

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
“ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**

Хавін Геннадій Львович

УДК 621.91

**МОДЕЛЮВАННЯ, ОПТИМІЗАЦІЯ Й ПРОЕКТУВАННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ
ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ**

Спеціальність 05.02.08 – технологія машинобудування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків–2016

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі технології машинобудування та металорізальних верстатів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, м. Харків

Науковий консультант доктор технічних наук, професор
Тимофієв Юрій Вікторович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут», м. Харків,
завідувач кафедри технології машинобудування
та металорізальних верстатів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Долматов Анатолій Іванович,
Національний аерокосмічний університет
ім. М.Е. Жуковського «ХАІ», м. Харків,
завідувач кафедри технології авіадвигунобудування

доктор технічних наук, професор
Петраков Юрій Володимирович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ,
завідувач кафедри технології машинобудування

доктор технічних наук, професор
Тарельник В'ячеслав Борисович,
Сумський національний аграрний університет, м. Суми,
завідувач кафедри технічного сервісу

Захист відбудеться «30» червня 2016 р. об 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.12 в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий «27» травня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Зубкова Н. В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Полімерні композиційні матеріали (ПКМ), як і інші композиційні матеріали (КМ), мають набір специфічних властивостей і особливостей, що якісним чином відрізняють їх від металів і сплавів. Отже, механічна обробка композитів також має корінні відмінності від обробки традиційних металевих заготовок. Найбільшого поширення в різних галузях промисловості отримали ПКМ, у яких елементами армування виступають скляні, вуглецеві, борні або органічні волокна. Матеріали такого класу забезпечують міцність і довговічність конструкцій при зниженні ваги. В даний час найбільш динамічне розвивається застосування волокнистих полімерних композитів (ВПК), що, в свою чергу, вимагає покращення методів їх обробки, поліпшення якості поверхні і точності виробів.

Механіка обробки ПКМ, перш за все, повинна базуватися на підході до різання як до процесу спрямованого руйнування крихких неоднорідних матеріалів. Це є ключем до появи нових технологічних рішень при розробці операції механічної обробки, що забезпечують високу продуктивність і якість процесу. Головними напрямками досліджень в області обробки ПКМ, безумовно, є: вибір марки інструменту і його кутів заточування; визначення оптимальних технологічних параметрів різання; реалізація системи управління якістю в процесі виробництва.

Отже, узагальнення механічної обробки виробів з полімерних композиційних матеріалів на основі механіки руйнування, раціональне призначення інструментального забезпечення, а також оптимізація розрахунку технологічних режимів обробки для досягнення високої якості у вигляді мінімального розширення і відсутності розкошачень, продуктивності різання при максимальній стійкості інструменту, є актуальною науково-практичною проблемою, розв'язування якої визначило напрямок дисертаційних досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі технології машинобудування та металорізальних верстатів НТУ «ХПІ» за планами науково-дослідних робіт відповідно до завдань держбюджетних тем МОН України: «Розвиток теорії механічної обробки композиційних матеріалів на підставі досягнень механіки руйнування» (ДР № 0103U001498); «Розробка узагальненої теорії механічної обробки композиційних матеріалів та зношування інструменту» (ДР № 0106U001475); «Розвиток теорії та розробка узагальненої моделі механічної обробки композиційних матеріалів, призначення інструменту та режимів різання» (ДР №: 0109U002384); «Розробка теоретичних основ і методів рішення задач забезпечення міцності та надійності високонавантажених елементів машинобудівних конструкцій» (ДР № 0112U000403); «Розробка математичних моделей і методів рішення нелінійних задач динаміки та міцності елементів конструкцій при дії квазістатичних, динамічних та ударних навантажень» (ДР № 0115U000509), в яких здобувач був відповідальним виконавцем тем.

Мета і задачі дослідження. *Мета дослідження* – моделювання формоутворення виробів з ПКМ на основі управління процесом направлено руйну-

вання припуску, що дозволяє для обраного інструменту реалізувати вибір оптимальних технологічних параметрів; за рахунок створеної теорії, математичних моделей та математичного забезпечення удосконалити технологію механічної обробки, прогнозувати якість і продуктивність обробки виробів з ПКМ. Для досягнення зазначеної мети вирішуються наступні задачі:

- для підвищення якості та продуктивності операцій точіння та свердління проаналізувати і встановити основні резерви удосконалення технології механічної обробки ПКМ в умовах різних типів виробництв;

- науково обґрунтувати вибір інструменту і розрахунок технологічних параметрів і їх вплив на якість обробки і експлуатаційні характеристики виробів;

- на основі положень теорії руйнування в контакті розробити фізико-математичну модель механічного перерізу неоднорідних і шаруватих структур;

- теоретично зв'язати вплив технологічних параметрів обробки виробів з ПКМ на появу дефектів поверхні і, поперед усього, розшарування, розкошлячення і висмикування елементів армування;

- розробити основи прогнозування зношування різних типів інструментів при свердлінні і точінні, та математичну модель опису температурного поля в контакті інструмент-заготовка з ПКМ і прогнозування впливу температури в контакті на якість обробки;

- обґрунтувати вплив структури матеріалу – елементів армування та сполучного, об'ємного вмісту наповнювача, характеру переплетіння на якість обробки за заданих технологічних параметрах різання;

- визначити процедуру призначення технологічних параметрів на появу розшарування на виході інструменту та інших дефектів обробки і розробити загальну методологію призначення режимів різання і інструменту в залежності від типу ПКМ і вимог до якості виробів;

- сформулювати задачу оптимізації режимів механічної обробки ПКМ, враховуючи специфіку структури і характер дефектів;

- розробити методику автоматичного вибору інструменту, призначення технологічних параметрів та оцінки якості обробки ПКМ;

- здійснити впровадження в виробництво результатів дослідження по забезпеченню підвищення якості механічної обробки ПКМ.

Об'єктом дослідження є технологічні процеси точіння і свердління деталей з полімерних композиційних матеріалів із забезпеченням необхідної якості в умовах різних типів виробництв.

Предмет дослідження – формоутворення поверхонь полімерних композитів за заданими вимогами до якості і продуктивності на основі удосконалення технології механічної обробки.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження базуються на узагальнених положеннях технології машинобудування, теорії різання, теорії руйнування та контактного руйнування, математичному аналізі і моделюванні, методах чисельного аналізу. Побудова математичних моделей різання для встановлення взаємозв'язку характеристик формоутворення від технологічних параметрів обробки використовує методи теорії руйнування. Визначення напруженого стану

в контактi та розподiлу температурного поля в контактi базується на методi граничних елементiв. Визначення шорсткостi поверхнi обробленої поверхнi використовує метод контактної профiлометрії. Для пошуку оптимального рiшення застосовано сучаснi методи оптимізації – метод «рою частинок» та сiрий реляційний аналіз.

Наукова новизна отриманих результатiв полягає у тому, що 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;

– 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;

– вперше з позицій механіки руйнування обґрунтований синтез технологічних параметрів процесу обробки з фізико-механічними параметрами матеріалу та отриманий подальший розвиток теорії рiзання крихких композиційних матеріалів як явище локального контактного руйнування при взаємодії вершини інструменту з матеріалом;

– знайшов доробок метод призначення технологічних параметрів обробки отворів з прогнозуванням фактору розшарування і розкошлячення всередині отвору та удосконалено математичний опис взаємозв'язків якісних і кількісних показників поверхневого шару обробленого отвору і підтверджено загальні принципи управління технологічними параметрами свердління;

– запропоновано нові співвідношення, що пов'язують довжину площини контакту по обробленій поверхні, пружне віджимання і шорсткість поверхні з фізичними параметрами матеріалу і технологічними параметрами процесу;

– одержала подальший розвиток математична модель процесу зносу свердел при обробці отворів для прогнозування зношування інструменту і схема вибору технологічних параметрів обробки з урахуванням впливу цього фактору;

– отримало подальший розвиток чисельне моделювання закономірностей розподілу напружень в контактi вершини інструменту з композиційним матеріалом та оцінка інтенсивності розподілу температурного поля в осередку деформації і отримано залежності значення температури в контактi від швидкості рiзання;

– отримали подальший розвиток закономірності, що описують вплив складу ПКМ, напрямку обробки і геометричних параметрів інструментів на якість одержаних отворів.

Практичне значення отриманих результатiв для машинобудівної галузі полягає в побудові оптимальних технологічних процесів механічної обробки полімерних композиційних матеріалів із забезпеченням мінімального розшарування і розкошлячення поверхні обробки. Запропоновано методикку розрахунку технологічних параметрів точіння і свердління в залежності від типу ін-

струменту, марки матеріалу заготовки і вимог до якості поверхневого шару ПКМ.

На базі створеної теорії, представлених математичних моделей і методів оптимального проектування розроблено математичне забезпечення для раціонального вибору типу інструменту, визначення оптимальних технологічних параметрів і гарантованого прогнозування якості отриманої обробки для операцій точіння та свердлення. Розроблено експертні рекомендації щодо інструментального забезпечення і визначення оптимальних технологічних параметрів якісної і продуктивної обробки свердлінням та розточуванням пластин з композиційних матеріалів теплообмінників. Результати роботи впроваджені на ПАО «ФЕД» (м. Харків) для багатоваріантних розрахунків якісної обробки полімерних електроізоляційних матеріалів та на АО «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».

Особистий внесок здобувача. Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримано здобувачем особисто. Серед них: розробка теорії різання крихких композиційних матеріалів як контактного руйнування при взаємодії абсолютно жорсткого інструменту з волокном або джгутом полімерного композиту; розробка теоретичної концепції розвитку магістральної тріщини по досягненню коефіцієнта інтенсивності напружень свого критичного значення; визначено модель опису появи тріщини розшарування на виході свердел із заготовки; встановлено закономірності впливу режимів обробки на якість і ефективність з позицій механіки руйнування; для проектування операції свердління надано новий метод вибору параметрів обробки, що базується на призначенні подачі, що забезпечує відсутність розшарування на виході свердла; для рішення задачі оптимізації сформульовано цільову функцію для пошуку оптимального значення якої реалізовано метод «рою частинок», а для пошуку оптимального значення сукупності технологічних параметрів при обробці експериментальних даних використано метод сірого реляційного аналізу; для прогнозування зношування спіральних свердел розроблено модель зносу свердел в процесі обробки отворів і нову схему вибору технологічних параметрів обробки з урахуванням зносу інструменту

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної доповідалися на: XIII–XVII Міжнародних науково-технічних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2005–2015); V Міжнародній науково-технічній конференції «Високі технології в машинобудуванні» (м. Харків, 2013); XIV–XIX Міжнародних науково-технічних конференціях «Фізичні та комп'ютерні технології» (м. Харків, 2009–2014).

Публікації. Основний зміст дисертації викладено у 35 наукових працях, серед яких: 1 монографія (у співавторстві), 28 статей у фахових виданнях України (5 – у наукометричних базах), 5 статей у іноземних періодичних фахових виданнях, 2 – у матеріалах конференцій.

Структура й обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, восьми розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 361 сторінку, з них 94 рисунки за текстом, 29 рисунків на 13 окремих сторінках, 17 таблиць за текстом, 321 найменування використаних джерел на 33 сторінках, 8 додатків на 59 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано її мету і задачі досліджень, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, надано наукову новизну та практичну значущість роботи, подано дані про публікації, апробацію роботи і особистий внесок здобувача.

Перший розділ присвячено аналізу науково-технічної інформації щодо загальної технології механічної обробки точінням та свердлінням різних типів полімерних композиційних матеріалів.

Висока анізотропія властивостей композитів, їх неоднорідність і ряд інших специфічних властивостей вимагають спеціальних підходів до технології обробки, вибору інструментів і призначення режимів різання. При обробці композитів за рахунок анізотропії властивостей і високої абразивної здатності відбувається інтенсивне зношування інструменту при відносно малих значеннях діючих навантажень. Природна відмінність композитів також створює значні труднощі при виборі оптимальних технологічних параметрів обробки. Тому аналіз контактної взаємодії інструмента і заготовки при механічній обробці являє собою складну математичну задачу.

Систематизовані основні показники якості обробки. Визначено сучасний стан питання технологічного забезпечення механічної обробки, зокрема особливу увагу приділено свердлінню отворів у ПКМ. Надані основні математичні методи моделювання: регресійні моделі, що базуються на методології поверхні відгуку (RSM), підхід «soft computing» ANFIS (Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System) і адаптивна мережа нечіткого виведення. На підставі загального стану задачі технологічного забезпечення механічної обробки ПКМ сформульовано основні напрямки і перспективні можливості її вирішення.

У **другому розділі** визначені дефекти обробки, що виникають при точінні та свердлінні ПКМ.

Головна проблема полягає у тому, що якість обробки дуже важко оцінити через відсутність стружки, руйнування не завжди можна бачити, і величина шорсткості має тільки непряме значення при оцінці якості. 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 (наприклад, відхилення форми, ро-

зміру 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 (рис.1). При обробці отворів найбільш відповідальним та небезпечним є розшарування (деламінація) на виході інструменту із заготівки. Погіршення якості обробки ПКМ визначає необхідність заміни інструменту.

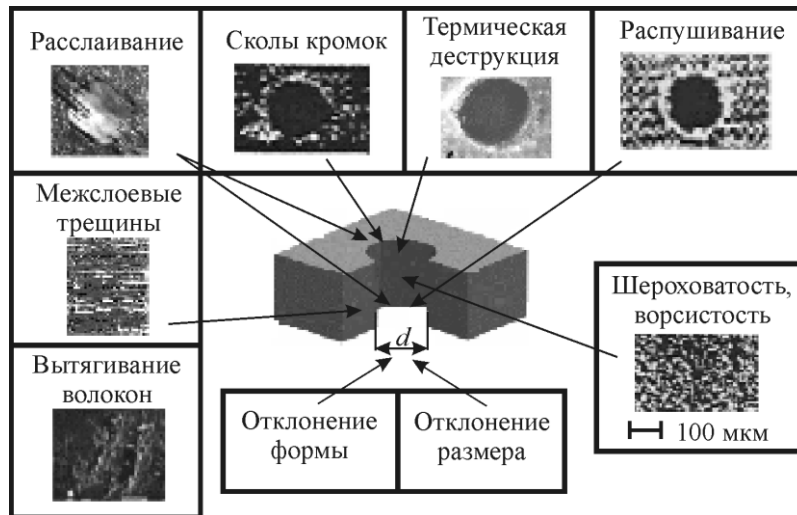


Рисунок 1 – Класифікація показників пошкодження, що виникають при свердлінні композитів

Визначено, що розшарування та розкошлячення структури матеріалів з ПКМ звичайно появляються сумісно, і їх розміри можуть змінюватися, тому що більше розшарування породжує більше розкошлячення та навпаки. Поява задирів, висмикнутих або не зрізаних волокон у вигляді розпушення-розкошлячення визначається в основному дією осьової сили. При її збільшенні ці дефекти повільно зростають до деякого значення, після якого розшарування досягає визначеного значення, а розкошлячення може помітно зменшитися.

Застосування традиційних способів визначення якості через шорсткість обробленої поверхні методом контактної профілометрії показало, що це ненадійний параметр у оцінці, тому що в процесі різання «розмазування» сполучного приводить до спотворювання поверхні і невірних даних профілометрії. Шорсткість найбільш залежить від зношування інструменту і при збільшенні зносу має тенденцію різкого зростання.

Тому для оцінки рівня руйнування навколо просвердленого отвору використовується підхід представлення фактору розшарування як функції від різних параметрів процесу: подачі, швидкості і радіуса свердла, у вигляді співвідношення $F_{dam} = D_{dam} / D_{hole} = k(f \cdot D_{hole} / s)^a \cdot (F_z / (E \cdot D_{hole}^2))^b$, де s – величина подачі, мм/хв; f – частота обертання шпинделя, об/хв; F_z – осьова сила, Н; E – модуль пружності волокон армування, Па; D_{hole} – номінальний діаметр отвору, м; D_{dam} – діаметр максимальної границі пошкодження навколо отвору,

м; a, b, k – постійні, які знаходяться експериментально методами регресійного аналізу.

Вплив різних факторів на процеси утворення дефектів поверхні зводиться до наступного. Такі процеси руйнування, як розрив волокон на виході свердла та утворення локальної пластичної деформації, збільшуються зі збільшенням вагового змісту волокон. Аналіз отриманих експериментальних даних показав, що величина шорсткості зростає зі збільшенням вмісту наповнювача і досягає максимального значення для 60%. Збільшення вмісту наповнювача призводить до погіршення якості обробленого отвору на виході інструменту, розігріву різальних кромek інструменту і плинності матриці позаду різальних крайок. Для матеріалу з низьким вмістом наповнювача характерний розігрів вершини інструменту, що призводить до пластичного протягу матриці і породжує досить довгу стружку, в той час як свердління матеріалу з високим вмістом наповнювача дає пиловидну стружку.

Під час свердління перерізані скляні волокна утворюють геометричну неточність отвору у вигляді колокоподібності на вході і розпушування на вихідній площині отвору. Ці дефекти є результатом розщеплення волокон і розтріскування матриці, які вносять вклад в пружне відновлення матеріалу, що приводить до скорочення діаметру отвору. Якість отворів для твердосплавного свердла краще, ніж для швидкорізальної сталі для однакових умов різання. Фактор розшарування вище при роботі інструментом зі швидкорізальної сталі, ніж для твердого сплаву. Таким чином, розшарування і розкошачення у будь-якому 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. При точінні використовується традиційний інструмент з твердого сплаву з різними геометричними характеристиками. При свердлінні застосовуються свердла з нормальним або подвійним заточенням або спіральні свердла з підрізаними різальними крайками зі швидкорізальної сталі і твердого сплаву. Проаналізовано широкий спектр спіральних свердел з різною формою заточування, а також інструмент, оснащений твердосплавними пластинами і перовий інструмент.

Визначено, що особливості застосування універсального спірального свердла в основному полягають у тому, що свердління вимагає досить високого тиску і при обробці глибоких отворів свердла мають схильність забиватися продуктами різання. Головною перевагою є його універсальність і низька вартість. Модифікації геометрії традиційного спірального свердла здійснюють за рахунок особливостей заточування, підточення і затилування вершини свердла. Ці модифікації умовно розділені на дві категорії: незначні зміни класичного спірального свердла, пов'язані з «підточенням» і «затилуванням» вершини свердла, та значні, коли відбуваються суттєві зміни або тільки на задній поверхні, або на обох поверхнях задньої і в області поперечної різальної кромки, а також зміни стружечної канавки і передньої поверхні.

Наведені особливості застосування свердел різної форми і з різним заточуванням, які орієнтовані на свердління окремих класів композиційних матеріалів. Але при переході до свердління композитів з іншою структурою в більшості випадків позитивного ефекту досягти не вдається. Крім того, часто спостерігається підвищений знос спеціальних свердел при обробці композиційних матеріалів всіх груп. Також певним спеціального інструменту є його висока вартість, складність в переточці і невелика кількість допустимих переточувань інструменту. У більшості випадків для заточування інструменту потрібні спеціальні дорогі пристосування або навіть спеціальний заточувальний верстат.

Таким чином, на підставі аналізу інструментального забезпечення свердління ПКМ за такими критеріями, як якість обробленої поверхні, стійкість інструменту та його вартості пріоритет віддається традиційному спіральному свердлу з твердого сплаву. Основні переваги такого рішення є висока стійкість свердла, можливість достатньої кількості переточувань, невелика вартість свердел і широка номенклатура типорозмірів.

Четвертий розділ присвячено моделюванню контактної взаємодії інструменту і матеріалу, розробці моделі контактного руйнування з використанням положень лінійної механіки руйнування.

Доведене, що побудова моделі деформування і руйнування ПКМ з позицій механіки руйнування і механіки контактного руйнування є доцільним засобом отримання інтегральної оцінки процесу деструкції і, поперед усього, оцінити напружено-деформований стан (НДС) і теплове становище волокон і матриці ПКМ в зоні різання. Специфіка опису НДС в процесі різання ПКМ визначається чітко вираженою анізотропією властивостей самого матеріалу, де наповнювач має високу міцність і твердість. Матеріал має різну поведінку при обробці уздовж або поперек волокон. Суттєвим чином на напружений стан впливає схема армування ПКМ. Дослідження особливостей процесу різання конструкційних ПКМ дозволило зробити висновок про крихкий або квазікрихкий характер руйнування (деструкції) матеріалу при обробці. При цьому ПКМ зберігає свої пружні властивості до самого акту порушення суцільності (тріщиноутворення і відриву). Експериментальні дослідження показали, що НДС таких матеріалів при різанні є пружним на протязі усього процесу навантаження. Власно руйнування (акт відділення фрагменту матеріалу) супроводжується утворенням багаточислених макро- та мікротріщин, що описуються моделлю крихкого руйнування.

З іншого боку ПКМ має високі пружні властивості, що визначаються параметрами наповнювача. Сили різання при обробці ПКМ приблизно у 10–20 разів нижче, ніж при аналогічній обробці металів. Завдяки цьому найчастіше точність виробів з ПКМ при обробці різанням суттєво залежить від пружних деформацій заготовки під дією сил різання та умов її закріплення.

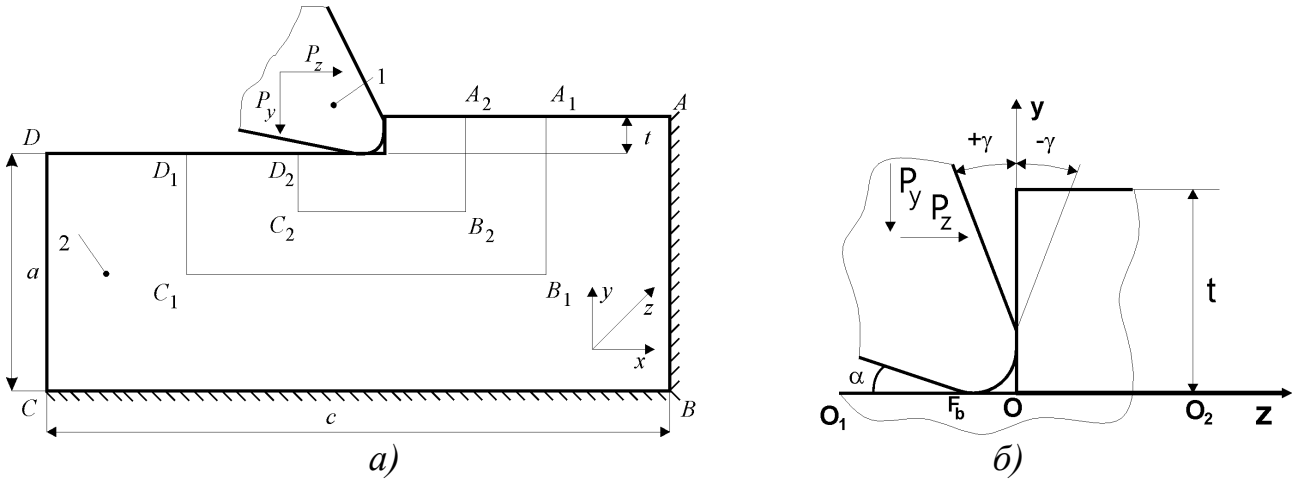


Рисунок 2 – Розрахункова схема задачі визначення НДС ПКМ: а – загальна розрахункова схема; б – схема контактної взаємодії вершини інструменту і матеріалу

Враховуючи викладене, сформульована розрахункова схема визначення напружено-деформованого стану ПКМ (конструкційного склопластика) в процесі його обробки різанням. В рамках площинної задачі теорії пружності (площинна деформація) визначена задача контактної взаємодії різального інструменту – 1 з анізотропним матеріалом – 2 (рис. 2 а). З теорії різання матеріалів прийнято у якості силового навантаження використовувати складові рівнодіючої сили різання: P_z – тангенційну, P_y – нормальну, що прикладені до різального клину.

У фізичній моделі (розрахунковій схемі) прийнято, що ПКМ взаємодіє з абсолютно жорстким інструментом, що має передній кут γ , радіус закруглення вершини інструменту ρ та довжину різальної кромки b . Враховуючи різницю з твердості і модуля пружності для матеріалу інструменту і матеріалу, що обробляється, таке припущення цілком правомірне і традиційно використовується при розгляданні задач теорії різання. Прийняти умови навантаження нормальною і тангенційною силами, які розподілені уздовж лінії контакту по границі взаємодії матеріалу і інструменту.

Визначено, що врахування сил тертя має значення при розгляданні задачі зносу різального інструменту по задній поверхні і особливого впливу на загальну картину НДС в області локального руйнування при різанні (точка O на рис. 2 б) не впливає.

По площині контактування заготовки і стола верстата (лінія BC і AB) прийнято умову жорсткого зв'язку. На всіх останніх поверхнях завдана відсутність навантаження: $t_n=0$, $t_\tau=0$.

Процес різання волокон (або джгутів) трактується як контактна взаємодія абсолютно жорсткого клину з радіусом округлення при вершині, що заглиблюється під деяким кутом у волокно. Постановка задачі в рамках теорії пружності така: інтенсивне локальне руйнування місця контакту, зріст і злиття мікротріщин в макротріщини, зростання останніх до критичного значення, нестійкий рух магістральної тріщини і відділення фрагменту волокна.

Загальне формулювання процесу різання ПКМ представляється таким чином: косе заглиблення абсолютно жорсткого тіла в пружне напівпространство, що викликає зародження і розвиток мікротріщин, які розповсюджуються у двох напрямках. Тріщина в процесі навантаження рухається у волокні і приводить до видалення фрагменту матеріалу; інша рухається уздовж границі скловолокна – сполучне і приводить до порушення адгезійного зв'язку. Фактично інтенсивність розвитку і напрямку руху першої тріщини і є процес різання (вилучення припуску). Інтенсифікація цього процесу, управління за допомогою технологічних параметрів і геометричних характеристик інструменту, являє собою ціль математичного моделювання фізичного процесу різання ПКМ. Розвиток тріщини розшарування приводить до погіршення якості обробленої поверхні – розкошлячченню, утворенню дефектів структури поверхневого шару, ефекту висмикування волокон при слабкому адгезійному зв'язку скловолокна і сполучного.

В моделюванні процесу різання ПКМ як задачі механіки локального контактного руйнування поруч із питаннями зародження, розвитку і нестійкого руху магістральної тріщини, що перерізує волокно (джгут), найбільш важливим є запобігання розриву адгезійного зв'язку уздовж границі «сполучне – наповнювач». Таким чином, ефект перерізу є наслідком магістрального руху тріщини, старт якої визначається в залежності від виконання одного з критеріїв: або максимальне значення коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) досягає критичного значення, або довжина тріщини приймає значення критичної довжини тріщини. Зростання тріщини визначається максимальним значенням КІН розтягуючих напружень – K_m . Тріщина розповсюджується під кутом α до свого первісного напрямлення уздовж поверхні, на якій виникають максимальні розтягуючі напруження, і визначається за формулами В.В. Панасюка:

$$\alpha = 2 \cdot \arctg[(1 - \sqrt{1 + 8k^2}) / 4k], \quad K_m = \cos^2(\alpha / 2)[K_I \cos(\alpha / 2) - 3K_{II} \sin(\alpha / 2)],$$

де K_I, K_{II} – коефіцієнти інтенсивності напружень (КІН) 1-го та 2-го роду; $k = K_I / K_{II}$. По досягненню $K_m = K_c$, де K_c – критичне значення КІН, починається старт тріщини і переріз волокна.

Приймається, що тріщина довжиною l розташована в напівплощині перпендикулярно до її поверхні. На краю напівплощини на відстані b від тріщини прикладені розподільні нормальні q_n та дотичні q_t навантаження по деякій довжині. Закон розподілення навантаження заздалегідь невідомий і його знаходження це результат рішення окремої задачі про вдавлення сферичного або конічного індентору, що моделює процес місцевої контактної взаємодії округленої різальної кромки інструменту з системою джгутів або волокон, що перерізуються. КІН одержано за допомогою співвідношень

$$K_{Iq} = \frac{1}{\sqrt{\pi l}} \int_b^{b_1} q(y) R_{qq}(y) dy; \quad K_{IIq} = \frac{1}{\sqrt{\pi l}} \int_b^{b_1} q(y) R_{qt}(y) dy;$$

$$K_{It} = \frac{1}{\sqrt{\pi l}} \int_b^{b_1} t(y) R_{tq}(y) dy; \quad K_{III} = \frac{1}{\sqrt{\pi l}} \int_b^{b_2} t(y) R_{tt}(y) dy,$$

де R_{ij} – нормуючий коефіцієнт КІН для зосередженої сили, що прикладена на деякій відстані від тріщини. У випадку, коли тріщина розташована у кінці площини контакту, розподіл навантаження по площині контакту при поглибленні сферичного індентору радіусу R у пружну напівплощину без тертя має вигляд:

$$q(r) = -\frac{3P}{2\pi a^3} \sqrt{a^2 - r^2}, \quad t(r) = \frac{F}{2\pi a \sqrt{a^2 - r^2}},$$

де r – відстань від центру площини контакту до будь-якої точки у межах контакту радіусу a ; P, F – інтегральне значення нормального та дотичного зусилля. Тоді для значень КІН визначені співвідношення:

$$K_I = \frac{1}{a\sqrt{\pi l}} (P \cdot I_{qq} + F \cdot I_{tq}), \quad K_{II} = \frac{1}{a\sqrt{\pi l}} (P \cdot I_{qt} + F \cdot I_{tt}),$$

де коефіцієнти при зусиллях обчислюються за формулами:

$$I_{qq} = -\frac{3}{2\pi a^2} \int_0^{2a} \sqrt{a^2 - (y-a)^2} R_{qq}\left(\frac{y}{y+l}\right) dy, \quad (1)$$

$$I_{tq} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2a} \frac{R_{tq}\left(\frac{y}{y+l}\right) dy}{\sqrt{a^2 - (y-a)^2}}, \quad I_{tt} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2a} \frac{R_{tt}\left(\frac{y}{y+l}\right) dy}{\sqrt{a^2 - (y-a)^2}}, \quad (2)$$

$$I_{qt} = -\frac{3}{2\pi a^2} \int_0^{2a} \sqrt{a^2 - (y-a)^2} R_{qt}\left(\frac{y}{y+l}\right) dy. \quad (3)$$

Для деякого значення довжини тріщини l величина КІН визначається як сума КІН $K_I = K_I^* + K_{Iq} + K_{It}$, $K_{II} = K_{IIq} + K_{III}$, де K_I^* – КІН від зовнішніх навантажень, наприклад від дії додаткового джерела енергії поза зоною контактної взаємодії. Задача визначення коефіцієнтів (1),(2),(3) вирішена методом інтегральних рівнянь.

Припустимо, що всі структурні складові композиту (наприклад, волокна) представляються елементами, що мають одну степінь свободи, тобто «стержневими елементами». Окрім того, приймається припущення, що матриця не сприймає осьове навантаження, волокна ідеально пов'язані з матрицею, розташовані рівномірно і мають несучу здатність тільки у осьовому напрямку. Це дозволяє розглядати великі об'єми матеріалу, значно спростити алгоритм рішення задачі за рахунок зниження її розмірності. Зсувні моделі одержали найбільше використання при аналізі процесів руйнування ПКМ.

Руйнування матеріалу сполучного має великий вплив на загальний характер несучої властивості композиту. У якості критерія міцності для матеріалу сполучного використана гіпотеза максимального нормального навантаження. Відповідно до цієї гіпотези, руйнування в умовах багатовісного напруженого

стану трапляється тоді, коли максимальна головна нормальна напруга стає рівною або перевищує максимальну нормальну напругу в момент руйнування зразка з того ж матеріалу в умовах одновісного напруженого стану. Таким чином, руйнування трапляється, коли $\sigma_1 \geq \sigma_e; \sigma_2 \geq \sigma_e; \sigma_3 \geq \sigma_e$ або $\sigma_1 \leq \sigma_c; \sigma_2 \leq \sigma_c; \sigma_3 \leq \sigma_c$, де $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – головні нормальні напруги; σ_e, σ_c – руйнівні напруги при одновісному розтягуванні і стисненні відповідно. Ця гіпотеза найкращим чином підходить до опису руйнування крихких матеріалів.

Таким чином, вважається, що виконання критерію за напруженням розтягування або за напруженням стиснення в деякій точці, призводить до втрати несучої здатності матеріалу в цій точці, порушенню суцільності і до руйнування з видаленням дрібнодисперсної стружки.

При використанні теорії граничних нормальних напружень для односпрямованих композитів, як правило, міцність шару в напрямку волокон приймається рівною руйнуючим напруженням для волокон арматури, а межі міцності шару за дотичним і нормальним напруженням поперек волокон дорівнюють відповідним граничним напруженням матриці при зсуві, розтягуванні і стисненні. Такий підхід значно спростив загальну оцінку міцності, однак розрахунки свідчать, що використання властивостей матриці, визначених поза композитом, для встановлення несучої здатності матриці не в повній мірі враховують руйнування по межі волокно-матриця, концентрації мікронапруг поблизу неї та інших локальних ефектів. Визначено, що руйнування поверхневого шару насамперед пов'язана з аналізом процесу руйнування матриці як компоненти, що має багато більш низькі властивості міцності в порівнянні з матеріалом армування. В першу чергу полімерна матриця відрізняється вкрай низьким значенням міцності при розтягуванні, що посилюється наявністю безлічі мікродефектів і залишкових напружень невідомої орієнтації.

При різанні ПКМ враховано дві моделі навантаження сполучного, що впливають з математичної постановки задачі як задачі контактної взаємодії анізотропного тіла з різальним клином. Перша модель, що наведена на рис. 3, описує НДС системи «матриця-джгут-матриця» в момент перерізу скляного джгута. Друга модель аналогічна першій і відбиває НДС системи «джгут-матриця-джгут», та характеризує напружений стан в момент закінчення перерізу джгута і початку навантаження матриці. Представлені моделі описують два крайніх випадки взаємодії різального клину і оброблюваного матеріалу, і всі інші взаємні розташування інструменту та джгута, інструменту та сполучного будуть умовно бути проміжними.

Напружений стан біля вершини тріщини описують рівняннями, що зводять задачу до визначення єдиного параметра, який характеризує поле напруги – коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН). 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.

Основним інструментом для теоретичного дослідження руйнування в контакті інструменту із шаруватим композитом є енергетичний критерій лінійної

механіки руйнування, який ґрунтується на описі поля напружень біля вершини тріщини в лінійно-пружному матеріалі.

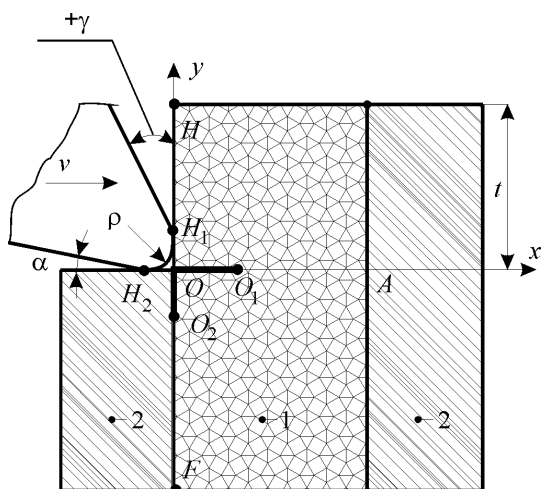


Рисунок 3 – Розрахункова схема взаємодії джгута волокон – 1 і матриці – 2

Енергетичний аналіз свердління спіральним свердлом, що схематично зображено на рис. 4 а, дає співвідношення для критичної осьової сили $F_z = \pi \left[\frac{8 \cdot G_{IC} \cdot E \cdot h^3}{3(1-\nu^2)} \right]^{1/2}$, з якого визначається h^* , що відповідає критичному значенню осьової сили.

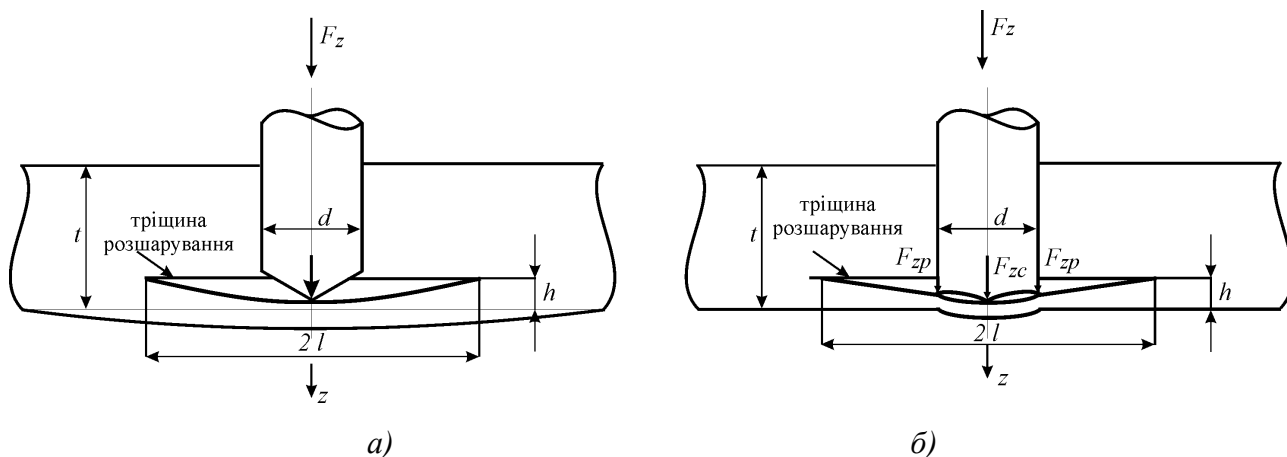


Рисунок 4 – Модель утворення міжшарової тріщини при свердленні шаруватого композиту: а – звичайним спіральним свердлом; б – свердлом з підрізаючими кромками

Дані співвідношення дозволяють визначити для заданої осьової сили величину товщини відшарування по нижній поверхні. Питання про величину самого розшарування отримати не можна. Для якісної експлуатації просвердленого отвору необхідно мати уявлення не тільки про глибину залягання тріщини розшарування h , а й власне про її величину. Для свердла з підрізаючими кромками (рис. 4 б) енергетичний аналіз дає співвідношення

$$F_z = \pi(1 + k_f) \sqrt{\frac{8 \cdot G_{IC} \cdot E \cdot h^3}{3(1 - \nu^2) \left[1 + k_f^2 (1 - k_l^2)^2 \right]}}, \text{ де } k_f = F_{zp} / F_{zc} \text{ – відношення сили,}$$

що діє на периферії до центральної сили; $k_l = d / (2 \cdot l)$ – відношення діаметра свердла до загальної довжини тріщини.

У більшості практичних застосувань задається граничне значення глибини відшаровування h або максимальне значення фактору розшарування. При цьому є невизначеність щодо значення величини поширення тріщини в поздовжньому напрямку і як пов'язати розрахунок цієї величини з режимними параметрами обробки, геометрією свердла і його стійкістю.

У цьому контексті визначено, що зв'язок руху тріщини руйнування з технологічними параметрами здійснюється через силове навантаження, яке повинно бути таким, щоб зробити переріз безпосередньо контактуючого волокна (джгута) і мінімально розповсюджуватися на інші в ході обробки. Це дає можливість мінімізувати появу і довжину випереджувальної тріщини, яка може бути причиною утворення різних типів дефектів. При різанні таких суттєво неоднорідних матеріалів, як ПКМ, є наявність поверхні розподілу, яка призводить до дисипації енергії різання. Поверхня розподілу служить бар'єром на шляху поширення тріщини.

Тріщина послідовно рухається з одного шару в інший по поверхні розподілу, що приводить до утворення дефектів у вигляді розшарувань і пустот, які переводять початкову тріщину в нове, менш вигідне для її поширення положення. Поверхні розподілу сприяють роботі окремих складових ПКМ. Наприклад, якщо тріщина перетинає кілька шарів наповнювач-сполучне, тоді при наявності у вершині тріщини поперечної складової досить високої інтенсивності, має місце розрив між суміжними шарами. Це призводить до того, що тріщина не буде рухатися далі за матеріалом, а розподілиться на ряд окремих тріщин в межах кожного шару. З точки зору механіки руйнування, якщо шари досить малі за товщиною, то в кожному з них у вершині тріщини виникає площинно-напружений стан, в той час як в однорідному матеріалі однакової товщини стан площинної деформації. Тому для армованих шаруватих матеріалів підвищується в'язкість руйнування і зменшується швидкість поширення тріщини.

Розшарування односпрямованого композиту уздовж волокон завжди випереджає руйнування зсувом в цьому напрямку і перш, ніж волокно перед фронтом зруйнується (рух тріщини), матриця завжди буде деформована зрушенням. Для композиційних склопластиків типу крихке волокно–крихка матриця домінуючим в процесі руйнування при різанні є руйнування волокон або джгутів. Всі види дисипації енергії, властиві композитам при руйнуванні за рахунок руху магістральної тріщини, крім руйнування наповнювача, є несуттєвими.

Визначено, що максимальне значення дотичного напруження, відповідального за зрушення, досягається при значенні переднього кута 15° (рис. 5). Компонента нормальної напруги у напрямку руху – стискаюча невисокої інтенсивності, уздовж перпендикулярного напрямку – розтягуюча з високою інтенсивністю, що свідчить про те, що руйнування має тенденцію реалізовуватися за

рахунок зсуву–відриву. Зменшення переднього кута до негативних величин призводить до відсутності по лінії зрізу напружень зрізу, значного погіршення загального рівня напруженого стану для зсуву і відриву. Для негативних кутів змінюється характер руйнування зсувом на руйнування відривом не по лінії зрізу, а вище по координаті (рис. 3).

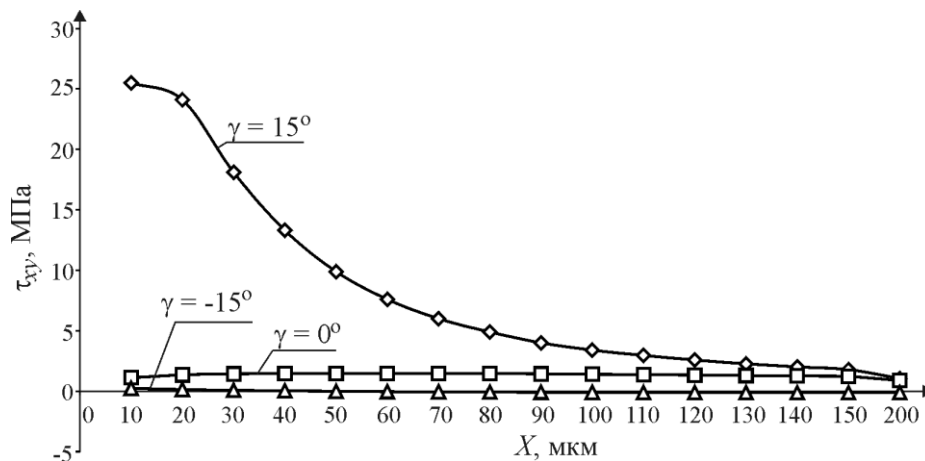


Рисунок 5 – Розподіл напруження τ_{xy} уздовж лінії зрізу в залежності від переднього кута для $v=60$ м/хв., $s=0,05$ мм/об

Руйнування за рахунок зрізу має місце для малих значень радіуса округлення вершини інструменту. Збільшення радіуса призводить до падіння величини зсувного напруження, що змінює характер руйнування зсувом–зрізом на руйнування відривом, підвищує імовірність висмикування волокон і погіршує якість обробленої поверхні. Малі значення радіуса округлення призводять до збільшення тріщини порушення адгезійного зв'язку. Зі збільшенням швидкості різання для будь-яких значень переднього кута інтенсивність зсувних напружень падає; з ростом подачі збільшується сила різання і напружений стан в контактї.

У п'ятому розділі наведено 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. В процесі свердління визначені два механізми стружкоутворення. Один для крихких матеріалів через механізм руйнування шляхом проростання тріщини і другий, режим в'язкої обробки, що включає в себе видалення матеріалу через пластичну деформацію (як протилежність крихкому руйнуванню). При механічній обробці ПКМ має місце крихке руйнування, що визначає особливий підхід до розрахунку силового навантаження. На теперішній час теоретичні аналітичні залежності для діючих сил різання базуються на застосуванні співвідношень з теорії різання металів. Ці співвідношення модифіковано та пристосовано до опису силового навантаження при різанні крихких матеріалів шляхом введення до розрахунку сукупності коефіцієнтів, що відбивають специфіку руйнування композитів.

При точінні ПКМ використовують кінематичні залежності, що розроблені в теорії різання металів. Для цих залежностей визначено багаточисленні коефіцієнти, які з тією або іншою точністю дозволяють підрахувати складові сили різання. При свердлінні існують різні підходи до розгляду зміни величини осьової сили, які зводяться до моделювання характеру її зміни в декілька етапів (рис. 6 а). Наприклад, зміна осьової сили спірального твердосплавного свердла проходить декілька етапів: підхід, коли свердло наближається до заготовці; контакт, коли свердло починає контактувати з заготовкою; свердління, робочий процес без розшаровування; поява розшаровування, коли осьова сила перевищить деяке критичне значення і відбувається старт тріщини розшаровування; вихід свердла, коли вершина інструменту виходить з заготовки; закінчення процесу, отвір просвердлений; відведення свердла, свердло виводиться з отвору і відводиться від заготовки. Аналогічні зміни відбуваються і для крутного моменту (рис. 6 б).

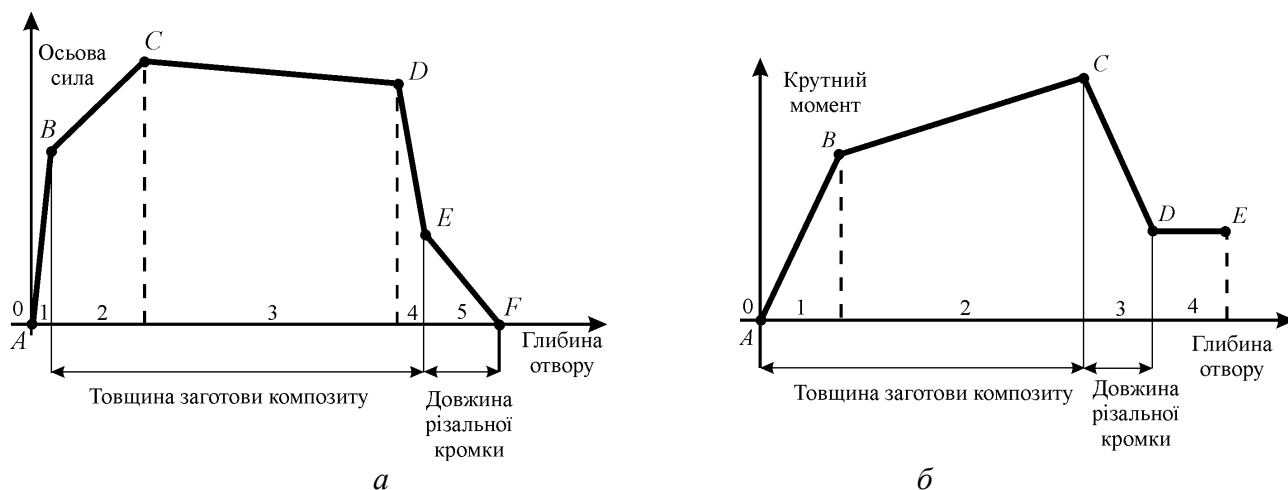


Рисунок 6 – Ідеалізована схема зміни силових параметрів при свердлінні отворів: а – осьової сили; б – крутного моменту

Осьова сила (зусилля подачі), що діє протягом усього процесу свердління, визначається як «сила, що діє уздовж осі свердла протягом процесу обробки». Розрахункові залежності для осьової сили і крутного моменту мають вигляді функцій $F_z = C_z \cdot d^{n_f} \cdot s^{m_f} \cdot K_z$ і $M_t = C_m \cdot d^{n_t} \cdot s^{m_t} \cdot K_t$, де d – діаметр свердла. Розрахунки осьової сили та крутного моменту використовують емпіричні залежності для різних типів матеріалів з використання різних марок інструменту, які наведено у дисертації.

Вплив технологічних параметрів свердління на величину силових факторів має найбільш важливе значення при проектуванні операцій механічної обробки ПКМ. Осьова сила і крутий момент при свердлінні багатошарових композитів визначаються геометрією різальної частини інструменту і його діаметром, числом просвердлених отворів одним інструментом (знос інструменту), і залежать від технологічних параметрів обробки, в першу чергу таких, як швидкість різання і подача. На основі проведених численних досліджень сили F_z і моменту M_t зроблені висновки про вплив різних чинників обробки на величини

ну цих параметрів. Визначено, що швидкість різання незначно впливає на величину осьової сили, яка трохи зменшується з ростом швидкості різання. Домінуючим фактором є подача, з ростом якої зростає і осьова сила. Зі збільшенням зносу інструменту вплив швидкості різання проявляється сильніше і спостерігається помітне зростання осьової сили.

Величина сили F_z впливає на характер і величину виникаючих дефектів, особливо розшарування, і багато в чому відповідальна за зношування інструменту. З огляду на те, що із зношуванням зростають силові фактори свердління, осьова сила визначає знос інструменту і, в свою чергу, визначає його стійкість. Якщо «критична осьова сила» відома, тоді можна збільшити ефективність свердління і поліпшити якість поверхні ПКМ.

Для оцінки величини осьової сили під час свердління композитів розроблена модель, що базується на головній вимозі здійснювати механічне руйнування матеріалу в залежності від його механічних характеристик, в якості яких фігурує модуль пружності, міжшарова енергія руйнування по першому типу I, коефіцієнт Пуассона, геометричні параметри інструменту і прикладене навантаження. Загальна закономірність зміни величини осьової сили під час свердління шаруватих полімерних композитів спіральним свердлом складається в її збільшенні зі збільшенням подачі, зменшенні при збільшенні швидкості обертання шпинделя і збільшенні з ростом діаметра інструмента і товщини заготовки. Величина крутного моменту (моменту опору) в залежності від подачі і швидкості обертання шпинделя змінюється аналогічно значенню осьової сили.

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 величини фактору розшарування на виході інструменту з отвору.

Також одним з важливіших факторів при обробці ПКМ є температура в контакті і в загальному осередку деформації. Величина температури визначає, поперед усього, появу такого дефекту як «пропали» сполучного, який приводить до безповоротного браку виробу. З другого боку зростання температури приводить до інтенсифікацій зношування інструменту і, навпаки, зношування інструменту приводить до інтенсивного зростання температури.

Виконано чисельне моделювання теплових явищ при ортогональному різанні ПКМ методом граничних елементів. На межі поділу матеріал-інструмент по задній поверхні має місце виділення тепла тертя, яке використовується при моделюванні для прогнозування розподілу температури. Тепло від пластичних деформацій не враховується, тому що матеріал має високі пружні властивості при малих деформаціях. Вирішальне значення при свердлінні відводиться генеруванню тепла тертя по задній поверхні.

Рішення задачі розподілу температури в процесі різання склопластиків полягає не стільки в рішенні самої задачі, скільки у визначенні термонапруженого стану поверхневого шару, оцінки деструкції компонентів і, як наслідок, якості обробленої поверхні. Особливо важливим є не тільки визначення серед-

ньої температури, але і миттєвої пікової. Саме миттєва, максимальна температура дозволяє отримати реальну картину поширення процесу деструкції в поверхневому шарі оброблюваного полімерного композиційного матеріалу. Характер зміни максимальної температури в основному визначається величиною подачі і швидкості різання (рис. 7). Запропоновано аналітичну залежність розподілу температури в контакті у вигляді співвідношення $\theta = K_{\theta} \cdot (v - k \cdot v^2)^{n_v} s^{n_s} t^{n_t}$. Таке представлення дозволяє моделювати температурне поле не тільки при класичних швидкостях різання, але і при підвищених швидкостях, на яких за експериментальними даними можна спостерігати зниження рівня температури за рахунок явища динамічного руйнування матеріалу.

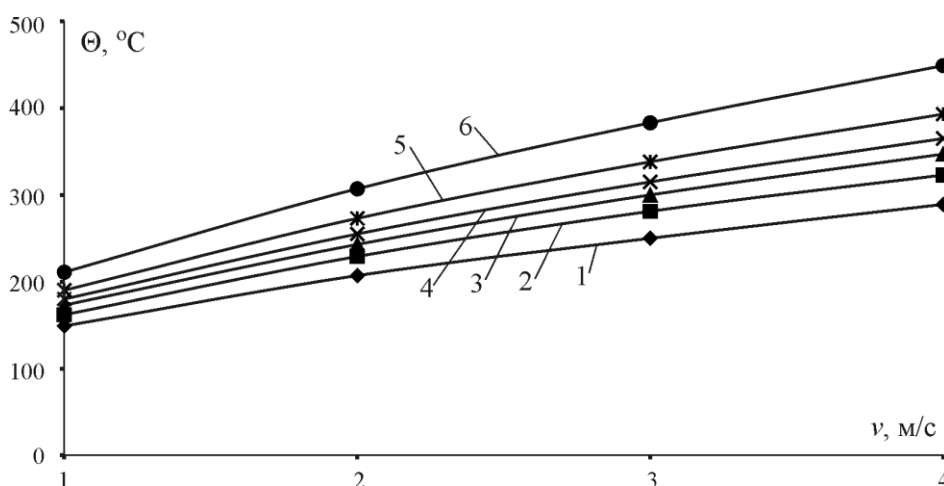


Рисунок 7 – Залежність максимальної температури в контакті від швидкості обробки при глибині різання 0,5 мм і подачі: 1 – 0,05 мм/об; 2 – 0,1 мм/об; 3 – 0,15 мм/об; 4 – 0,2 мм/об; 5 – 0,3 мм/об; 6 – 0,6 мм/об

Розроблена модель теплового стану при різанні дозволяє якісно та кількісно оцінювати розподіл температури в контакті з урахуванням затуплення інструменту по мірі обробки, яке моделюється, як збільшення радіуса закруглення вершини інструменту.

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 розшаровування, припінання 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 розкошлячення на основі виконання поетапних ітерацій:

- за заданим значенням діаметру свердла та фактору розшарування на виході свердла із заготовки F_{dam} , призначають подачу s ;
- за допомогою аналітичних або емпіричних залежностей розраховують осьову силу F_z і крутний момент M_t ;
- якщо задана кількість просвердлених отворів N або припуск S_t , то розраховується величина зносу задньої поверхні h_z ;
- визначається час роботи інструменту τ і знаходиться значення частоти обертання шпинделя f ;
- проводиться перевірка виконання обмежень за температурою в зоні контакту θ , шорсткості обробленої поверхні R_z, R_a, R_t .

При умов по обмеженням вважається, що припикання сполучного відсутнє і величина шорсткості поверхні у межах задовільного. Деякі аналітичні і емпіричні залежності для розрахунку режимних параметрів обробки надано у дисертації.

Таким чином, сформульовано основні принципи, що лягли у основу математичної моделі визначення режимних параметрів різання.

По-перше, збільшення подачі і діаметру свердла призводить до збільшення шорсткості стінок отвору. Поверхнева шорсткість зростає з ростом попереднього зношування інструменту. Для низької швидкості різання подача несуттєво впливає на шорсткість, для високої швидкості різання і подачі, шорсткість поверхні дуже висока.

По-друге, шорсткість залежить від співвідношення між частотою обертання шпинделя і подачею безвідносно від виду армування, наповнювача і методу виготовлення. Внутрішня неоднорідність матеріалу може ініціювати різке погіршення якості обробки. Інструмент з твердого сплаву дає кращу якість обробленої поверхні, ніж із швидкорізальної сталі для всіх комбінацій частоти обертання і подачі. По мірі зношування задньої поверхні і закруглення вершини свердла відбувається збільшення шорсткості поверхні отвору. При цьому найбільш сильно це проявляється в місцях появи незрізаних волокон, які локалізуються під кутом $\pm 45^\circ$.

По-третє, свердління інструментом зі швидкорізальної сталі дає дещо менший діаметр отвору в порівнянні з діаметром свердла, а свердла з твердого сплаву – більший. Діаметр отвору зі збільшенням подачі і частоти обертання збільшується, що пояснюється інтенсифікацією коливальних процесів у технологічній системі. Найбільш істотну роль на точність діаметру і спотворення форми надає знос інструменту: чим вище розмірний знос свердел, тим діаметр отвору буде менше. Величина овальності зростає зі збільшенням осьової сили. При цьому значення максимального діаметра наближається до діаметра інструменту, в той час як отриманий отвір менш діаметра свердла. Зниження овально-

сті спостерігається для найнижчого значення подачі і високої частоти обертання шпинделя.

В *четвертих*, зі збільшенням зносу інструменту величина усадки під час свердління отворів в цих матеріалах зменшується, величина зміни діаметрів отворів після обробки практично не залежить від геометрії свердла, швидкість різання мало впливає на величину усадки; основний вплив на усадку (розбивання) отвору оказують особливості структури оброблюваного матеріалу, його фізичні властивості і наявність дефектів структури.

Доведено, що чинниками, які впливають на розмірне відхилення діаметра кінцевого отвору, є: швидкість різання і подача, знос інструменту і биття шпинделя. Для інструменту з швидкорізальної сталі на кінцеву величину діаметра найбільший вплив робить швидкість різання, для твердосплавного інструменту – подача. Діаметр отвору збільшується зі збільшенням швидкості різання і подачі, що пояснюється зростанням вібрацій інструменту.

Сьомий розділ присвячено постанові та рішенню задачі оптимізації технологічного процесу механічної обробки полімерних композитів. Задачу оптимізації технологічного процесу 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.

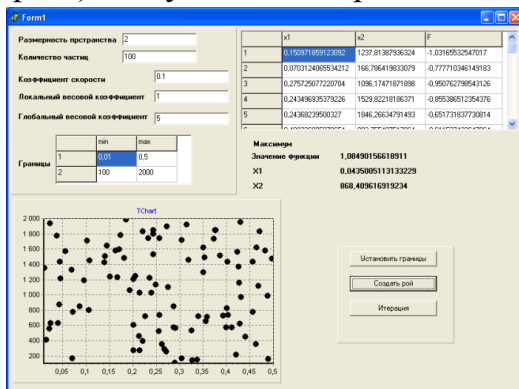
Завдання оптимізації силового навантаження сформульоване наступним чином. Для заданої марки оброблюваного матеріалу (з відомими фізико-механічними характеристиками), марки інструментального матеріалу і типу інструменту необхідно обрати геометричні характеристики інструменту (передній і задній кут, головний кут в плані або кут при вершині свердла) і технологічні режими різання (подачу, частоту обертання шпинделя, глибину різання або діаметр свердла) такі, щоб силові елементи процесу механічної обробки були мінімальні. Так, визначення якості свердління зводиться до екстремальної задачі для осьової сили і крутного моменту: $F_z = F(\alpha, \gamma, 2\varphi, d, s, f) \rightarrow \min$, $M_t = M(\alpha, \gamma, 2\varphi, d, s, f) \rightarrow \min$. Обмеженнями при вирішенні задачі оптимізації цільової функції з багатьма змінними приймається виконання умов по глибині розшарування, шорсткості і температурі. Методом «рою частинок» рішення задачі мінімізації значень осьової сили і крутного моменту як функцій геометричних параметрів інструменту при свердленні вуглепластику Т300/5208 з об'ємним вмістом волокон 55%.

Для забезпечення виконання показників якості обробки запропоновано компромісну цільову функцію виду

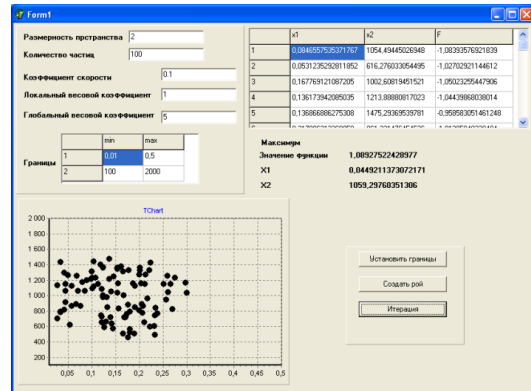
$$E(h, R_z, w, D_{dam}) = \alpha_1 \cdot \left(\frac{h - h_0}{h_0} \right)^2 + \alpha_2 \cdot \left(\frac{R_z - R_{z0}}{R_{z0}} \right)^2 + \alpha_3 \cdot \left(\frac{w - w_0}{w_0} \right)^2 + \alpha_4 \cdot \left(\frac{D_{dam} - D_{nom}}{D_{nom}} \right)^2 \rightarrow \min,$$

де сума вагових коефіцієнтів $\sum_{i=1}^I \alpha_i = 1$; h, R_z, w, D_{dam} – поточні значення зносу

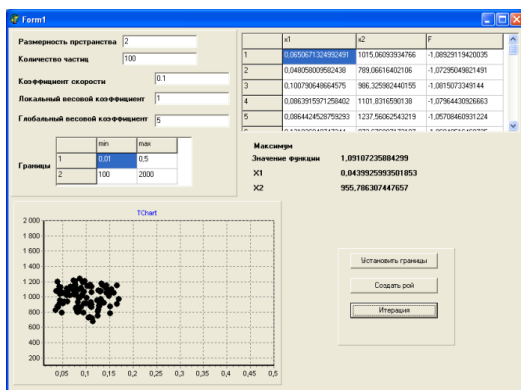
по задній поверхні інструменту, шорсткості, втрата ваги і діаметр зони пошкодження; $h_0, R_{z0}, w_0, D_{nom}$ – номінальні значення зносу по задній поверхні, шорсткості, зносу (як втрати ваги інструментом) і діаметра отвору, що застосовуються для нормалізації. Для вирішення завдання пошуку оптимального рішення використано алгоритм «рою частинок» (рис. 8). Який дозволяє здійснювати пошук глобального екстремуму у заданому інтервалі змін технологічних параметрів. Результатом рішення задачі є величина подачі і частоти обертання шпинделя що забезпечує мінімальне значення цільової функції $E(h, R_z, w, D_{dam})$. Метод побудовано таким чином, що початкове наближення в процесі ітерацій орієнтується на краще значення цільової функції і поступово всі точки (частинки рою) стягуються до кращої.



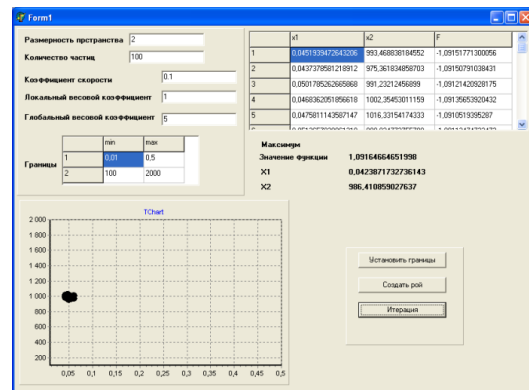
а)



б)



в)



г)

Рисунок 8 – Екранні форми пошуку оптимального значення: а – початкове наближення частинок; б – розподіл після 10 ітерацій; в – розподіл після 20 ітерацій; г – розподіл після 50 ітерацій

Для обробки експериментальних даних, що сформовані у вигляді таблиць зміни вимірних значень різних фізичних величин (осьової сили і крутного моменту, діаметру пошкодження на виході інструмента із заготовки, шорсткості поверхні, зносу інструменту, температури та інше) від технологічних параметрів обробки (подачі, частоти обертання шпинделя) та геометричних даних інструменту (кутів заточування, зносу) розроблено алгоритм методу «сірого реляційного аналізу», що реалізований у вигляді програмного забезпечення Це дозволяє виключно точно визначити поєднання технологічних параметрів (для обраного інструменту), що забезпечують найкращі показники при обробці у діапазоні їх зміни. Вирішена задача пошуку значень подачі, частоти обертання шпинделя і головного кута в плані які забезпечують мінімальне значення шорсткості і фактору розшарування при свердленні епоксидного склопластику свердлом з твердого сплаву K10.

У **восьмому** розділі наведені 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.

Для операції свердління ПКМ виконано дослідження впливу параметрів свердління на зношування інструменту і величину фактору розшарування. Вирішено задачу свердління вуглепластику марки T300/5208 з об'ємним вмістом волокон 55%. Свердління заготовки товщиною 30 мм здійснено свердлом з твердого сплаву BK8 діаметром 10 мм на повну глибину. Обрано спіральне свердло з нормальною заточкою. Отримано залежності величини глибини початку розшарування від величини подачі. Використовуючи емпіричні залежності для шорсткості і швидкості різання при заданому значенні стійкості інструменту, одержані співвідношення, що пов'язують задане граничне значення глибини початку розшарування з величиною подачі та швидкості різання.

Аналогічно для подачі побудовано залежність швидкості свердління від глибини початку міжшарового руйнування. Наявність цієї залежності дозволяє, використовуючи емпіричне вираження для прогнозованої шорсткості, розрахувати значення шорсткості як функцію заданої глибини початку міжшарового руйнування, що приведено на рис. 9.

Отримане співвідношення, що зв'язує величину шорсткості обробленого отвору і величину глибини розшарування, дозволяє на стадії розрахунку режимів свердління визначити при необхідності величину початку розшарування або шорсткості проектованої операції свердління шаруватого композиту.

Таким чином, аналізуючи отримані розрахункові результати визначено, що діапазон зміни величини подачі при свердлінні композиційних матеріалів 0,08 – 0,60 мм/об у більшості випадків гарантує утворення міжшарових дефектів у вигляді розшарування на глибині не більше ніж 1 мм по нижній кромці заготовки. Отримані результати справедливі при свердлінні односпрямованого полімерного композиту спіральним свердлом із твердого сплаву.

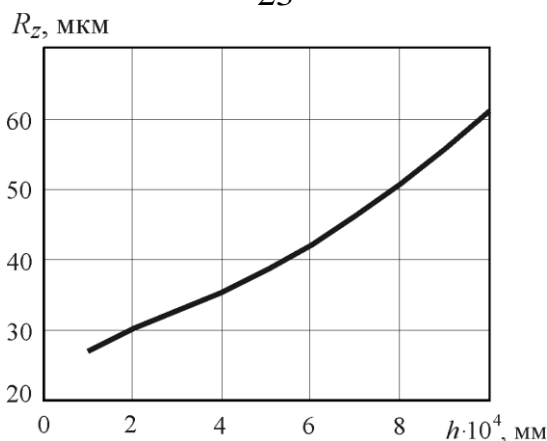


Рисунок 9 – Залежність величини шорсткості від передбачуваного значення глибини початку міжшарового руйнування

Аналогічна задача вирішена для свердління при тих же умовах того ж матеріалу свердлом з твердого сплаву з підрізаними різальними кромками. Для заданих граничних значень глибини початку розшарування отримано залежність зміни довжини тріщини від діаметра свердла і залежність довжини тріщини від відносини сили, що діє на периферії свердла до осьової сили (рис. 10)

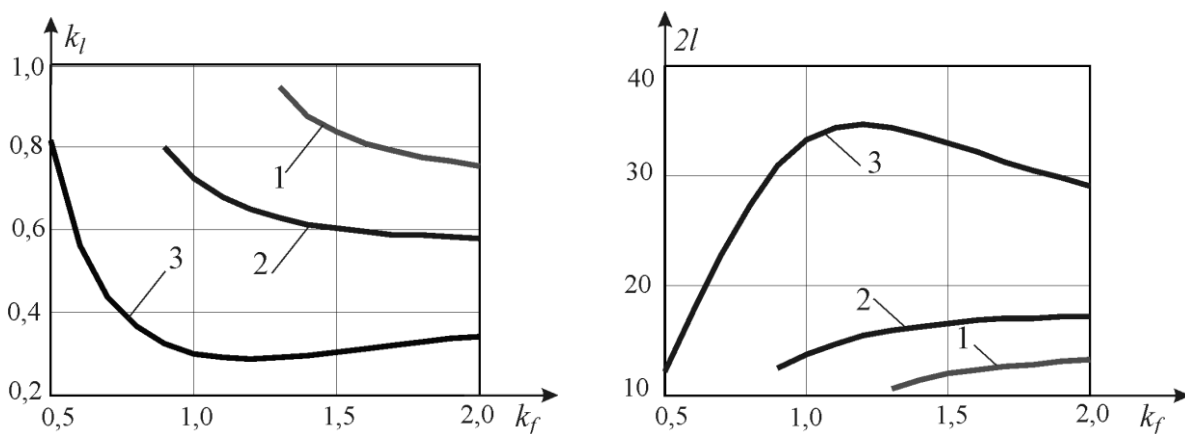


Рисунок 10 – Залежність параметрів процесу від відношення сили, що діє на периферії до величини осьової сили, що діє по центру k_f , для різних значень глибини розшарування 1 – $[h] = 0,35$ мм; 2 – $[h] = 0,40$ мм; 3 – $[h] = 0,45$ мм: а – зміни відношення діаметра свердла до довжини тріщини розшарування k_l ; б – зміни довжини тріщини

Для перевірки теоретичної розрахункової моделі розподілу напружень у контакті інструмент-матеріал, що приведена у розділі 5, проведена серія чисельних експериментів для операції точіння склопластику. Перевірявся збіг теоретичних розрахункових і експериментальних значень температури для різних швидкостей різання.

Для моделей на рис. 2, 3 проаналізована обробка точінням епоксидного односпрямованого склопластику армованого джгутами з алюмоборосілікатного скла. Різання здійснюється поперек волокон. У площині XOZ матеріал ізотропний.

Значення складових сили різання для параметрів точіння $v=2$ м/с, $s=0,05$ мм/об і $t=0,5$ мм $P_z=62$ Н, $P_y=28$ Н. Це навантаження умовно розподілене уздовж передньої поверхні різця $p_z=-620$ Н/мм² и $p_y=-280$ Н/мм². Передній кут приймався 0° , 15° , -15° . Середній діаметр джгутів 270 мкм (з відхиленням від середнього не більш 10%). Сполучне – епоксидна смола ЕДТ-10. Об'ємний вміст скловолокна 60%, сполучного – 40%. Упаковка джгутів квадратична. Фізичні характеристики (пружні постійні) компонентів склопластику такі: $E_{11}=4,853 \cdot 10^4$ Па; $E_{22}=8,876 \cdot 10^3$ Па; $\nu_{12}=0,285$; $G_{12}=4,666 \cdot 10^3$ Па.

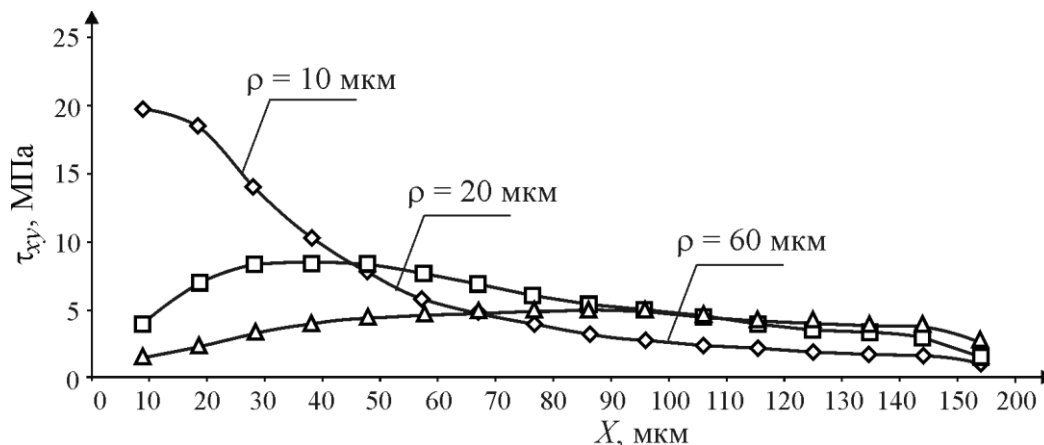


Рисунок 11 – Розподіл дотичних напружень τ_{xy} уздовж лінії зрізу в залежності від величини радіуса закруглення вершини інструменту

На рис. 11 для швидкості різання 60 м/хв і подачі 0,05 мм/об, надано розподіл дотичних напружень в залежності від величини радіуса закруглення. Руйнування при обробці різанням ПКМ відбувається шляхом зрізу при наявності малого радіуса закруглення (гострий інструмент). У цьому випадку значення дотичного напруження, що відповідає за зріз, досягає максимуму (рис. 5, 10). При збільшенні радіуса закруглення інтенсивність напружень зрізу зменшується і характер руйнування змінюється на зріз-відрив.

Аналіз результатів і їх порівняння з експериментальними даними показали, що у якості граничної глибини різання рекомендується значення не більш 1 мм, швидкість різання не більше 3 м/с, подачу не більш 0,3 мм/об. Виконання таких умов при обробці склопластику гарантує відсутність термодеструкції сполучного і, як наслідок, відсутність його налипання на задню поверхню інструмента. Прийняття таких мір забезпечує достатньо високу стійкість інструменту при виконанні заданих вимог до якості обробленої поверхні.

Для задачі різання епоксидного склопластику армованого джгутами, розглянуто задачу старту тріщини по лінії зрізу. Навантаження прикладене у вигляді зосередженого нормального та дотичного зусилля уздовж берегів тріщини. Параметри інструменту: передній кут $\gamma=0^\circ$; задній кут $\alpha=12^\circ$; кут у плані $\phi=45^\circ$; зношування по задній поверхні не враховувалось $h_z=0$ мм. Технологічні параметри в розрахунках: подача $s=0,075; 0,1; 0,21; 0,32; 0,42; 0,51$ мм/об;

глибина різання $t=0,5; 1; 1,5; 3; 4; 5$ мм; швидкість різання 10 м/хв. В табл. 1 надано значення КІН для глибини різання 1 мм, які одержані з співвідношення В.В. Панасюка, як функція подачі для довжини тріщини $l=10^{-5}$ при ортогональному різанні.

Таблиця 1 – Значення КІН K_r , як функція подачі s

Значення КІН	Значення подачі s , мм/об					
	0,075	0,1	0,21	0,32	0,42	0,51
K_r , кН/м ^{3/2}	15,7	17,7	23,9	27,9	30,6	32,3

Значення критичного КІН такого матеріалу знаходиться в межах 4,0–6,0 кН/м^{3/2} і, таким чином, визначена мінімальна подача при якій здійснюється старт тріщини руйнування.

До опису процесу зносу вершини різця при різанні ПКМ застосовано модель абразивного зносу. Визначені закономірності використовуються в математичному забезпеченні розрахунку оптимальних режимів різання композитів і прогнозуванні якості обробленої поверхні з урахуванням зміни геометрії ріжучого інструменту з часом. Прийнято, що залежність величини зносу носить спадковий характер і в більшості випадків має місце степінний зв'язок інтенсивності (швидкості) зношування від тиску і швидкості контактної взаємодії

$$\frac{\partial w(Q, \tau)}{\partial \tau} = K_w p^n(Q, \tau) v^m(Q, \tau) \tau^q,$$

де w – величина зносу в точці Q контактуючих поверхонь, м; p – контактний тиск, Па; τ – час контактної взаємодії, с; K_w – коефіцієнт зношування, який не залежить від часу; n, m, q – постійні, що визначаються з експериментів.

При механічній обробці виробів з ПКМ етап інтенсивного зношування інструменту має невелику тривалість за часом (приробіток) і залежить від режиму різання. Основний час роботи інструменту супроводжується зношуванням з постійною швидкістю, що підтверджується експериментальними даними. При цьому контактний тиск є практично незмінна величина, а величина зносу лінійно залежить від часу. Тоді співвідношення другого етапу стаціонарного зношування приймається у вигляді

$$\frac{\partial w(Q, \tau)}{\partial \tau} = K_w v^m(Q) p^n(Q, \tau).$$

Як на першому, так і на другому етапі визначальним є розподіл контактного тиску, який змінюється у часі і залежить від історії контактної взаємодії, тобто носить спадковий характер.

На рис. 12 наведено порівняння розрахункових даних за формулою нестационарного зносу, що показана суцільною лінією, стаціонарного зносу – штриховою і експериментальними значеннями (+ і □) залежності величини зно-

су по задній поверхні при точінні склопластику ЭФБ-П для подачі $s=0,21$ мм/об, глибині різання $t=1,5$ мм на різних швидкостях.

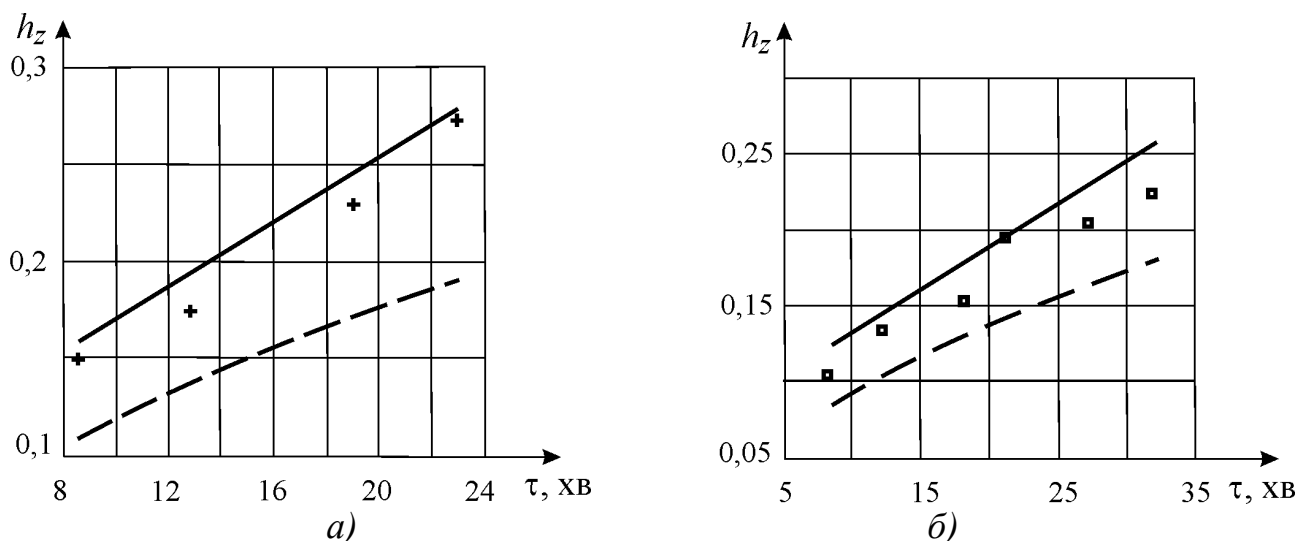


Рисунок 12 – Залежність величини зносу по задній поверхні від часу обробки:
а – швидкість 125 м/хв.; б – 115 м/хв

У додатках наведено види і типи універсального інструменту, який використовується при точінні і свердлінні ПКМ; результати аналізу напружено-деформованого стану в контактї інструмент–композит та вплив на його розподіл геометричних параметрів різців, що отримані чисельним моделюванням методом граничних елементів; відомі з науко-технічної літератури емпіричні залежності розрахунку силових факторів для різних типів інструментів і фактору розшарування при обробці ПКМ; залежність максимальної температури в контактї від технологічних факторів; опис математичного забезпечення рішення задач оптимізації методом «рою частинок» и «сірого реляційного аналізу»; опис математичного забезпечення, що реалізує наукові положення дисертації для рішення прикладних виробничих задач; акти впровадження практичного застосування результатів дисертаційної роботи у виробництво на ПАО «ФЕД» та АО «ХАРП».

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну проблему удосконалення технології механічної обробки полімерних композиційних матеріалів за рахунок застосування теорії механічного руйнування до моделювання різання ПКМ, розробці математичних моделей і рішення задачі оптимізації для вибору технологічних параметрів обробки, що гарантують зазначену якість виробів із ПКМ.

1. Сформульована теорія спрямованого руйнування полімерного композиту при його механічній обробці, що дозволяє змоделювати технологічні процеси операцій точіння та свердлення, як регульоване і цілеспрямоване руйнування припуску.

2. Розроблено математичну модель зняття припуску при механічній обробці ПКМ як реалізацію фізичного процесу руху тріщини руйнування, що дозволило системно обґрунтовано вибір раціональних геометричних характеристик інструменту і оптимальних технологічних параметрів обробки, що дають гарантовану якість обробленої поверхні.

3. На основі теорії руйнування узагальнена математична модель механічного перерізу неоднорідних і шаруватих структур, для якої отримані співвідношення, що дозволяють враховувати вплив технологічних параметрів обробки на появу дефектів типу розшарування, розкошлячення і висмикування елементів армування, та здійснити математичне моделювання розподілу та величини дефектів.

4. Запропонована математична модель теплообміну, яка покладена в основу чисельних досліджень розподілу температури в контактній інструмент-матеріал. Отриманий результат дає можливість визначити середню і максимальну температуру різання, прогнозувати появу припалів і можливу деструкцію матриці, що є основою визначення якості поверхні.

5. Розроблено математичну модель зносу інструменту і прогнозування інтенсивності цього процесу від технологічних параметрів обробки, що дозволяє оцінити погіршення якості поверхні отворів за рахунок зміни геометричних параметрів інструменту у часі.

6. Підтверджено, що адгезійний зв'язок елементів армування та сполучного, об'ємний вміст наповнювача, характер переплетення необхідно враховувати при оптимальному виборі технологічних параметрів різання, що дозволяє підвищити точність одержаного рішення.

7. Обґрунтовано та розроблено процедуру призначення режимних параметрів при свердлінні, яка базується на визначенні подачі з умов мінімізації величини розшарування на виході свердла і виконання обмежень по шорсткості і температурі, що гарантує припустимі розміри пошкоджень на виході інструменту із заготовки і високу якість обробленої поверхні.

8. На основі запропонованої теорії та розроблених моделей створено математичне забезпечення для автоматичного призначення інструменту, технологічних параметрів та оцінки якості обробки ПКМ, за допомогою якого вирішено практичні задачі.

9. Результати роботи впроваджено у виробництво на машинобудівних підприємствах м. Харкова ПАО «ФЕД» і АО «ХАРП», та у навчальному процесі кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів НТУ «ХП».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Механическая обработка волокнистых полимерных композитов / Н.В. Везуб, А.П. Тарасюк, Г.Л. Хавин, А.А. Гетманов – Харьков: Изд-во ХНАДУ (ХАДИ), 2001. – 180 с.

Здобувачем написано глави 1-4, де розглянуті питання моделювання контактної взаємодії ріжучого інструменту і матеріалу, теплові явища при різанні ком-

позитів та вплив зносу на значення середньої температури в зоні обробки.

2. Хавин Г.Л. Развитие микротрещин при упругом взаимодействии сверхтвердых материалов / Г.Л. Хавин // Вестник ХГПУ. – 1999. – №32. – С.136–142.

3. Хавин Г.Л. О влиянии адгезионной прочности компонентов при механической обработке композиционных материалов / Г.Л. Хавин // Вестник ХГПУ. – 1999. – №45. – С.36–39.

4. Хавин Г.Л. Распределение срезающих напряжений в контакте инструмент-стеклопластик / Г.Л. Хавин // Вестник Инженерной Академии Украины. – 2000. – №1. – С. 347–350.

5. Хавин Г.Л. Температурное поле в стеклопластиках при высокой скорости резания / Г.Л. Хавин // Вестник Инженерной Академии Украины. – 2001. – №3. – С. 512–515.

6. Верезуб Н.В. Энергетические аспекты разрушения полимерных композитов при резании / Н.В. Верезуб, А.П. Тарасюк, Г.Л. Хавин // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2001. – №59. – С. 28–34.

Здобувачем розроблено теоретичні основи використання енергетичного балансу при різанні ПКМ, у тому разі врахування кінетичної енергії на старт та просування магистральної тріщини..

7. Верезуб Н.В. Механика разрушения волокнистых полимерных композитов при резании / Н.В. Верезуб, А.П. Тарасюк, Г.Л.Хавин // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. – №61. – С. 206–213.

Здобувачем розроблено математичну модель руйнування при різанні ПКМ, яка заснована на енергетичному балансі роботи зовнішніх сил і сил дисипації при руйнуванні поверхневого шару (припуску).

8. Хавин Г.Л. Автоматизированный расчет оптимальных технологических параметров при точении стеклопластиков / Г.Л.Хавин // Резание и инструмент в технологических системах. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. – №62. – С. 162–167.

9. Хавин Г.Л. Резание композиционных стеклопластиков с позиций механики разрушения / Г.Л. Хавин // Вісник НТУ «ХПИ». – Харків: НТУ «ХПИ». – 2002. – №9. – С. 97–103.

10. Хавін Г.Л. Розвиток тріщини руйнування при різанні склопластиків / Г. Л. Хавін // Вісник НТУ «ХПИ». – Харків: НТУ «ХПИ». – 2002. – №19. – С. 52–57.

11. Хавін Г. Л. Модель контактного руйнування при різанні склопластиків / Г.Л. Хавін // Вісник НТУ «ХПИ». – Харків: НТУ «ХПИ». – 2003. – №16. – С. 132–138.

12. Хавин Г.Л. Автоматизированный выбор режимов обработки при сверлении композиционных материалов / Г.Л. Хавин // Вісник НТУ «ХПИ». – Харків: НТУ «ХПИ». – 2004. – №28. – С. 101–107.

13. Хавин Г.Л. Моделирование процесса изнашивания инструмента при резании композиционных материалов / Г.Л. Хавин // Вісник НТУ «ХПИ». – Харків: НТУ «ХПИ». – 2004. – №44. – С. 3–7.

14. Хавін Г.Л. Формулювання задачі статистичної оптимізації процесу рі-

зання композиційних матеріалів з урахуванням надійності ріжучого інструменту / Г.Л. Хавін // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2005. – №39. – С. 3–8.

15. Хавін Г.Л. Упругое восстановление поверхностного слоя при обработке композиционных материалов / Г.Л. Хавін // // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2006. – №18. – С. 78–81.

16. Хавін Г.Л. До питання зміни розмірів отворів армованих композиційних матеріалів після обробки / Г.Л. Хавін // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – №1. – С. 129–132.

17. Хавін Г.Л. Моделювання тріщини руйнування при різанні армованих композиційних матеріалів / Г.Л. Хавін // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – №17. – С. 75–80.

18. Хавін Г.Л. Чисельний аналіз інтенсивності напружень тріщини руйнування при різанні армованих композиційних матеріалів / Г.Л. Хавін // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – №4. – С. 75–80.

19. Хавін Г.Л. Моделирование абразивного износа инструмента при точении армированных композиционных материалов / Г.Л. Хавін // // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – №22. – С. 66–76.

20. Хавін Г.Л. К определению составляющих силы резания при точении армированных композиционных материалов / Г.Л. Хавін, В.Ю. Антонец // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2008. – №23. – С. 87–92.

Здобувачем зроблено постановку задачі і основні теоретичні виводи до побудови математичної моделі розрахунку складових сили різання при точінні полімерних композитів..

21. The use of PHE to improve energy efficiency in production / P. Kapustenko, O. Arsenyeva, S. Boldyriyev, G. Khavin // Journal of Cleaner Production. – Elsevier. – 2009. – 17, N10. – P. 951–958.

Здобувач проведено розрахунки по оптимальному призначенні режимів розточування при обробці отворів у пластинах з композиційного матеріалу для використання у теплообмінних апаратах.

22. Хавін Г.Л. Моделирование изнашивания инструмента при точении композиционных материалов / Г.Л. Хавін // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2009. – №4. – С. 56–61.

23. Mathematical Modeling and optimal Design of PFHE /O. Arsenyeva, L. Tovazhniynskyy, P. Kapustenko, G. Khavin // Chemical Engineering Transaction. – 2010. – 21. – P. 223–228.

Здобувачем досліджено вплив різних параметрів на якість математичної моделі, що дозволяє прогнозувати якість обробленого отвору на виході інструменту із заготовки.

24. The new corrugation pattern for low Pressure Plate Condensers / O. Arsenyeva, L. Tovazhniynskyy, P. Kapustenko, G. Khavin // Computer Aided Chemical Engineering. – 2010. – 28. – P. 1327–1332.

Здобувач розробив математичну модель та алгоритм до розрахунків процесу обробки отворів у пластинах теплообмінників, що використовуються для роботи з агресивними середовищами.

25. Хавін Г.Л. Закономірності зносу інструменту при обробці полімерних композиційних матеріалів / Г.Л. Хавін // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XVIII міжн. наук.-практ. конф. (м. Харків, 12-14 травня 2010 року) – Харків: НТУ «ХПІ». – 2010. – Ч.1. – С. 158.

26. Хавин Г.Л. Моделирование составляющих сил резания / Г.Л. Хавин // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011. – №40. – С. 133–138.

27. Optimal design of PFHE for efficient heat recovery in process industries / O. Arsenyeva, L. Tovazhniynskyy, P. Kapustenko, G. Khavin // Energy. – 2011. – 36. – P. 4588–4598

Здобувач обґрунтовано використання запропонованої математичної моделі до оптимального вибору технологічних параметрів обробки отворів у пакетах пластин теплообмінних апаратів.

28. Хавин Г.Л. Разрушение и изнашивание режущих кромок инструмента при механической обработке полимерных композиционных материалов / Г.Л. Хавин // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №53(959). – С. 66–71.

29. Хавин Г.Л. Моделирование механизма процесса резания композиционного материала / Г.Л. Хавин // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №4. – С. 64–68.

30. Хавин Г.Л. Моделирование межслойного разрушения при сверлении композиционных материалов / Г.Л. Хавин // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2013. – № 83. – С. 277–285.

31. Хавин Г.Л. Моделирование величины межслойной трещины при сверлении полимерных композитов / Г.Л. Хавин, Е.С. Касьян // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – № 49 (1091). – С. 125–132.

Здобувач розробив постановку задачі і теоретичні основи рішення задачі визначення міжшарової тріщини при роботі спіральним свердлом при зміні режимних параметрів обробки.

32. Хавин Г.Л. Межслойное трещинообразование при сверлении полимерных композитов / Г.Л. Хавин // Физические и компьютерные технологии: труды 19-й междунар. научно-практ. конф. (г. Харьков, 25-26 июня 2014 г.) – Харьков: ГП ХМЗ «ФЭД». – 2014. – С. 99–104.

33. Хавин Г.Л. Трещинообразование при сверлении полимерных композиционных материалов / Г.Л. Хавин // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. – №42(1085). – С. 129–137.

34. SPHE for Efficient Heat Recovery under the Industrial Application / O. Arsenyeva, L. Tovazhniynskyy, P. Kapustenko, G. Khavin // Chemical Engineering Transactions. – 2015. – 45. – P. 1231–1236.

Здобувачем розроблено алгоритм та математичну модель до розрахунків по вибору оптимальних технологічних параметрів свердлінні отворів у пакетах спіральних теплообмінників.

35. Хавин Г.Л. Образование дефектов при сверлении слоистых композитов и механизм появления расслаивания / Г.Л. Хавин // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – №4(1113). – С. 96–100.

АНОТАЦІЇ

Хавін Г.Л. Моделювання, оптимізація й проектування технологічних процесів механічної обробки полімерних композиційних матеріалів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.08 – технологія машинобудування. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, 2016.

Дисертацію присвячено розвитку технології механічної обробки полімерних композиційних матеріалів. Використовуючи досягнення механіки руйнування і контактного руйнування розроблено теорію різання волокон (джгутів) при механічній обробці волокнистих полімерних матеріалів. Побудовано математична модель на базі метода граничних елементів і лінійної механіки руйнування. Отримані закономірності розподілу напружень в контактній вершині інструменту з крихким матеріалом в залежності від геометричних параметрів інструменту та технологічних параметрів обробки. З позицій механіки руйнування надано залежність спрямованого руйнування від режимів різання і їх вплив на ефективність процесу обробки. Розроблено принципи призначення інструменту і вплив марки матеріалу у та його геометричних параметрів на стійкість. Запропоновано модель прогнозування фактору розшарування при свердлінні ПКМ. Досліджено вплив складу ПКМ і напрямку армування на якість просвердлених отворів. Проведено систематизацію відомих емпіричних залежностей силових факторів і фактору розшарування при обробці різних видів ПКМ різними типами інструментів. Сформульовано задачі оптимізації при механічній обробці, які рішенняються методом «рою частинок» і «сірого реляційного аналізу». Створено математичне забезпечення щодо вибору оптимальних режимів обробки ПКМ.

Ключові слова: технологічний процес, обробка отворів, якість поверхні, полімерні композити, режими різання, розшарування, продуктивність, контактне руйнування.

Хавин Г.Л. Моделирование, оптимизация и проектирование технологических процессов механической обработки полимерных композиционных материалов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2016.

Диссертация посвящена развитию технологии механической обработки полимерных композиционных материалов. Решена научно-техническая задача повышения качества и производительности операций точения и сверления за счет применения теории рационального выбора инструмента и оптимального расчета режимных параметров обработки. Используя достижения механики разрушения и контактного разрушения, разработана теория перерезания воло-

кон (жгутов) при механической обработке ПКМ. Сформулирована математическая модель зарождения трещины в контакте как результат внедрения абсолютно жесткого индентора заданной кривизны. Используя метод граничных элементов, разработана численная модель контактного взаимодействия вершины инструмента с обрабатываемым композитом. Задача решается в несколько этапов. На последнем этапе моделируется контактное взаимодействие вершины инструмента и фрагмента ПКМ в виде «жгут-связующее-жгут». Получены закономерности распределения напряжений в контакте вершины инструмента с хрупким материалом в зависимости от геометрических параметров инструмента и технологических параметров обработки. С позиций механики разрушения представлена зависимость направленного разрушения от режимов резания и их влияние на эффективность процесса обработки. Теоретически обосновано появление дефектов обработки как следствие реализации хрупкого механизма разрушения при резании композитов и исследовано влияние технологических параметров резания на характер разрушения в контакте инструмент-материал.

В рамках предложенной математической модели исследовано влияние геометрических параметров инструмента на распределение напряжений сдвига, вызывающих появление и рост трещины перерезающей волокна. Проанализировано распределение тепловых потоков и температурного поля в очаге деформации, получены зависимости изменения температуры от скорости контактного взаимодействия, подтвержденные численными расчетами. Предложены принципы назначения инструмента и влияние марки материала инструмента и его геометрических параметров на стойкость. Для прогнозирования изнашивания режущего инструмента представлена модель изменения геометрии инструмента по задней поверхности. Предложена модель прогнозирования фактора расслаивания при сверлении ПКМ в зависимости от действующей осевой силы. Исследовано влияние состава ПКМ и направления армирования на качество просверленных отверстий. Проведена систематизация известных эмпирических зависимостей силовых факторов и фактора расслоения при обработке различных видов ПКМ различными типами инструментов. Представлены оценки по влиянию состава ПКМ, армирования и направления обработки на разломачивание поверхности отверстий и шероховатость. Сформулированы задачи оптимизации при механической обработке, которые решаются методом «роя частиц» и «серого реляционного анализа». Для операции сверления разработана новая схема назначения режимов сверления в основу, которой положен выбор величины подачи не по шероховатости, а по заданному значению величины расслаивания на выходе инструмента и коэффициенту разломачивания на внутренней поверхности отверстия. На основе представленных моделей и методов оптимального проектирования создано математическое обеспечение для выбора оптимальных режимов токарной и сверлильной обработки ПКМ.

Ключевые слова: технологический процесс, обработка отверстий, качество поверхности, полимерные композиты, режимы резания, расслаивание, производительность, контактное разрушение.

Khavin G.L. Simulation, optimization and design of technological processes of machining of polymeric composite materials. – Manuscript.

Thesis for granting the Degree of Doctor of Technical sciences on a specialist 05.02.08 – Manufacturing engineering. – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, 2016.

The thesis is dedicated to the improvement of technology machining of polymeric composite materials (FRP). With the achievement of fracture mechanics and contact fracture developed a theory cut fibers (rovings), when machining fibrous polymeric materials. A mathematical model based on the boundary element method and linear fracture mechanics is developed. The resulting patterns of distribution of stresses in contact with the top of the instrument with fragile material, depending on the geometrical parameters of the tool and process parameters processing are archived. From the point of fracture mechanics provided technological dependence on the cutting conditions and their impact on the effectiveness of the treatment. Aspects of tool assigning and influence of tool mark material and its geometric parameters on tool life are presented. The model of prediction delamination factor when drilling FRP is proposed. Influences of FRP composition and direction reinforcement on the quality of the drilling holes are considered. The systematization of known empirical relationships of power factor and delamination factor in the processing of various types of FRP for different types of tools is provided. The problems of machining optimization are formulated and they are solved by «swarm particles» method and «gray relation analysis» method. The software for the choice of the optimum cutting conditions of turning and drilling processing FRP is created.

Key words: technological process, hole processing, surface quality, polymer composites, cutting conditions, delamination, productivity, contact fracture.

Підписано до друку 27.05.2016 р. Формат 60x90/16.
Папір Сору Paper. Друк – різнограф.
Гарнітура Times New Roman. Умовн. друк. арк. 1,4
Обл. вид. арк. 1,4. Наклад 110 прим. Зам. № 325

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ»
(ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво ВО4 № 022953 від 31.03.1994 р.)
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1
тел. 7-170-354
www.modelist.in.ua