

Л. Калафатова, Покровськ, Україна

ПЕРСПЕКТИВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОБРОБКИ СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ ВИРОБІВ ІЗ КРИХКИХ НЕМЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ

***Анотація.** Визначені шляхи підвищення ефективності шліфування виробів – оболонок складної форми з кераміки і ситалів, що пов'язані із забезпеченням вібростійкості технологічної системи обробки. Для конкретних умов завдяки використанню розробленої узагальненої математичної моделі формування похибки профілю при механічній обробці встановлені пріоритетні напрямки підвищення жорсткості елементів технологічної системи, серед яких провідне значення мають конструкція заготовки, недоліки технології заготівельних операцій і особливості використаних верстатних систем. Для вирішення завдання запропоновано удосконалення існуючої технології отримання заготовки; перехід на обробку оболонок на верстатах х ЧПК; можливість використання технології 3D-друку при виробництві точних складнопрофільних деталей з кераміки.*

***Ключові слова:** технічна кераміка; тонкостінні оболонки; алмазне шліфування; динаміка процесу; характеристики і способи отримання заготовки; якість і точність обробки.*

Вступ

Сучасне машинобудування відзначається поширенням використання крихких неметалевих матеріалів (різних видів кераміки в тому числі і склокераміки – ситалів), що мають підвищені фізико-механічні властивості, а саме: міцність, зносостійкість, теплостійкість, корозійну стійкість, радіопрозорість і т. ін. У технологічних процесах оброблення передбачені обов'язкові операції шліфування для забезпечення потрібних високих значень точності і якості поверхонь виробів, які у значній кількості випадків мають складну форму. Процеси шліфування забезпечуються алмазними кругами в основному на металевій зв'язці.

В роботі розглянуті процеси виробництва складно-профільних оболонок з крихких неметалевих матеріалів (КНМ), які застосовують в авіакосмічній та ракетній галузях. Основне їх призначення - елементи літальних апаратів, наприклад, антенних обтічників ракет і літаків [1]. Виходячи з умов експлуатації виробів, до них пред'являються підвищені вимоги по забезпеченню міцності при складному поєднанні змінних силових і теплових впливів, в агресивних середовищах, а також необхідних показників аеродинамічності і радіопрозорості виробу в заданому діапазоні частот. Для цього необхідно витримати високі вимоги до товщини стінки деталі (не більше $\pm 0,1$ мм), точності профілю, рівня

шорсткості оброблених поверхонь (долі мкм) і відсутності дефектного шару. Встановлено [2, 3, 4], що виконання цих вимог пов'язано з дотриманням умов протікання усіх стадій технологічного процесу – від заготівельних до фінішних операцій механічної обробки.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій

У зв'язку з неможливістю на сьогодні забезпечити точність форми виробу і потрібну якість поверхні на етапі отримання заготовки (здебільшого відцентрове литво) виріб піддається багатоетапній механічній обробці, до складу якої входять чорнові і чистові операції шліфування внутрішнього і зовнішнього контурів. При цьому видаляється основний припуск величиною до 8-10 мм на сторону, який є нерівномірним вздовж усього профілю деталі. Алмазно-абразивна обробка ведеться способом глибокого шліфування (глибина різання 0,5...1,5 мм), яке супроводжується крихким руйнуванням оброблюваного матеріалу і формуванням порушеного обробкою дефектного шару, шорсткості і хвилястістю сформованої поверхні. Точність стінки оболонки по товщині після попереднього виміру отриманих розмірів досягається на операціях «вирізки» і доводки алмазними брусками, що здійснюються вручну.

Механічна обробка фасонних деталей типу антенних обтічників ракет з керамічних матеріалів, супроводжує рядом негативних факторів. До них відносяться - високоміцний матеріал заготовки, низька жорсткість системи ВПД, складна траєкторія руху інструмента, а також перемінна глибина різання, яка має місце із-за нерівномірності розподілу припуску вздовж заготовки. У сукупності це призводить до суттєвого впливу на ефективність обробки динамічної стійкості технологічної системи (ТС) алмазного шліфування, що доведено результатами багатьох досліджень [4, 5, 6]. Чим вище вібростійкість ТС, тим ефективніше (за параметрами точності і якості) буде відбуватися оброблення мало жорстких деталей з КНМ. Таким чином, для визначення основних напрямків забезпечення заданих вихідних параметрів ТП механічної обробки КНМ необхідно знайти і усунути основні причини дестабілізації жорсткості ТС шліфування оболонок, серед яких значне місце займає мала жорсткість самої оброблюваної заготовки, що є актуальним завданням.

Метою роботи є визначення шляхів підвищення вібростійкості ТС шліфування за рахунок удосконалення технології заготівельних операцій, що забезпечує наближення розмірів і геометрії заготовки (основного елемента системи) до цих же параметрів оброблюваної деталі.

Основна частина

В умовах виробництва механічна обробка оболонок з КНМ реалізується на модернізованих токарних верстатах із агрегатною

шліфувальною головкою і системою прямого копіювання. Технологія обробки передбачає роздільне, за дві установки, шліфування алмазним інструментом внутрішньої і зовнішньої поверхонь оболонки, з подальшою «вирізкою» і доводкою профілю і стінки деталі по її довжині і перетину, визначених для конкретного виробу. Ці операції реалізуються вручну алмазними брусками.

Динамічний аналіз системи показав, що основні вібраційні впливи в ній створюють: змінна жорсткість підсистеми «шпиндельний вузол верстата - пристосування - заготовка», а також биття, огранка, нерівномірний знос шліфувального круга. Окремо необхідно виділити заготовку – складно-профільну оболонку, розміри якої можуть досягати по діаметру 350 мм і по довжині до 1000 мм. Товщина стінки заготовки в процесі механічної обробки змінюється від 20 мм до 6 – 7 мм після остаточних операцій алмазного шліфування. Параметри заготовки задають її динамічну поведінку, яка притаманна особливо тонкостінним оболонкам – виробам малої жорсткості. Було встановлено, що на формування геометрії поверхні і якість поверхневого шару впливають наступні фактори [2, 3, 7, 8]: фізико-механічні властивості матеріалу, схема різання, жорсткість елементів ТС та їх вібрації, стан поверхні шліфувального круга, режими шліфування (рис. 1).

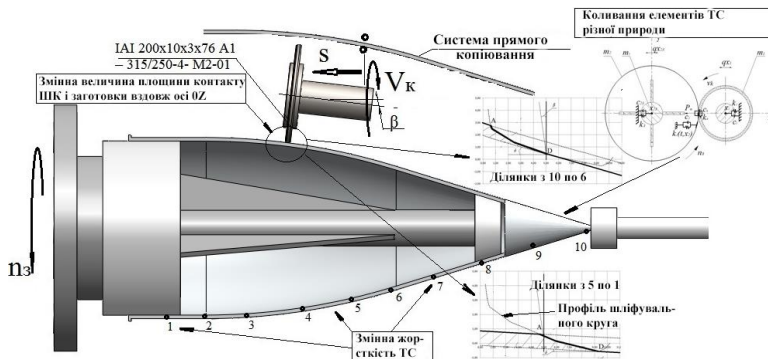


Рисунок 1 – Схема зовнішнього шліфування оболонки у виробничих умовах з позначенням факторів, які впливають на параметри оброблення [7]

В процесі досліджень були удосконалені підходи щодо забезпечення високої якості виробів із КНМ при обґрунтуванні раціональних умов їх обробки: належного верстатного обладнання, схем і режимів шліфування, характеристик інструментів, які дають можливість комплексного

технологічного керування точністю обробки і дефектністю сформованої поверхні за рахунок зміни рівня силового впливу на неї при різанні.

Встановлено, що при шліфуванні великогабаритних порожнистих деталей – оболонок із КНМ, виникають коливання двох видів: вимушені і автоколивання. Причини появи вимушених коливань це зовнішні збурення системи ВПД, викликані дисбалансом елементів верстату, оброблюваної заготовки, інструменту, а також недостатньою жорсткістю пристосувань, в тому числі системи копіїв, що забезпечують переміщення алмазної шліфувальної головки поздовж заготовки згідно з профілем деталі (див. рис. 1). Автоколивання – це вібрації, що викликані самозбудженням коливань усередині самої системи різання і відбиваються на якості поверхневого шару деталі внаслідок зміни умов контакту алмазних зерен інструменту, з поверхнею, що формується.

В процесі досліджень розроблена узагальнена математична модель формування похибки профілю під час механічної обробки тонкостінної складнопрофільної оболонки [2, 9], яка дозволяє проаналізувати фактори, що визначають цю похибку. До названих факторів можна віднести змінності сил різання і моментів за величиною і напрямком, які пов'язані не тільки з нерівномірним припуском і змінними жорсткостями заготовки і пристосування по довжині, але і зі складною формою оброблюваної деталі, а також з властивостями матеріалу заготовки. Це призводить до прискороного зносу інструменту, а, отже, до зміни його параметрів і параметрів області контакту круга і заготовки, а також дозволяє виявити способи зменшення їх впливу на точність виробу, який формується.

Розглянемо можливості нівелювання негативного впливу заготовки як мало жорсткого складнопрофільного елементу ТС на точність формування заданого профілю деталі. Завдання можна вважати вирішеним у повному обсязі, якщо профіль заготовки буде максимально наближеним до профілю і параметрам готової деталі без втрати нею заданих експлуатаційних характеристик. При цьому виділимо три можливі напрями вирішення проблеми.

1. Удосконалення існуючої технології отримання заготовки за рахунок зміни технологічних характеристик оброблюваного матеріалу.

В основу аналізу зміни геометричних характеристик поверхонь деталі покладемо відомий факт про те, що похибки профілю виробу з'являються на початкових стадіях виробничого процесу і копіюються від операції до операції. Існуюча технологія отримання заготовок габаритних порожнистих виробів не забезпечує їх достатньої точності, особливо при формуванні стінки виробу. При відцентровому формуванні заготовки, яке є основним при найбільш використаному матеріалі для антенних обтічників, а саме ситалу АС-418, виникають значні відхилення її

геометричних розмірів від розмірів готового виробу і нерівномірності товщини стінки в радіальному і поздовжньому напрямках, еліпсність у поперечному перерізі. При існуючій технології основні фактори, що впливають на точність форми заготовки – це якість і формуючі властивості скломатеріалу, нестабільність кількості скломаси для заливки однієї деталі при переході від заготовки до заготовки; частота обертання форми для лиття; температура формуючого комплексу; час витримки відформованої скломаси у формі для лиття; початковий момент обертання формуючого комплексу [8]. Величина відхилень від рівномірності стінки заготовки уздовж її утворюючої перемінна і може досягати 14 мм (рис. 2). Як наслідок, виникає нерівномірність припуску на механічну обробку по внутрішньому контуру по відношенню до готового (виділено пунктиром) прошліфованого виробу. Нерівномірність товщини стінки заготовки пов'язана з фізико-механічними властивостями оброблюваного матеріалу і особливостями технології формування.

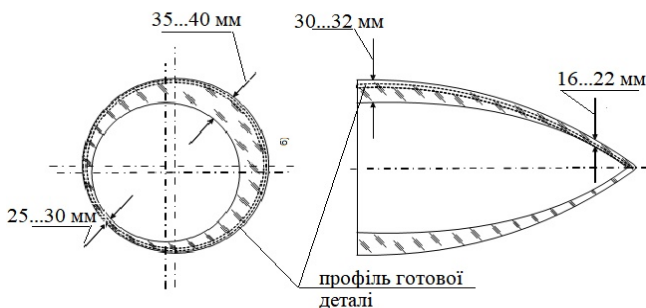


Рисунок 2 – Схема відхилення профілю заготовки від профілю готового виробу

Наступна механічна обробка такої заготовки супроводжується похибками точності отримання заданого контуру деталі. Причиною цього явища є постійні коливання сил різання, які призводять до зміни величини віджимання інструменту від заготовки при переміщенні уздовж її контуру, зростання вібрацій у системі, хвилястості поверхні виробу, що формується. При шліфуванні заготовок з нерівномірним припуском необхідне постійне коректування параметрів режиму обробки, наперед за все, глибини різання, що призводить до збільшення кількості проходів і часу шліфування, підвищення зносу алмазного інструменту і дефектності обробленої поверхні, особливо в зонах врізання інструменту, пов'язаного з необхідністю зміни глибини шліфування до завершення проходу. Крім того, з попереднього технологічного переходу на наступний перехід

копіюється похибка форми заготовки з певною ступеню уточнення в радіальному і поздовжньому напрямках.

Таким чином, при обробці невірноваженої заготовки з'являється чинник змінної маси, який впливає на пружні переміщення, а також викликає коливання в технологічній системі [2, 3]. Відповідно до послідовності процесу утворення похибки обробки чинники, які діють в технологічній системі і які викликані похибками встановлення заготовки, статичного та динамічного налаштування технологічної системи, породжують відхилення параметрів відносного руху оброблюваної деталі і різального інструменту [8], що негативно впливають на точність і якість сформованих поверхонь.

Великі відхилення товщини стінки заготовки від її розмірів у готовому виробу, що виникають при відцентровому формуванні, для уникнення браку потребують завищення геометричних і об'ємних параметрів заготовки та, як наслідок, призводять до великих витрат скломаси і збільшення об'єму механічної обробки. Проведені експериментальні дослідження показали, що зазначених недоліків можна уникнути, якщо використовувати для скловаріння сировину, якій притаманні рівномірні формувальні властивості. Це, так звана, ситалокераміка КС-418, яка відрізняється від АС-418 способами підготовки сировини і формування при збереженні експлуатаційних характеристик ситалу АС-418.

Розроблена технологія виробництва заготовок (Патенти України № 66132, № 66133) базується на 100% використанні ситалових відходів шляхом їх переплавки. Особливості фізико-хімічних і механічних властивостей такої сировини забезпечують отримання скломаси з меншою в'язкістю і більшою однорідністю складу, що дозволяє виготовити заготовку практично рівної товщини уздовж твірної (нерівномірність стінки складає від 3 до 5 мм при 8 – 14 мм у базовому варіанті). За рахунок цього істотно збільшується продуктивність механічної обробки обтічників і підвищується їх якість – зменшується товщина дефектного шару виробу з 350 до 300 мкм і, як наслідок, збільшується його міцність при незміщеному стані матеріалу КС-418 відносно до ситалу АС-418 в 1,5-2 рази.

2. Удосконалення процесів механічної обробки керамічних складнопрофільних оболонок за рахунок використання сучасного обладнання на основі верстатів з ЧПК.

Як видно з наведених вище даних, точність обробки керамічних оболонок (на прикладі антенних обтічників) алмазним шліфуванням на токарних верстатах з системами силового копіювання досить низька, а сама копіювальна система (див. рис. 1) через великі кути копіювання не

дозволяє остаточно на цих операціях повністю реалізувати обробку перемінної кривої профілю, що призводить до призначення додаткових ручних операцій для обробки окремих його ділянок. Крім цього, точність доведення профілю стінки обтічника напряму залежить від кваліфікації та сумлінності працюючого, тобто від людського фактору, дія якого в багатьох випадках негативно позначається на якості продукції, що випускається. Операції контролю геометрії виробу також не автоматизовані і на проміжних стадіях технологічного процесу затратні за часом тому, що вони включають операції обміру, розмітки і визначення міжопераційних припусків. Все це призводить до зростання трудомісткості, зниженню точності процесу механічної обробки і до домінуючого впливу на результати суб'єктивного фактору.

На даному часі використання існуючих технологічних комплексів на базі верстатів з ЧПК можуть у значній мірі підвищити ефективність обробки складнопрофільних виробів із КНМ [10]. Було запропоновано змінити принцип обробки оболонок за рахунок використання сучасних верстатних систем з ЧПК, які дозволяють відмовитися від принципу використання копіїв для формоутворення виробу і підвищити жорсткість системи. При цьому можливо використати технологічні засоби зменшення коливань, вібрацій, динамічних навантажень у технологічній системі. Останнє дозволяє зменшити зусилля різання, направлені на поверхню, що формується, стабілізувати динаміку процесу і через це зменшити глибину і покращити структуру порушеного обробкою шару.

Автоматизація процесів механічної обробки і контролю деталей складного профілю з КНМ позитивно відіб'ється на їх загальній трудомісткості і дозволить повністю відмовитися від операцій ручної доробки і контролю сформованого профілю виробів, які в умовах виробництва займають значну частину технологічного процесу і залежать від кваліфікації верстатника.

3. Удосконалення принципів отримання заготовок складної форми з керамічних матеріалів за рахунок використання сучасних 3D-технологій друку.

Прикладом подібних технологій, за якими майбутнє, є селективне лазерне спікання (Selective Laser Sintering, SLS) [11], що є методом адитивного виробництва і використовується для створення високоточних виробів практично необмеженої геометричної складності. Технологія базується на послідовному спіканні шарів попередньо розігрітого майже до температури плавлення порошкового матеріалу за допомогою лазера високої потужності, який забезпечує спікання частинок порошкоподібного матеріалу (діаметр частинок 50-100 мкм) для отримання необхідного контуру шару. Отримані за такою технологією

заготовки потребують лише фінішної механічної обробки, наприклад, поліровки, для забезпечення заданої шорсткості виробу. Використання 3D-друку методом SLS дозволяє виробляти складні деталі силових установок, авіабудування, космонавтики, тощо.

Технології 3D-друку керамічних виробів вже знайшли реальне використання в Україні і реалізуються за допомогою унікального високошвидкісного 3D-принтера, який створений українським стартапом Kwambo – одеською фабрикою, на якій при використанні нової технології струменевого 3D-друку керамічними порошками [12] створюють відразу готові об'єкти складної форми з точністю друку до 20 мкм. Використання технологій 3D-друку дозволить докорінним чином змінити технологічний процес виготовлення керамічних деталей типу оболонок у порівнянні з існуючими процесами їх виробництва, а саме, виключити цілу низку складних і малопродуктивних операцій – від заготівельних до операцій механічної обробки.

Висновки

Використовуючи розроблену узагальнену модель формування похибки профілю при алмазному шліфуванні тонкостінних деталей оболонкової форми із КНМ здійснено аналіз факторів, які визначають похибки при механічній обробці і виявлено способи зменшення їх впливу на точність і якість сформованих поверхонь. Перш за все - це чинники нерівномірності припуску, який утворюється на стадії отримання заготовки, і його копіювання на профіль оброблюваної на використаному обладнанні деталі, а також змінних по довжині жорсткостей заготовки і пристосування.

Перспектива даного дослідження полягає в можливості підвищення ефективності та рівня автоматизації обробки виробів - оболонок складної просторової форми шляхом: вдосконалення технології заготівельних операцій; розробки прогресивних схем шліфування при використанні верстатів з ЧПК; використання сучасних технологій 3D-друку для отримання відразу готових об'єктів складної форми, мінуючи низку складних і малопродуктивних операцій, що входять до структури технологічних процесів діючих виробництв.

Список використаних джерел: 1. *Ромашин А.Г.* Радиопрозрачные обтекатели летательных аппаратов. Проектирование, конструкционные материалы, технология производства, испытания: учебное пособие / А.Г. Ромашин, В.Е. Гайдачук, Я.С. Карпов та ін. – Харьков: Изд. Центр «ХАИ», 2003. – 240 с. 2. *Олійник С. Ю.* Забезпечення якості обробки тонкостінних силалових оболонок шляхом покращення динамічних характеристик технологічної системи шліфування: дис. канд. техн. наук: 05.02.08. Донецьк, 2014. 210 с. 3. *Калафатова Л.П.* Повышение эффективности шлифования твердых сплавов и конструкционной керамики: монография / Л.П. Калафатова, П.Г. Матюха, Д.В. Поколенко та ін. – Покровск: ГВУЗ «ДонНТУ», 2017. – 182 с. 4. *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.

5. *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.ijmactools. 2011.06.006. – P. 3-26.
6. *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.
7. *Олейник С.Ю.* Оценка параметров волнистости поверхности на операции глубокого алмазного шлифования крупногабаритных тонкостенных ситалловых оболочек / С.Ю. Олейник // Машинобудування і машинознавство. Всеукр. наук. вісник. - Красноармійськ: ДонНТУ, 2015. - № 1 (12). – С. 40–46.
8. *Поколенко Д. В.* Підвищення ефективності обробки антенних обтічників із ситалів за рахунок удосконалення технології алмазного шліфування: автореф. дис. на здобуття канд. техн. наук: спец. 05.02.08 «Технологія машинобудування». Донецьк, 2014. 20 с.
9. *Олійник С.Ю.* Аналітична модель механізму утворення сумарної похибки профілю виробів типу оболонок з крихких неметалевих матеріалів під час алмазного шліфування / С.Ю. Олійник, Л.П. Калафатова, Д.В. Поколенко // Технічні науки та технології: науковий журнал. – Чернівці: ЧНТУ, 2017. - № 1(7). – С. 33-41.
10. Пат. на полезн. модель №129442, Российская федерация. Токарный станок с ЧПУ для прецизионной размерной обработки оболочек двойной кривизны из керамических материалов: Банк патентов. 2013. URL: <http://bankpatentov.ru/node/379384>.
11. Селективное лазерное спекание (SLS). CNC3D-printer.com. 2016. URL: [https://cnc3d-printer.com/index.php?TM_TC=1&TM_TX=Selektivnoe_lazernoe_spekanie_\(SLS\)](https://cnc3d-printer.com/index.php?TM_TC=1&TM_TX=Selektivnoe_lazernoe_spekanie_(SLS)).
12. Унікальний високоскоростної 3D-принтер для печати керамики создал украинский стартап Kwambo. ЭкоТехника. 2017. URL: <https://ecotechnica.com.ua/technology/2987-unikalnyj-vysokoskorostnoj-3d-printer-dlya-pechati-keramiki-sozdal-ukrainskij-startap-kwambio.htm>.

L. Kalafatova, Pokrovs`k, Ukraine

PERSPECTIVES FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF MACHINING OF COMPLEX PROFILES PRODUCTS FROM BRITTLE NON-METALLIC MATERIALS

Abstract. *There are certain requirements to the quality of profile-composite thin-walled shells used in aerospace engineering. All the necessary characteristics of the items (such as thickness of shells, profile accuracy and surface quality) can be provided using the method of diamond grinding. Therefore, the researches, related to establishing an analytical connection between the phenomena arising during tooling of such wares and errors of their form and geometry, are relevant. The purpose of these research is to determine the direction of increasing the vibration-resistance of the grinding system by improving the workpiece production technology, which ensures the approximation of the size and geometry of the workpiece (the main element of the grinding system) to the same parameters of the workpiece. The performed researches allowed to develop a generalized mathematical model of formation of total error of the profile of a thin-walled pyroceram shell considering factors influencing the level of vibrations of elements of the grinding technological system and the accuracy of treatment. The model considers the unevenness of the allowance, which occurs at the stage of obtaining the workpiece, as well as the variable stiffness of the workpiece and the machine tool. Priority directions of increasing the stiffness of the elements of the technological system are established. Among them of the leading importance are the construction of the workpiece, the drawbacks of the workpiece production technology and the features of machine systems using. For the solution of the problem, we proposed: improving the existing workpiece production technology; transition to machining on CNC machines; the possibility of using 3D printing technology in the production of precise complicated parts from ceramics.*

Keywords: *technical ceramics; thin-walled shell; diamond grinding; dynamics of process; workpiece production technologies; quality and precision of machining.*