

## ВІДГУК

офіційного опонента доктора технічних наук, професора  
Луціва Ігора Володимировича  
на дисертаційну роботу **Ше Сяньнін** на тему **«Підвищення ефективності механічного оброблення деталей з титанових сплавів на основі імітаційного моделювання процесу формоутворення»**, подану на здобуття освітньо-наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 131 «Прикладна механіка» (галузь знань 13 «Механічна інженерія»)

Дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та дев'яти додатків. Повний обсяг роботи складає 378 сторінок, основна частина дисертації займає 215 сторінок, з них 68 рисунків по тексту; 1 таблиць по тексту; списку використаних джерел з 139 найменувань, 7 додатків на 162 сторінках.

**Актуальність обраної теми.** Титанові сплави є одними з основних конструкційних матеріалів, що застосовуються в різних галузях промисловості. Широке використання цих матеріалів пов'язане з притаманними титану і його сплавам комплексом експлуатаційних властивостей, таких як поєднання високої питомої міцності, корозійної стійкості у агресивних середовищах, не магнітності та підвищеної термостійкості. Порівняно із обробленням більшості інших металів, до механічної обробки титану висувають вищі вимоги і більше обмежень. Титанові сплави володіють механічними та фізичними властивостями, які здатні істотно впливати як на процес різання, так і на стійкість інструментального матеріалу. Якщо інструмент і режими різання обрані правильно, а також за умови достатньої жорсткості верстата і надійності закріплення заготовки, процес обробки титану буде високоефективним.

Багато з тих властивостей, які роблять титан привабливим матеріалом для виготовлення деталей (а саме високе значення співвідношення міцності до ваги, нижчий модуль пружності порівняно із сталями, більша стійкість до корозії, низька теплопровідність) впливають на його оброблюваність. Це виражається у тому, що під час оброблення титану генеруються відносно високі та концентровані сили різання. Це викликає вібрації в процесі обробки, що призводить до швидкого зношування різальних лез. Крім того, титан погано проводить тепло.

На сьогоднішній день існують різноманітні методики дослідження процесів різання титанових сплавів. Серед цих методик слід виокремити сучасні методи імітаційного моделювання у поєднанні з експериментальною верифікацією результатів таких досліджень. Ефективність такого підходу полягає у можливості оцінки значної кількості термодинамічних та напружено-деформаційних чинників механічного оброблення, вплив яких є визначальним при формуванні якості поверхневого шару виробів та відповідно - забезпечення високої стійкості різальних інструментів. Таким

чином, можна зробити висновок про актуальність досліджень Ше Сяньнін, спрямованих на оптимізацію режимів механічного оброблення титанових сплавів шляхом проблемно-орієнтованого аналізу результатів імітаційного моделювання силового, термодинамічного та напружено-деформаційного стану заготовки та інструменту в процесі формоутворення

Дисертаційна робота виконана відповідно до проекту в рамках держбюджетної роботи МОН України «Комплексна система функціонально-орієнтованого проектування механічного оброблення деталей з титанових та хромонікелевих сплавів».

### **Ступінь обґрунтованості наукових положень.**

Наведені в дисертації наукові положення, висновки та рекомендації є достовірними та належно обґрунтованими. Для цього автором проведені необхідні теоретичні та експериментальні дослідження.

Автором виконано достатньо широкий аналіз літературних джерел з досліджуваної тематики, в результаті якого визначено основні напрями підвищення ефективності технологічного процесу механічного оброблення виробів з титанового сплаву шляхом вибору раціональних режимів різання, геометрії різального інструменту та технологічного середовища.

Дисертація вміщує достатню кількість розрахункових схем, графічної пояснювальної інформації, таблиць, опису методик досліджень та експериментального обладнання, що використовувалися для дослідження процесу різання заготовок із титанових сплавів, інших матеріалів, отриманих внаслідок проблемно-орієнтованого аналізу результатів імітаційного моделювання силового, термодинамічного та напружено-деформаційного стану заготовки та інструменту в процесі формоутворення.

При здійсненні математичного та імітаційного моделювання та аналізі результатів досліджень знайшли застосування сучасні спеціалізовані програмні продукти.

Загальні висновки дисертації узгоджуються зі сформульованою метою та поставленими задачами досліджень і відображають усі основні отримані результати в конкретних числових значеннях.

**Достовірність отриманих результатів** підтверджується застосуванням математичних положень методів аналітичного і імітаційного моделювання (положень технології машинобудування, теорії різання, механіки деформівного твердого тіла, методів класичної механіки, інтегрального і диференціального числення, математичного моделювання, диференціального та інтегрального числення) та планування багатофакторних експериментів, достатньою збіжністю результатів теоретичних і експериментальних досліджень, а також завдяки використанню сучасних вимірювальних комплексів та апробованих методик досліджень.

Завдання дисертаційної роботи є обґрунтованими, прийняті припущення та вихідні положення – аргументованими. Висновки, рекомендації та пропозиції обґрунтовані теоретично і підтвержені

експериментально, що свідчить про їх достовірність.

**Наукова новизна** дисертаційної роботи полягає у наступному.

*Уперше:*

- розроблена методика поєднання імітаційного та експериментального дослідження трибомеханічних процесів різання титанових сплавів;
- теоретично та експериментально доведено, що характерна саме для механічного оброблення титанових сплавів динаміка дисонансної циклічної зміни складових сил різання є наслідком адіабатичного зсуву в зоні стружкоутворення;
- підтверджено, що коливання навантаження на інструмент призводить до синхронної зміни швидкості зношування як по передній, так і по задній поверхні, що зумовлено специфікою фрикційних умов різання титанового сплаву;
- запропонована нова методика поєднання результатів аналітичного моделювання вібраційних процесів, що виникають під час механічного оброблення заготовок із титанових сплавів, із результатами імітаційного моделювання процесів різання;
- виявлені резонансні амплітудно-частотні характеристики при обробці титанових сплавів з різними режимами оброблення та схемами закріплення заготовки та доведено, що амплітудне переміщення супорту зміщується по частоті у протифазі відносно заготовки та шпинделя в результаті впливу на них сили різання, причому величина цього зміщення є прямо пропорційною силі різання і обернено пропорційною їх жорсткостям.

*Набули подальшого розвитку:*

- методика аналізу процесу зношування різального інструменту на основі аналізу результатів імітаційного моделювання трибомеханічних процесів з використанням критеріїв Ушуї та Арчарда.

*Удосконалено* методику рекомендацій щодо раціонального вибору режимів та інструментального забезпечення процесу різання титаномістких сплавів на основі системного аналізу і узагальнення досвіду впровадження наукових засад інженерії поверхонь, термодинамічного аналізу впливу трибомеханічних чинників процесу різання на формування силових та напружено-деформаційних параметрів виробів

**Повнота викладу наукових положень в опублікованих працях.** За результатами дисертаційних досліджень загалом автором опубліковано 12 наукових праць, з них: 2 статті у наукових фахових виданнях України, 4 - у виданнях, включених до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science і 7 тез доповідей.

**Практична цінність роботи** полягає розробленні та практичній реалізації методу імітаційного моделювання процесу різання титанових сплавів із застосуванням результатів аналітичного моделювання механічного оброблення та надання конкретних рекомендацій щодо вибору оптимальних

режимів різання та вибору геометрії різального інструменту для забезпечення функціональної якості поверхневого шару оброблюваної деталі.

### **Аналіз змісту дисертаційної роботи**

У **вступі** обґрунтовано актуальність наукового дослідження, сформульовано мету, об'єкт, предмет та задачі дисертаційної роботи, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Визначений особистий внесок здобувача у результатах досліджень, показаний зв'язок дисертації з науковими програмами, планами, наведено інформацію щодо апробації результатів дисертації, публікацій автора, структури та обсягів дисертаційної роботи.

У **першому розділі** автором проаналізований сучасний стан технологічного забезпечення та розроблення методів прогнозуючого моделювання процесів механічного оброблення виробів з титанових сплавів. Результати такого аналізу дозволили сформулювати наукову гіпотезу, яка полягає в тому, що імітаційні дослідження динамічних процесів та проблемно-орієнтований аналіз впливу трибомеханічних чинників на формування силових та напружено-деформаційних параметрів різання титанових сплавів та зносостійкість різального інструменту забезпечать підвищення ефективності механічного оброблення виробів з титанових сплавів. При цьому слід керуватись вибором структури та параметрів технологічних операцій з врахуванням напружено-деформаційних та термодинамічних особливостей формоутворення виробів. В результаті узагальнення, а також аналізу результатів відомих досліджень автором сформульовані мета та основні завдання дисертаційної роботи.

У **другому розділі** автором запропоновані особливості імітаційного моделювання напружено-деформованого та термодинамічного стану заготовки з титанового сплаву в зоні різання на основі теорії скінчених елементів в системі DEFORM 2D. Згенерована методика досліджень динамічних процесів пружної технологічної системи оброблення. Проведений ґрунтовний аналіз впливу явищу адіабатичного зсуву під час різання титанових сплавів на термодинамічні та напружено-деформаційні процеси механічного оброблення. Для ефективного опрацювання результатів роботи системи DEFORM 2D в якості математичного забезпечення фільтраційної процедури згладжування даних реологічного моделювання, тобто підвищення точності даних без спотворення тенденції сигналу, розроблено методику, що базується на математичному апараті Савицького-Гола, програмну реалізацію якої наведено в дисертації.

У **третьому розділі** дисертації подані результати дослідження силових та термодинамічних чинників механічного оброблення деталей з титанових сплавів. Визначені залежності коефіцієнта усадки стружки від швидкості різання, глибини різання титанового сплаву та величини переднього кута різального інструменту. Проведений аналіз впливу силових чинників на формування напружено-деформованого стану заготовки.

Доведено, що геометрія різального леза інструменту суттєво впливає на узагальнену силу різання, особливо для різального леза із від'ємним переднім кутом. Встановлено, що зміна глибини різання суттєво не впливає на температуру в зоні різання, проте, геометрія різального леза інструменту суттєво впливає на температуру обробки. Запропонована оригінальна методика моделювання залишкових деформацій та напружень I роду в системі Deform 2D, що передбачає використання сітки референтних точок вздовж обробленої поверхні та по глибині заготовки в зоні її термостабілізації.

**Четвертий розділ** присвячений аналізу результатів імітаційного та експериментального дослідження впливу трибологічних чинників на напружено-деформований і термодинамічний стан заготовки при механічному обробленні титанових сплавів. Встановлено, що коефіцієнт тертя в системі «Стружка-інструмент» має значний вплив на термодинамічний стан процесу різання. Доведено, що зношування інструменту як по передній, так і по задній поверхні, безумовно, залежить від триботехнічних умов при різанні титанового сплаву. Причому, коливання навантаження на інструмент призведе до синхронної зміни швидкості зношування. Аналіз використання різних аналітичних моделей дозволив зробити висновок, що модель Ушуї є більш адекватною для опису процесу зношування інструменту при механічному обробленні титанового сплаву.

У **п'ятому розділі** автор навів результати експериментальних досліджень вібраційних процесів різання виробів з титанових сплавів. Було розроблено та досліджено математичну модель чотиримасової автоколивальної схеми металорізального верстата з урахуванням результатів імітаційного моделювання процесу різання титанових сплавів. Проведено дослідження динаміки процесу різання та виявлено резонансні амплітудно-частотні характеристики при механічному обробленні таких матеріалів з різними режимами різання та схемами закріплення заготовки. З метою верифікації аналітичних та імітаційних досліджень автором було розроблено та створено експериментальну установку. Порівняння результатів моделювання та експериментальних даних показало високий рівень адекватності теоретичного та реального представлення вібраційних процесів під час механічного оброблення титанових сплавів

Матеріали розділів дисертації подано у логічній послідовності відповідно до сформульованих задач досліджень.

#### **Ідентичність змісту анотацій та основних положень дисертації.**

Анотації українською та англійською мовами відображають зміст дисертації та в достатньому обсязі висвітлюють її основні результати та висновки.

#### **Відсутність порушень академічної доброчесності.**

За результатами аналізу дисертаційної роботи та публікацій автора ознак академічного плагіату не виявлено. У тексті дисертації здобувачем

наведені посилання на наукові публікації як власні, так і інших авторів. Елементів фальсифікації, фабрикації та запозичень фрагментів тексту, наукових результатів в роботі не виявлено. Це дає можливість зробити висновок про відсутність порушень академічної доброчесності в дисертаційній роботі.

### **Зауваження та пропозиції до дисертаційної роботи**

*До вступу та анотації:*

1. Занадто деталізований опис результатів імітаційного моделювання без аналізу впливу цих чинників на формування мікрогеометрії поверхні та характеристик точності при різанні.

*До першого розділу:*

2. Аналіз досліджень інженерії поверхонь при обробленні титанових сплавів потребує ширшого узагальнення щодо предмету дисертаційних досліджень та загальних висновків дисертаційної роботи.

*До другого розділу:*

3. Слід було б більш ґрунтовно пояснити причину вибору для даних досліджень саме системи Deform 2D у порівнянні з аналогічними за призначенням системами, адже система Deform в основному призначена для досліджень процесів пластичного деформування, а не різання.

4. Не зрозуміло, чому автор обмежився лише методикою планарних (2D) досліджень, уникнувши можливості системи Deform здійснювати 3D імітаційні моделювання.

*До третього розділу:*

5. Отримані багаточисельні результати досліджень потребують системного узагальнення для більш практичного застосування рекомендацій та пропозицій щодо оптимізації режимів різання підчас оброблення титанового сплаву.

*До четвертого розділу:*

6. Автор обмежився аналізом лише 2-х критеріїв зношування різального інструменту – Ушуї та Арчарда. Проте, в теорії різання існує велика кількість інших критеріїв (абразивного, дифузійного, адгезійного тощо). Доцільно би було більш коректно обґрунтувати вибір саме запропонованих критеріїв.

*До п'ятого розділу:*

7. Не зрозуміло, чому в дисертації в формулі (5.2) апроксимація сили різання представлена рівнянням не в повному вигляді.

8. Було б бажано більш детально обґрунтувати використання чотири масової динамічної моделі технологічної обробної системи.

9. Подані на рис. 5.7. амплітудно-частотні характеристики коливань робочих органів верстата та деталі при різних умовах затиску деталі потребують більш ґрунтовного опрацювання (опису висновків та методики побудови експериментальних досліджень).

Наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи та її наукову цінність.

## ВИСНОВОК

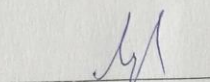
Дисертаційна робота Ше Сяньнін на тему «Підвищення ефективності механічного оброблення деталей з титанових сплавів на основі імітаційного моделювання процесу формоутворення», подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 131 «Прикладна механіка» (галузь знань 13 «Механічна інженерія»), є завершеною науково-дослідною працею, в якій отримані нові науково-обґрунтовані результати, що в сукупності вирішують актуальну задачу підвищення ефективності технологічного процесу механічного оброблення виробів з титанових сплавів.

Зміст дисертації в достатній мірі відображений в опублікованих матеріалах досліджень (статтях та тезах доповідей). Недоліки, наведені у зауваженнях, не впливають на загальну цінність дисертаційного дослідження.

Дисертаційна робота «Підвищення ефективності механічного оброблення деталей з титанових сплавів на основі імітаційного моделювання процесу формоутворення» за актуальністю і новизною отриманих результатів, їх достовірністю і обґрунтованістю, науковою і практичною цінністю, повнотою викладення матеріалу в наукових публікаціях, структурою та обсягом відповідає вимогам Наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 року «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» та «Тимчасовому порядку присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 167 від 06 березня 2019 року, за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» (13 «Механічна інженерія»).

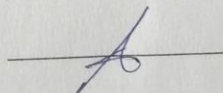
На підставі цього вважаю, що автор дисертації Ше Сяньнін заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 «Прикладна механіка».

Офіційний опонент,  
професор кафедри  
конструювання верстатів,  
інструментів та машин,  
Тернопільського національного  
технічного університету  
ім. І. Пулюя, д.т.н., професор



Ігор ЛУЦІВ

Підписав проф. Луцива І.В.  
зсвідчує проф.  
Перший проректор ТНУ  
д.т.н., проф.



Олег ЛЯШУК