

УДК 621.9.02

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОМПОЗИТІВ НА ОСНОВІ КАРБОНОВИХ ВОЛОКОН ЗАСТОСУВАННЯМ РАЦІОНАЛЬНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ**О. О. Ченчева, Є. Є. Лашко, О. А. Самусенко, В. Т. Щетинін, О. Ф. Саленко**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: salenko2006@ukr.net

Показано особливості обробки зразків із вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів фрезеруванням кінцевими фрезами та відрізним кругом; пилянням реноватором; свердлінням спіральними й алмазовмісними трубчастими свердлами; гідроабразивним різанням. Оцінено напружений стан зони різання в композиційних матеріалах на основі карбонівих волокон при різних методах обробки. Установлено прогнозовану деструкцію матеріалу в залежності від часу взаємодії поверхні різання з інструментом і від часу експлуатації інструменту з максимально допустимим навантаженням. Наведено порівняння якості різку та стану ріжучої крайки інструментів, які короткочасно працюють з композитами. Виконано перевірку механічних характеристик досліджуваних зразків матеріалів. Рекомендовано для отримання репрезентативних зразків для механічних випробувань таку обробку: абразивне обрізання алмазовмісним інструментом, отримання умов для уведення гідроабразивного струменя (свердління) і подальша струминно-абразивна обробка.

Ключові слова: точність; пиляння; мікрофрезерування; свердління; гідроабразивне різання.**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ КАРБОНОВЫХ ВОЛОКОН ПРИМЕНЕНИЕМ РАЦИОНАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ****О. А. Ченчева, Е. Е. Лашко, А. А. Самусенко, В. Т. Щетинин, А. Ф. Саленко**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: salenko2006@ukr.net

Показано особенности обработки образцов из углерод-углеродистых композиционных материалов фрезерованием концевыми фрезами и отрезным кругом; пилением реноватором; сверлением спиральными и алмазодержащими трубчатыми сверлами; гидроабразивным резанием. Оценено напряженное состояние зоны резания в композиционных материалах на основе карбонных волокон при разных методах обработки. Установлено прогнозируемую деструкцию материала в зависимости от времени взаимодействия поверхности резания с инструментом и от времени эксплуатации инструмента с максимальной допустимой нагрузкой. Приведено сравнение качества реза и состояния режущей кромки инструментов, которые кратковременно работают с композитами. Выполнена проверка механических характеристик исследуемых образцов материалов. Рекомендовано для получения репрезентативных образцов для механических испытаний следующую обработку: абразивное обрезание алмазосодержащим инструментом, получение условий для введения гидроабразивной струи (сверление) и дальнейшая струйно-абразивная обработка.

Ключевые слова: точность; пиление; микрофрезерование; сверление; гидроабразивное резание.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Широке використання композиційних матеріалів на основі карбонівих волокон (ВВКМ) зумовлене високою міцністю виробів, їх легкістю, здатністю сприймати різні види силових навантажень, а для карбон-карбонівих матеріалів – здатністю зберігати механічні властивості в умовах високих (більше 2000°C) температур.

Як правило, заготовки виробів з карбон-карбону одержують викладенням джгутів, ниток або тканин на відповідні моделі з наступним насиченням піровуглецем в умовах високих температур [1], а з карбон-полімерних матеріалів – використанням препрегів з викладенням на модель і наступним просоченням компонентами поліефірних смол, що дозволяє на етапі формування матеріалу закладати головні вісі твердості та міцності, досягаючи бажаного рівня анізотропії властивостей елементів конструкції та готового виробу в цілому.

Незважаючи на те, що форма заготовки може бути наближена до форми готового виробу вже в процесі формування, існує необхідність кінцевої обробки заготовки по ряду площин, які в загальному випадку є криволінійними. Такими площинами є поверхні сполучення, отвори, пази, елементи опор і таке інше.

Ряд робіт [2, 3] свідчать про те, що волокнисті композиційні матеріали (насамперед полімерні) ма-

ють низьку оброблюваність, механічно обробляються тільки спеціальним інструментом, розшаровуються, деструктують з ушкодженням верхньої та нижньої крайок, що може вести до вибракування готової деталі. Якісна обробка (з мінімальною кількістю дефектів) можлива тільки спеціальним інструментом (свердлінням – [2, 4], фрезеруванням – [4], абразивною обробкою – [5]). Однак і в цих умовах поява дефектів є досить імовірною. Таким чином, очевидно є проблема одержання репрезентативних зразків, випробування яких дозволяє чітко визначити основні механічні характеристики матеріалу, як на рівні початкового структурного елемента, так і матеріалу в цілому.

В [5–7] показана можливість використання струминних методів обробки для різання композиційних матеріалів, причому в [5] також відзначається, що неоднорідна структура матеріалів й анізотропія властивостей вимагає додаткових заходів по запобіганню деструкції оброблюваних матеріалів і зниження ймовірності появи браку.

Автори [2] приводять порівняльну таблицю ефективності різних методів обробки заготовок з композиційних матеріалів на основі скляних і вуглецевих волокон, однак умови одержання якісних поверхонь не приводять.

Методи досліджень. Для проведення експериментальних досліджень використовувалося серійне та спеціальне лабораторне устаткування механічної і струминно-абразивної обробки. Струминно-абразивне контурне різання здійснювалося на лазерно-струминному комплексі ЛСК-400-5 з 5-координатною системою керування, який дозволяє здійснювати контурне різання гідроабразивним потоком діаметром 1,02 мм, який витікає із калібрувальної трубки з масовою витратою абразивних часток 0,4-0,6 кг/хв; у якості абразиву використовували гранатовий пісок фракцією 50/75 мкм. Швидкість контурної подачі становила 300-800 мм/хв і залежала від виду оброблюваного зразка. Абразивне різання здійснювали абразивним колом діаметром 150 мм з нанесеними методом гальванічної фіксації алмазними зернами фракцією 80/100 мкм, швидкість обробки – до 50 м/с. Свердління отворів здійснювали алмазовмісними свердлами трубчастого типу зі швидкістю різання до 10 м/с, обробку проводили на мікрофрезерному верстаті мод. Pгохон MF70, який також використовували й для виконання операцій мікрофрезерування кінцевими фрезами із твердого сплаву діаметром 2,0 і 2,5 мм зі швидкостями різання до 120 м/хв. Для виконання пазів і уступів у зразках спроектований та виготовлений спеціальний інструмент для зворотно-поступальної обробки (типу «реноватор»). Використовувався реноватор Bosch PMF 250 CES з полотном пиляльним алмазовмісним спеціально виготовленим Інститутом надтвердих матеріалів ім. В. Н. Бакуля НАН України.

Заглиблювальне полотно з полікристалічним напилюванням фракційністю 20-50 мкм забезпечує високоякісну обробку з одержанням геометричної точності в межах 9-10 класів і шорсткості поверхні не гірше 6,3 мкм на торці різку в зоні щільності до 95%.

Стан поверхні після обробки контролювали за допомогою растрового електронного мікроскопа REM-106-И й оптичного цифрового мікроскопа Omni_scan, підключеного до комп'ютера.

Вплив рідини (води) на механічні властивості оброблюваного матеріалу визначали на основі механічних випробувань дослідних зразків на розтягування. При цьому порівнювали зразки, отримані механічним способом і способом гідроабразивного різання, як відразу після завершення обробки (тобто коли зразки ще були вологими), так і після повного їхнього висихання. Сушіння зразків виконували в сушильній шафі при температурі повітря 60-75°C і русі повітря 150 м³/год.

Для визначення механічних властивостей матеріалів використовувалася універсальна дослідна машина УМЭ-10ТМ, призначена для статичних і циклічних випробувань розтягуванням-стискуванням або вигинанням при одночасній реєстрації діаграми деформування, яка фіксується тензодатчиком KELI DEG 50. Реєстрація даних проводилася за допомогою АЦП m-DAQ, під'єднаним до підсилювача сигналу.

Механічним випробуванням піддавали зразки стандартної форми (рис. 1), при розтягуванні зразка дослідна машина забезпечувала взаємне видалення робочих органів із заданою швидкістю деформування.

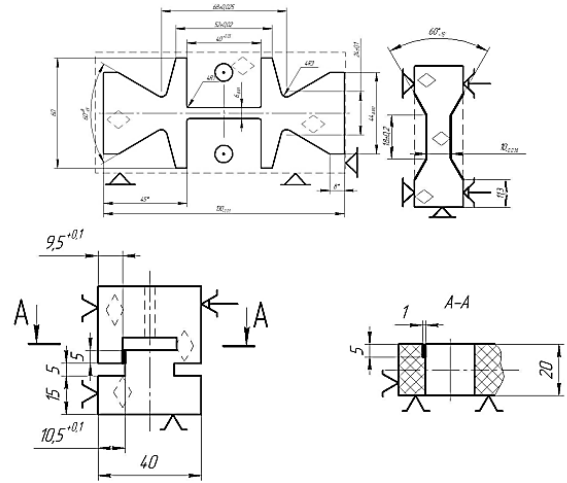


Рисунок 1 – Різні види зразків, використовуваних для випробувань на:
а) розтягування; б) вигин; в) зсув

Для визначення товщини деструктивного шару використовували еталонні зразки, отримані практично повним виключенням деструктивного шару за рахунок попереднього викладення зразка-свідка з наступною полімеризацією (або спіканням для вуглець-вуглецевих матеріалів).

Метою досліджень є підвищення точності визначення механічних властивостей ВВКМ застосуванням раціональних методів обробки зразків.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Якщо при виготовленні зразків з металів або неметалевих однорідних матеріалів утворений деструктивний шар T_d звичайно не перевищує 10-15 мкм для фінішних методів обробки, а точність виконання лінійних розмірів – бази випробування – відповідає IT6...IT7 і становить не більш 35-50 мкм, то похибка вимірювань контрольованої величини, зумовлена похибками виконання дослідного зразка не перевищує 1,5-2% і може бути зменшена за рахунок урахування фактичних розмірів заготовки.

Інша ситуація спостерігається при виготовленні зразків з композиційних матеріалів.

Неоднорідна структура матеріалу, просторове переплетення волокон з утворенням порожнин і зон відсутності матриці суттєво впливає як на якість поверхневого шару, так і на параметри міцності, контрольовані механічними випробуваннями.

Вивчення мікрофотографій зони обробки показало, що отримані дефекти можна класифікувати так (рис. 2):

- дефекти пружного відновлення волокон з матриці, у результаті якого витримується контрольований розмір, а волокна перебувають над поверхнею;
- дефекти порушення адгезійного зчеплення в приповерхній зоні, у результаті чого активний перетин зразка зменшується на величину деструкції;
- дефекти когезійного порушення в поверхневому шарі, при якому виникають мікро- і макротріщини направляються вглиб матеріалу та можуть активної рости при циклічному навантаженні.

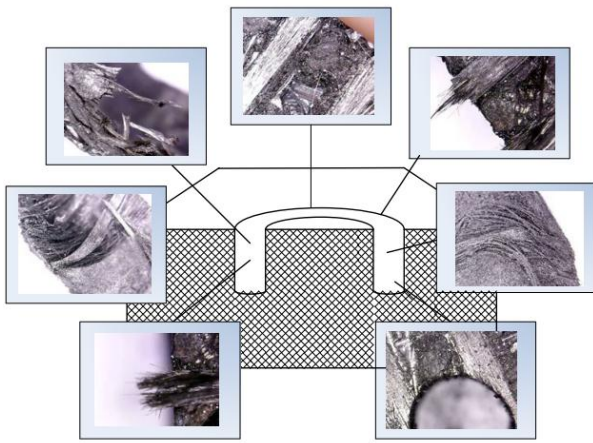


Рисунок 2 – Дефекти обробки композиційних матеріалів

Поява тих або інших дефектів визначається видом механічного впливу на оброблюваний матеріал, використанням інструментом.

Таким чином, існує певний зв'язок між виникаючими на поверхні обробки дефектами й умовами формування поверхні, що в загальному вигляді відповідає результатам, отриманим в [8].

Розглянемо основні механізми утворення дефектів при вирізанні заготовок різними методами.

Основним механізмом формування нових поверхонь при механічній обробці (наприклад, при *фрезеруванні кінцевими фрезами*) є процес утворення стружки, пов'язаний з багатоплановими явищами зародження та розвитку мікроефектів, що ведуть до виникнення тріщин у тілі оброблюваного матеріалу на макрорівні. Так, аналізуючи стружкоутворення при різанні матеріалу ріжучим клином автор [9] відзначив, що напружений стан у вершині тріщини, що утворилася під дією інструмента уздовж гіпотетичної поверхні різання, забезпечує розвиток і поширення тріщин у напрямку вектора швидкості головного руху. Теорія Гріффітса для пружних тіл, до яких можна віднести й розглянутий клас матеріалів, (за умови стабільної міцності в усіх напрямках) дає можливість очікувати відхилення тріщини від початкового напрямку при $K_{II} \neq 0$ (зміщення) на певний кут $\chi = -\chi_c$, який збігається з напрямком максимального значення сили P , при цьому остання зумовлює розвиток тріщини.

Збільшення критичного навантаження викликає деяке зростання критичної швидкості розвитку тріщини, одночасно скорочуючи шлях до початку її біфуркації. В армованих композитах існує критична швидкість поширення тріщин, яка не залежить від підведеної енергії. Це явище пояснюється поглинанням і накопиченням мікроефектів, локалізованих у напрямку приблизно $\chi = 60^\circ$, де існують максимальні розтягувальні напруження. Таким чином, прикладене зовнішнє зусилля, при якому буде спостерігатися активне тріщиноутворення, яке не повинне перевищувати опір розтріскуванню. На практиці цю умову забезпечити досить складно, оскільки періодична зміна сили різання зумовлюється як режимами різання, так і структурою матеріалу, хоча в [9] показано, що регулюванням виду навантаження

й енергосилових параметрів процес розгалуження та біфуркації може бути локалізований.

Дослідження особливостей лезового різання армованих неметалевих матеріалів, проведені авторами [2], зокрема, склопластиків, показують, що неоднорідна структура матеріалу призводить до перерозподілу областей накопичення мікротріщин: при русі ріжучого клина уздовж напрямку армування висока концентрація, взаємодія та злиття мікротріщин веде до утворення мікротріщин, які можуть перебувати на відстані від ріжучого клина або торкатися його, розташовуючись за вектором головного руху під кутом $15-20^\circ$; при русі ріжучого клина під кутом 90° до напрямку армування вони зосереджуються у полімерній матриці та на межі «волоконно-матриця». Біфуркація в цьому випадку йде під кутом $40-60^\circ$. Структура поперечно армованого пластику стримує розвиток магістральної тріщини та відводить її уздовж волокна. Саме на цій ділянці мають місце дефекти, пов'язані з хімічною полімеризацією, залишками реакцій, послабляють міцність композита в цій зоні.

Рух ріжучого інструменту також викликає значну деформацію волокон, веде до перерозподілу навантажень у зоні різання. У роботі [4, 8] також відзначається, що обробка поперечно армованого пластику відбувається зі значним розшаруванням волокон і матриці, порушенням структури поверхні й істотним зниженням якості обробки.

Періодичне зародження, розвиток і злиття тріщин, веде до відділення частинок матеріалу, що призводить до циклічності характеру процесу лезової обробки, при якому сила різання спочатку підвищується до максимального значення (при зародженні сітки тріщини), а потім стрімко знижується (з появою магістральної тріщини та відділенні елемента стружки).

Таким чином, механічне різання композитів вуглецевої групи лезовим інструментом супроводжується утворенням дефектного поверхневого шару, який може досягати $0,9-4,5$ мм.

При мікрорізанні абразивними зернами (наприклад, при обробці *відрізним кругом*) тріщиноутворення відбувається за подібною схемою. При цьому утворюються чотири основні типи тріщин: радіальні C_R , медіанні C_M , бічні C_L і кінчні C_K (рис. 3, тріщини а, б, в, г відповідно). Для різних матеріалів послідовність утворення тріщин може незначно відрізнятися, однак для основних крихких матеріалів ця послідовність має такий вигляд. Спочатку з'являються медіанні тріщини на межі між зонами деформації під і близько одиничним зерном. При знятті навантаження (у результаті сколювання або виривання зерна) ці тріщини виходять на поверхню подібно радіальним. Потім, при збільшенні навантаження або при його повному знятті, під дією залишкових напружень виникають бічні тріщини. Кінчні тріщини можуть виникати при значних величинах подачі, коли одиничне зерно впроваджується в оброблювану поверхню ударним способом.

У результаті досліджень [8] було показано, що сколювання матеріалу відбувається в основному через утворення бічних тріщин. Товщина дефектного шару в цьому випадку не перевищує $0,1-0,4$ мм.

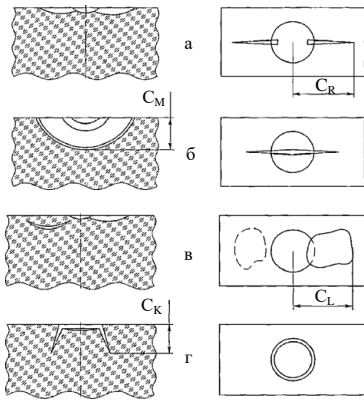


Рисунок 3 – Основні типи тріщин, що утворюються при роботі одиничного зерна

Застосування інструменту зворотно-поступальної дії (реноватора) призводить до того, що внаслідок обмежених швидкостей руху абразивних зерен, а також невеликих (не більше 3-4 мм) ходів поверхня виходить більш низької якості, для підвищення якої щільність нанесення алмазних зерен повинна бути максимально високою, а саме різання не повинне супроводжуватися значними силовими навантаженнями. Обсяг знімання матеріалу заглиблювальними пильними полотнами реноватора значно менший у порівнянні з різанням абразивним колом.

При свердлінні матеріалів спіральним свердлом силовий вплив змінюється, як і змінюється рівнодіюча, внаслідок чого зона тріщиноутворення охоплює певний обсяг матеріалу, що значно перевищує зону безпосереднього контакту.

Внаслідок недосконалості структури реальних композиційних матеріалів, а також відмінності фізико-механічних властивостей його компонентів, повний опір розтріскуванню буде залежати від різних проявів тріщиноутворення (виникнення тріщин зсуву або тріщин відриву). Якщо узяти до уваги, що напрямки тріщини завжди сприяє її розкриттю, завдання оцінювання імовірного напрямку розвитку тріщини зводиться до встановлення очікуваної епюри силового навантаження інструментом зони різання, яке залежить від схеми обробки й умов її виконання.

При свердлінні матеріалів алмазовмісними трубчастими свердлами на поверхні виникає певний мікрорельєф, товщина якого визначає висоту мікронерівностей R_a . Безпосередньо під ним перебуває тріщинуватий шар δ , набагато більш протяжний, ніж перший. Щільність і розмір тріщин зменшується при русі вглибину. Обидва шари являють собою зону деструкції.

Розглядаючи механізм тріщиноутворення можна відзначити, що основні параметри якості поверхневого шару залежать від довжини тріщин: величину R_a визначає розмір медіанних тріщин C_M , а глибину деструктивного шару δ визначає розмір конічних тріщин C_K (рис. 4).

Нижче тріщинуватого шару перебуває мікропластичний шар, що оточує кожну тріщину та поширюється на відстань t . Його товщина становить 1-2 мкм, що підтверджується даними проведених досліджень [8].

У роботі [8] встановлено, що шорсткість поверх-

ні пов'язана із загальною глибиною дефектного шару лінійним законом:

$$\delta = a \cdot R_a + b, \quad (1)$$

де a, b – постійні коефіцієнти.

Аналогічна залежність прослідковується й у дослідженнях тріщиноутворення: існує залежність між розміром конічних і медіанних тріщин, які визначають δ і R_a . У ході експериментів встановлено, що зазначені коефіцієнти залежать від зернистості алмазного порошку та властивостей оброблюваного матеріалу [9].

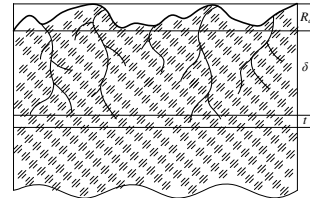


Рисунок 4 – Модель поверхневого шару матеріалу, обробленого алмазним свердлінням

Найнебезпечнішим дефектом при свердлінні полімерних композитів вважається розшарування між сусідніми шарами армування уздовж його напрямку.

Основною причиною появи розшарування є високе значення діючої осьової сили, величина якої в основному визначається подачею. Крім того істотну роль відіграє також неправильний вибір ріжучого інструменту та ступінь його зношеності. Для зменшення розшарування відомо кілька рішень, наприклад, зниження подачі та свердління в підкладну плиту. Міжшарове розшарування, що виникає при свердлінні композитів, є головним дефектом, який зменшує цілісність композита, його згинальну міцність та втомлену міцність під дією циклічного навантаження. Тому завдання створення математичних моделей, що дозволяють на стадії проектування технологічної операції свердління прогнозувати появу та зростання величини міжшарового розшарування, є актуальною й має практичну цінність.

Численні експериментальні спостереження показали, що розшарування з'являється навколо отвору на вході й виході інструмента із заготовки. Розшарування виникає при контактному навантаженні матеріалу заготовки осьовою силою. Це явище більш характерне свердлінню спіральними свердлами, ніж трубчастими алмазовмісними.

Поява міжшарових тріщин на вході зумовлене контактною взаємодією поперечної ріжучої крайки з поверхнею заготовки, у результаті чого тонкий шар починає лупитися, відділяється від сусіднього й утворюється зона розшарування навколо вхідного отвору. У момент, коли свердло перебуває у виході з отвору, число шарів композиту, що перебувають перед свердлом, зменшується, знижується їхня загальна твердість у структурі композиту. У результаті відбувається розшарування останніх шарів і руйнування останніх волокон (джгутів) у матеріалі.

Вивченню якісних і кількісних характеристик цього процесу присвячено досить багато досліджень [8, 10], однак для карбон-карбонівих матеріалів за-

лежностей одержуваного розшарування від режимів обробки немає.

Якщо прийняти, що свердло (рис. 5) являє собою трубу зовнішнім радіусом r_z і внутрішнім r_{bn} , труба

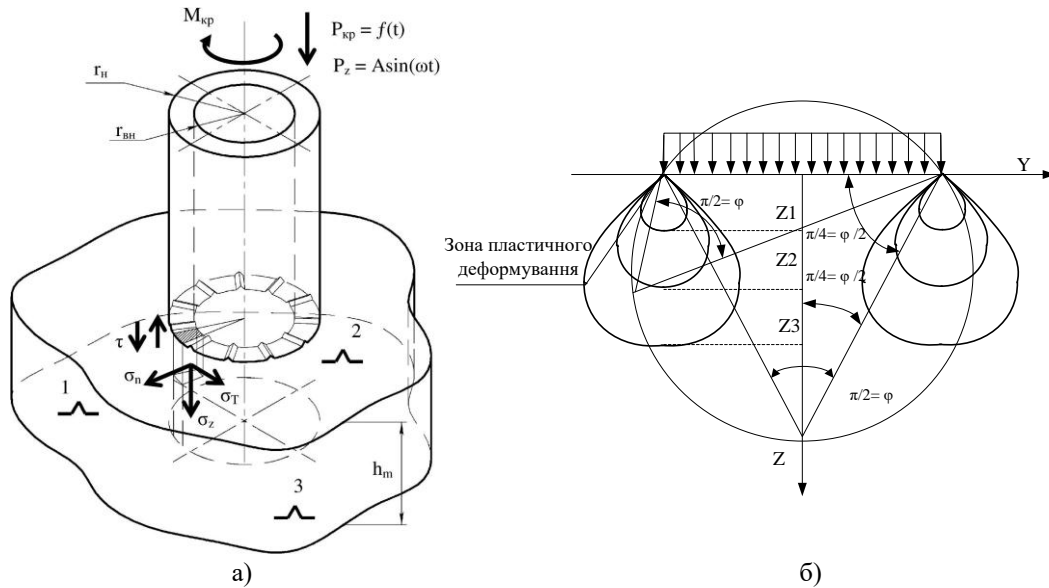


Рисунок 5 – Дія свердла (а) і напружено-деформований стан у зоні різання (б)

Складові переміщень $U(t)$ і $H(t)$ у певній точці поверхні сприймає практично перпендикулярне навантаження, які, згідно [9] для зв'язку напружень і деформації дозволяють записати величини $U(t)$ і $H(t)$:

$$U(t) = -\frac{(1-2\mu)}{G} \frac{P_z(t)}{(D_{max} - D_{min})^2} r, r > \frac{D_{max}}{2}, \quad (2)$$

$$H(t) = -\frac{(1-2\mu)}{G} P_z(t) \frac{2}{\pi(D_{max} - D_{min})}$$

де G – модуль зсуву оброблюваного матеріалу; μ – коефіцієнт Пуассона; ε – об'ємна деформація;

$$\Delta = \frac{d^2}{dr^2} + \frac{d}{rdr} + \frac{d^2}{dz^2} - \text{оператор Лапласа.}$$

Таким чином, розшарування матеріалу можливе в області, де U і H досягнуть критичного значення, а відповідні компоненти напружень і деформацій визначаються так:

$$\varepsilon = \varepsilon_r + \varepsilon_t + \varepsilon_z = \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{U}{r_m} \frac{\partial H}{\partial z},$$

$$\varepsilon = \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)G} (\sigma_r + \sigma_t + \sigma_z) = \frac{1-2\mu}{E} (\sigma_r + \sigma_t + \sigma_z). \quad (3)$$

Умова розшарування $\sigma_z \geq [\sigma_a], \sigma_r, \sigma_t \geq [\sigma_k]$.

Ряд робіт, зокрема [12, 13], свідчать про те, що, незважаючи на особливості методу, струминно-абразивна обробка є серйозною альтернативою механічному різанню й для композиційних матеріалів.

При струминно-абразивному різанні відбувається активне руйнування матеріалу як струменем рідини, так і частинками абразиву, які викликають ударне квазікрихке мікроруйнування з утворенням дрібнодисперсного шламу. Це явище спостерігається при різанні карбон-карбонівих матеріалів, у яких

розташована перпендикулярно до поверхні, і при силовому впливі викликає появу у відповідних мікробсягах тіла товщиною h_{ob} напружень $\sigma_r, \sigma_z, \sigma_t$ і τ .

відносно подовження наближається до нуля. Однак нещільна структура таких матеріалів, особливо при просторовому армуванні, вимагає розв'язання питання про відсутність ушкоджень потоком, який не є твердим індентором, як ми вже відзначали [11].

Для аналізу взаємодії двофазного потоку малого діаметра з перешкодою – неоднорідною оброблюваною заготовкою – скористаємося енергетичною концепцією, згідно з якою енергія E_{Σ} , надана потоку, перетворюється в роботу руйнування A_p і зміни стану поверхні A_c , а також витрачається на зміну напрямку руху потоку H , за винятком втрат на різних етапах E_n , у результаті чого розвивається вирва струминної ерозії та формується деструктивний поверхневий шар. При цьому борозенка різі утворюється як наслідок ряду послідовних положень струменя, при яких руйнування матеріалу здійснилося повністю, на всю товщину заготовки h . Загальне рівняння балансу енергії для випадку струминно-абразивного різання матиме вигляд:

$$E_{\Sigma} = A_p + A_c + H + E_n. \quad (4)$$

На основі міркувань [12] і з урахуванням результатів досліджень кінетична енергія струменя складе:

$$E_{\Sigma} = \frac{M_{ij} V_{ij}^2}{2} - E_c - H, \quad (5)$$

де M_{ij} – розподіл мас робочого середовища на площі контакту струменя, кг; V_{ij} – розподіл швидкостей руху робочого середовища в поперечному перерізі, м/с; E_n – втрати енергії в струмені, Дж.

Відхилення струминного потоку при напливами на кутовий дефлектор, яким може бути джгут волокон у композитах 3-D структури, може бути визначений за залежністю:

$$\varepsilon = \arctan \frac{a_1 - a_2 \sqrt{\frac{v}{v_0 \xi_{\max}}}}{\frac{y_d}{\xi_{\max}} - a_2 \tan \alpha \sqrt{\frac{v}{v_0 \xi_{\max}}}} - a_1 \tan \varepsilon_d \quad (6)$$

де постійні $a_1 = \frac{\varepsilon_d \cos \varepsilon_d}{\pi + \varepsilon_d}$; $a_2 = \frac{\pi + 0,6 \varepsilon_d}{\pi + 2 \varepsilon_d} \frac{\sin \varepsilon_d}{\sqrt{(1 - \varepsilon_d / \pi) / 2}}$; ε_d – кут огинаючої, яка визначається розташуванням волокна в матриці і який внаслідок переміщення струменя залежить від опору руйнуванню матеріалу та його структури; v – кінетична в'язкість рідини; v_0 – швидкість струменя; ξ – координата, вимірювана уздовж фронту (рис. 6).

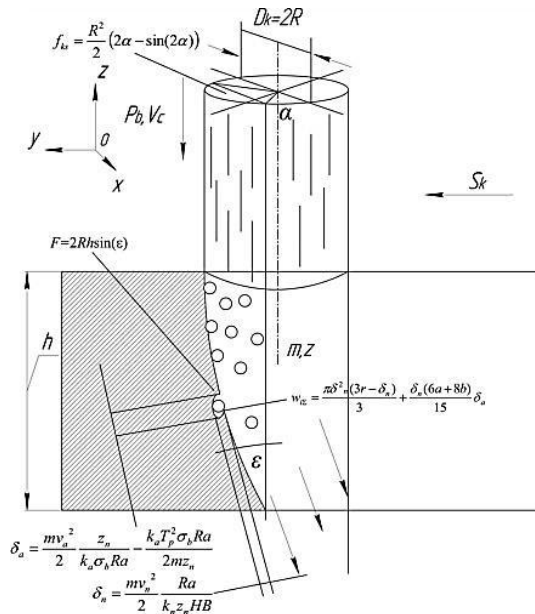


Рисунок 6 – Відхилення струменя при натіканні на фронт зони різання

Таким чином, режими різання, а також параметри застосовуваного інструмента безпосередньо визначають не тільки продуктивність обробки, але й товщину деструкції поверхневого шару, що необхідно враховувати при обробці зразків для механічних випробувань.

У процесі обробки відбувається зношування інструмента: зміна кутів на ріжучій крайці, викрушування абразивних зерен. Усе це призводить до того, що навіть при стабільних режимах різання параметри поверхневого шару змінюються.

Для прийнятих до уваги методів обробки (R_1 – фрезерування; R_2 – обробка абразивним кругом; R_3 – обробка реноватором (зворотно-поступальний рух); R_4 – свердління; R_5 – гідроабразивне різання) визначені максимальні напруження й епюри розподілу напружень за перетином різку в заготовках з вуглець-утримуючих композиційних матеріалів. Результати моделювання та мікроелектронного дослідження стану поверхні зведені в табл. 1.

З наведеного видно, що свердління та мікрофрезерування дозволяють одержувати мінімальну деструкцію поверхневого шару; у той же час гідроабразивне прошивання отворів веде до прогнозованої

деструкції матеріалу на значному віддаленні від точки додавання навантаження.

Зміна ширини зони деструкції (рис. 7) виміряна на натурних зразках (показана у вигляді окремих точок на діаграмі) показує таке. «Нетвердість» гідроабразивного струменя призводить до того, що силова схема взаємодії постійно змінюється, а, отже, складові зростають, тобто потік згодом просто буде розмивати оброблюваний зразок, що вимагає мінімізації часу знаходження струменя в нерухомому стані.

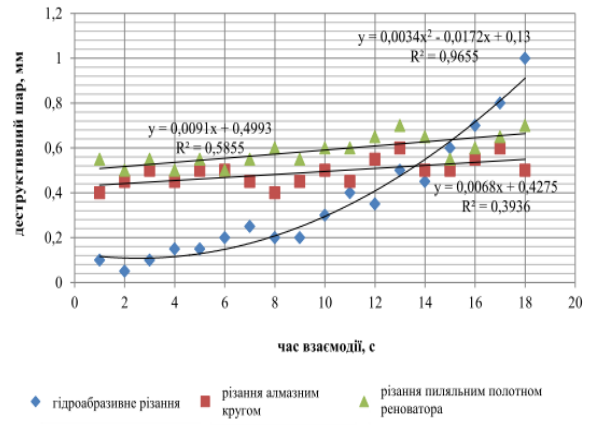


Рисунок 7 – Зміна ширини зони деструкції залежно від часу взаємодії поверхні різання з інструментом

При обробці матеріалів алмазними дисками або пиляльними заглиблювальними полотнами істотної зміни ширини деструктивної зони не відбувається.

Зменшення кількості ріжучих мікрокрайок призводить й до зміни товщини деструктивного шару (рис. 8). Проведені випробування інструментів показали, що одночасно зі зменшенням кількості зерен на поверхні інструмента товщина деструктивного шару спочатку зменшується, а потім має тенденцію до збільшення, однак при цьому збільшується сила різання.

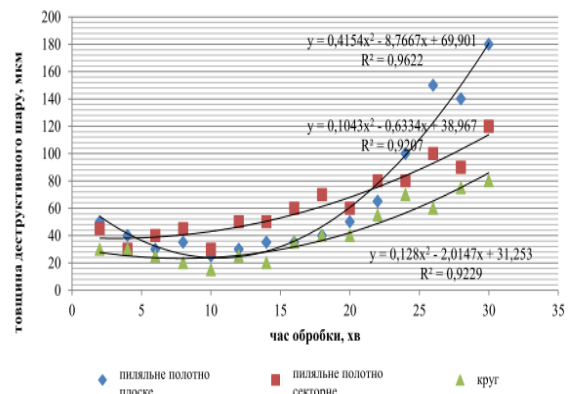
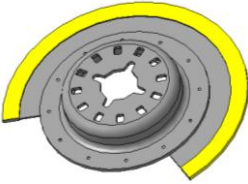
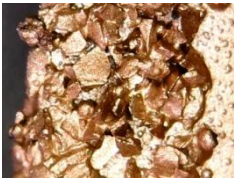

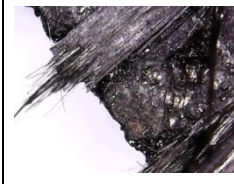
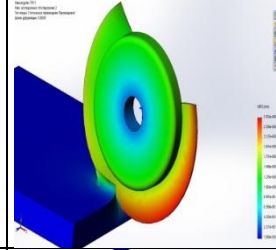
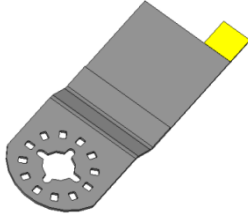



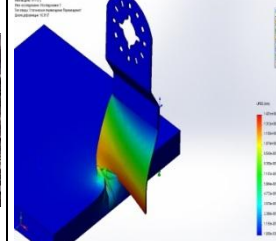
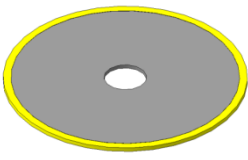
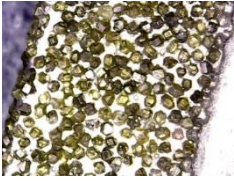

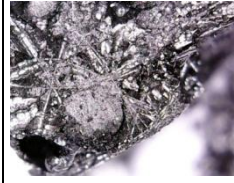
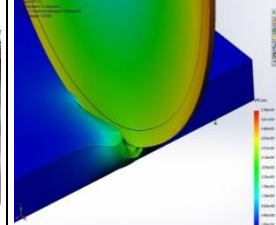
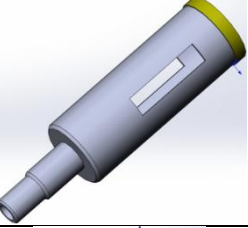


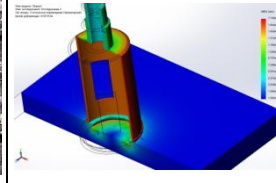
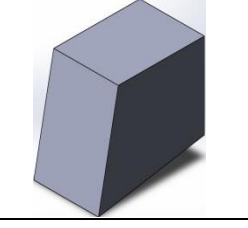
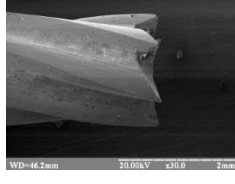
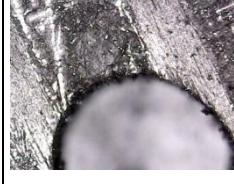
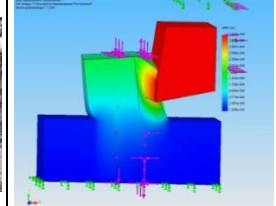
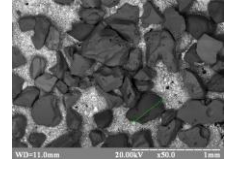
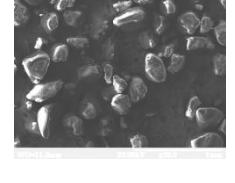

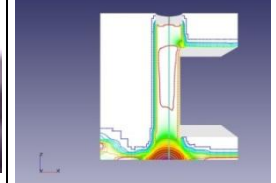
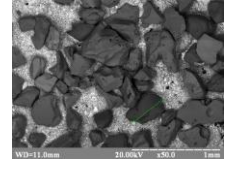
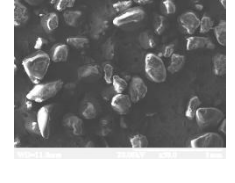

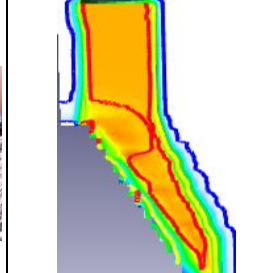


Рисунок 8 – Зміна товщини деструктивного шару залежно від часу експлуатації інструменту з максимально допустимим навантаженням (швидкість різання – 70 м/с)

Це явище можна пояснити тим, що при постійній швидкості подачі різальні властивості знижуються, одночасно знижується циклічний вплив на поверхні різання за зоною активного руйнування, отже, тріщини починають активно біфуркувати доти, поки напруження в зоні різання не перевищать міцність адгезії (або когезійного руйнування в місці дефектів).

Таблиця 1 – Порівняння якості різання та стану ріжучої крайки інструментів, що короткочасно працюють з карбон-карбонними матеріалами та карбон-полімерними матеріалами

№	Модель інструменту	Стан інструменту до обробки	Стан інструменту після обробки	Стан поверхні	Виникаючі напруження
1					
2					
3					
5		---			
6		---	 WD=46.2mm 20.0kV x30.0 2mm		
8	Струміль пробій	 WD=11.0mm 20.0kV x50.0 1mm			
9	Струміль різ	 WD=11.0mm 20.0kV x50.0 1mm			

Нами також запропоновані досить прості регресійні залежності ширини деструкції від функції максимальних напружень у зоні різання $\delta=f(\sigma_{max})$:

$$\begin{aligned} \delta_1 &= 0,55 \exp^{0,1\sigma_{max}}; \\ \delta_2 &= 0,74 \exp^{0,08\sigma_{max}}, \end{aligned} \quad (7)$$

де δ_1 – деструкція карбон-карбонового матеріалу; δ_2 – деструкція карбон-полімеру, що дало можливість побудувати та порівняти діаграми розвитку ширини деструктивної зони (рис. 9) обробки карбонових композитів, що утворюється при різних методах.

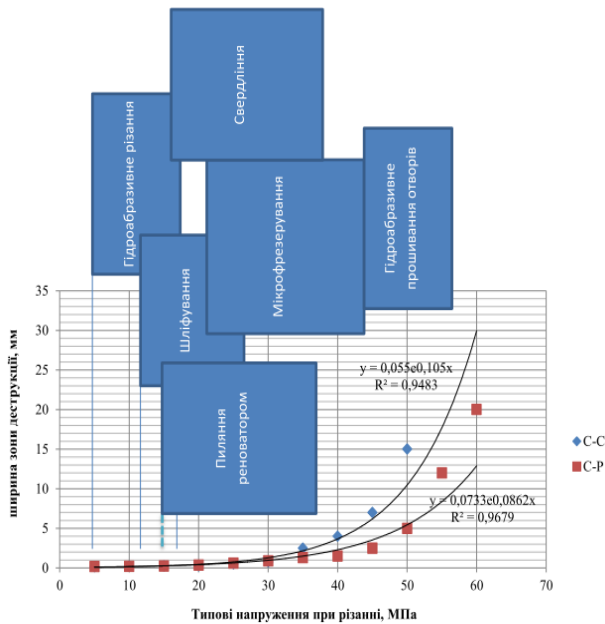


Рисунок 9 – Виникаючі напруження при різних методах обробки й їх вплив на ширину зони деструкції

Таким чином, нами показано, що одержання якісних зразків складної конфігурації пов'язане з деякими складнощами, зумовленими як неоднорідною структурою оброблюваного матеріалу, так і проявом квазікрихких властивостей карбонових армувальних волокон.

Нехай одержання масиву властивостей готового виробу (зразка для механічних випробувань) у вигляді множин $Fi(l, b, h, r, \delta...)$ можливе реалізацією деякої сукупності технологічних впливів M_j , властивих тому або іншому методу обробки. Кожний технологічний вплив можна представити у вигляді сукупності множин властивостей інструмента T_j , динамічних властивостей обробної системи W_j , способу силового впливу P_j , для яких $(T_j, W_j, P_j) \in M_j$, що дає можливість для заготовки з властивостями S_i вихідні параметри якості представити як:

$$Fi(l, b, h, r, \delta...) = M_j \cdot S_i. \quad (8)$$

Грунтуючись на положеннях, відбитих у роботі [14], можемо записати умову забезпечення вихідних параметрів обробки як:

$$Fi(l, b, h, r, \delta...) = T_j \cdot S_i \cap W_j \cdot S_i \cap P_j, \quad (9)$$

що дає сукупність варіантів переходів обробки, кращий з якого можна вибрати за певним критерієм.

При цьому головною умовою одержання необхідного результату є обмеження товщини деструктивного шару на рівні $>2\%$ бази вимірів.

Перевірка механічних характеристик досліджуваних зразків матеріалів, отриманих традиційною механічною обробкою і запропонованою показало, що при розтягуванні відповідно до рис. 10 (а, б), діаграми розтягування зразків (рис. 10, в) до руйнування дещо відрізняються. Така відмінність зумовлена тим, що зразок, отриманий за запропонованою схемою обробки, має менший деструктивний шар, і, відповідно, показує більшу витривалість при навантаженні. Обчислення статистичної вибірки даних довело, що така відмінність суттєва і становить 6-7%, при достовірності результатів 99,0%.

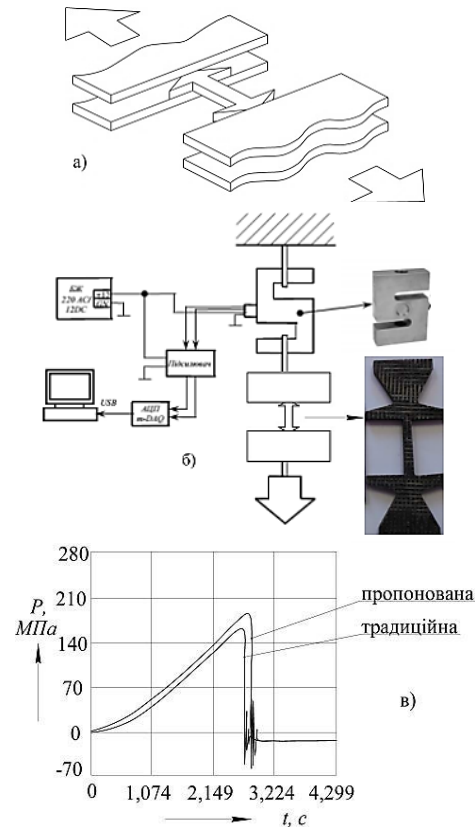


Рисунок 10 – Перевірка механічних характеристик досліджуваних зразків матеріалів

Виконані дослідження стану поверхні при різних методах обробки дозволили одержати залежності, що зв'язують умови проведення обробки з товщиною деструктивного шару для карбон-карбонових і карбон-полімерних матеріалів.

Так, якщо необхідно отримати зразок $a \times b \times h$ з кубічної заготовки розмірами $A \times B \times L$, причому зразок містить криволінійні ділянки радіусами r_i . Можливі наступні технологічні операції: $(R_2)-(R_1)$; $(R_2)-(R_5)$; $(R_2)-(R_4)-(R_5)$. При оптимізації процесу за критерієм мінімізації часу обробки для заданого рівня якості одержаний варіант функціонально орієнтованого процесу $(R_2)-(R_4)-(R_5)$, схема якого представлена на рис. 11.

Така послідовність операцій дозволяє максимально повно використовувати всі переваги гідроабразивного різання (значне скорочення часу обробки) й уникнути деструкції матеріалу в момент пробою струменем.

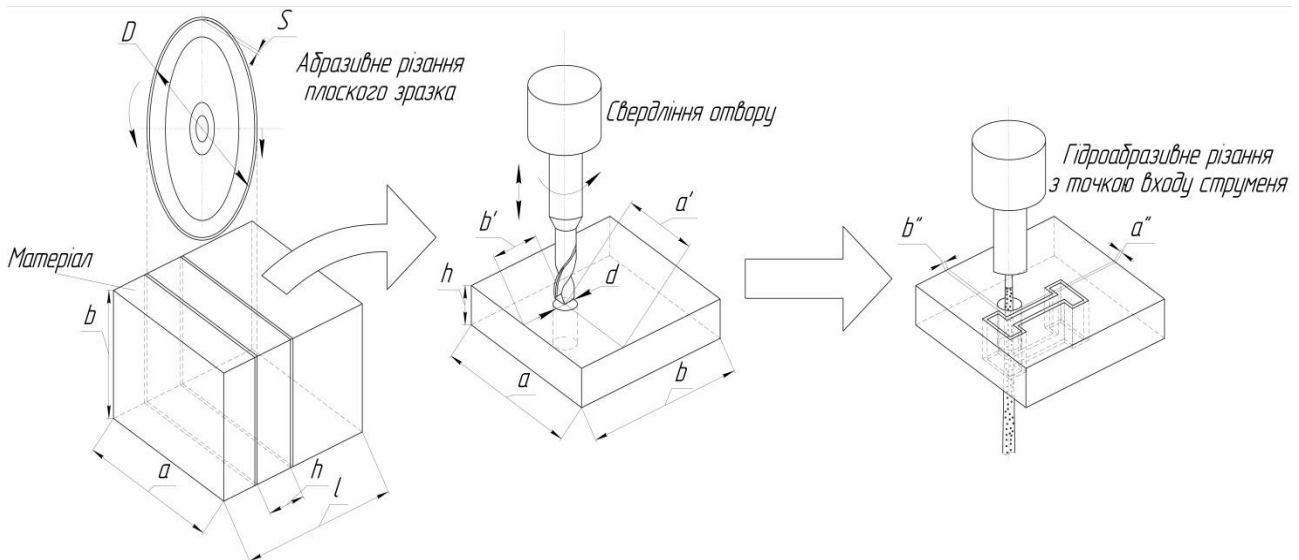


Рисунок 11 – Послідовність підготовки зразка з карбової заготовки

ВИСНОВКИ. У результаті виконаного комплексу теоретико-експериментальних досліджень оцінено напружений стан зони різання в композиційних матеріалах на основі карбових волокон при різних методах обробки, встановлена прогнозована деструкція матеріалу та показано, що одержання репрезентативних зразків для механічних випробувань можливе при певній послідовності обробки: абразивне обрізання алмазовмісним інструментом, одержання умов для введення гідроабразивного струменя (свердління) і наступна струминно-абразивна обробка.

ЛІТЕРАТУРА

1. Синани І.Л., Бушуев В.М. Степень насыщения пироуглеродом отдельных фрагментов ткане-прошивного каркаса несущей основы герметичных конструкций // Коррозия: материалы, защита. – Москва: Наука и технологии, 2014. – № 9. – С. 8–11.
2. Мелентьев Р.Ю., Натальчишин В.В. Особенности механической обработки полимерных композиционных материалов // Зб. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2013. – № 4. – С. 30–34.
3. Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов (аналитический обзор): монография / Д.В. Криворучко, В.А. Залого, В.А. Колесник и др.; под общей ред. проф. В.А. Залого. – Сумы: Университетская книга, 2013. – 272 с.
4. Механическая обработка волокнистых полимерных композитов / Н.В. Верезуб, А.П. Тарасюк, Г.Л. Хавин. – Харьков: Издательство ХГАДУ (ХАДИ), 2001. – 180 с.
5. Формування деструктивного шару на крайках оболонкових виробів із неметалевих композитів при гідро- та гідроабразивному різанні / О.Ф. Саленко, О.В. Фомовська, В.О. Дудюк // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»: Серія «Машинобудування». – Київ: НТУУ «КПІ», 2010. – № 59. – С. 210–215.
6. Визначення поверхневого деструктивного шару при обробці конструкційних неметалевих композитів і його впливу на механічні властивості виробів / О.Ф. Саленко, В.В. Драгобецький, О.В. Фомовська, В.О. Дудюк, О.М. Мана // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Кременчук: КДПУ, 2010. – Вип. 1/2010 (60). – С. 82–90.
7. Miller R. Waterjet Cutting: Technology and Industrial Applications. – Lilburn: Fairmont Press, 1991. – 154 p.
8. Хавин Г.Л. Образование дефектов при сверлении слоистых композитов и механизм появления расслаивания // Вестник Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр., темат. вып.: Технологии в машиностроении. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2015. – № 4 (1113). – С. 96–100.
9. Повышение эффективности гидроструйного резания использованием управляемого резания средств трещинообразования / В.Н. Орел, В.Т. Щетинин, А.Ф. Саленко Н.Н. Яцына // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков, 2016. – Вып. 1 (79). – С. 81–86.
10. Хавин Г.Л. Моделирование величины межслойной трещины при сверлении полимерных композитов // Технологія машинобудування: Механіка та машинобудування. – Харьков, 2013. – № 1. – С. 145.
11. Повышение эффективности процесса струйно-лазерного перфорирования листовых заготовок профилированным потоком / В.Ю. Холодный, С.В. Коваленко, Ю.А. Павлюченко, Г.В. Габузян, А.Ф. Саленко // Вестник двигателестроения. – Запорожье: ОАО Мотор Сич, 2015. – № 1. – С. 106–113.
12. Повышение точности контурного гидроабразивного резания пластин из твердых сплавов и сверхтвердых материалов / А.Ф. Саленко, В.Т. Щетинин, А.Н. Федотьев // Сверхтвердые материалы. – Киев: Наукова думка, 2014. – № 3. – С. 73–82.
13. О возможности гидроабразивной прошивки отверстий в заготовках из функциональных материалов / А.Ф. Саленко, А.Н. Мана, В.С. Петропольский и др. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: збір. наук. праць. – Краматорськ, 2011. – Вип. 29. – С. 107–118.
14. Savage G. Carbon-Carbon Composites. – London: Chapman & Hall, 1993. – 389 p.

**INCREASING THE ACCURACY OF COMPOSITES MECHANICAL PROPERTIES
DETERMINATION BASED ON CARBON FIBERS USING RATIONAL PROCESSING METHODS**

O. Chencheva, E. Lashko, O. Samusenko, V. Shchetynin, O. Salenko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: salenko2006@ukr.net

Purpose. To prove increasing the accuracy of the carbon-carbon composites mechanical properties determination using rational methods of samples processing. **Methodology.** The comparative analysis method has been used to find out cut quality and cutting tool edge condition; destruction of materials. **Results.** For experimental studies serial and special laboratory equipment of mechanical and abrasive waterjet processing has been used. It has been shown the features of processing samples by micromilling on Proxxon MF70; sawing by multitool back-and-forth motion (Bosch PMF 250 CES); drilling used spiral and diamond-containing tubular drills; abrasive waterjet cutting on LSK-400-5. **Originality.** For the first time the strain-stress state of the cutting zone in composite materials based on carbon fibers at different processing methods has been determined. **Practical value.** The following processing has been recommended for obtaining representative samples of the carbon-carbon composites for mechanical testing: abrasive cutting by the diamond tool, preparation conditions for introduction of the waterjet stream (drilling) and further abrasive waterjet processing. References 14, table 1, figures 11.

Key words: accuracy; sawing; micromilling; drilling; abrasive waterjet cutting.

REFERENCES

1. Sinani, I.L. and Bushuev, V.M. (2014), *Stepen nasyshtcheniya pirouglerodom odelnykh fragmentov tkaneproshivnogo karkasa nesushchey osnovy germetichnykh konstruksiy* [The degree of saturation of the individual fragments pyrolytic carbon skeleton of the base substrate sealed designs], *Korroziya: materialy, zashchita*, no. 9, pp. 8–11.
2. Melentyev, R.Yu. and Natalchishin, V.V. (2013), *Osobennosti mekhanicheskoy obrabotki polimernykh kompozitsionnykh materialov* [The features of mechanical processing of polymer composite materials], *Zbirnyk naukovykh prats NUK*, no. 4, pp. 30–34.
3. Krivoruchko, D.V., Zaloga, V.A. and Kolesnik, V.A. et al.; under the general editorship by prof. V.A. Zaloga (2013), *Mekhanicheskaya obrabotka kompozitsionnykh materialov pri sborke letatelnykh apparatov (analiticheskyy obzor): monografiya* [Mechanical processing of composite materials for the assembly of aircraft (analytical review): monograph], Universitetskaya kniga, Sumy, Ukraine.
4. Verezub, N.V., Tarasyuk, A.P. and Khavin, G.L. (2001), *Mekhanicheskaya obrabotka voloknistykh polimernykh kompozitov* [Mechanical processing of fibrous polymer composite materials], Izdatelstvo HGADU (HADI), Kharkiv, Ukraine.
5. Salenko, O.F., Fomovska, O.V. and Dudiuk, V.O. (2010), *Formuvannia destruktivnogo sharu na kraykakh obolonkovykh vyrobiv iz nemetalevykh kompozitiv pry hidro- ta hidroabrazivnomu rizanni* [Formation of a destructive layer on the edges of products made of non-metallic composites during waterjet and abrasive waterjet cutting], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Ukrainy «Kyivskyi politekhnichnyi instytut»: Seriya «Mashynobuduvannia»*, no. 59, pp. 210–215.
6. Salenko, O.F., Drahobetskyi, V.V., Fomovska, O.V., Dudiuk, V.O. and Mana, O.M. (2010), *Vyznachennia poverkhnivoho destruktivnogo sharu pry obrobsi konstruksiynykh nemetalevykh kompozitiv i yoho vplyvu na mekhanichni vlastyivosti vyrobiv* [Determination of surface destructive layer during processing of constructional non-metallic composites and its influence on mechanical properties of products], *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, no. 1/2010 (60), pp. 82–90.
7. Miller, R. (1991), *Waterjet Cutting: Technology and Industrial Applications*, Fairmont Press, Lilburn, USA.
8. Khavin, G.L. (2015), *Obrazovanie defektov pri sverlenii sloistykh kompozitov i mekhanizm poyavleniya rasslaivaniya* [Formation of defects during drilling of layered composites and the mechanism of the appearance of delamination], *Vestnik Nats. tekhn. un-ta «KhPI»: sb. nauch. tr., temat. vyp.: Tekhnologii v mashinostroenii*, no. 4 (1113), pp. 96–100.
9. Orel, V.N., Shchetynin, V.T., Salenko, A.F. and Yatsyna, N.N. (2016), *Povyshenie effektivnosti gidrostruyynogo rezaniya ispolzovaniem upravlyaemogo rezaniya sredstv treshchinoobrazovaniya* [The use of controlled cracking to improve the efficiency of waterjet cutting], *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*, no. 1 (79), pp. 81–86.
10. Khavin, G.L. (2013), *Modelirovanie velichiny mezhsloynoy treshchiny pri sverlenii polimernykh kompozitov* [Modeling the value of an interlayer crack during drilling of polymer composites], *Tekhnolohiia mashynobuduvannia: Mekhanika ta mashynobuduvannia*, no. 1, p. 145.
11. Kholodnyi, V.Yu., Kovalenko, S.V., Pavliuchenko, Yu.A., Habuzian, H.V. and Salenko, A.F. (2015), *Povyshenie effektivnosti protsessa struyyno-lazernogo perforirovaniya listovykh zagotovok profilirovannym potokom* [Increasing the efficiency of the process of waterjet guided laser perforation the sheet blanks by a profiled flow], *Vestnik dvigatelestroeniya*, no. 1, pp. 106–113.
12. Salenko, A.F., Shchetynin, V.T. and Fedot'yev, A.N. (2014), *Povyshenie tochnosti konturnogo gidroabrazivnogo rezaniya plastin iz tverdyykh splavov i sverkhtverdyykh materialov* [Increasing the accuracy of contour abrasive waterjet cutting of plates of hard alloys and superhard materials], *Sverkhtverdye materialy*, no. 3, pp. 73–82.
13. Salenko, A.F., Mana, A.N. and Petropolskiy, V.S. (2011), *O vozmozhnosti gidroabrazivnoy proshivki otverstiy v zagotovkakh iz funktsionalnykh materialov* [About the possibility of waterjet perforation of holes in workpieces made of functional materials], *Nadiinist instrumentu ta optymizatsiia tekhnolohichnykh system: zb. nauk. prats*, no. 29, pp. 107–118.
14. Savage, G. (1993), *Carbon-Carbon Composites*, Chapman & Hall, London, UK.

Стаття надійшла 02.06.2017.