

Л.П. Калафатова, д.т.н., проф.
Донецький національний технічний університет
С.Ю. Олійник, к.т.н., ст. викл.
Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ

Визначення закономірностей формування похибки профілю при шліфуванні виробів-оболонок з крихких неметалевих матеріалів

До складнопрофільних тонкостінних оболонок з крихких неметалічних матеріалів (КНМ), що використовуються в аерокосмічній техніці, пред'являються високі вимоги щодо якості поверхні, точності профілю та товщини оболонки, які забезпечуються при механічній обробці - алмазному шліфуванні. Сучасне обладнання дає можливість впроваджувати ефективні схеми різання і застосовувати адаптивне управління ходом технологічного процесу. Тому дослідження, пов'язані з встановленням аналітичного зв'язку між явищами, що виникають під час механічної обробки таких виробів, і похибками їх форми та геометрії, актуальні.

Більшість досліджень пов'язано з вирішенням завдання зменшення дефектності поверхневого шару КНМ матеріалів, викликаної механічною обробкою. Ряд досліджень присвячений питанню підвищення ефективності обробки оболонок за рахунок зниження вібрації в технологічній системі формоутворення виробів. Однак відсутні комплексні дослідження, що дозволяють оцінити сумарну похибку алмазного шліфування тонкостінних оболонок в залежності від умов обробки. Це вимагає створення математичної моделі механізму утворення похибки профілю оболонок з КНМ, у тому числі з ситалу, при їх алмазному шліфуванні, яка враховує умови обробки і потрібна для розробки прогресивних технологічних процесів.

У статті представлена узагальнююча математична модель формування сумарної похибки профілю тонкостінної оболонки з ситалів з урахуванням факторів, що впливають на рівень коливань елементів технологічної системи шліфування і точність обробки.

Представлено математичний опис процесу виникнення похибки внутрішнього контуру тонкостінної оболонки при її алмазно-абразивній обробці. Модель враховує нерівномірність припуску, яка виникає на стадії отримання заготовки, а також змінну жорсткість заготовки і пристосування. Модель дозволяє аналізувати чинники, що визначають похибки шліфування деталей і виявити способи зменшення їх впливу на точність сформованого виробу.

Ключові слова: алмазне шліфування; крихкі неметалеві матеріали; тонкостінні оболонки; похибка профілю; математична модель; точність обробки.

Вступ. Постановка проблеми. До деталей ракетної і авіатехніки – антенних обтічників ракет і літаків [1, 2], які є складнопрофільними тонкостінними оболонками (довжиною від 0,5 до 2 м, діаметром від 200 до 500 мм, товщиною стінки 4 – 6 мм) і виготовляються з крихких неметалевих матеріалів (КНМ) типу технічних ситалів і кераміки, висувають підвищені вимоги з показників міцності, жорсткості, радіопрозорості й надійності при експлуатації.

Одна з основних властивостей обтічників – радіопрозорість, забезпечується його заданим профілем та високою точністю по товщині стінки, яка в ряді випадків обмежується допуском $\pm 0,02$ мм [2], а також високими вимогами щодо рівня мікро- і макрогеометрії зовнішньої поверхні (шорсткість не більше $R_a=0,0808-0,04$ мкм) і повна відсутність дефектного шару.

Забезпечення заданих властивостей деталей закладено в технологічний процес виробництва на всіх його етапах, що включають: отримання заготовки, механічну обробку, операцію зміцнення, при якій шляхом хімічного травлення повністю видаляється порушений обробкою поверхневий шар виробу [3]. Механічна обробка для матеріалів зазначеного класу, які відносяться до категорії важкооброблюваних, здійснюється методом алмазно-абразивної обробки (операції чорнового і чистового алмазного шліфування з наступним доведенням алмазними брусками), як єдино прийнятної в цих умовах. Формування профілю виробу із заданими характеристиками здійснюється на етапах внутрішнього шліфування заготовки при її базуванні по зовнішній поверхні і зовнішнього шліфування при базуванні по попередньо обробленій внутрішній поверхні. Однак велика твердість і крихкість матеріалу, схильність до дефектності, нестійкість технологічної системи шліфування роблять процес отримання придатної до використання деталі трудомістким і екологічно шкідливим [3, 4].

Підвищення ефективності виготовлення тонкостінних великогабаритних оболонок із важкооброблюваних матеріалів є актуальним завданням, рішення якого передбачає дослідження закономірностей утворення похибок профілю виробів на операціях шліфування чому і присвячена ця робота.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Пошуку найбільш ефективних методів забезпечення заданої точності профілю та якості поверхні тонкостінних оболонок із КНМ в літературі [2, 3] приділялося немало уваги. Однак при дослідженнях, як правило, обмежувалися виявленням закономірностей виникнення похибок на окремих етапах виготовлення виробу без урахування взаємозв'язку їх між собою. У роботах [5, 6] приведені результати теоретичних досліджень впливу систематичних похибок, що змінюють профіль обробленої поверхні в порівнянні з заданим, на операціях внутрішнього і зовнішнього шліфування контурів виробу. Встановлено, що основними визначальними факторами при цьому є змінна жорсткість заготовки по довжині при її закріпленні в пристосуванні. У роботах [5–7] досліджено вплив вібрацій, що виникають в технологічній системі обробки, на якість поверхні по параметру хвилястості і точність профілю оболонок.

Тому визначення закономірностей формування похибки профілю під час механічної обробки тонкостінних складнопрофільних оболонок, які би в комплексі враховували вплив основних технологічних чинників на процес шліфування, є актуальним завданням. Виходячи з цього, метою проведених досліджень є розробка такої узагальнюючої моделі формування похибки профілю тонкостінних оболонок із КНМ, яка дозволить врахувати нерівномірність припуску, що виникає на стадії отримання заготовки, а також змінні вздовж довжини деталі жорсткості заготовки і пристосування.

Викладення основного матеріалу. В основу аналізу зміни геометричних характеристик поверхонь деталі покладений 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 при відцентровому формуванні не забезпечує їх достатньої точності, особливо відносно стінки виробу. При цьому виникають значні відхилення геометричних розмірів заготовки від розмірів готового виробу і нерівномірності товщини стінки в радіальному Δ_r і поздовжньому напрямках Δ_l , еліпсність у поперечному перерізі. Величина відхилень від рівномірності стінки заготовки уздовж її утворюючої перемінна і може досягати 14 мм (рис. 1). Як наслідок, виникає нерівномірність припуску на механічну обробку по внутрішньому контуру по відношенню до готового (виділено пунктиром) прошліфованого виробу.

Наступна механічна обробка такої заготовки супроводжується похибками точності отримання заданого контуру деталі, причиною чого є постійні коливання сил різання і, відповідно, зміни величини віджимання інструменту від заготовки при переміщенні уздовж її контуру, зростання вібрацій у системі і хвилястості поверхні виробу, що формується. Виникає потреба у постійному коректуванні режиму різання, насамперед, глибини різання, що призводить до збільшення кількості проходів і часу шліфування, підвищення зносу алмазного інструменту і дефектності обробленої поверхні. Крім того, з попереднього технологічного переходу на наступний перехід копіюється похибка форми заготовки з певною ступеню уточнення в радіальному Δ_r' і поздовжньому напрямках Δ_l'' .

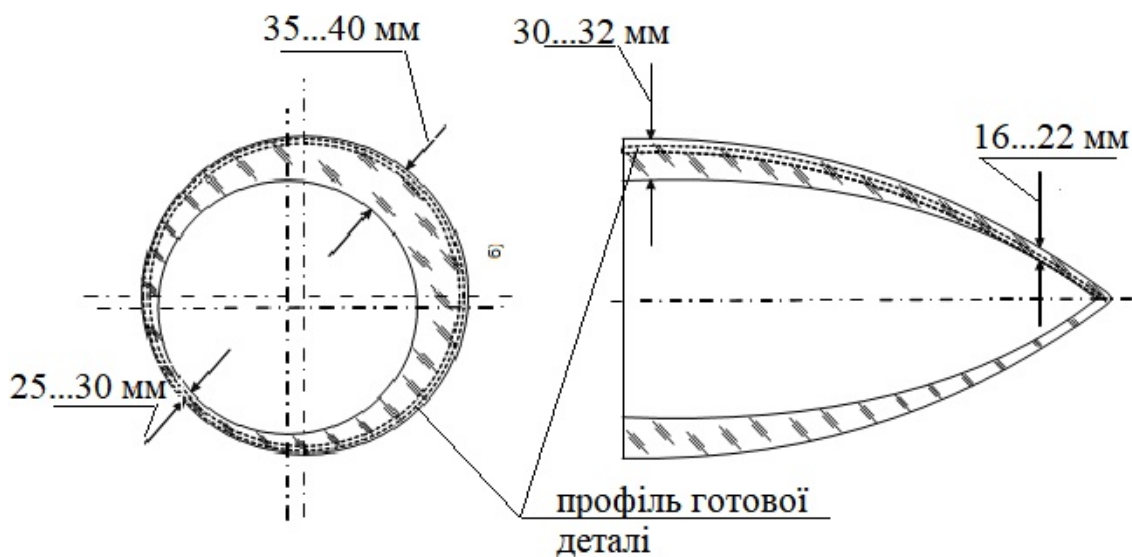


Рис. 1. Схема відхилення профілю заготовки від профілю готового виробу

Таким чином, при обробці неврівноваженої заготовки з'являється чинник змінної маси, який впливає на пружні переміщення, а також викликає коливання в технологічній системі [5, 6; 8–11]. Під час обробки, під дією сили різання, виникають такі фактори як пружні віджимання, знос інструменту, коливання елементів технологічної системи [8]. Розробка математичної моделі формування похибки профілю під час механічної обробки тонкостінної складнопрофільної оболонки дозволить проаналізувати фактори, що визначають похибку механічної обробки, і виявити способи зменшення їх впливу на точність виробу, який формується.

Математичний опис процесу утворення похибки обробки розроблено відповідно до методики, представленій в роботі [12], і містить складання рівнянь відносного руху технологічних баз оброблюваної заготовки і точки контакту робочої поверхні круга із заготовкою «К» (рис. 2). Для випадку глибинного шліфування оболонок з КНМ, через швидкий і нерівномірний знос круга можна прийняти зону контакту у вигляді точки (точки «К»).

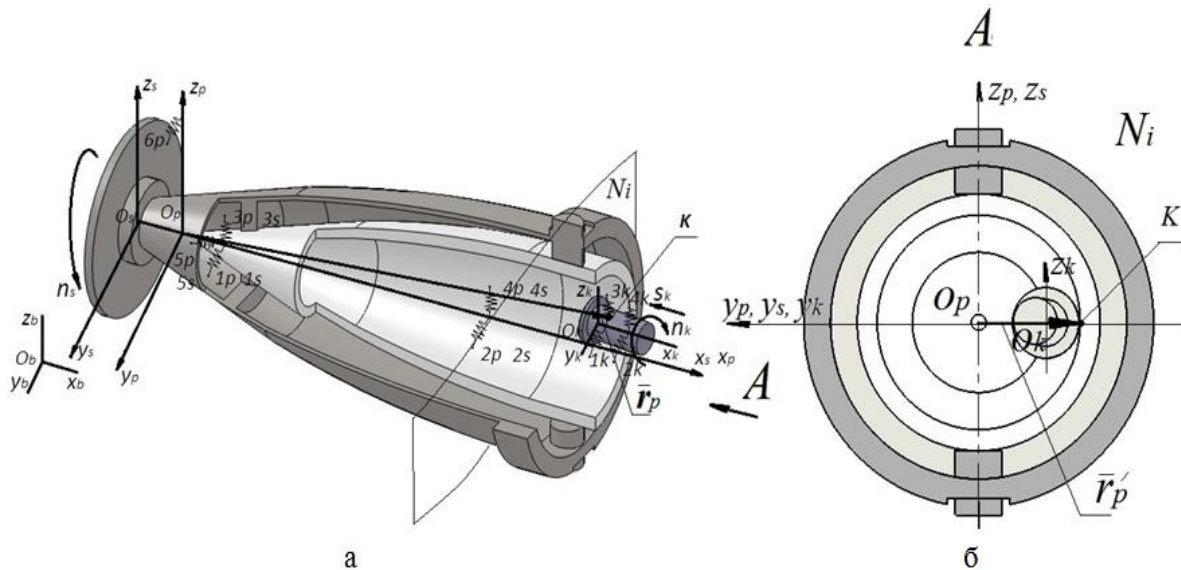


Рис. 2 Схема шліфування внутрішнього профілю оболонки:
 а) розташування систем координат елементів технологічної системи;
 б) проекція радіус-вектору \vec{r}_p' точки поверхні деталі у площині N_i (\vec{r}_p')

Об'єднаємо елементи технологічної системи (ТС) алмазного шліфування внутрішнього контуру в групи і розглянемо наступні підсистеми: оброблювана заготовка (р); шпиндель - пристосування (s); верстат - станина (b); різальний інструмент (k). Приймемо наступні позначення підсистем координат: \sum_b - технологічного обладнання або верстата – станини; \sum_s - шпинделя -пристосування; \sum_p - оброблюваної заготовки; \sum_k - різального інструменту (шліфувального круга).

Положення однієї з вище вказаних систем координат ТС щодо іншої системи координат можна визначити трьома переміщеннями і трьома поворотами. Щоб з'ясувати вплив будь-якого чинника на точність обробки, введемо опорні точки 1s, 2s, 3s, 4s, 5s, 1p, 2p, 3p, 4p, 5p, 6p, 1k, 2k, 3k, 4k для кожної з підсистем координат, які дозволять «зв'язати» точки на поверхні деталі зазначених підсистем з осями систем координат (див. рис. 2). Опорні точки являють собою пружні зв'язки між підсистемами.

В умовах реалізації схеми різання, при якій результатом відносного руху заготовки та інструменту є гвинтова траєкторія, до чинників, що впливають на процес формоутворення і його точність, відносять: статичні і динамічні розмірні параметри відносного руху, серед яких є похибки установки заготовки і налаштування круга щодо заготовки; нерівномірність припуску на заготовці; її змінна жорсткість. Для отримання результату (величини похибки обробленої поверхні) необхідно встановити функціональні зв'язки між значеннями діючих факторів і геометричними характеристиками деталі, за допомогою яких можна описати оброблену поверхню щодо технологічних баз.

Такою геометричною характеристикою деталі [13, 14] можна прийняти радіус-вектор точки поверхні деталі \vec{r}_p' (з урахуванням схеми відносного руху заготовки і інструменту), проведеного з початку координат системи координат заготовки O_p , співпадаючої з її технологічними базами (рис. 2).

В результаті такого математичного опису утворення похибки обробки можуть бути визначені функціональні залежності між діючими чинниками і відхиленнями радіус-вектору \bar{r}_p .

Відносні положення підсистем інструменту і деталі змінюються з течією часу, тому формули переходу – це рівняння руху в декартових координатах:

$$x_p = f_1(x_k, y_k, z_k, t); y_p = f_2(x_k, y_k, z_k, t); z_p = f_3(x_k, y_k, z_k, t), \quad (1)$$

де x_k, y_k, z_k – координати точки «К» у системі інструмента; t – час.

Відповідно до схеми обробки (рис. 2), система координат інструмента \sum_k обертається навколо своєї осі $O_k X_k$ за законом $\varphi' = \varphi'(t)$ і переміщається в подовжньому напрямі по відношенню до системи верстата \sum_b за законом $\bar{S}_k = \bar{S}_k(t)$. Система координат шпинделя з пристосуванням \sum_s обертається навколо своєї осі $O_s X_s$. Після виконання ряду перетворень, отримаємо рівняння руху точки «К» в векторній формі:

$$\bar{r}_p = M_p M'_s M_s M'_k M_k \bar{r}_k + M_p M'_s M_s (\bar{r}_{o_k} + \bar{S}_k - \bar{r}_{o_s}) - M_p \bar{r}_{so_p}, \quad (2)$$

де M_p – матриця поворотів системи координат заготовки навколо осей $O_p X_p, O_p Y_p, O_p Z_p$; M'_s – матриця повороту, яка враховує задане схемою відносного руху оброблюваної заготовки і шліфувального круга обертання системи координат шпиндель-пристосування; M_s – матриця повороту системи координат шпиндель-пристосування навколо осей $O_s X_s, O_s Y_s, O_s Z_s$; M'_k – матриця повороту, яка враховує задані схемою обертання і переміщення системи координат шліфувального круга в нерухомій системі координат верстата; M_k – матриця повороту системи координат шліфувального круга навколо осей $O_k X_k, O_k Y_k, O_k Z_k$; \bar{r}_k – радіус-вектор, який визначає місце знаходження точки «К» в системі координат шліфувального круга; \bar{r}_{o_k} – радіус-вектор, який визначає місце знаходження початку системи координат інструмента O_k в нерухомій системі координат верстата; \bar{r}_{o_s} – радіус-вектор, який визначає місце знаходження початку системи координат шпинделя-пристосування O_s в нерухомій системі верстата; \bar{S}_k – вектор переміщення системи координат шліфувального круга в нерухомій системі координат верстата; \bar{r}_{so_p} – радіус-вектор, який визначає місце знаходження початку системи координат заготовки O_p в системі координат шпиндель-пристосування.

У виразі (2) присутні кінематичні (матриці поворотів і вектор поступального руху, що описують відносний рух заготовки та шліфувального круга) і розмірні параметри, які входять у матриці поворотів і радіус-векторів, що характеризують відносне положення координатних систем технологічної системи шліфування. Вже згадана заготовка-оболонка - тіло обертання, тому її можна уявити, як поєднання безлічі профілів поперечних перерізів N_i , що лежать в площинках, які перетинають заготовку (деталь) перпендикулярно осі обертання. Основною геометричною характеристикою деталі, за рівнем відхилень якої можна судити про похибки обробки, є радіус-вектор деталі, а процес утворення поверхні деталі здійснюється в результаті зміни за величиною і напрямком цього радіус-вектору.

Провівши через основні бази заготовки-оболонки осі системи координат \sum_p , можна кількісно виразити похибку статичної настройки заготовки в системі \sum_s . Аналогічно виражається статична настройка \sum_s в \sum_b і \sum_k в \sum_s . Під час статичного настроювання системи при відсутності робочого навантаження в результаті помилок в налаштуванні, вимірах, наявності геометричної неточності обладнання, похибки закріплення з'являється похибка статичної настройки ω_c . Встановлено, що для умов установки заготовки при обробці внутрішнього контуру, похибка установки в основному пов'язана з похибкою базування, а похибки закріплення і пристосування в порівнянні з нею незначні. Похибка базування при цьому присутня як в осьовому, так і в радіальному напрямках. В осьовому напрямку похибка базування залежить від кута опорного конуса в пристосуванні і допуску на розмір деталі в місці базування по конусу (див. рис. 2), що призводить до появи різновитчинності виробу за профілем уздовж його довжини. Радіальна похибка базування при внутрішній обробці визначається точністю вивірки осі заготовки. Похибка профілю деталі в кожній її точці K_i визначається відповідно до виразу:

$$\Delta \bar{r}_p = \bar{r}_{p_i} - \bar{r}_{p_{i0}} \quad (3)$$

де $\bar{r}_{p,0}^-$ - задане значення проекції радіус-вектору \bar{r}_p^- на площину N_i в зоні контакту до відповідної точки контакту круга і заготовки «К»; \bar{r}_p^- - отримується після обробки значення проекції вектору \bar{r}_p^- на площину N_i в зоні контакту до відповідної точки контакту круга і заготовки «К».

Проекцію вектору на площину (рис. 2) представимо у вигляді суми векторів:

$$\bar{r}_p^- = \bar{r}_u^- + \bar{r}_n^-, \quad (4)$$

де \bar{r}_u^- - проекція радіус-вектору установки заготовки на площину N_i , яка визначає вплив переміщень і поворотів системи координат заготовки на точність обробки в поперечному перерізі; \bar{r}_n^- - проекція радіус-вектору настройки \bar{r}_n^- на площину N_i , яка визначає вплив сумарних переміщень і поворотів системи координат заготовки і шліфувального круга.

Величини і напрямки цих векторів знаходяться через відповідні радіус-вектори і матриці повороту.

Проекцію радіус-вектору настройки \bar{r}_n^- на площину N_i можна уявити як векторну суму:

$$\bar{r}_n^- = \bar{r}_{sn}^- + \bar{r}_k^-, \quad (5)$$

де \bar{r}_{sn}^- - проекція вектору \bar{r}_{sn}^- у площині N_i , яка визначає відстань і напрямок між осями $O_s X_s$ і $O_k X_k$ у площині N_i ; \bar{r}_k^- - проекція вектору \bar{r}_k^- , що визначає відстань і напрямок між віссю $O_k X_k$ і точкою «К» у площині N_i .

Похибка установок викликає відхилення початкових значень розмірних параметрів рівняння руху, а похибки статичної та динамічної настройок викликають відхилення як початкових, так і поточних значень параметрів відносного руху елементів технологічної системи. Після підстановки значень параметрів відхилень відносного руху технологічних баз до рівняння математичної моделі (2) можна визначити похибку формування профілю деталі на операції алмазного шліфування і врахувати похибки, які вносяться при прямому копіюванні профілю заготовки.

Під час обробки під дією сил різання і інерції, мас заготовки і пристосування, крутних моментів у технологічній системі порушується задане відносно розташування систем координат заготовки, шліфувального круга, шпинделя-пристосування. Особливістю розробленої математичної моделі для визначення похибки обробки є те, що вона дозволяє врахувати змінності зазначених сил 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, що призводить до прискореного зносу шліфувального круга, а, отже, до зміни його параметрів і параметрів області контакту круга і заготовки. У роботах [6, 9] представлені дані, які отримані теоретичним і експериментальним шляхами. Їх підстановка у рівняння математичної моделі (2) дає можливість проаналізувати в комплексі ступінь впливу зазначених вище факторів на похибку профілю оболонки після шліфування.

Аналогічним шляхом можна отримати базову математичну модель для визначення похибки формування профілю деталі при алмазному шліфуванні її зовнішнього контуру.

Висновки. Представлена математична модель визначення похибки профілю при алмазному шліфуванні тонкостінних деталей оболонкової форми з КНМ. Використання моделі дозволить здійснити аналіз факторів, що визначають похибку при механічній обробці, і виявити способи зменшення їх впливу на точність сформованого виробу. Перш за все – це чинники нерівномірності припуску, який утворюється на стадії отримання заготовки, і його копіювання на профіль оброблюваної деталі, а також змінних по довжині жорсткостей заготовки і пристосування.

Перспектива даного дослідження полягає в теоретичному обґрунтуванні можливості підвищення ефективності виробів - оболонки складної просторової форми шляхом вдосконалення технології заготовчих операцій і розробки прогресивних схем шліфування.

Список використаної літератури:

1. 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.
2. Радиопрозрачные обтекатели летательных аппаратов. Проектирование, конструкционные материалы, технология производства, испытания : учеб. пособие / А.Г. Ромашич, В.Е. Гайдачук, Я.С. Карпов, М.Ю. Русин. – Харьков : Изд. центр «ХАИ», 2003. – 240 с.
3. Гусев В.В. Технологическое обеспечение качества обработки изделий из технической керамики : монография / В.В. Гусев, Л.П. Калафатова. – Донецк : ГВУЗ «ДонНТУ», 2012. – 252 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. *Калафатова Л.П.* Исследование точности формообразования изделий из ситаллов при шлифовании / *Л.П. Калафатова, Д.В. Поколенко, Л.Н. Феник* // *Наукові праці ДонНТУ*. – 2007. – № 4 (124). – С. 96–108.
6. *Поколенко Д.В.* Підвищення ефективності обробки антенних обтічників із ситалів за рахунок удосконалення технології алмазного шліфування : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.02.08 «Технологія машинобудування» / *Д.В. Поколенко* ; ДонНТУ. – Донецьк, 2014. – 20 с.
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. Алексева*. – 2010. – № 4 (83). – С. 85–92.
8. *Гусев В.В.* Влияние динамики процесса алмазного шлифования на формирование поверхностного слоя изделий из ситаллов / *В.В. Гусев, Л.П. Калафатова, Д.В. Поколенко* // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2007. – № 2. – С. 14–17.
9. *Олейник С.Ю.* Забезпечення якості обробки тонкостінних ситалових оболонок шляхом покращання динамічних характеристик технологічної системи шліфування : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.02.08 «Технологія машинобудування» / *С.Ю. Олейник* ; ДонНТУ. – Красноармійськ, 2014. – 20 с.
10. *Huang Han* Grinding characteristics of engineering ceramics in high speed regime / *Han Huang, Ling Yin* // *Int. J. Abrasive Technology*. – 2007. – Vol. 1, No. 1. – Pp. 78–93.
11. *Krishna Gopala A.* Optimization of surface grinding operations using a differential evolution approach / *A. Krishna Gopala* // *J. Mater. Process. Technol.* – 2010. – Vol. 183, No. 2–3. – Pp. 202–209.
12. *Гусев В.В.* Обоснование расчетной схемы для исследования динамического состояния технологической системы алмазно-абразивной обработки тонкостенных оболочек из ситалла / *В.В. Гусев, Л.П. Калафатова, С.Ю. Олейник* // *Сучасні технології в машинобудуванні*. – 2011. – № 6. – С. 14–23.
13. *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*. – 2012. – Вип. 128. – С. 60–67.
14. *Калафатова Л.П.* Математическая модель для определения закономерностей формирования погрешности обработки при шлифовании оболочек сложного профиля из ситалла / *Л.П. Калафатова, С.Ю. Олейник, Д.В. Поколенко* // *Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві : зб-к наук. праць*. – Одеса : ОНПУ, 2016. – Вип. 2 (13). – С. 89–99.

References:

1. *Suzdal'cev, E.I., Rusin, M.Ju., Kurakin, V.I. and Hamicaev, A.S.* (2014), «Analiz sootvetstvija prochnosti steklokeramiki OTM 357 trebovanijam k konstrukcii obtekatelja», *Ogneupory i tehničeskaja keramika*, No. 7, pp. 9–12.
2. *Romashin, A.G., Gajdachuk, V.E., Karpov, Ja.S. and Rusin, M.Ju.* (2003), *Radioprozračnyje obtekateli letatel'nyh apparatov. Proektirovanie, konstrukcionnye materialy, tehnologija proizvodstva, ispytaniya*, Izd. centr «НАИ», Хар'ков, 240 p.
3. *Gusev, V.V. and Kalafatova, L.P.* (2012), *Tehnologičeskoe obespečenie kachestva obrabotki izdelij iz tehničeskoj keramiki*, monografija, GVUZ «DonNTU», Doneck, 252 p.
4. *Rogov, V.A., Suzdal'cev, E.I. and Shkarupa, M.I.* (2009), «Osobennosti upravlenija kachestvom poverhnosti pri mehanicheskoj obrabotke steklokristallicheskih izdelij», *Steklo i keramika*, No. 12, pp. 5–7.
5. *Kalafatova, L.P., Pokolenko, D.V. and Fenik, L.N.* (2007), «Issledovanie točnosti formoobrazovanija izdelij iz sitallov pri shlifovanii», *Naukovi praci DonNTU*, No. 4 (124), pp. 96–108.
6. *Pokolenko, D.V.* (2014), *Pidvishhennja efektyvnosti obrobki antennih obtčnikiv iz sitaliv za rahunok udoskonalennja tehnologij almaznogo shlifuvannja*, avtoref. diss. kand. tehn. nauk, spec. 05.02.08 *Tehnologija mashinobuduvannja*, DonNTU, Donec'k, 20 p.
7. *Glebov, V.V., Ignat'ev, D.A. and Egorov, M.E.* (2010), «Upravlenie kolebatel'nyim povedeniem instrumenta pri shlifovanii hrupkih nemetallicheskih materialov», *Trudy nizhegorodskogo tehničeskogo universiteta im. R.E. Alekseva*, No. 4 (83), pp. 85–92.
8. *Gusev, V.V., Kalafatova, L.P. and Pokolenko, D.V.* (2007), «Vlijanie dinamiki processa almaznogo shlifovanija na formirovanie poverhnostnogo sloja izdelij iz sitallov», *Novi materialy i tehnologij v metalurgij ta mashinobuduvanni*, No. 2, pp. 14–17.
9. *Olijnik, S.Ju.* (2014), *Zabezpečennja jakosti obrobki tonkostinnih sitalovih obolonok shljahom pokrashannja dinamichnih karakteristik tehničeskoj sistemy shlifuvannja*, avtoref. diss. kand. tehn. nauk, spec. 05.02.08 *Tehnologija mashinobuduvannja*, DonNTU, Krasnoarmijs'k, 20 p.
10. *Huang, H. and Ling, Y.* (2007), «Grinding characteristics of engineering ceramics in high speed regime», *Int. J. Abrasive Technology*, Vol. 1, No. 1, pp. 78–93.
11. *Krishna Gopala, A.* (2010), «Optimization of surface grinding operations using a differential evolution approach», *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 183, No. 2–3, pp. 202–209.
12. *Gusev, V.V., Kalafatova, L.P. and Olejnik, S.Ju.* (2011), «Obosnovanie raschetnoj shemy dlja issledovanija dinamicheskogo sostojanija tehničeskoj sistemy almazno-abrazivnoj obrabotki tonkostennyh oboloček iz sitalla», *Suchasni tehnologij v mashinobuduvanni*, No. 6, pp. 14–23.

13. Gusev, V.V., Kalafatova, L.P. and Olejnik, S.Ju. (2012), «Issledovanie dinamicheskogo sostojanija tehnologicheskoy sistemy almazno-abrazivnoj obrabotki tonkostennyh obolochek iz sitallov», *Visnik SevNTU*, Vol. 128, pp. 60–67.
14. Kalafatova, L.P., Olejnik, S.Ju. and Pokolenko, D.V. (2016), «Matematicheskaja model' dlja opredelenija zakonomernostej formirovanija pogreshnosti obrabotki pri shlifovanii obolochek slozhnogo profilja iz sitalla», *Informacijni tehnologii v osviti, nauci ta virobnictvi, zb-k nauk. prac'*, Vol. 2 (13), ONPU, Odesa, pp. 89–99.

Калафатова Людмила Павлівна – доктор технічних наук, професор кафедри гірничих машин і мехатронних систем машинобудування Донецького національного технічного університету.

Наукові інтереси:

- процеси алмазно-абразивної обробки крихких неметалевих матеріалів;
- підвищення якості обробки виробів з крихких неметалевих матеріалів.

Олійник Світлана Юрїївна – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технології машинобудування Донбаської державної машинобудівної академії міста Краматорськ.

Наукові інтереси:

- динаміка і моделювання процесів шліфування;
- технологічні основи гнучких виробничих систем.

Стаття надійшла до редакції 18.10.2017.