

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи
Національного університету
«Львівська політехніка»
д.т.н., професор
Іван ДЕМІДОВ



2025 р.

Висновок

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації «Підвищення ефективності технологічного процесу механічного оброблення деталей з хромо-нікелевих сплавів на основі імітаційного моделювання процесу формоутворення» здобувача наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 – Прикладна механіка (галузь знань 13 – Механічна інженерія) Олега Проданчука міжкафедрального наукового семінару НН Інституту механічної інженерії та транспорту Національного університету «Львівська політехніка»

1. Актуальність теми дисертації

За результатами детального аналізу сучасного рівня технологічного забезпечення виготовлення виробів з хромо-нікелевих сплавів встановлено, що підвищення ефективності механічного оброблення заготовок з цих матеріалів залишається актуальною науковою та практичною задачею, що зумовлено широким розповсюдженням і постійним впровадженням нових модифікацій хромо-нікелевих сплавів у різні високотехнологічні галузі промисловості; недостатньою обґрунтованістю теоретичної бази та контраверсійністю трактування експериментальних результатів досліджень щодо визначення оптимальної структури і параметрів технологічних операцій; перспективністю застосування удосконалених методів імітаційного моделювання процесів різання для прийняття науково-обґрунтованих рішень з урахуванням впливу напружено-деформованого та термодинамічного стану заготовки на продуктивність і якість обробленого поверхневого шару, а також пріоритетним впровадженням функціонально-орієнтованих технологічних процесів, де основним критерієм є досягнення найвищих експлуатаційних характеристик виробів, а не мінімізація собівартості виробу.

2. Зв'язок теми дисертації з державними програмами, науковими напрямами університету та кафедри

Наукові дослідження, запропоновані в дисертаційній роботі, узгоджено із з Законом України № 3534-IX від 13 січня 2024 року «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки», який актуалізує стратегічні пріоритетні напрями

інноваційної діяльності в Україні з урахуванням ключових викликів і потреб економіки, суспільства, а також глобальних тенденцій розвитку високотехнологічних секторів економіки, зокрема автоматизації виробничих процесів в машинобудуванні. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до плану наукових робіт кафедри «Робототехніка та інтегровані технології машинобудування» Національного університету «Львівська політехніка» підчас виконання держбюджетної роботи МОН України «Комплексна система функціонально-орієнтованого проектування механічного оброблення деталей з титанових та хромонікелевих сплавів» (№ держреєстрації 0119U101127), де автор був співвиконавцем проекту. Здобувач також був співвиконавцем НДР «Комплексна система функціонально-орієнтованого проектування механічного оброблення деталей з важкооброблюваних матеріалів для військово-промислового комплексу» згідно з наказом Міністерства освіти і науки України від 20.03.2022 №264 «Про затвердження плану заходів з реалізації міжнародних наукових та науково-технічних програм і проектів за напрямом «Наука» на 2022 рік» та наказом Міністерства освіти і науки України від 14.04.2022 № 335 «Про фінансування спільних українсько-литовських науково-дослідних проектів у 2022 році».

3. Особистий внесок здобувача в отриманні наукових результатів

Всі теоретичні та практичні результати, що представлені до захисту, отримано автором самостійно. Особистий внесок здобувача полягає у тому, що ним було:

- на основі аналізу літературних джерел сформовано ідею реалізованих в дисертаційній роботі досліджень, що полягає у застосуванні імітаційного моделювання процесу формоутворення для підвищення ефективності технологічного процесу механічного оброблення деталей з хромо-нікелевих сплавів;

- внаслідок проведених теоретичних (імітаційних) досліджень в системі Deform 2D та їх експериментальної верифікації встановлено межі доцільності застосування жорстко- та пружно-пластичної імітаційної моделі різання для різних конструктивних матеріалів та поставлених умов дослідження;

- надані практичні рекомендації щодо вдосконалення розрахунку в програмному комплексі Deform 2D напружено-деформованого стану заготовки в процесі її механічного оброблення для забезпечення найбільшої збіжності нормативної та розрахункової похибки в меню Simulation Controls/Iteration;

- проведений в системі AdvantEdge аналіз результатів моделювання силових параметрів під час лезового механічного оброблення заготовок з хромо-нікелевого сплаву Inconel 718 зі зміною глибини та швидкості різання. Зроблено висновок, що при збільшенні швидкості різання до 120 м/хв сила різання інтенсивно зменшується через значний вплив наростаючої пластичної деформації матеріалу; на середніх швидкостях (120 - 180 м/хв) сила різання також зменшується внаслідок скорочення товщини стружки та зниження сил адгезії між стружкою і різальним лезом, але інтенсивність цієї зміни значно падає; на високих швидкостях (більше 180 м/хв) сила різання стабілізується і

знову незначно зростає через високе термічне навантаження;

- доведено домінуючий вплив глибини різання на формування залишкових напружень у поверхневих шарах оброблюваного хромо-нікелевого сплаву. Крім того встановлено прямий і суттєвий вплив швидкості різання на величину залишкових напружень, що виникають у процесі обробки;

- в результаті проведених досліджень доведено, що під час різання заготовок з хромо-нікелевих сталей та сплавів, спостерігається явище, що у випадку перевищення твердості заготовки певного порогового значення, домінуючим явищем руйнування матеріалу заготовки стає утворення тріщин, а не пластична деформація. В результаті цього явища енергія деформації, яка, в свою чергу, перетворюється в тепло, зменшується і розм'якшення матеріалу, практично, не відбувається;

- аналіз експотенційних ліній тренду та апроксимаційних рівнянь залежності співвідношень кутів деформації на заокругленій частині леза різального інструмента під час оброблення типового представника хромо-нікелевого сплаву IN718 та звичайної конструкційної сталі (аналог AISI 1020) дозволяє зробити висновок про те, що ці співвідношення суттєво залежать як від радіусу при вершині інструменту, так і від механічних властивостей матеріалу (а саме від його пластичності);

- співставлення результатів імітаційного моделювання - залежності сили різання від швидкості та глибини різання а також від радіусу при вершині різального леза з результатами експериментів, опрацьованими на основі регресійного аналізу даних, вказує на задовільний рівень адекватності проведених теоретичних досліджень.

4. Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів та запропонованих автором рішень, висновків, рекомендацій

У результаті досліджень встановлено, що для моделювання процесів механічного оброблення виробів доцільно використовувати різні імітаційні моделі в залежності від матеріалу та поставлених завдань. Для деяких матеріалів, де різниця між моделями невелика, застосування складніших моделей не виправдане, а для хромо-нікелевих сплавів вибір між пружно-пластичною та класичною пластичною моделлю має значний вплив на точність відтворення процесів, особливо при аналізі показників обробленої поверхні.

Практичні рекомендації щодо вдосконалення розрахунків у спеціалізованих програмних комплексах спрямовані на оптимізацію параметрів розрахунку, що дозволяє узгодити точність моделювання з його адекватністю реальним показникам процесів механічного оброблення хромо-нікелевих сплавів. Порівняння імітаційних даних з експериментальними результатами, підтвердженими за допомогою акустичних методів, свідчить про необхідність адаптації підходів до конкретних механічних властивостей оброблюваних матеріалів.

Подальший аналіз досліджень показав, що як сила різання, так і формування залишкових напружень суттєво залежать від режимів оброблення. Причому, саме збільшення глибини різання призводить до значного зростання силових

навантажень, а зміна швидкості різання викликає складну реакцію матеріалу: спочатку сила різання зменшується через посилення пластичної деформації, а потім стабілізується або злегка зростає внаслідок термічного впливу, що також відображається на температурному режимі в зоні формоутворення.

Аналіз впливу радіусу заокруглення інструменту дозволив зробити важливий висновок про те, що його розмір суттєво впливає на характер деформаційних процесів: менші значення сприяють інтенсивнішому формуванню стружки, а більші – більш помітній пружно-пластичній деформації обробленої поверхні. Експериментальна установка з використанням тензOMETричних датчиків підтвердила загальну узгодженість імітаційних і експериментальних результатів.

5. Ступінь новизни основних результатів дисертації порівняно з відомими дослідженнями аналогічного характеру

Наукова новизна роботи полягає у розробці вдосконаленої методики імітаційних та аналітичних досліджень функціонально-орієнтованого технологічного процесу оброблення важкооброблюваних матеріалів на основі хрому та нікелю для визначення доцільності застосування жорстко-пластичної або пружно-пластичної моделі різання. Теоретично та експериментально встановлено, що при збільшенні швидкості різання до 120 м/хв сила різання значно знижується через інтенсивну пластичну деформацію, на середніх швидкостях (120–180 м/хв) спостерігається подальше зниження сили різання завдяки зменшенню товщини стружки та сил адгезії між стружкою і лезом, а на високих швидкостях (понад 180 м/хв) сила різання стабілізується з незначним зростанням через домінування високого термічного навантаження, що спричинює розм'якшення матеріалу в зонах деформації. Дослідження також доводять, що формування зони індукованих різанням залишкових напружень суттєво залежить від режимів механічної обробки: глибина різання є пріоритетною для формування залишкових стискаючих напружень, а збільшення швидкості різання веде до переважного формування розтяжних залишкових напружень через переважання термодинамічного чинника.

Також наукова новизна дослідження полягає в тому, що встановлено специфічні механізми руйнування заготовок з хромонікелевих сталей і сплавів: при перевищенні порогового значення твердості замість пластичної деформації домінує утворення тріщин, що призводить до зниження деформаційної енергії і практично не викликає розм'якшення матеріалу, що важливо для вибору критерію руйнування в реологічних моделях. Аналіз експотенційних ліній тренду і апроксимаційних рівнянь показав, що співвідношення кутів деформації на заокругленій частині леза залежить як від радіусу при вершині інструмента, так і від пластичності оброблюваного матеріалу: при малих радіусах (0,1–0,25 мм) значна частина матеріалу переходить у стружку, тоді як при великих (0,6–1,5 мм) формується пружно-пластична деформація на поверхні обробки. Додатково, імітаційні дослідження температури різання виявили, що найбільш інтенсивне зростання температури відбувається для радіусу до 0,6 мм, після чого

подальше зростання практично відсутнє, що підкреслює важливість врахування цього параметра для аналізу термодинамічного стану зони різання.

6. Перелік наукових праць, які відображають основні результати дисертації

Основний зміст дисертації відображено у 20 наукових публікаціях, серед яких: 2 статті включені до міжнародної наукометричної бази Scopus, 5 статей у наукових фахових виданнях України і 13 тез доповідей.

1. Stupnytskyu, V., Prodanchuk, O., Stupnytska, N. (2022). Simulation Studies of High-Speed Machining. In: Ivanov, V., Trojanowska, J., Pavlenko, I., Rauch, E., Peraković, D. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing V. DSMIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, pp. 332–344.

2. Stupnytskyu V., Prodanchuk O., Dyshev O. Analyzing the use of rigid- or elastic-plastic finite models for the simulating of cutting processes. *Archive of Mechanical Engineering*. – 2025. – Vol. 72, №1, P. 131–152.

3. Stupnytskyu V., Xianning S., Dragašius E., Baskutis S., Prodanchuk O. Simulation and analytical studies of chip formation processes in the cutting zone of titanium alloys // *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. – 2023. – Vol. 9, № 1. – С. 1–16.

4. Stupnytskyu V., Pasternak S., Prodanchuk O. Increase productivity of hard-to-machine materials by preventive heating of the workpiece // *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. – 2024. – Vol. 10, № 2. – P. 66–80.

5. Stupnytskyu V., Prodanchuk O. Analysis of thermodynamic, stress-strain, and loaded states of chromium-nickel alloy workpieces using machining process simulation in advantage software // *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*. – 2024. – Vol. 10, № 1. – P. 45–62.

6. Ступницький В. В., Проданчук О. О. Вплив технологічних чинників та геометрії різального інструменту на оброблюваність хромонікелевих сталей і сплавів на їх основі // *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні : український міжвідомчий науково-технічний збірник*. – 2024. – Вип. 58. – С. 59–77.

7. Prodanchuk O., Stupnytska N., Olenuk T. 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*. – 2024. – Vol. 10, No. 3. – P. 65–78.

7. Апробація основних результатів дослідження на конференціях, симпозіумах, семінарах тощо

Основні результати роботи докладались і обговорювались на 14 Міжнародних та Всеукраїнських науково-технічних конференціях та симпозіумах, а саме: «Advances in Design, Simulation and Manufacturing - DSMIE 2022», червень 7-10, 2022, Познань, Польща; «Прогресивні технології в машинобудуванні» IX Міжнародна науково-практичної конференція, Львів–Звенів (Карпати), 31 січня – 3 лютого, 2023 року; «Молода наука - роботизація і нано-технології сучасного машинобудування» Міжнародна молодіжна науково-технічна конференція, 12–14 квітня 2023 р., Краматорськ-Тернопіль; «Сучасні технології у промисловому виробництві» X Всеукраїнська науково-технічна

конференція (Суми, 18–21 квітня 2023 р.); 16-й Міжнародний симпозіум українських інженерів-механіків у Львові (Львів, 18 травня – 19 травня 2023 р.); «Наукові горизонти ХХІ століття: мультидисциплінарні дослідження» Міжнародна наукова конференція (Ужгород, 16-17 травня, 2024 р.); «Перспективи регіонального та місцевого розвитку» II Конференція молодих учених, 23 листопада 2023 р., Львів; «Актуальні задачі сучасних технологій» XII Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів, Тернопіль, 6–7 грудня 2023 р.; «Молода наука - роботизація і нано-технології сучасного машинобудування» Міжнародна молодіжна науково-технічна конференція, 10–12 квітня 2024 р., Краматорськ-Тернопіль; IV Міжнародна науково-технічна інтернет-конференція, 23–24 квітня 2024 року, Рівне; «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» XXII Міжнародна науково-технічна конференція (Краматорськ – Тернопіль, 28–30 травня 2024 року); «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» XIV Міжнародна науково-практична конференція (Чернігів, 23–24 травня 2024 р.); «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» XXII Міжнародна науково-технічна конференція (Краматорськ – Тернопіль, 28–30 травня 2024 року; «Сучасні технології у промисловому виробництві» IX Всеукраїнська науково-технічна конференція (Суми, 19–22 квітня 2022 р.).

8. Наукове значення виконаного дослідження із зазначенням можливих наукових галузей та розділів програм навчальних курсів, де можуть бути застосовані отримані результати

Наукове значення виконаного дослідження полягає в подальшому розвитку методів та підходів підвищення функціонально-орієнтованої ефективності технологічного процесу механічного оброблення деталей з хромо-нікелевих сплавів, а саме у залученні методів імітаційного моделювання процесу формоутворення структури та параметрів технологічної операції.

Дисертація має теоретико-практичний характер, а сформульовані та обґрунтовані в ній положення, узагальнення та висновки становлять науковий інтерес у галузі механічної інженерії, зокрема у прикладній механіці, і можуть бути використані у:

- науково-дослідній сфері – з метою удосконалення ефективності застосування імітаційних методів при дослідженні оброблюваності важкооброблюваних сталей та сплавів на основі хрому та нікелю;

- навчальному процесі – з метою підготовки методичних рекомендацій для студентів механічних спеціальностей підчас вивчення дисциплін з технології машинобудування, теорії різання та проектування металорізального інструменту;

- в виробничому процесі – з метою підвищення продуктивності технологічного процесу оброблення хромо-нікелевих сплавів, забезпечення високих функціональних властивостей оброблених поверхонь виробів з цих матеріалів.

9. Практична цінність результатів дослідження із зазначенням конкретного підприємства або галузі народного господарства, де вони можуть бути застосовані

Практичне значення отриманих у дисертаційній роботі результатів полягає в підвищенні ефективності технологічного процесу механічного оброблення деталей з хромо-нікелевих сплавів на основі імітаційного моделювання процесу формоутворення. Результати дисертаційних досліджень застосовані у процесі виготовлення продукції з важкооброблюваних сплавів, а саме, прес-форм у ТОВ «СТАНКОПЛАСТ», м.Хмельницький.

10. Оцінка структури дисертації, її мови та стилю викладення

Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, переліку умовних позначень, символів, одиниць вимірювання, скорочень, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 222 сторінки, з них 88 рисунків по тексту; 2 таблиці по тексту; списку використаних джерел з 120 найменувань на 15 сторінках

Дисертація за структурою, мовою та стилем викладання оформлена відповідно до вимог Міністерства освіти і науки України, що висувуються до подібного наукових робіт. Зміст наукових праць доповнює основні положення дисертації.

У ході обговорення дисертації до неї не було висунуто жодних зауважень щодо самої суті роботи.

11. З урахуванням зазначеного, на міжкафедральному науковому семінарі інституту механічної інженерії та транспорту ухвалили:

11.1. Дисертація Проданчука Олега Олександровича «Підвищення ефективності технологічного процесу механічного оброблення деталей з хромо-нікелевих сплавів на основі імітаційного моделювання процесу формоутворення» є завершеною науковою працею, у якій розв'язано конкретне наукове завдання підвищення ефективності технологічного процесу лезового механічного оброблення заготовок з хромо-нікелевих сплавів шляхом оптимального вибору структури та параметрів технологічних операцій на основі проблемно-орієнтованого аналізу результатів імітаційного реологічного моделювання процесів різання з урахуванням специфічних напружено-деформаційних і термодинамічних особливостей формоутворення виробів. Під підвищенням ефективності в даному контексті слід розуміти забезпечення високої продуктивності механічного оброблення заготовок, стійкості різального інструмента та забезпечення якості обробленого поверхневого шару з метою покращення експлуатаційних властивостей виробів з хромо-нікелевих матеріалів (насамперед, втомної міцності та зносостійкості), що має важливе значення для механічної інженерії.

11.2. Основні наукові положення, методичні розробки, висновки та практичні рекомендації, викладені у дисертаційній роботі, логічні, послідовні, аргументовані, достовірні, достатньо обґрунтовані. Дисертація характеризується єдністю змісту.

11.3. У 20 наукових публікаціях повністю відображені основні результати

дисертації, з них 5 статей у наукових фахових виданнях України та 2 статі у наукових періодичних виданнях інших держав; 2 статей у виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз.

11.4. Дисертація відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, зі змінами).

11.5. Дисертація є результатом самостійних досліджень, не містить елементів фальсифікації, компіляції, плагіату та запозичень, що констатує відсутність порушення академічної доброчесності. Використання текстів інших авторів мають належні посилання на відповідні джерела.

11.6. З урахуванням наукової зрілості та професійних якостей Проданчука О.О. дисертація «Підвищення ефективності технологічного процесу механічного оброблення деталей з хромо-нікелевих сплавів на основі імітаційного моделювання процесу формоутворення» рекомендується для подання до розгляду та захисту у спеціалізованій вченій раді.

За затвердження висновку проголосували:

за	-	Тридцять два
проти	-	(немає)
утримались	-	(немає)

Головуючий на
міжкафедральному науковому
семінарі ІМІТ д.т.н., професор

 Ігор КУЗЬО

Рецензенти:

д.т.н., професор, професор каф.
РІТМ

 Ігор ГРИЦАЙ

д.т.н., професор, доцент каф.
РІТМ

 Ярослав КУСИЙ

Відповідальний у ННІ ІМІТ за
атестацію PhD

к.т.н. старший викладач каф.
ПМАІ

 Роман ГОРОДНЯК

"28" лютого 2025 р.