

*Світлана Олійник, Людмила Калафатова, Дмитро Поколенко*

## **АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ МЕХАНІЗМУ УТВОРЕННЯ СУМАРНОЇ ПОХИБКИ ПРОФІЛЮ ВИРОБІВ ТИПУ ОБОЛОНОК З КРИХКИХ НЕМЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ ПІД ЧАС АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ**

*Светлана Олейник, Людмила Калафатова, Дмитрий Поколенко*

## **АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕХАНИЗМА ОБРАЗОВАНИЯ СУММАРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ПРОФИЛЯ ИЗДЕЛИЙ ТИПА ОБОЛОЧЕК ИЗ ХРУПКИХ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ АЛМАЗНОМ ШЛИФОВАНИИ**

*Svitlana Oliinyk, Liudmyla Kalafatova, Dmytro Pokolenko*

## **ANALYTICAL MODEL OF THE MECHANISM OF FORMATION OF TOTAL ERROR OF PROFILE OF SHELL TYPE WARES FROM BRITTLE NON-METAL MATERIALS IN DIAMOND GRINDING**

*У статті представлена узагальнена математична модель формування сумарної похибки профілю тонкостінної оболонки із ситалів з урахуванням факторів, що впливають на рівень коливань елементів технологічної системи шліфування і точність обробки. У моделі враховані вплив похибки встановлення заготовки на верстаті, налаштування технологічної системи шліфування та рівень коливань елементів технологічної системи на похибку утворення профілю виробу. Рішення, які отримані з використанням математичної моделі, дозволяють визначити сумарну похибку обробки тонкостінних виробів і досліджувати способи її зменшення.*

**Ключові слова:** оболонка, алмазне шліфування, вібрації в технологічній системі, хвилястість, похибка профілю.

*Рис.: 3. Бібл.: 8.*

*В статье представлена обобщенная математическая модель формирования суммарной погрешности профиля тонкостенной оболочки из ситаллов с учетом факторов, влияющих на уровень колебаний элементов технологической системы шлифования и точность обработки. В модели учтены влияния погрешности установки заготовки на станке, настройки технологической системы шлифования и уровень колебаний элементов технологической системы на погрешность образования профиля изделия. Решения, которые получены с использованием математической модели, позволяют определить суммарную погрешность обработки тонкостенных изделий и исследовать способы её уменьшения.*

**Ключевые слова:** оболочка, алмазное шлифование, вибрации в технологической системе, волнистость, погрешность профиля.

*Рис.: 3. Библ.: 8.*

*The paper provides a generalized mathematical model of formation of total error of the profile of a thin-walled pyroceram shell taking into account factors influencing the level of vibrations of elements of the grinding technological system and the accuracy of treatment. This model takes into account the error of workpiece installation on a machine-tool, technological grinding system settings, the level of vibration of technological system elements that influence the error of profile formation. Solutions obtained with the help of this mathematical model allow estimating the total error of thin-walled shells tooling. Thus, it becomes possible to investigate the methods of reducing this error.*

**Key words:** shell, diamond grinding, vibrations in the technological system, waviness, profile error.

*Fig.: 3. Bibl.: 8.*

**Постановка проблеми.** Сьогодні основними напрямками підвищення конкурентоспроможності продукції авіакосмічної і ракетної промисловості є зниження трудомісткості та інтенсифікація виробництва при забезпеченні високої якості виробів, які можливі за рахунок підвищення гнучкості в організації виробничого процесу, оновлення та модернізації устаткування, застосування нового інструменту, прогресивних схем і режимів різання. До елементів такої продукції відносяться складнопрофільні тонкостінні оболонки (довжиною від 0,5 до 2 м і діаметром від 200 до 500 мм, з товщиною стінки 4–6 мм) з крихких неметалевих матеріалів типу технічних ситалів і кераміки, наприклад, обтічники ракет різних класів [1]. До таких оболонок висуваються високі вимоги з механічної міцності, термостійкості, радіотехнічних властивостей, які забезпечуються геометричною точністю профілю і стінки деталі й характеристиками поверхневого шару (структурою порушеного обробкою дефектного шару, поверхневими напруженнями, хвилястістю і шорсткістю обробленої поверхні).

Згідно зі схемою забезпечення експлуатаційних характеристик таких виробів – оболонок [1] досягнення заданих властивостей відбувається на етапах отримання заготовки, її механічної обробки, операції зміцнення, на якій повністю видаляється порушений

обробкою поверхневий шар деталі. Механічна обробка для матеріалів указанного класу, які відносяться до категорії важкооброблюваних, здійснюється способом алмазно-абразивної обробки (операції чорнового і чистового алмазного шліфування з наступним доведенням алмазними брусками), як єдино можливого в цих умовах.

Останніми роками в умовах жорсткої конкуренції перспективні підприємства переоснащуються новим високотехнологічним обладнанням, яке дає можливість впроваджувати більш ефективні схеми різання і застосовувати адаптивне управління ходом технологічного процесу. Останнє неможливо без встановлення якісних і кількісних зв'язків між діючими технологічними факторами і похибками оброблення. Тому в сучасному виробництві дослідження, які пов'язані з встановленням аналітичного зв'язку між явищами, що виникають під час механічної обробки складнопрофільних виробів, і похибками форми і геометрії виробів, набувають нового змісту й актуальності.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Складна форма заготовки виробу, який розглядається, визначається конфігурацією антенних пристроїв, місцем їх розташування і зовнішніми обводами об'єкта. Радіопрозорість таких виробів досягається дотриманням двох умов: по-перше, вибором відповідного матеріалу; по-друге, забезпеченням заданих параметрів стінки виробу та якості оброблених поверхонь. Радіопрозорі матеріали є діелектриками, які істотно не змінюють амплітуду і фазу електромагнітної хвилі радіочастотного діапазону, що проходить крізь виріб. До таких матеріалів відносяться технічні ситали і ситалокераміка [1]. Друга умова досягнення необхідного рівня радіотехнічних характеристик пов'язана з забезпеченням вимог щодо товщини стінки виробу, які також визначаються як розмірними характеристиками, так і геометричними відхиленнями його профілю. «Електрична» товщина, як характеристика радіопрозорості стінки (властивості об'єкта пропускати необхідний сигнал електромагнітного випромінювання радіочастотного діапазону при його мінімальному спотворенні) у будь-якій точці профілю цього виробу, пов'язана з фактичною величиною відносної діелектричної проникності конструкційного матеріалу і товщиною самої стінки.

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми.** Задана товщина виробу забезпечується на етапах алмазного шліфування зовнішньої стінки оболонки і наступної операції «вирізки». Операція «вирізка» складається з підгонки профілю зовнішньої поверхні оболонки відносно обробленого внутрішнього профілю за допомогою зміни глибини шліфування по позначених поясах уздовж осі виробу відповідно до результатів проміжного контролю товщини стінки на спеціальному пристосуванні. Ця операція характеризується досить високою трудомісткістю і виконується робочими високої кваліфікації. Зміна глибини шліфування здійснюється вручну, що супроводжується нерівномірною зміною товщини заготовки і глибини шліфування, викликає значні вібрації під час оброблення і як наслідок – виникнення різнотовщинності стінки по довжині виробу і хвилястості поверхні. В результаті формоутворення способом алмазного шліфування сукупна похибка обробки становить 0,8 мм, а хвилястість поверхні по висотному фактору – 0,13 мм.

**Мета статті.** Головною метою цієї роботи є розроблення узагальненої математичної моделі формування сумарної похибки профілю під час механічної обробки тонкостінної складнопрофільної оболонки з урахуванням факторів, що впливають на рівень коливаний елементів технологічної системи (ТС).

**Виклад основного матеріалу досліджень.** Розглянемо остаточний етап алмазного шліфування – чистову обробку. Треба відзначити, що всі етапи алмазного шліфування деталі супроводжуються значними коливаннями в технологічній системі і динамічною нестабільністю процесу різання. У зв'язку зі зміною стану заготовки (товщини стінки, маси, жорсткості, нерівноваженості під час обробки, яка викликана здебільшого нерівномірністю припуску), застосуванням різних схем шліфування на різних етапах змі-

нуються домінуючі фактори, що впливають на рівень і характер коливань. Основними причинами появи значних коливань, як визначено раніше [2; 3], під час алмазного шліфування складнопрофільних оболонок слід вважати: недостатню жорсткість технологічної системи, зміну жорсткості заготовки при зміні координати точки прикладання сили різання, а також безпосередньо саму зону контакту, яка є генератором коливань.

Відповідно до послідовності процесу утворення похибки обробки чинники, що діють у технологічній системі і викликані похибками встановлення заготовки, статичного та динамічного налаштувань технологічної системи, породжують відхилення параметрів відносного руху деталі і різального інструменту. Під час обробки під дією сили різання проявляються такі фактори, як пружні віджимання, знос інструменту, коливання елементів технологічної системи [4]. Математичний опис процесу утворення похибки має на увазі складання рівнянь відносного руху точки контакту робочої поверхні «К» круга із заготовкою і технологічних баз оброблюваної заготовки (рис. 1, схема зовнішнього шліфування оболонки розглянутого типу).

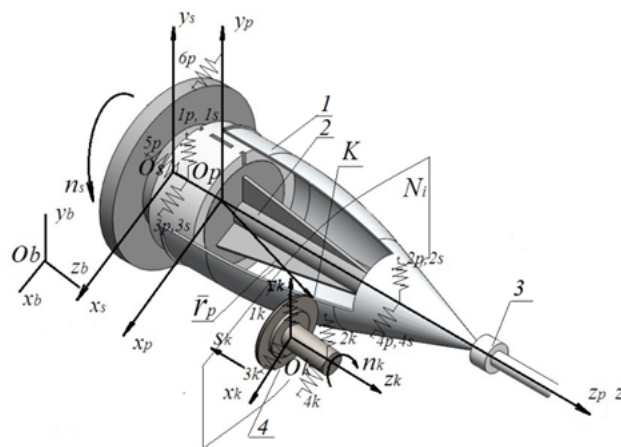


Рис. 1. Схема зовнішнього шліфування оболонки із зазначенням опорних точок

Шліфування виконується на універсальному токарному верстаті, який оснащений агрегатною шліфувальною голівкою, встановленою на супорті. На цьому етапі виріб, який оброблюється, являє собою тонкостінну оболонку 1, встановлену на оправці 2 і оперту на задній центр верстата через опору 3. Алмазний шліфувальний круг 4 встановлено на агрегатній шліфувальній голівці. Необхідно відзначити, що шліфування відбувається з глибиною 0,5...2 мм, при цьому глибина шліфування для різних ділянок оброблюваної зовнішньої поверхні може змінюватися в цих зазначених межах під час одного проходу шліфувального круга [5; 6], тобто реалізується процес «глибинного» шліфування.

Для математичного опису процесу утворення похибки обробленої поверхні позначимо зону контакту круга і виробу у вигляді точки «К». З метою уникнення зовеликого математичного виразу об'єднаємо ланки, що складають технологічну систему, у групи, параметри яких можливо виразити аналітично в доступній формі або отримати їх значення після проведення фізичних вимірювань у технологічній системі. Позначимо оброблювану підсистему заготовки (p); підсистему шпинделя-приспособлення (s); підсистему верстата-станіни (b); підсистему ріжучого інструменту (k). Введемо такі позначення підсистем координат:  $\sum_b$  – технологічного обладнання або верстата-станіни;  $\sum_s$  – шпинделя-приспособлення;  $\sum_p$  – оброблюваної заготовки;  $\sum_k$  – ріжучого інструменту. Розташування однієї з вищеперерахованих підсистем координат технологічної системи шліфування щодо іншої системи координат можна визначити трьома переміщеннями і трьома поворотами.

Щоб з'ясувати вплив вказаного фактора на точність обробки, введемо опорні точки  $1s, 2s, 3s, 4s, 5s; 1p, 2p, 3p, 4p, 5p, 6p; 1k, 2k, 3k, 4k$  для кожної підсистеми координат, які дозволяють нам «зв'язати» точки на поверхні деталі зазначених підсистем з осями систем координат (рис. 1). Опорні точки являють собою пружні зв'язки між підсистемами. Радіус-вектор  $\bar{r}_p$ , який показаний на рис. 1, є основною геометричною характеристикою, за допомогою якої можна висловити величину похибки обробленої поверхні і встановити функціональні зв'язки між величинами діючих факторів і похибкою обробки [7]. Геометрично процес утворення поверхні деталі описується як результат зміни за величиною і напрямком цього радіус-вектора.

Згідно зі схемою обробки (рис. 1), система координат інструменту  $\sum_k$  обертається навколо своєї осі  $O_k Z_k$  за законом  $\phi' = \phi'(t)$  і рухається в подовжньому напрямку щодо системи верстата  $\sum_b$  за законом  $\bar{S}_k = \bar{S}_k(t)$ . Система координат шпинделя з пристосуванням  $\sum_s$  обертається навколо своєї осі  $O_s Z_s$ . Вже згадана схема зовнішньої обробки є окремим випадком схеми для виведення рівнянь відносного руху точки контакту шліфувального круга з поверхнею оброблюваної заготовки, які розглянуті в роботі [7]. Виконавши перетворення, отримаємо рівняння руху точки  $K$  у векторній формі:

$$\bar{r}_p = M_p M'_s M_s M'_k M_k \bar{r}_k + M_p M'_s M_s (\bar{r}_{o_k} + \bar{S}_k - \bar{r}_{o_s}) - M_p \bar{r}_{so_p}, \quad (1)$$

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  $O_k X_k, O_k Y_k, O_k Z_k$ ;

$\bar{r}_k, \bar{r}_{o_k}, \bar{r}_{o_s}, \bar{r}_{so_p}$  – радіус-вектори, які відповідно визначають місце знаходження: точки  $K$  у системі координат шліфувального круга, початка системи координат інструмента  $O_k$  у нерухомій системі координат верстата, початка системи координат «шпиндель-пристосування»  $O_s$  в нерухомій системі верстата, початка системи координат заготовки  $O_p$  в системі координат «шпиндель-пристосування»;

$\bar{S}_k$  – вектор переміщення системи координат шліфувального круга в нерухомій системі координат верстата.

Заготовка-оболонка, що розглядається, є тілом обертання, тому її можна уявити як поєднання безлічі профілів поперечних перерізів  $N_i$  (рис. 1), що лежать у площинах, які перетинають заготовку перпендикулярно осі обертання. Основною геометричною характеристикою деталі, за відхиленнями якої можна робити висновки про похибки обробки, є радіус-вектор деталі  $\bar{r}_p$ .

Похибка профілю деталі в кожній її точці  $K_i$  визначається відповідно до виразу:

$$\Delta r_p^- = r_{p_i}^- - r_{p_{i0}}^- \quad (2)$$

де  $r_{p_{i0}}^-$  – значення проекції радіус-вектора  $\bar{r}_p$  на площину  $N_i$  в зоні контакту до відповідної точці контакту круга і заготовки « $K$ », яке задається вимогами до виробу;

$r_{p_i}^-$  – значення проекції вектора на площину  $N_i$  в зоні контакту до відповідної точці контакту круга і заготовки  $K$ , що отримано після обробки.

Нерівномірна хвилястість поверхні, що є наслідком значних коливань елементів технологічної системи, впливає на точність товщини стінки оболонки. Фактори, які впливають на хвилястість поверхні, були розглянуті в роботах [2; 6]. За результатами аналізу вібраційних процесів у технологічній системі шліфування зроблені висновки, що основними чинниками, які впливають на рівень вібрацій, а отже, і якість поверхні, є змінна жорсткість оброблюваної заготовки (тонкостінної оболонки) і низька жорсткість конструкції пристосування – консольної оправки. Величина амплітуди коливань також залежить від характеристики шліфувального круга; його зносу, який пов'язаний зі схемами обробки, які визначають площину контакту круга і заготовки; дисбалансу шліфувального круга.

Аналітичні дослідження вібрацій під час алмазного шліфування зовнішнього контуру оболонок у роботах [2; 3; 8] проводилися з використанням системи рівнянь руху відносних мас і формотворчих систем верстата. Для спрощення аналітичних виразів рух елементів технологічної системи розглядався в напрямку нормальної складової сили різання, яка є найбільшою за величиною та максимально впливає на формування поверхні заготовки.

Результатом, який був отриманий при використанні розробленої математичної моделі [2; 3; 6], є траєкторія руху точки « $K$ », яка розташована в зоні контакту інструменту з деталлю, і утворює поверхню заготовки у процесі проходження шліфувального круга. Положення миттєвих координат точки « $K$ » протягом часу визначить геометрію формованої поверхні. Миттєва координата точки « $K$ » визначається як сума миттєвих координат центру заготовки та інструменту, а також величини відносних зміщень поверхні заготовки-оболонки, які викликані коливаннями елементів ТС у процесі обробки:

$$\bar{X}_K = \bar{X}_k + \bar{X}_{sp} + \bar{X}_s, \quad (3)$$

де  $\bar{X}_K$  – миттєва координата точки « $K$ » у напрямку дії нормальної складової сили різання  $P_n(t)$  і відносно теоретичного контуру сформованої поверхні;

$\bar{X}_k$ ,  $\bar{X}_{sp}$ ,  $\bar{X}_s$  – миттєві координати осей, відповідно: шліфувального круга в напрямку дії  $P_n(t)$  і відносно теоретичного контуру сформованої поверхні; підсистеми «оправка-заготовка» в напрямку дії  $P_n(t)$  і відносно теоретичного контуру сформованої поверхні; шпинделя верстата в напрямку дії  $P_n(t)$  і відносно теоретичного контуру сформованої поверхні.

Колівання лінії контакту шліфувального круга і заготовки у процесі формоутворення залежать від коливань елементів ТС, які з'являються в результаті дії різноманітних факторів й у своєму поєднанні призводять до появи періодичної похибки на поверхні обробленої заготовки.

Включення динамічних факторів до рівняння руху (1) для точки « $K$ » дозволить побудувати більш точний профіль поверхні, тому що враховує більше зазначених вище факторів, ніж наведено у рівнянні (3). Уявимо схему обробки заготовки з урахуванням динамічних характеристик (рис. 2).

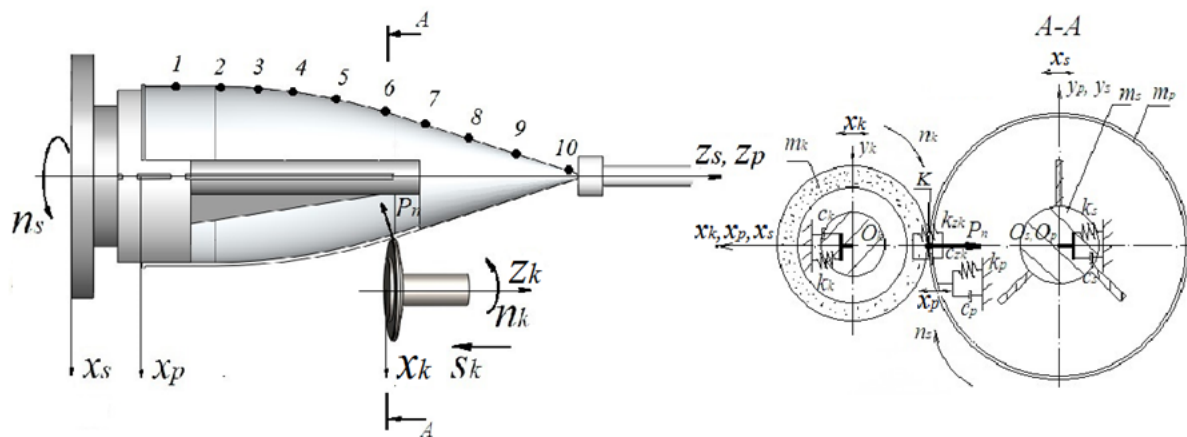


Рис. 2. Схема обробки заготовки на остаточному етапі шліфування зовнішньої поверхні з урахуванням динамічних характеристик

Таку схему з урахуванням певних припущень можна привести до еквівалентної розрахункової ланцюгової схеми, яка показана на рис. 3, де  $m_k$  – підсистема ТС «шпиндель – агрегатна головка-супорт»,  $m_{sp}$  – підсистема ТС «оправка – заготовка»,  $m_s$  – підсистема шпиндельного вузла.

Технологічну систему алмазного шліфування зовнішньої поверхні заготовки визначимо у вигляді тримасової моделі. На схемі (рис. 3) елементи системи позначені відповідно до схеми, що наведена на рис. 1: оброблювана заготовка –  $m_p$ ; оправка, на якій встановлена заготовка,  $m_{sp}$ ; інструмент (алмазний шліфувальний круг) –  $m_k$ ; шпиндельний вузол –  $m_s$ .

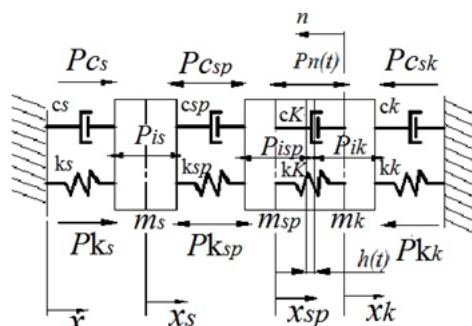


Рис. 3. Еквівалентна розрахункова ланцюгова схема шліфування зовнішньої поверхні тонкостінної оболонки обертання з урахуванням динамічних характеристик

Для остаточного етапу оброблення, якщо оброблювана заготовка є тонкостінною оболонкою з товщиною стінки 4..6 мм і при цьому маса заготовки оболонки значно менше маси оправки, на якій вона встановлена, розрахунок коливань поверхні оболонки буде здійснюватися за законами теорії оболонок, а в розрахунковій схемі (рис. 3) заготовка й оправка представлені як  $m_{sp}$ .

Колівання опорних точок елементів технологічної системи ( $1s, 2s, 3s, 4s, 5s; 1p, 2p, 3p, 4p, 5p, 6p; 1k, 2k, 3k, 4k$ , див. рис. 1) будуть моделюватися в напрямку дії нормальної складової сили різання, яка описується функцією  $P_n(t)$ , як сили, що найбільше впливає на виникнення динамічної нестійкості процесу оброблення.

Розглянемо рух замкнутої динамічної системи в напрямку нормалі до оброблюваної поверхні. Підсистема технологічної системи «шпиндель – агрегатна головка – супорт»  $m_k$  з'єднується з опорою (станіною верстата) через пружний  $k_k$  і дисипативний  $c_k$

елементи. Підсистема «шпіндельний вузол верстата»  $m_s$  через пружний  $k_s$  і дисипативний  $c_s$  елементи також з'єднується з опорою (розташованою в системі верстата  $\sum b$ ). Підсистема «оправка – заготовка» через пружний  $k_{sp}$  і дисипативний  $c_{sp}$  елементи приєднана до шпинделя верстата. Узагальнені координати переміщення мас:  $m_k - x_k$ ,  $m_{sp} - x_{sp}$ ,  $m_s - x_s$ . Координатою  $n_k$  позначено динамічний вплив з боку шліфувального круга, який обумовлений його биттям і огранкою, і відбувається з частотою, що відповідає частоті обертання інструменту.

Функцію  $P_n(t)$  можна уявити таким чином:

$$P_n(\tau) = P_{n0} + \sum_{i=1}^n P_{ni} \sin \omega \tau, \quad (4)$$

де  $P_{n0}$  – значення статичної складової сили різання;

$i$  – гармоніки, обумовлені:  $i=1$  – дисбалансом (биттям) круга, наприклад, через його встановлення з похибкою,  $i=2$  – відхиленням форми шліфувального круга від ідеальної;

$P_{ni}$  – сили, які викликані позначеними вище явищами, що виникають у процесі шліфування;

$\omega$  і  $\tau$  – відповідно, кругова частота і час.

Рівняння силового балансу для цієї технологічної системи зовнішнього шліфування можуть мати вигляд:

$$\begin{aligned} m_k \ddot{x}_k - c_k \dot{x}_k + c_K (\dot{x}_k - \dot{x}_{sp}) - k_k x_k + k_K (x_k - x_{sp}) &= c_K \dot{n} + k_K n; \\ m_{sp} \ddot{x}_{sp} - c_K (\dot{x}_k - \dot{x}_{sp}) + c_{sp} (\dot{x}_{sp} - \dot{x}_s) - k_K (x_k - x_{sp}) + k_{sp} (x_{sp} - x_s) &= -c_K \dot{n} - k_K n; \\ m_s \ddot{x}_s - c_{sp} (\dot{x}_{sp} - \dot{x}_s) + c_s \dot{x}_s + k_{sp} (x_{sp} - x_s) + k_s x_s &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Моделювання коливань стінки заготовки, яке розглянуто в роботі [3], враховується в моделі (5) через зміни глибини шліфування в зоні контакту. Модель (5) дозволила отримати амплітуди коливань елементів технологічної системи, величина яких залежить від режимів обробки, коливань елементів технологічної системи, у тому числі шліфувального круга і тонкостінної оболонки, і, як наслідок, коливань сили різання у разі зміни глибини різання.

Отримуючи значення переміщень  $x$  елементів технологічної системи в опорних точках у результаті рішення системи рівнянь (5) і підставляючи їх у рівняння (1), визначимо відхилення параметрів відносного руху, зумовлених переміщенням однієї системи координат відносно іншої ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  – лінійні переміщення,  $\Delta \phi$ ,  $\Delta \varphi$ ,  $\Delta \theta$  – обертання відносно осей) в опорних точках із урахуванням коливань елементів технологічної системи. Отримавши значення відносних переміщень координатних систем за один оборот заготовки і моделюючи необхідну кількість обертів, можливо визначити сумарну похибку одержуваного профілю залежно від величини і напрямків дії факторів, що впливають на похибку обробки.

**Висновки і пропозиції.** Результати досліджень, які були отримані раніше за допомогою динамічної моделі (5) і моделі утворення хвилястості поверхні (3), дозволили: визначити діапазон безвібраційних режимів алмазного шліфування зовнішньої поверхні й оптимальне розташування опор оправки, яке враховує коливання стінки оболонки; дослідити способи зменшення коливань стінки оболонки; розробити способи зменшення хвилястості на етапі оброблення зовнішньої поверхні [6]. Зменшення хвилястості поверхні дозволило підвищити точність по товщині стінки оболонки і знизити трудомісткість ручних доводочних робіт. Однак це не виключає операції вирізки в існуючому технологічному процесі.

Модель (1) дозволяє дослідити способи зменшення сумарної похибки обробки, а також визначити рівень факторів, що впливають на похибку формування профілю під час механічного оброблення на всіх операціях алмазного шліфування оболонок в порядку технологічного процесу, що на чистовій обробці приводить до необхідності виключення цієї похибки на операції «вирізки». До згаданих чинників відносять фактори нерівномірності припуску, який утворюється на стадії отримання заготовки, і його копіювання на профіль оброблюваної деталі, а також змінних по довжині значень жорсткості заготовки і пристосування та копіювання похибки форми заготовки з урахуванням рівня уточнення в подовжньому та радіальному напрямках. Перспектива цього дослідження полягає в можливості підвищення ефективності та рівня автоматизації обробки деталей – оболонок складної просторової форми із крихких неметалевих матеріалів завдяки удосконаленню технології заготівельних операцій, а також розроблення прогресивних схем шліфування при використанні верстатів з ЧПУ.

### Список використаних джерел

1. Гусев В. В. Технологическое обеспечение качества обработки изделий из технической керамики : монография / В. В. Гусев, Л. П. Калафатова. – Донецк : ДонНТУ, 2012. – 252 с.
2. 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 : зб. наук. праць. – Х. : НТУ «ХПИ», 2011. – Вип. 6. – С. 14–23.
3. 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.
4. 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» / Поколенко Дмитро Валерійович ; ДонНТУ. – Донецьк, 2014. – 20 с.
5. Олейник С. Ю. Оценка параметров волнистости поверхности на операции глубинного алмазного шлифования крупногабаритных тонкостенных ситалловых оболочек / С. Ю. Олейник // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Машинобудування і машинознавство». – 2015. – № 1 (12). – С. 40–46.
6. Олійник С. Ю. Забезпечення якості обробки тонкостінних ситаллових оболонок шляхом покращення динамічних характеристик технологічної системи шліфування : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.02.08 «Технологія машинобудування» / Олійник Світлана Юрійвна ; ДонНТУ. – Красноармійськ, 2014. – 20 с.
7. Адаптивное управление станками : монография / [под ред. Б. С. Балакашина]. – М. : Машиностроение, 1973. – 688 с.
8. Гусев В. В. Повышение виброустойчивости технологической системы во время алмазного шлифования тонкостенных оболочек вращения из ситаллов / В. В. Гусев, Л. П. Калафатова, С. Ю. Олейник // Резание и инструмент в технологических системах : междунар. научн.-техн. сб. – Х. : НТУ «ХПИ», 2013. – Вип. 83. – С. 86–92.

### References

1. Gusev, V.V. & Kalafatova, L.P. (2012). *Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva obrabotki izdelii iz tekhnicheskoi keramiki [Technological security of quality processing of products from technical ceramics]*. Donetsk: DonNTU (in Russian).
2. Gusev, V.V., Kalafatova, L.P. & Oleinik, S.Iu. (2011). Obosnovanie raschetnoi skhemy dlia issledovaniia dinamicheskogo sostoianiia tekhnologicheskoi sistemy almazno-abrazivnoi obrabotki tonkostennykh obolochek iz sitalla [Substantiation of the settlement scheme for the research of the dynamic condition of technological system of diamond-abrasive processing of thin-walled shells from glass-ceramics]. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni – Modern technologies of engineering*, no. 6, pp. 14–23 (in Russian).



## TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGIES

3. Gusev, V.V., Kalafatova, L.P. & Oleinik, S.Iu. (2012). Issledovanie dinamicheskogo sostoiania tekhnologicheskoi sistemy almazno-abrazivnoi obrabotki tonkostennykh obolochek iz sitallov [Investigation of the dynamic process of diamond-abrasive treatment of glass-ceramic's thin-walled shells]. *Visnyk SevNTU. Serii: Mashynopryladobuduvannia ta transport – Journal of the Sevastopol National Technical University. Series: Mechanical Instrumentation and Transport*, no. 128, pp. 60–67 (in Russian).
4. Pokolenko, D.V. (2014). Pidvyshchennia efektyvnosti obrobky antenykh obtichnykiv iz sytaliv za rakhunok udoskonalennia tekhnolohii almaznogo shlifuvannia [Increase of the efficiency of processing the antenna domes made of cetalss due to upgrading of diamond grinding technology]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Donetsk: DonNTU (in Ukrainian).
5. Oleinik, S.Iu. (2015). Otsenka parametrov volnistosti poverkhnosti na operatsii glubinnoho almaznogo shlifovannia krupnogabaritnykh tonkostennykh sitallovykh obolochek [Estimation of parameters of waviness on the surface on the operation of deep diamond grinding of large thin-walled shells from cetalss]. *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Serii: «Mashynobuduvannia i mashynoznavstvo» – Bulletin of DonNTU, Series: Mechanical Engineering*, no. 1 (12), pp. 40–46 (in Russian).
6. Oliinyk, S.Iu. (2014). Zabezpechennia yakosti obrobky tonkostennykh sytalovykh obolonok shliakhom pokrashchennia dynamichnykh kharakterystyk tekhnolohichnoi systemy shlifuvannia [Assurance of accuracy of machining thin-walled shells from pyroceram by improving the dynamic characteristics of technological system of grinding]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Krasnoarmiysk: DonNTU (in Ukrainian).
7. Balakashin B.S. (ed.) (1973). *Adaptivnoe upravlenie stankami [Adaptive control of machines]*. Moscow: Mashinostroenie (in Russian).
8. Gusev, V.V., Kalafatova, L.P. & Oleinik, S.Iu. (2013). Povyshenie vibroustoichivosti tekhnologicheskoi sistemy vo vremia almaznogo shlifovannia tonkostennykh obolochek vrashcheniia iz sitallov [Increase the vibration resistance of a technological system during diamond grinding of thin-walled shells from glass-ceramics]. *Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh – Cutting & tool in technological system*, no. 83, pp. 86–91 (in Russian).

**Олійник Світлана Юрївна** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технології машинобудування, Донбаська державна машинобудівна академія (вул. Академічна, 72, м. Краматорськ, 84313, Україна).

**Олейник Светлана Юрьевна** – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры технологии машиностроения, Донбасская государственная машиностроительная академия (ул. Академическая, 72, г. Краматорск, 84313, Украина).

**Oliinyk Svitlana** – PhD in Technical Sciences, Senior Lecturer of Machine Building Technology Department, Donbass State Engineering Academy (72 Academy Str., 84313 Kramatorsk, Ukraine).  
E-mail: sveta.oleynik30@gmail.com

**Калафатова Людмила Павлівна** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри гірничих машин і мехатронних систем машинобудування, Донецький національний технічний університет (пл. Шибанкова, 2, м. Покровськ, 85300, Україна).

**Калафатова Людмила Павловна** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горных машин и мехатронных систем машиностроения, Донецкий национальный технический университет (пл. Шибанкова, 2, г. Покровск, 85300, Украина).

**Kalafatova Liudmyla Pavlivna** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Mountain Machines and Mechatronic Systems of Engineer, Donetsk National Technical University (2 Shybankova Sq., 85300 Pokrovsk, Ukraine).

E-mail: lpk04nov@mail.ru

**Поколенко Дмитро Валерійович** – кандидат технічних наук, начальник науково-вимірвального центру Костянтинівського державного науково-виробничого підприємства «Кварсит» (вул. Шмідта, 20, м. Костянтинівка, 85110, Україна).

**Поколенко Дмитрий Валерьевич** – кандидат технических наук, начальник научно-измерительного центра Константиновского научно-производственного предприятия «Кварсит» (ул. Шмидта, 20, г. Константиновка, 85110, Украина).

**Pokolenko Dmytro** – PhD in Technical Sciences, Chief of Scientifically-Measuring Center of Konstantinovka Scientific and Production Enterprise “Kvarsit” (20 Shmidta Str., 85110 Konstantinovka, Ukraine).

E-mail: pokolenko.dim@gmail.com