

**ВИСОКОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ
В ПРИЛАДОБУДУВАННІ**

УДК 621.95.01: 621.95.02

**ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ СВЕРДЛІННЯ ОТВОРІВ В ВОЛОКНИСТИХ
КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛАХ**¹⁾Гречук А. І., ²⁾Глоба О. В., ¹⁾Девін Л. М.¹⁾Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, м. Київ, Україна²⁾Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, УкраїнаE-mail: grechukand@gmail.com, alexandr.globa.vasy1@gmail.com, Ldevin350@gmail.com

Проблематика. Волокнисті полімерні композиційні матеріали (ВПКМ) використовуються в багатьох галузях сучасного машинобудування, зокрема авіа- та ракетобудування. Для виробництва сучасного пасажирського літака необхідно виробити мільйони високоякісних отворів в деталях з ВПКМ для забезпечення надійних болтових та заклепочних з'єднань. Свердління є ключовою механічною операцією для виробництва отворів в ВПКМ. На відміну від свердління металовмісних матеріалів, свердління ВПКМ супроводжується виникненням специфічних дефектів, таких як розшарування, незрізані волокна, викривлення матриці ВПКМ з поверхні отвору та термодеструкції. Перелічені дефекти негативно впливають на надійність болтових та заклепочних з'єднань між деталями з ВПКМ, що зумовлює актуальність даного дослідження.

Мета дослідження. Визначення впливу допоміжних різальних кромок розробленого свердла з НТМ на якість поверхонь отворів в зразках з вуглепластику.

Методика дослідження. Поставлена мета була реалізована шляхом експериментальних досліджень зі свердління зразків з вуглепластику розробленим свердлом та свердлами SECO (Швеція) з ідентичними умовами різання. Процеси свердління супроводжувались реєстрацією осьової сили різання, крутного моменту та випромінювання сигналу акустичної емісії. Аналіз отриманих сигналів дозволив дослідити особливості роботи допоміжних різальних кромок розробленого свердла. Якість поверхонь просвердлених отворів було проаналізовано за рахунок визначення шорсткості, використовуючи оптичний мікроскоп Alicona Infinite Focus (Австрія). За результатами експериментальних досліджень було зроблено відповідні висновки.

Висновки. Аналіз даних виявив, що розроблене свердло забезпечує вдвічі нижчу шорсткість поверхонь отворів ніж свердло SECO за умови однакової величини зносу головних різальних кромок. Такий результат, головним чином, зумовлений роботою допоміжних різальних кромок розробленого свердла на реверсивному ході.

Ключові слова: свердління, акустична емісія, вуглепластик.

Вступ

Волокнистим композиційним полімерним матеріалам (ВПКМ) притаманні такі унікальні властивості як висока міцність, жорсткість, низький коефіцієнт термічного розширення, високі пружні властивості та корозійний опір [1], що зумовлюють їх використання в різноманітних галузях сучасного машинобудування, зокрема авіабудування. Вміст ваги композиційних матеріалів в конструкціях сучасних літальних апаратів в порівнянні з 1970 роком виріс від 2 до 50 % [2, 3]. Технологічний процес виготовлення волокнистих композиційних матеріалів передбачає можливість формування деталей складних форм. Кінцева механічна обробка деталей з ВПКМ полягає в свердлінні отворів для болтових та заклепочних з'єднань [4].

Вміст вуглецевих або органічних волокон високої міцності, багатонаправлені схеми армування та анізотропія властивостей ВПКМ, зумовлюють вини-

кнення різноманітних дефектів при свердлінні, що є нетиповим для процесу обробки металевих гомогенних матеріалів. Серед відомих дефектів можна виділити утворення незрізаних волокон та розшарування композиту на вході та виході отвору, термодеструкція матриці і волокон за рахунок виникнення високих температур в зоні різання та пошкодження поверхні отвору. Утворення дефектів знижує надійність болтових та заклепочних з'єднань між деталями з ВПКМ [4] та зумовлює актуальність їх дослідження.

Виникнення перелічених дефектів пов'язане зі складною будовою ВПКМ. Різноманітні схеми армування композитів волокнами та вуглецевій та на органічній основі зумовлюють варіативність процесів стружкоутворення при свердлінні. Впродовж свердління, різальні кромки (РК) свердла знаходяться в різних положеннях відносно волокон одного шару. Це зумовлює зміну кута врізання РК в шар волокон та призводить до утворення

руйнувань на поверхні отвору. Дане явище було досліджено в роботах [5-7]. Було виявлено, що головним чинником виникнення таких дефектів є інтенсивний знос РК свердел.

Дана робота присвячена дослідженню дефектів поверхні отвору та аналізу процесу свердління зразків з ВПКМ.

Розроблене свердло з АТП

Для свердління ВПКМ загалом використовуються спіральні та перові свердла з швидкоріжучої сталі, твердого сплаву. Високі абразивні властивості ВПКМ призводять до інтенсивного зносу та збільшення радіуса РК свердел. З метою підвищення ефективності свердління ВПКМ та забезпечення високої якості отворів в Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля було розроблено та виготовлено свердло з ріжучою частиною з полікристалу алмазу [8] рис.1, б. Свердло оснащене двома симетрично розташованими алмазно-твердосплавними пластинами. Геометрія різальної частини була забезпечена внаслідок заточки по передній та задній поверхнях. Однією з особливостей розробленого свердла є розташування допоміжних різальних кромок паралельно осі свердла.

Експериментальні дослідження

Експериментальне дослідження полягало в свердлінні зразків з вуглепластику свердлами з твердого сплаву та розробленим свердлом. Використовували зразки з вуглепластику надані компанією SAAB AB. Зразки мали розміри 120x100x8 мм зі схемою армування [0,45,-45,90]. Вуглепластик складався з епоксидної смоли та поліакриліттрилового волокна діаметром 7 мкм. Використовувалося твердосплавне свердло надане компанією SECO AB, модель SD290A-7.963 (рис. 1 а).



Рис. 1. Свердла для обробки ВПКМ: а) – SECO SD290A-7.963; б) – розроблене свердло з АТП

Під час свердління проводилась реєстрація осьової сили різання, крутного моменту та сигналу акустичної емісії (АЕ). Осьова сила та крутний момент реєструвалися за допомогою динамометра *Kistler 9129A*, під'єданого до підсилювача *Kistler 5070* та персонального комп'ютера через АЦП *National Instruments 9223*. Для реєстрації випромінювання АЕ був використований датчик ДСИМ-1 [9], з частотою 1 МГц, під'єднаний до підсилювача *Kistler 5019* та персонального комп'ютера через АЦП *National Instruments 9223*. Зареєстровані сигнали оброблювались в програмному середовищі *MATLAB*.

На рис.2 продемонстровані зареєстровані сигнали осьової сили, крутного моменту та АЕ впродовж свердління заготовки вуглепластику розробленим свердлом. Свердління здійснювалося зі швидкістю різання $V_c=180$ м/хв і подачею $S=0,02$ мм/об.

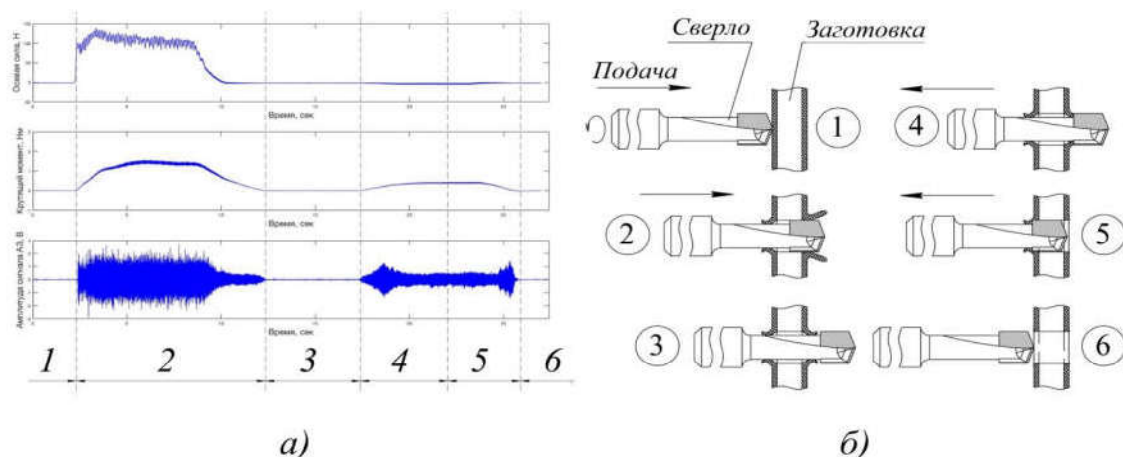


Рис. 2. Зареєстровані сигнали (а) осьової сили, крутного моменту та сигналу АЕ при свердлінні зразків з вуглепластику розробленим свердлом на відповідних стадіях (б)

Представлені сигнали на рис. 2 а можна розділити на 6 складових зон, які характеризують 6 відповідних стадій процесу свердління розробленим свердлом, що зображені на рис. 2, б. Зона 1 -

це підхід свердла до заготовки, що супроводжується відсутністю сили різання, крутного моменту та сигналу АЕ. Зона 2 характеризує процесі врізання, свердління та виходу свердла із зони різан-

ня, що супроводжуються виникненням незрізаних волокон отвору зі сторони входу і виходу свердла із заготовки.

Під час виходу свердла із зони різання, незрізані волокна в силу своїх пружних властивостей, відгинаються в їх початкове положення. Зона 3 характеризує третя незрізаних волокон та державки свердла, внаслідок того, що діаметр державки менший ніж діаметр різальної частини, як показано на стадії 3 (рис. 2, б).

Після деякого проміжку часу свердлу була надана реверсна подача, яка також дорівнювала 0,02 мм/об. Оскільки напрям обертання свердла не був змінений, вершина допоміжної різальної кромки здійснювала зрізання незрізаних волокон. Це підтверджується наявністю крутного моменту, сили різання та сигналу АЕ впродовж зон 4 та 5. Величина крутного моменту складала 45% від величини крутного моменту під час різання впродовж зони 2. Це зумовлено зрізанням тонкого шару незрізаних волокон та тертям допоміжних різа-

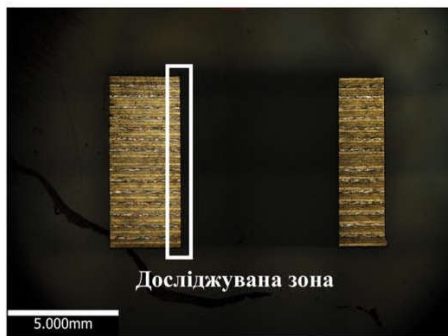
льних кромки об поверхню отвору. Сила різання мала від'ємне значення впродовж зон 4 та 5 при величині в 4% від осьової сили на робочому ході. Сигнал АЕ реєстрував процеси зрізання волокон зі сторони виходу отвору в зоні 4 та входу в зоні 5. Зрізання волокон супроводжувалося сплесками сигналу у відповідних зонах.

Дослідження якості просвердлених отворів

Дослідження якості отворів полягало у аналізі руйнувань та вимірюванні шорсткості поверхні отвору. Для аналізу якості, зразки з просвердленими отворами були розрізані навпіл в осьовому перерізі, а потім залиті прозорою епоксидною смолою *Struers EpoFix* (Данія) з використанням вакуумної камери з метою заповнення порожнеч. Фінішне полірування зразків (рис. 4,а) відбувалося за допомогою автоматичної полірувальної машини *Struers Tegramin-30*, полірувальних дисків *MD-Chem* та колоїдної емульсії *OP-S 0,04* мкм.



а)



б)

Рис. 4. Зразки просвердлених отворів (а) та зображення торцевої поверхні отвору (б)

Зразки були досліджені використовуючи оптичний мікроскоп *Alicona Infinite Focus* (Австрія). На рис.4б продемонстровано результат вимірювання типового отвору, просвердленого розробленим свердлом. Виділена досліджувана зона є профілем поверхні отвору в осьовому перерізі. Аналогічні дослідження були проведені для отворів просвердлених твердосплавним свердлом *SECO SD290A-7.963*. На рис. 5 представлені приклади профілів поверхонь отворів.

Під час проведення аналізу зразків було виявлено значні пошкодження матриці вуглепластику на поверхнях отворів просвердлених свердлом *SECO SD290A-7.963* (рис.5 а, г). Поверхня отворів просвердлених розробленим свердлом є більш якісною (рис.5 б, в). Величину викришування можна визначити внаслідок виміру глибини викришування матриці композиту. Для цього можна використати нормовані параметри шорсткості.

Шорсткість поверхні отворів можна вимірювати за допомогою профілометрів, як це здійснено в роботах [6, 10]. Використання класичного мето-

ду може призвести до руйнування матеріалу та зниження точності вимірювань. У зв'язку з цим шорсткість вимірювалась за допомогою оптичного мікроскопу *Alicona Infinite Focus* (Австрія). Приклади поверхонь та отримані профілограми зображені на рис. 6. Шорсткість вимірювалась з використанням поляризованого світла для уникнення відблисків на вимірювальній поверхні.

На рис. 6,а зображені результати вимірювання шорсткості поверхонь отворів, просвердлених свердлом *SECO SD290A-7.963*, та розробленим свердлом з АТП на рис. 6, б.

Результати проведених вимірювань шорсткості поверхонь отворів в залежності від зносу головних РК свердел представлені на рис. 7. Знос свердел вимірювався шляхом створення 3D моделей свердел за допомогою оптичного мікроскопу. Результати вимірювань свідчать, що розроблене свердло з АТП забезпечує шорсткість $Ra 2.4$, а свердло *SECO SD290A-7.963* – $Ra 4.7$ за умови однакової величини зносу РК свердел.

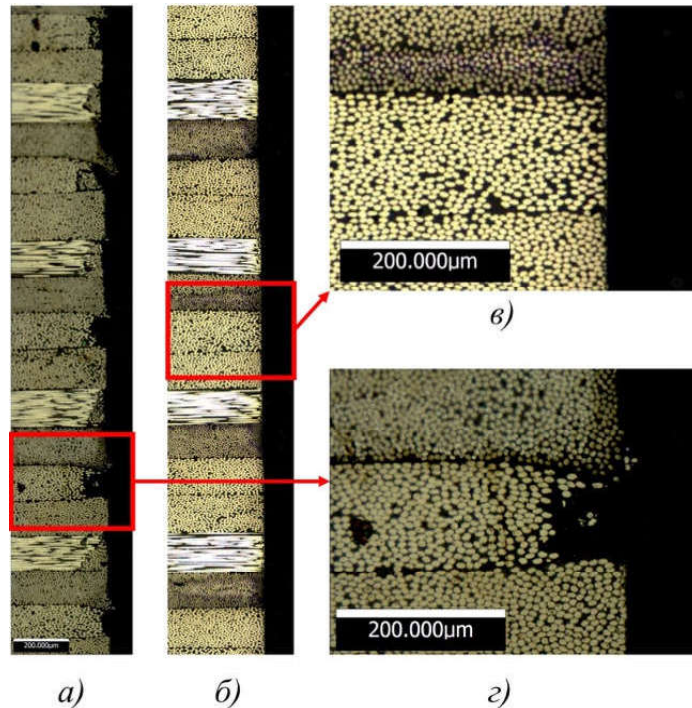


Рис. 5. Профілі поверхонь отворів в осьовому перерізі: а), г) – свердлом *SECO SD290A-7.963*; б), в) – розробленим свердлом з АТП

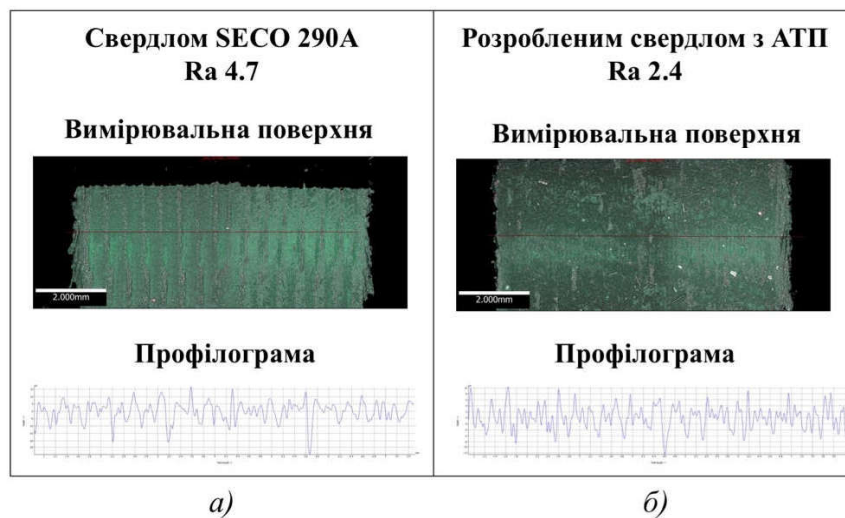


Рис. 6. Вимірювальні поверхні та профілограми: а) – в результаті свердління свердлом *SECO 290A*; б) – розробленим свердлом з АТП

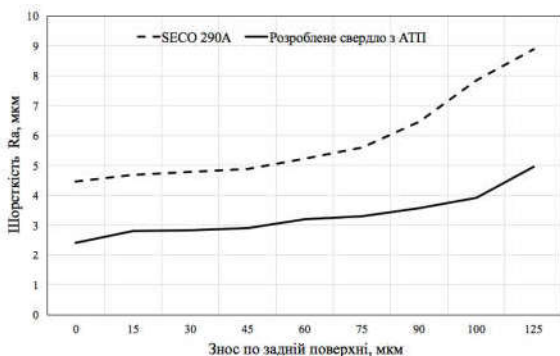


Рис. 7. Графік залежності шорсткості поверхні отворів від величини зносу свердел по задній поверхні

Висновки

В роботі було досліджено роботу допоміжних різальних кромки розробленого свердла з АТП. Виявлені ділянки сигналів АЕ, осьової сили та крутного моменту на реверсному ході свердла свідчать про додаткові процеси різання, а саме роботу допоміжних різальних кромки. За результатами проведення експериментальних досліджень по свердлінню заготовок термореактивних вуглепластиків розробленим свердлом та свердлом *SECO 290A* можна зазначити, що поверхні отворів просвердлених розробленим свердлом мають більш високу якість. Такі висновки базуються на отриманих результатах оптичної мікроскопії пове-

рхонь отворів, а також виміру параметру шорсткості Ra . Аналіз даних виявив, що розроблене свердло забезпечує вдвічі нижчу шорсткість поверхонь отворів ніж свердло *SECO SD290A-7.963* за умови однакової величини зносу головних різальних кромок.

Робота була виконана за підтримкою програми Європейського Союзу ЕРАЗМУС+ (грант № SMS-300668), проекту “*Sustainable Production Initiative (SPI)*” в кооперації з Лундським університетом (Швеція) та Технічним університетом Чалмерса (Швеція). Окремо вдячні компаніям *SECO Tools AB* та *SAAB AB* (Швеція).

Література

1. Hocheng H. (ed.). *Machining technology for composite materials: principles and practice*. – Elsevier, 2011.
2. Кива Д. С. Этапы становления и начала развернутого применения полимерных композиционных материалов в конструкциях пассажирских и транспортных самолетов (1970–1995 гг.) // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2014. – №. 6. – С. 5–16–5–16.
3. Ко F. K., Wan L. Y. *Textile Structural Composites: From 3-D to 1-D Fiber Architecture* // *The Structural Integrity of Carbon Fiber Composites*. – Springer International Publishing, 2017. – P. 795-847.
4. Лупкин Б. В. и др. Влияние технологических параметров процесса сверления на статическую

прочность болтовых соединений ПКМ // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. – 2013. – №. 60. – С. 30-41.

5. Henerichs, M., Voß, R., Kuster, F., Wegener, K., 2015. Machining of carbon fiber reinforced plastics: Influence of tool geometry and fiber orientation on the machining forces. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 9, p.136-145.
6. Ramirez, C., Poulachon, G., Rossi, F., M'Saoubi, R., 2014. Tool wear monitoring and hole surface quality during CFRP drilling, 2nd CIRP 2nd CIRP Conference on Surface Integrity (CSI), *Procedia CIRP*, p. 163-168.
7. Poulachon G. et al. Hole surface topography and tool wear in CFRP drilling // *Procedia CIRP*. – 2016. – V. 45. – P. 35-38.
8. Патент України №112821 «Свердло для обробки полімерних композиційних матеріалів» від 26.12.2016
9. Девин Л. Н., Широкополосные датчики акустической эмиссии для диагностики состояния режущих инструментов / Л. Н. Девин, Н. В. Новиков // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. – 2008. – №4. – С.81 – 85.
10. Eneyew, Eshetu Demissie. *Experimental Study of Damage and Defect Detection during Drilling of CFRP Composites*. Diss. 2014.

УДК 621.95.01: 621.95.02

¹⁾А. И. Гречук, ²⁾А. В. Глоба, ¹⁾Л. Н. Девин

¹⁾Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев, Украина

²⁾Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, Украина

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА СВЕРЛЕНИЯ ОТВЕРСТИЙ В ВОЛОКНИСТЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

Проблематика. Волокнистые полимерные композиционные материалы (ВПКМ) используются во многих отраслях современного машиностроения, в частности авиа- и ракетостроения. Для производства современного пассажирского самолета необходимо выработать миллионы высококачественных отверстий в деталях с ВПКМ для обеспечения надежных болтовых и заклепочных соединений. Сверление является ключевой операцией механообработки для производства отверстий в ВПКМ. В отличие от сверления металлоконтрастных материалов, сверление ВПКМ сопровождается возникновением специфических дефектов, таких как расслоение, несрезанные волокна, выкрашивание матрицы ВПКМ с поверхности отверстия и термодеструкция. Перечисленные дефекты отрицательно влияют на надежность болтовых и заклепочных соединений между деталями из ВПКМ, что обуславливает актуальность данного исследования.

Цель исследования. Определение влияния вспомогательных режущих кромок разработанного сверла из СТМ на качество поверхностей отверстий в образцах из углепластика.

Методика исследования. Поставленная цель была реализована путем экспериментальных исследований по сверлению образцов из углепластика разработанным сверлом и сверлами *SECO* (Швеция) с идентичными условиями резания. Процессы сверления сопровождалась регистрацией осевой силы резания, крутящего момента и сигнала акустической эмиссии. Анализ полученных сигналов позволил исследовать особенности работы вспомогательных режущих кромок разработанного сверла. Качество поверхностей просверленных отверстий были проанализированы за счет определения шероховатости, используя оптический микроскоп *Alicona Infinite Focus* (Австрия). По результатам экспериментальных исследований были сделаны соответствующие выводы.

Выводы. Анализ данных показал, что разработанное сверло обеспечивает более низкую шероховатость поверхностей отверстий, чем сверло SECO при одинаковой величине износа главных режущих кромок. Такой результат, главным образом, обусловлен работой вспомогательных режущих кромок разработанного сверла на реверсивном ходу.

Ключевые слова: сверление, акустическая эмиссия, углепластик.

¹⁾**A. I. Hrechuk, ²⁾A. V. Globa, ¹⁾L. M. Devin**

¹⁾*V. Bakul Institute of Superhard materials, Kyiv, Ukraine*

²⁾*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*

INCREASING THE QUALITY OF DRILLING HOLES IN FIBER REINFORCEMENT COMPOSITE MATERIALS

Problems. Fiber reinforcement polymer composite materials (FRP) are used in many areas of modern machine building, mostly in aircraft and aerospace industries. Millions of high-quality holes in FRP details are necessary for production of a modern passenger aircraft, to provide reliable bolt and rivet connections. Drilling is a key-machining operation for the production of holes in FRP.

Comparing metal-containing materials drilling, FRP drilling is accompanied by the appearance of specific defects, such as delamination, uncut fibers, the damages of FRP's matrix from the holes surface and thermal destruction. The listed defects adversely affect the reliability of bolt and rivet joints between parts of FRP, which determines the relevance of this study.

The aim of the study. Determination of the influence of the support cutting edges of the developed drill with superhard materials on the holes surfaces quality of carbon fiber reinforcement plastics (CFRP) samples.

Research methodology. The goals were achieved by experimental investigations on drilling CFRP samples by the designed drill bits and drill bit from SECO (Sweden) with similar cutting conditions. The drilling process was accompanied by the registration the axial force of cutting, torque and the acoustic emission signal. The analysis of the registered signals allowed to study the features of support cutting edges of the developed drill. The quality of the drilled holes surfaces was analyzed by determining the roughness using Alicona Infinite Focus (Austria) optical microscope. Conclusions were made according to the results of experimental studies.

Conclusions. Analyzed data are shown, that the developed drill provides twice the lower roughness of the holes surfaces than the drill SECO, according to the same level of the wear of the main cutting edges. These results are mainly due to the work of the support cutting edges of the developed drill on a reversing feed.

Keywords: drilling, acoustic emission, CFRP.

*Надійшла до редакції
08 листопада 2017 року*

*Рецензовано
18 листопада 2017 року*

© Гречук А. І., Глоба О. В., Девін Л. М., 2017

УДК 536.212:536.627

МЕТОД КОНТРОЛЮ СТУПЕНЯ СФЕРОЇДИЗАЦІЇ ГРАФІТУ У ВИСОКОМІЦНОМУ ЧАВУНІ

Шевченко О. І.

Головна астрономічна обсерваторія НАН України, м. Київ, Україна

E-mail: soi_51@ukr.net

У статті наведено аналіз наявних методів, стандартних зразків, засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) та державних стандартів і моделей вимірювань при розробленні та виготовленні виробів з чавуну. Основу технології ливарного виробництва становлять теплові процеси. Значна частина усіх вимірювань, що виконуються у цехових та лабораторних умовах, припадає на теплофізичні вимірювання. Наявні теплофізичні методи контролю мають недостатньо високу чутливість та роздільну здатність у визначенні технологічних параметрів. Описаний перетворювач та метод вимірювання ступеня сфероїдизації графіту у високоміцному чавуні у промислових умовах на автомобільному заводі.