

же проблема контролю износа режущего инструмента и возможный путь ее решения. В основной части рассматривается метод диагностики состояния режущего инструмента в условиях автоматизированного производства, основанный на измерении сигнала акустической эмиссии и мощности резания. Основной задачей этого метода является сбор максимально точной информации о состоянии инструмента, чтобы исключить возможные непредвиденные ситуации, в которых система автоматизированного контроля может принять неверное решение и выполнить неправильное действие. Она позволяет контролировать интенсивность износа режущего инструмента и прогнозировать его работоспособность, что позволяет повысить точность, качество и эффективность механообработки.

**Ключевые слова:** диагностика, процесс резания, автоматизация, режущий инструмент, износ, работоспособность режущего инструмента.

**Ye. V. Bohachov, Ye. I. Korobtsov, V. V. Shevchenko**

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

## METHOD OF INCREASING THE RELIABILITY OF DIAGNOSTICS OF THE STATE OF THE CUTTING TOOL IN THE AUTOMATED PROCESSING OF PARTS

This article consists of an introduction that explains the need to develop methods of increasing the reliability for diagnosing the state of a cutting tool, from the problem that describes the cutting process at the microstructural level, the problem of wear of the cutting tool and the possible way to solve it is determined. In the main part, the method of increasing the reliability for diagnosing the state of a cutting tool under conditions of automated production is considered, based on the measurement of the acoustic emission signal and the cutting power. The main task of this method is to collect the most accurate information about the state of the instrument in order to exclude possible unforeseen situations in which the automated control system can make the wrong decision and perform the wrong action. The results of experimental studies are the main justification that the main parameters by which it is better to observe the state of the operability of the cutting tool is the signal of the acoustic emission of the cutting zone and the cutting power.

This diagnostic method works by a single algorithm, which has two variants of event development. The first option is a fast-responding emergency stop system, based on tracking and analyzing power cut changes. The second option is a subsystem diagnostics of the efficiency of the cutting tool, which evaluates and predicts the state of the cutting tool and is carried out on the basis of the combination parameter of acoustic emission. With the help of the presented formulas, it is possible to approximately predict the wear of the tool. Improving the method for diagnosing the operability of the cutting tool makes it possible to more accurately control the wear and durability of the cutting tool both in the machining process and in the technologically processing system as a whole.

The general functional block diagram of the diagnostic method is depicted graphically and is a good example of how this method can reduce the number of defective parts, by increasing reliability and accuracy in the conditions of automated production. It allows you to monitor the intensity of wear of the cutting tool and to predict its performance, which makes it possible to improve the accuracy, quality and efficiency of machining. Also at the end are conclusions and a list of references.

**Keywords:** diagnostics, cutting process, automation, cutting tools, wear, cutting tool operability.

*Надійшла до редакції  
25 квітня 2018 року*

*Рецензовано  
11 травня 2018 року*

УДК 621.95.01: 621.95.02

## МОНІТОРИНГ ПРОЦЕСУ СВЕРДЛІННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ РЕЄСТРАЦІЄЮ СИГНАЛУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ

<sup>1)</sup>Гречук А. І., <sup>1)</sup>Девін Л. Н., <sup>2)</sup>Глоба О. В.

<sup>1)</sup>Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, Київ, Україна

<sup>2)</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені  
Ігоря Сікорського», Київ, Україна

*E-mail:* [grechukand@gmail.com](mailto:grechukand@gmail.com), [Ldevin350@gmail.com](mailto:Ldevin350@gmail.com), [alexandr.globa.vasyl@gmail.com](mailto:alexandr.globa.vasyl@gmail.com)

**Проблематика.** Волокнисті полімерні композиційні матеріали (ВПКМ) широко використовуються в різних галузях сучасного машинобудування для виготовлення деталей складної форми. Свердління отворів в деталях з ВПКМ може супроводжуватися виникненням специфічних геометричних дефектів, які приводять до

розміщення та зниження надійності з'єднань між деталями. Тому, визначення величини дефектів отворів, які просвердлені в зразках з ВПКМ є першочерговою задачею для підвищення продуктивності зборки конструкцій з ВПКМ в промисловості.

**Мета дослідження.** Розробити методіку визначення величини дефектів, а саме незрізаних волокон, які просвердлені в зразках з ВПКМ.

**Методика дослідження.** Поставлена мета була реалізована шляхом реєстрації та аналізу сигналу акустичної емісії в процесі свердління заготовок з вуглепластику твердосплавними свердлами SECO Tools AB (Швеція), використовуючи широкосмугові п'єзоелектричні датчики акустичної емісії ДИСМ-1. Аналіз отриманих сигналів дозволив дослідити процес свердління, а також визначити ділянки сигналів, які характеризують контактні явища між різальним інструментом та утвореними дефектами.

**Висновки.** За результатами експериментальних досліджень було запропоновано емпіричну модель, яка описує залежність сигналу акустичної емісії від величини незрізаних волокон, що утворюються при свердлінні зразків з вуглепластику.

**Ключові слова:** свердління, акустична емісія, вуглепластик.

### Вступ

Волокнисті полімерні композиційні матеріали (ВПКМ) широко використовуються в різних галузях сучасного машинобудування зокрема в авіабудівній промисловості. Унікальні властивості ВПКМ вигідно виділяють їх серед інших конструкційних матеріалів за рахунок можливості зменшення питомої ваги літаків, що сприяє підвищенню продуктивності польотів [1]. Важливою особливістю технологічного процесу виготовлення ВПКМ є можливість високоточного виготовлення великогабаритних деталей складної форми. Завдяки цьому, механічна обробка ВПКМ головним чином полягає у виготовленні отворів в деталях з ВПКМ для забезпечення надійних з'єднань. Свердління є основоположною механічною операцією в авіабудівній промисловості для виготовлення високоякісних отворів в деталях з ВПКМ [2].

ВПКМ відносяться до важкооброблюваних матеріалів із-за висоміцних складових, багатокомпонентної та шарової структури матеріалу. Обробка отворів в деталях з ВПКМ супроводжується інтенсивним зносом різальних кромок інструменту, високою адгезією та термічною деградацією волоконно-матричного наповнення ВПКМ, а також виникненням специфічних геометричних дефектів серед яких незрізані волокна (рис. 1). Наявність таких дефектів призводить до утворення зазорів між деталями внаслідок чого відбувається розхитування та послаблення з'єднань під час використання конструкцій, що є неприйнятними для загальних вимог машинобудування [3].

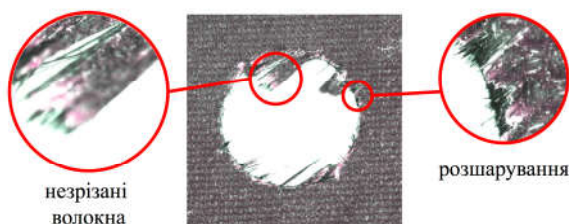


Рис. 1. Дефекти просвердленого отвору в ВПКМ

S. Guagel [4] запропонував вимірювати загальну площу незрізаних волокон, використовуючи бінаризацію цифрових зображень просвердлених отворів, які були отримані шляхом світло-оптичної мікроскопії. Процес бінаризації полягає в конвертації кольорового зображення в чорно-біле, при чому кожна точка зображення змінює свій колір на чорний або білий в залежності від величини контрасту. Це досягається за рахунок контрастного фону, що забезпечує видиме розмежування між простором отвору і незрізаними волокнами та дозволяє отримати фактичний контур незрізаних волокон. Подібний спосіб оптичного визначення величини незрізаних волокон було використано у роботах [5, 6]. Недоліками цього способу є необхідність застосування оптичного мікроскопу з високою роздільною здатністю, розробки спеціалізованого програмного забезпечення для цифрового аналізу отриманих зображень просвердлених отворів, а також неможливості визначення величини незрізаних волокон в промислових умовах.

В даній роботі представлено альтернативний метод визначення площі незрізаних волокон просвердлених отворів в ВПКМ за рахунок реєстрації та аналізу сигналу акустичної емісії під час свердління.

### Обладнання та інструмент

В роботі досліджувався процес свердління зразків з вуглепластику, що складався з 40% матриці на основі епоксидної смоли та 60% високоміцних поліакриліїтрилових (PAN – polyacryl nitrile) волокон. Заготовки вуглепластику товщиною ~8 мм склалися з 64 шарів по 125 мкм кожний. Шари по чергово орієнтовані під кутами [0/45/-45/90] градусів. Це комерційно доступний тип ВПКМ, який використовується в сучасній авіабудівній промисловості.

Свердління зразків було проведено на трьохосьовому вертикально-фрезерному верстаті з ЧПК ЕСМО PC Mill 300 (США), максимальною частотою обертання шпинделя  $n=10000$  об/хв. Використовувались твердосплавні свердла без покриття SECO SD290A-7.963 (Швеція), діаметром 8 мм.

Випромінювання акустичної емісії реєстрували за допомогою п'єзоелектричного датчика ДИСМ-1

[7] закріпленого на дослідній заготовці через прошарок акустопрозорого мастила на відстані 40 мм від отвору. Датчик під'єднувався до ПК через підсилювач KISTLER 5019 (Швейцарія) та аналого-цифровий перетворювач National Instruments 9223 (США) з частотою опитування 1 МГц. Схема під'єднання зображена на рис. 2.

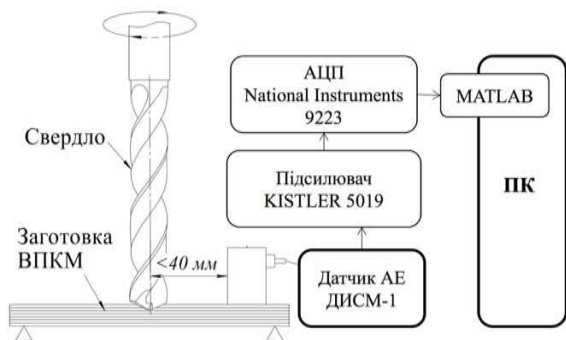


Рис. 2. Схема розташування та підключення датчика АЕ

#### Визначення площі незрізаних волокон

Аналіз дефектів полягав у визначенні площі незрізаних волокон шляхом цифрової обробки зображень просвердлених отворів в зразках з вуглепластику. Зображення були отримані на світло-оптичному мікроскопі Alicona Infinite Focus 3D (Швейцарія).

Процес визначення площі незрізаних волокон полягав у визначенні контуру незрізаних волокон та координат центру  $(x_c, y_c)$  та діаметру  $D_{ном}$  кола, яке описує границі просвердленого отвору. Для цього було розроблено програмне забезпечення в середовищі програмування MATLAB. Визначення параметрів кола починається з бінаризації оригінального зображення просвердленого отвору (рис. 2.6, а) та видалення відблисків. Результат процесу бінаризації зображено на рис. 2.6, б. Після бінаризації здійснюється трасування границь білих та чорних зон, в результаті чого визначається контур внутрішнього простору отвору. Для здійснення бінаризації та створення контуру використовувались функція `imbinarize` (функція MATLAB [8]) та алгоритм трасування «Окіл Мура» [9].

Висока роздільна здатність зображення (990 PPI) забезпечує високу точність аналізу, створюючи таким чином контур з великою кількістю точок (12-50 тис.). Описаний контур містить в собі всі точки, що відповідають положенню незрізаних волокон та границі отвору. Серед точок цього масиву обираються діаметрально протилежні пари точок, відстань між якими близька до діаметра свердла, яким проводилось свердління. Для визначення діаметру та координат центра кола було використано функцію `circfit`, яка була запропонована А. Horschler [10].

Для точного визначення контуру незрізаних волокон, було здійснено видалення зовнішньої зони навколо визначеного кола (рис. 3, г). Це дозволило

виключити з процесу аналізу незрізаних волокон частину розшарування. Після цього, виконується операція бінаризації зображень з врахуванням виключених зон, що дозволяє визначити контур та площу незрізаних волокон  $S_f$  (рис. 3, д-е).

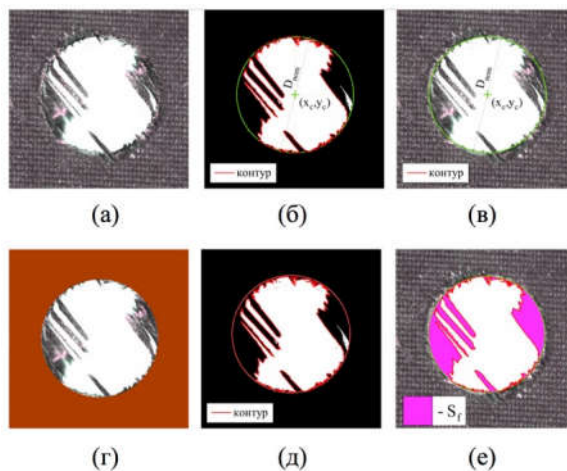


Рис. 3. Зображення просвердленого отвору: (а) – оригінальне зображення просвердленого отвору; (б) – бінаризоване зображення; (в) – шукане коло, яке описує границі просвердленого отвору; (г) – зображення з вирізаною зовнішньою зоною визначеного кола; (д, е) – контур незрізаних волокон.

#### Аналіз сигналу акустичної емісії

При виході свердла із зони різання, незрізані волокна ВПКМ знаходяться в контакт з неріжучою частиною свердла. В процесі обертання свердла, в зонах контакту відбуваються контактні процеси, що зумовлені високою міцністю та пружним властивостям волокон вуглепластику. На рис. 4 схематично зображені стадії свердління, які відповідають ділянкам сигналу АЕ, який було зареєстровано в процесі свердління.

На рис. 4 виділено стадії різання 1–4, які відповідають реєстрованому сигналу акустичної емісії 5 на відрізьку AD в процесі свердління заготовки 6 з вуглепластику, свердлом 7, що рухається за напрямом 8. Стадія 1 характеризує підхід свердла до заготовки і відповідає сигналу акустичної емісії на відрізьку АВ. Стадія 2 зображує вривання, свердління та вихід свердла із заготовки, що відповідає сигналу на відрізьку ВС. Відрізок CD сигналу акустичної емісії характеризує контактні процеси між свердлом, що обертається без подачі та утвореними незрізаними волокнами 9 отвору 10 вздовж його грані 11 в зоні контакту 12. Стадія 4 відповідає відрізьку DE сигналу і виходу свердла із зони контакту. Визначення площі незрізаних волокон реалізовано шляхом розрахунку СКВ амплітуди реєстрованого сигналу АЕ (на відрізьку CD) заготовки в процесі обертання свердла після його виходу із зони різання на відстань не більшу ніж половина діаметру.

Як показують експериментальні дослідження, розраховані СКВ значення  $\sigma$  амплітуди реєстрова-

них сигналів АЕ на відповідних відрізках СД знаходяться в лінійній залежності від площі утворених незрізаних волокон при відповідних операціях свердління і описується функцією виду:

$$S = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot \sigma}{4k}$$

де  $D$  – діаметр свердла;  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення (СКВ) амплітуди на відповідному відрізку СД сигналу акустичної емісії (рис. 4);  $k$  – безрозмірний коефіцієнт, що визначається експериментальним шляхом для різних типів ВПКМ та величини частоти обертання свердла.

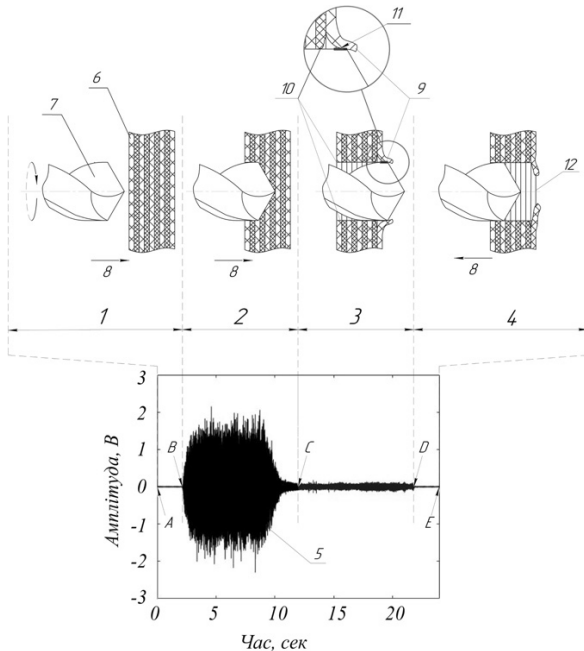


Рис. 4. Схематичне зображення стадій свердління

На рис. 5 зображені типові приклади сигналів АЕ, визначені значення СКВ  $\sigma$ , розраховані та визначені площі незрізаних волокон просвердлених отворів в зразках з вуглепластику.

Розрахований коефіцієнт  $k=0,12$  при свердлінні зі швидкістю різання  $V_c = 100$  м/хв та подачею  $S=0,02$  мм/хв. Коефіцієнт кореляції Пірсона між теоретично розрахованою площею незрізаних волокон і визначених шляхом аналізу зображень дорівнював 0,954.

### Висновки

В даній роботі представлено методику визначення якості, а саме площі незрізаних волокон просвердлених отворів в заготовках з ВПКМ за рахунок вимірювання СКВ амплітуди сигналу акустичної емісії в процесі свердління. Запропонований неруйнівний метод забезпечує швидке визначення площі незрізаних волокон в момент виходу свердла із зони різання внаслідок аналізу ділянки сигналу АЕ, яка характеризує контактні явища, що утворюються між незрізаними волокнами отвору та неріжучою частиною свердла. Портативність датчику ДИСМ-1 [7] акустичної емісії та простота їх розташування на

заготовках ВПКМ дозволяє використовувати запропонований метод в різноманітних промислових умовах, наприклад у випадках свердління отворів в великогабаритних деталях в авіабудівній промисловості.

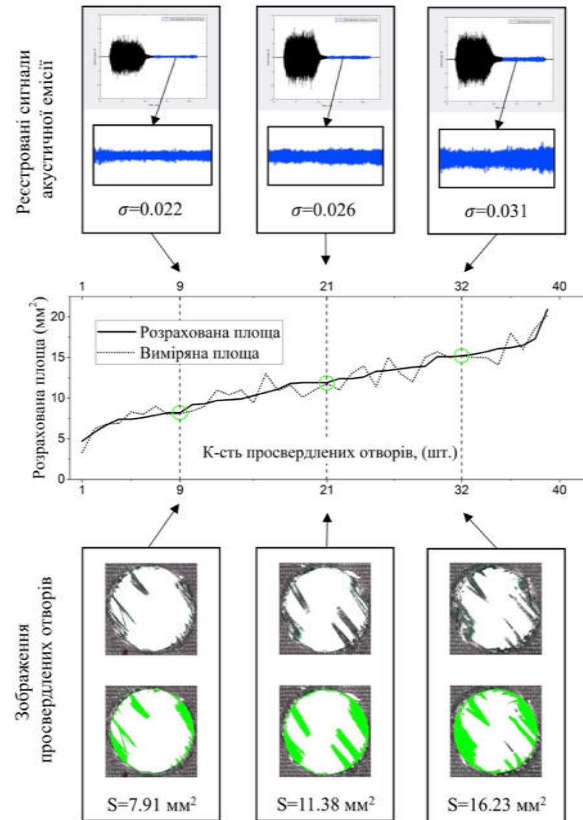


Рис. 5. Графік залежності площі незрізаних волокон отворів від кількості просвердлених отворів

Роботу було виконано за підтримки 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. Davim J.P. Machining composite materials // London : Hoboken, NJ: ISTE ; Wiley, 2010. 262 p.
2. Глоба А., Булах И. Исследование качества отверстий при обработке углепластика разными конструкциями режущего инструмента // Вісник СевНТУ. 2013. № 140. С. 21 – 26.
3. Лупкин Б. [и др.]. Влияние технологических параметров процесса сверления на статическую прочность болтовых соединений ПКМ // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2013. № 60. С. 30 – 41.
4. Gaugel S., et. al. A comparative study on tool wear and laminate damage in drilling of carbon-fiber rein-

- forced polymers (CFRP) // Composite Structures. 2016. (155). PP. 173–183.
5. Voß R. et. al. Evaluation of bore exit quality for fibre reinforced plastics including delamination and uncut fibres // CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2016. (12). PP. 56 – 66.
  6. Voss R. et.al. Optimised approach for characterisation of cutting edge micro-geometry in drilling carbon fibre reinforced plastics(CFRP) // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2017. № 1 – 4 (90). PP. 457 – 472.
  7. Девин Л. Н., Новиков Н. В. Широкополосные датчики акустической эмиссии для диагностики состояния режущих инструментов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2008. №4. С. 81 – 85.
  8. MATLAB - MathWorks. (n.d.). Дата звернення 12, Березень 2018, із <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
  9. Binarize 2-D grayscale image or 3-D volume by thresholding - MATLAB imbinarize. (n.d.). Дата звернення 12, Березень 2018, із <https://www.mathworks.com/help/images/ref/imbinarize.html>
  10. Trace region boundaries in binary image - MATLAB bwboundaries. (n.d.). Дата звернення 12, Березень 2018, із <https://www.mathworks.com/help/images/ref/bwboundaries.html>
  11. Circfit - File Exchange - MATLAB Central. (n.d.). Дата звернення 12, Березень 2018, <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/56412-circfit>

УДК 621.95.01: 621.95.02

<sup>1)</sup> А. І. Гречук, <sup>1)</sup> Л. Н. Девин, <sup>2)</sup> О. В. Глоба

<sup>1)</sup> *Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, Киев, Украина;*

<sup>2)</sup> *Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина*

#### МОНІТОРИНГ ПРОЦЕС СВЕРЛЕННЯ КОМПОЗИЦІОННИХ МАТЕРІАЛІВ ЗА СЧЕТ РЕГІСТРАЦІЇ СИГНАЛІВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

**Проблематика.** Волокнистые полимерные композиционные материалы (ВПКМ) широко используются в различных отраслях современного машиностроения для изготовления высокоточных деталей сложной формы. Сверление отверстий в деталях с ВПКМ может сопровождаться возникновением специфических геометрических дефектов, приводящих к разупрочнению и снижению надежности соединений между деталями. Поэтому, определение величины дефектов просверленных отверстий в образцах с ВПКМ является первоочередной задачей для повышения производительности сборки конструкций из ВПКМ в промышленности.

**Цель исследования.** Разработать методику определения величины дефектов, а именно несрезанных волокон просверленных отверстий в образцах с ВПКМ.

**Методика исследования.** Поставленная цель была реализована путем регистрации и анализа сигнала акустической эмиссии в процессе сверления заготовок из углепластика твердосплавными сверлами SECO Tools AB (Швеция), используя пьезоэлектрические датчики акустической эмиссии ДИСМ-1. Анализ полученных сигналов позволил исследовать процесс сверления, а также определить участки сигналов, отвечающих за работу контактных явлений, образующихся между режущим инструментом и образованными дефектами.

**Выводы.** В соответствии с результатами экспериментальных исследований было определено эмпирическую модель, которая описывает зависимость сигнала акустической эмиссии от площади несрезанных волокон, образующихся при сверлении образцов из углепластика.

**Ключевые слова:** сверление, акустическая эмиссия, углепластик.

<sup>1)</sup> А. Hrechuk, <sup>2)</sup> А. Globa, <sup>1)</sup> L.Devin

<sup>1)</sup> *V. Bakul Institute of Superhard materials, Kyiv, Ukraine*

<sup>2)</sup> *National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine*

#### THE MONITORING OF THE FRP DRILLING USING THE ACOUSTIC EMISSION

**Problems.** Fiber reinforcement plastics (FRP) are widely used in different areas of nowadays manufactures for high tolerance complex and geometry components producing. Drilling holes in FRP components can be accompanied by the appearance of specific geometric defects, which lead to slacking, loosening and reducing the safety of component joints. Therefore, the defining of the drilled holes defects in FRP samples is the primary goal for increasing the performance of assembling FRP constructions in the industry.

**Goals.** To develop a methodology for defining the volume of uncut fibers of drilled holes in FRP components.

**Methods of research.** The goal was realized by registering and analyzing the acoustic emission signal during the drilling of CFRP using cemented carbide drill bits from SECO Tools AB (Sweden) and acoustic emission transducer DISM-

1. The analysis of the obtained signals made it possible to investigate the drilling process and also to determine the sections of signals for the action of the contact phenomena between the cutting tool and the defects.

**Conclusions.** According to the results of experimental investigations, an empirical model, that describes the relation of the acoustic emission signal on the area of uncut fibers when drilling samples from CFRP, has been determined..

**Keywords:** drilling, acoustic emission, carbon fiber.

Надійшла до редакції  
10 квітня 2018 року

Рецензовано  
28 квітня 2018 року

УДК 621.3

## МОДЕЛЮВАННЯ КЕРОВАНОГО РУХУ ІНДЕНТОРА ПРИ ВИМІРЮВАННІ ТВЕРДОСТІ МАТЕРІАЛУ ДЕТАЛІ

Скицюк В. І., Булик М. О., Печонка М. М., Клочко Т. Р., Тимчик Г. С.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: [t.klochko@kpi.ua](mailto:t.klochko@kpi.ua)

*У статті йдеться про актуальну проблему вимірювання параметрів твердості матеріалу деталей різного призначення, які призначені для роботи в умовах великих навантажень, а також при виготовленні штучних імплантів, що призначені для вживлення у живий організм та функціонування їх протягом дуже тривалого часу. Це створює додаткові вимоги до якості цих деталей.*

*Розглянуто проблему визначення моменту торкання індентора до поверхні деталі та швидкості руху індентора під час вимірювання твердості та мікротвердості матеріалу деталей. Створено модель перехідного процесу зростання тиску, що утворюється при вимірюванні та залежить від типу навантаження. У подальших дослідженнях доцільно продовжити аналіз руху індентора під час випробування на твердість матеріалів. Для цього у подальшому проаналізуємо модель визначення моменту торкання індентора до поверхні деталі, що впливає на точність вимірювання параметрів твердості матеріалу деталі.*

**Ключові слова:** твердість, мікротвердість, матеріал, деталь, імплант, вимірювання, механічна обробка.

### Вс

### тип

Твердість є чи не найбільш вживаним параметром твердих матеріалів, який прямо або посередньо входить до різного роду розрахунків навантажень технологічних об'єктів [1]. Особливо актуальною проблемою точного приладобудування є вимірювання параметрів твердості та мікротвердості деталей, які призначені для роботи в умовах великих навантажень. Окрім того, подібні проблеми актуальні також при виготовленні штучних імплантів, що призначені для вживлення у живий організм, оскільки параметри мікротвердості таких деталей повинні відповідати жорстким умовам експлуатації, а тим самим піддаватися крутним, осьовим навантаженням тощо. Тому створення нових методів і засобів контролю та вимірювання значення мікротвердості є вкрай важливою задачею виготовлення точних деталей широкого призначення. Наразі існують розробки приладів вимірювання значення мікротвердості [2, 3, 4], тим не менш, вони або не призначені для застосування на верстаках, або портативні прилади не витримують необхідної точності.

### Постановка задачі

Таким чином, ми маємо необхідність користуватися невизначеними поняттями, але з математичним та дослідним підґрунтям.

В силу цілої низки причин, ми маємо необхідність користуватися не тільки цим поняттям, а і фізико-математичним апаратом, який його супроводжує. Отже, під твердістю розуміється здатність матеріального тіла зберігати свою форму незалежно від потужності дії зовнішніх сил [1]. Але, під твердістю в техніці - називається ступінь піддатливості матеріалу під дією зосередженої сили. У техніці твердість розподіляють на два види – твердість та мікротвердість. Наразі твердість є інтегральна характеристика міцності матеріалу, в той час як мікротвердість - є диференційна величина. Твердість має важливе місце у розрахунках при металообробці. Вимірювання твердості, а особливо мікротвердості, стосується якості визначення режимів різання при механічній обробці деталей. Особливо це стосується таких величин як сили навантаження