

УДК 621.923

Л.П. КАЛАФАТОВА (д-р техн. наук, проф.)

Д.В. ПОКОЛЕНКО (канд. техн. наук)

Донецький національний технічний університет

ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ШЛІФУВАННЯ ВИРОБІВ ІЗ ВАЖКООБРОБЛЮВАНИХ КРИХКИХ НЕМЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ

Зроблено огляд результатів наукових досліджень щодо підвищення ефективності процесу алмазного шліфування виробів типу оболонок із крихких неметалевих матеріалів за рахунок обґрунтованого вибору раціональних вхідних технологічних параметрів процесу обробки. Визначені пріоритетні технологічні засоби позитивного впливу на процес різання для конкретних умов обробки. Окреслені напрями подальших досліджень.

Ключові слова: шліфування, ситали, кераміка, тонкостінні оболонки, вхідні технологічні параметри, динаміка процесу, якість обробки, перспективи досліджень.

Вступ. Сучасне машинобудування відзначається все більшим використанням матеріалів, що мають підвищені фізико-механічні властивості, а саме: міцність, зносостійкість, теплостійкість, корозійну стійкість, радіопрозорість і т. ін. Серед них одне з провідних місць займають крихкі неметалеві матеріали (КНМ) типу технічних ситалів, різних видів кераміки. За показниками оброблюваності різанням такі матеріали відносяться до важкооброблюваних і передбачають у технологічних процесах обробки обов'язкові операції шліфування для забезпечення потрібної, у значній кількості випадків складної форми виробів, і якості обробленої поверхні, які забезпечуються алмазними кругами в основному на металевій зв'язці.

Процес шліфування КНМ супроводжується виникненням дефектного шару обробленої поверхні, який негативно впливає на експлуатаційні характеристики виробів і повинен бути видалений різними способами з наступним модифікуванням і зміцненням поверхневих шарів. Глибина і структура дефектного шару впливають на трудомісткість і собівартість отримання виробів і залежать від фізико-механічних характеристик оброблюваних матеріалів і умов шліфування. Тому проблема високопродуктивної і якісної обробки шліфуванням сучасних важкооброблюваних крихких неметалевих матеріалів є **актуальною** і вирішується за допомогою використання основних технологічних способів підвищення якості обробки виробів машинобудування [1], які включають вибір раціональних видів схем і режимів обробки, характеристик різальних інструментів, властивостей використовуваних технологічних середовищ, динамічного стану елементів технологічної системи різання, та ін.

Розв'язанню проблем, що є складовими частинами рішення завдань підвищення ефективності механічної обробки КНМ важкооброблюваних конструкційних матеріалів, присвячено багато наукових праць та практичних розробок. Наперед за все це обґрунтовується областями використання КНМ в силу їх високих експлуатаційних характеристик: у літако- і ракето будівництві, оборонній, оптичній промисловостях, які передбачають підвищені вимоги до міцності матеріалів і несучої здатності конструкцій, що працюють у широкому діапазоні температур при різних видах і сполученнях механічних і теплових навантажень, у різних агресивних середовищах. Специфіка експлуатації виробів із вказаних матеріалів визначає підвищені вимоги до їх характеристик за міцністю і точністю виготовлення, якістю оброблених поверхонь, яка в значній мірі визначається шорсткістю обробленої поверхні (долі мікрометру) і зведенням до мінімуму дефектів поверхневого шару [2, 3] у вигляді сколів, мікротріщин і т.п.

Огляд робіт, присвячених цим питанням, дозволяє зробити висновок, що більшість з них стосується визначення впливу окремих, розрізнених факторів обробки, а саме параметрів

режиму шліфування, сил різання [4-6], хвилястості, зносу і ступеню відновлення ріжучої спроможності шліфувального круга, його биття [4, 6-8], температурного фактору [9], на вихідні показники процесу шліфування, насамперед, шорсткість обробки і у меншій мірі торкається питань розвитку дефектного шару виробів, хоча його структура визначає експлуатаційні характеристики виробів, а також трудомісткість і собівартість обробки. Крім того, дослідження провадяться з використанням у якості оброблюваних матеріалів (особливо це стосується тонкостінних оболонок складної просторової форми як елементів ракетної техніки) технічних ситалів і кварцевої кераміки [10-14], які відрізняються високою вартістю, складністю технологій заготівельних операцій і механічної обробки.

Розробкою виробів аналогічного класу із ситалів і кварцевої кераміки в Україні займається лише одне підприємство: Костянтинівське державне науково-промислове підприємство «Кварсит» (КДНПП «Кварсит»), з яким Донецький національний технічний університет (ДонНТУ) має багаторічний тісний науково-технічний зв'язок. Виконані дослідження показали, що підвищення ефективності виготовлення виробів із цих конструкційних матеріалів пов'язано з вивченням закономірностей складних багатофакторних процесів їх алмазно-абразивної обробки. Враховуючи особливості процесу шліфування крихких матеріалів, встановлено, що ступінь дефектності поверхні, яка формується, визначається рівнем силової дії на неї при різанні [3] і залежить від двох категорій факторів: перша - фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу (його міцності, твердості, крихкості, похідної дефектності і структури); друга - технологічних параметрів процесу обробки (схеми різання; рівня режиму різання; технологічних і експлуатаційних характеристик різального інструменту; ріжучої спроможності інструменту і ефективності використовуваних способів її відновлення). При чому при обробці різних за фізико-механічними властивостями конструкційних матеріалів змінюються пріоритети використання тих чи інших способів підвищення якості оброблюваної поверхні.

Метою цієї роботи є бажання ознайомити читачів з результатами досліджень наукових співробітників ДонНТУ, виконаних за період 2010-2015 років, у напрямку підвищення ефективності обробки КНМ при дотриманні заданих вимог до якості обробленої поверхні шляхом визначення пріоритетного впливу вхідних параметрів технологічного процесу обробки виробів типу оболонок на процес алмазного шліфування.

Основний зміст роботи. Високі експлуатаційні характеристики виробів із важкооброблюваних матеріалів забезпечуються кінцевими (фінішними) способами обробки, при яких відбувається модифікування у потрібному напрямку фізико-механічних властивостей поверхневих шарів виробів. Обов'язковим підготовчим етапом для вказаних способів є шліфування відповідних поверхонь.

Виконаний авторами роботи значний обсяг наукових досліджень щодо підвищення ефективності алмазно-абразивної обробки КНМ [2, 3,14] дозволив зробити узагальнюючий висновок, що дефектність обробленої поверхні залежить від фізико-механічних характеристик, насамперед міцності і структури оброблюваних матеріалів, з якими пов'язаний рівень напружено-деформованого стану (НДС) зони різання при шліфуванні з різними вхідними параметрами технологічного процесу обробки.

Знаходження рівня НДС зони різання при абразивній обробці є складним науково-технічним завданням, що пов'язано з необхідністю визначення впливу основних характеристик процесу різання на силовий аспект процесу формоутворення, який забезпечує конкретний напружено-деформований стан зони контакту інструмента і виробу. Результати аналізу схеми взаємодії факторів, які визначають процес абразивної обробки (рис.1), свідчать про складність і взаємний зв'язок явищ, що протікають у зоні різання.

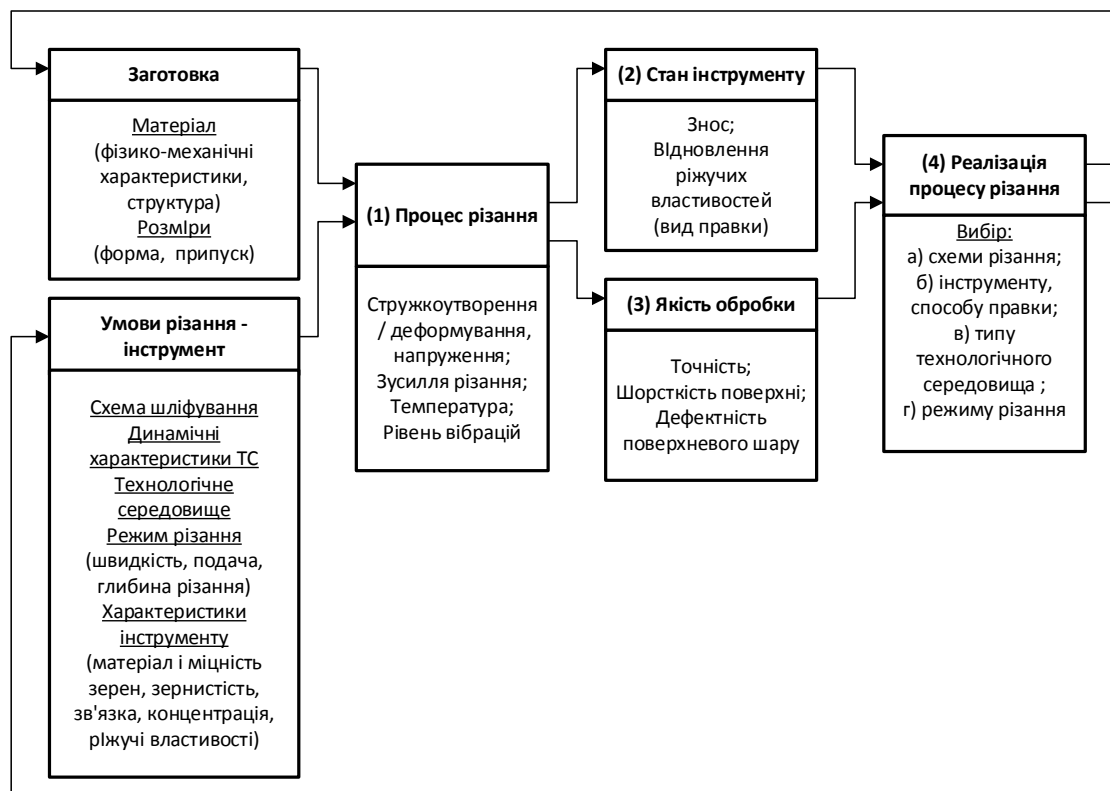


Рис. 1. Схема взаємодії факторів, які визначають процес абразивної обробки КНМ

У попередні роки (період з 1980р. по 2010р.) був проведений комплекс досліджень стосовно впливу на процес різання і стан технологічної системи (ТС) при шліфуванні виробів із ситалів, у тому числі оболонок складної просторової форми (обтічників ракет), таких вхідних параметрів, як схема різання, тип і поверхнева активність мастильно-охолоджуючих середовищ, технологічна характеристика ріжучих інструментів і способи відновлення їх різальної здатності, режими різання [3, 14].

Отримані результати дозволили надалі сформулювати і вирішити завдання підвищення ефективності технологічних процесів алмазного шліфування виробів із ситалу за рахунок їх багатопараметричної оптимізації по критерію мінімуму технологічної собівартості з урахуванням великої кількості технічних обмежень [15, 16].

Для вирішення поставленого завдання була розроблена оптимізаційна модель багатоопераційного процесу плоского алмазного шліфування периферією круга виробів з ситалу АС-418. В якості цільової функції використовувалася вдосконалена залежність технологічної собівартості, виражена через варійовані параметри - параметри режиму шліфування (v , s , t). У якості обмежень враховувалися: характеристики обладнання; стан інструменту - його знос і стійкість; якість сформованої поверхні, а саме, її шорсткість і дефектність при врахуванні впливу на процес обробки рівня сил і температур при різанні. При цьому розміри і глибина проникнення дефектів повинні задовольняти вимогам якості на заключній операції. На проміжних операціях параметри режиму обробки призначалися, виходячи з рівності глибини дефектного шару, внесеного при обробці на даній операції, з глибиною дефектного шару, внесеного на попередній операції. Такий підхід дозволив при вирішенні задачі оптимізації врахувати технологічну спадковість попередньої обробки і оптимізувати кількість і послідовність операцій, необхідних для досягнення необхідної якості [17].

Рівень температур, що виникають при шліфуванні ситалів для розглянутих умов обробки, і вплив температури на дефектність, а так само вплив характеристик мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ (МОТС) на ці явища раніше не досліджувалися. Для

їх використання в якості обмежень проводився ряд досліджень [18, 19]. В результаті були отримані математичні залежності температури і складових сил різання, що виникають при шліфуванні ситалу, від параметрів режиму для різних умов обробки "всух" - без МОТС і з використанням охолодження (табл. 1). У якості МОТС використовувалася рідина наступного складу: 89% води +1% кальцинованої соди+10% індустріальної олії. Аналогічні залежності використовувалися в якості обмежень при вирішенні задачі оптимізації.

Таблиця 1. Математичні залежності температури і складових сили різання від параметрів режиму обробки при шліфуванні з МОТС і «всуху»

Параметри	Обробка без МОТС («всуху»)	Обробка з МОТС
Температура, °C	$\Theta = 12,8 \cdot t^{0,25} \cdot s^{0,55} \cdot v^{0,97}$	$\Theta = 126 \cdot t^{0,44} \cdot s^{0,26} \cdot v^{0,19}$
Сила P_y , Н	$P_y = 2863,7 \cdot t^{0,79} \cdot s^{0,6} \cdot v^{-0,98}$	$P_y = 275 \cdot t^{0,46} \cdot s^{0,31} \cdot v^{-0,29}$
Сила P_z , Н	$P_z = 16,8 \cdot t^{0,9} \cdot s^{0,77} \cdot v^{0,38}$	$P_z = 12,6 \cdot t^{0,12} \cdot s^{0,47} \cdot v^{-0,08}$

Дослідження температури, що виникає під час шліфування ситалів, підтвердили необхідність використання при обробці МОТС з метою зменшення силової дії на оброблювану поверхню і, як наслідок, на її дефектність [19, 20]. На рис. 2, у якості приклада, представлені знімки дефектності зразків ситалу, що викликана процесом шліфування кругом А 250/200 з параметрами режиму $v = 41$ м/с; $s = 4,47$ м/хв; $t = 0,4$ мм. Знімки отримані методом люмінесцентної дефектоскопії у сполученні з хімічним травленням обробленої поверхні зразків до заданого рівня. Дефектна картина зразків ситалу, що наведена на рис. 2, відповідає рівню травлення 100 мкм щодо поверхні шліфування при збільшенні зображення - 200 разів.

Був також встановлений комплексний вплив характеристик МОТС (мастильний і диспергуючий вплив) на рівень температур і сил, що виникають при обробці. Середовища, які володіють однаковими охолоджуючими властивостями, при наявності у їх складі мінімальної кількості відповідних поверхнево-активних добавок, від 2-х до 3-х разів змінюють рівень температур і складових сили різання, що дає підставу вважати характеристики МОТС одним із дієвих чинників впливу на ефективність процесу шліфування КНМ, і використовувати це при вирішенні завдань оптимізації.

Якісна оцінка впливу умов протікання процесу шліфування ситалів на рівень дефектності, викликаної обробкою, дозволила зробити наступний висновок. При шліфуванні ситалів з використанням МОТС диспергуюча властивість середовища по відношенню до оброблюваного матеріалу в більшій мірі сприяє зниженню дефектів, ніж охолоджуюча [19].

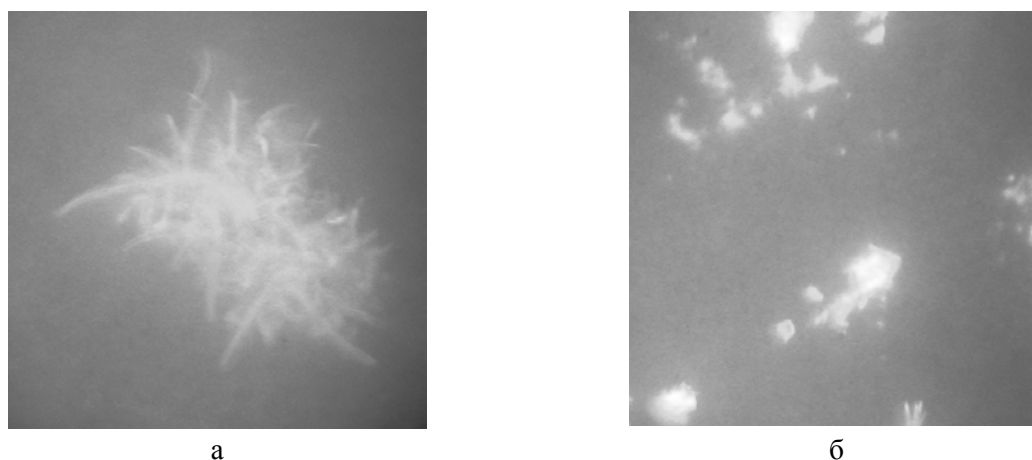


Рис. 2. Дефектність шліфованих зразків ситалу: а - без МОТС: $\Theta = 860^\circ\text{C}$, $P_y = 82$ Н, $P_z = 94$ Н; б - з МОТС: $\Theta = 250^\circ\text{C}$, $P_y = 96$ Н, $P_z = 17$ Н

Рішення задачі оптимізації, пов'язане з дослідженням нелінійної цільової функції з нелінійними обмеженнями, які мають вигляд кусочно-гладкої функції, здійснювалося чисельними методами нелінійного програмування. В результаті розроблена програма, призначена для проектування оптимальних ТП обробки виробів з ситалів в умовах конкретного виробництва, що дозволяє знижувати її технологічну собівартість на 15...20%.

Результати вивчення процесів механічної обробки виробів типу оболонки з ситалу і кераміки і впливу вхідних параметрів ТП на якість обробки дозволили зробити висновок щодо суттєвого впливу на ефективність обробки динамічної сталості технологічної системи (ТС) алмазного шліфування. Тому наступні етапи досліджень були присвячені підвищенню ефективності виробництва антенних обтічників ракет з ситалів (великогабаритних тонкостінних виробів складної просторової форми типу тіл обертання, що експлуатуються у складних умовах) за рахунок вдосконалення технології обробки, обґрунтування її раціональних, з точки зору динамічної стабільності процесу шліфування, умов - послідовності обробки, схеми і режимів шліфування, характеристики ріжучого інструменту.

Вирішення цієї науково-технічної задачі здійснювалося шляхом дослідження впливу технологічних факторів процесу алмазного шліфування обтічників ракет на динамічний стан елементів ТС і, як наслідок, на розвиток дефектного шару в формованій поверхні і точність обробки виробів [20].

Було розроблено експериментально-теоретичну модель розвитку дефектного шару при шліфуванні ситалів з урахуванням впливу силового і динамічного впливів алмазних зерен на оброблювану поверхню на стадіях: ударного контакту одиничного зерна з оброблюваним матеріалом (ОМ) і при переміщенні зерен щодо формованої поверхні, тобто, при шліфуванні. Досліджено картину формування дефектного шару в зразках ситалу при ударній дії на них зерна-індентора, яка показала, що дефектність залежить від рівня кінетичної енергії, що вноситься в поверхневий шар ОМ при ударі, погіршуючись структурно і проникаючи на велику глибину з його зростанням. Моделювання процесу утворення дефектного шару при шліфуванні зразків ситалу при різному рівні динамічних впливів на сформовану поверхню дозволило встановити, що розвиток дефектів обумовлений процесом розгалуження (біфуркацією) тріщин, інтенсивність якого пов'язана з максимальною величиною напружень σ_{\max} , що виникають в ОМ і призводять до його руйнування при різанні. Напружений стан у зоні різання визначається інтенсивністю вібрацій – величиною амплітуди коливань A , які викликані, наприклад, дисбалансом круга як фактором, що викликає вимушені коливання у системі, і величиною нормальної складової сили різання P_y , і може бути описано рівнянням

$$\sigma_{\max} \approx C_1 \cdot A^{0,45} P_y^{0,7},$$

де C_1 - коефіцієнт, отриманий, виходячи із прийнятих припущень, які враховують особливості умов експерименту.

При цьому відзначається інтенсивний розвиток дефектного шару при збільшенні рівня вібрацій: збільшення його глибини, розгалуження тріщин у зразках, шліфованих під час биття круга [21].

Проведений комплекс експериментальних досліджень, спрямованих на визначення ступеня впливу динаміки ТС, зумовленої наявністю дисбалансу круга як фактора, що викликає вимушені коливання в системі, на силові характеристики процесу шліфування і дефектність поверхневого шару виробу при варіації параметрів режиму шліфування підтвердив висунуті теоретичні положення. Встановлено, що найбільший вплив на складові сили різання, особливо на силу P_y , надають глибина різання і подача, що позначається на якості формованого шару,

знижуючи її зі збільшенням P_y . При збільшенні відцентрової сили, яка визначає дисбаланс круга, зростають коливання нормальної складової сили різання, що призводить до періодичної зміни щільності дефектів по глибині шліфованого зразка, і досягає максимальних значень на рівні 150 ... 260 мкм. Наявність биття шліфувального круга (ШК) як фактору додаткового ди-

намічного впливу на оброблювану поверхню, призводить до введення в неї додаткової енергії, що викликає інтенсифікацію розгалуження тріщин на великих глибинах у поверхневому шарі деталі і негативно впливає на міцність виробів з ситалів.

Результати експериментальних досліджень, виконаних в лабораторних і виробничих умовах, підтвердили дані теоретичних досліджень і дозволили встановити найбільш сприятливі поєднання параметрів режиму обробки та стану ШК за рівнем його збалансованості, виходячи із забезпечення необхідної якості оброблюваної поверхні. Резервом підвищення вібростійкості ТС шліфування обтічників і підвищення за рахунок цього їх якості і точності обробки є забезпечення раціональних умов взаємодії ШК і заготовки, які можуть бути забезпечені наступними технологічними способами: вибором обґрунтованих режимів і схем шліфування; розмірів і характеристик шліфувальних кругів; вдосконаленням технології отримання заготовок і конструкції верстатних пристроїв [22, 23]. Ці ж фактори також впливають на точність обробки обтічників, що підтверджено результатами комп'ютерного моделювання процесу їх шліфування та теоретичним аналізом процесу виявлення похибок при обробці антенних обтічників із ситалів. Так для умов зовнішньої обробки виробу (рис. 3) можна зауважити, що урахування раціональної конструкції пристрою як елемента ТС, вносить суттєві зміни у динамічний стан системи (рис. 4), змінивши у 2,5 рази величину радіальних переміщень у системі, що позитивно впливає на точність обробки обтічників.

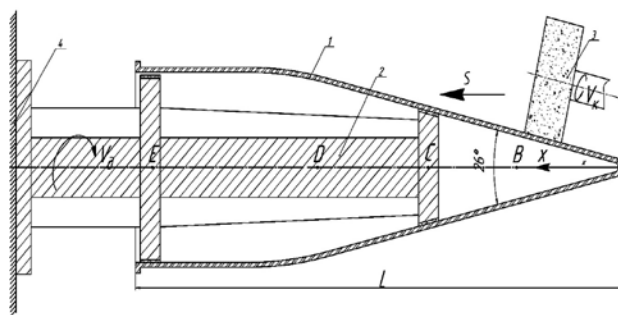


Рис. 3. Схема зовнішньої обробки виробу:
1–заготовка; 2–пристрій; 3 – шліфувальний круг; 4 – шпиндельний вузол верстата

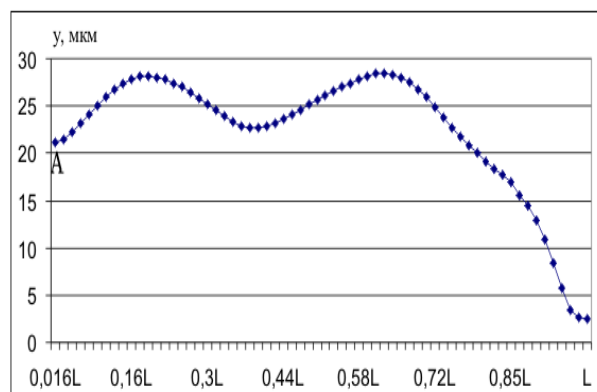


Рис. 4. Радіальні переміщення підсистеми
«пристрій - заготовка» при шліфуванні

Також була вирішена складне науково-технічне завдання щодо забезпечення якості поверхні (по параметру хвилястості) на етапі алмазно-абразивної обробки крупно-габаритних тонкостінних оболонок обертання з ситала шляхом поліпшення динамічних характеристик ТС [24]. Результати аналізу вхідних параметрів технологічного процесу, визначених динамічними характеристиками елементів ТС і режимами глибинного шліфування ситалових оболонок, дозволили зробити висновки про зв'язок між умовами обробки, вібраціями в ТС і хвилястістю зовнішньої поверхні. На підставі цього було розроблено структурну схему взаємозв'язку технологічних факторів, яка лягла в основу математичної моделі ТС алмазно-абразивної обробки. У виробничих умовах були проведені експериментальні вимірювання радіальних коливань шліфувальної головки (див. рис. 3), які дозволили зробити висновки про те, що основними джерелами вібрацій в ТС є змінна жорсткість підсистеми «шпиндель-оправка-заготовка», биття і ограновування шліфувального круга, а також особливості оброблюваної заготовки як тонкостінної оболонки обертання.

Для достатнього математичного опису коливальних процесів під час шліфування ТС представлена як тримасова модель, до складу якої входять підсистеми: «шпиндельний вузол», «оправка-заготовка» і «агрегатна головка-супорт», з'єднані між собою пружними і дисипативними елементами. На підставі цього було розроблено розрахункову схему, обмежену зазначеними підсистемами, які пов'язані між собою зоною контакту при різанні. Зона контакту виділяється в окремий елемент ТС. Пружна система верстата приведена до системи з зосередженими

параметрами і обмежена елементами ТС: шпindelь, оправка-заготовка; агрегатна головка. Параметри коливань оболонки (амплітуда A_o) визначаються відповідно до теорії оболонок і в запропонованій моделі мають періодичний характер [25, 26].

Математична модель ТС шліфування з урахуванням її динамічних характеристик представлена у вигляді системи диференціальних рівнянь другого порядку з постійними коефіцієнтами і дозволяє розрахувати параметри коливань елементів ТС, які описують хвилястість поверхні. Стан поверхні заготовки після обробки є наслідком складного поєднання коливань по декількох напрямках. Координата профілю обробленої поверхні (її хвилястість у поздовжньому напрямку) відповідає виразу:

$$H_{vi} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \left(\omega_n \cdot \left(i \cdot \frac{60}{n_3} \right) + \varphi_n \right),$$

де i - номер обороту заготовки під час обробки; A_n , ω_n , φ_n - відповідно, амплітуда, частота, початкова фаза коливань елемента ТС.

Розрахунок чисельних значень амплітуд коливань при умові зміни характеристик ТС можна зробити за допомогою розробленої комп'ютерної моделі ТС у середовищі візуального моделювання динамічних систем [27].

Адекватність математичної моделі ТС алмазного шліфування була підтверджена в умовах виробництва порівнянням висоти хвилястості, виміряної на профілограмах поверхні після шліфування, і розрахункової, яка визначалась як геометрична сума амплітуд коливань елементів ТС у момент зняття припуску з поверхні заготовки. Запропонований спосіб оцінки рівня коливань елементів ТС під час обробки ситалових оболонок дозволив якісно і з достатньою достовірністю оцінити вплив технологічних параметрів обробки і конструктивних параметрів затискного пристосування на вібрації в ТС і хвилястість сформованої зовнішньої поверхні виробів. Розбіжність розрахункових і експериментальних значень геометричних параметрів поверхні виробу (висоти і кроку хвилястості) не перевищувала 15%.

За результатами досліджень впливу режиму різання на рівень коливань оболонки зроблений висновок про дії кожного параметра режиму на величину A_o . Це забезпечило теоретичні передумови до розробки практичних способів вибору раціональних режимів різання. Для розглянутих умов шліфування (габаритів оболонки, товщини стінки, конструкції оправки) визначено режими різання, при яких зменшення A_o досягає 25-35%. Раціональні конструкції оправок забезпечили підвищення жорсткості і стійкості оболонки під час шліфування до параметричних коливань, що дозволило знизити амплітуду її коливань від 20 до 60%.

Узагальнюючі сказане можна відмітити, що за результатами виконаних теоретико-експериментальних досліджень були видані рекомендації по розробці прогресивних ТП обробки ситалових обтічників, що забезпечують необхідні точність і якість виробів з меншими трудовими витратами, які були впроваджені з позитивним економічним ефектом на Костянтинівському ДНВП «Кварсит».

Напрями наступних досліджень. На даний момент виробу складної просторової форми (тонкі оболонки, наприклад, обтічники ракет) в Україні виробляються із ситалів і кварцової кераміки. Ці матеріали і технології їх обробки були розроблені ще за часів СРСР. У зв'язку з підвищенням вимог до виробів виникла необхідність у розробці нових матеріалів, які мають більш високі тактико-технічні показники з урахуванням раціонального використання високовартісних компонентів для їх виготовлення. Так, наприклад, для виготовлення ситалів необхідні такі компоненти як Al_2O_3 , BaO , Li_2O та інші. Для виготовлення кварцової кераміки необхідні гірничий кристал і небезпечні для людини пропитки на основі формальдегідних смол. Усі ці компоненти купуються за мережами України, здебільше у Російській Федерації. Крім того для виготовлення ситалів необхідно використання вартісної технології скловаріння, відпалу, кристалізації. Використовуваний при цьому спосіб отримання заготовок (центробіжне лиття) забезпечує отримання заготовок з великою товщиною стінки, що вимагає великих обсягів обробки

до необхідних геометричних розмірів. Часто співвідношення товщини стінки заготовки і готового виробу дорівнює трьом, що приводить до нераціонального розходу матеріалів і енергоресурсів.

Тому розробка нових крихких неметалевих матеріалів, які мають необхідні експлуатаційні характеристики при більш сприятливій оброблюваності (перша категорія факторів, що впливають на рівень силових процесів при різанні і, за рахунок цього, на розвиток їх дефектності - див. рис. 1), є одним із перспективних шляхів, який дозволить вирішити завдання підвищення ефективності процесів виготовлення відповідних виробів, що є **актуальним**.

Таким чином одним із важливих наступних науково-технічних завдань стає необхідність створення матеріалів аналогічного класу, які при наявності всіх потрібних експлуатаційних характеристик були би більш дешевими, менш важкооброблюваними (наприклад, різні види ситалокераміки замість ситалів і кварцевої кераміки для виготовлення тонкостінних оболонок складної поверхневої форми), а також оптимізації режимів і умов їх шліфування за методами, що враховують нестаціонарність процесу обробки і можливість позитивного впливу на його протікання шляхом відповідного підбору раціональних значень вхідних параметрів ТП.

Одним із варіантів вирішення цього завдання є розробка такого матеріалу як ситалокераміка літій алюмосилікатного складу, що відповідає всім необхідним експлуатаційним характеристикам виробів. Цей матеріал на стадії виготовлення заготовки дозволяє провадити переробку відходів виробництва ситалів, минаючи вартісні процеси скловаріння і відпалу, а також полегшити механічну обробку. Використання керамічної технології для виготовлення виробів із ситалокераміки дозволить займатися переробкою відходів від склотехнологій, які можуть складати до 60% від загального обсягу використовуваних матеріалів, і дозволить відмовитися від закупок природного газу, який використовується як основний енергоносіє при скловарінні і складає до 30% у складі собівартості готової продукції. Керамічна технологія дозволить також сумістити процес кристалізації і відпалу до одного режиму, що також дозволить зменшити розхід електроенергії. Шляхом добавлення до ситалокераміки інших компонентів можна отримати керовані властивості виробів, такі як відкрита пористість, термостійкість, міцність і радіопрозорість.

Очікується, що шляхом розробки раціональних технологічних процесів обробки ситалокераміки (призначення раціональних схем і режимів механічної обробки, послідовності операцій обробки, відповідного оснащення та інструменту) можна, при адаптації умов механічної обробки згідно з її фізико-механічними характеристиками і похідною структурою, зменшити сформований дефектний шар і водопоглинання матеріалу виробу і, відповідно, підвищити його радіотехнічні параметри.

Для умов обробки КНМ на базі теорій дефектоутворення і руйнування твердих тіл при різанні буде розроблена узагальнююча модель формування дефектного шару, обумовленого процесом різання, яка комплексно враховує можливі модифікації умов обробки і ступінь їх впливу на параметри дефектності. Базою для створення моделі є відомості, отримані теоретико-експериментальним шляхом, щодо впливу на структуру поверхневого шару деталей поряд з пористістю, розмірами кристалів оброблюваного матеріалу, його фізико-механічних характеристик, а також технологічних умов обробки: схеми та режиму шліфування, складу технологічних середовищ, характеристики алмазних кругів та ін., вибір яких треба здійснювати у суворій залежності від потрібної якості виробів і властивостей заготовки. Для цього необхідні знання щодо впливу кожного з перерахованих параметрів та їх сполучень на умови процесу шліфування, серед яких найбільш важливими є силовий, температурний та динамічний аспекти процесу різання, та їх зв'язок із інтенсивністю розвитку порушеного обробкою шару деталей.

Для успішного вирішення проблеми виготовлення якісних деталей із ситалокераміки при мінімальних витратах необхідна розробка прогресивних технологічних процесів механічної обробки керамічних матеріалів. Це потребує проведення досліджень, пов'язаних з вивченням впливу перерахованих факторів на дефектність поверхневого шару, та продуктивність обробки. Тобто, беручи до уваги унікальні властивості ситалокераміки, можна прогнозувати широке використання цього матеріалу у різних галузях техніки, насамперед за все, як одного з основних для виготовлення елементів ракетної техніки (наприклад, обтічників ракет), при умовах вдосконалення технології його механічної обробки.

Бібліографічний список

1. Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г. Суслов – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
1. Калафатова Л.П. Повышение прочности изделий из ситаллов за счет снижения уровня дефектности их поверхностного слоя при алмазном шлифовании / Л.П. Калафатова, Д.В. Поколенко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2013. – № 5. – С. 3-5.
2. Калафатова Л.П. Технологічні основи підвищення ефективності обробки і забезпечення якості виробів із технічних стеклов і ситаллів: дис.. докт. техн. наук: 05.02.08 / Калафатова Людмила Павлівна; Харк. Нац. техн. ун-т «ХПІ». – Х, 2001. – 515 с.
3. Badger Jeffrey. The effect of wheel eccentricity and run-out on grinding forces, waviness, wheel wear and chatter / Jeffrey Badger, Stuart Murphy, Garret O'Donnell // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2011. - doi:10.1016/j.ijmachtools.2011.06.006. – С. 3-26.
4. Venu Gopal A. Selection of optimum conditions for maximum material removal rate with surface finish and damage as constraints in SiC grinding / A. Venu Gopal, P. Venkateswara Rao // International J. of Machine Tools & Manufact. – 2013. – 43. Н. 1327-1336.
5. Huang Han Grinding characteristics of engineering ceramics in high speed regime / Han Huang, Ling Yin // Int. J. Abrasive Technology. – 2007. – V. 1, No. 1. – P. 78-93.
6. Krishna Gopala A. Optimization of surface grinding operations using a differential evolution approach / A. Krishna Gopala // J. Mater. Process. Technol. – 2010. – 183, №2-3. – P.202-209.
7. Глебов В.В. Управление колебательным поведением инструмента при шлифовании хрупких неметаллических материалов / В.В. Глебов, Д.А. Игнатьев, М.Е. Егоров // Труды нижегородского технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2010 – №4(83). – С. 85-92.
8. Kato, Hiroshi Fujii Temperature Measurement of Workpieces in Conventional Surface Grinding / Kato, Hiroshi Fujii // Journal of Manufacturing Science and Engineering MAY. – 2010. – P. 297-303.
9. Анализ соответствия прочности стеклокерамики ОТМ 357 требованиям к конструкции обтекателя / Е. И. Суздальцев, М. Ю. Русин, В.И. Куракин, А.С. Хамицаев // Огнеупоры и техническая керамика. – 2014. – №7. – С. 9-12.
10. Рогов В.А. Особенности управления качеством поверхности при механической обработке стеклокристаллических изделий / В.А. Рогов, Е.И. Суздальцев, М.И. Шкарупа // Стекло и керамика. – 2009. – №12. – С. 5-7.
11. Русин М.Ю. Проектирование головных обтекателей ракет из керамических и композиционных материалов: учебное пособие [для студ. высш. уч. зав.] / М.Ю. Русин. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 64 с.
12. Шкарупа М.И. Повышение эффективности механической и физико-технической обработки деталей типа оболочек вращения из конструкционной керамики: автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук: 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки» / Шкарупа Михаил Игоревич; РУДН – М., 2011. – 23 с.
13. Гусев В.В. Технологічне забезпечення якості обробки виробів із технічної кераміки / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова. – Донецьк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. – 250 с.
14. Поезд С.А. Зниження собівартості алмазно-абразивної обробки крихких неметалевих матеріалів шляхом оптимізації технологічного процесу шліфування: дис. канд. техн. наук: 05.02.08 / Поезд Світлана Андріївна; ДонНТУ. – Донецьк, 2011. – 210 с.
15. Поезд С.А. Оптимизация технологического процесса шлифования ситаллов / С.А. Поезд, Л.П. Калафатова // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь, 2010. – Вип. №111/2010. – С. 75-80.
16. Поезд С.А. Реализация способа рационального распределения припуска по операциям при алмазном шлифовании ситаллов / С.А. Поезд // Труды Донецкого национального технического университета. Серия «Машиностроение». – 2010. – Вип. №7 (167). – С.140-149.
17. Поезд С.А. Влияния охлаждения на температурные и силовые параметры процесса шлифования, а так же на качество поверхности ситаллов при различных режимах резания / С.А. Поезд, Л.П. Калафатова // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем. – 2008. – Вып. №23. – С. 194-201.
18. Поезд С.А. Влияние состава смазочно-охлаждающих технологических сред на тепловые и силовые характеристики процесса шлифования ситаллов / С.А. Поезд, Л.П. Калафатова // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – 2008. — Вип. 5 (139). – С. 30-39.
19. Поколенко Д.В. Підвищення ефективності обробки антенних обтічників із ситаллів за рахунок удосконалення технології алмазного шліфування: дис. канд. техн. наук: 05.02.08 / Поколенко Дмитро Валерійович; ДонНТУ. – Донецьк, 2014. – 194 с.

20. Калафатова Л.П. Определение влияния динамических характеристик процесса шлифования на качество обрабатываемой поверхности изделий из ситаллов / Л.П. Калафатова, Д.В. Поколенко // Сучасні технології в машинобудуванні. Зб. наук. праць НТУ "ХПІ". – 2015. – Вип. 10. – С. 37-46.
21. Калафатова Л.П. Исследование точности формообразования изделий из ситаллов при шлифовании / Л.П. Калафатова, Д.В. Поколенко, Л.Н. Феник // Труды ДонНТУ. Машиностроение. – 2007. – № 4 (124). – С. 96-108.
22. Гусев В.В. Влияние динамического воздействия на формирование структуры дефектного слоя ситалла / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова, Д.В. Поколенко // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Х.: НТУ «ХПИ», 2012. – С. 76-82.
23. Олійник С.Ю. Забезпечення якості обробки тонкостінних ситаллових оболонок шляхом покращення динамічних характеристик технологічної системи шліфування: дис. канд. техн. наук: 05.02.08 / Олійник Світлана Юрійовна; ДонНТУ. – Донецьк, 2014. – 210 с.
24. Гусев В.В. Исследование динамического состояния технологической системы алмазно-абразивной обработки тонкостенных оболочек из ситаллов / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова, С.Ю. Олейник // Вісник СевНТУ. Серія: Машиноприладобудування та транспорт: зб. наук. пр. – 2012. – Вип. 128. – С. 60-67.
25. Гусев В.В. Теоретическое исследование влияния режимов обработки на уровень вибраций при алмазном шлифовании тонкостенных оболочек из хрупких неметаллических материалов / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова, С.Ю. Олейник // Вестник СевНТУ. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – 2013. – Вип. № 139/2013. – С. 57-62.
26. Гусев В.В. Исследование формирования волнистости поверхности при алмазном шлифовании тонкостенных сложно-профильных оболочек вращения из ситаллов / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова, С.Ю. Олейник // Научно-технический журнал. – 2013. – Том 12, № 2. – С. 29-35.

References

1. Suslov, A.G. (2000), *The quality of the surface layer of machine parts*. [Kachestvo poverhnostnogo sloya detaley mashin], Machine building, Moscow, 320 p.
2. Kalafatova, L.P., Pokolenko, D.V. (2013), "Increasing the strength of the glass-ceramics product by reducing the level of defects of the surface layer in diamond grinding", *Hardening technology and coating* [Povyishenie prochnosti izdeliy iz sitallov za schet snizheniya urovnya defektnosti ih poverhnostnogo sloya pri almaznom shlifovanii], Machine building, Moscow, No. 5, pp. 3-5.
3. Kalafatova, L.P. (2001), Technological basis of the defectness of raise of efficiency of machining and provision of the required quality of the articles made of technical glass and cetalls [Tehnologicheskie osnovyi povyisheniya effektivnosti obrabotki i obespecheniya kachestva izdeliy iz tehnicheskikh stekol i sitallov: dis. ...dokt. tehn. nauk], Kharkiv, 515 p.
4. Badger, J., Stuart M., Garret O'D. (2011), "The effect of wheel eccentricity and run-out on grinding forces, waviness, wheel wear and chatter", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, No. 2011.06.006, pp. 3-26.
5. Venu Gopal, A., Venkateswara Rao, P. (2013), "Selection of optimum conditions for maximum material removal rate with surface finish and damage as constraints in SiC grinding", *International Jor. of Machine Tools & Manufact*, No. 43, pp. 1327-1336.
6. Huang H., Yin L. (2007), "Grinding characteristics of engineering ceramics in high speed regime", *Int. J. Abrasive Technology*, V. 1, No. 1, pp. 78-93.
7. Krishna Gopala, A. (2010), "Optimization of surface grinding operations using a differential evolution approach", *J. Mater. Process. Technol.*, V. 183, No. 2-3, pp. 202-209.
8. Glebov, V.V., Ignatjev, D.A., Egorov, M.E. (2010), "Control of the tool vibrational behavior for grinding of brittle nonmetallic materials" [Upravlenie kolebatelnym povedeniem instrumenta pri shlifovanii hрупких nemetallicheskih materialov], *Works of the Nizhny Novgorod Technical University*, No. 4(83), pp. 85-92.
9. Kato, A., Hiroshi, F. (2010), "Temperature measurement of workpieces in conventional surface grinding", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, MAY 2010, pp. 297-303.
10. Suzdalcev, E.I., Rucin, M.U., Kurakin, V.I. (2014), "Analysis of the conformity of strength glass-ceramics 357 OTM to requirements of radome construction" [Analiz sootvetstviya prochnosti steklokeramiki OTM 357 trebovaniyam k konstruksii obtekatel'ya], *Refractory and technical ceramics*, No. 7, pp. 9-12.
11. Rogov, V.A., Suzdalcev, E.I., Shkarupa M.I. (2009), "Features of surface quality control in machining glass-ceramic products" [Osobennosti upravleniya kachestvom poverhnosti pri mehanicheskoy obrabotke steklokrystallicheskih izdeliy], *Glass and ceramics*, No. 12, pp. 5-7.

12. Rucin, M.U. (2012), *Projecting of head domes of rocket of ceramic and composite materials* [Proektirovanie golovnykh obtekatel'nykh raket iz keramicheskikh i kompozitsionnykh materialov], Publisher MSTU. Bauman, N., Moscow, 64 p.
13. Shkarupa, M.I. (2011), Improving the efficiency of mechanical and physical-technical parts such as shells of revolution of structural ceramics [Povyishenie effektivnosti mekhanicheskoy i fiziko-tehnicheskoy obrabotki detaley tipa obolochek vrascheniya iz konstruksionnoy keramiki: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk], Moscow, 23 p.
14. Gusev, V.V., Kalafatova, L.P. (2012), *Technological security of quality processing of products from technical ceramics*. [Tehnologicheskoe obespechenie kachestva obrabotki izdeliy iz tehnicheskoy keramiki], SHEI "DonNTU", Donetsk, 250 p.
15. Poezd, S.A. (2011), Improving the efficiency of technological processes diamond grinding products made of glass ceramics due to their multi-parameter optimization [Povyishenie effektivnosti tehnologicheskikh protsessov almaznogo shlifovaniya izdeliy iz sitallov za schet ih mnogoparametricheskoy optimizatsii: dis. ... kand. tehn. nauk], Donetsk, 210 p.
16. Poezd, S.A., Kalafatova L.P. (2010), "Optimization of the process of grinding of glass-ceramics" [Optimizatsiya tehnologicheskogo protsessa shlifovaniya sitallov], *Bulletin of SevNTU, Series: Machine-instrumentation and transport, Sevastopol*, No. 111/2010, pp. 75-80.
17. Poezd, S.A. (2010), "Implementation of the method of rational distribution of allowance for operations in diamond grinding of glass-ceramics" [Realizatsiya sposoba ratsionalnogo raspredeleniya pripuska po operatsiyam pri almaznom shlifovanii sitallov], *Bulletin of DonNTU, Series: Machine engineering, Donetsk*, No. 7(167), pp. 140-149.
18. Poezd, S.A., Kalafatova, L.P. (2008), "The effects of cooling on the temperature and power parameters of the grinding process, as well as the quality of the surface of the glass-ceramics under various cutting conditions" [Vliyaniya ohlazhdeniya na temperaturnye i silovye parametry protsessa shlifovaniya, a tak zhe na kachestvo poverhnosti sitallov pri razlichnykh rezhimakh rezaniyaalmaznom shlifovanii sitallov], *The reliability of the tools and optimization of technological systems. Collection of scientific papers, Kramatorsk*, No. 23, pp. 194-201.
19. Poezd, S.A., Kalafatova, L.P. (2008), "Influence of the composition of cutting technological environments on thermal and power characteristics of the grinding process of glass-ceramic" [Vliyanie sostava smazочно-ohlazhdayushchikh tehnologicheskikh sred na teplovyie i silovye harakteristiki protsessa shlifovaniya sitallov], *Collection of scientific papers of DonNTU. Series: Machine engineering and , Donetsk*, No. 5(139), pp. 30-39.
20. Pokolenko, D.V. (2014), Increase of the efficiency of processing the antenna domes made of cetals due to upgrading of diamond grinding technology [Povyishenie effektivnosti obrabotki antennykh obtekatel'nykh iz sitalloa za schet usovershenstvovaniya tehnologii almaznogo shlifovaniya: dis. ... kand. tehn. nauk], Donetsk, 194 p.
21. Kalafatova, L.P., Pokolenko, D.V. (2015), "Determination of the influence of the dynamic characteristics of the grinding process on the surface quality of products from glass-ceramics" [Opredelenie vliyaniya dinamicheskikh harakteristik protsessa shlifovaniya na kachestvo obrabatyivaemoy poverhnosti izdeliy iz sitallov], *Modern technologies in engineering. Collection of scientific papers of NTU "KPI", Kharkiv*, No. 10, pp. C. 37-46.
22. Kalafatova, L.P., Pokolenko, D.V., Fenic, L.N. (2007), "The investigation of precision forming products made of glass ceramics in grinding" [Issledovanie tochnosti formoobrazovaniya izdeliy iz sitallov pri shlifovanii], *Bulletin of DonNTU, Series: Machine engineering, Donetsk*, No. 4(124), pp. 96-108.
23. Gusev, V.V., Kalafatova, L.P., Pokolenko, D.V. (2012), "Influence of dynamic action on the formation of the defect layer structure in glass-ceramic" [Vliyanie dinamicheskogo vozdeystviya na formirovanie struktury defektnogo sloya sitalla], *J. Mater. Cutting and tool in technological systems, NTU "KPI", Kharkov*, pp. 76-82.
24. Oleynik, S.U. (2014) Assurance of accuracy of machining thin-walled shells from pyroceram by improving the dynamic characteristics of technological system of grinding [Obespechenie kachestva obrabotki tonkostennykh sitallovykh obolochek putem uluchsheniya dinamicheskikh harakteristik tehnologicheskoy sistemy shlifovaniya: dis. ...kand. tehn. nauk], Donetsk, 210 p.
25. Gusev, V.V., Kalafatova, L.P., Oleynik, S.U. (2012), "Study of the dynamic state of the technological system of diamond-abrasive machining of thin-walled shells made of glass ceramics" [Issledovanie dinamicheskogo sostoyaniya tehnologicheskoy sistemy almazno-abrazivnoy obrabotki tonkostennykh obolochek iz sitallov], *Bulletin of SevNTU, Series: Machine-instrumentation and transport, Sevastopol*, No. 128, pp. 60-67.
27. Gusev, V.V., Kalafatova, L.P., Oleynik, S.U. (2013), "Theoretical study of the effect of processing conditions on the level of vibration in diamond grinding thin-walled shells of brittle nonmetallic

- materials" [Teoreticheskoe issledovanie vliyaniya rezhimov obrabotki na uroven vibratsiy pri almaznom shlifovanii tonkostennyih obolochek iz hrupkih nemetallicheskih materialov], *Bulletin of SevNTU, Series: Machine-instrumentation and transport, Sevastopol*, No. 139/2013, pp. 57-62.
28. Gusev, V.V., Kalafatova, L.P., Oleynik, S.U. (2013), "Research of formation at the surface waviness diamond grinding of thin hard-core shells of revolution of the glass-ceramics" [Issledovanie formirovaniya volnistosti poverhnosti pri almaznom shlifovanii tonkostennyih slozhno-profilnyih obolochek vrascheniya iz sitallov], *Scientific and technical journal. - Krasnogorsk: Public Academy "Kontenant"*, V. 12, No. 2, pp. 29-35.

Надійшла до редакції 18.03.2016

L.P. Kalafatova, D.V. Pokolenko

Donetsk National Technical University

WAYS OF IMPROVING THE EFFICIENCY OF GRINDING OF PRODUCTS FROM BRITTLE NON-METALLIC MATERIALS

The review of scientific research related to improving the effectiveness of the process of diamond grinding of brittle nonmetallic material products (technical cetalls and ceramics) has been implemented by means of rational input parameters of processing. These parameters include: physical and mechanical properties of the material being processed and its structure, schemes and regimes of grinding, types of lubricating and cooling technological materials, technological characteristics of cutting tools, the temperature in the cutting zone, dynamic stability of the technological system of grinding. Conditions of exploitation of ceramic products define high demands to their strength, manufacturing precision, quality of the treated surface: its roughness, undulations and absence of defects in the surface layer. For the conditions of surface grinding of glass-ceramic products the problem of increasing the efficiency of manufacturing was solved by multi-parameter optimization of the cutting process. The minimum of the technological cost price was accepted as the criterion of optimization, whereas of variable parameters were the cutting modes. At the same time power and temperature factors were taken into account as the factors which influence the processing defects.

The thesis is on the raise of efficiency of production of the cetalls antenna domes of rocket (large-sized thin-walled articles of a complicated space form of a rotary body type) due to processing technology upgrading and the substantiation of its rational, from the point of view of providing the dynamic stability of the grinding process, and conditions such as processing sequence, grinding modes and schemes, and cutting tool characteristics. The performed research has enabled us to substantiate the point that the behavior of technological system of grinding the antenna domes as a dynamic system and, as a result, the efficiency of their processing, the quality (defectiveness, undulations) and the accuracy of surface that is formed, depend upon the input parameters of technological process. The height of undulations on the outer surface of antenna domes affects the duration of the subsequent profile of finishing operations. Processing methods have been developed according to the results of theoretical and experimental studies of vibrating processes of the technological system elements and parameters of undulations on the outer surface which are dependent on the conditions of grinding. The waviness parameters depend on the level of vibration of the elements of technological system, with a major impact on the waviness value made by the dynamic behavior of large thin-walled shell. Based on the results of the research, the recommendations concerning the development of the rational technological processes of antenna domes processing that provide the required accuracy and quality of processing workpieces were given.

Keywords: cetall, ceramics, defectiveness, dynamics of process, grinding, input technological parameters, quality of machining, thin-walled shell.