

Л. М. Девін*, М. Є. Стахнів, С. В. Ричев

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакула

НАН України, м. Київ, Україна

*ldevin350@gmail.com

**Дослідження сигналу акустичної емісії
на етапі врізання і виходу свердла
з алмазно-твердосплавних пластин (АТП)
під час свердління вуглепластику**

Представлено результати дослідження сигналу акустичної емісії під час свердління вуглепластику з різними режимами різання та геометрією свердла із алмазно-твердосплавних пластин. Встановлено закономірності зміни сигналу акустичної емісії під час процесу свердління на етапах врізання і виходу свердла із заготовки, а також вплив режимів різання на якість одержуваного отвору. Встановлено зв'язок рівня сигналу акустичної емісії на етапі виходу поперечної кромки із заготовки з дефектністю просвердлених отворів. Вивчено вплив ширини поперечної кромки на значення сигналу акустичної емісії.

Ключові слова: свердління вуглепластиків, алмазно-твердосплавні пластини, сигнал акустичної емісії, поперечна ріжуча кромка, врізання свердла, вихід свердла, пружна деформація, пластична деформація.

**АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СВЕРДЛІННЯ
ВУГЛЕПЛАСТИКУ СВЕРДЛОМ З АТП**

Волокнисті полімерні композиційні матеріали (ВПКМ) мають високі пружні властивості (модуль Юнга – 120–240 ГПа), високі питомі значення міцності і високу корозійну і антимагнітну стійкість, що робить їх важливими матеріалами в різних галузях сучасного машино-, авіа- і суднобудування та енергетики, а також в медицині, будівництві, робототехніці, автобудуванні [1]. Особливо перспективними матеріалами, які до того ж дешеві, є вуглепластики. Вони, по-перше, більш стійкі до втомного руйнування в порівнянні з металами, а по-друге, підраховано, що заміна 40 % конструкції з алюмінієвого сплаву на вуглепластик приведе до 12 % зниження ваги всієї конструкції [1].

Механічна обробка вуглепластиків різанням під час виробництва викликає серйозні труднощі: в зоні різання висока (для полімерної зв'язки) температура, різальні інструменти зношуються інтенсивніше, ніж під час обробки багатьох металів, в отворах формується дефектний поверхневий шар.

Найбільш поширеною операцією механічної обробки виробів з вуглепластиків є свердління, що обумовлено необхідністю виготовлення отворів для з'єднання деталей. Якість просвердлених отворів визначається сукупністю кількох параметрів, таких як стан волокон, розшарування композита на виході свердла з отвору, руйнування поверхні отвору і термодеструкція матриці [2].

Наявність незрізаних волокон пов'язана з багатьма факторами, такими як невірно підібрані режими різання, не оптимальні геометричні параметри та інші недоліки конструкції свердла. Внаслідок збільшення радіусу різальних

кромки свердла внаслідок його зносу в зоні різання збільшуються деформації оброблюваного матеріалу, що обумовлює змінання і розрив волокон замість зрізання.

Тому для підвищення ефективності обробки застосовують інструменти з надтвердих матеріалів [2, 3]. Інструмент з них дозволяє інтенсифікувати процеси обробки виробів з вуглепластику в порівнянні зі свердлами з твердих сплавів.

Водночас для вуглепластиків особливо важливо дослідити, як впливають геометричні параметри свердла і режими різання на процес свердління і якість одержуваних отворів. Особливо важливо встановити як змінюються умови різання на етапі входу і виходу свердла із заготовки під час свердління.

СТАН ПИТАННЯ

Процес свердління вуглепластиків детально розглянуто в огляді [1], де докладно проаналізовано вплив режимів різання і геометричних параметрів свердла на продуктивність і якість обробки. З аналізу літератури випливає, що найбільшу ефективність під час свердління мають свердла, виготовлені з застосуванням полікристалів алмазу або з CVD алмазним покриттям. Особливу увагу заслуговує робота [4], де досліджено сили різання на вході і виході свердла із заготовки під час свердління інструментом з АТП.

Для вивчення процесів руйнування волокон і матриці в процесі різання вуглепластику доцільно використовувати акустичну емісію (АЕ), яка пов'язана з генеруванням пружних хвиль напружень, викликаних тертям, руйнуванням, а також містить інформацію про інші фізичні процеси, які відбуваються під час різання [5]. Останні десятиріччя метод АЕ широко використовують для моніторингу процесів механічної обробки матеріалів. Слід зауважити, що сигнал АЕ під час різання досить інформативний, а використання ширококутових датчиків АЕ дозволяє отримати цей сигнал і обробити за допомогою сучасних математичних пакетів. Однак робіт, в яких досліджено сигнал АЕ на різних етапах свердління (вході, під час свердління і виході свердла з заготовки) інструментом з полікристалів алмазу авторами не виявлено.

У випадку свердління метод АЕ використовували для визначення положення свердла [6], а особливості математичної обробки сигналів АЕ розглянуто в [7]. Слід зауважити, що на першому етапі дослідження сигналів АЕ необхідно виконати роботу з вибору найбільш інформативних параметрів сигналу АЕ, а також розрахувати ці параметри сигналу з подальшим встановленням кореляційних зв'язків між ними і характеристиками процесу різання. В даній роботі параметри сигналу АЕ зіставляються з осьовою силою різання, яка досліджена в [4].

Метою даної роботи було вивчення особливостей генерування сигналу АЕ на етапах врізання і виходу інструменту з заготовки вуглепластику під час свердління свердлами з алмазно-твердосплавних пластин (АТП), встановлення, яким чином швидкість різання та геометрія поперечної кромки впливають на сигнал АЕ, дослідження впливу умов різання на сигнал АЕ на етапах входу і виходу свердла з заготовки, а також на якість одержуваного отвору.

ОПИС ЗАГОТОВКИ, СВЕРДЛА І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Свердління заготовки вуглепластику виконували на високоточному токарному верстаті ТПК-125ВМ. Свердло закріплювали в шпindelь верстата ТПК-125ВМ, що забезпечувало потрібну жорсткість і можливість плавної зміни кількості обертів в хвилину. Під час дослідження використовували перове свердло зі вставками з алмазно-твердосплавних пластин, конструкція якого

описана в [2]. В якості ріжучих вставок свердла використовували двошарові АТП, які було впаяно срібним припоєм в корпус.

Дві протилежно розташовані пластини АТП формували різальну частину свердла. Заточку свердла виконували по двох площинах, перемичка включала алмазну і твердосплавну частини.

Допоміжні ріжучі кромки було сформовано паралельно осі свердла і вони виконували доводочну функцію, що покращувало шорсткість обробленої поверхні.

Заточку свердла виконували на верстаті Safag Spinesso 38 (Швейцарія), алмазним кругом 11A2 зі зв'язкою В1-11 зернистістю АС6 100/80 для чорнової і АС6 20/14 для чистової операцій. Режими заточки: швидкість – 26 м/с, подача – 10 подв. хід/хв, ЗОТС FUCHS EcoCool 68f2.

Для проведення експериментів свердла були заточені з заднім кутом на головній різальній кромці 17° або 30° , кут в плані – 120° , радіус закруглення різальних кромок – 17,3 мкм.

Оброблювану заготовку товщиною 12 мм закріплювали в динамометрі УДМ-100 за допомогою спеціально виготовленого пристосування. Схему свердла представлено на рис. 1.

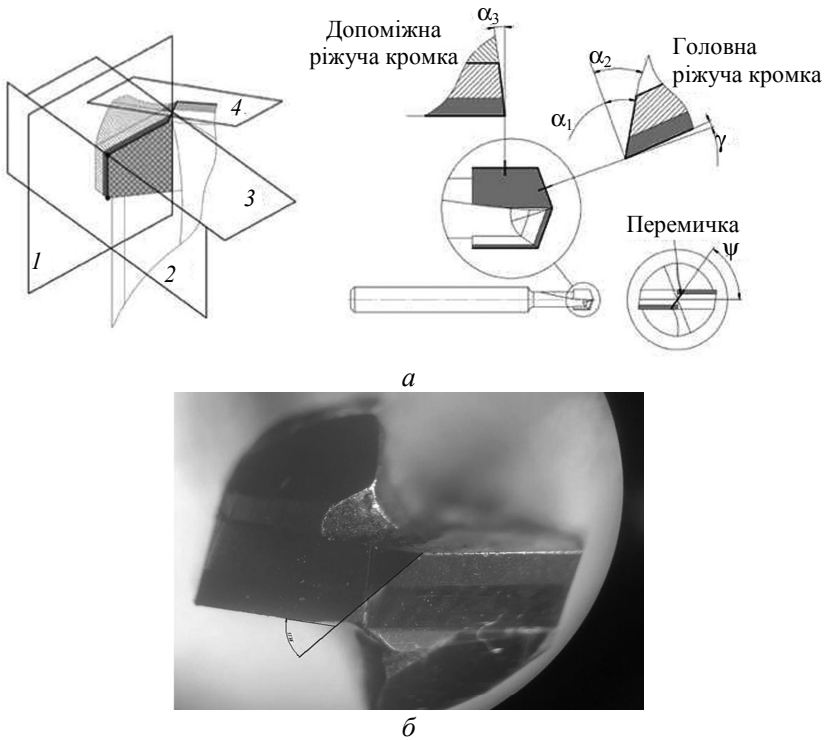


Рис. 1. Схематичне зображення конструкції свердла з АТП (а), знімок свердла (б).

Для дослідження процесу свердління було використано автоматизовану систему для дослідження сигналу АЕ. Блок-схему системи представлено на рис. 2.

Важливим елементом розробленої системи є широкосмуговий датчик АЕ оригінальної конструкції [5]. Для з'єднання датчика АЕ з аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) застосовували попередній підсилювач з великим вхідним та малим вихідним опором, а також амплітудно-піковий детектор (АПД). Для запису на комп'ютер сигналу АЕ і сигналу після пікового детек-

тора використовували АЦП з частотою опитування 2 МГц. Управління АЦП виконували за допомогою програми Power Graph [8].

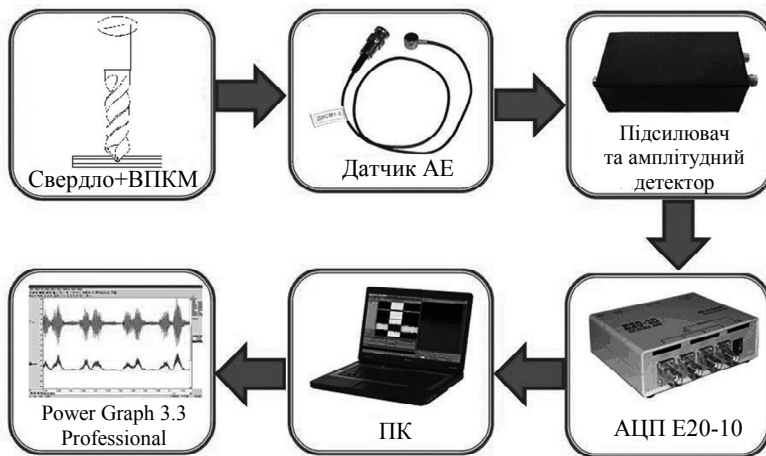


Рис. 2. Блок-схема автоматизованої системи для дослідження сигналу АЕ під час свердління.

Слід також зауважити, що під час досліджень було враховано ту обставину, що акустичні емісії відповідають сигнали частотою 200–2000 кГц. Тому, крім вбудованого в попередній підсилювач електричного фільтра високих та низьких частот, було використано подальшу цифрову фільтрацію сигналу АЕ. Для цього в програмі Power Graph використовували функцією HighPass-фільтр, що пропускає верхні частоти (ВЧ фільтр). Амплітудно-частотна характеристика сигналу з датчика АЕ після фільтрації знаходилась в частотному діапазоні вище 100 кГц.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

На рис. 3 приведено осцилограму сигналу АЕ і зміну осьової сили P_o під час свердління, а на рис. 4 – сигналу після пікового детектора (ПД) і згладженого сигналу після пікового детектора (ЗПД). Як видно, осцилограма зміни осьової сили P_o (див. рис. 3) якісно відповідає змінам сигналу пікового детектора (див. рис. 4).

Згладжений сигнал після пікового детектора, який простіше вимірювати у порівнянні з осьовою силою P_o , є більш інформативним, тому що в цьому сигналі міститься інформація про процеси різання і тертя різальними кромками свердла, пружної і пластичної деформації матеріалу заготовки, а також, про руйнування матриці і матеріалу заготовки, розриву волокон. В свою чергу, аналізуючи амплітудно-частотну характеристику сигналу АЕ простіше розрізнити різання і тертя різальними кромками: поперечною, головними, боковими. Як показано в [4], під час свердління вуглепластику свердлами з АТП виділяється п'ять характерних ділянок. Під час дослідження сигналу АЕ необхідно додатково розглянути ще дві ділянки (див. рис. 3, 4): 1 – ділянку підводу свердла до заготовки (шум від шпинделя та супорту верстату) і 7 – ділянку після виходу головних різальних кромки з заготовки (коли немає різання).

Відомо, що сигнал АЕ найбільш інформативно характеризує RMS – середньоквадратичне значення амплітуди сигналу АЕ [7], яке позначають ψ . У разі розрахунку закономірностей зміни RMS за часом вибрану ділянку

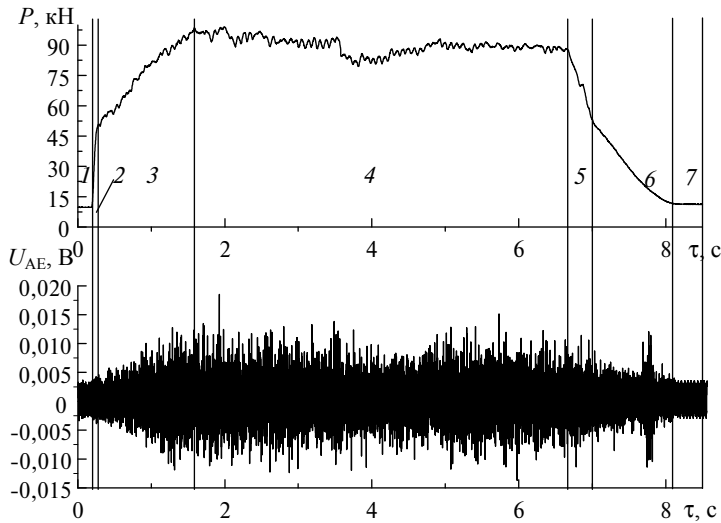


Рис. 3. Характерна осцилограма сигналу АЕ і зміна осьової сили P_0 під час свердління вуглепластику товщиною 10 мм ($v = 1,04$ м/с, $S = 120$ мм/хв, $D = 7,95$ мм, задній кут $\alpha = 17^\circ$, поперечна кромка $k = 2,14$ мм).

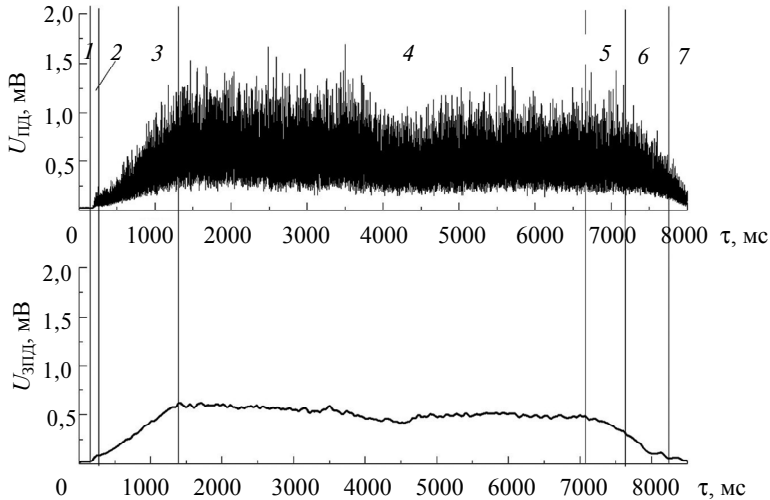


Рис. 4. Осцилограма первинного та згладженого сигналу АЕ після пікового детектора під час свердління вуглепластику товщиною 10 мм ($v = 1,04$ м/с, $S = 120$ мм/хв, $D = 7,95$ мм, задній кут $\alpha = 17^\circ$, поперечна кромка $k = 2,14$ мм).

сигналу АЕ ділили на декілька інтервалів. В кожному інтервалі розраховували RMS сигналу АЕ. Ці значення RMS порівнювали зі значеннями аргументу середини інтервалу, і таким чином отримували функцію зміни RMS сигналу АЕ в залежності від часу. Але, як показали експериментальні дослідження під час свердління вуглепластику свердлами з АТП, ряд ділянок у разі врізання і виходу свердла неширокі, тому їх не доцільно розбивати на додаткові інтервали. На цих ділянках RMS змінюється лінійно (рис. 5, а, б), можна виділити проміжок часу $[\tau_0, \tau^*]$, який відповідає конкретній ділянці, де τ_0 – час, що відповідає початковій точці, τ^* – останній точці. Можна записати рівняння

$$\psi(\tau) = \psi_0 + k(\tau - \tau_0),$$

де $\psi(\tau)$ – RMS сигналу АЕ на конкретні ділянки; τ – час із проміжку $[\tau_0, \tau^*]$; k – коефіцієнт пропорційності прямої; ψ_0 – значення RMS сигналу АЕ в початковій точці. Для кожної ділянки сигналу АЕ було запропоновано алгоритм розрахунку ψ_0 .

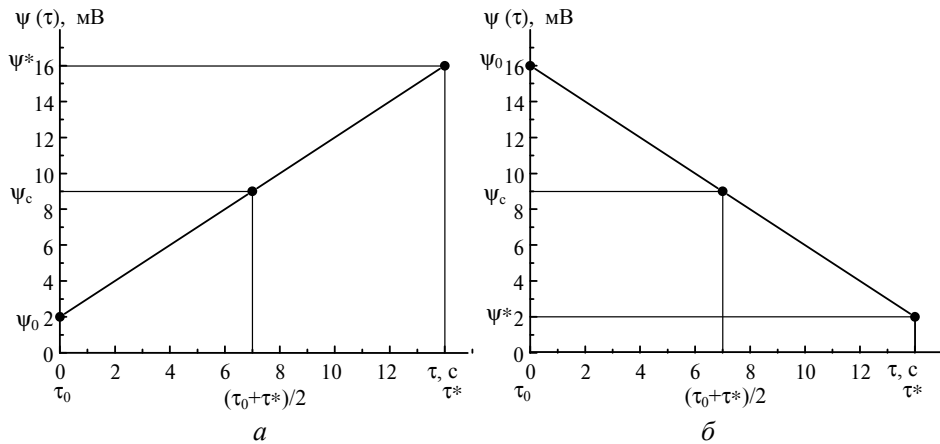


Рис. 5. Лінійні зміни RMS сигналу АЕ $\psi(\tau)$ протягом часу τ у разі зростання (а) і зменшення (б) RMS.

Для не широких ділянок, характерних для врізання і виходу свердла, виходили середні значення RMS сигналу АЕ (ψ_c), яке відповідає середній точці $(\tau + \tau_0)/2$ (див. рис. 5, а, б). За такої умови справедливе рівняння

$$\psi - \psi_c = \psi_c - \psi_0,$$

де ψ^* – значення RMS в кінці ділянки. Тому, якщо відоме значення ψ_0 і ψ_c , можна розрахувати ψ^* :

$$\psi^* = \psi(\tau^*) = 2\psi_c - \psi_0, \quad (1)$$

Приведена формули (1) була основою, яку використовували під час аналізу RMS сигналу АЕ на різних ділянках свердління у разі врізання і виходу свердла.

У відповідності до [4] і рис. 3, 4 позначено ділянки і отримано формули для розрахунку RMS сигналу АЕ:

1 – ділянка підведення свердла до заготовки, час змінюється в проміжку $[0, \tau_1^*]$, АЕ обумовлено шумом підшипника шпинделя верстата і не пов'язано з процесом обробки, RMS сигналу АЕ теоретично повинно бути постійним $\psi_1(\tau_1) = \text{const}$, але практично є незначні відхилення, середнє значення RMS сигналу АЕ позначено як ψ_{1c} , і враховуючі незначні зміни RMS сигналу АЕ, можна записати: $\psi_1(\tau) \approx \psi_{1c}$;

2 – ділянка врізання поперечної кромки, час τ_2 змінюється в проміжку $[\tau_1^*, \tau_2^*]$ і має місце взаємодія поперечної кромки з заготовкою [4], тому RMS сигналу АЕ зростає, середнє значення RMS сигналу позначено ψ_{2c} і у відповідності з рис. 5, а можна записати: $\psi_2(\tau_2) = \psi_{1c} + k_2(\tau_2 - \tau_1^*)$, де k_2 – коефіцієнт пропорційності прямої, у відповідності з (1) значення $\psi_2^* = \psi_2(\tau_2^*) = 2\psi_{2c} - \psi_{1c}$;

3 – ділянка врізання головних різальних кромки, час τ_3 змінюється в проміжку $[\tau_2^*, \tau_3^*]$, має місце взаємодія поперечної кромки з заготовкою, а також поступове збільшення площі взаємодії ріжучих кромки [4], тому RMS сигналу АЕ зростає, середнє значення RMS сигналу позначено ψ_{3c} , і можна записа-

ти: $\psi_3(\tau_3) = \psi_2(\tau_2^*) + k_3(\tau_3 - \tau_2^*)$, де k_3 – коефіцієнт пропорційності прямої, значення $\psi_3^* = \psi_3(\tau_3^*) = 2\psi_{3c} - \psi_2$;

4 – ділянка стаціонарного процесу свердління, час τ_4 змінюється в проміжку $[\tau_3^*, \tau_4^*]$, поперечна і різальні кромки повністю взаємодіють з оброблюваною заготовкою, поступово збільшується площа взаємодії бокових стрічок свердла з заготовкою і теоретично RMS сигналу АЕ має зростати, тому що площа взаємодії бокових стрічок свердла з заготовкою протягом часу збільшується (див. рис. 3, 4), але практично RMS сигналу АЕ змінюється довільно в залежності від фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу, тому ділянку розбили на N інтервалів (в даному випадку 5), для кожного з інтервалів розраховали середнє значення RMS сигналу АЕ: $\psi_{4c1} \dots \psi_{4c5}$ і прийнято, що $\psi_4(0) = \psi_{4c1}$, $\psi_4(\tau_4^*) = \psi_{4c5}$;

5 – ділянка виходу поперечної різальної кромки, час τ_5 змінюється в проміжку $[\tau_4^*, \tau_5^*]$, поперечна кромка перестає взаємодіяти із заготовкою, але ще взаємодіють головні різальні кромки, а також бокові поверхні стрічок свердла, а також можливе розшарування матеріалу заготовки і розрив волокон [9]; ця обставина обумовлює зростання RMS сигналу АЕ [9], на ділянці можливі дві ситуації: перша – коли доля RMS сигналу АЕ, обумовленого взаємодією із заготовкою поперечної кромки більша долі RMS сигналу АЕ, пов'язана з руйнуванням матеріалу заготовки і розривом волокон; у цьому випадку $\psi_5(\tau_5)$ протягом часу зменшується, друга – коли доля RMS сигналу АЕ, обумовленого взаємодією із заготовкою поперечної кромки менша долі RMS сигналу АЕ, пов'язана з руйнуванням матеріалу заготовки і розривом волокон; у цьому випадку RMS сигналу АЕ $\psi_5(\tau_5)$ протягом часу зростає [9] і як для першого випадку, так і для другого формули розрахунку будуть ідентичними; середнє значення RMS сигналу АЕ позначено ψ_{5c} і можемо записати: $\psi_5(\tau_5) = \psi_4(\tau_4^*) + k_5(\tau_5 - \tau_4^*)$, де k_5 – коефіцієнт пропорційності прямої; значення $\psi_5(\tau_5^*) = 2\psi_{5c} - \psi_4(\tau_4^*)$;

6 – ділянка виходу головних різальних кромки, час τ_6 змінюється в проміжку $[\tau_5^*, \tau_6^*]$, головні різальні кромки та бокові поверхні стрічок свердла частково взаємодіють із заготовкою, а також має місце руйнування матеріалу заготовки і розрив волокон, RMS сигналу АЕ зменшується, середнє значення RMS сигналу позначено – ψ_{6c} і у відповідності з рис. 5, б можна записати: $\psi_6(\tau_6) = \psi_5(\tau_5^*) + k_6(\tau_6 - \tau_5^*)$, де k_6 – коефіцієнт пропорційності прямої; значення $\psi_6(\tau_6^*) = 2\psi_{6c} - \psi_5(\tau_5^*)$;

7 – ділянка повного виходу головних різальних кромки, час змінюється в проміжку $[\tau_6^*, \tau_7^*]$, бокові поверхні стрічок свердла частково взаємодіють із заготовкою, а також може мати місце третя розірваних волокон по поверхні інструменту, RMS сигналу АЕ зменшується, середнє значення RMS сигналу позначено ψ_{7c} ; у відповідності з рис. 5, б можна записати: $\psi_7(\tau_7) = \psi_6(\tau_6^*) + k_7(\tau_7 - \tau_6^*)$, де k_7 – коефіцієнт пропорційності прямої; значення $\psi_7(\tau_7^*) = 2\psi_{7c} - \psi_6(\tau_6^*)$.

Для кожного проведеного експерименту на кожній ділянці свердління було розраховано RMS сигналу АЕ. На рис. 6 приведено характерний графік, що показує як змінюється значення RMS сигналу АЕ, а також зміну осьової сили P_0 .

На етапі врізання визначено RMS сигналу АЕ, яке обумовлене взаємодією заготовки з поперечною кромкою, позначили $\psi_{\text{поп}}$, формула для його розрахунку

$$\psi_{\text{поп}} = \psi_2^* - \psi_{1c} = 2(\psi_{2c} - \psi_{1c}).$$

RMS сигналу АЕ, обумовлене головними різальними кромками, позначили як $\Psi_{\text{різ}}$, формула для його розрахунку

$$\Psi_{\text{різ}} = \Psi_3^* - \Psi_2^*$$

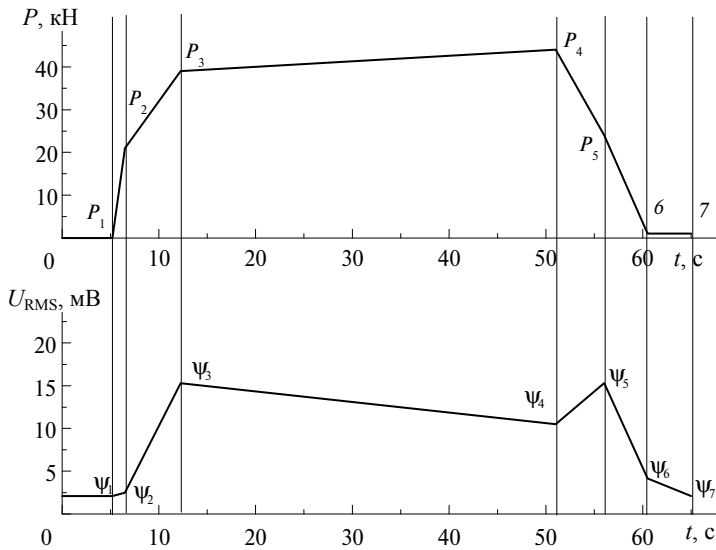


Рис. 6. Зміни RMS сигналу АЕ і осьової сили P_o під час свердління вуглепластику товщиною 10 мм ($v = 1,04$ м/с, $S = 120$ мм/хв, $D = 7,95$ мм, задній кут $\alpha = 17^\circ$, поперечна кромка $k = 2,14$ мм).

RMS сигналу АЕ, обумовлене взаємодією заготовки з поперечною кромкою і головними різальними кромками, позначили як $\Psi_{\text{сум}}$, формула для його розрахунку

$$\Psi_{\text{сум}} = \Psi_{\text{поп}} + \Psi_{\text{різ}}$$

Було введено параметр $\Omega_{\text{вр}}$:

$$\Omega_{\text{вр}} = (100\Psi_{\text{поп}})/\Psi_{\text{сум}}$$

який показує частку (в процентах) RMS сигналу АЕ на поперечній кромці по відношенні до сумарного RMS сигналу. Цей параметр дозволяє виявити вплив поперечної кромки у разі стаціонарного свердління. Для цілого ряду експериментів (табл. 1, 2) під час обробки даних було визначено параметр $\Omega_{\text{вр}}$.

Аналіз зміни RMS сигналу АЕ показав, що на етапі врзання свердла в заготовку основний вплив на RMS сигналу АЕ має поперечна кромка. На етапі стаціонарного свердління вплив поперечної кромки в сумарному сигналу АЕ становить 9–20,5 % (див. табл. 1, 2).

Таблиця 1. Залежність параметра $\Omega_{\text{вр}}$ від подачі S за швидкості різання $v = 0,62$ м/с

S, мм/об	$\Omega_{\text{вр}}$, %	
	$\alpha = 17^\circ, k = 2,14$ мм	$\alpha = 30^\circ, k = 2,78$ мм
0,01	11	16
0,02	11,5	18,5
0,04	13	19
0,06	14,5	20
0,08	14,5	20,5

Досліджено вплив подачі, швидкості різання і довжини поперечної кромки на RMS сигналу АЕ на поперечній кромці і сумарну RMS сигналу АЕ (див. табл. 1, 2 і рис. 7) під час врізання свердла в заготовку.

Таблиця 2. Залежність параметра $\Omega_{вр}$ від подачі S за швидкості різання $v = 1,04$ м/с

S , мм/об	$\Omega_{вр}$, %	
	$\alpha = 17^\circ$, $k = 2,14$ мм	$\alpha = 30^\circ$, $k = 2,78$ мм
0,012	9	17,8
0,024	9	18
0,036	10	20
0,048	9,5	20,5
0,060	11	20

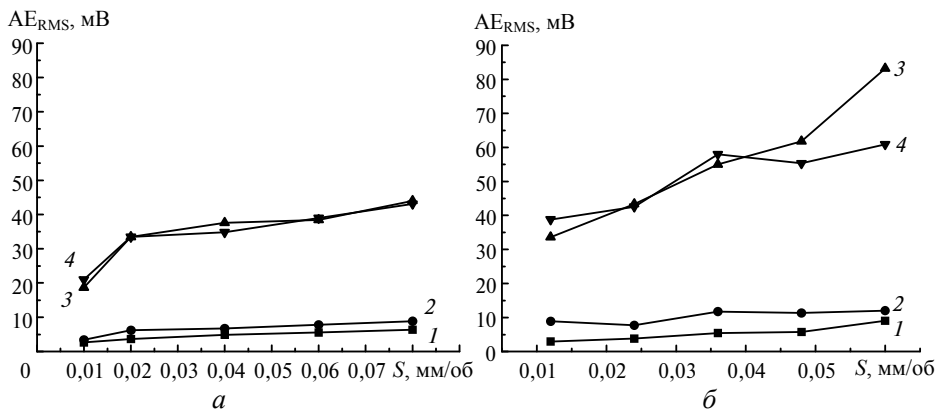


Рис. 7. RMS сигналу АЕ на поперечній кромці $\psi_{поп}$ ($k = 2,14$ (1), 2,78 (2) мм) і сумарне RMS сигналу АЕ $\psi_{сум}$ ($k = 2,14$ (3), 2,78 (4) мм) під час врізання свердла в заготовку; швидкість різання $v = 0,62$ (а) і 1,04 (б) м/с.

Дослідження, що були виконані на етапі врізання свердла в заготовку (рис. 8), дозволили встановити наступне:

- за швидкості різання $v = 0,62$ м/с частка RMS сигналу АЕ на поперечній кромці зі збільшенням подачі зростає і становить 11–14,5 % ($k = 2,14$ мм) і 16–20,5 % ($k = 2,78$ мм) від сумарного RMS сигналу АЕ;
- за швидкості різання $v = 1,04$ м/с частка RMS сигналу АЕ на поперечній кромці зі збільшенням подачі зростає і становить 9–11 % ($k = 2,14$ мм) і 18–20 % ($k = 2,78$ мм) від сумарного RMS сигналу АЕ;
- зі збільшенням довжини поперечної кромки від 2,14 до 2,78 мм за незмінної хвилинної подачі і швидкості різання RMS сигналу АЕ на поперечній кромці зростає приблизно в 2 рази, а сумарне RMS сигналу АЕ збільшується на 50–95 %;
- зі збільшенням подачі від 0,01 до 0,08 мм/об за незмінної швидкості різання RMS сигналу АЕ на поперечній кромці зростає в 1,3–2,0 рази, а сумарне RMS сигналу АЕ – в 2,0–2,2 рази;
- за $k = 2,14$ мм і незмінній хвилинній подачі зі збільшенням швидкості від 0,62 до 1,04 м/с RMS сигналу АЕ на поперечній кромці збільшується на 5–50 %, а сумарне RMS сигналу АЕ збільшується на 50–100 %;

– за $k = 2,78$ мм і незмінній хвилинній подачі зі збільшенням швидкості від 0,62 до 1,04 м/с RMS сигналу АЕ на поперечній кромці і сумарне RMS сигналу АЕ збільшується на 20–80 %.

Було визначено RMS сигналу АЕ, обумовлене взаємодією поперечної кромки із заготовкою під час виходу свердла (позначено як $\Psi_{\text{вих}5}$). В [4] встановлено, що під час виходу поперечної кромки із заготовки має місце зменшення осьової сили P_o . Ця обставина дозволила виявити долю осьової сили, яка приходить на поперечну кромку. При дослідженні сигналу АЕ на ділянці Ψ_4 – Ψ_5 (див. рис. 6), коли поперечна кромка наближається до краю заготовки, в переважній більшості експериментів мало місце зростання RMS сигналу АЕ (у відмінності від осьової сили P_o), що вказує на наявність інтенсивного процесу розшарування матеріалу заготовки і розрив волокон.

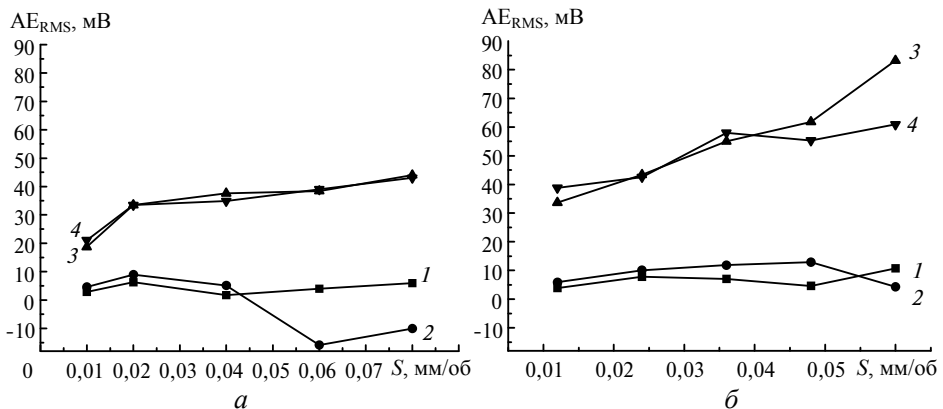


Рис. 8. RMS сигналу АЕ на виході поперечної кромки $\Psi_{\text{вих}5}$ ($k = 2,14$ (1), 2,78 (2) мм) і сумарне RMS сигналу АЕ $\Psi_{\text{сум}}$ ($k = 2,14$ (3), 2,78 (4) мм) на виході із заготовки; швидкість різання $v = 0,62$ (а) і 1,04 (б) м/с.

Також було показано [10], що контактні процеси між не зрізаними волокнами просвердленого отвору та свердла, що обертається, випромінюють додаткові сигнали АЕ, які вказують на зниження якості отвору. Тобто на поверхні отвору у вуглепластику погіршуються ворсистість та розшарування. Встановлено, чим більше зростає RMS сигналу АЕ на ділянці 5, тим більша дефектність просвердлених отворів. Тільки в двох експериментах на ділянці 5 не було зростання RMS сигналу АЕ, а, навпаки, зменшення. В цьому випадку спостерігали високу якість просвердлених отворів. Враховуючи вище сказане, формула для розрахунку $\Psi_{\text{вих}5}$ буде мати вигляд

$$\Psi_{\text{вих}5} = \Psi_5^* - \Psi_4^* .$$

Також було введено параметр $\Omega_{\text{вих}}$:

$$\Omega_{\text{вих}} = (100\Psi_{\text{вих}5})/\Psi_{\text{сум}},$$

який показує частку (в процентах) RMS сигналу АЕ на поперечній кромці по відношенні до сумарного RMS сигналу під час виходу свердла. Цей параметр дозволяє виявити процеси, які супроводжують вихід поперечної кромки з вуглепластику. Для цілого ряду експериментів (див. табл. 1, 2) під час обробки даних було визначено параметр $\Omega_{\text{вих}}$.

В табл. 3, 4 наведено значення параметра $\Omega_{\text{вих}}$ в залежності від подачі S за швидкості різання $v = 0,62$ і 1,04 м/с.

Дослідження, виконані на етапі виходу свердла з заготовки (див. табл. 3, 4, рис. 8), дозволили встановити, що під час свердління вуглепластику RMS сигналу АЕ обумовлене взаємодією заготовки з поперечною кромкою і характеризує або наявність як домінуючих процесів руйнування матеріалу заготовки і розриву волокон, або їх відсутність. Для двох режимів (див. табл. 3), коли $\Omega_{\text{вих}}$ мало від'ємні значення -21 і -23 , процес руйнування матеріалу заготовки і розриву волокон був несуттєвим. Відповідно, в цих випадках за швидкості різання $v = 0,62$ м/с і подачі $S_0 = 006-0,08$ мм/об (з параметрами свердла $\alpha = 30^\circ$, $k = 2,78$ мм) досягали найвищу якість отриманих отворів. Процес руйнування матеріалу заготовки і розриву волокон під час виходу свердла був не значимим ще в трьох випадках за режимами:

$v = 0,62$ м/с, $S_0 = 0048$ мм/об (з параметрами свердла $\alpha = 17^\circ$, $k = 2,14$ мм);

$v = 1,04$ м/с, $S_0 = 0048$ мм/об (з параметрами свердла $\alpha = 17^\circ$, $k = 2,14$ мм);

$v = 1,04$ м/с, $S_0 = 006$ мм/об (з параметрами свердла $\alpha = 30^\circ$, $k = 2,78$ мм);

Значення $\Omega_{\text{вих}}$ у цих випадках не перевищувало 8 %.

Таблиця 3. Значення параметра $\Omega_{\text{вих}}$ в залежності від подачі S за швидкості різання $v = 0,62$ м/с

S, мм/об	$\Omega_{\text{вих}}, \%$	
	$\alpha = 17^\circ, k = 2,14$ мм	$\alpha = 30^\circ, k = 2,78$ мм
0,01	15	22
0,02	19	27
0,04	4,5	15
0,06	10	-21
0,08	13,5	-23

Таблиця 4. Значення параметра $\Omega_{\text{вих}}$ в залежності від подачі S за швидкості різання $v = 1,04$ м/с

S, мм/об	$\Omega_{\text{вих}}, \%$	
	$\alpha = 17^\circ, k = 2,14$ мм	$\alpha = 30^\circ, k = 2,78$ мм
0,012	11,5	15
0,024	17,9	24
0,036	12,8	20
0,048	7,4	23
0,060	12,8	7

Для більш детального аналізу свердління було проведено аналіз гістограм диференціального розподілу кількості V сигналів АЕ за амплітудою на різних етапах врізання та виходу свердла, тобто аналізували залежність числа імпульсів АЕ (амплітуда яких знаходиться між значеннями V і $V + \Delta V$) від значення V (за ГОСТ Р ІСО 12716–2009). Аналізували сигнали АЕ після пікового детектора та RMS сигналу АЕ – середньоквадратичне значення амплітуди АЕ по заданій кількості точок $N = 100$ (ковзаюче середньоквадратичне значення):

$$Y_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}.$$

Розрахунки гістограм виконували за записаними сигналами АЕ в пакеті Power Graph з використанням функції аналіз-гістограма за кількістю аналізованих значень амплітуд 200 тис. за кожні 100 мс і з кроком амплітуди 2 мВ. При свердлінні вуглепластику за $v = 0,62$ м/с, $S = 0048$ мм/об (з параметрами свердла $\alpha = 17^\circ$, $k = 2,14$ мм) отримали гістограми, що наведено на рис. 9.

У перші 100 мс на гістограмі існують 2 піки амплітуд, але в подальшому вони зливаються в один пік. Це пов'язано з тим, на першому етапі з деталлю контактує тільки поперечна кромка і велика кількість імпульсів АЕ має малу амплітуду і ці сигнали пов'язані з тертям поперечної кромки по деталі. Різальні кромки ще не працюють. По мірі вступу різальних кромки в процес різання кількість сигналів великої амплітуди зростає через те, що різальні кромки перерізують (руйнують) міцні армуючі волокна.

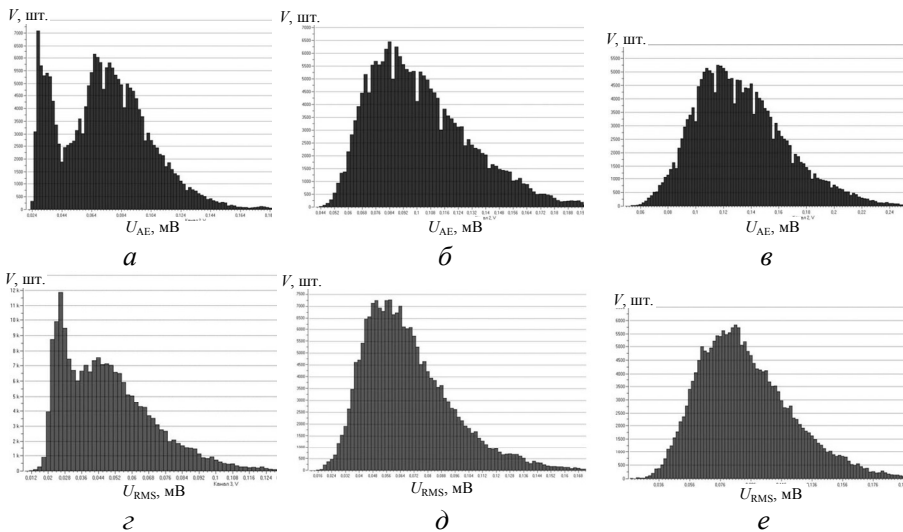


Рис. 9. Гістограми диференціального розподілу кількості V сигналів АЕ після пікового детектора (а, б, в) та RMS сигналу (г, д, е) різної амплітуди на етапах врізання свердла: перші (а, г) і другі (б, д) 100 мс, подальші етапи (в, е).

Для даних режимів обробки графіки розподілу амплітуд сигналів АЕ по мірі входу різця в зразок вуглепластику, різання та виходу свердла наведено на рис. 10. Аналіз розподілу максимальних, мінімальних і середніх амплітуд, а також моди розподілу амплітуд показує, що на протязі врізання не тільки середня амплітуда сигналу АЕ, але і розподіл сигналу по амплітуді змінюється, під час подальшого свердління розподіл сигналу АЕ по амплітуді змінюються несуттєво, а на виході амплітуда монотонно знижуються.

Це свідчить про те, що основний вплив на розподіл амплітуд мають саме різальні кромки, тобто саме їх робота по зрізання вуглецевих волокон. Вплив же поперечної та бокових кромки на розподіл амплітуд незначний.

ВИСНОВКИ

На першому етапі врізання свердла в заготовку домінуючий вплив на сигнал АЕ має взаємодія поперечної кромки з заготовкою. Під час врізання головних різальних кромки вплив (частина сигналу АЕ) від поперечної кромки зменшується і на етапі стаціонарного свердління її частка в сумарному RMS сигналу АЕ становить 9–20,5 %.

Зі збільшенням довжини поперечної кромки на 30 % RMS сигналу АЕ на поперечній кромці зростає в ~ 2 рази, а сумарне RMS сигналу АЕ збільшується на 50–95 %.

Зі збільшенням подачі від 0,01 до 0,08 мм/об за незмінної швидкості різання RMS сигналу АЕ на поперечній кромці зростає в 1,3–2,0 рази, а сумарне RMS сигналу АЕ – в 2,0–2,2 рази.

Під час дослідження сигналу АЕ, коли поперечна кромка виходить із заготовки, в переважній більшості експериментів має місце ріст значення RMS сигналу АЕ (у відмінності від осової сили P_0), що вказує на наявність інтенсивного процесу розшарування матеріалу заготовки і розрив волокон. Більшому значенню дефектності просвердлених отворів (ворсистість та розшарування) відповідає більша RMS сигналу АЕ на виході поперечної кромки.

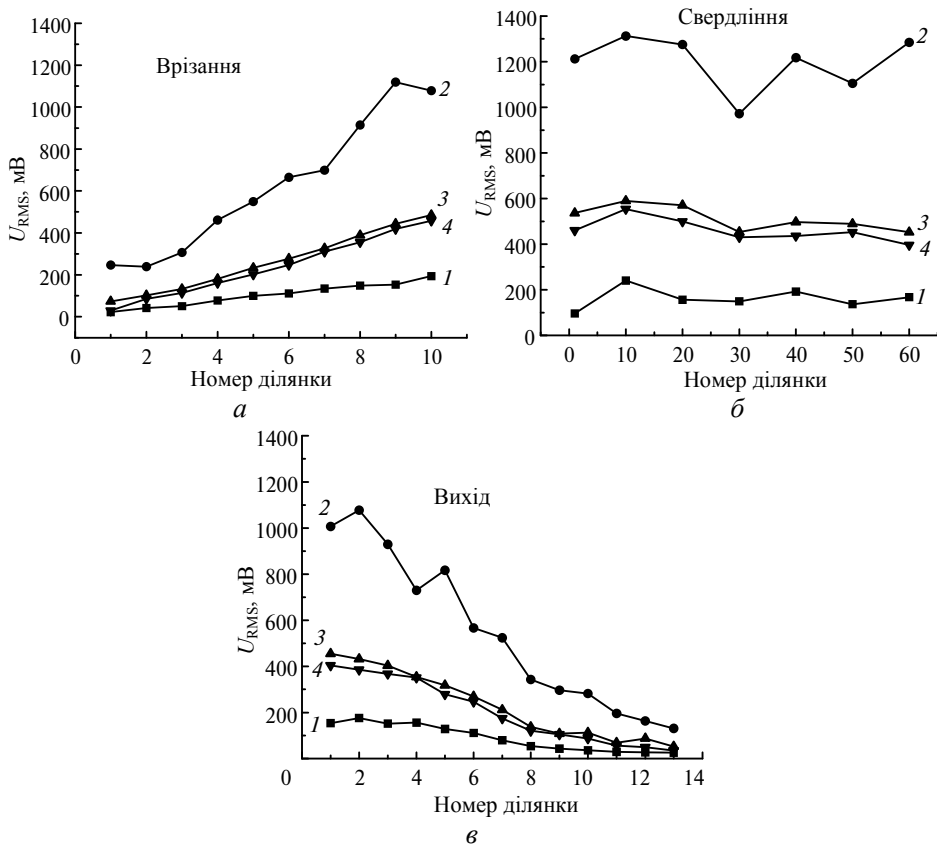


Рис. 10. Розподіл RMS сигналів АЕ під час входу різця в зразок вуглепластику (а), стаціонарного різання (б) і виходу свердла (в): мінімальна (1), максимальна (2), середня (3) амплітуда, мода розподілу амплітуд (4).

Рекомендовані режими обробки для досягнення високої якості на поверхні отвору:

$v = 0,62$ м/с, $S = 006$ мм/об (з параметрами свердла $\alpha = 30^\circ$, $k = 2,78$ м);

$v = 0,62$ м/с, $S = 008$ мм/об (з параметрами свердла $\alpha = 30^\circ$, $k = 2,78$ мм).

Високопродуктивні режими обробки, за яких досягають найкращої якості поверхні отворів:

$v = 1,04$ м/с, $S = 0048$ мм/об (з параметрами свердла $\alpha = 17^\circ$, $k = 2,14$ мм);

$v = 1,04$ м/с, $S = 006$ мм/об (з параметрами свердла $\alpha = 30^\circ$, $k = 2,78$ мм);

Основний вплив на розподіл амплітуд має робота різальних кромок із зрізання вуглецевих волокон. Вплив роботи поперечної та бокових кромок на розподіл амплітуд RMS сигналу АЕ є незначним.

L. M. Devin, M. E. Stachniv, S. V. Rychev
Bakul Institute for Superhard Materials,
National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine
Investigation of acoustic emission signal on the stage
of penetration and exit when drilling carbon plastics by using
drills from diamond-carbide plates (PCD)

The regularities of the change in the acoustic emission signal during the drilling process at the stages of penetration and exit of the drill from the workpiece are established, as well as how the cutting modes affect the quality of the hole obtained. The relationship between the levels of the acoustic emission signal at the stage of the exit of the transverse edge from the workpiece with the defectiveness of the drilled holes has been established. The effect of the width of the transverse edge on the magnitude of the acoustic emission signal has been studied.

Keywords: drilling carbon fiber reinforced plastics, diamond carbide inserts, signal of acoustic emission, transverse cutting edge, drill entrance, exit drills.

1. Криворучко Д.В., Залого В.А., Пасечник В.А., Колесник В.А., Емельяненко С.С., Некрасов С.С. Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов (аналитический обзор): монография / под общей ред. проф. В.А. Залого. Сумы: Университетская книга, 2013. 272 с.
2. Devin L.N., Grechuk A.I., Lupkin B.V. Drilling of composites using tools of polycrystalline superhard materials. *J. Superhard Mater.* 2018. Vol. 40, no. 1. P. 58–64.
3. Инструменты из сверхтвердых материалов / под ред. Н.В. Новикова и С.А. Клименко. Изд. 2-е, перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 2014. 608 с. (Б-ка инструментальщика).
4. Devin L.M., Stachniv M.E. An axial force during drilling of carbon plastics with drills equipped with diamond-carbide inserts. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 4, no. 6. P. 409–416.
5. 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.
6. Wertheim R., Ben-Hanan U., Ihlenfeldt S., Stoll A., Treppe F., Wabner M. Acoustic emission for controlling drill position fiber-reinforced plastic and metal stacks. *CIRP Annals.* 2012. Vol. 61, no. 1. P. 75–78.
7. Filonenko S., Nimchenko T. Acoustic emission at machining of materials by turning. *Technological Systems.* 2011. Vol. 3. P. 56.
8. Девин Л.Н., Сулима А.Г. Применение пакета Power Graph для исследования процесса резания. *Промышленные измерения контроль, автоматизация диагностика (ПуКАД).* 2008. № 3. С. 24–26
9. Hrechuk A. Drilling holes in fiber-reinforcement composite materials: A literature review. Sweden, Lund University, 2016. 33 p.
10. Девін Л.М., Гречук А.І. Спосіб визначення якості отворів в зразках з волокнистих полімерних композиційних матеріалів. Пат. України на корисну модель № 125333. Опубл. 10.05.2018.

Надійшла до редакції 08.07.21

Після доопрацювання 24.09.21

Прийнята до опублікування 28.09.21