

## **ВІДГУК**

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора

Тарельника В'ячеслава Борисовича

на дисертаційну роботу Хавіна Геннадія Львовича

«Моделювання, оптимізація й проектування технологічних процесів механічної обробки полімерних композиційних матеріалів»,  
представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування

### **1. Актуальність теми**

Підвищення використання композиційних матеріалів (КМ) в сучасному машинобудуванні та побуті, а також розширення номенклатури полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), постійно вимагає розробки нових і удосконалення наявних методів їх механічної обробки.

Головне місце в технології механічної обробки ПКМ займають операції точіння виробів і свердління отворів різного діаметру. Крім застосування для цих цілей нового інструменту і модернізації вже існуючого, найважливіше місце займає технологічне забезпечення цих операцій і, в першу чергу, оптимальний або раціональний вибір технологічних параметрів процесу обробки.

В даний час відбувається постійне розширення застосування композиційних матеріалів в різних сферах людської життєдіяльності, що пов'язують із здешевленням і збільшенням виробництва ПКМ і вдосконаленням методів розрахунку конструкцій з них. Збільшення використання ПКМ зажадало створення ефективних технологічних процесів для їх механічної обробки, в тому числі і ручного свердління отворів при складанні. Крім того значно розширилася потреба в виробництві отворів малого діаметра або мікросвердлень, що з огляду на специфіку структури ПКМ має значні технологічні труднощі. Удосконалення конструкцій з ПКМ і створення принципово нових типів матеріалів ініціювали появу і розвиток технологій

швидкісного точіння, глибокого свердління й свердління похилих отворів в заготовках перехресного армування. Потреба в такого роду отворах, в свою чергу, призвела до створення нових типів інструментів і модернізації вже існуючих. Великі перспективи пов'язані з використанням високошвидкісного свердління глибоких отворів. Технологія високошвидкісного свердління в ПКМ, хоча і вимагає спеціального обладнання та інструменту, в окремих випадках забезпечує високу продуктивність і якість обробки. Однак ця технологія поки не довела більш високу ефективність процесу в порівнянні з традиційним свердлінням, і є предметом подальших наукових теоретичних та експериментальних досліджень.

Для обробки полімерних композиційних матеріалів з різною структурою і різними типами наповнювачів, з високими показниками міцності і абразивними характеристиками, доцільно використовувати твердосплавний інструмент і ретельно розраховані технологічні параметри обробки. Це забезпечує необхідні показники якості поверхні і високу продуктивність. Тому аналіз задач механічної обробки і удосконалення технологічних основ забезпечення продуктивності, точності та якості механічної обробки ПКМ є актуальною проблемою сучасного машинобудування, яка і визначила напрямки дисертаційного дослідження

У зв'язку з цим, тематика наукових досліджень Хавіна Геннадія Львовича, що представлена у дисертаційній роботі «Моделювання, оптимізація й проектування технологічних процесів механічної обробки полімерних композиційних матеріалів» є актуальною і такою, що спрямована на вирішення важливої науково-прикладної проблеми вдосконалення якості та продуктивності механічної обробки полімерних композиційних матеріалів. Ця тематика відповідає п. 6 паспорту спеціальності 05.02.08 «Технологія машинобудування», затвердженою постановою президії ВАК України від 14.06.2007 за № 47-08/6.

## **2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій і їхня достовірність**

Обґрунтованість та достовірність наукових результатів підтверджується використанням апробованих в технології машинобудування методів моделювання, проектування й оптимізації технологічних процесів. Дослідження напружено-деформованого стану поверхонь деталей в процесі їх формоутворення виконано на основі аналізу результатів числового моделювання процесів різання, реалізованого із застосуванням теорії граничних елементів. Обґрунтованість розрахунків появи і руху тріщини руйнування базується на відомих положеннях теорії руйнування та контактного руйнування, що були удосконалені і модифіковані для рішення задач технології машинобудування. Для розробки і обґрунтування методів оптимізації структури та параметрів технологічних процесів використано методи багато параметричної оптимізації, обчислювальної математики та їхні узагальнення й модифікації, що забезпечують збіжність ітераційних процесів пошуку рішення, які виникають внаслідок формулювання відповідних задач. Числові методи, які застосовуються для розв'язання поставлених оптимізаційних задач, є обґрунтованими, їх збіжність встановлена на основі існуючої методики та отриманих числових даних. Достовірність отриманих результатів моделювання напружень та деформацій, вибору геометричних параметрів інструменту та технологічних параметрів процесу підтверджується узгодженням з показниками, що одержані при проведенні аналогічних досліджень і відомих з літературних джерел, та публічними експериментальними даними по точінню і свердленню заготовок з полімерних композиційних матеріалів.

Достовірність досліджень, що проведені у розділах 2-8, не викликає сумнівів, тому що вони базуються на викликах виробництва, підтверджуються конкретністю постановки завдань, системному підході, мають велике практичне значення. Наукові положення і висновки, сформульовані в дисертації, обґрунтовані з наукової і технічної точки зору і підтверджуються їх практичною реалізацією.

Аналіз висновків та отриманих в роботі результатів показує, що дисертація Хавіна Г.Л. має внутрішню єдність, містить обґрунтовані і достовірні положення. Висновки по розділах відображають отримані результати та логіку досліджень. Рекомендації, розроблені в дисертації, мають практичну спрямованість.

### **3. Наукова новизна**

В процесі розв'язання науково-технічних задач, які були поставлені в роботі, виходячи з її мети, автором було отримано низку нових науково-технічних результатів, серед яких, на мій погляд, найважливішими є такі:

1. Вперше науково обґрунтовано та сформульовано положення управління спрямованого руйнування полімерного композиційного матеріалу в процесі свердління та точіння, яка стала підґрунтям створення технології обробки та вибору оптимальних режимних параметрів процесу, призначення технологічних параметрів обробки отворів з прогнозуванням фактору розшарування і розкошлячення.

2. Вперше одержана теоретична концепція і математична модель процесу перерізу волокон (джгутів) ПКМ як послідовність зародження, зростання і розвитку магістральної тріщини, удосконалено математичну модель опису появи тріщини розшарування та запропоновано оцінку фактору розшарування при обробці різними типами інструментів.

3. Вперше з позицій механіки руйнування обґрунтований синтез технологічних параметрів процесу обробки з фізико-механічними параметрами матеріалу та отриманий подальший розвиток теорії різання крихких композиційних матеріалів як явище локального контактного руйнування при взаємодії вершини інструменту з матеріалом, з урахуванням закономірностей, що описують вплив складу ПКМ, напрямку обробки і геометричних параметрів інструментів на якість одержаних отворів.

4. Вперше запропоновані співвідношення, що пов'язують довжину площини контакту по обробленій поверхні, пружне віджимання і шорсткість

поверхні з фізичними параметрами матеріалу і технологічними параметрами процесу. Розроблена математична модель процесу абразивного зносу свердел при обробці отворів для прогнозування зношування інструменту і запропоновано схему вибору технологічних параметрів обробки з урахуванням впливу цього фактору.

#### **4. Значення одержаних результатів для науки і практики**

Наукове значення результатів роботи полягає в наступному:

1. Розвинуті науково-прикладні основи проектування технологічних процесів виготовлення виробів з полімерних композиційних матеріалів на основі управління спрямованим руйнуванням матеріалу при обробці і прогнозування якості поверхні.
2. Засобами математичного моделювання поєднанні наукові розробки механіки руйнування і технології машинобудування у вигляді теоретичної концепції перерізу волокон як послідовного руху тріщини руйнування.
3. Розвинуто теорію граничноелементного моделювання процесів формоутворення виробів як явище контактної взаємодії вершини інструменту з матеріалом, обґрунтувавши вибір ефективного критерію руйнування при різанні, методику формування тріщини розшарування на виході свердла при свердленні різними типами інструментів.
4. Проведені ґрунтовні дослідження впливу технологічних параметрів свердлення і точіння, та марки інструментального матеріалу, типу і геометрії інструменту на показники напружено-деформованого стану і розподіл температурного поля оброблюваної заготовки з полімерних композиційних матеріалів.
5. Удосконалена методика визначення складових сили різання та крутного моменту та розроблено математичний опис взаємозв'язків якісних і кількісних показників поверхневого шару обробленого

отвору і підтверджено загальні принципи управління технологічними параметрами свердління.

6. Розвинуто положення явища зносу свердел при обробці отворів для прогнозування зношування інструменту і розроблена схема вибору технологічних параметрів обробки з урахуванням впливу цього фактору.
7. Набула подальшого розвитку рішення задачі багатопараметричної оптимізації технологічних процесів механічного оброблення виробу на основі впровадження компромісної цільової функції, що системно характеризує вплив технологічних чинників на якість обробки.

#### Практичне значення одержаних результатів:

На основі отриманих теоретичних результатів та розроблених числових методів створено алгоритми та програмне забезпечення для розв'язання низки прикладних задач:

1. Алгоритмічне і методичне забезпечення системи автоматизованого вибору інструменту та оптимального розрахунку технологічних параметрів обробки, в основу якої покладено аналіз процесу руйнування в контактні інструмент-матеріал, числове моделювання напружено-деформованого стану і температурного поля, функціональні модулі та аналітично-прикладні програми для урахування зносу інструменту та оцінки якості оброблюваних поверхонь.

2. Практичні рекомендації щодо побудови ефективної математичної моделі формоутворення виробів з полімерних композиційних матеріалів, реалізованої із застосуванням розробленого програмного продукту, що використовує метод граничних елементів (Boundary Element Method).

3. Практичні рекомендації і програмний продукт щодо прогнозування розшарування на виході інструменту при свердленні та утворенню разкошлячень і інших пошкоджень.

4. Алгоритм та програмний модуль для розв'язання задачі багатопараметричної оптимізації пошуку оптимальних параметрів технологічної обробки, який реалізує метод «рою частинок».

5. Результати досліджень впроваджені на підприємствах ПАТ «ФЕД» (м. Харків) для багатоваріантних розрахунків якісної обробки полімерних електроізоляційних матеріалів та на АТ «ХАРП» (м. Харків) для проектування технологічних процесів точіння та свердлення підшипникових сепараторів з текстоліту (пропитаний шифон марки ТП-6) та сепараторів з поліаміду марки арамід ПА СВ30-1Э-ТМ. Результати дисертаційної роботи впроваджено у навчальний процес на кафедрі технології машинобудування та металорізальних верстатів національного технічного університету «ХПІ» для спеціальностей 050202 – «Автоматизоване управління технологічними процесами» та 050502 – «Металорізальні верстати та системи».

### **5. Повнота викладення основних результатів роботи**

Основні результати дисертаційної роботи в достатній мірі опубліковано в 35 наукових працях, із яких 1 монографія (у співавторстві), 27 статей у фахових виданнях України (5 – у наукометричних базах), 5 статей у закордонних періодичних фахових виданнях, 2 – у матеріалах науково-технічних конференцій. Основні наукові положення і висновки, які представлені в дисертації та авторефераті ідентичні між собою. Автореферат відображає актуальність роботи, зміст і суть одержаних наукових результатів, їх практичне значення, детально виокремлює особистий внесок здобувача та демонструє апробацію результатів досліджень.

Теоретичні положення і практичні результати оригінальні, взаємопов'язані та отримані на основі системного аналізу. Результати роботи свідчать про особливий вклад здобувача в науку. Висунуті в роботі задачі послідовно вирішені автором. Таким чином, досягнуто поставлену мету дослідження: моделювання формоутворення виробів з полімерних композиційних матеріалів на основі управління процесом направленою руйнування припуску, що дозволяє для обраного інструменту реалізувати вибір оптимальних технологічних параметрів.

## **6. Оцінка змісту дисертації і її завершеність в цілому**

Робота складається зі вступу, восьми розділів, висновків, списку літератури з 321 найменування та додатків, в яких наведено результати моделювання та акти використання результатів роботи. Загальний обсяг роботи складає 361 сторінку, з них 268 сторінок основного тексту (без врахування рисунків та таблиць на окремих аркушах), 123 рисунки і 17 таблиць за текстом. Обсяг дисертаційної роботи не перевищує встановлені норми.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і завдання дослідження, висвітлено наукову новизну та практичну значимість одержаних результатів. Наведено відомості про апробацію роботи та публікації.

У **першому розділі** з використанням існуючих наукових публікацій і даних про досягнення в обробці полімерних композиційних матеріалів проаналізовано стан розвитку технологічного забезпечення механічної обробки заготовок з ПКМ, методів математичного моделювання процесу різання матеріалів такого класу та методів обробки експериментальних даних.

**Другий розділ** присвячений аналізу дефектів обробки, що виникають при точінні та свердленні ПКМ.

Завдяки неоднорідній структурі ПКМ при обробці, за рахунок руйнування матриці, утворюється дрібнодисперсна пилоподібна стружка та газу. Усі виникаючі дефекти умовно підрозділяються на відхилення від точності (відхилення форми, розміру отворів) і дефекти пошкодження обробленої поверхні. До останніх відносять: розшарування, міжшарові тріщини, висмикування волокон, сколювання кромки, термічна деструкція, розпушення і розкошлячення, порушення мікрорельєфу поверхні або шорсткість. При обробці отворів найбільш відповідальним та небезпечним є розшарування на виході інструменту із заготовки. Погіршення якості обробки ПКМ визначає необхідність заміни інструменту.

Для оцінки рівня руйнування навколо просвердленого отвору використовується підхід представлення фактору розшарування як функції від параметрів процесу (подачі, швидкості) і радіуса свердла. Розшарування і



разкошлячення у будь якого випадку супроводжують свердління ПКМ і їх розподіл та інтенсивність визначаються діаметром отвору, товщиною заготовки і технологічними параметрами обробки.

У **третьому розділі** обґрунтовано інструментальне забезпечення операцій точіння та свердління отворів у ПКМ. Проаналізовано широкий спектр спіральних свердел з різною формою заточування, а також інструмент, оснащений твердосплавними пластинами і перовий інструмент. На підставі аналізу інструментального забезпечення свердління ПКМ за такими критеріями, як якість обробленої поверхні, стійкість інструменту та його вартість пріоритет віддається традиційному спіральному свердлу з твердого сплаву. Традиційне спіральне свердло має головну перевагу перед спеціальними за рахунок невеликої вартості. При виконанні отворів з підвищеної точності перевагу слід віддавати спеціальним свердлам. Якщо вимоги до якості не дуже високі, то доцільніше користуватися спіральним свердлом.

**Четвертий розділ дисертації** присвячено моделюванню контактної взаємодії інструменту і матеріалу, розробці моделі контактного руйнування з використанням положень лінійної механіки руйнування. Напружений стан біля вершини тріщини описують рівняннями, що зводять задачу до визначення єдиного параметра, який характеризує поле напруги– коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН). Основним інструментом для теоретичного дослідження руйнування в контакті вершини із шаруватим композитом є енергетичний критерій лінійної механіки руйнування, який ґрунтується на визначенні поля напружень біля вершини тріщини в лінійно-пружному матеріалі.

Енергетичний підхід полягає в тому, що швидкість вивільнення пружної енергії визначається диференціюванням повної потенційної енергії і при цьому існує зв'язок швидкості вивільнення пружної енергії з КІН. Енергетичний критерій впливає з аналізу зміни повної потенційної енергії системи при її малих кінцевих відхиленнях від положення рівноваги. При цьому визначаються умови, при яких в деякій області біля початкового рівноважного стану може

існувати збурений рівноважний стан. Ці умови, що описують суміжний з вихідним збурений рівноважний стан, формулюються у вигляді варіаційного принципу стійкості.

**П'ятий розділ** дисертації присвячений результати моделювання силових факторів та температурного поля, де основним питанням для всіх процесів механічної обробки є моделювання сил різання, які, з одного боку, відповідають за споживану енергію протягом процесу обробки і, з іншого боку, визначають знос інструменту. Аналіз впливу технологічних режимних параметрів обробки на величину фактору розшарування визначив, що мінімальне значення осьового зусилля, яке відповідає мінімальному значенню подачі при заданих геометричних характеристиках свердла, не забезпечує мінімального значення фактору розшарування.

У **шостому розділі** наведено проектування технологічного процесу обробки ПКМ і призначення головних режимних факторів обробки – подачі і частоти обертання шпинделя. Стратегія призначення режимів механічної обробки ПКМ, з одного боку, повинна забезпечувати максимальну продуктивність процесу, а з іншого боку виконання вимог до якості, і, в першу чергу, відсутності розшарування, припикання і ворсистості. Крім того, абразивний характер системи волокон призводить до інтенсивного зносу інструменту, що вимагає зменшення швидкості обробки. На підставі практичного досвіду та лабораторних досліджень сформульовано декілька якісних закономірностей по вибору технологічних параметрів обробки та марки і типу інструменту. По-перше, зменшення величини поперечної різальної кромки найістотнішим чином призводить до зменшення осьової сили. По-друге, фактор розшарування (область руйнування на виході інструмента із заготовки) зростає зі збільшенням швидкості і подачі.

В роботі запропоновано призначення технологічних (режимних) параметрів обробки з урахуванням особливості розшарування і гарантованої наявності разкошлячення на основі виконання поетапних ітерацій:

**Сьомий розділ** дисертацій присвячений постанові та рішенню задачі оптимізації технологічного процесу механічної обробки полімерних композитів. Задачу оптимізації сформульовано як реалізацію одного з наступних завдань: оптимізація з обмеженнями нелінійної цільової функції декількох змінних, яка може бути сформульована аналітично, наприклад, пошук параметрів свердління, що забезпечують мінімальне розшарування, разкошлячення, шорсткість поверхні або температуру; багатопараметрична оптимізація нелінійної цільової функції за критеріями якості, де виконання показників якості поверхні входить в компромісну цільову функцію; пошук оптимального рішення за параметрами якості для функцій заданих у вигляді таблиці, як результат вимірювань в проведених експериментах.

**У восьмий розділі** надано рішення прикладних задач, щодо моделювання технологічного процесу механічної обробки, у яких досліджується вплив геометричних параметрів інструменту – переднього, заднього кутів, головного кута, при точінні склопластику, та задач про виявлення впливу режимних параметрів обробки на розподіл напружень у контакті, розподіл температурного поля, зношування інструменту.

**У висновках** сформульовано основні наукові результати дисертаційної роботи.

Таким чином, дисертація Хавіна Г.Л. за змістом представляє собою завершену наукову роботу, яка має внутрішню єдність, сукупність наукових теоретичних положень і практичних результатів, що свідчить про індивідуальний внесок здобувача в науку і практику. Дисертація написана і оформлена згідно з вимогами. Автореферат у повній мірі відображає зміст дисертації.

## **7. Зауваження по змісту і оформленню дисертації та автореферату**

1. Як вказано в розділі 2 (стор.41) кількість наповнювача і його укладка визначають стратегію вибору інструменту, його геометрію стійкість та інше. Автором не вказана яка ж це стратегія і які базові принципи призначення типу інструменту і кутів його заточування при обробці різних типів ПКМ.

2. Розшарування та розкошлячення проявляються одночасно на що вказано у розділі 2 (стор.51). Однак розкошлячення дуже часто виникає при перерізу волокон або джгутів під гострим кутом, коли дія зусилля зрізу мінімальне. Моделювання механізму такої взаємодії є дуже важливим для розуміння появи дефекту розкошлячення, що не знайшло відбиття у наданій математичній моделі (розділ 4) перерізу джгутів.

3. У розділу 4.3 (стор.132) автором запропонована двомірна модель ортогонального різання, яка знайшла подальший розвиток на стор.134, рис.4.7. Ніяким чином не розглядається різання полімерного композиту, коли волокна армування розташовані під кутом. Крім того, не враховується наявність кута армування відносно вектору швидкості і наявність зміни переплетення композиту по координаті, яка не розглядається в постановці задачі.

4. Числовий аналіз впливу геометричних параметрів інструменту на процес різання і руйнування надано автором у п.4.3.4 (стор.135) та у додатку Б, при цьому не розглянуто вплив заднього кута на напружено-деформований стан в контакті.

5. У розділу 3 (стор.96) розглянуто питання впливу типу армування, кількості і механічних властивостей матеріалу армування на характер і інтенсивність зношування інструменту. Однак у подальшому це питання не зачіпляється і відповіді на питання як же впливає тип армування на зношування інструменту і його стійкість немає.

6. У п. 8.2, стор.248 автором надано емпіричну формулу розрахунку температури (8.1) для якої немає ніяких пояснень про її отримання і значення величин, що входять до неї. Розподіл температурного поля ні яким чином не пов'язано з моделлю, що описує деструкцію матриці. Прогнозування плавлення матриці під дією температурного підігріву зовсім відсутнє.

7. При числовому моделюванні методом граничних елементів (розділ 4, стор.127,128) для опису поведінки тріщини і визначення її старту не вказано використовувався спеціальний елемент або розрахунок здійснювався через енергетичний підхід (метод податливості).

Проте, вважаю, що вищенаведені зауваження та недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаного на високому науковому рівні

дисертаційного дослідження, не зменшують її наукову новизну та практичну значимість і не знижують загального позитивного сприйняття проведеного обсягу досліджень.

#### **8. Висновок про відповідність встановленим вимогам**

Розглядаючи дисертаційну роботу в цілому, треба оцінити її позитивно.

Дисертація Хавіна Геннадія Львовича на тему «Моделювання, оптимізація й проектування технологічних процесів механічної обробки полімерних композиційних матеріалів», що подана на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування, є завершеною науково-дослідною роботою і містить нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності вирішують актуальну наукову проблему розвитку науково-прикладних основ проектування прогресивних технологічних процесів виготовлення виробів машинобудування, що має суттєве значення для машинобудування України. Робота відповідає формулі та напрямам досліджень паспорту наукової спеціальності 05.02.08 – технологія машинобудування (п.п. 2, 3, 6 та 10) та повністю відповідає вимогам п.п. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів» від 24 липня 2013 р. № 567 щодо докторських дисертацій, а її автор заслуговує присудження наукового ступеню доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування.

Офіційний опонент,

завідувач кафедри технічного сервісу

Сумського національного аграрного університету,

доктор технічних наук, професор

В.Б. Тарельник

Підпис завіряю,

Вчений секретар



Ю.І. Данько