

## До питання точності визначення механічних характеристик карбон-карбонових композитів за зразками, отриманими гідрорізанням

О.Ф. Саленко<sup>1</sup>, Сюе Сяндін<sup>1</sup>, С.В. Коваленко<sup>1</sup>, Г.В. Габузьян<sup>2</sup>, В.М. Орел<sup>3</sup>, Є.Є. Лашко<sup>4</sup>, Свук Ханн<sup>5</sup>

1 – КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

2 – ВСП “Фаховий коледж КрНУ ім. М. Остроградського”, Кременчук, Україна

3 – ХНУВС Кременчуцький льотний коледж, Кременчук, Україна

4 – Кременчуцький національний університет, Кременчук, Україна

5 – Корейський інститут фотоніки, Республіка Корея

*Анотація.* В роботі представлені результати дослідження можливостей застосування гідроабразивного різання для виготовлення стандартних зразків для випробування карбон-карбонових матеріалів на згин, розтягування стискання та ін., для визначення граничної та довготривалої міцності. Відомо, що вибірна спроможність струменя (ущільненого гідроабразивного потоку) обтікати перешкоди веде до відхилення траєкторії його руху, і, як наслідок, зміни прогнозованої форми борозенки різку. Для карбон-карбонових матеріалів проблема постає більш гострою, оскільки чергування високоміцних джгутів карбонових волокон із більш м'якою фазою піровуглецю та певна порожнистість структури створюють умови для активної дисипації потоку та розмиття поперечного перетину за зоною безпосереднього гідроабразивного впливу. Іншою проблемою є вплив на властивості залишкової вологи, яка зберігається між волокнами.

Показано, що раціональні умови гідроабразивного різання та застосування засобів компенсації викривлення траєкторії струменя дозволяють обмежити зону деструкції до 0,5...0,8 мм та забезпечити практично повне видалення вологи зі зразків протягом 60 хв. Виходячи із ширини зони деструкції запропоновано введення коефіцієнту площини активного перетину зразка, який враховує ці особливості процесу.

**Ключові слова:** гідроабразивне різання, карбон-карбонові матеріали, міцність, випробування, механічні властивості, зразки

**Вступ.** Вуглець-вуглецевий композиційний матеріал (ВВКМ) набув широкого застосування завдяки високій температурі сублімації, високій міцності при температурах до та понад 2800°C, гарному опору термічним і механічним навантаженням, у тому числі й ударним, хімічній, радіаційній та втомленій стійкості, низькій щільності [1]. ВВКМ заслужено привертає увагу розробників виробів та устаткування, яке працює при високих температурах у безокисному середовищі. Створення конструкцій сучасної ракетно-космічної техніки, використовуваних в умовах високих температур і підвищених термомеханічних навантажень, не ефективно без застосування деталей з ВВКМ. У ракетно-космічній техніці використовується приблизно 18% від загального обсягу виробництва ВВКМ, який у цей час становить понад 1000 т/рік і збільшується щорічно.

Вимоги до ВВКМ, які використовуються у ракетно-космічній техніці, найбільш високі в порівнянні з іншими сферами їх застосування та постійно ставляться завдання підвищення їх експлуатаційних характеристик. Удосконалення технології виробництва ВВКМ в усьому світі відноситься до пріоритетних напрямків, що визначають обороноздатність і науково-технічний потенціал держави, що володіє ними [2].

ВВКМ мають порівняно дрібну структуру, що дозволяє виготовляти вироби складної форми з окремими дрібними фрагментами. ВВКМ являє собою бінарний композит і складається з вуглецевого армувального каркаса (АК) (преформи), виготовленого з вуглецевих волокон, і вуглецевої або графітової (пірографітової) матриці.

Механічна обробка ВВКМ виконується як на стадіях його виготовлення для зняття поверхневого шару, що закупорив пори, так і після виготовлення для одержання деталей необхідної якості. При механічній обробці ВВКМ спостерігаються зовсім інші фізико-хімічні процеси, не властиві процесу різання металу. Це руйнування армувальних волокон, водопоглинення, деструкція матриці. Дослідження процесу різання ВВКМ зводиться в більшості випадків до визначення раціональних режимів їх обробки. Механічна обробка

здійснюється твердосплавним і алмазним різальним інструментом. Для обробки ВВКМ застосовуються металорізальні верстати з засобами інтенсивного пиловидалення.

Проблемою обробки спеціальних тестових зразків (зокрема, рис. 1) є необхідність забезпечити високу якість крайки, а також мінімальність поверхневого деструктивного шару. Саме цей шар може у подальшому впливати на точність визначення механічних характеристик матеріалу.

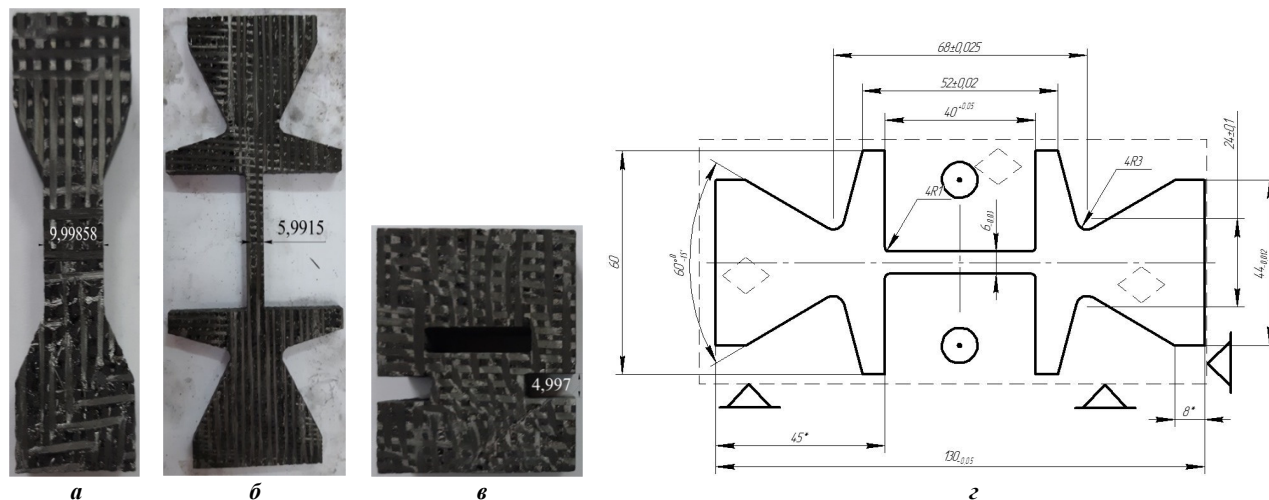


Рис. 1. Зразки для механічних випробувань: а) на стискування; б) на розтягування, згин, в) на зсув; г) креслення зразка б)

Традиційно таке оброблення виконують за багаточисельне перевстановлення заготовки механічним способом – лезовим або абразивним інструментом. При цьому (3) внаслідок активного пилоутворення подібні процеси вимагають спеціального обладнання, умов уловлювання шкідливого пилу а також застосування спеціального інструменту.

У роботі [4] наведені результати досліджень обробки ВВКМ за допомогою потужних технологічних лазерів. Лазерна обробка дозволяє створити на поверхні виробу шар матеріалу зі зміненим стосовно основної маси структурнофазовим складом і на проміжній стадії виготовлення виробів змінити пористу структуру матеріалу (збільшити відкриту пористість). Лазерна обробка ВВКМ веде до графітації матеріалу в зоні лазерного впливу та до збільшення стійкості обробленого матеріалу від 1,5 до 10 разів у кисневовмісних газових середовищах при високих температурах. Можливе нанесення захисних покриттів на ВВКМ методом лазерного наплавлення. Однак лазерне різання залишається наразі недосяжним.

Гідроабразивне різання, за свідченням (4), залишається ефективною альтернативою механічним способам оброблення композитів. При цьому недоліки операцій струминно-абразивного різання пропонується компенсувати наступною послідовністю виконання операцій.

Для підготовки зразків шляхом контурного різання розглянемо схему переміщення інструменту по поверхні та похибки (абсолютні та накопичені), які властиві даному методу оброблення. Оскільки геометричні параметри струменя визначають переважно точність еквідистантного контуру (рис. 2), його енергетичні параметри безпосередньо визначають умови локального мікроруйнування, внаслідок якого формується крайка виробу. Остання характеризується як шорсткістю, так і товщиною дефектного шару ( $\square$ ,  $\square$ ), що потребує визначення функціональної обумовленості цих чинників властивостями гідро абразивного струменя.

При цьому, істотний внесок у формування показників має ще і структура матеріалу, напрямок розташування джгутів армувальних волокон.

Осцилограма на рис. 4 б показує, що розроблений ПДГ дозволяє шляхом впливу на педаль в широких межах змінювати величину постійного струму, що подається в обмотку статора і керувати гальмівним моментом двигуна в процесі динамічного гальмування. Завдяки цьому машиніст крана має можливість формувати оптимальний за швидкодією, динамічними навантаженнями та амплітудою розгойдування вантажу, процес гальмування.

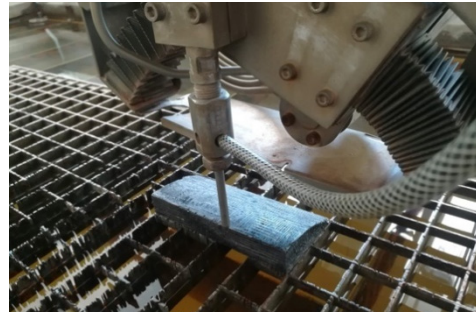
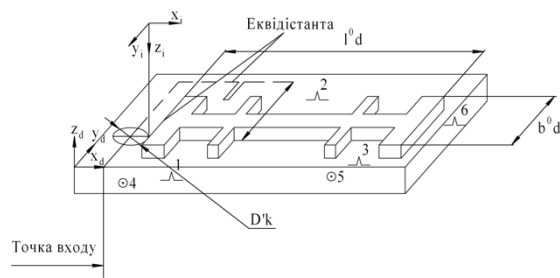


Рис. 2. Схема технологічного налагодження процесу

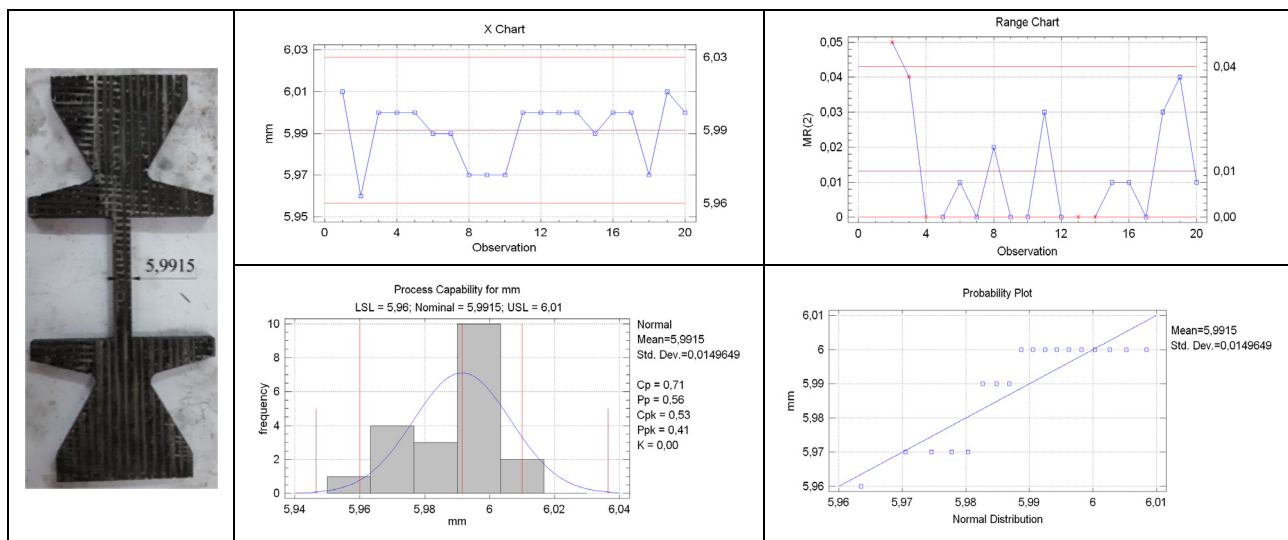
Рівень шорсткості контролювали у двох напрямках (1-1 та 2-2) в центральній частині сформованої торцевої поверхні. Профіль поверхні контролювали 10 разів, результати усереднювали і заносили до таблиць Statgraphics 5+.

Встановлено, що зростання параметру шорсткості  $Ra$  відбувається майже лінійно зі зростанням середньо очікуваного діаметру абразивної частинки  $b_a$ . Це можна пояснити вираженими квазікрихкими властивостями даного матеріалу при впливі швидкоплинним потоком гідро абразиву; значна кількість зламів на передній та торцевій поверхнях обумовлені тим, що більші абразивні частинки виконують не мікрорізання, а втиснення частинки у тіло, внаслідок чого відбувається злам із утворенням площинок максимальних дотичних напружень. Статистична обробка даних не дозволила виявити суттєвих відхилень контрольованого параметру залежно від механічних властивостей досліджуваних матеріалів.

При розрізуванні композиційних матеріалів істотний вплив на формування показників якості, і, зокрема, рівня шорсткості, має рідинна складова потоку. Існує чітко виражений екстремум контрольованого показника. Зазначимо, що режими ведення обробки обиралися такими, щоб забезпечити оптимальну продуктивність процесу різання, тобто для пластиків швидкість контурної подачі була більшою для менш міцних матеріалів. У той же час встановлено, що тиск у 250 МПа з відповідним коригуванням швидкості контурної подачі призводить до більш якісного різку: рівень шорсткості у цьому випадку знижується на 25...30 % у порівнянні з результатами, отриманими для випадку максимального тиску рідини у 350 МПа. Для усіх зразків виконували повну статистичну обробку даних, приклад окремих діаграм наведений у Таблиці. Також визначали у залишок вологи після просушування зразка, що дозволило побудувати криву висихання зразку масою 17,62 г.

При цьому стає очевидним, що висушування залишкової вологи відбувається на протязі 45 хв при температурі оточуючого середовища  $20 \pm 0,5$  °C.

Таблиця

Приклад статистичної обробки результатів вимірювань зразків  $l_{розм}=6-003$ 

Увагу було приділено також і контролю деструктивного шару, який виникав при обробленні поверхні. Для цього на основі модельного експерименту визначали умови обтікання рідиною окремих джгутів волокон, і прогнозували глибину деструкції за критичними напруженнями здатними їх зруйнувати. При цьому вдалося довести, що раціональні умови гідроабразивного різання та застосування засобів компенсації викривлення траєкторії струменя дозволяють обмежити зону деструкції до 0,5..0,8 мм та забезпечити практично повне видалення вологи зі зразків протягом 60 хв. Виходячи із ширини зони деструкції запропоновано введення коефіцієнту площини активного перетину зразка, який враховує ці особливості процесу.

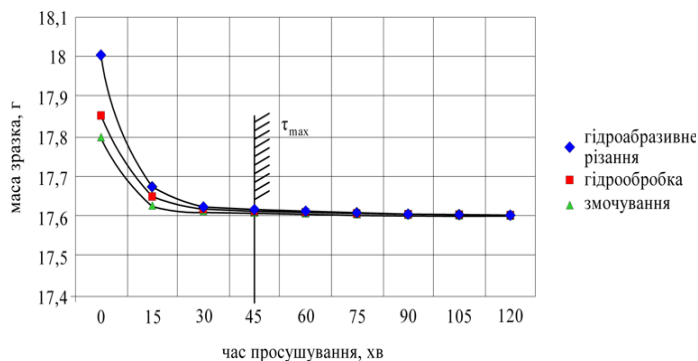


Рис. 3. Залежність водопоглинення від тиску води при різних дослідях

## Висновки

Гідроабразивне різання карбон-карбонівих матеріалів є ефективним, надійним та відтворюваним процесом, здатним із високою продуктивністю виконувати підготовку зразків для механічних випробувань. Залишкова волога практично не впливає на визначені показники міцності, оскільки розбіжність між отриманими результатами при різних методах обробки заготовки складає 4,6 %. Ця розбіжність може бути скоригована введенням відповідного коефіцієнту.

## Список літератури

1. Сіренко Г.О., Базюк Л.В., Шийчук О.В. Залежність показників фізико-механічних властивостей композитного матеріалу на основі політетрафторетилена від параметрів розподілу вуглецевих волокон// Фізика і хімія твердого тіла. – 2007. – Т.8, №3. – С.601-609.
2. Кириченко А. М., Метак Аль Ібрахім, Ченчева О. О., Щетинін В. Т. Закономірності формування вихідних показників якості при обробці нещільних карбонвмісних матеріалів абразивним інструментом. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2019. Випуск 1/2019 (114). С. 41–49.
3. [Effect of slime and dust emission on micro-cutting when processing carbon-carbon composites](#)
4. A Salenko, V Glukhova, O Chenchewa, V Shchetynin - Восточно-Европейский журнал передовых технологий, 2020. – с. 24-39
5. Cutting carbon-carbon composites by the diamond drills variable cyclic feed.
6. Oleksandr Salenko, Olga Chenchewa, Viktor Shchetynin, Valentina Gluchova, Evgeny Lashko Mohamed R.F. Budar. - ISSN 2521-1943. Mechanics and Advanced Technologies #3 (87), 2019

## On the question of the accuracy of determining the mechanical characteristics of carbon-carbon composites from samples obtained by hydro-cutting

O. Salenko, Xue Xianding, S. Kovalenko, H.Gabuzyan, V. Orel., Eu. Lashko, Swook Hann

**Abstract.** The paper presents the results of a study of the possibilities of using hydroabrasive cutting to produce standard samples for testing carbon-carbon materials for bending, stretching, compression, etc., to determine ultimate and long-term strength. It is known that the selective ability of the jet (compacted hydroabrasive flow) to flow around obstacles leads to a deviation of the trajectory of its movement, and, as a result, a change in the predicted shape of the cutting groove. For carbon-carbon materials, the problem becomes more acute, since the alternation of high-strength carbon fiber bundles with a softer pyrocarbon phase and a certain hollowness of the structure create conditions for active flow dissipation and blurring of the cross section behind the zone of direct hydroabrasive influence. Another problem is the effect on the properties of the residual moisture that is stored between the fibers.

It is shown that the rational conditions of water-abrasive cutting and the use of tools to compensate for the jet trajectory distortion allow limiting the zone of destruction to 0.5...0.8 mm and ensuring almost complete removal of moisture from the samples within 60 minutes. Based on the width of the destruction zone, it is proposed to introduce the coefficient of the plane of the active section of the sample, which considers these features of the process.

**Key words:** hydroabrasive cutting, carbon-carbon materials, strength, tests, mechanical properties, samples.