

ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ ОБРОБКИ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ СКЛАДНОПРОФІЛЬНИХ ДЕТАЛЕЙ З ВАЖКООБРОБЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ

R. Nosov¹, <https://orcid.org/0009-0001-0868-924X>

V. Ruban¹ <https://orcid.org/0000-0002-9216-3506>

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

TECHNOLOGICAL PROBLEMS OF PROCESSING IN THE MANUFACTURE OF COMPLEX PROFILE PARTS FROM DIFFICULT MATERIALS

Мета. Виявлення та систематизація основних технологічних проблем, що виникають при обробці складнопрофільних деталей, а також розробка рекомендацій щодо підвищення ефективності виробничих процесів.

Методика. Аналіз літературних джерел з сучасних методів обробки складнопрофільних деталей, зокрема верстатної та адитивної технології, систематизація проблемних зон: зношування інструменту, режими різання, дефекти поверхні, деформації деталей, складність контролю точності.

Результати дослідження. Встановлено ключові фактори, що безпосередньо впливають на якість обробки складнопрофільних деталей: конструктивна геометрія деталі, фізико-механічні властивості матеріалу, режими різання, жорсткість технологічної системи та якість інструменту. Сформовано систематизований перелік технологічних проблем, що потребують першочергового вирішення для підвищення ефективності виробництва. Результати дозволяють визначити пріоритетні напрямки модернізації технологічних процесів та адаптації виробничого обладнання до складних виробів.

Наукова новизна. У роботі проведено системний аналіз технологічних проблем обробки складнопрофільних деталей, що включає взаємозв'язок геометрії виробу, властивостей матеріалу та режимів різання. Це дозволяє прогнозувати якість поверхні на різних стадіях проектування, підвищуючи точність технологічного процесу.

Практична значимість. Результати дослідження можуть бути безпосередньо використані під час розроблення та коригування технологічної і проєктної документації на виготовлення складнопрофільних деталей з важкооброблюваних матеріалів. Систематизовані технічні проблеми та встановлені чинники їх виникнення доцільно застосовувати при виборі режимів різання, інструментального оснащення, схем базування і закріплення заготовок, а також при модернізації технологічних процесів механічної обробки. Представлено актуальну схему базування для деталі типу конічна оболонка.

Ключові слова: *складнопрофільні деталі, верстатна обробка, режими різання, якість поверхні, технологічний процес.*

Вступ. Сучасне машинобудування характеризується високими вимогами до функціональних та експлуатаційних параметрів виробів, що зумовлює широке використання складнопрофільних деталей із важкооброблюваних матеріалів у авіаційній, енергетичній, космічній та інших галузях промисловості. Деталі з жароміцних сплавів, титанових та нікелевих конструкційних матеріалів забезпечують необхідну міцність, жаростійкість та корозійну стійкість, але водночас створюють суттєві технологічні труднощі під час механічної обробки через високі сили різання, інтенсивне зношування інструменту та складність підтримання стабільних режимів обробки.

Механічна обробка складнопрофільних деталей має низку специфічних особливостей. Геометрична складність поверхонь, велика кількість криволінійних елементів та вузьких пазів обмежують доступ інструмента і ускладнюють вибір траєкторії обробки, що призводить до підвищеної ймовірності похибок і дефектів. При цьому точність та якість обробленої поверхні безпосередньо залежать не лише від параметрів режимів різання, але й від конструктивних характеристик верстатного обладнання, жорсткості технологічної системи та характеристик кріплення заготовки [1].

Проблема зношування різального інструменту та забезпечення стабільної якості оброблення є однією з ключових. Сучасні підходи до підвищення ефективності обробки включають використання інструментів з надтвердих матеріалів, покриттями з алмазних чи кубічних нітридних шарів, а також удосконалені режими охолодження й змащення.

Окрему увагу приділяють впровадженню автоматизованих систем та роботизованих технологій у процес механічної обробки, що дозволяє реалізувати адаптивне керування операціями та своєчасно коригувати траєкторії руху інструмента для досягнення високої точності.

У контексті актуальних наукових викликів окремі дисертаційні дослідження також показують, що застосування нестандартних методів фінішної обробки, таких як полімерно-абразивні інструменти для тонкостінних і складнопрофільних елементів, може істотно підвищити якість поверхні та продуктивність технологічних процесів [2].

Таким чином, технологічні проблеми обробки складнопрофільних деталей з важкооброблюваних матеріалів носять багатоаспектний характер і включають питання оптимізації режимів різання, вибору інструментальної бази, забезпечення стабільності технологічної системи та впровадження автоматизованих рішень. Поглиблення наукового розуміння цих процесів є передумовою для підвищення продуктивності та якості сучасних виробничих систем, що має важливе значення для підвищення конкурентоспроможності машинобудівної продукції на світовому ринку.

Метою даної статті є узагальнення та систематизація основних технологічних проблем виготовлення складнопрофільних деталей з важкооброблюваних матеріалів, а також визначення шляхів їх мінімізації з урахуванням сучасного рівня розвитку технологій машинобудування.

Вибір технологічної моделі. У якості загальної деталі-представника для огляду існуючих проблем розглянемо тонкостінну оболонку, кривизна профілю якої задана параметричним рівнянням (рис. 1, табл. 1).

$$\begin{cases} y = \frac{R^2}{n_1} \sin t \\ x = \frac{R^2}{n_2} \cos t \end{cases}, \quad (1)$$

де, R – радіус кривизни профілю, n_1, n_2 – коефіцієнти, що задають еліпсність.

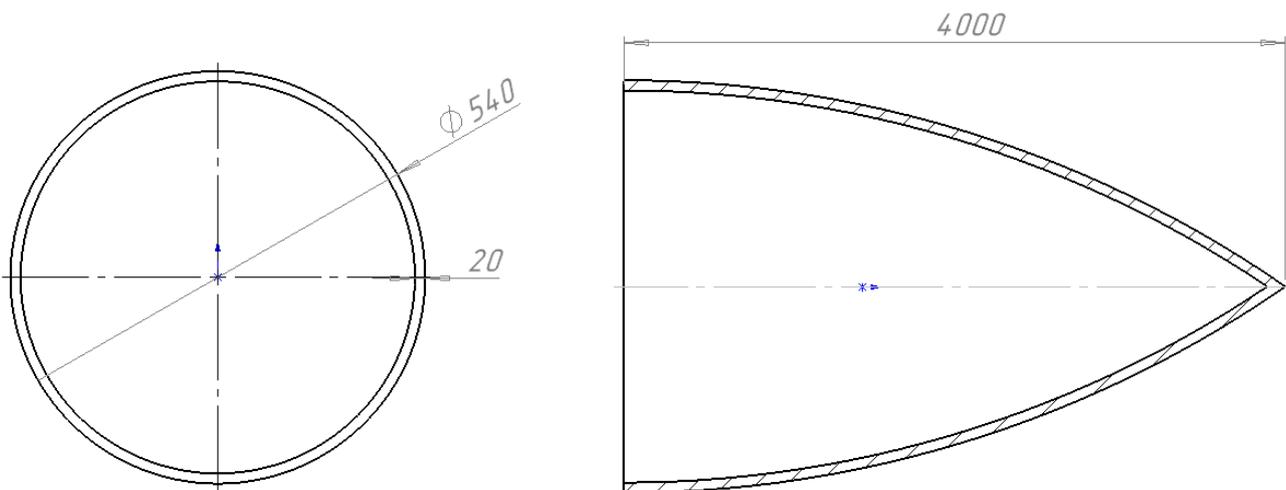


Рис. 1. Деталь-представник

Таблиця 1

Узагальнений базовий виробничий процес виготовлення деталі представника

Виробничий процес виготовлення		
Технологія отримання заготовки:	Механічна обробка заготовки:	Комбіноване зміцнення оброблених поверхонь:
<ul style="list-style-type: none"> – синтез похідного матеріалу - стекла марки АС-418 (виготовлення шихти); – отримання заготовки методом відцентрового лиття; – кристалізація матеріалу обтічника в заготовці. 	<ul style="list-style-type: none"> – алмазне шліфування внутрішньої і зовнішньої поверхонь заготовки (послідовне чорнове і чистове оброблення); – абразивна доводка шліфованих поверхонь для забезпечення необхідної точності і якості виробу. 	<ul style="list-style-type: none"> – видалення хімічним травленням дефектного шару, викликаного механічною обробкою; – зміцнення поверхні деталі іонним бомбардуванням.

Такому типу виробів притаманні усі основні проблеми виготовлення, а саме: пришвидшений знос інструменту, деформації під час обробки, погане тепловідведення та пов'язані з цим дефекти. Крім того, такі деталі виготовляють переважно з важкооброблюваних матеріалів. Розглянемо детальніше кожен окремий аспект основної проблеми.

Вплив зношування інструменту та режимів різання на якість поверхні складнопрофільних деталей.

Одним із ключових аспектів технологічних проблем при обробці складнопрофільних деталей з важкооброблюваних матеріалів є інтенсивне зношування різального інструменту (рис. 2). Цей фактор суттєво обмежує точність обробки та повторюваність операцій, а також збільшує собівартість виробництва через необхідність частого замінювання інструментів та переналагодження верстатів. Зношування інструменту зумовлено високими силами різання, локальними підвищеннями температури у зоні контакту інструмент-заготовка та підвищеним абразивним впливом на робочу поверхню [3].

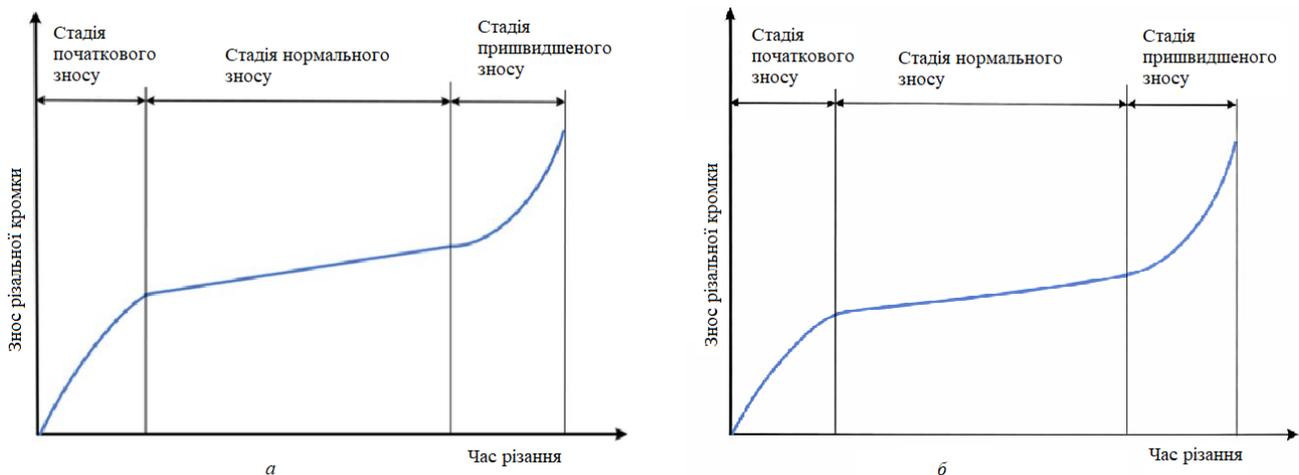


Рис. 2. Порівняння зносу різальної кромки *а* – за нормальних умов експлуатації, *б* – при обробці сплавів титану

Важливим чинником, що впливає на зношування та якість обробки, є оптимальний вибір режимів різання. Режими різання включають швидкість різання, подачу, глибину різання. Недостатньо оптимізовані параметри можуть привести до нерівномірного зношування, утворення задирок та мікротріщин на оброблюваній поверхні, що критично для деталей, які мають складну криволінійну геометрію. Зменшення швидкості різання може подовжити ресурс інструменту, але знижує продуктивність, підвищення швидкості збільшує теплові навантаження та може привести до неконтрольованих деформацій. Проблема полягає у знаходженні компромісного режиму (табл. 2), який одночасно забезпечує високу точність обробки та тривалий ресурс інструменту.

Сучасні підходи до зменшення зношування включають використання інструментів з надтвердих матеріалів, покриттів з алмазним напиленням або нітриду бору, а також активне застосування систем охолодження та мінімізації тертя. Активно впроваджуються адаптивні системи контролю керування

верстатами, що дозволяють корегувати траєкторію та параметри різання в реальному часі, враховуючи стан інструменту та геометрію деталі. Такий підхід дозволяє зменшити похибки обробки на 15–20 % та підвищити продуктивність на 10–15 % без додаткового зношування інструменту [4].

Таблиця 2

Оптимальні параметри режимів різання при шліфуванні деталі представника

Операції шліфування	Параметри режиму шліфування:				
	Швидкість круга v_k , м/с	Частота обертання заготовки n_z , об/хвил	Глибина різання t , мм	Обертова подача круга s_o , мм/об	Хвилинна подача круга $s_{xв}$, мм/хвил
Чорнове шліфування	31,2 ... 47,1	40...65	1,0...2,0	0,2..0,5	5,0....72,0
Чистове шліфування	15,6...47,1	10...100	0,05...2,0	0,13...0,22	5,0...72,0

Крім того, важливим є планування послідовності обробки відповідальних складнопрофільних деталей (рис. 3). Використання багатокоординатних ЧПУ верстатів дозволяє розподілити навантаження рівномірно по всій поверхні деталі та уникнути концентрованих зон високого тиску, що сприяє збільшенню ресурсу інструменту та зменшенню ймовірності деформацій тонкостінних елементів.

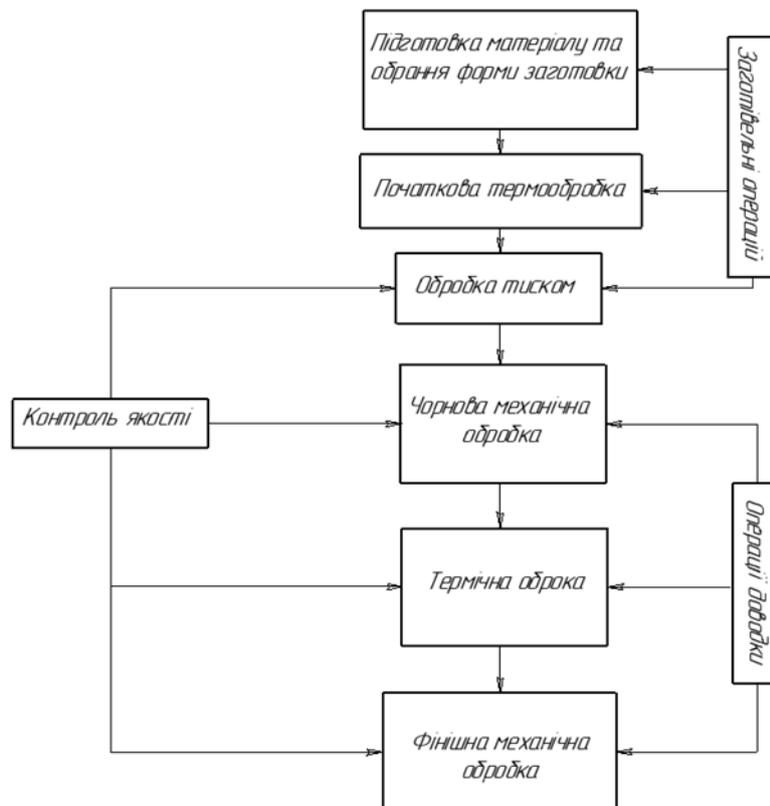


Рис. 3. Блок діаграма базового технологічного процесу виготовлення деталей із загартованої сталі

Таким чином, аналіз технологічної проблеми зношування інструменту та вибору режимів різання показує, що комплексний підхід який поєднує сучасні матеріали для інструменту, адаптивні режими різання та комп'ютерне моделювання є ключовим для підвищення точності, якості та ефективності обробки складнопрофільних деталей з важкооброблюваних матеріалів.

Деформації тонкостінних складнопрофільних деталей і контроль точності.

Однією з найбільш значущих проблем при механічній обробці складнопрофільних деталей з важкооброблюваних матеріалів є деформації тонкостінних елементів, що виникають під час різання. Деформації можуть з'являтися як через внутрішні напруження в заготовці, так і через зовнішнє навантаження інструментом, а також через нерівномірні термічні навантаження в зоні обробки. Для деталей із складною геометрією це критично, оскільки навіть незначні вигини або прогини можуть порушити геометричну точність, знизити якість поверхні та призвести до невідповідності конструкційним вимогам.

Причини деформацій включають низьку жорсткість тонких стінок, високі сили різання при обробці, а також нерівномірний розподіл навантажень. Найбільша небезпека виникає при обробці деталей із співвідношенням товщини стінки до довжини профілю менше 1:10 [5].

Кріплення та підтримка заготовки є важливим чинником контролю деформацій (рис. 4). Використання спеціальних кондукторів, підпорок або вакуумних фіксаторів дозволяє зменшити прогин тонкостінних частин під час обробки. Вибір способу кріплення та його оптимізація залежить від конструктивних особливостей деталі, матеріалу та планованих режимів різання. Правильне кріплення може зменшити деформацію на 30–50 % у порівнянні зі стандартними методами фіксації [6].

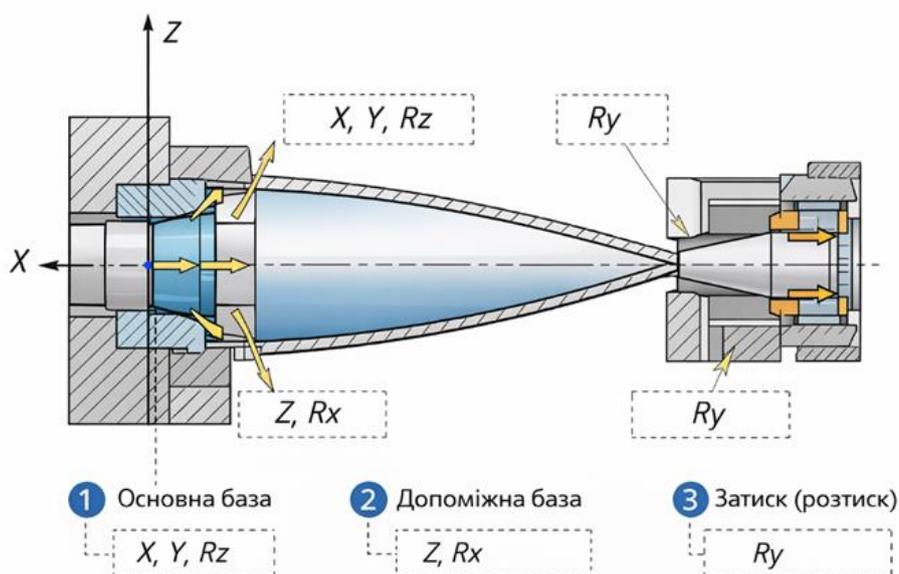


Рис. 4. Базування деталі представника

Також важливим є вибір контролю точності у процесі та після обробки. Застосування контактних і безконтактних методів вимірювання, таких як координатно-вимірювальні машини (КВМ), лазерні сканери та оптичні трекари це дозволяє виявити навіть невеликі деформації та похибки профілю. Впровадження цих систем у виробничий цикл забезпечує зворотний зв'язок для адаптивного коригування режимів різання в реальному часі.

Контроль та запобігання деформацій тонкостінних складнопрофільних деталей є критичним для забезпечення геометричної точності та високої якості обробки.

Теплові явища, термічні пошкодження та їх вплив на якість складнопрофільних деталей.

Ще однією важливою технологічною проблемою при механічній обробці складнопрофільних деталей з важкооброблюваних матеріалів є інтенсивні теплові явища, що виникають у зоні контакту інструменту й заготовки. В процесі різання переважна частина механічної енергії, а саме до 95–99 % перетворюється на тепло, яке розподіляється між стружкою, інструментом і заготовкою. Для важкооброблюваних матеріалів, таких як титанові, нікелеві, жароміцні сплави, характерні низька теплопровідність і висока термостійкість, що зумовлює локальну концентрацію тепла безпосередньо в зоні різання (рис. 5) [7].

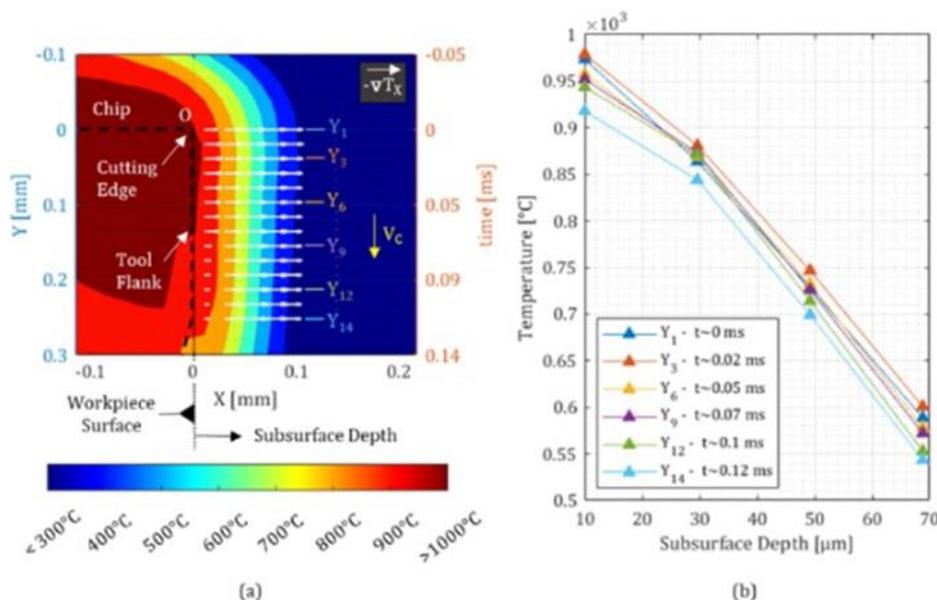


Рис. 5. Температурна карта зони різання при обробці нікелевого сплаву [8]

При виготовленні складнопрофільних деталей теплові процеси ускладнюються інтенсивністю режимів різання, особливо під час чорнкової обробки. Зміна кривизни поверхні, кута нахилу інструменту та глибини різання призводить до нерівномірної генерації тепла вздовж оброблюваного профілю, що викликає значні температурні градієнти. У результаті виникають локальні перегріву, які негативно впливають на стабільність процесу та якість кінцевої поверхні. Також

існує ризик перегріти інструмент або заготовку, що призведе до повторної термообробки або відбракування.

Одним із наслідків надмірного теплового навантаження є термічні пошкодження поверхневого шару. До них відносять утворення мікротріщин, локальні опіки, структурні перетворення, зокрема формування так званого «білого шару», а також накопичення залишкових розтягувальних напружень [9]. Для складнопрофільних деталей такі дефекти особливо небезпечні, оскільки вони часто локалізуються у зонах концентрації напружень це істотно знижує втомну міцність і експлуатаційну надійність виробів.

Нерівномірний нагрів заготовки та інструмента спричиняє теплові деформації, які в умовах низької жорсткості складнопрофільних і тонкостінних деталей можуть перевищувати допустимі. Після охолодження деталі частина деформацій переходить у залишкові, що робить неможливим досягнення заданої форми без додаткових корегувальних операцій.

Найбільш широко розповсюджена проблема під час високошвидкісної та багатовісної обробки, яка застосовується для виготовлення складних просторових поверхонь. У таких умовах традиційні системи охолодження часто виявляються недостатньо ефективними.

Значна увага приділяється застосуванню альтернативних методів теплового контролю, зокрема мінімального змащування (MQL), криогенного охолодження та подачі охолоджувача через внутрішні канали інструмента. Поряд із цим активно розвиваються чисельні методи термомеханічного моделювання, які дозволяють прогнозувати температурні поля, оцінювати ризик термічних пошкоджень і оптимізувати режими обробки ще на стадії технологічного проектування.

Отже, теплові явища та пов'язані з ними термомеханічні дефекти значно впливають на якість складнопрофільних деталей з важкооброблюваних матеріалів. Їх негативний вплив проявляється у погіршенні стану поверхневого шару, прискореному зношуванню інструменту та зменшенні ресурсу виробів. Вирішення цієї проблеми полягає у оптимізації режимів різання, удосконалення систем охолодження та використання сучасних методів моделювання теплових процесів.

Висновки. У результаті проведеного аналізу технологічних проблем обробки складнопрофільних деталей з важкооброблюваних матеріалів встановлено, що продуктивність і якість виготовлення таких виробів визначається вирішенням проблем пов'язаних з механічними та термічними навантаженнями. Вони мають взаємопов'язаний характер і не можуть розглядатися ізольовано.

Інтенсивне зношування різального інструменту є одним із ключових обмежувальних чинників стабільності процесу обробки. Вибір режимів різання без урахування фізико-механічних властивостей важкооброблюваних матеріалів та змінних умов різання при складній геометрії деталі призводить до погіршення якості поверхні та зростання виробничих витрат. Оптимізація режимів різання, застосування інструментів з надтвердих матеріалів і використання адаптивних систем керування дозволяють суттєво підвищити ресурс інструменту та повторюваність технологічних операцій.

Встановлено, що деформації тонкостінних складнопрофільних деталей під час обробки є наслідком низької жорсткості заготовок, високих сил різання та нерівномірного розподілу навантажень. Такі деформації істотно ускладнюють забезпечення геометричної точності. Основним шляхом зменшення їх впливу є застосування чисельного моделювання процесів обробки, оптимізація схем кріплення та послідовності операцій, а також впровадження сучасних методів контролю точності безпосередньо під час обробки.

Визначено, що теплові явища в зоні різання відіграють важливу роль при обробці важкооброблюваних матеріалів, особливо для складних поверхонь зі змінними умовами різання. Накопичення тепла призводить до термічних пошкоджень поверхневого шару, виникнення залишкових напружень і погіршення експлуатаційних властивостей деталей. Застосування ефективних систем охолодження, зокрема безпосереднього та кріогенного змащування, у поєднанні з термомеханічним моделюванням, дозволяє знизити негативний вплив теплових процесів і підвищити стабільність обробки.

Перелік посилань

1. Prodanchuk, O., Stupnytska, N., & Olenuk, T. (2024). A review and analysis of the influence of technological parameters on the efficiency of processing hard-to-machine materials. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*, 10(3), 63–77.
2. Oliynyk, S., & Kalafatova, L. (2023). Analysis of processing schemes for complex-shaped shells. *KPI Repository*. <https://ela.kpi.ua>
3. Prodanchuk, O., Stupnytska, N., & Olenuk, T. (2024). A review and analysis of the influence of technological parameters on the efficiency of processing hard-to-machine materials. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*, 10(3), 63–77.
4. Horokhivskiyi, N., & Vlasovets, V. (2025). Modern approaches to quality assurance in robotic processing of complex-shaped parts. *Visnyk KhNTU*.
5. Stepanov, D. (2019). *Technological features for quality and productivity in processing complex and thin-walled parts with polymer-abrasive tools* (Doctoral dissertation). National Technical University “KhPI”.
6. Horokhivskiyi, N., & Vlasovets, V. (2025). Modern approaches to quality assurance in robotic processing of complex-shaped parts. *Visnyk KhNTU*.
7. Kishawy, H. A., & Hosseini, A. (Eds.). (2019). *Machining difficult-to-cut materials: Basic principles and challenges*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-94346-3>
8. La Monaca, A., Axinte, D. A., Liao, Z., M’Saoubi, R., & Hardy, M. C. (2021). Towards understanding the thermal history of microstructural surface deformation when cutting a next generation powder metallurgy nickel-base superalloy. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 168(Part B), 103765. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2021.103765>
9. Soori, M., & Asmael, M. (2021). Cutting temperatures in milling operations of difficult-to-cut materials. *Journal of New Technology and Materials*, 11(1), 47–56.

ABSTRACT

Purpose. Identification and systematization of the main technological problems that arise when processing complex-profile parts, as well as development of recommendations for increasing the efficiency of production processes.

Methodology. Analysis of literature sources on modern methods for processing complex-profile parts, in particular machine tool and additive technology, systematization of problem areas: tool wear, cutting modes, surface defects, part deformations, complexity of accuracy control.

Research results. Key factors that directly affect the quality of processing complex-profile parts have been identified: structural geometry of the part, physical and mechanical properties of the material, cutting modes, rigidity of the technological system and tool quality. A systematized list of technological problems that require priority solutions to increase production efficiency has been formed. The results allow us to determine the priority areas for the modernization of technological processes and the adaptation of production equipment to complex products.

Scientific novelty. The work provides a systematic analysis of technological problems in the processing of complex-profile parts, which includes the relationship between the geometry of the product, material properties and cutting modes. This allows us to predict the surface quality at different stages of design, increasing the accuracy of the technological process.

Practical significance. The results of the study can be directly used in the development and adjustment of technological and design documentation for the manufacture of complex-profile parts from difficult-to-machine materials. Systematized technical problems and established factors of their occurrence are expedient to be used in the selection of cutting modes, tooling, schemes of basing and fastening of workpieces, as well as in the modernization of technological processes of mechanical processing. An actual basing scheme for a part of the conical shell type is presented.

Keywords: *complex-profile parts, machine processing, cutting modes, surface quality, technological process.*

дата першого надходження статті до видання	10.10.2025
дата прийняття до друку статті після рецензування	13.11.2025
дата публікації (оприлюднення)	29.12.2025