

С. Олійник, Краматорськ, Україна,
Л. Калафатова, Покровськ, Україна

АНАЛІЗ СХЕМИ ОБРОБКИ СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ ОБОЛОНОК ОБЕРТАННЯ

Анотація. У статті розглядаються проблеми точності обробки складнопрофільних маложорстких деталей. З метою підвищення точності шліфування виконується дослідження операційної схеми обробки тонкостінної оболонки. Моделювання похибки профілю на операції остаточного шліфування було виконано для традиційної схеми обробки, на токарному верстаті з агрегатною шліфувальною головкою і системою прямого копіювання, і для схеми обробки на обладнанні, яке оснащено механізмом з паралельними структурами. Використана модель базується на математичному описі процесу утворення похибки обробки за допомогою рівнянь відносного руху технологічних баз оброблюваної заготовки і точки контакту робочої поверхні круга із заготовкою. Розрахунки довели, що запропонована схема обробки та технологічне обладнання дозволять виключити похибку устанавлення, виконати обробку з необхідним кутом розвороту осі круга, підвищити жорсткість технологічної системи і забезпечити точність обробки зовнішнього контуру деталі.

Ключові слова: тонкостінні оболонки; алмазне шліфування; похибка обробки; механізми з паралельною кінематикою; моделювання процесів.

Постановка проблеми

Сучасне машинобудування відрізняється геометричною складністю виробів, які виготовлені з нових матеріалів і характеризуються високими вимогами до якості робочих поверхонь та їх обґрунтованими властивостями. В більшості випадків такі вироби виготовляються в дрібносерійному або одиничному виробництві. Це спровокувало розвиток і впровадження реконфігуруємих виробництв, що вимагає використання модульних технологічних систем, які базуються на принципах та методах мехатроніки. В цьому напрямку одним із перспективних шляхів є використання механізмів з паралельною структурою [1], які дозволяють реалізувати широкі функціональні можливості при формуванні геометрично складних поверхонь, нежорстких деталей та реалізації технологічних процесів оброблення з різною фізичною сутністю. Верстати-роботи можуть виконувати фрезерні, свердлильні, токарні, розточувальні, різьбонарізні та шліфувальні роботи [2]. Відомі компоновки таких верстатів забезпечують менші габарити, потенційно велику питому жорсткість, підвищені динамічні характеристики, простоту і технологічність конструкції, крім того похибки, які виникають під час обробки, можна компенсувати використанням відповідного

управляючого програмного забезпечення [3]. При цьому вони дешевші і простіші в обслуговуванні. Їх конструкція та технологічні можливості постійно вдосконалюються. Таке обладнання дає можливість вирішити технологічні завдання, які до цього моменту не мали досконалого рішення.

Складнопрофільні вироби машинобудівної, ракетної та авіаційної техніки характеризуються різноманітністю форм оброблюваних поверхонь та матеріалів, з яких вони виготовляються. Переважно, це тіла обертання: тонкостінні циліндри, які ускладнені елементами, складнопрофільні оболонки, обичайки, диски і т.п. Такі деталі мають різноманітну конфігурацію, конструктивні особливості, розміри, високі вимоги до точності і якості поверхонь. Складаються ці деталі з поверхонь, параметри локальної топології яких змінюються від однієї точки до іншої нескінченно близької до неї точки. Вони виготовляються, в залежності від умов експлуатації, з найрізноманітніших матеріалів: від полімерів до жароміцних і твердих сплавів та виробів з крихких неметалевих матеріалів типу технічних ситалів і кераміки. При цьому до вказаних деталей пред'являють підвищені вимоги по точності та стану поверхневого та приповерхневого шарів. Дослідження факторів, які впливають на похибки при механічній обробці деталей – тонкостінних кілець, фланців, ребер корпусів камер згоряння, та методики розрахунку їх деформацій розглянуто в роботі [4]. Розробка методики із забезпечення вимог точності для автоматизованого виробництва тонкостінних деталей з використанням метода циліндричних моментних оболонок та імітаційного моделювання представлено в роботі [5]. Дослідження способів зниження вібрацій під час фрезерування тонкостінних металевих заготовок-облонок, ускладнених додатковими елементами, розглянуто в роботі [6]. Таким чином, проблема прогнозування похибок та встановлення якісного і кількісного їх зв'язку з діючими технологічними факторами при автоматизованій обробці тонкостінних деталей є актуальною в науковому і прикладному аспектах.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій

Об'єктом дослідження в статті є технологічна система шліфування складнопрофільних тонкостінних оболонок (довжиною від 0,5 до 2 м і діаметром від 200 мм до 500 мм, з товщиною стінки 4–6 мм), які виготовляються з крихких неметалевих матеріалів типу технічних ситалів і кераміки, наприклад, обтічників ракет різних класів [7]. До таких деталей висуваються високі вимоги по точності поверхонь внутрішнього, зовнішнього контурів та товщині стінки, а також до рівня мікро- і макрогеометрії, дефектності приповерхневого шару виробів. Складна

нетехнологічна форма обolonкової деталі обумовлює особливості оброблення та встановлення її на технологічному обладнанні під час алмазного шліфування, яке є виключно можливим варіантом при обробці матеріалів аналогічного класу. Оброблення кожного виробу є достатньо трудомістким процесом, який займає більше 40 годин та має значну частку доводочних робіт, що виконуються вручну. Дослідження проблеми точності оброблення таких виробів представлені в роботах [7-9], де наведені результати теоретичних та експериментальних досліджень впливу технологічних факторів і систематичних похибок на точність профіля обробленої поверхні під час внутрішнього і зовнішнього шліфування контуру. Встановлено, що основними визначальними факторами при цьому є змінна жорсткість заготовки по довжині, а також силові фактори процесу шліфування. Експериментальні та теоретичні дослідження впливу вібрацій на якість поверхні і точність профілю обolonки дозволили встановити, що головним джерелом коливань у технологічній системі є сили, які виникають з боку дії шліфувального круга на заготовку [7]. Інтенсивність коливань змінюється в залежності від місця контакту круга із заготовкою по її довжині, що впливає на хвилястість поверхні.

Для варіантів обробки на обладнанні з класичною кінематичною структурою була запропонована схема різання, яка відрізняється від традиційної зміною кута нахилу осі круга відносно осі деталі [7]. Результати попередніх досліджень якості поверхні [7, 8] дозволили сформулювати вимоги до напрямку силового впливу на оброблювану поверхню щодо забезпечення в ній мінімального рівня дефектності. Для цього необхідно, щоб основний градієнт напружень від сил різання був зосереджений в об'ємі припуску, що видаляється. В дослідженнях, які представлені в роботах [7, 8], доведено, що зміною схеми різання та режиму шліфування можна впливати на характер взаємодії робочої поверхні круга з оброблюваною поверхнею заготовки за рахунок зміни площі їх контакту. Цей фактор впливає на величину демпфування в системі інструмент-заготовка, перерозподіл припуску в необхідному напрямку вздовж утворюючої круга. Таким чином, можна направлено формувати силовий вплив на поверхню заготовки за рахунок зміни умов роботи алмазних зерен та їх зносу. Така схема обробки має назву шліфування з «перехресними осями». Дослідження схеми процесу глибинного круглого шліфування зі схрещеними осями інструменту і деталі, при якому чорновий припуск знімається торцем круга, а чистове шліфування і виходжування виконується його периферією, показує, що вибір оптимального кута орієнтації дозволяє керувати розмірами плями контакту, що, в свою чергу, впливає на продуктивність обробки, знос

шліфувального інструменту та розвантаження його калібрувальної ділянки [9]. В експериментальних дослідженнях [10] доведено, що зміна традиційної схеми обробки на обробку з перехресними осями шліфувального круга та деталі з одночасним розворотом інструмента в осьовій площині так, щоб його крайка виходила за межі припуску, що видаляється, дозволяє збільшити продуктивність обробки, підвищити стійкість інструменту та стабільність процесу шліфування. В роботі [8] була запропонована схема внутрішнього шліфування, яка відрізняється від традиційної тим, що подача круга відбувається від фланцю до носка заготовки-оболонки. Рівнодіюча сил різання при цьому спрямована в припуск, який видаляється, та прагне притиснути заготовку до установчих елементів пристрою. Така схема дозволила зменшити негативний вплив на якість поверхні, що формується, радіальної складової сили різання, яка в традиційній схемі направлена в оброблювану поверхню.

Таким чином, головними факторами, які впливають на точність та якість поверхні, є статична та динамічна настройка технологічної системи (ТС), рівень силових факторів процесу шліфування та динамічні характеристики елементів ТС. Похибки обробки, які виникають при цьому, наступні: різнововщинність виробу по діаметру та довжині; змінна хвилястість поверхні; невідповідні шорсткість оброблюваної поверхні і дефектність приповерхневого шару виробу [7-9]. Це вимагає впроваджувати у технологічний процес трудомісткі чистові та фінішні операції, які підвищують собівартість виробу.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми

Аналіз результатів проведених досліджень вказує на те, що виникнення похибок формування профіля деталі провокує в тому числі і недосконалу схему шліфування заготовки, яка визначається взаємним розташуванням заготовки та інструменту, що впливає на силовий фактор під час обробки та динаміку технологічної системи. Встановлено, що в результаті формоутворення складнопрофільних деталей способом алмазного шліфування сукупна похибка обробки зовнішнього контуру досягає 0,8 мм [7], а хвилястість поверхні по висотному фактору становить до 0,13 мм [7, 9]. Необхідна точність профілю досягається за допомогою операції доведення, яка виконується вручну. Варіанти зміни схеми шліфування обмежені технологічними можливостями традиційного обладнання, яке використовується для механічної обробки таких деталей. Крім того, значний вплив на величину систематичних похибок обробки спричиняє схема базування деталі в пристосуванні та безпосередньо конструкція самого верстатного пристосування. Вдосконалення сучасних

методів отримання заготовок [9] для оболонок з крихких неметалевих матеріалів дозволяє значно зменшити припуск на механічну обробку, таким чином ще більш важливим стає питання забезпечення точності на чистових етапах обробки деталі.

Мета роботи є обґрунтування вибору операційних схем шліфування складнопрофільних оболонок при використанні сучасного обладнання для підвищення точності механічної обробки їх поверхонь.

Виклад основного матеріалу

Технологічний процес виготовлення тонкостінних оболонок, який запропоновано в роботі, складається з трьох основних етапів: отримання заготовки, її механічної обробки та операції зміцнення поверхневого шару оброблених поверхонь деталі. Формування профілю виробу із заданими характеристиками здійснюється на етапах внутрішнього шліфування заготовки при її базуванні по зовнішній поверхні і наступного зовнішнього шліфування при базуванні на попередньо обробленій внутрішній поверхні. Традиційна схема обробки обґрунтована можливостями технологічного обладнання для виконання механічної обробки поверхонь оболонки (рис. 1 а). Сучасне обладнання з використанням механізмів з паралельною структурою та з вбудованим обертальним столом [2] дає можливість змінити розташування заготовки відносно опорних поверхонь. Розглянемо схему обробки з розташуванням заготовки у вертикальній площині та за умови зміни схеми базування (рис. 1, б).

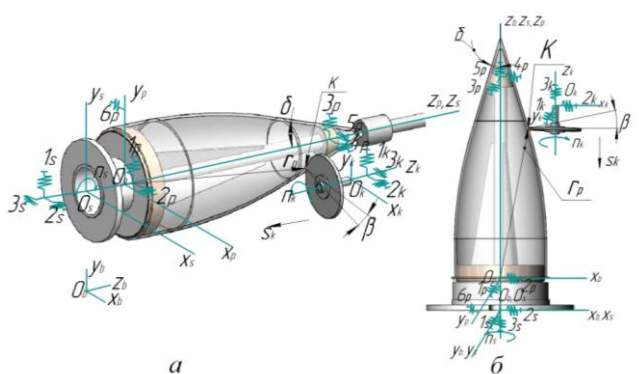


Рисунок 1 – Схеми шліфування при використанні: а – токарного верстата, оснащеного агрегатною шліфувальною головкою та системою прямого копіювання (Варіант I); б – технологічного обладнання з механізмами паралельної кінематики, вбудованим обертовим столом і з системою ЧПК (Варіант II)

Запропонована схема (див. рис. 1, б) з розтискною оправкою виключає похибку базування, дозволяє використовувати схему різання з «перехресними осями» круга і заготовки при розвороті круга відносно осі заготовки на кут, який виключає вплив на точність профілювання зміни положення формоутворюючої точки на поверхні різального інструменту при його переміщенні вздовж оброблюваної поверхні [7]. Також на точність позитивно впливає переорієнтування дії нормальної сили на оброблювану поверхню та підвищення жорсткості технологічної системи в порівнянні з традиційною схемою (див. рис. 1, а). Для оцінки впливу запропонованої схеми різання з врахуванням факторів, що виникають під час механічної обробки, на сукупну похибку виконання профілю деталі при чистовому шліфуванні використаємо імітаційну розрахункову модель, яка була досліджена в роботах [11, 12].

Для побудови математичної моделі технологічна система представлена складеною з підсистем: заготовка (p); шпиндель-присосування (s); верстат-станина (b); різальний інструмент (k) (див. рис. 1). Кожна підсистема має свою систему координат: \sum_b – технологічного обладнання або верстата-станини, \sum_s – шпинделя-присосування, \sum_p – заготовки, \sum_k – різального інструменту (шліфувального круга). Характеристикою, яка виконує математичний опис профілю поверхні, що формується під час обробки, в залежності від відносних переміщень баз елементів технологічної системи (з урахуванням схеми відносного руху заготовки та інструменту) виступає радіус-вектор \bar{r}_p . Радіус-вектор виходить з початку координат заготовки O_p та закінчується на утвореній поверхні (див. рис. 1, а, б), що дає можливість описати похибку профілювання як функціональну залежність між факторами процесу шліфування, параметрами технологічної системи та відхиленнями радіус-вектора \bar{r}_p .

Відповідно до обох схем обробки (див. рис. 1), система координат шпинделя з присосуванням \sum_s обертається навколо своєї осі $O_s X_s$. Система координат інструмента \sum_k обертається навколо осі $O_k X_k$ з постійною швидкістю і переміщається в подовжньому напрямку по відношенню до системи верстата \sum_b за законом $\bar{S}_k = \bar{S}_k(t)$. Обертання системи координат шліфувального круга не впливає на визначення

радіус-вектора \bar{r}_p , тому не враховується в математичній моделі. Таким чином, математичну модель, яка описує довжину вектора \bar{r}_p на операції зовнішнього шліфування, записуємо у наступному вигляді:

$$\bar{r}_p = M_p M_s M_k M_s' \bar{r}_k + M_p M_s M_s' (\bar{r}_{0k} + \bar{S}_k - \bar{r}_{0s}) - M_p \bar{r}_{s0_p} \quad (1)$$

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 системи координат шпindelь-приспособування навколо осей $O_s X_s, O_s Y_s, O_s Z_s$;

M_k – матриця повороту системи координат шліфувального круга навколо осей $O_k X_k, O_k Y_k, O_k Z_k$;

M_s' – матриця повороту, яка враховує задане схемою відносного руху оброблюваної заготовки і шліфувального круга обертання системи координат шпindelь-приспособування;

\bar{r}_k – радіус-вектор, який визначає місце знаходження точки K в системі координат шліфувального круга;

\bar{r}_{0k} – радіус-вектор, який визначає місце знаходження початку системи координат інструмента O_k в нерухомій системі координат верстата;

\bar{r}_{0s} – радіус-вектор, який визначає місце знаходження початку системи координат шпindelя-приспособування 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 шпindelь-приспособування.

Похибка профілю зовнішньої поверхні в кожній обраній для дослідження точці K_i визначається відповідно до виразу:

$$\Delta r_p = \bar{r}_{p_i} - \bar{r}_{p_{i0}}, \quad (2)$$

де $\bar{r}_{p_{i0}}^{\prime}$ – задане значення проекції радіус-вектора \bar{r}_p на площину в зоні контакту до відповідної точки контакту круга і заготовки K – площину шліфування;

$\bar{r}_{p_i}^{\prime}$ – фактичне значення проекції вектора \bar{r}_p на площину шліфування.

Фактичне значення проекції вектора на координатні осі представимо у вигляді суми векторів:

$$\bar{r}_p^{\prime} = \bar{r}_u^{\prime} + \bar{r}_n^{\prime}, \quad (3)$$

де \bar{r}_u^{\prime} – проекція радіус-вектора установки заготовки на площину шліфування, яка визначає вплив переміщень і поворотів системи координат заготовки на точність обробки в поперечному перерізі;

\bar{r}_n^{\prime} – проекція радіус-вектора настройки \bar{r}_n на площину шліфування, яка визначає вплив сумарних переміщень і поворотів системи координат заготовки і шліфувального круга.

Величина проекції вектора \bar{r}_u^{\prime} визначається через радіус-вектор \bar{r}_{so_p} та матрицю поворотів системи координат заготовки M_p . Величина проекції вектору \bar{r}_n^{\prime} визначається через радіус-вектори \bar{r}_{o_s} , \bar{r}_k та матриці M_s і M_k . Проекція радіус-вектора налаштування \bar{r}_n^{\prime} на площину шліфування описується векторною сумою:

$$\bar{r}_n^{\prime} = \bar{r}_{sn}^{\prime} + \bar{r}_k^{\prime}, \quad (4)$$

де \bar{r}_{sn}^{\prime} – проекція вектора \bar{r}_{sn} в площині шліфування, яка визначає відстань і напрямок між осями $O_s X_s$ і $O_k X_k$ у площині шліфування;

\bar{r}_k^{\prime} – проекція вектора \bar{r}_k , що визначає відстань і напрямок між віссю $O_k X_k$ і точкою K в площині шліфування.

Похибка установки викликає відхилення початкових значень розмірних параметрів рівняння руху, а похибки статичного та динамічного налаштувань викликають відхилення як початкових, так і поточних значень параметрів відносного руху елементів технологічної

системи. Після підстановки значень параметрів відхилень відносного руху технологічних баз у рівняння математичної моделі (1) можна визначити похибку формування профілю деталі на операції алмазного шліфування і врахувати похибки, які виникають при прямому копіюванні профілю заготовки (див. рис. 1, *a*) або залежать від конструкційних параметрів технологічного оснащення (див. рис. 1, *a, б*).

Під час обробки під дією сил різання та інерції, мас заготовки і пристосування, крутних моментів у технологічній системі порушується задане відносне розташування систем координат заготовки, шліфувального круга, шпинделя-пристосування. Особливістю цієї моделі для визначення похибки профілювання складних поверхонь є те, що вона дозволяє врахувати змінності зазначених сил і моментів за величиною і напрямком, які пов'язані не тільки з нерівномірним припуском і змінною приведеною жорсткістю заготовки і пристосування вздовж профілю деталі по ходу подачі інструмента, але і з складною формою оброблюваної деталі та станом алмазного круга.

Розрахункова модель розроблена з використанням математичної моделі (1) в системі візуального математичного моделювання Matlab Simulink. Застосування системи імітаційного моделювання дозволяє досліджувати формування профілю поверхні під час шліфування з урахуванням змінного характеру вихідних даних, які описуються як аналітичними, так і експериментальними залежностями. Розроблена модель надалі буде використана як інструмент для перевірки нових технологічних рішень, що стосуються обробки маложорстких складнопрофільних виробів на технологічних машинах із механізмами паралельної структури.

Змодельємо величину похибки профілювання на операції чистового шліфування зовнішньої поверхні виробу за традиційною схемою обробки (див. рис. 1, *a*) – варіант I, та схемою, яка пропонується (див. рис. 1, *б*) – варіант II.

Похибка статичної настройки ТС з'являється в результаті помилок у налаштуванні, вимірах, наявності геометричної неточності обладнання, похибки встановлення заготовки на обладнанні. Похибка устанавлювання складається з похибок базування, затискання та самого пристосування. Установчі поверхні пристосування обробляють на тому ж верстаті, тому похибка пристосування має незначний вплив і не враховується далі. Похибка затискання визначається контактними деформаціями виробу. За експериментальними даними [7] величина похибки затискання незначна в порівнянні з похибкою базування. Похибка базування має осьову та кутову складові, які врахуємо в імітаційній моделі. Осьова складова похибки виникає через розбіжність технологічної та виміральної баз та

за даними роботи [7] для традиційної схеми обробки складає на остаточній операції алмазного шліфування зовнішнього контуру $\Delta_{\sigma o} = 1,13$ мм. Базування заготовки виконується по поверхням опор оправки (див. рис. 1, *a*). Між заготовкою та циліндричною частиною оправки існує зазор, який приводить до повороту заготовки під час обробки під дією сили різання. Таким чином, кутова похибка базування складається з похибки вивірки осі заготовки при внутрішньому шліфуванні та величини зазору між циліндричною опорою оправки та базовою поверхнею заготовки [7]. В результаті похибка базування впливає на відхилення товщини стінки заготовки по її довжині, що унеможливує використання автоматичного отримання розміру і для варіанту традиційного методу обробки приводить до необхідності здійснення корегування позиції інструмента відносно заготовки.

Похибка статичного налаштування верстату в традиційній схемі обробки зовнішньої поверхні обумовлена налаштуванням шпинделя шліфувального круга відносно установчих елементів пристосування та копіру, так як обробка виконується методом прямого копіювання. Похибка налаштування верстата на розмір в осьовому та діаметральному напрямках приймається за вимірами та розрахунками, представленими в роботі [7], і складає в осьовому напрямку $\Delta_{uo} = 0,58 - 1,66$ мм в залежності від місця обробки по довжині контуру і в радіальному напрямку – $\Delta_{np} = 0,054$ мм.

Знос шліфувального круга впливає на зміну величини радіус-вектора r_k . Під час шліфування профіль круга нерівномірно змінює свою форму, що приводить до похибки профілювання. Способом зменшення похибки є розворот круга на кут β між осями круга та заготовки. В роботі [7] доведено, що при розвороті круга на кут більше 10° , похибка, пов'язана зі зміною контактної поверхні інструмента, зникає. При традиційній схемі обробки розворот круга через конструктивні особливості верстату та схеми шліфування можливо виконати тільки на 7° , що обумовлює похибку при обробці параболічної поверхні, яка збільшується вздовж заготовки. При обробці конічної поверхні похибка профілювання, яка залежить від зношення поверхні круга, відсутня. При моделюванні обробки заготовки за схемою (див. рис. 1, *b*) круг можливо розгорнути на 12° , що виключить появу цієї похибки.

В процесі обробки при переміщенні точки K – точки контакту інструменту і виробу, який обробляється, вздовж осі Z_p (див. рис. 1) відбувається зміна жорсткості технологічної системи, що пов'язано з

особливостями конструкції деталі і обраної схеми шліфування. Це впливає на величину відхилення пристосування і заготовки і, як наслідок, на зміну величини радіус-вектора \bar{r}_p . Для розрахунків визначено зміну жорсткості заготовки-оболонки, яка встановлена на оправці, під дією складових сил різання для обох варіантів (див. рис. 1, а, б). Також враховані зміни геометричних характеристик деталі, які виникають при видаленні припуску під час обробки, таких як пересування координати центра тяжіння, зміна центробіжних моментів інерції, що впливає на появу сил та моментів інерції.

Крім сил різання на заготовку діють сили інерції, які можуть виникати через обертання неврівноважених мас, що було враховано в роботі [12] при моделюванні чорнового етапу внутрішньої обробки контуру оболонки. Для чистового етапу обробки зовнішнього контуру сили інерції незначні і мало впливають на точність профілювання.

Для моделювання сумарного впливу перерахованих факторів на точність обробки були прийняті наступні умови зовнішнього шліфування оболонки: матеріал оброблюваної заготовки ситал АС-418, шліфування виконується алмазним кругом ІАІ 200x10x3x76 315/250-4-M2-01 зі сталою формою круга, яка за рахунок його прироблення виникає після 60 годин шліфування [7]; режим шліфування відповідає рекомендованому в роботах [7-9] (глибина різання 1 мм, подача 0,65 мм/об, швидкість різання 40 м/с, частота обертання заготовки 80 об/хв); нормальна складова сили різання змінюється при переміщенні інструмента по координаті Z_p від 150 до 420 Н [7]; для варіанта І змодельована обробка поверхні з кутом нахилу осі шліфувального круга до осі заготовки $\beta=7^\circ$, де при зміні миттєвого кута δ поверхні оболонки (див. рис. 1) виникає похибка профілювання, для варіанта II – $\beta=12^\circ$, як наслідок – відсутня похибка профілювання на параболічній частині заготовки; розрахунок приведеної жорсткості, моментів інерції, координати центра тяжіння виконано в прикладній програмі SolidWorks Simulation та відповідають експериментальним даним, які представлені в роботах [7-9]; для варіанту II згідно даним роботи [2] прийнята просторова точність $\pm 0,025$ мм, постійна для всієї зони обробки.

Похибка профіля заготовки по координаті X_p (див. рис. 1) впливає на похибку товщини стінки оболонки і відображається на її експлуатаційних характеристиках. На рис. 2 представлена залежність

сумарної похибки профіля від координати X_p для обох варіантів схем обробки.

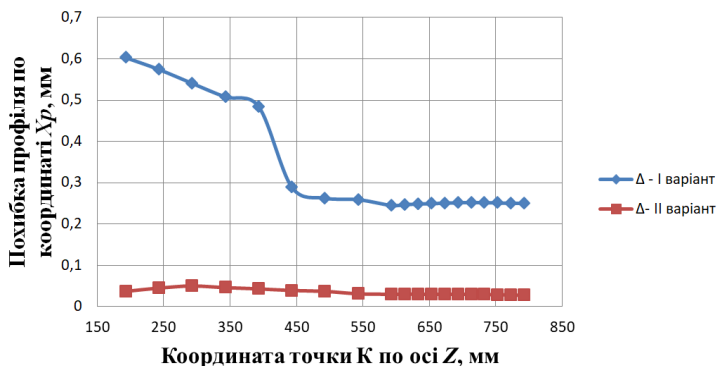


Рисунок 2 – Результат моделювання похибки профіля деталі по координаті X_p

Розрахунки похибки профіля оболонки, які виконані для схеми варіанта I, відповідають експериментальним даним, які надаються в роботі [7], і підтверджують адекватність моделі. Виходячи з цього, порівняння отриманих результатів при реалізації обох варіантів обробки (див. рис. 2) свідчить про підвищення точності профілювання деталі при використанні запропонованого варіанту шліфування у порівнянні з базовим від 12 до 5 разів в залежності від положення зони контакту круга із заготовкою по її довжині. Таким чином, модель можливо використовувати, як інструмент для перевірки технологічних рішень відносно обробки тонкостінних складнопрофільних оболонок, а також інших подібних деталей для будь-яких схем обробки, які реалізовані на існуючому технологічному обладнанні.

Висновки і пропозиції.

Для забезпечення точності отримання розглянутих деталей в роботі [7] вказано на необхідність використання спеціального технологічного обладнання, але для умов одиничного або дрібносерійного виробництва це суттєво підвищить собівартість виробів. Розрахунки підтвердили, що верстати з механізмами паралельної кінематики по своїм технологічним можливостям здатні забезпечити необхідну точність оброблення подібних виробів, а завдяки високій гнучкості та універсальності мають

можливість виготовляти вироби з невисокою серійністю в умовах реконфігуруемого виробництва. Зміна схеми шліфування заготовки та її реалізація на верстатах з механізмами паралельної кінематики дозволить виключити похибку базування, підвищити жорсткість технологічної системи, забезпечити можливість виконання схеми зі «схрещеними осями» з необхідним кутом розвороту осі круга до 12°. Згідно до умов експлуатації виробів допуск на діаметр для розглянутих деталей складає не більше $\pm 0,1$ мм, допуск на товщину стінки $\pm 0,03$ мм, що за результатами розрахунку (див. рис. 2) виконується для варіанту II. Однак залишаються проблеми нівелювання вібрацій, які виникають при механічній обробці виробів аналогічного класу. Це вимагає удосконалення конструкції технологічного оснащення для умов реконфігурованого виробництва і стане предметом наступних досліджень.

References: 1. Pavlenko, D. Vakhnichenko, E. Kostyuk, V. Kropivnyi. Tendenciya rozvy`tku obladnannya z mexanizmy` paralel`noyi struktury` [Trends in the development of equipment to the mechanisms of parallel structure]. Design, production and exploitation of agricultural machines, 2012, no.42 (2), pp. 181-186. 2. 5-axis-machining centers. [Available at: https://www.itmash.ru/katalog/5-ti-osevye-stanki-i-obrabatvavushchie-centry-s-chpu/pg2026-40-45-portal](https://www.itmash.ru/katalog/5-ti-osevye-stanki-i-obrabatvavushchie-centry-s-chpu/pg2026-40-45-portal) (accessed 18.03.2020). 3. Merlet, J.P. Parallel Robots [Solid Mechanics and Its Applications]. Berlin. Springer, 2006. 394 p. 4. Morgunov A.P., Chkhetiani E.Yu. Tehnologicheskoe obespechenie tochnosti mehanicheskoy obrabotki tonkostennykh detaley aviatsionnykh dvigateley [The technological base of machining precision of the thin-walled plane engine details]. Omsk Scientific Bulletin. Series «Equipment, Machines and Technologies», 2012, no.1 (107), pp. 130-132. 5. Lastovskiy P.N. Obespechenie zadannykh trebovaniy tochnosti pri avtomatizirovannoy tokarnoy obrabotke tonkostennykh detaley: avtoref. dy`s. na zdobuttya nauk. stupenya kand. texn. nauk: specz. 05.02.08 “Texnologiya mashynobuduvannya” [Ensuring specified accuracy requirements for automated turning of thin-walled parts. Abstract of a thesis candidate eng. sci. diss (Ph. D) 050208 “Technology of mechanical engineering”]. Omsk, 2010. 24 p. 6. Kolluru Kiran, Axinte Dragos, Becker Adib. A solution for minimising vibrations in milling of thin walled casings by applying dampers to workpiece surface. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2013, no.62, pp.415-418. 7. Pokolenko D. V. Pidvy`shhennya efekty`vnosti obrobky` anteny`x obtichny`kiv iz sy`taliv za raxunok udoskonalennya texnologiyi almaznogo shlifuvannya: avtoref. dy`s. na zdobuttya nauk. stupenya kand. texn. nauk: specz. 05.02.08 “Texnologiya mashynobuduvannya” [Improvement of the efficiency of machining antenna cords from cetalls by improving the technology of diamond grinding. Abstract of a thesis candidate eng. sci. diss (Ph. D) 050208 “Technology of mechanical engineering”]. Donetsk, 2014. 20 p. 8. Kalafatova L. P. Technologichni osnovy` pidvy`shhennya efekty`vnosti obrobky` ta zabezpechennya yakosti vy`robiv iz texnichny`x stekol i sy`taliv: avtoref. dy`s. na zdobuttya nauk. stupenya doct. texn. nauk: specz. 05.02.08 “Texnologiya mashynobuduvannya” [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. Abstract of a thesis Dokt. Of Techn. Sciences diss 050208 “Technology of mechanical engineering”]. Kharkiv, 2001. 24 p. 9. Kalafatova L. P., Matjuha P. G., Pokolenko V. D., Olejnik S. Ju., Poezd S. A. Povyshenie jeffektivnosti shlifovaniya tverdih splavov i konstrukcionnoy keramiki: monografija [Improving the efficiency of grinding of

hard alloys and structural ceramics. Pokrovsk, CEI DonNTU Publ., 2017. 182 p. **10.** Vyal'cev M.V., Gusyev V.V., Molchanov O.D., Pokolenko D.V., Sirchenko O.V. Sposib shlifuvannya til obertannya z pryamolinijny`my` i kry`volijny`my` tvirny`my` [Method of grinding the rotational bodies with straight and curvilinear generator]. Patent UA, no.54942, 2005. **11.** Kalafatova L.P., Oleynyk S.Yu., Pokolenko D.V. Matematicheskaya model dlya opredeleniya zakonornostey formirovaniya pogreshnosti obrabotki pri shlifovanii obolochek slozhnogo profilya iz sitalla. [The mathematical model to determine the regularities of the formation of the machining errors during grinding the glass-ceramic shells of complex profile]. Technologies of informations are in education, science and production, 2016, no.2(13), pp.89-99. **12.** Kalafatova L.P., Oleynyk S.Yu., Pokolenko D.V. Povyshenie tochnosti obrabotki pri vnutrennem shlifovanii tonkostennyih obolochek slozhnoy formy iz hrupkih nemetallicheskih materialov [Improving the accuracy of machining during internal grinding of thin-walled shells of complex shape from brittle non-metallic materials]. Cutting & tool in technological system, 2017, no.87, pp. 85-96.

Svitlana Oliinyk, Kramatorsk, Ukraine,
Lydmila Kalafatova, Pokrovsk, Ukraine

ANALYSIS OF THE MACHINING SCHEME OF COMPLEX-PROFILES SHELLS OF ROTATION

Abstract. *Modern engineering products have complex geometry with high quality requirements, are made from new materials that is provoked the development and use the mechanisms of parallel structure, which are distinguished by high rigidity characteristics, as well as have wide functional capabilities. The precision problems of machining of complex-profile low-rigid parts, in particular thin-walled pyroceram shell are considered in article. Scheme of machining affect the accuracy and depends on the capabilities of technological equipment. Rationale for scheme of machining a thin-walled casing is presented in article. The accuracy of machining the outer profile of the casing was simulated for last step of diamond grinding. The simulation was performed for a traditional scheme of machining, which is performed for a lathe with an aggregate grinding head and a direct copying system, and for a scheme of machining for equipment that is fitted out with a mechanism with a parallel structure. The model of formation of the machining error is based on using the equations of relative displacement of the technological bases of the workpiece and the contact point of the working surface of the diamond wheel with the workpiece. The model takes into account the static and dynamic characteristics of the technological system and force factors during grinding. The calculations have confirmed that proposed solutions are able to provide the necessary machining precision. Changing the machining scheme of the workpiece and performing such machining on equipment with mechanisms of parallel structures eliminates the basing error, increases the rigidity of the technological system, and provides the possibility of turning the axis of the diamond wheel with the required angle.*

Keywords: *thin-walled shell; diamond grinding; the error of machining; mechanisms of parallel structures; process modeling.*