питомої інтенсивності в 2,5 і більше разів;
- підвищення продуктивності обробки в 1,5...2 рази;
- зниження температури зони обробки, що повністю виключає шліфувальні дефекти, викликані тепловим фактором.

Крім того, визначено, що застосування малої кількості МОТС (5...10 мл/хв) розширює область стабільного протікання процесу торцевого планетарного шліфування.

6. Практичні результати роботи використано на ДП ЗМКБ "Івченко-Прогрес" при розробці технологічних процесів виготовлення деталей й елементів проточних частин перспективних авіадвигунів й енергетичних установок. Впроваджено технологію торцевого планетарного шліфування плоских поверхонь на виробництві ДП НПКГ "Зоря-Машпроект" при виготовленні деталей з важкооброблюваних матеріалів газотурбінних двигунів.

7. Результати, отримані в даній роботі, можуть бути використані як теоретичні і технічні основи при створенні енергоресурсозберігаючої технології



високопродуктивного плоского шліфування виробів з важкооброблюваних матеріалів.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Телегин А. В. Торцовое планетарное шлифование / Н. В. Сурду, А. В. Телегин // Різання та інструмент в технологічних системах. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2005. – Вип. 69. – С. 293–300.

Здобувачем отримані аналітичні вирази для визначення кінематичних співвідношень між різними складовими робочих рухів торцевого планетарного шліфування для забезпечення критеріальних вимог прояву АПЕ.

2. Телегин А.В. Влияние режимных параметров на процесс торцевого планетарного шлифования / Н. В. Сурду, А. В. Телегин // Високі технології в машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2007. – Вип.1 (14). – С. 106–113.

Здобувачем досліджено вплив режимів обробки на вихідні показники процесу торцевого планетарного шліфування.

3. Телегин А.В. Повышение эффективности плоского шлифования труднообрабатываемых материалов / Н. В. Сурду, А. А. Тарелин, А. В. Телегин // Сучасні технології у машинобудуванні. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2007. – С. 143–164.

Здобувачем виконано імітаційне моделювання процесу торцевого планетарного шліфування. Встановлено існування систематичної похибки обробки.

4. Телегин А.В. Усовершенствование кинематики процессов плоского шлифования как основа повышения его эффективности. Часть 1 / Н. В. Сурду, А. В. Телегин // Вісник Інженерної академії України. – 2007. – №1. – С. 108–114.

Здобувачем виконано аналіз сучасних шляхів розвитку технологій високопродуктивного шліфування.

5. Телегин А.В. Усовершенствование кинематики процессов плоского шлифования как основа повышения его эффективности. Часть 2 / Н. В. Сурду, А. В. Телегин // Вісник Інженерної академії України. – 2007. – №2. – С. 90–97.

Здобувачем визначена залежність величини систематичної увігнутості оброблюваної поверхні в залежності від режимів обробки.

6. Телегин А. В. Оптимизация конструктивных и технологических параметров торцевого планетарного шлифования / И. Е. Аннопольская, Н. В. Сурду, А. В. Телегин // Різання та інструмент в технологічних системах: – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2007. – Вип. 73. – С. 9–19.

Здобувачем розроблено математичну модель процесу та сформульовано граничні умови.

7. Телегин А. В. Экспериментальное исследование процесса торцевого планетарного шлифования / Н. В. Сурду, А. А. Тарелин, А. В. Телегин // Різання та інструмент в технологічних системах: – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2008. – Вип. 74. – С. 277–286.

Здобувачем проведено експериментальне визначення енергетичних та силових показників обробки.

8. Телегин А.В. Исследование свойств поверхностных слоев жаропрочных материалов, обработанных методом торцевого планетарного шлифования / Н. В.

Сурду, А. А. Тарелин, А. В. Телегин, А. Г. Фистик // Різання та інструмент в технологічних системах: – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2008. – Вип. 75. – С. 379–386.

Здобувачем визначено вплив технологічних параметрів на формування властивостей поверхневого шару важкооброблюваних матеріалів.

9. Пат. 79543 Україна, МПК<sup>7</sup> В24В 7/00. Спосіб шліфування плоских поверхонь і пристрій для його здійснення / Сурду М.В., Телегин О.В., заявл. 16.09.2005; опубл 25.06.07, Бюл. №9.

Здобувачем отримані аналітичні залежності, які забезпечують підвищення продуктивності та якості обробки.

10. Телегин А. В. Торцовое планетарное шлифование // Современные проблемы машиностроения : конференція молодих вчених та спеціалістів 3 - 6 грудня 2005 р. : тези докладів – Харків: ІПМаш НАН України, 2005. – С. 50.

11. Телегин А. В. Исследование эффективности торцового планетарного шлифования // Современные проблемы машиностроения : конференція молодих вчених та спеціалістів 1 - 7 грудня 2006 р. : тези докладів – Харків: ІПМаш НАН України, 2006. – С. 56.

12. Телегин А.В. Высокопроизводительное шлифование плоских поверхностей / Н. В. Сурду, А. В. Телегин // Физические и компьютерные технологии : междунар. научн.-техн. конф., 19 - 20 апреля 2007 г. : труды – Харків: ХНПК “ФЭД”. – 2007. – С. 227–229.

Здобувачем отримано аналітичні вирази для визначення вихідних показників процесу торцевого планетарного шліфування.

13. Телегин А.В. Создание инструмента для торцового планетарного шлифования // Современные проблемы машиностроения : конференція молодих вчених та спеціалістів 29 листопада - 1 грудня 2007 р. : тези докладів – Харків: ІПМаш НАН України, 2007. – С. 52.

## АНОТАЦІЇ

**Телегин А.В. Підвищення ефективності торцевого шліфування важкооброблюваних матеріалів шляхом удосконалювання кінематики процесу. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти. – Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, Харків, 2008.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню ефективності та якості плоского торцевого шліфування важкооброблюваних матеріалів за рахунок удосконалення кінематики мікрорізання та формоутворення, націленого на зниження енергетичних та силових показників процесу. Для цього визначена кінематика процесу торцевого планетарного шліфування яка дозволяє покращити умови роботи зерен шляхом забезпечення неперекриття одиничних зрізів керованої довжини. Розроблено й теоретично обґрунтовано способи торцевого планетарно-вихрового і торцевого планетарного шліфування (ТПШ) та кінематичні схеми різних варіантів торцевих планетарно-шліфувальних голівок для їхнього здійснення. Експериментальні дослідження процесу ТПШ

важкооброблюваних матеріалів 12X18H10T, 20X13, BT5, ЖС6К показали, що процес стружкоутворення якісно відрізняється від стружкоутворення при традиційному шліфуванні, що проявляється як підвищення продуктивності обробки в 1,5...2 рази; зниження питомої енергоємності в два і більше разів, збільшення питомої інтенсивності обробки в 2,5 і більше разів. Виміряна контактна температура при ТПШ не перевищує 70°C, що впливає безпосередньо з рівня енергоємності, який лежить в інтервалі 0,0025...0,05 Дж/мм<sup>3</sup>. Дослідження мікротвердості показують мінімальну зміну фізико-механічних властивостей у мікрошарах на глибині до 3...5 мкм. При ТПШ мікроструктура оброблюваних матеріалів не зазнає змін.

Ключові слова: процес торцевого шліфування, планетарно-шліфувальний інструмент плоскі поверхні, важкооброблювані матеріали, адсорбційно-пластифікуючий ефект, кінематика мікрорізання.

**Телегин А.В. Повышение эффективности процесса плоского торцевого шлифования труднообрабатываемых материалов за счет кинематики. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструменты. – Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, 2008.

Диссертационная работа посвящена повышению эффективности и качества плоского торцевого шлифования труднообрабатываемых материалов за счет усовершенствования кинематики микрорезания и формообразования, нацеленного на снижение энергетических и силовых показателей процесса.

Для этого определена кинематика процесса торцевого планетарного шлифования позволяющая улучшить условия работы зерен путем обеспечения неперекрывания единичных срезов регулируемой длины. Разработаны и теоретически обоснованы способы торцевого планетарно-вихревого и торцевого планетарного шлифования (ТПШ) и кинематические схемы различных вариантов торцевых планетарно-шлифовальных головок для их осуществления. Предложены схемы и методики расчета режимов обработки с помощью ТПШГ, для чистового шлифования, групповой обработки, чернового шлифования со съемом припуска любой величины за один или несколько проходов. Проведено 2D и 3D геометрическое моделирование взаимодействия „обрабатываемая поверхность – зерно“, „обрабатываемая заготовка – абразивный инструмент“ на уровне единичного среза, микро- и макрорельефов. Выявлены особенности формообразования планетарного способа обработки плоских поверхностей. Проведена оптимизация конструктивных и технологических параметров процесса ТПШ для достижения максимальной производительности и обеспечения качества обработки.

Экспериментальные исследования процесса ТПШ труднообрабатываемых материалов 12X18H10T, 20X13, BT5, ЖС6К показали, что производительность обработки растет в 1,5...2 раза; применение малых количеств СОТС (5...10 мл/мин) расширяет область стабильного протекания процесса; отсутствует засаливание кругов и коэффициент шлифования выше, чем при торцевом

шлифовании. Установлено, что удельная энергоёмкость шлифования не зависит от производительности и снижается в 2 и более раз, а удельная интенсивность обработки возрастает в 2,5 и более раз. Контактная температура при ТПШ не превышает 70°C, что вытекает непосредственно из уровня энергоёмкости, которая лежит в интервале 0,0025...0,05 Дж/мм<sup>3</sup>. Процесс стружкообразования качественно отличается от стружкообразования при традиционном шлифовании, что объясняется значительным снижением адгезионной составляющей трения между зёрнами и обрабатываемым материалом. Исследования микротвёрдости показывают незначительное изменение физико-механических свойств в микрослоях на глубине до 3...5 мкм. При ТПШ микроструктура обрабатываемых материалов не претерпевает никаких изменений.

Ключевые слова: процесс торцового шлифования, планетарно-шлифовальный инструмент, плоские поверхности, труднообрабатываемые материалы, адсорбционно-пластифицирующий эффект, кинематика микрорезания.

### SUMMARY

**Telegin O.V. Increasing the effectiveness of face grinding hard-to-machine materials process at the expense of kinematics. – Manuscript.**

Thesis for a Candidat's degree by speciality 05.03.01 – machining processes, machines and tools. – A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems of NAS of Ukraine, Kharkov, 2008.

Thesis is devoted to lowering of power consumption of hard-to-machine materials flat surfaces grinding by improving kinematics of process of face grinding. It has been established and theoretically proved method of face epicyclic-vortical and face epicyclic grinding and kinematic schemes of different variants of face epicyclic-grinding heads for their realization. Schemes and calculation methods of processing modes by means of epicyclic-grinding heads, for finish grinding, group processing, rough-grinding with removal an allowance of any size for one or several passes are offered. The experimental research of influence of conditions of processing and regime parameters of face epicyclic grinding process has shown, that the process of chip formation qualitatively differs from the chip formation in traditional grinding that is shown as: 1,5...2 times increase of flat surfaces processing productivity, two and more times decrease of specific power consumption, 2,5 and more times increase of specific intensity of processing. The measured contact temperature of processing at FEG does not exceed 70°C, that follows directly from the level of power consumption which is in the range of 0,0025...0,05 J/mm<sup>3</sup>. Microhardness researches show the minimum change of physicomaterial properties in microlayers on the depth up to 3...5 microns. At FEG the microstructure of processed materials does not change.

Keywords: flat grinding, hard-to-machine materials, adsorption-plasticization effect, microcutting kinematics, the epicyclic-grinding tool.