

ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ УМОВ ГІДРОАБРАЗИВНОГО РІЗАННЯ ТОВСТИХ КАРБОН-КАРБОНОВИХ ПЛАСТИН НА ОСНОВІ МОДЕЛЮВАННЯ ДВОФАЗНОГО ПОТОКУ РІДИНИ

Є. Є. Лашко

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: evgeny.lashko.lj@gmail.com

Показано особливості обробки зразків із вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів гідроабразивним різанням. Наведено розрахункову схему руху двофазного потоку рідини у карбон-карбонівому композиті 3d структури у початковий момент та у момент стабілізації. У результаті моделювання програмними засобами FlowVision, отримано епюри розподілу гідродинамічного навантаження елементів оброблюваного композиту в зоні струминного впливу. Установлено обсяг армувального волокна зруйнованого двофазним потоком рідини за одиницю часу. Проведено експериментальні дослідження, які довели тотожність прогнозу (математичного моделювання явищ руйнування гідроабразивним струменем) та експериментального різання вуглець-вуглецевих композиційних заготовок. Установлено, що для передумання поширення зони деструкції необхідно встановлювати такий тиск у контурі високого тиску мультиплікаторної системи, при якому б виникаючий початковий гідроудар був направлений поміж волокон і не припадав би на вертикально або близько до вертикально розташованого волокна.

Ключові слова: гідроабразивне різання, вуглецевмісний композит, двофазний потік, моделювання.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ГИДРОАБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ ТОЛСТЫХ КАРБОН-КАРБОНОВЫХ ПЛАСТИН НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВУХФАЗНОГО ПОТОКА ЖИДКОСТИ

Е. Е. Лашко

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: evgeny.lashko.lj@gmail.com

Показаны особенности обработки образцов из углерод-углеродных композиционных материалов гидроабразивной резкой. Приведена расчетная схема движения двухфазного потока жидкости в карбон-карбонном композите 3d структуры в начальный момент и в момент стабилизации. В результате моделирования программными средствами FlowVision, получены эпюры распределения гидродинамической нагрузки элементов обрабатываемого композита в зоне струйного воздействия. Установлено объем армированного волокна, разрушенного двухфазным потоком жидкости в единицу времени. Проведены экспериментальные исследования, которые доказали тождественность прогноза (математического моделирования явлений разрушения гидроабразивной струей) и экспериментальной резки углерод-углеродных композиционных заготовок. Установлено, что для предотвращения распространения зоны деструкции необходимо устанавливать такое давление в контуре высокого давления мультипликаторной системы, при котором бы возникающий начальный гидроудар был направлен между волокон и не приходился бы на вертикально или близко к вертикально расположенному волокну.

Ключевые слова: гидроабразивное резание, углеродсодержащий композит, двухфазный поток, моделирование.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Виробництво композиційних матеріалів є однією з галузей промисловості, що найбільш активно розвивається. Вироби з композитів застосовуються в машинобудуванні, авіабудуванні й електротехнічній промисловості, що дозволяє замінити та заощадити велику кількість чорних і кольорових металів.

Зростання виробництва композиційних матеріалів зумовлене розширенням номенклатури та сфер їх застосування, викликає значний інтерес до питань теорії і практики обробки різанням, оскільки отримання виробів не обходиться без використання операцій механічної обробки [1, 2, 3].

Механічна обробка композиційних матеріалів пов'язана з рядом складнощів і недоліків. Ці складнощі такі:

- швидке затуплення різального інструменту;
- великий шум та запилення робочого місця.

Вони пояснюються особливостями фізико-механічних властивостей, структури та будови матеріалів, високими абразивними якостями наповнювача, неоднорідністю складових частин та високою

механічною анізотропією. Значне затуплення різальної частини інструменту ускладнює загальну технологію процесу та призводить до великої витрати інструменту на одиницю довжини оброблюваного матеріалу.

Дослідження механічної обробки матеріалів зосереджуються на питанні стійкості різального інструменту, інші чинники механічної обробки є похідними від неї [4, 5].

Основні шляхи підвищення стійкості інструменту такі:

- створення і дослідження нових матеріалів для виготовлення різального інструменту;
- знаходження оптимальної геометрії заточування та режимів різання;
- застосування різних методів додаткової обробки робочих поверхонь інструменту;
- застосування різних методів охолодження;
- зміна конструкції інструменту.

Ці заходи призводять до підвищення стійкості інструменту, але не вирішують питання якості обробки.

У зв'язку з цим існує необхідність в розробці й освоєнні методів різання композиційних матеріалів, що забезпечують значну продуктивність, потрібну точність та якість поверхонь різі. Перспективним процесом обробки матеріалів є гідроабразивне різання (ГАР), що полягає в процесі руйнування надзвукним потоком рідини й абразиву.

Основним недоліком обробки композиційних матеріалів гідроабразивним різанням є утворення розшарувань різної величини (до 7...8 мм) в місцях прошивання матеріалу [6].

Існуючі технології й устаткування ГАР спрямовані на забезпечення власне процесу розділення матеріалу та не ураховують будову матеріалу.

Основні підходи до забезпечення продуктивності й якості різання вуглецевмісних матеріалів під дією надзвукного струменя рідини різного складу відображені в дослідженнях [7, 8].

Технологічні складнощі, пов'язані з отриманням потрібної шорсткості, точності форми та розташування поверхні різі, можуть бути вирішені застосуванням програмного забезпечення, що моделює взаємодію між матеріалом і струменем, програмує рух інструменту, оцінює час різання.

Проте, практично відсутні рекомендації і розрахункові моделі по вибору режимів різання композиційних матеріалів, що виключають виникнення розшарувань матеріалу.

Метою досліджень є встановлення умов поширення деструкції за зону впливу струменя як двофазного швидкоплинного потоку рідини та виявлення умов локалізації гідровпливу. Дослідження процесу руйнування вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів (ВВКМ) і розробка технологічних рекомендацій по їх обробці ГАР є актуальним науково-технічним завданням.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Для прогнозування розшарування матеріалу методом ГАР проведено моделювання напружено-деформованого стану під дією гідроабразивного струменя. У моделі урахуємо, що створюване напруження за товщиною проникнення більше межі міцності з'єднання матриці і армувального волокна, відповідно в цьому місці відбуватиметься розшарування [9]. Стохастичними чинниками, що впливають на міцність з'єднання, було знехтувано.

При моделюванні урахувалося, що вирази для переміщення, що створюються зосередженими особливостями (зосереджена сила, подвійна сила, центр обертання, центр розширення), можна розглядати як деякі приватні рішення рівнянь теорії пружності для безмежного середовища, де відсутня точка прикладення особливостей (рішення повинне бути в даній області кінцевим і безперервним; мати в ній такі ж похідні будь-якого порядку за усіма координатами).

За лінію розподілу цих особливостей вибрана безкінечна напівпряма. Далі отримано рішення рівнянь теорії пружності для пружного середовища, у якому виділена область обмежена кінчною поверхнею, що містить вершину на початку напівпрямой й охоплює її [10].

Розрахунково отримані такі аналітичні залежності (1–6):

$$\sigma_{xx} = \frac{2G}{m-2} \operatorname{div}U + \frac{1}{2\pi} \times \left(S_x \left(\frac{x}{R^3} - \frac{3x^3}{R^5} + \frac{m-2}{m} \left(-\frac{3x}{R(R+z)^2} - \frac{x^3(3R+z)}{R^3(R+z)^3} \right) \right) + S_y \left(-\frac{y}{R^3} - \frac{3x^2y}{R^5} - \frac{m-2}{m} \left(\frac{y}{R(R+z)^2} - \frac{x^2y(3R+z)}{R^2(R+z)^4} \right) \right) + S_z \left(\frac{z}{R^3} - \frac{3x^2z}{R^5} - \frac{m-2}{m} \left(\frac{1}{R(R+z)} - \frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right) \right) \right) \quad (1)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{2G}{m-2} \operatorname{div}U + \frac{1}{2\pi} \times \left(S_x \left(\frac{x}{R^3} - \frac{3y^2x}{R^5} - \frac{m-2}{m} \left(\frac{x}{R^2(R+z)} - \frac{xy^2(3R+z)}{R^2(R+z)^4} \right) \right) + S_y \left(\frac{y}{R^3} - \frac{3y^3}{R^5} + \frac{m-2}{m} \left(-\frac{3y}{R(R+z)^2} + \frac{y^3(3R+z)}{R^3(R+z)^3} \right) \right) + S_z \left(\frac{z}{R^3} - \frac{3zy^2}{R^5} - \frac{m-2}{m} \left(\frac{1}{R(R+z)} + \frac{y^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right) \right) \right) \quad (2)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{2G}{m-2} \operatorname{div}U + \frac{1}{2\pi} \times \left(S_x \left(\frac{x}{R^3} - \frac{3z^2x}{R^5} - \frac{m-2}{m} \frac{x}{R^3} \right) + S_y \left(\frac{y}{R^3} - \frac{3z^2y}{R^5} - \frac{m-2}{m} \frac{y}{R^3} \right) + S_z \left(-\frac{2(m-1)}{m} \frac{z}{R^3} + \frac{2z}{R^3} - \frac{3z^3}{R^5} \right) \right) \quad (3)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{4\pi} \times \left(S_x \left(-\frac{6x^2y}{R^5} - \frac{m-2}{m} \frac{2y}{R(R+z)^2} \right) + S_y \left(\frac{x}{R^3} + \frac{1}{R^3} - \frac{6xy^2}{R^5} \right) + 2S_z \left(-\frac{3xyz}{R^5} + \frac{m-2}{m} \frac{xy(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right) \right) \quad (4)$$

$$\sigma_{yz} = \frac{1}{2\pi} \times \left(S_x \left(-\frac{3y^2x}{R^5} - \frac{3xyz}{R^5} \right) + S_y \left(\frac{m-2}{m} \left(\frac{2}{R(R+z)} + \frac{yz(2R+z)}{R^3(R+z)^2} - \frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right) \right) + S_z \left(-\frac{6z^2y}{R^5} + \left(1 + \frac{3(m-2)}{m} \right) \frac{y}{R^3} \right) \right) \quad (5)$$

$$\sigma_{xx} = \frac{1}{4\pi} \times \left(S_x \left(-\frac{3zx^2}{R^5} - \frac{3z^2x}{R^5} - \frac{m-2}{m} \left(\frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} + \frac{x^3(2R+z)}{R^3(R+z)^3} \right) \right) + \right. \\ \left. -S_y \frac{6xyz}{R^5} + S_z \left(\left(1 + \frac{m-2}{m} \right) \frac{x}{R^3} - \frac{6xz^2}{R^5} \right) \right) \quad (6)$$

де R – одиничний вектор напрямку; m – число Пуассона; S_x, S_y, S_z – проекції зосередженої сили на осі XYZ , що діє усередину напівпростору.

Під час дії зосередженої сили на композиційний матеріал відбувається поперечне зміщення шарів, що призводить до руйнування матеріалу по межі з’єднання матриці та армувального волокна.

Аналіз отриманих залежностей показує, що шари матеріалу при проникненні гідроабразивного струменя не лише відриваються один від одного, але і зсуваються один відносно одного. Установлено, що у момент урізування в композиційний матеріал власне дотичне напруження досягає максимальних значень і руйнує з’єднання між шарами шляхом зсуву.

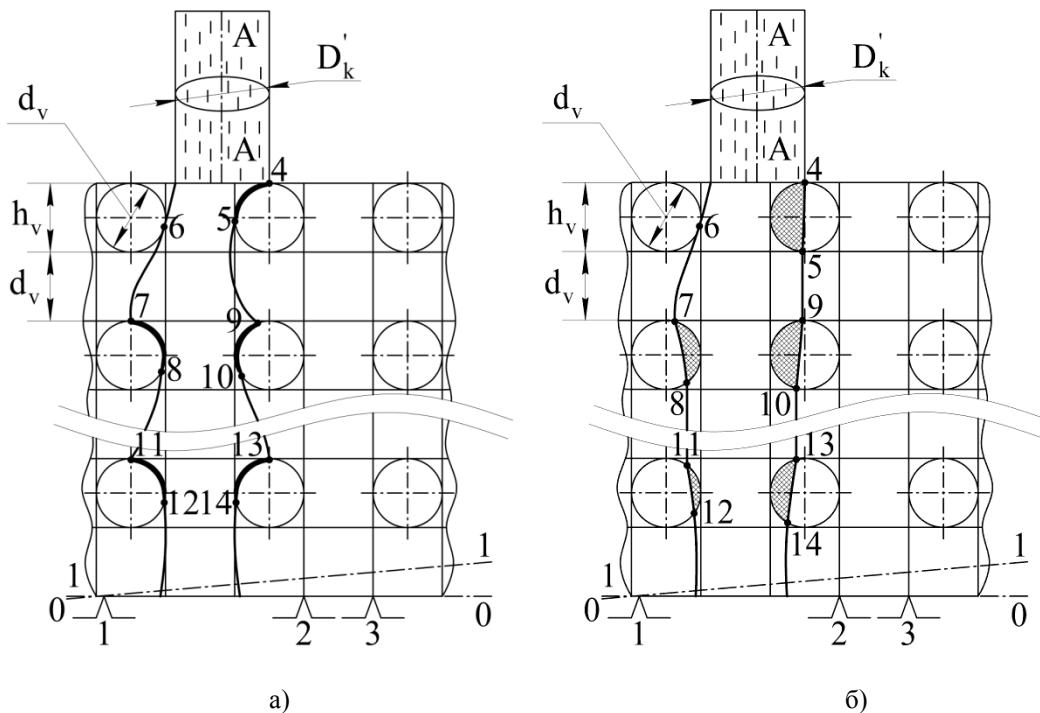


Рисунок 1 – Розрахункова схема руху двофазного потоку рідини у карбон-карбонівому композиті 3d структури: а) – початковий момент; б) – момент стабілізації потоку

Для моделювання натікання рідини створено модель, яка побудована за принципом армування тривимірного вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу. При цьому діаметри джгутів обрано однаковими і такими, що дорівнюють 1,8 мм; джгути в композиті розташовані паралельно головним осям X, Y та Z , мають регулярне розташування і покояться на горизонтальному столі.

На матеріал натікає двофазний струмінь діаметром 2,0 мм, натікання раптове, у початковий

У відповідності до цього при визначенні оптимальних режимів різання ВВКМ гідроабразивним струменем, з урахуванням можливого розшарування, основну увагу звернуто на створюване дотичне напруження, яке повинне бути менше граничних значень для даного матеріалу.

Моделювання було виконано у програмному середовищі FlowVision у відповідності до режиму обробки, яка здійснювалася на лазерно-струминному комплексі ЛСК-400-5 (табл. 1).

Прийmemo гіпотезу, що час дії гідродинамічного навантаження безпосередньо визначає ерозію того чи іншого волокна. Схема зношування волокон показана на рис. 1.

Таблиця 1 – Режим обробки, який був заданий у препроцесінг інженерного моделювання

Фізична величина	Розмірність	Значення
Тиск	МПа	250
Швидкість потоку	м/с	12,9
Витрата абразиву	кг/хв	0,6
Фракційність абразиву	мм	0,30

момент часу на поверхні вирви, борозенки й інші дефекти відсутні; характеристики міцності та пружності волокон однакові за усіма осями. Між волокнами існують зазори правильної геометричної форми, утворені внаслідок дотику абсолютно круглих волокон між собою.

В результаті моделювання нами отримано ряд епюр розподілу гідродинамічного навантаження елементів оброблюваного композиту в зоні струминного впливу (рис. 2–4).

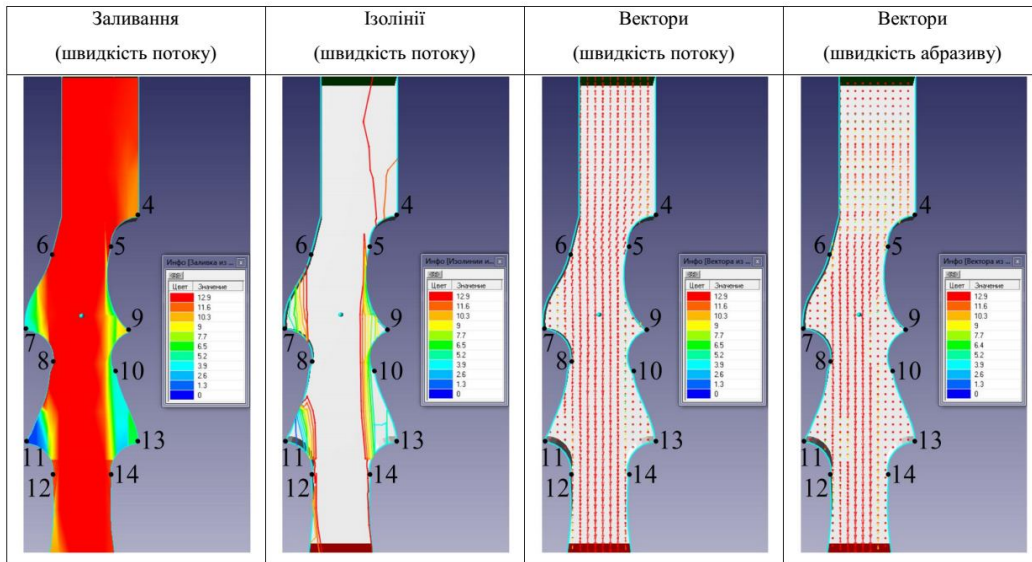


Рисунок 2 – Епюри розподілу гідродинамічного навантаження у карбон-карбовому композиті 3d структури у початковий момент

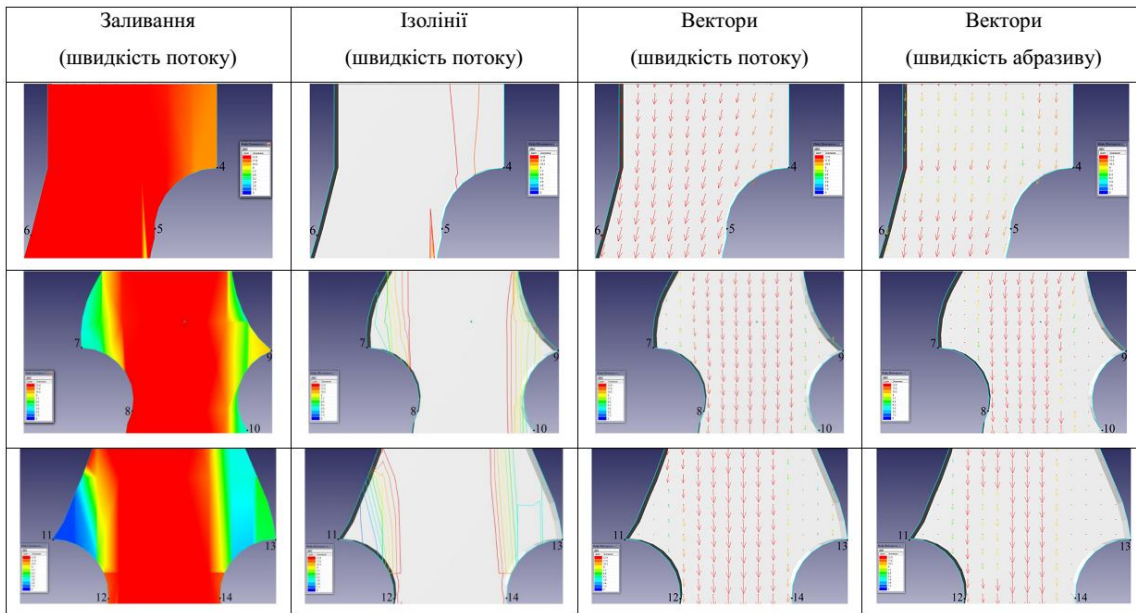


Рисунок 3 – Епюри розподілу гідродинамічного навантаження за критичними точками

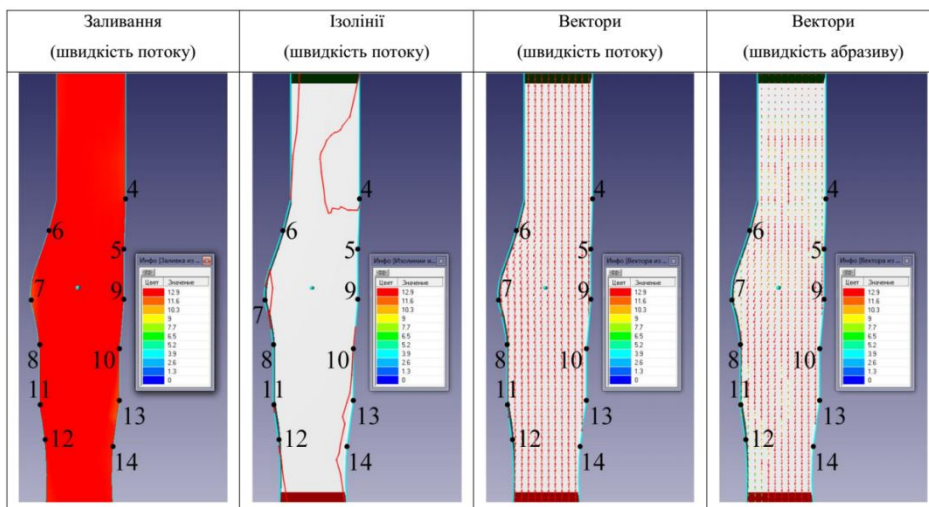


Рисунок 4 – Епюри розподілу гідродинамічного навантаження у карбон-карбовому композиті 3d структури у момент стабілізації потоку

Аналіз отриманих епюр дозволяє зробити ряд важливих висновків. По-перше, швидкість руйнування волокон є змінною, і в початковий момент взаємодії обумовлюється схемою гідродинамічного впливу. Оскільки такий вплив постійно змінюється (зруйновані волокна відкривають шлях до прямування натікаючого потоку рідини, у той час як їх залишки створюють своєрідну маску для дії периферійної частини струменя.

За діаграмами розвитку вирви встановлено, що час на формування наскрізного прорізу карбон-карбової заготовки не перевищує 0,5 с, однак щільність матеріалу, наявність порожнин має істотний вплив на якість обробки контуру. Так, аналіз

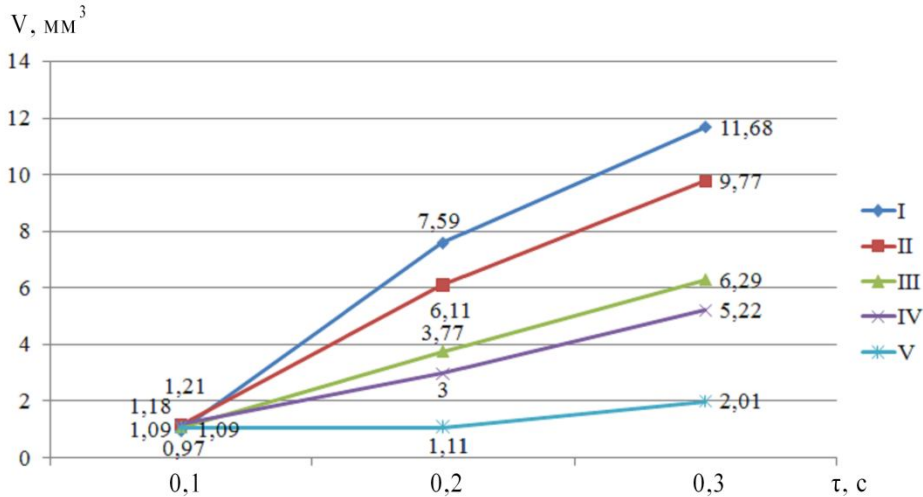


Рисунок 5 – Обсяг армувального волокна зруйнованого потоком за одиницю часу

Також встановлено, що безпосередньо на якість форми отвору впливає і точка натикання на перепону. Якщо у початковий момент часу струмінь не може подолати опір руйнування (наприклад, натикання на джгут), зона деструкції різко поширюється за межі безпосереднього гідровпливу.

діаграм (рис. 5) доводить, що у початковий момент часу за рахунок відбиття струменя можливе руйнування прилеглої до зони безпосереднього струмінного впливу зони.

При цьому розширення зони впливу становить 1,35–1,50 D_k .

Реалізація планів багатфакторного експерименту довела, що розширення зони гідродинамічного впливу найбільше залежить від початкових гідродарних явищ. При цьому змінюється профіль каналу прорізання: при недостатньому тиску йде активне розмивання верхнього шару, при високому – зона розмивання зміщується від верхньої площини донизу.

Проведення експериментальних досліджень довело тотожність прогнозу (математичного моделювання явищ руйнування гідроабразивним струменем) та експериментального різання карбон-карбових заготовок; показало задовільну східність результатів (рис. 6). Похибка вимірів не перевищує 25 %.



а)



б)



в)

Рисунок 6 – Дефекти гідроабразивного різання заготовок із ВВКМ 3d структури: розмиття верхнього шару (а), натикання на джгут (б) та якісна заготовка (в)

ВИСНОВКИ. Запропонована модель взаємодії гідроабразивного потоку із неоднорідним середовищем регулярної структури, в якому армування співпадають із осями дії струменя. Опис поширений на задачу прогнозування якості крайки при гідроабразивному різанні ВВКМ. Показано, що руйнування волокон відбувається нерівномірно, причому волокна, що знаходяться з боку дії струменя, мають істотний вплив на якість поверхні та на виникнення розмиттів і дефектів у прилеглих зонах.

Проведений комплекс досліджень дозволив установити, що для передування поширенню зони деструкції необхідно встановлювати такий тиск у контурі високого тиску мультиплікаторної системи, при якому б виникаючий початковий гідродудар був направлений поміж волокон і не припадав би на вертикально або близько до вертикально розташованого волокна. Цим вдається попередити утворення значних дефектів у вигляді розмиття карбон-карбонної заготовки в прилеглий до сформованої поверхні поділу зони.

ЛІТЕРАТУРА

1. Liu J. C., Wang D. Y., Che Y. W. Research on Manufacturing Process of Carbon-Carbon Composites as Ablation Resistance Materials. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 813. pp. 419–426.
2. Newcomb B. A. Processing, structure, and properties of carbon fibers. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2016. Vol. 91. Part 1. pp. 262–282.
3. Chung D. D. L. Processing-structure-property relationships of continuous carbon fiber polymer-matrix composites. *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2017. Vol. 113. pp. 1–29.
4. Pinho L. V., Carou D., Davim J. P. Comparative study of the performance of diamond-coated drills on the delamination in drilling of carbon fiber reinforced plastics: Assessing the influence of the temperature of the drill. *Journal of Composite Materials*. 2016. Vol. 50. Issue 2. pp. 179–189.
5. Uhlmann E., Sammler F., Richarz S. Machining of Carbon and Glass Fibre Reinforced Composites. *Procedia CIRP*. 2016. Vol. 46. pp. 63–66.
6. Alberdi A., Suárez A., Artaza T. Composite cutting with abrasive water jet. *Procedia Engineering*. 2013. Vol. 63. pp. 421–429.
7. Buchez A., Barsukov G. V., Stepanov Y. S., Mikheev A. V. Definition of abrasive water jet cutting capacity taking into account abrasive grain properties. *Selected Engineering Problems*. 2013. № 4. pp. 157–162.
8. Salenko A., Chencheva O., Lashko E. Forming a defective surface layer when cutting parts made from carbon-carbon and carbon-polymeric composites. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 4/1 (94). pp. 61–72.
9. Xu C., Song L., Zhu H. Experimental investigation on the mechanical behaviour of 3D carbon/carbon composites under biaxial compression. *Composite Structures*. 2018. Vol. 188. pp. 7–14.
10. Барсуков Г. В., Михеев А. В., Журавлева Т. А. Моделирование напряженного состояния слоистого материала под действием сверхзвуковой гидроабразивной струи. *Интернет-журнал "Мир Науки"*. 2014. Выпуск 4 (6) (октябрь–декабрь). С. 52–62.

DETERMINATION OF RATIONAL CONDITIONS OF ABRASIVE WATERJET CUTTING OF THICK CARBON-CARBON PLATES BASED ON THE MODELING OF A TWO-PHASE FLOW OF LIQUID

E. Lashko

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: evgeny.lashko.lj@gmail.com

Purpose. The features of samples processing from carbon-carbon composite materials by abrasive water jet cutting are shown. Possessing a set of unique physical and mechanical properties, the latter are increasingly applied in aviation and space technologies. It has been determined the conditions for the expansion of the destruction outside the jet impact zone as a two-phase flow of liquid and the detection of the conditions for the localization of the hydraulic action. **Methodology.** Engineering modeling by means of software tools FlowVision has been used to find out the diagram of the distribution of the hydrodynamic load of the elements of the processed composite in the jet impact zone. The comparative analysis method also has been used to find out cut quality. **Results.** The model of interaction of an abrasive water jet stream with an inhomogeneous environment of regular structure in which the reinforcement coincides with the axes of the jet is proposed. The calculated scheme of moving of two-phase flow of liquid in the carbon-based composite of the 3d structure at the initial moment and at the moment of stabilization is shown. The volume of reinforcing fiber that was destroyed by a two-phase flow of fluid per unit time has been determined. For experimental studies serial and special laboratory equipment of abrasive water jet processing has been used. Experimental studies have been carried out that prove the identity of the forecast (mathematical modeling of phenomena of destruction by abrasive water jet flow) and experimental cutting of carbon-carbon composite blanks. The results show a satisfactory convergence, the measurement error does not exceed 25%. **Originality.** For the first time the strain-stress state of the cutting zone in composite materials based on carbon fibers at abrasive water jet by means of engineering modeling has been determined. **Practical value.** The results have been actually implemented industrially, and are of interest for the further research aimed at the hybridization of processes, as well as the development of technologies based on a functional-oriented approach. References 10, table 1, figures 6.

Key words: abrasive waterjet cutting, carbon-based composite, two-phase flow, modeling.

REFERENCES

1. Liu, J. C., Wang, D. Y., Che, Y. W. (2013), "Research on Manufacturing Process of Carbon-Carbon Composites as Ablation Resistance Material", *Advanced Materials Research*, vol. 813, pp. 419–426.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.813.419>
2. Newcomb, B. A. (2016), "Processing, structure, and properties of carbon fibers", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 91, part 1, pp. 262–282.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.10.018>
3. Chung, D. D. L. (2017), "Processing-structure-property relationships of continuous carbon fiber polymer-matrix composite", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 113, pp. 1–29.
<https://doi.org/10.1016/j.mser.2017.01.002>
4. Pinho, L. V., Carou, D., Davim, J. P. (2016), "Comparative study of the performance of diamond-coated drills on the delamination in drilling of carbon fiber reinforced plastics: Assessing the influence of the temperature of the drill", *Journal of Composite Materials*, vol. 50, issue 2, pp. 179–189.
<https://doi.org/10.1177/0021998315571973>
5. Uhlmann, E., Sammler, F., Richarz, S. (2016), "Machining of Carbon and Glass Fibre Reinforced Composites", *Procedia CIRP*, vol. 46, pp. 63–66.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.197>
6. Alberdi, A., Suárez, A., Artaza, T. (2013), "Composite cutting with abrasive water jet", *Procedia Engineering*, vol. 63, pp. 421–429.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.217>
7. Buchcz, A., Barsukov, G. V., Stepanov, Y. S., Mikheev, A. V. (2013), "Definition of abrasive water jet cutting capacity taking into account abrasive grain properties", *Selected Engineering Problems*, no 4, pp. 157–162.
8. Salenko, A., Chencheva, O., Lashko, E. (2018), "Forming a defective surface layer when cutting parts made from carbon-carbon and carbon-polymeric composites", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 4/1 (94), pp. 61–72.
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.139556>
9. Xu, C., Song, L., Zhu, H. (2018), "Experimental investigation on the mechanical behaviour of 3D carbon/carbon composites under biaxial compression", *Composite Structures*, vol. 188, pp. 7–14.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.035>
10. Barsukov, G. V., Mikheev, A. V., Zhuravleva, T. A. (2014), *Modelirovanie napryazhennogo sostoyaniya sloistogo materiala pod deystviem sverkhzvukovoy gidroabrazivnoy strui* [Modeling the stress state of the layered material under the action of the supersonic abrasive water jet], *Internet-journal «Mir Nauki»*. Vol. 4 (6) (october-december), pp. 52–62.

Стаття надійшла 01.06.2018.