

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

УДК 621.95.01: 621.9.019

Мелентьєв Руслан Юрійович



**ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ФОРМИ ОТВОРІВ
В ДЕТАЛЯХ З ВУГЛЕПЛАСТИКА**

05.02.08 – технологія машинобудування

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2017

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Одеському національному політехнічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник

доктор технічних наук, професор
Ларшин Василь Петрович,
Одеський національний політехнічний університет,
кафедра “Технологія машинобудування”, м. Одеса.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Новіков Федір Васильович,
Харківський національний економічний університет
імені Семена Кузнеця,
кафедра «Природничі науки та технології», м. Харків.

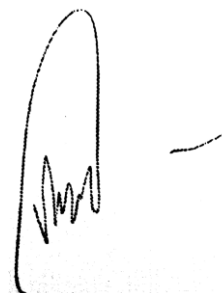
кандидат технічних наук, доцент
Умінський Сергій Михайлович,
Одеський державний аграрний університет,
кафедра «Експлуатація та ремонт МТП», м. Одеса.

Захист відбудеться “31” березня 2017 р. о 14:00 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.052.02 в Одеському національному політехнічному університеті за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1, ауд. 400-А.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Одеського національного політехнічного університету за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченка, 1

Автореферат розісланий “28” лютого 2017 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради Д 41.052.02



А. О. Бойко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В даний час спостерігається стрімке зростання застосування полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), зокрема вуглецевих волоконно-армованих полімерів (ВАП). Це призводить до необхідності удосконалення методів обробки цих матеріалів, які в значній мірі ускладнені їх специфічними фізичними і механічними властивостями. Формоутворення отворів в вуглепластиках є найбільш трудомісткою операцією з числа застосовуваних і за деякими оцінками складає до 80% загальної трудомісткості обробки, що досягає 50% від загальної вартості обробки цього матеріалу, оскільки навіть невеликий приватний реактивний літак має від 250 000 до 400 000 отворів, транспортний же літак або бомбардувальник має від 1 000 000 до 2 000 000 отворів.

Серед відомих методів формоутворення отворів: електроіскрова обробка не має високу ефективність, лазерна не забезпечує вимог якості обробленої поверхні у зв'язку з термічною деструкцією полімеру а електрохімічна обробка і зовсім не може бути застосована до даного класу матеріалів. Таким чином, традиційне механічне свердління і по сьогодні зберігає першість у вирішенні даного питання. Проте, процес різання характерний супроводом дефектів обробки, через незадоволення якісних показників заданим вимогам готового виробу. Так, обмежуючим фактором при плануванні технологічних параметрів процесу свердління деталей з вуглепластика є дефекти вхідної і вихідної кромки отвору. Показники шорсткості поверхні і діаметра отвору не є пріоритетними.

Серед існуючих шляхів забезпечення бездефектної обробки отворів і підвищення ефективності процесу свердління виділяють застосування лезового і алмазного інструменту, причому, відомо безліч вітчизняних і зарубіжних праць, що суперечать стосовно переваг і недоліків наведених напрямків.

У зв'язку з вищевказаним, завдання підвищення точності форми отворів на основі вибору типу свердла та параметрів процесу є безумовно актуальним як для науки, так і для світового машинобудування.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі технології машинобудування Одеського національного політехнічного університету у рамках НДР МОН України «Дослідження ресурсозберігаючих технологій при лезовій та абразивній обробці», ДР № D113U001462, з 09.12 по 06.15 рр., а також відповідно до програми міжнародного наукового співробітництва та обміну науковцями ERASMUS MUNDUS, на замовлення проекту BACIS (2012-2741 / 001-001 - EMA2), досліди виконані в Туринському політехнічному університеті Італії (Politecnico di Torino). Здобувач приймав безпосередню участь у аналітичних та експериментальних роботах як відповідальний виконавець.

Мета і задачі дослідження. Мета роботи – підвищення точності форми кромки отвору в вуглепластиках за рахунок вдосконалення параметрів процесу та вибору інструменту.

Для досягнення мети в роботі поставлено наступні задачі:

- Виконати аналіз процесів обробки отворів в ПКМ. Виявити характерні

особливості обробки даного класу матеріалів, встановити рекомендовані геометрії інструментів і режимні параметри процесу для досягнення вимог що до якісних показників отворів.

- Запропонувати новий технологічний спосіб зменшення дефектів кромки та підвищення ефективності обробки отворів в вуглепластиках. Розробити інструмент для реалізації запропонованого способу;

- Розробити методику та виконати комплекс експериментальних досліджень лезового і алмазного свердління вуглепластика з метою достовірної оцінки технологічних переваг і недоліків кожного виду обробки;

- Встановити характер утворення сил різання, проаналізувати їх вплив на якість кромки отворів. Виконати статистичний аналіз експериментальних даних. Визначити коефіцієнти регресійних залежностей для визначення сил різання та якісних показників отвору, на основі яких, виконати оптимізацію режимів різання для досягнення якості отвору, що задовольняють вимоги до готової продукції.

- Дослідити теплову сторону процесу абразивного свердління кільцевим свердлом на основі отриманих експериментальних даних.

- Виробити практичні рекомендації щодо вибору прогресивних режимів різання та різальних інструментів для свердління отворів в вуглепластиках.

- Класифікувати якісні показники отворів в ПКМ.

Об'єкт дослідження – технологічні операції лезового та абразивного свердління вуглепластиків.

Предмет дослідження – Технологічні параметри процесу свердління, технологічні фактори утворення дефектів і геометрія ріжучого інструменту, що забезпечує комплекс заданих вимог до якості отворів.

Методи дослідження. Методологічною основою роботи є експериментальне дослідження технологічних закономірностей формування параметрів якості обробки отворів у деталях з вуглепластика. Теоретичні дослідження базуються на фундаментальних положеннях технології машинобудування, теорії різання матеріалів, теплофізиці й чисельного моделювання. Результати експериментальних досліджень одержано за допомогою високоякісного оснащення з використанням сучасних п'єзометричних засобів вимірювань. Статистичне оброблення експериментальних даних проводилось з використанням прикладних програми для ЕВМ. Теоретичні розробки щодо теплонапруженості процесу отримані методом комп'ютерного моделювання на основі методу скінчених елементів.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше обґрунтовано, що температура є фактором виникнення деламінації в волокнисто-армованих композитах, що дозволило розробити новий ефективний спосіб підвищення точності форми отвору в вуглепластиках.

2. Отримали подальший розвиток теорія та спосіб *«різнозернистої обробки»* отворів на операції свердління, який характеризується тим, що загальний припуск на обробку поділяється на операційні припуски які видаляються послідовно-паралельно, чим, за рахунок зниження величини силових та температурних показників процесу, підвищується точність форми отвору.

3. Удосконалено модель теплового поля при свердлінні вуглепластика,

яка відрізняється комплексною динамічно-змінною геометрією заготівлі під час обробки кільцевим свердлом, оберненим зв'язком теплофізичних характеристик до температури та функціональною щільністю теплового потоку, що дозволило знизити похибку моделювання і визначити вплив температури процесу на виникнення деламінації.

Практичне значення отриманих результатів:

1. Наведено класифікацію дефектів отворів в ПКМ, терміни якої рекомендуються до застосування в описі дослідження чи цитуванні результатів. Запропоновано критерій оцінки якості кромки отвору в *«необроблений периметр»*.

2. Вказані недоліки та переваги використання спірального та кільцевого інструменту стосовно обробки отворів в вуглепластиках. Докладено вплив блокування керна на сили різання та якісні показники отвору. Надано можливість використання фактичних результатів дослідження (записів, баз даних та ін.) при підготовці нових нормативних і методичних документів чи теоретичних розробок.

3. Побудовані емпіричні моделі для визначення осьової сили різання, крутного моменту, відшарування вхідної і вихідної кромки отвору та інше при обробці отворів в вуглепластику спіральним чи кільцевим свердлом. Виконано оптимізацію технологічних параметрів операції свердління за допустимою величиною деламінації кромки, складені тривимірні карти сил різання, наведені таблиці вибору раціональних режимів різання.

4. Розроблено високопродуктивний процес свердління з поєднанням етапів чорнової та чистової обробки в одному осьовому русі інструменту. На основі підтвердженої ефективності вказаного, розроблено лінійку різнозернистого інструменту для обробки отворів в ПКМ, які є рішенням для свердління глибоких отворів чи тонких конструкцій, матеріалів з низькою теплостійкістю та високими пружними характеристиками, для усунення проблеми блокування керна, застосування твердих змащувальних засобів та інше.

Технічна новизна розробок захищена восьмию деклараційними патентами України. Окрім, прийнято участь в міжнародній програмі розвитку машинобудівної галузі промисловості за кордоном

Особистий внесок здобувача. Основні теоретичні дослідження за темою дисертаційної роботи [1 – 3, 6, 7,] виконані автором самостійно. Основні експериментальні дослідження [18] виконані в лабораторії інженерної механіки Туринського політехнічного університету в Алессандрії за підтримки науковців департаменту та інженерного складу лабораторії. У працях, опублікованих у співавторстві [1, 2, 8], здобувачем виконано плани експериментів, технічний та аналітичний опис отриманих результатів. Здобувачем також запропоновано нові конструкції свердл у співавторстві [9, 10] та особисто [11, 12, 13, 14, 15, 16].

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати роботи доповідались і обговорювались на: «3rd CIRP Conference on Surface Integrity», м. Північна Кароліна (2016), XX міжнародна науково-практична конференція «Роль науки в розвитку соціума: теоретические и практические аспекты», м. Єкатеринбург (2016), міжнародна науково-технічна конференція «новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении», м. Одеса –

Київ (2016), 5-а міжнародна науково-технічна конференція «Современные высокоэффективные технологии и оборудование в машиностроении» м. Санкт-Петербург (2016), IV міжнародна науково-технічна конференція «Актуальні проблеми інженерної механіки та технології машинобудування», м. Миколаїв (2016). Роботу в повному обсязі заслухано та схвалено на розширеному науковому семінарі кафедри «Технологія машинобудування» Одеського національного політехнічного університету (2016) та в відділ № 18 «Технологічного управління якістю обробки інструментами з надтвердих матеріалів» Інституту надтвердих матеріалів імені Бакуля України (2016).

Публікації. Основні положення та результати дисертації опубліковано в 22 роботах, з них 7 (5 одноосібних) статей у фахових виданнях України та 1 в виданні Elsevier, що індексується НМБД Scopus, 8 у деклараційних патентах України, 6 в матеріалах конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається з вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних літературних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації 209 сторінок, в тому числі 91 рисунок, 17 таблиць, список використаних літературних джерел з 156 найменувань та 7 додатків на 42 сторінках. Обсяг основного тексту дисертації 135 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформовано мету, об'єкт, предмет досліджень та задачі, які розв'язуються в роботі. Окреслено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів. Наведено інформацію щодо апробації, структури та обсягу роботи.

В першому розділі виконано аналіз стану проблеми забезпечення бездефектної обробки отворів у виробах з вуглепластиків та формуванню завдань, вирішення яких необхідно для досягнення поставленої мети роботи.

На підставі аналізу робіт міжнародних наукових колективів, які досліджували обробку отворів в вуглепластиках: С.С. Tsao, Н. Hocheng and I.C. Chen; J.P. Davim, P. Reis, V. N. Gaitonde, S. R. Karnik, J.K. Rubio, A.M. Abrao, V. Krishnaraj and R. Zitoune; L.M.P. Durão and A.T. Marques; X. Wang, L. G. Wang and P.Y. Kwon; Y. Karpat, M. Fernández and C. Cook; D. Iliesku, D. Genih and F. Giro; V.A. Phadnis and F. Makdum; J. Akbari and P. Mehbudi; W.L. Cong, C.L. Zhang and W. Xu та окремих дослідників I. Shyha, R. Zeman, M.J. Li, E. Brinksmeier, M.B. Lazar, K. Palanikumar, K.H. Park, A.A.. Степанов, А.В. Баликов, В.І. Дрожжин, В.А. Залога, Д.В. Криворучко, В. Г. Сороченко, А.С. Дударев, С.В. Резник і багатьох інших, показано, що найбільші труднощі викликає обробка отворів з допустимим рівнем деламінації кромки. Зважаючи на відсутність систематизованих даних про фізичну природу різання волокнистих композитів був проведений аналіз зв'язків режимів різання з силами різання та утворенням дефектів. Серед багатьох робіт зазначається супереч, що до впливу параметрів процесу на сили різання та якісні показники отвору. Розглянуті теплові явища, що виникають під час обробки ПКМ. Матеріал має низьку теплостійкість та теплопровідність, що призводить до нагрівання зони різання та превалювання механічної деструкції матеріалу в термодеструкцію.

Розглянуто особливості геометрії ріжучого інструменту. Спостерігається декілька конроверсивних технологічних напрямів, котрі для підвищення ефективності процесу свердління ПКМ наполягають на використанні з одної сторони спірального свердла та алмазного кільцевого з іншої. Існують численні однокі дослідження оптимального інструменту, в той час як порівняльні комплексні експерименти є ліченими та входять у супереч між собою. Вищесказане призвело до необхідності вирішення протиріччя переваги двох типів інструменту стосовно обробки отворів в вуглепластиках. На підставі аналізу стану проблеми і обраного напрямку дослідження сформульовані мета і завдання досліджень.

У другому розділі на основі властивостей ВАП та характеристики абразивної обробки, було висунуто гіпотезу про додатковий фізичний фактор виникнення дефекту форми отворів. З висунутого витікає, що з метою уникнення деламінації вихідної кромки отвору слід знижувати температуру яка досягається в крайньому шарі композиту. Теплонапруженість при свердлінні ПКМ вивчається в університеті Лафборо (Велика Британія), Бременському інституті матеріалознавства (Німеччина), Сумському державному університеті (Україна), ИСМ ім. В. Н. Бакуля НАНУ (Україна), МГТУ ім. Баумана (Російська федерація) та інших, проте не відмічається жодної спроби встановити зв'язок між температурою та деламінацією кромки. Розглядаються технологічні передумови зниження температури, в результаті чого, відомий в теорії шліфування та хонінгування спосіб *«різнозернистої»* обробки знаходить нове застосування та отримує розвиток. Різнозерниста обробка отворів на операції свердління поєднує чорновий та чистовий етапи обробки в одному проході інструменту за рахунок послідовно-паралельного видалення операційних припусків шарами різних абразивних фракцій.

В розділі також представлено опис експериментальних досліджень. Задачі експериментального дослідження полягали в: визначенні сил різання (осьової сили та крутного моменту); оцінці показників якості кромки отвору; детальному вивченні характеру виникнення сил різання та умови, що їх формують; встановленні зв'язків між вхідними та вихідними даними; отриманні емпіричних залежностей контрольних параметрів; перевірці наявності положень, що опосередковано задовільняють чи суперечать висуненій гіпотезі.

Обладнання для виконання експериментального дослідження надано підрозділом Алессандрійської лабораторії інженерної механіки Туринського політехнічного університету (Sede di Alessandria del Politecnico di Torino). Застосовано вертикально фрезерний верстат з ЧПУ CORTINI M500/F1, з швидкістю шпинделя до 8000 об/хв, максимальною потужністю 3,7 кВт та максимальним крутним моментом 24 Нм. Контрольно-вимірювальний комплекс включав: чотирьох-компонентний п'єзометричний динамометр Kistler (type 9272), багатоканальний посилювач сигналу Kistler (type 5019), стереомікроскоп LEICA MS5 з камерою високої роздільної здатності LEICA DFC280 та програмним забезпеченням LEICA Qwin software.

Інструмент застосований в експерименті, обрано на основі рекомендаційних даних з літературних джерел, що до оптимальних параметрів геометрії спірального та кільцевого свердла для зниження дефектів кромки. В якості спірального свердла

досліджували інструмент виробництва ISCAR, моделі SCD 060-020-060 AP3 з твердим покриттям (TiAlN) методом фізичного осадження з парової фази (PVD coating), діаметром 6 мм, 140° та 27° кутів при вершині та спіралі, відповідно. Кільцеві свердла виконавця «Полтавський алмазний завод», діаметром 6 мм, товщиною стінки 1 мм та висотою абразивної частини 5 мм. Відповідно рекомендацій ИСМ ім. В. Н. Бакуля НАНУ, свердла виготовленні на нікелевій гальванічній зв'язці, з алмазними елементами марки AC15, AC32, AC80 та фракціями (мкм) 63/50, 125/100 та 200/160, відповідно. Також в експерименті досліджується авторська конструкція кільцевого свердла з двома шарами зернистості: внутрішній 200/160 мкм та зовнішній 63/50 мкм.

Матеріал дослідження замовлений виробнику Hexion, який є партнером більшості провідних авіаконцернів. Зв'язка та армуючий елемент композиту EpiKote 04695/1 та EpiKure 05357, відповідно, обиралися згідно з їх застосуванням в звукопоглинаючих панелях авіаційних двигунів пасажирського авіалайнера Airbus A380. Матеріал є вуглепластиком на епоксидній основі з тканюю схемою армування та товщиною шару 400 мкм. Товщина зразків, що досліджувалися складала 4 мм. Поєднання складових та шарів виконувалося компанією Benteler SGL Composite Technology відповідно до встановленої технологічної документації виробником.

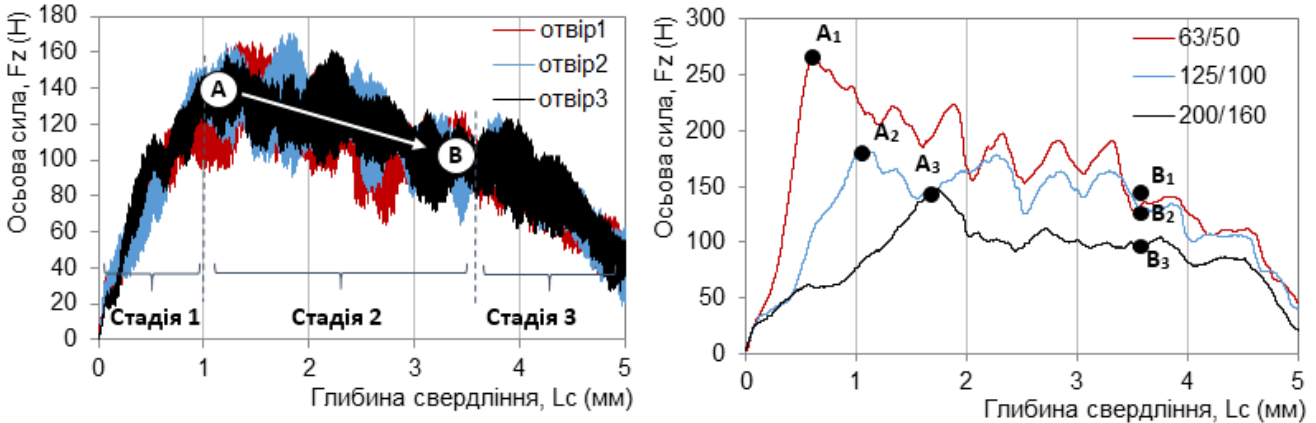
План експерименту базовано на аналізі експериментальних дослідів, що чітко встановлює діапазон рекомендованих режимів різання операцій лезового та абразивного свердління вивчаємого діаметру для зменшення дефектів кромки. Оптимальна швидкість різання V коливається від 30 до 50 м/хв та осьова подача f від 0,02 до 0,12 мм/об. Швидкість різання вище 60 м/хв рекомендується лише ліченими джерелами. На основі вказаного, сплановано повнофакторні експерименти, які задовольняють рекомендовані значення режимних параметрів.

Відповідно до цілей роботи, фіксувалися показники осьової сили та крутного моменту. Деламінація вхідної і вихідної кромки отвору визначалася як $F_d = \frac{D_{max}}{D}$, де: F_d – фактор дефекту; D_{max} – діаметр дефектної зони, мм; D – діаметр отвору, мм. Запропоновано оцінювати «необроблений периметр» кромки отвору виразом $U_r = \frac{l \cdot 100\%}{P}$, де l – довжина дуги несформованого сектору кромки, мм; P – периметр отвору, мм.

У третьому розділі наведено результати експериментальних досліджень свердління вуглепластика спіральним та кільцевим свердлом.

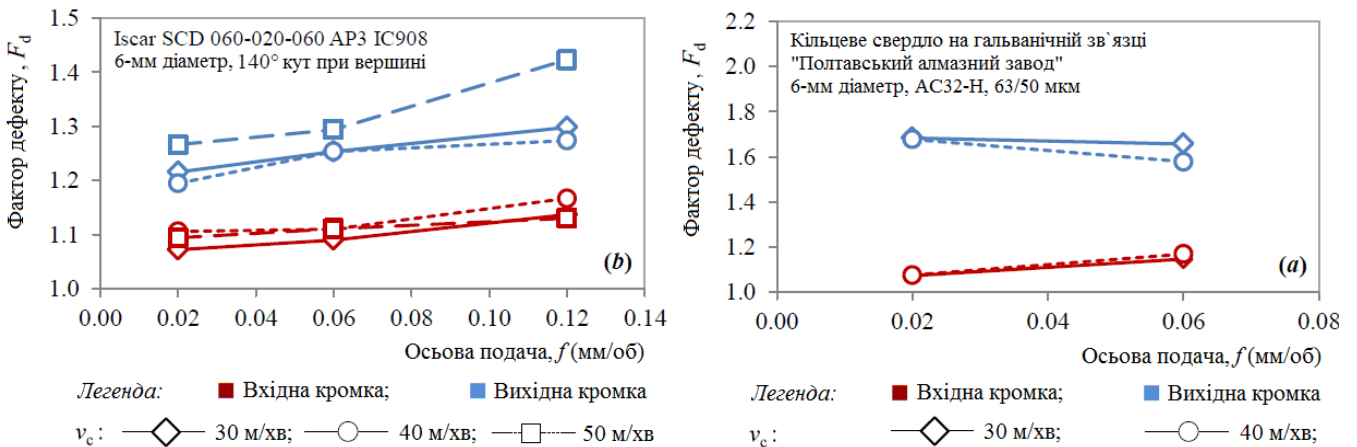
Записи ланцюга динамометр/посилювач/ПК детально розглянуті та піддані спектральному аналізу. Швидкі перетворення Фур'є з'ясували наяву автоколивань. Сили різання та їх зв'язок з режимами різання доповідається розгорнуто та ілюстровано. З'ясовано, що підвищення осьової подачі призводить до збільшення осьової сили та крутного моменту. Підняття швидкості різання має відносно слабкий знижуючий ефект. Проте відмічений значний обернений вплив фракції алмазу (при кільцевому свердлінні) на величину сил різання. Помічено зниження осьової складової сил різання зі збільшенням глибини свердління після повного входу інструменту в оброблюваний матеріал (фіг. 1.а, стадія 2), при чому

сходження тренду осьової сили деактивується зі зниженням швидкості різання та підвищенням осьової подачі. Вказані обставини виникають у зв'язку з втратою міцності оброблююмого матеріалу через його нагрів. Важливим спостереженням, також є те, що зауважений ефект зниження осьової сили виражений значніше при кільцевому свердлінні, що в свою чергу пояснюється через вище енергоспоживання процесу абразивної обробки за рахунок високої міри диспергування стружки у порівнянні з лезовою обробкою.

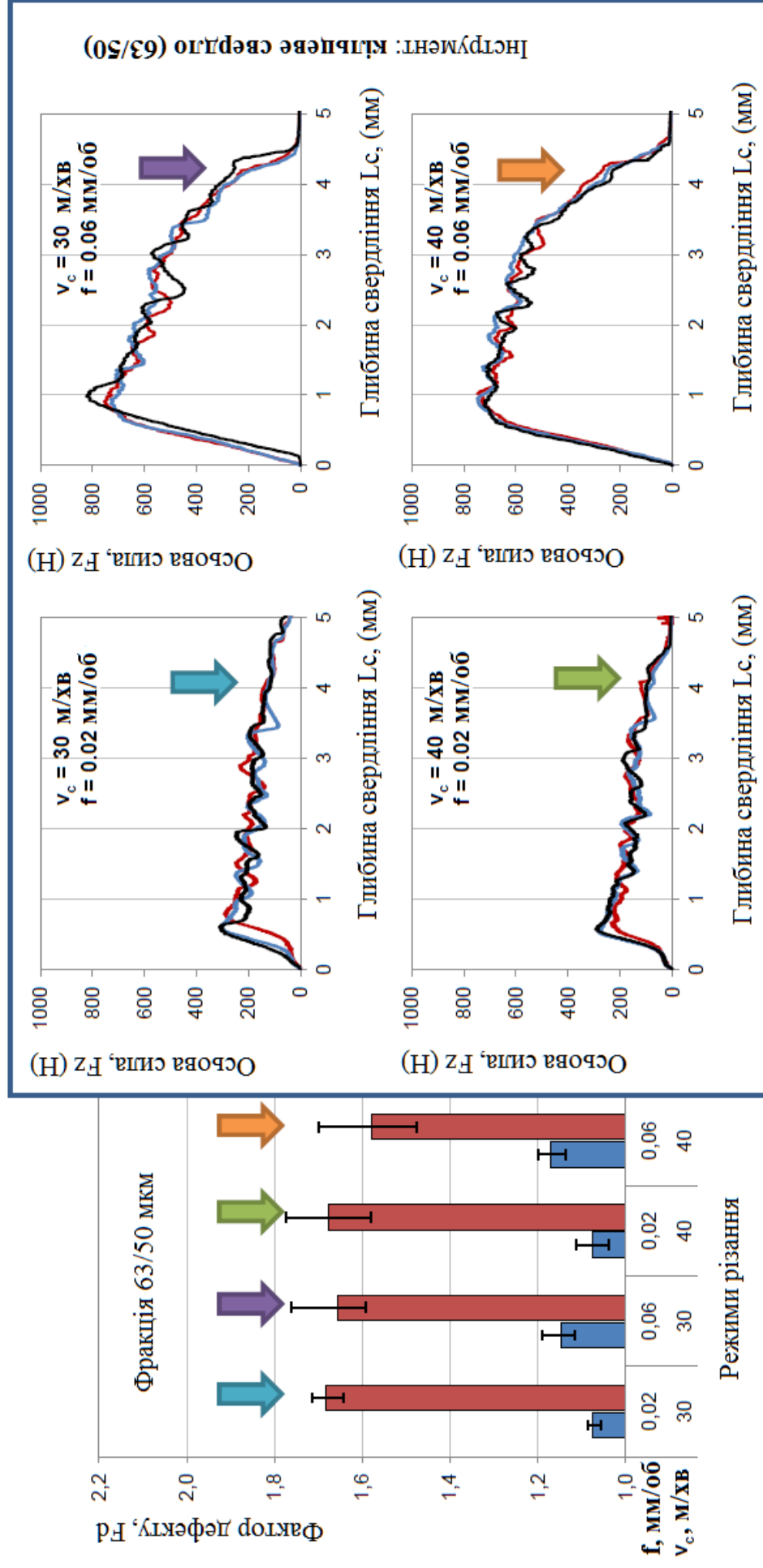


Фігура 1. Характер осьової сили при спіральному (а) та кільцевому (б) свердлінні ($v = 30$ м/хв, $f = 0,02$ мм/об)

Деламінація вхідної кромки практично порівнянна для обох інструментів, однак спіральне свердло забезпечує меншу величину деламінації на вихідній кромці (фіг.2). Дефекти кромки отворів лезової обробки характеризуються чіткою причинністю їх виникнення, зі збільшенням осьової подачі та швидкістю



Фігура 2. Залежність відшарування від режимів різання спіральним (а) та кільцевим свердлом (б)



Фігура 3. Осьова сила в момент виникнення дефекту кромки

різання відшарування зростає з обох боків отвору. При кільцевому свердлінні варіювання швидкості різання в досліджуваному діапазоні не призводить до статистично значущого ефекту. Значна осьова подача збільшує деламінацію на вході, проте практично не вказує впливу на деламінацію вихідної кромки. Аналіз осьових сил в моменти виходу кільцевого свердла на різних осьових подачах не демонструє зв'язку з фактором деламінації вихідної кромки (фіг. 3). Відповідно до збільшення зернистості алмазу, дефекти знижуються з обох боків. Вказане є опосередкованим доказом гіпотези, що до залежності форми кромки від температури в зоні різання, оскільки відомо, що теплонапруженість процесу обробки абразивом зростає з подрібненням зернистості інструменту.

Авторська конструкція кільцевого свердла продемонструвала високий рівень ефективності. У порівнянні з мілкозернистим (63/50 мкм), двошарове свердло (200/160 мкм + 63/50 мкм), маючи однакову висоту мікрорельєфу периферійної ріжучої поверхні, забезпечує зниження осьової сили, крутного моменту та відшарування вихідної кромки на деяких режимах до 33%, 64% та 56%, відповідно.

Блокування керна в порожнині кільцевого свердла являє серйозну проблему. Осьова сила підіймається майже втричі вже на свердлінні п'ятого отвору, що також відобразилося негативно на якості кромок.

Емпіричні моделі силових та якісних параметрів виведені на основі статистичного аналізу (ANOVA) повного факторного експерименту. Для запису залежностей використана форма лінійної регресії виду (1):

$$y = b_0 - b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_ix_i \quad (1)$$

де y – значення контролюємого параметру; x_1, x_2, x_3, x_i – вхідні параметри процесу; b_0, b_1, b_2, b_3, b_i – емпіричні коефіцієнти. Для лезової обробки осьова сила F_{tt} (2), крутний момент M_{tt} (3), фактор дефекту на вході $F_{dt\ entry}$ (4) та виході $F_{dt\ exit}$ (5). Для алмазної обробки осьова сила F_{tc} (6), крутний момент M_{tc} (7), фактор дефекту на вході $F_{dc\ entry}$ (8) та виході $F_{dc\ exit}$ (9).

$$F_{tt} = 108,8581 - 0,411111v + 949,5512f \quad R^2 = 0,9739 \quad (2)$$

$$M_{tt} = 0,115439 - 0,00051v + 1,0495f \quad R^2 = 0,8923 \quad (3)$$

$$F_{dt\ entry} = 1,049591 + 6,11E - 4v + 0,567251f \quad R^2 = 0,3619 \quad (4)$$

$$F_{dt\ exit} = 1,051696 + 38,33E - 4v + 1,046784f \quad R^2 = 0,3854 \quad (5)$$

$$F_{tc} = -38,4376 + 3,406611v + 8906,431f - 0,93582g \quad R^2 = 0,9149 \quad (6)$$

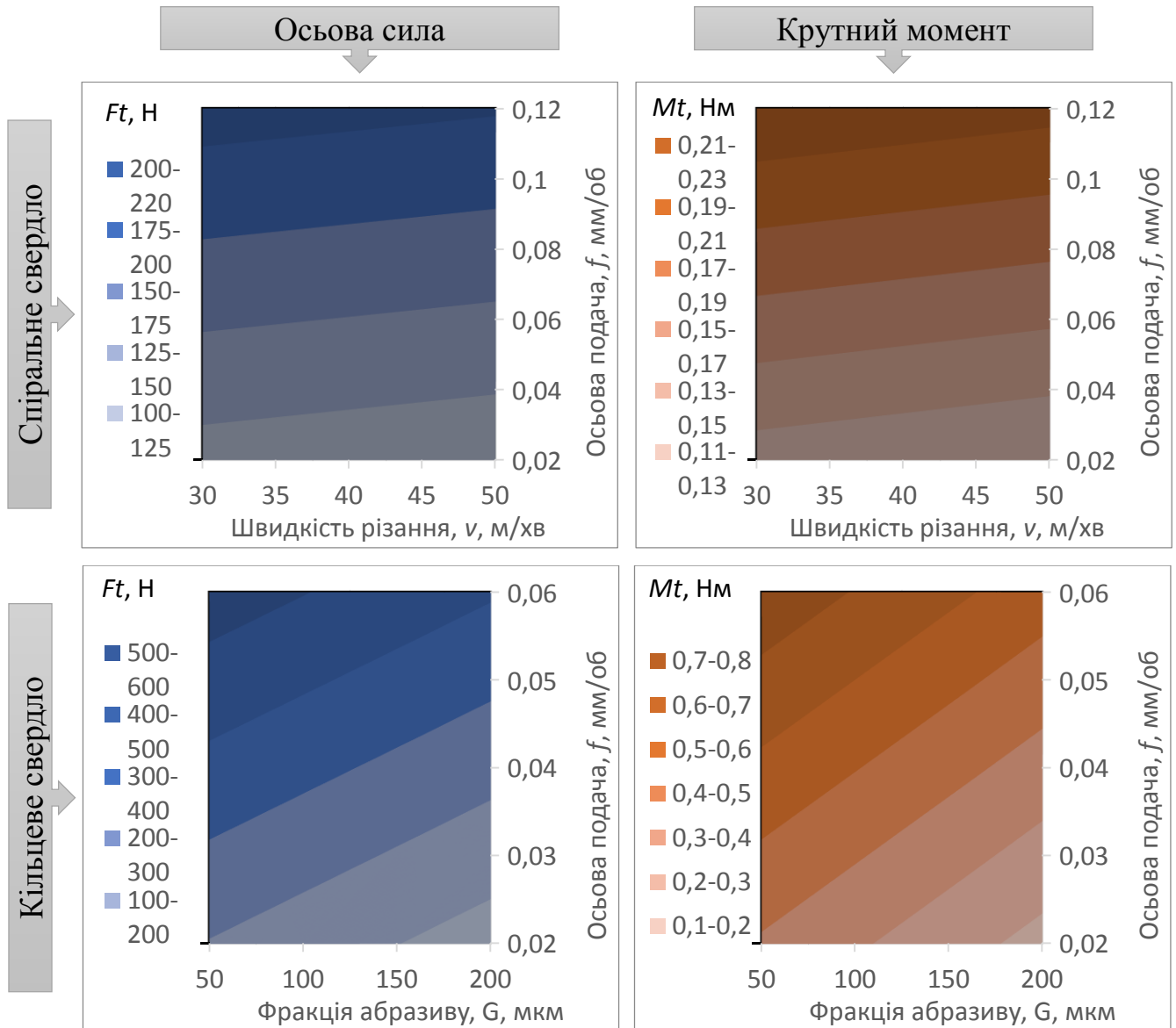
$$M_{tc} = 0,208923 + 0,02038v + 9,542778f - 0,00147g \quad R^2 = 0,9678 \quad (7)$$

$$F_{dc\ entry} = 1,056838 + 1,25f - 1,9E - 4g \quad R^2 = 0,4803 \quad (8)$$

$$F_{dc\ exit} = 1,88137 - 11,8E - 4g \quad R^2 = 0,2617 \quad (9)$$

де v, f, g – швидкість різання, осьова подача та абразивна фракція, відповідно, R^2 – коефіцієнт кореляції.

На основі емпіричних моделей (2, 3, 6 і 7) складені карти осьової сили і крутного моменту в залежності від режимів різання та фракції абразиву, що дозволяють дотримуватися максимально допустимого навантаження при обробці тонкостінних деталей. На фігурі 4 зображені поверхні з кольоровою градацією залежності осьової сили та крутного моменту різання від осьової подачі, швидкості різання та фракції абразиву для спірального та кільцевого свердла. Кожен відтінок поверхонь визначає діапазон наведеного силового показника. Карти відображають математичне очікування параметрів на 95% рівні достовірності. Деталі статистичних відхилень наводяться в додатках в кінці дисертації.



Фігура 4. Залежність сил різання від режимних параметрів процесу свердління.

Розроблено довідникові таблиці по свердлінню вуглепластика, які дозволяють призначати раціональні параметри режиму свердління, що забезпечують вимоги технічних умов креслень по заданій величині допущеного відшарування. Таблиці залежності деламінації кромки отвору від режимів різання для спірального свердління вуглепластика представлено на фігурі 5.

Необроблений периметр вдвічі значніше виражений при обробці кільцевим свердлом ніж спіральним, в середньому 7% і 3%, відповідно. Показник підлягає закону нормального розподілення, проте в значній мірі є величиною випадковою і даному досліді тенденцій, що до параметрів процесу, не виявлено.

Швидкість Різання, v (м/хв)	Осьова подача, f (мм/об)										
	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12
30	0,24	0,25	0,27	0,29	0,31	0,32	0,34	0,36	0,37	0,39	0,41
32	0,24	0,26	0,28	0,29	0,31	0,33	0,34	0,36	0,38	0,39	0,41
34	0,25	0,26	0,28	0,30	0,31	0,33	0,35	0,36	0,38	0,40	0,42
36	0,25	0,27	0,28	0,30	0,32	0,33	0,35	0,37	0,38	0,40	0,42
38	0,25	0,27	0,29	0,30	0,32	0,34	0,35	0,37	0,39	0,41	0,42
40	0,26	0,27	0,29	0,31	0,32	0,34	0,36	0,38	0,39	0,41	0,43
42	0,26	0,28	0,29	0,31	0,33	0,34	0,36	0,38	0,40	0,41	0,43
44	0,26	0,28	0,30	0,31	0,33	0,35	0,37	0,38	0,40	0,42	0,43
46	0,27	0,28	0,30	0,32	0,34	0,35	0,37	0,39	0,40	0,42	0,44
48	0,27	0,29	0,30	0,32	0,34	0,36	0,37	0,39	0,41	0,42	0,44
50	0,27	0,29	0,31	0,33	0,34	0,36	0,38	0,39	0,41	0,43	0,44

Вхідна кромка отвору

Швидкість Різання, v (м/хв)	Осьова подача, f (мм/об)										
	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12
30	0,56	0,59	0,63	0,66	0,69	0,72	0,75	0,78	0,81	0,85	0,88
32	0,59	0,62	0,65	0,68	0,71	0,74	0,77	0,81	0,84	0,87	0,90
34	0,61	0,64	0,67	0,70	0,73	0,77	0,80	0,83	0,86	0,89	0,92
36	0,63	0,66	0,69	0,73	0,76	0,79	0,82	0,85	0,88	0,91	0,95
38	0,65	0,69	0,72	0,75	0,78	0,81	0,84	0,87	0,91	0,94	0,97
40	0,68	0,71	0,74	0,77	0,80	0,83	0,87	0,90	0,93	0,96	0,99
42	0,70	0,73	0,76	0,80	0,83	0,86	0,89	0,92	0,95	0,98	1,01
44	0,72	0,76	0,79	0,82	0,85	0,88	0,91	0,94	0,98	1,01	1,04
46	0,75	0,78	0,81	0,84	0,87	0,90	0,94	0,97	1,00	1,03	1,06
48	0,77	0,80	0,83	0,86	0,90	0,93	0,96	0,99	1,02	1,05	1,08
50	0,79	0,82	0,86	0,89	0,92	0,95	0,98	1,01	1,04	1,08	1,11

Вихідна кромка отвору

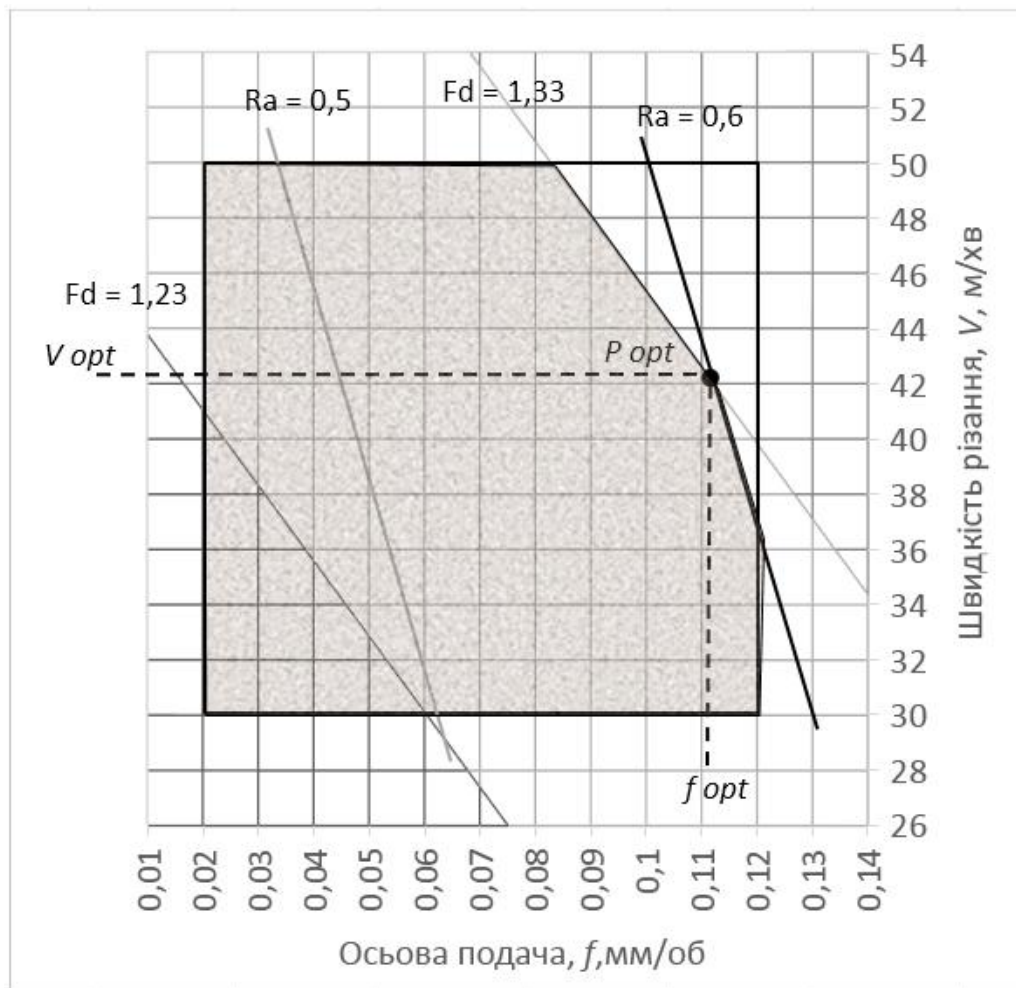
Фігура 5. Таблиці вибору раціональних режимів різання по допустимій величині деламінації (мм від кромки отвору) для спірального свердла ($d = 6$ мм).

Оптимізація процесу свердління для досягнення найменшого машинного часу $T = \frac{L_c}{vf} \rightarrow \min$ при забезпеченні допустимої деламінації та шорсткості поверхні, вирішена методом лінійних комбінацій відповідно до системи рівнянь з двома обмеженнями (для лезової обробки):

$$\begin{cases} Fd = 1,051696 + 0,003833V + 1,04678f \leq 1,33 \\ Ra = 0,188328 + 0,002432V + 1,65f \leq 0,6 \end{cases} \quad (10)$$

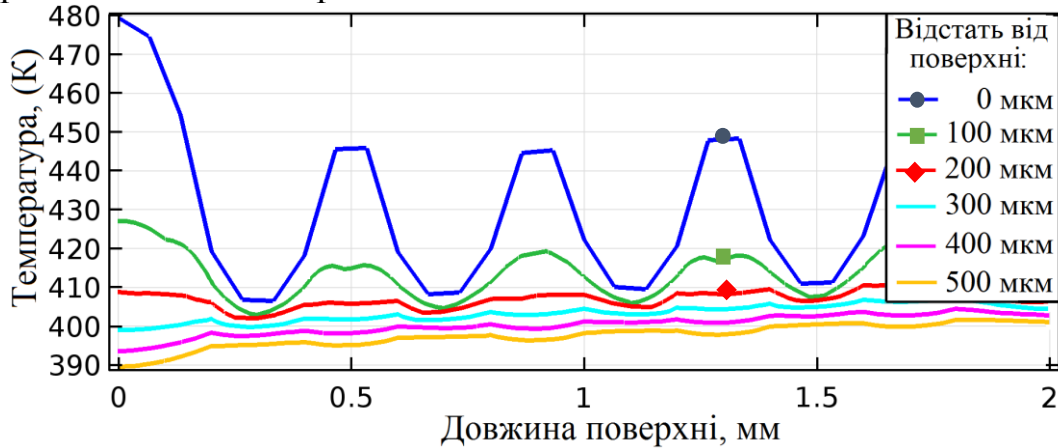
при $Fd \geq 1$; $Ra \geq 0$

де Fd – головне обмеження в виді деламінації на вихідній кромці по емпіричній моделі (5), Ra є адитивним обмеження взятим по емпіричній залежності з іншого експерименту, який виконувався за аналогічних умов. На фігурі 6, точка P_{opt} – вказує на оптимальну осьову подачу f_{opt} та швидкість різання V_{opt} для досягнення фактору деламінації $Fd < 1,33 = 1$ мм від краю отвору, при шорсткості поверхні $Ra = 0,6$ мкм. Обмеження підвищених показників якості $Fd < 1,23 = 0,7$ мм та $Ra = 0,5$ визначають поле параметрів процесу, що задовольняють вказаному діапазону дефектів Fd і шорсткості поверхні Ra .



Фігура 6. Оптимізація режимів операції лезового свердління ($d = 6$ мм) графічним методом січних обмежень, де $Ra = 0,6$ мкм; $Fd = 1,33$ (деламінація не більше 1 мм від краю вихідної кромки).

У четвертому розділі досліджено теплове поле при обробці ПКМ. Аналізована теплова анізотропія ВАП за рахунок різних теплофізичних властивостей їх складових. Оцінена взаємодія між волокном та матрицею в елементарній комірці. Вивчено тепловий обмін між однонаправленими шарами ВАП з ортотропною схемою армування, в результаті чого встановлено ступеневий температурний профіль оброблюваної поверхні (фіг. 7) за рахунок високої теплопровідної здатності волокон та їх почергового пересічного напрямку в різних шарах. Ізотермічний аналіз багатокомпонентного тіла демонструє високу теплову інтеграцію між шарами, що дозволило спростити модель. Похибка переходу від пошарової моделі до ізотропної становить близько 20%.



Фігура 7. Температурний профіль нагріваної поверхні вуглепластика з ортотропним армуванням.

Модель теплового поля при свердлінні кільцевим свердлом базується на експериментальних даних. Такий підхід дозволив уникнути поширених припущень та підвищити точність теплової моделі. Відповідно до емпіричних моделей з нагріванням вуглецевого ВАП до 300°C теплопровідність та теплоємність підвищується на 30% та 120%, відповідно, що й відображається в моделі зворотнім зв'язком вказаних параметрів до температури. Головне диференціальне рівняння в циліндричній системі координат прийняло вид:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda(T)}{\rho C_p(T)} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + u' \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (11)$$

З початковими та граничними умовами:

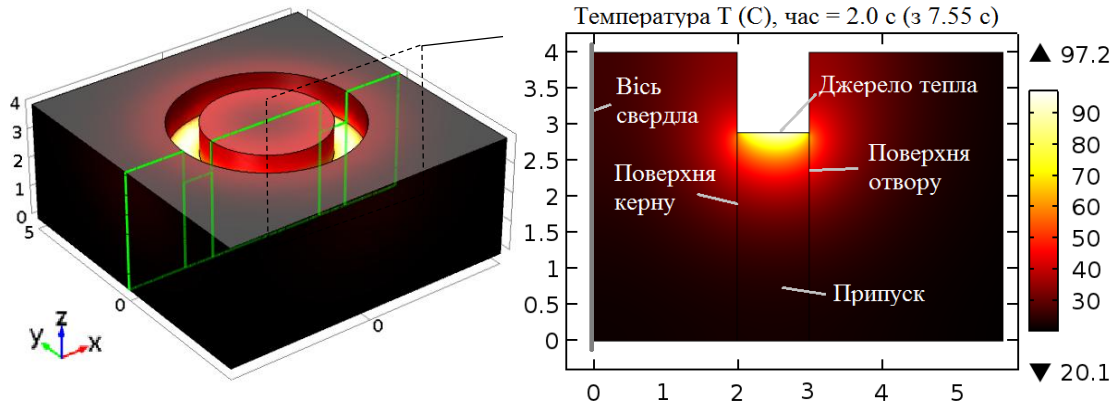
$$T_{\tau=0} = 0; \quad \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{r_1 \leq r \leq r_2} = q(r); \quad \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=-u\tau} = \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=H-u\tau} = 0;$$

Щільність теплового потоку є функцією другого порядку та визначається як:

$$Q = Q_w \frac{M_i(L_c) V_c}{l S} d_f(r), \text{ Вт/м}^2 \quad (12)$$

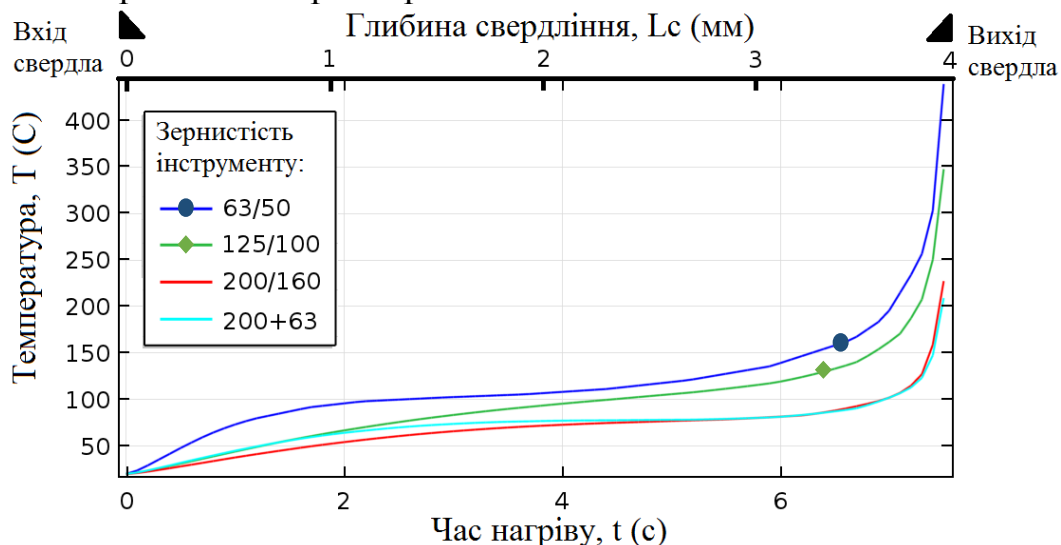
де $M_i(L_c)$ – функція крутного моменту від глибини свердління L_c , Нм; l – відносне плече сили, мм; V_c – швидкість різання, м/с; S – площа контактної зони, м², Q_w – кількість тепла, що надходить до деталі 5%, d_f – функція дистрибуції щільності

теплового потоку по товщині стінки відносно радіусу свердла. Отримання рішення нестационарного процесу нагріву через рівняння (11) аналітичним шляхом неможливе, тому поставлена задача обчислювалася методом кінцевих елементів в програмному комплексі Comsol Multiphysics.

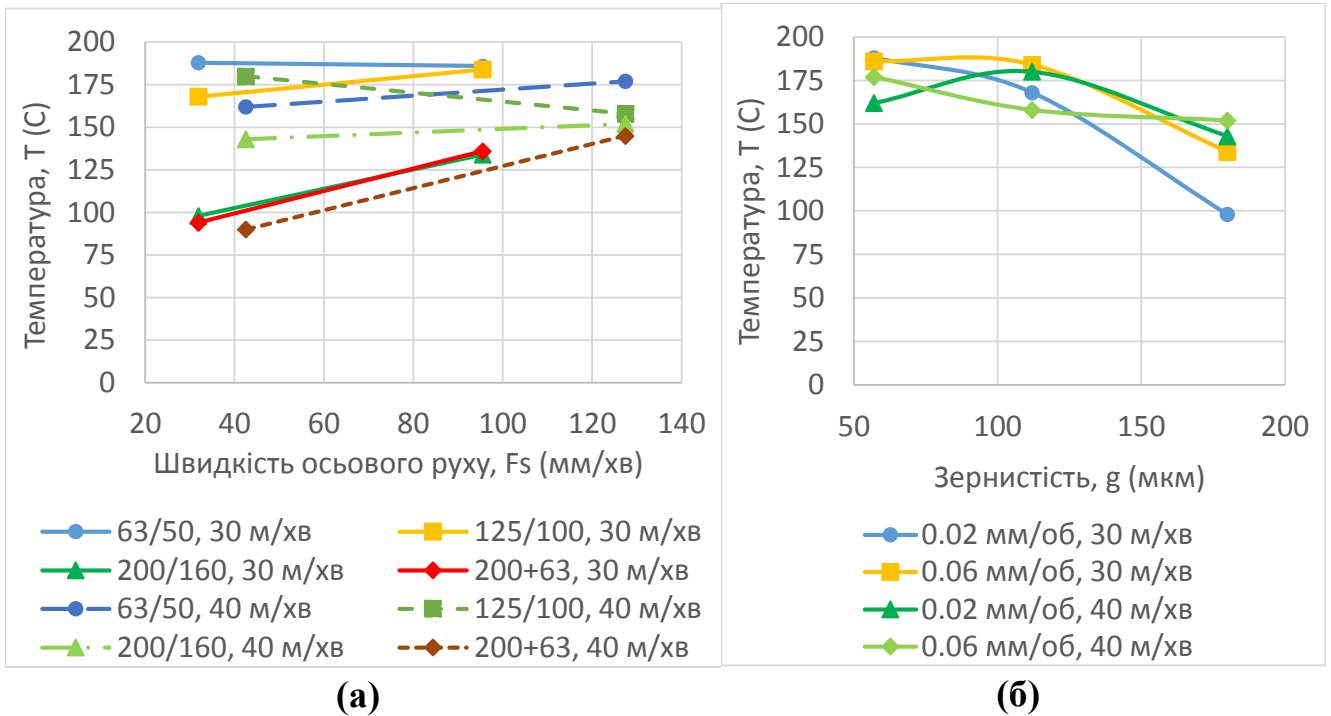


Фігура 8. Фрагменти 3-ти вимірної чисельної моделі нестационарного теплового поля при кільцевому свердлінні

В результаті симуляції з різними вхідними емпіричними даними отримано 3-вимірну нестационарну теплову модель (фіг. 8). Визначено характер зростання температури в припуску, по обробленій поверхні, в радіальному напрямку і т.д. Встановлено, що з наближенням джерела тепла до адіабатної площини, тепло не встигає відводитися та акумулюється в зоні різання. За останні 0,5 мм глибини свердління, температура зростає майже в двічі і може перевищувати 400 °C (фіг. 9). Максимальна температура поверхні отвору досягається на кромці і становить майже 200 °C. Знайдено залежність максимальної температури в зоні різання та на поверхні отвору від режимів різання та зернистості інструменту (фіг. 10). Похибка результатів моделювання з врахуванням помилок емпіричних даних коливається біля 26%. Отримані матеріали резюмовано.

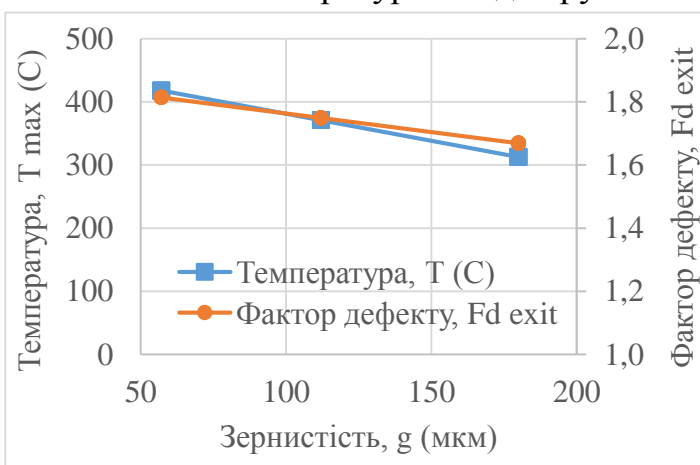


Фігура 9. Температура в зоні різання ($v = 30$ м/хв, $f = 0,02$ мм/об).



Фігура 10. Залежність максимальної температури на оброблюваній поверхні від режимів різання (а) та зернистості інструменту (б)

У п'ятому розділі наведено перевірку висунутої гіпотези та заснованого на неї технологічного рішення, що до підвищення ефективності свердління вуглепластиків. Доведено, що сили різання, зокрема осьова сила по мірі заглиблення інструменту в деталь, знижується за рахунок втрати міцності матеріалу через високий рівень теплонапруженості процесу обробки, що впливає з характеру зниження осьової сили та підвищення температури в зоні різання відносно глибини свердління. Оскільки максимальна температура досягається у поверхневому (останньому) шарі вуглепластика, волокна шару, відносно до втрати міцності на згинання, деформуються і вигинаючись назовні відшаровуються від основної маси, що створює дефект. Зіставлено математичне очікування максимальної температури і відшарування від зернистості інструменту (фіг. 11).



Фігура 11. Зіставлення трендів температури і величини дефектів.

Аналізовано відповідність зниження деламінації до зниження температури на експериментованих режимах різання та встановлено, що зі зниженням температури на 26%, деламінація вихідної кромки зменшуються на 18%.

На основі дослідженої високої ефективності застосування авторської конструкції кільцевого свердла (фіг. 12), технологічний спосіб різнозернистості отримав поширення. Створено ряд

різномірних свердл різного призначення, які забезпечують зниження сил різання, температури та дефектів кромки отвору з одночасним збереженням якості поверхні, точності діаметра отвору і стійкості інструмента. Нові конструкції свердел також є ефективним вирішенням питання свердління тонкостінних деталей, глибокого свердління, обробкою матеріалів з низькою теплостійкістю і високими пружними характеристиками. Крім того конструктивно усунуто проблему блокування керну, що відкриває промисловий шлях кільцевому типу свердла.



Фігура 12. Ефективність двошарового алмазного кільцевого свердла з зернистістю 200/160 + 63/50 в порівнянні зі звичайним кільцевим свердлом з зернистістю 63/50.

Наведено комплексне порівняння технологічних характеристик обробки отворів в вуглепластиках спіральним і кільцевим свердлом. Обидва інструменти демонструють однаково низький показник деламінації входу $Fd_{entry} < 1,2$. Осьове зусилля різання при $f = 0,02$ мм/об, теж однакове і не перевищує $F_t \leq 150$ Н, проте при $f = 0,06$ мм/об осьова сила при спіральному свердлінні нижче кільцевого втричі ($F_{tt} = 200$ Н vs $F_{tc} = 600$ Н). У порівнянні з звичайним кільцевим свердлом, спіральне свердло також забезпечує вдвічі нижчий фактор деламінації виходу ($Fd_{exit} = 1,3$ vs 1,6) та необроблений периметр кромки отвору ($Ur = 3\%$ vs 7%).

Розроблений різномірний інструмент забезпечує допустиму деламінацію $Fd_{exit} = 1,33$ (1 мм) при $n = 2123$ об/хв і осьовій подачі $f = 0,06$ мм/об, що є продуктивнішим, наприклад, у порівнянні з поточною технологією формоутворення отворів в ЗПП на Пермському заводі «Машиностроитель» на 27%.

Класифікація дефектів якості отвору по їх фізичній природі (фіг. 13) створена з ціллю нівеляції термінологічної невизначеності серед дослідників. Запропоновано додатковий метод оцінки стану кромки отвору. *Необроблений периметр кромки* для оцінки рівня невідкритості отвору, це відношення довжини дуги несформованої кромки до периметру отвору $U_r = \frac{l_{edge}}{P_{hole}}$.



Фігура 13. Класифікація дефектів при обробці отворів в ПКМ.

ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення і нове вирішення наукової задачі підвищення точності форми кромки отворів в вуглепластиках. Головні наукові і практичні результати роботи, на основі яких дисертант претендує на присудження наукового ступеня є:

1. Лаконічно презентовано контент найцитованіших закордонних досліджень стосовно обробки отворів в ПКМ за останні 15 років, що являє практичну цінність для майбутніх дослідників шляхом швидкого орієнтування серед найвідоміших закордонних профільних наукових праць XXI століття.

2. Наведено класифікацію дефектів отворів в ПКМ, терміни якої рекомендуються до застосування в описі дослідження чи цитуванні результатів. Запропоновано критерій оцінки якості кромки отвору в *«необроблений периметр»*.

3. Запропоновано новий технологічний спосіб підвищення точності та ефективності обробки отворів в вуглепластиках через застосування *«різнозенистої»* обробки. Спосіб передбачає виконання чорнової та чистової обробки, одночасно, без втрати продуктивності чи якості. На основі висунутої гіпотези, яка утворює новий напрям контролю якісного стану кромки отворів в ПКМ, зниження деламінації досягається через зниження температури різання в крайньому шарі оброблююмого матеріалу, що не призводить до втрати його міцнісних характеристик та збереженню умов різання.

4. Розроблено ряд інструментів для реалізації різнозернистої обробки отворів, яка полягає в сумісництві операцій свердління та зенкерування через послідовно-паралельне видалення операційних припусків на обробку шарами окремих, різних за величиною, фракцій абразиву. Досліди встановили значну ефективність запропонованого оснащення, у зв'язку з чим засіб її реалізації отримав поширення у виді ряду модернізованих конструкцій алмазних свердл. Технічна новизна дискутуємого захищена 8 деклараційними патентами України.

5. Розроблено методику та виконано комплексне експериментальне дослідження, ряд пошукових та перевірочних, в результаті чого усунене протиріччя переваги між спіральним та звичайним кільцевим свердлом, стосовно обробки вуглепластика. Встановлено, що без врахування зносу, геометрія спірального свердла забезпечує меншу величину деламінації вихідної кромки, необроблений периметр кромки, сили різання і температури.

6. Побудовано модель нестационарного теплового поля при кільцевому свердлінні. Гідність моделі забезпечується за рахунок емпіричного базування вхідних даних. Геометрія, початкові та граничні умови відображають реальні положення моделюємого процесу. До переваг необхідно віднести уникнення, класичного в технологіях машинобудування, припущення відсутності зворотного зв'язку теплофізичних властивостей матеріалу з температурою через непридатність аналітичних методів. Припущення усувається за рахунок використання чисельного методу скінчених елементів, в результаті чого, запропонована модель має високий рівень адекватності. Визначено, що сили різання та точність форми вихідної кромки отвору корелюють зі зміною температури в припуску на обробку.

7. Вироблено рекомендації з свердління вуглепластиків, які дозволяють призначати раціональні параметри режиму свердління, що забезпечують необхідну точність оброблених кромки отворів та допустимі силові навантаження на деталь під час обробки. Ці параметри режимів свердління є нормативними провідними матеріалами для технологів при розробці операцій свердління вуглепластиків. Виведено 8 емпіричних функціональних залежностей: для визначення осьової сили, крутного моменту, деламінації виходу і входу для обох типів інструменту. Виконана оптимізація режимних параметрів процесу по заданій величині відшарування.



8. Результати досліджень впроваджено в процес виготовлення деталей з ПКМ, скла та кераміка на ЧАТ «Фірма Еліпс» (с. Салгани), ТОВ «Фірма Мустанг» (смт. Сергіївка), ТОВ «Антохій», ТОВ «Медико-інструментальний завод», КП «Ремонтно-будівельна дільниця» (м. Білгород-Дністровський).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Мелентьев Р. Ю. Определение площади срезаемых структурных фаз при алмазном сверлении полимерных композиционных материалов / Р. Ю. Мелентьев // Пр. Одес. політехн. ун-ту. — Одесса, 2013. — Вип. 3(42). — С. 55 – 59.
2. Мелентьев Р. Ю. Компьютерное моделирование теплового поля в элементарном объеме полимерных композиционных материалов / Р. Ю. Мелентьев // Проблемы машиностроения. — 2014. — Т. 17, № 2. — С. 3 –8.
3. Мелентьев, Р. Ю. Определение теплопроводности полимерных композиционных материалов / Р. Ю. Мелентьев // Науч. вестн. Донецк. гос. металлург. акад. — Донецк, 2013. — № 2 (12Е). — С. 123 – 130.
4. Мелентьев Р. Ю. Особенности механической обработки полимерных композиционных материалов / Р. Ю. Мелентьев, В. В. Натальчишин // Зб. наук. пр. нац. ун-ту кораблебуд. — Миколаїв, 2013. — № 4 (449). — С. 30 – 34.
5. Мелентьев Р. Ю. Особенности сверления углепластика / Р. Ю. Мелентьев, В.В. Натальчишин // Пр. Одес. політехн. ун-ту. — Одесса, 2014. — Вип. 2(44). — С. 27 – 33.
6. Melentiev R. Y. The new designs of diamond drill bits for composite polymers tooling / R. Y. Melentiev // Odes'kyi Politechnichnyi Universytet Pratsi. — Odessa, 2014. — Iss. 3 (47). — P. 24 – 34.
7. Melentiev R. Y., Numerical simulation of thermal field in fiber composite materials / R. Y. Melentiev // Odes'kyi Politechnichnyi Universytet Pratsi. — Odessa, 2016. — Iss. 1 (48). — P. 9 – 17.
8. Melentiev R. Y. Effects of tool geometry on delamination and part quality in CFRP drilling : A review : 3rd CIRP Conference on Surface Integrity, 8 – 10 June 2016 y., North Carolina, USA, 2016. / R. Y. Melentiev, P. C. Priarone, M. Robiglio, L. Settineri. — Procedia CIRP 45, 2016. — P. 31 – 34.
9. Пат. 86318 Україна, МПК В 28 D 1/12. Абразивне кільцеве свердло / Н. В. Ліщенко, Р. Ю. Мелентьев, В. П. Ларшин (Україна). — № u201308214 ; заявл. 01.07.2013 ; надр. 25.12.2013, Бюл. № 24.
10. Пат. 88720 Україна, МПК В 28 D 1/12. Абразивне конічне свердло / В. П. Ларшин, Н. В. Ліщенко, Р. Ю. Мелентьев (Україна). — № u201313139 ; заявл. 11.11.2013 ; надр. 25.03.2014, Бюл. № 6.
11. Пат. 92358 Україна, МПК В 28 D 1/12, В 24 D 5/00. Абразивне Архімедове свердло / Р. Ю. Мелентьев (Україна). — № u201402925 ; заявл. 24.03.2014 ; надр. 11.08.2014, Бюл. № 15.
12. Пат. 92382 Україна, МПК В 28 D 1/12, В 24 D 5/00. Абразивне кільцеве свердло / Р. Ю. Мелентьев (Україна). — № u201403069 ; заявл. 26.03.2014 ; надр. 11.08.2014, Бюл. № 15.

13. Пат. 92485 Україна, МПК В 28 D 5/00, В 28 D 1/12. Абразивне клиновидне свердло / Р. Ю. Мелентьев (Україна). — № u201314191 ; заявл. 05.12.2013 ; надр. 26.08.2014, Бюл. № 16.
14. Пат. 106285 Україна, МПК В 24 D 5/14, В 28 D 1/12. Абразивне перфороване свердло з віконцем / Р. Ю. Мелентьев (Україна). — № u201509355 ; заявл. 28.09.2015; надр. 25.04.2016, Бюл. № 8.
15. Пат. 107074 Україна, МПК В 28 D 1/14. Абразивне грановане свердло / Р. Ю. Мелентьев (Україна). — № u201509758 ; заявл. 08.10.2015 ; надр. 25.04.2016, Бюл. № 10.
16. Пат. 109093 Україна, МПК В 28 D 1/14. Абразивне самозагострювальне кільцеве свердло / Р. Ю. Мелентьев (Україна). — № u201601610 ; заявл. 22.02.2016 ; надр. 10.08.2016, Бюл. № 15.
17. Мелентьев Р. Ю. Многослойное кольцевое сверло : тез. докл. XX Междунар. науч.-практ. конф. «Роль науки в развитии социума: теоретические и практические аспекты», г. Екатеринбург, 13 – 15 мая 2016 г. / Р. Ю. Мелентьев. – Екатеринбург, 2016. – С. 8 – 10.
18. Мелентьев Р. Ю. Тепловое поле при сверлении полимерных композитов кольцевым сверлом : тез. докл. всеукр. науч.-практ. конф. "Проблеми розвитку регіону: промисловий та економічний аспекти", м. Первомайськ, 1 – 2 черв. 2016 р. / Р. Ю. Мелентьев. – Миколаїв, 2016. – С. 154 – 156.
19. Мелентьев Р. Ю. Температурное поле заготовки в процессе кольцевого сверления полимерных композитов : тез. докл. междунар. науч.-практ. конф. "Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении", г. Одесса, 21 – 23 сент. 2016 г. / Р. Ю. Мелентьев. – Одесса, 2016. – С. 22 – 24.
20. Мелентьев Р. Ю. Мультизернистый абразивный инструмент для сверления : тез. докл. 5-ой междунар. науч.-практ. конф. «Современные высокоэффективные технологии и оборудование в машиностроении» г. Санкт-Петербург, 5 – 6 окт. 2016 г. / Р. Ю. Мелентьев. – СПб., 2016. – С. 32 – 37.
21. Мелентьев Р. Ю. Самооформляемый профиль кольцевого сверла : тез. докл. 5-ой междунар. науч.-практ. конф. «Современные высокоэффективные технологии и оборудование в машиностроении» г. Санкт-Петербург, 5 – 6 окт. 2016 г. / Р. Ю. Мелентьев. – СПб., 2016. – С. 38 – 44.
22. Мелентьев Р. Ю. Влияние температуры на отслоение кромки при сверлении углепластика : тез. доп. IV міжнар. наук.-техн. конф. «Актуальні проблеми інженерної механіки та технології машинобудування» м. Миколаїв, 26 – 28 жовт. 2016 р. / Р. Ю. Мелентьев. – Миколаїв, 2016. – С. 35 – 38.

Анотація

Мелентьев Р.Ю. Підвищення точності форми отворів в деталях з вуглепластиків. -Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.08 технологія машинобудування – Одеський національний політехнічний університет, Одеса, 2016.

Робота присвячена зниженню деламінації кромки і підвищенню ефективності обробки отворів в деталях з вуглепластиків спіральним та кільцевим свердлом.

Висунуто гіпотезу про залежність якості вихідної кромки отвору від її температури. Запропоновано нове технологічне рішення для зменшення дефектів кромки і підвищення ефективності обробки отворів в ПКМ, з метою реалізації якого, розроблений ряд нових конструкцій алмазних свердел.

Проведено комплекс експериментальних досліджень з метою достовірної оцінки технологічних характеристик кожного виду обробки стосовно вуглепластика. Доведено ефективність запропонованого технологічного рішення. Виведено регресійні залежності для визначення сил різання і якісних показників отвору, на підставі яких, виконана оптимізація режимів різання для досягнення якості отворів, які відповідають вимоги готової продукції. Вироблені практичні рекомендації щодо вибору раціональних режимів різання і ріжучого інструменту для свердління отворів в вуглепластика.

Створена чисельна модель теплового поля при кільцевому свердлінні вуглепластика з емпіричним базуванням. Вивчено вплив режимів різання і зернистості абразиву на теплонапруженість процесу. Зіставлення температурних і якісних тенденцій підтвердило висунуту гіпотезу.

Ключові слова: технологічний процес, свердління, вуглепластик, кільцеве свердло, експериментальне дослідження, чисельна модель, теплове поле.

Аннотация

Мелентьев Р.Ю.–Рукопись. Повышение точности формы отверстий в деталях из углепластиков.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения. – Одесский национальный политехнический университет, Одесса, 2016.

Работа посвящена снижению величины дефектов кромки и повышению эффективности обработки отверстий малого диаметра (6 мм) в деталях из углепластиков спиральным и кольцевым сверлом.

Проанализированы известные исследования по обработке отверстий в полимерных композиционных материалах. Выявлены характерные особенности обработки данного класса материалов. Изучены предложенные методы и приемы повышения эффективности обработки отверстий резанием, установлены рекомендуемые геометрии инструментов и режимные параметры процесса.

Выдвинута гипотеза о зависимости качества выходной кромки отверстия от температуры обработки поверхностного (нижнего) слоя композитного пакета.

Предложено новое технологическое решение для уменьшения дефектов кромки и повышения эффективности обработки отверстий в полимерных композитах, с целью реализации которого, разработан ряд новых конструкций алмазных сверл.

Выполнен комплекс экспериментальных исследований лезвийного и алмазного сверления углепластика с целью достоверной оценки технологических преимуществ и недостатков каждого вида обработки применительно к углепластику. Также исследовалось кольцевое сверло авторской конструкции, в котором реализовано новое технологическое решение. Погрешность измерений, согласно документации измерительной аппаратуры, не превышает 2,3%. Установлен характер образования сил резания, проанализировано их влияние на контролируемые параметры. Обнаружено снижение осевой силы с увеличением глубины сверления, зависимость величины которого, тесно связана с режимами резания и зернистостью инструмента. Это находит объяснение через потерю прочностных свойств обрабатываемого материала по причине нагрева, что косвенно верифицирует выдвинутую гипотезу. Доказана и продемонстрирована эффективность предложенного технологического решения. Экспериментальные данные подвергнуты статистическому анализу. Выведены регрессионные зависимости для определения сил резания и качественных показателей отверстия, на основании которых, выполнена оптимизация режимов резания для достижения качества отверстий, удовлетворяющих требования готовой продукции. Выработаны практические рекомендации по выбору рациональных режимов резания и режущего инструмента для сверления отверстий в углепластика.

Исследовано тепловую сторону процесса алмазного сверления углепластика. Создана численная трехмерная модель нестационарного процесса нагрева обрабатываемого материала на операции кольцевого сверления углепластика. Достоинство модели обеспечивается за счет базирования на эмпирических входных данных, а также исключения допущения об отсутствии обратной связи теплофизических свойств материала с температурой, в результате чего, предлагаемая модель имеет высокий уровень адекватности. Усредненная погрешность моделирования с учетом ошибки эмпирических данных составила 26%. Полученное тепловое поле позволило выявить характер становления температуры в зоне резания и на обрабатываемой поверхности. Установлены максимальные температуры и их локации. Изучено влияние режимов резания и зернистости абразива на теплонапряженность процесса сверления.

На основании сопоставления температурных и качественных тенденций отмечена высокая степень корреляции этих показателей. Максимальная температура достигается в последнем срезаемом слое и ее значение достаточно для потери более половины прочности материала на изгиб, что приводит к его разрушению и нарушению геометрии кромки отверстия. Указанное является прямым подтверждением выдвинутой гипотезы.

Ключевые слова: технологический процесс, сверление, углепластик, кольцевое сверло, экспериментальное исследование, численная модель, тепловое поле.

Annotation

Melentiev R.Y. The improving of hole accuracy in carbon fiber reinforces polymers. -Manuscript.

Dissertation for the Candidate of science (PhD) degree, specialty 05.02.08 – Technology of machinebuilding - Odessa National Polytechnic University, Odessa, 2016.

The work is dedicated to reducing of drilling induced delamination and improving process efficiency of small diameter holes treatment in CFRP using twist and core drills.

A hypothesis of delamination dependence on temperature processing of the last layer was supposed in this study. Based on the hypothesis, it was proposed new technological solutions to reduce edge defects and improving the efficiency of holes in polymer composites, which realized by the development of new designs of diamond drill bits.

The complex of experimental studies were performed in order to assess reliable technological advantages and disadvantages of each drilling type concerning CFRP. The efficiency of the proposed technological solution was approved. After statistical calculation, empirical regression for cutting forces and qualitative indicators were obtained as also the optimal cutting parameters for required hole edge quality. It were presented practical recommendations for rational choice of the process parameters and cutting tool for drilling holes in carbon fiber.

Developed numerical model of thermal field during core drilling of carbon fiber with full empirical base. It was established the influence of the cutting and abrasive grit to thermal intensity of the process. Supposed hypothesis is confirmed by the comparison of temperature and quality trends.

Key words: Cutting process, drilling, CFRP, core drill, experimental investigation, numerical model, thermal field.