

# Дослідження процесів обробки

---

УДК 621.95

**Л. М. Девін\*, М. Є. Стахнів**

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля

НАН України, м. Київ

\*ldevin@ism.kiev.ua

## **Осьова сила при свердлінні вуглепластика свердлами з алмазно-твердосплавних пластин**

*Представлено результати дослідження осьової сили під час свердління вуглепластика з різними режимами різання і різною геометрією свердел з алмазно-твердосплавних пластин. Наведено закономірності зміни характеристик процесу свердління при стаціонарному різанні і на етапах врзання і виходу свердла із заготовки. Вивчено вплив ширини поперечної кромки на величину осьової сили.*

**Ключові слова:** свердління вуглепластиків, алмазно-твердосплавні пластини, осьова сила, поперечна ріжуча кромка, врзання свердла, вихід свердла.

### **ВСТУП**

Волокнисті полімерні композиційні матеріали (ВПКМ) мають високі пружні властивості, високі питомі значення міцності і високу корозійну і антімагнітну стійкість, що робить їх важливими матеріалами в різних галузях сучасного машинобудування і авіабудування, суднобудування та енергетики, а також в медицині, будівництві, робототехніці і автомобілебудуванні [1]. Особливо перспективними матеріалами, як найбільш дешеві, є вуглепластики. По-перше, вуглепластики є матеріалами з високим модулем пружності, що робить їх більш стійким до втомного руйнування в порівнянні з металами. По-друге, підраховано, що заміна 40 % конструкції з алюмінієвого сплаву на вуглепластик приведе до 12 % зниження ваги всієї конструкції [1].

Механічна обробка вуглепластиків різанням при виробництві викликає серйозні труднощі: в зоні різання виникає висока температура, ріжучі інструменти зношуються інтенсивніше, ніж за обробки багатьох металів, у виробках формується дефектний поверхневий шар.

Найбільш поширеною операцією механічної обробки виробів з вуглепластиків є свердління, що обумовлено необхідністю виготовлення отворів для з'єднання різних деталей. Якість просвердлених отворів визначається сукуп-

ністю кількох параметрів, таких як стан волокон, розшарування композита на вході і виході свердла з отвору, руйнування поверхні отвору і термодеструкція матриці [2].

Наявність не зрізаних волокон пов'язана з багатьма факторами, такими як невірно підібрані режими різання, не оптимальна геометрія, недолік конструкції свердла. Внаслідок використання збільшеного радіусу різальних кромки свердла в зоні різання виникають великі деформації оброблюваного матеріалу, що обумовлює зминання і розрив волокон замість зрізання.

Тому для підвищення ефективності обробки застосовують інструменти з надтвердих матеріалів [2, 3], що дозволяє інтенсифікувати процеси обробки виробів з вуглепластика в порівнянні із застосуванням інших інструментальних матеріалів.

Водночас для вуглепластиків особливо важливо дослідити, як впливають геометричні параметри свердла та режими різання на процес свердління і якість одержуваного отвору.

Впливу геометричних параметрів свердла і режимів обробки на осьову силу і крутний момент присвячено багато робіт, наприклад [1, 3–7], де зазначено, що особливо важливим є вивчення сили різання в різні періоди роботи свердла, тобто при врізанні в оброблювану заготовку, при сталому процесі різання і при виході свердла з заготовки. Встановлено, що в період врізання осьова сила і крутний момент зростають, а потім мало змінюються. Причому в [4] зазначено, що на поперечну кромку припадає близько 50 % осьової сили, значення якої є вихідним параметром для розрахунку міцності свердла. У момент, коли свердло виходить з отвору, різко зменшується жорсткість заготовки і осьова сила. Водночас збільшуються вібрації, що тривають до повного виходу свердла з отвору. Не встановлено інформаційні джерела про дослідження впливу геометричних параметрів свердел з алмазними ріжучими лезами на осьову силу під час свердління вуглепластиків.

Процес свердління вуглепластиків детально розглянуто в [1, 2], де докладно досліджено вплив режимів різання і геометричних параметрів свердла на продуктивність різання. З аналізу літератури випливає, що найбільш ефективні при свердлінні свердла, виготовлені із застосуванням полікристалів алмазу або з алмазним CVD-покриттям. Однак робіт, в яких досліджено сили різання на вході і виході свердла із заготовки під час свердління інструментом з полікристалів алмазу авторами не виявлено, хоча саме в процесі виходу свердла утворюється розшарування зовнішніх шарів вуглепластика і його розпушування.

Метою роботи було вивчення особливості зміни осьової сили на етапах врізання і виходу свердла із заготовки вуглепластика, з'ясування впливу поперечної кромки на осьову силу.

## МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Свердління заготовки вуглепластика виконували на високоточному токарному верстаті ТПК-125ВМ. При дослідженні використовували перове свердло зі вставками з алмазно-твердосплавних пластин, конструкція якого описана в [2]. Свердло містило основні і допоміжні ріжучі кромки, перемичку, канавку для стружки, циліндричний хвостовик. В якості ріжучих вставок використовували двошарові алмазно-твердосплавних пластини (АТП), які були впаяні в корпус.

Дві протилежно розташовані пластини АТП формували ріжучу частину свердла. Заточку свердла виконували по двох площинах і забезпечували формування перемички, яка включала як алмазну, так і твердосплавну частини.

Допоміжні ріжучі кромки було сформовано паралельно осі свердла – вони виконували доводочну функцію, покращували шорсткість обробленої поверхні.

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

Для проведення експериментів свердло було заточене з заднім кутом на головній різальній кромці, що дорівнював  $17^\circ$  або  $30^\circ$ . Кут в плані дорівнював  $120^\circ$ , радіус заокруглення різальних кромок – 17,3 мкм.

Оброблювану заготовку (рис. 1) товщиною 10 мм, довжиною 360 мм і шириною 60 мм за допомогою спеціально виготовленого пристосування закріплювали в динамометрі УДМ-100. За допомогою динамометра вимірювали осьову силу  $P_o$ . Сигнал від динамометра посилювався і через АЦП ADA 1406 фірми "HOLIT DataSystems" (Україна) надходив до персонального комп'ютера. Управління АЦП, реєстрацію і попередню обробку експериментальних даних виконували за допомогою програми PowerGraph [8].

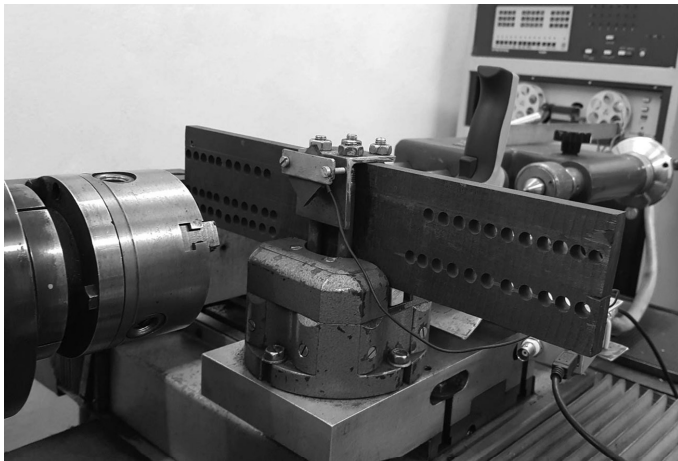


Рис. 1. Заготовка вуглепластика, закріплена в динамометрі.

Свердління проводили при частоті обертання шпинделя 1500 і 2500 об/хв. Подачу в межах від 15 мм/хв до 150 мм/хв здійснювали за допомогою переміщення супорта верстата.

Було виконано експерименти при різних подачах – від 0,01 до 0,08 мм/об. Розмір поперечної кромки  $k$  становив 2,14 мм або 2,78 мм, а задні кути  $\alpha$  на головній різальній кромці дорівнювали  $17^\circ$  або  $30^\circ$  відповідно. Швидкість різання  $v$  дорівнювала 0,62 або 1,04 м/с.

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Характерну осцилограму зміни осьової сили  $P_o$  під час свердління приведено на рис. 2.

На осцилограмі виділено шість характерних точок, позначених  $A$ ,  $P_{o1}$ ,  $P_{o2}$ ,  $P_{o3}$ ,  $P_{o4}$ ,  $B$ . Ці точки визначають п'ять ділянок на осцилограмі, які відповідають п'яти етапам свердління, і в них починаються і завершуються етапи свердління. Видно, що процес врізання складається з двох етапів: врізання поперечної кромки ( $A-P_{o1}$ ) і врізання різальних кромок ( $P_{o1}-P_{o2}$ ). Ділянка ( $P_{o2}-P_{o3}$ ) – основний період різання (стаціонарне свердління), коли всі кромки знаходяться в контакті з заготовкою. Процес виходу свердла з заготовки також

складається з двох етапів: вихід із заготовки поперечної кромки ( $P_0-P_{04}$ ) і вихід різальних кромок ( $P_{04}-B$ ).

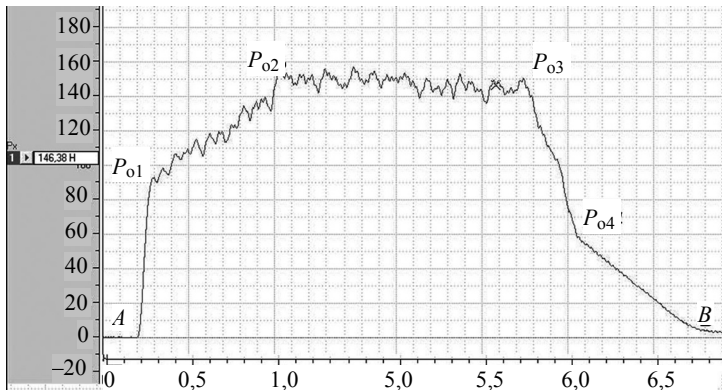


Рис. 2. Характерна осцилограма зміни осьової сили  $P_0$  під час свердління вуглепластика товщиною 10 мм ( $v = 1,04$  м/с,  $S = 30$  мм/хв,  $D = 7,95$  мм, задній кут –  $17^\circ$ , поперечна кромка  $k = 2,14$  мм).

Якщо  $P_{02}$  і  $P_0$  – сума осьових сил на поперечній і різучих кромках після повного входу свердла в заготовку і перед його виходом відповідно,  $P_{04}$  – осьова сила на різучих кромках після виходу поперечної кромки свердла з заготовки, тоді сила на поперечній кромці при врізанні  $P_{ок} = P_{01}$ , а на виході  $P_{ок} = P_{03} - P_{04}$  [5].

Аналіз отриманих при дослідженнях осцилограм дозволив встановити особливості зміни осьової сили різання на різних етапах свердління.

Результати зведені в табл. 1, де також наведені параметри, які визначалися з осцилограм і в подальшому використовувалися для аналізу.

Аналіз осцилограм показав, що на етапі врізання свердла в заготовку найбільший вплив на осьову силу різання має поперечна кромка. На етапі стаціонарного свердління вплив поперечної кромки в загальній осьовій силі становить 39–63 % (табл. 2, 3). При виході свердла поперечна кромка впливає на осьову силу тільки до її виходу із заготовки (див. рис. 2, точка  $P_{04}$ ).

**Таблиця 1. Особливості етапів свердління**

Ділянка	Зміна осьової сили	Параметр
$A-P_{01}$ Врізання поперечної кромки	Діє тільки складова, обумовлена взаємодією поперечної кромки з заготовкою, осьова сила зростає від 0 до $P_{01}$	$P_{ок} = P_{01}$ – складові осьової сили різання, $t_{A1}$ – тривалість врізання поперечної кромки, проміжок часу між точками A і $P_{01}$
$P_{01}-P_{02}$ Врізання головних різальних кромок	Складова, зумовлена взаємодією поперечної кромки з заготовкою постійна, осьова сила зростає за рахунок головних різальних кромок від $P_{01}$ до $P_{02}$	$t_{A2}$ – тривалість врізання свердла, проміжок часу між точками A і $P_{02}$
$P_{02}-P_{03}$ Стаціонарне свердління	Осьова сила $P_0$ змінюється не суттєво, складова від допоміжної різальної кромки менше 5 % від $P_0$	$P_0 = P_{02} = P_{03}$ – осьова сила при стаціонарному свердлінні

**Таблиця 1. (Продовження)**

$P_{03}-P_{04}$ Вихід поперечної кромки	Осьова сила зменшується від $P_{03}$ до $P_{04}$	$P_{ок} = P_{03}-P_{04}$ – складові осьової сили різання, $t_{3,4}$ – тривалість виходу поперечної кромки, проміжок часу між точками $P_{03}$ і $P_{04}$
$P_{04}-B$ Повний вихід свердла з заготовки	Значення осьової сили від головних різальних кромок зменшується від $P_{04}$ до нуля	$t_{3B}$ – тривалість виходу свердла із заготовки, проміжок часу між точками $P_{03}$ і $B$

**Таблиця 2. Частка осьової сили на поперечній кромці в загальній осьовій силі  $(100P_{ок})/P_o$  в залежності від подачі  $S_o$  при швидкості різання  $v = 0,62$  м/с**

$S_o$ , мм/об	$(100P_{ок})/P_o$ , %			
	$\alpha = 17^\circ, k = 2,14$ мм		$\alpha = 30^\circ, k = 2,78$ мм	
	Врізання	Вихід	Врізання	Вихід
0,01	51,6	52,0	42,8	42,1
0,02	53,2	57,0	44,8	46,5
0,04	60,4	64,1	48,9	48,1
0,06	62,1	61,1	46,7	47,6
0,08	62,8	63,5	47,0	48,7

**Таблиця 3. Частка сили на поперечній кромці в загальній осьовій силі  $(100P_{ок})/P_o$  в залежності від подачі  $S_o$  при швидкості різання  $v = 1,04$  м/с**

$S_o$ , мм/об	$(100P_{ок})/P_o$ , %			
	$\alpha = 17^\circ, k = 2,14$ мм		$\alpha = 30^\circ, k = 2,78$ мм	
	Врізання	Вихід	Врізання	Вихід
0,012	50,1	51,1	39,3	39,9
0,024	50,2	57,5	43,1	44,3
0,036	55,1	55,9	45,6	44,7
0,048	56,2	53,3	45,6	45,4
0,060	57,4	55,7	43,2	43,8

Досліджено вплив подачі, швидкості різання і довжини поперечної кромки на осьову силу на поперечної кромці і загальну осьову силу (див. табл. 2, 3) при врізанні свердла в заготовку (рис. 3) і при виході свердла з заготовки (рис. 4). Похибки вимірювання осьової сили становили не більше 15 %.

Дослідження, що були виконані на етапі врізання свердла в заготовку (див. рис. 3), дозволили встановити наступне:

1. За швидкості різання  $v = 0,62$  м/с частка осьової сили на поперечній кромці зі збільшенням подачі зростає і становить 52–63 % ( $k = 2,14$  мм) і 42–47 % ( $k = 2,78$  мм) від загальної осьової сили.

2. За швидкості різання  $v = 1,04$  м/с частка осьової сили на поперечній кромці зі збільшенням подачі зростає і становить 50–58 % ( $k = 2,14$  мм) і 40–44 % ( $k = 2,78$  мм) від загальної осьової сили.

3. Зі збільшенням довжини поперечної кромки з 2,14 до 2,78 мм за незмінних хвилинної подачі і швидкості різання осьове зусилля на ній зростає на 15–25 %, а загальна осьова сила збільшується на 20–30 %.

4. Зі збільшенням подачі від 0,01 до 0,08 мм/об при незмінній швидкості різання осьова сила на поперечній кромці зростає в 1,3–2,0 рази, а загальна осьова сила – в 2,0–2,2 рази.

5. За  $k = 2,14$  мм за незмінної хвилинної подачі зі збільшенням швидкості від 0,62 до 1,04 м/с осьова сила на поперечній кромці зменшується на 10–15 %, а загальна осьова сила не змінюється.

6. За  $k = 2,78$  мм за незмінної хвилинної подачі зі збільшенням швидкості від 0,62 до 1,04 м/с осьова сила на поперечній кромці і загальна осьова сила істотно не змінюються.

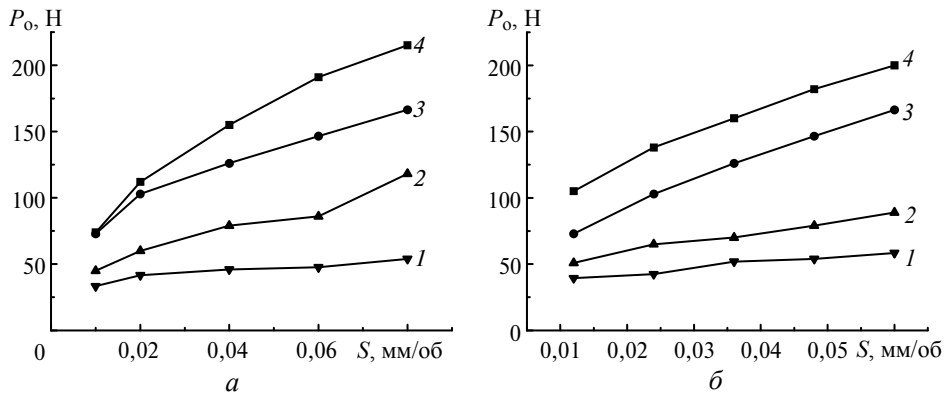


Рис. 3. Осьова сила на поперечній кромці  $P_{ок} = P_{o1}$  ( $k = 2,14$  (1), 2,78 (2) мм) і загальна осьова сила  $P_{o2}$  ( $k = 2,78$  (3), 2,14 (4) мм) при врізанні свердла в заготовку; швидкість різання  $v = 0,62$  (а) і 1,04 (б) м/с.

Дослідження, виконані на етапі виходу свердла із заготовки (див. рис. 4), дозволили встановити наступне:

1. За швидкості різання  $v = 0,62$  м/с частка осьової сили на поперечній кромці зі збільшенням подачі зростає і становить 52–64 % ( $k = 2,14$  мм) і 42–49 % ( $k = 2,78$  мм) від загальної осьової сили.

2. За швидкості різання  $v = 1,04$  м/с частка осьової сили на поперечній кромці зі збільшенням подачі зростає і становить 51–56 % ( $k = 2,14$  мм) і 40–44 % ( $k = 2,78$  мм) від загальної осьової сили.

3. Зі збільшенням довжини поперечної кромки з 2,14 до 2,78 мм за незмінних хвилинної подачі і швидкості різання осьове зусилля на ній зростає на 5–15 %, а загальна осьова сила збільшується на 10–20 %.

4. Зі збільшенням подачі від 0,01 до 0,08 мм/об за незмінної швидкості різання осьова сила на поперечній кромці зростає 1,5–1,8 рази, а загальна осьова сила зростає в 1,7–2,5 рази.

5. За  $k = 2,14$  мм за незмінної хвилинної подачі зі збільшенням швидкості від 0,62 до 1,04 м/с осьова сила на поперечній кромці істотно не змінюється, а загальна осьова сила зменшується на 10–12 %.

6. За  $k = 2,78$  мм за незмінної хвилинної подачі зі збільшенням швидкості від 0,62 до 1,04 м/с осьова сила на поперечній кромці істотно не змінюється, а загальна осьова сила зменшується на 10–12 %.

Зіставляючи результати дослідження впливу подачі та швидкості різання на осьову силу на поперечній кромці і загальну осьову силу під час врізання і

виходу із заготовки встановлено досить точний збіг результатів (перераховані вище пункти 1–4 при врізанні і при виході свердла з заготовки). Має місце деяка розбіжність результатів у пунктах 5 і 6. З огляду на похибку вимірювання осьової сили, і за виконання об'єднання результатів, наведених в пунктах 5 і 6, можна стверджувати:

– за  $k = 2,14$  мм за незмінної хвилинної подачі зі збільшенням швидкості від 0,62 до 1,04 м/с осьова сила на поперечній кромці й загальна осьова сила зменшуються на 5–8 %;

– за  $k = 2,78$  мм за незмінної хвилинної подачі зі збільшенням швидкості від 0,62 до 1,04 м/с осьова сила на поперечній кромці істотно не змінюється, а загальна осьова сила зменшується на 5–8 %.

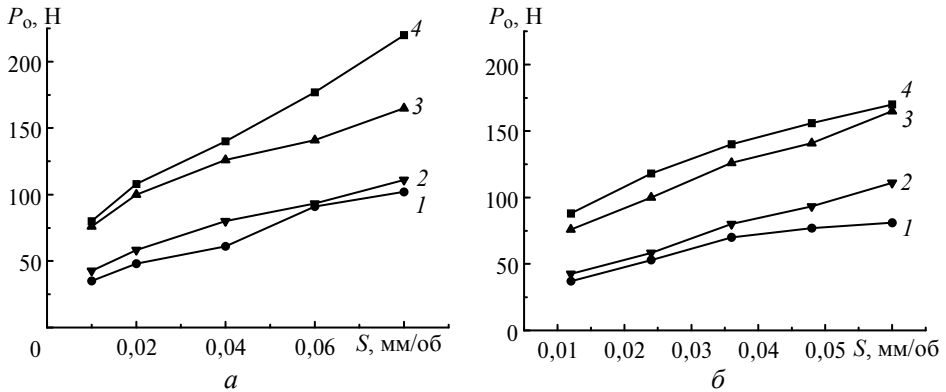


Рис. 4. Осьова сила на поперечній кромці  $P_{ок}$  ( $k = 2,14$  (1), 2,78 (2) мм) і загальна осьова сила  $P_{оз}$  ( $k = 2,78$  (3), 2,14 (4) мм) на виході із заготовки; швидкість різання  $v = 0,62$  (а) і 1,04 (б) м/с.

Досліджено вплив подачі, швидкості різання і довжини поперечної кромки на тривалість врізання і тривалість виходу свердла з заготовки (рис. 5).

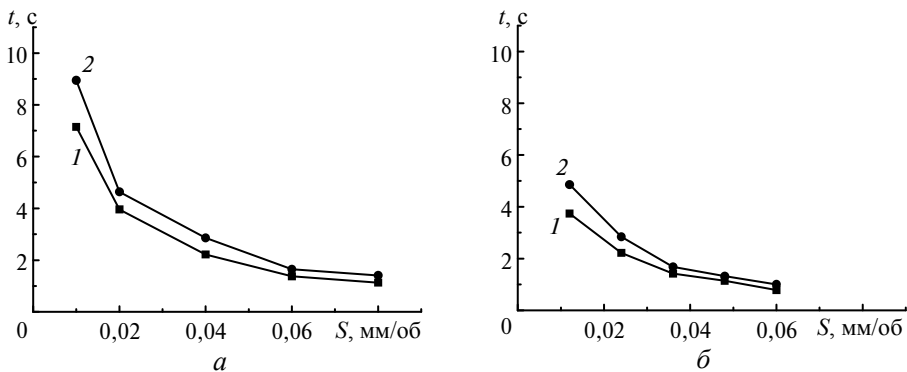


Рис. 5. Тривалості врізання  $t_{A2}$  (1) і виходу  $t_{3B}$  (2) свердла з поперечною кромкою шириною  $k = 2,14$  мм при швидкості різання  $v = 0,62$  (а) і 1,04 (б) м/с.

Дослідження тривалості врізання і виходу свердла з заготовки показали їх нерівність (див. рис. 5). У разі обробки заготовки з великим значенням жорсткості була б можлива повна рівність часу врізання і виходу, але заготовка вуглепластика, що складається з декількох скріплених шарів, має малу жорсткість, причому жорсткість у міру виходу свердла з заготовки зменшується. Ця обставина і обумовлює збільшення тривалості виходу свердла із заготовки

по відношенню до тривалості врізання (див. рис. 5). Отримані результати відповідають конкретній заготовці вуглепластика, на якій проводили дослідження. Однак встановлені тенденції можна узагальнити на процес свердління будь-яких пластин з інших вуглепластиків.

Дослідження тривалості врізання  $t_{A2}$  і тривалості виходу свердла з заготовки  $t_{3B}$  було виконано для свердел з шириною кромки  $k = 2,14$  мм (див. рис. 5) і  $k = 2,78$  мм. Аналіз отриманих даних дозволив встановити:

- тривалість виходу свердла з заготовки  $t_{3B}$  на 15–20 % більше тривалості врізання  $t_{A2}$ ;

- зі збільшенням швидкості різання за незмінних значеннях хвилинної подачі і довжини поперечної кромки свердла тривалість врізання  $t_{A2}$  і виходу свердла з заготовки  $t_{3B}$  зменшуються;

- зі збільшенням ширини кромки  $k$  від 2,14 до 2,78 мм за незмінних значеннях хвилинної подачі та швидкості різання, тривалості врізання  $t_{A2}$  і виходу свердла з заготовки  $t_{3B}$  збільшуються.

Досліджено вплив подачі, швидкості різання на тривалість часу врізання  $t_{A1}$  і виходу  $t_{34}$  поперечної кромки свердла із заготовки для інструментів з довжиною поперечної кромки  $k = 2,14$  і 2,78 мм (рис. 6).

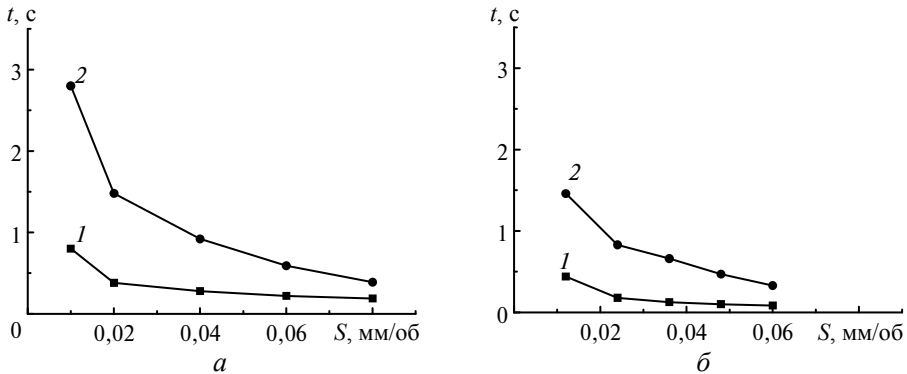


Рис. 6. Тривалість часу врізання  $t_{A1}$  (1) і виходу  $t_{34}$  (2) поперечної кромки довжиною  $k = 2,78$  мм при швидкості різання  $v = 0,62$  (а) і 1,04 (б) м/с.

Аналіз отриманих даних дозволив встановити:

- за час свердління свердлами з поперечної кромкою довжиною  $k = 2,78$  мм тривалість виходу поперечної кромки  $t_{34}$  в 2–4 рази більше, ніж тривалість врізання  $t_{A1}$ , а для поперечної кромки з  $k = 2,14$  мм – в 5–6 разів більше;

- зі збільшенням швидкості різання за незмінних значеннях хвилинної подачі і довжини кромки свердла тривалість часу врізання  $t_{A1}$  і  $t_{34}$  виходу поперечної кромки свердла з заготовки зменшується;

- зі збільшенням довжини поперечної кромки  $k$  від 2,14 до 2,78 мм за незмінних значень хвилинної подачі і швидкості різання тривалість часу врізання  $t_{A1}$  і виходу  $t_{34}$  поперечної кромки свердла з заготовки збільшується.

Аналіз експериментальних результатів показує, що абсолютні значення осьових сил на поперечної кромці під час врізання і на виході рівні.

## ВИСНОВКИ

На етапі врізання свердла в заготовку основний вплив на осьову силу різання має поперечна кромка. Під час врізання головних різальних кромки вплив поперечної кромки зменшується і на етапі стаціонарного свердління її частка в загальній осьовій силі становить 39–64 %. Після виходу із заготовки



поперечна кромка не взаємодіє з оброблюваним матеріалом і не впливає на осьову силу.

Зі збільшенням довжини поперечної кромки на 30 % осьове зусилля свердління зростає на 20–30 %. Зі збільшенням подачі вплив розміру поперечної кромки на осьову складову сили різання збільшується.

Осьова сила на поперечній кромці змінюється від 40 до 70 % від загальної осьової сили різання. Зі збільшенням заднього кута від  $17^\circ$  до  $30^\circ$  зменшується частка сили на поперечній кромці  $P_{ок}$  в загальній осьовій силі  $P_{о3}$ .

Осьові сили на поперечній кромці під час врзання і на виході рівні, але через зменшення жорсткості заготовки під час виходу свердла тривалість виходу свердла на 15–20 % більше, ніж тривалість врзання. Проте тривалість виходу поперечної кромки з заготовки в 2–4 рази (задній кут  $\alpha = 30^\circ$ , довжина поперечної кромки  $k = 2,78$  мм) і в 5–6 разів (задній кут  $\alpha = 17^\circ$ , довжина поперечної кромки  $k = 2,14$  мм) більше тривалості її входу в заготовку.

L. M. Devin, M. E. Stakhniv  
Bakul Institute for Superhard Materials,  
National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
Axial force when drilling carbon plastics by using drills  
from diamond-carbide inserts

*The results of studying the axial force during drilling of carbon fiber reinforced plastic under different cutting modes and different geometry of drills from diamond carbide inserts are presented. The regularities of changing the characteristics of the drilling process during stationary cutting and at the stages of insertion and exit of the drill from the workpiece are given. The influence width of the transverse edge width on the value of the axial force is studied.*

**Keywords:** *drilling carbon fiber reinforced plastics, diamond-carbide inserts, axial force, transverse cutting edge, drill entrance, exit drills.*

1. Криворучко Д.В., Залого В.А., Колесник В.А. и др. Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов (аналитический обзор): Моногр. / 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, С.А. Клименко. Изд. 2-е, перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 2014. 608 с.
4. Семенченко И.И., Матюшин В.М., Сахаров Г.Н. Проектирование металлорежущих инструментов. Москва: Машгиз, 1963. 952 с.
5. Резание конструкционных материалов, режущие инструменты и станки / под ред. В.А. Кривоухова. Москва: Машиностроение, 1967. 654 с.
6. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание металлов: Учебник для машиностр. и приборостр. спец. вузов. Москва: Высш. шк., 1985. 304 с.
7. Армарего И.Дж.А., Браун Р.Х. Обработка металлов резанием. Москва: Машиностроение, 1977. 325 с.
8. Девин Л.Н., Сулима А.Г. Применение пакета Power Graph для исследования процесса резания. *Промышленные измерения контроль, автоматизация диагностика (ПиКАД)*. 2008. № 3. С. 24–26.

Надійшла до редакції 27.12.19  
Після доопрацювання 20.02.20  
Прийнята до опублікування 02.03.20