

Є.В. Корбут, к.т.н., доц.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

Дослідження процесу різання свердлами з дискретною модифікованою поверхнею

У статті розглянуто процес обробки різанням полімерних композиційних матеріалів (ПКМ). Досліджено і описано процес взаємодії різального інструменту з нанесеним на його задню поверхню дискретного модифікованого покриття глобулярної структури з композиційним матеріалом. Для визначення впливу дискретизації задньої поверхні інструмента було розраховано величину нормальних сил, що виникають на задній поверхні інструмента в результаті процесу різання ПКМ в довільних точках поверхні та визначено величину напружень на глобулах, які розташовані на цій поверхні. Проведено порівняльне дослідження напружень, що виникають на задній поверхні при використанні інструмента зі суцільними різальними поверхнями та інструмента з дискретно модифікованою задньою поверхнею. В статті досліджено вплив архітектури покриття, нанесеного на інструмент, на величину напружень. Встановлено, що під час обробки полімерних композиційних матеріалів інструментом із дискретно модифікованою поверхнею глобули, розташовані в межах дискретних ділянок поверхні, під дією сил, що виникають на задній поверхні інструмента, виконують функції деформувальних елементів. Унаслідок цього відбувається руйнування матриці композита, а в зоні задньої поверхні інструмента супутньо реалізується процес диспергування матеріалу. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації технологічних процесів обробки різанням полімерних композиційних матеріалів.

Ключові слова: процес різання; полімерні композиційні матеріали; зносостійкі покриття; дискретизація робочої поверхні різального інструменту; глобула; деформуючий елемент; сили різання.

Актуальність теми. Проблема підвищення якості та ефективності обробки полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) різанням значною мірою пов'язана з пошуку шляхів забезпечення працездатності та надійності інструменту для їх обробки.

ПКМ мають комплекс властивостей та особливостей, які позитивно відрізняють їх від металів та їх сплавів, що відкриває широкі можливості для розробки нових конструкцій та технологій виробів різного призначення і удосконалення існуючих. Але поряд з цим, їх фізико-механічні властивості викликають труднощі обробкою різанням, що накладає певні вимоги до використання різального інструменту (РІ). Перш за все вони повинні забезпечувати необхідну якість, точність обробленої поверхні деталей з ПКМ та продуктивність процесу обробки. Спрощення їх конструкцій, підвищення рівня технологічності виготовлення дозволить знизити собівартість інструменту і, як наслідок, собівартість виробу з ПКМ.

Тому актуальним є питання підвищення працездатності інструменту для обробки полімерних композиційних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спирається автор. На теперішній час проводиться багато наукових досліджень з вивчення умов забезпечення якості процесу обробки ПКМ різанням [1].

Проводяться дослідження, спрямовані на розроблення нових видів обробки різанням, зокрема гідрорізання та ультразвукового різання [2], застосування прогресивних схем різання [3], дослідження й розроблення нових конструкцій і геометрії різального інструменту [4], визначення оптимальних режимів обробки [5], а також створення нових інструментальних матеріалів і покриттів для різального інструменту, призначеного для обробки полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) [6]. Але у більшості випадків з підвищенням продуктивності обробки виробів з ПКМ знижується якість готових виробів, а застосування альтернативних методів обробки потребує використання дорожчого обладнання, допоміжних пристосувань, що зрештою призведе до збільшення собівартості виробу.

У зв'язку з тим, що ПКМ, завдяки своїм фізико-механічним властивостям, є перспективним на сьогоднішній час для використання матеріалом, то багато досліджень спрямовано на вивчення процесів, що виникають під час обробки різанням ПКМ.

Вивчення процесів, що виникають при дискретизації робочих поверхонь свердел під час обробки різанням ПКМ, їх вплив на процес різання та якість отриманих деталей з полімерних композитів не проводилися. Дані аспекти розглядалися тільки для різання металевих деталей. Дослідження [6] показали, що використання дискретних покриттів на робочих поверхнях різального інструменту для обробки металів призводить до зменшення контактної площі, в результаті чого відбувається зниження сил тертя і, як наслідок, зменшення тепла в зоні контакту. Також унаслідок «несуцільності» поверхні поліпшується відвід

тепла з зони різання, що позитивно впливає на якість обробленої поверхні та збільшує ресурс використання інструменту. Але дослідження процесів, що виникають при дискретизації робочих поверхонь різального інструменту під час обробки ПКМ, не проводились і потребують подальшого вивчення.

Метою статті є дослідження процесу різання полімерних композиційних матеріалів свердлами з дискретно модифікованою задньою поверхнею.

Викладення основного матеріалу. Метою використання свердел із модифікованою поверхнею у вигляді дискретних ділянок покриття, які не схильні до когезійного розтріскування [7] з регулярно розташованими на них глобулами, є:

- зменшення питомої сили тертя;
- зменшення абразивного зношування інструменту за рахунок використання захисного покриття;
- зменшення деструктивного шару ПКМ.

У зв'язку із зазначеним постає завдання дослідження процесів, що виникають у разі дискретизації задніх робочих поверхонь інструменту під час обробки різанням ПКМ, а також визначення їхнього впливу на процес різання та якість отриманих деталей.

Гіпотеза полягає в тому, що глобула є деформуючим елементом і при взаємодії з ПКМ, внаслідок релаксації композита залежно від висоти глобул, умов обробки, положення дискретної ділянки з розміщеними на ній глобулами на задній поверхні інструмента створює в зв'язуючому ПКМ мікротріщини, що при подальшій обробці зменшує сили різання. Це особливо важливо на периферії свердла, оскільки внаслідок часткового руйнування поверхневого шару композита зменшуються напруження на ущільнювальних стрічках свердла, що виникають у результаті релаксації ПКМ, а отже — знижується товщина деструктивного шару оброблюваної деталі. Зазначена гіпотеза потребує аналітичного та експериментального підтвердження.

Для визначення впливу дискретизації задньої поверхні інструмента покриттям дискретного типу глобулярної структури на якість отриманої поверхні виробу з ПКМ проведено аналіз впливу сил, що діють на задню поверхню інструмента, на величину та розподіл сил на дискретну ділянку покриття з регулярно розташованими глобулами, вплив глобул на характер взаємодії глобули з оброблюваним матеріалом. На рисунку 1 представлена схема сил, що діють у зоні різання при обробці ПКМ.

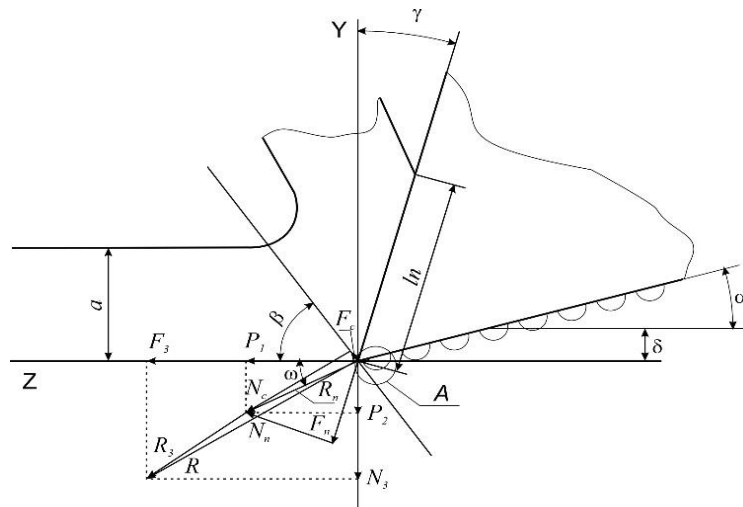


Рис. 1. Схема сил різання під час обробки ПКМ, N_n – нормальна сила, яка діє по передній поверхні, N_3 – нормальна сила, яка діє по задній поверхні, N_c – нормальна сила зсуву, F_c – дотична сила зсуву, F_n – сила тертя по передній поверхні, F_3 – сила тертя по задній поверхні, R_n – рівнодіюча сила (сила стружкоутворення), R – сумарна сила різання, μ – коефіцієнт тертя

З рисунка 1 випливає, що складові рівнодіючої сили дорівнюють:

$$P_z = P_1 + F_3 = N_n \cos \gamma + F_n \sin \gamma + F_3, \quad (1)$$

$$P_y = P_2 + N_3 = F_n \cos \gamma - N_n \sin \gamma + N_3. \quad (2)$$

Нормальна сила по передній поверхні та сила тертя по передній поверхні дорівнюють:

$$N_n = P_1 \sin(\omega + \gamma) / \cos \omega, \quad (3)$$

$$F_n = P_1 \cos(\omega + \gamma) / \cos \omega. \quad (4)$$

Сили, що діють в площині зсуву:

$$N_c = R_n \sin(\omega + \beta), \quad (5)$$

$$F_c = R_n \cos(\omega + \beta). \quad (6)$$

Сили тертя по передній та задній поверхні:

$$F_n = \mu \times N_n, \quad (7)$$

$$F_3 = \mu \times N_3. \quad (8)$$

Як відомо, ПКМ мають високу пружність, що призводить до пружного відновлення оброблюваної поверхні. Сили, які діють по задній поверхні інструмента, виникають у результаті пружного відновлення оброблюваного матеріалу та згідно з [8] можна розглядати як вдавлювання задньої поверхні інструмента в матеріал композита. При використанні різального інструменту з суцільною задньою поверхнею сили, що виникають в результаті пружного відновлення композита, призводять до виникнення сил тертя між задньою поверхнею інструмента та деталлю з ПКМ. При збільшенні режимів різання питома сила тертя збільшується і, як наслідок, погіршується якість отриманої деталі, що не дає змогу підвищити продуктивність обробки без втрати якості. Згідно з дослідженням [9], на задню поверхню інструмента в результаті пружної деформації ПКМ діє рівнодіюча нормальна сила N_3 .

Для визначення нормальної сили N_3 , провівши модифікацію залежності, запропонованою у [8], що застосовується для прямолінійного руху інструмента до процесу свердлення, отримаємо:

$$N_3 = \frac{\pi \eta \sigma_1 \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \sin \alpha}{4b(0,25+\mu^2)} R, \quad (9)$$

де N_3 – нормальна сила, що діє на задню поверхню свердла, b – товщина зрізу, яка залежить від величини подачі, так як розглядаємо процес різання за один оберт свердла, то $b \in [0,1 - 0,7]$, η – коефіцієнт пропорційності, згідно [8] приймаємо $\eta = 1,2$, σ_1 – границя міцності ПКМ, μ -коефіцієнт тертя ПКМ, приймаємо, R – відстань від центра свердла до точки, що досліджується.

Згідно з довідковими даними приймаємо: $\sigma_1 = 550$ МПа, $\nu_1 = 0,25$; $E_1 = 25$ ГПа; $\nu_2 = 0,12$; $E_2 = 500$ ГПа, $\mu = 0,3$, $\eta = 1,2$, подачу приймаємо – $b = 0,4$ мм, досліджувані точки на задній поверхні інструмента – $R_1 = 1$ мм, $R_2 = 3$ мм, $R_3 = 5$ мм.

Результати розрахунків нормальної сили, що діє на задню поверхню свердла представлені на рисунку 2.

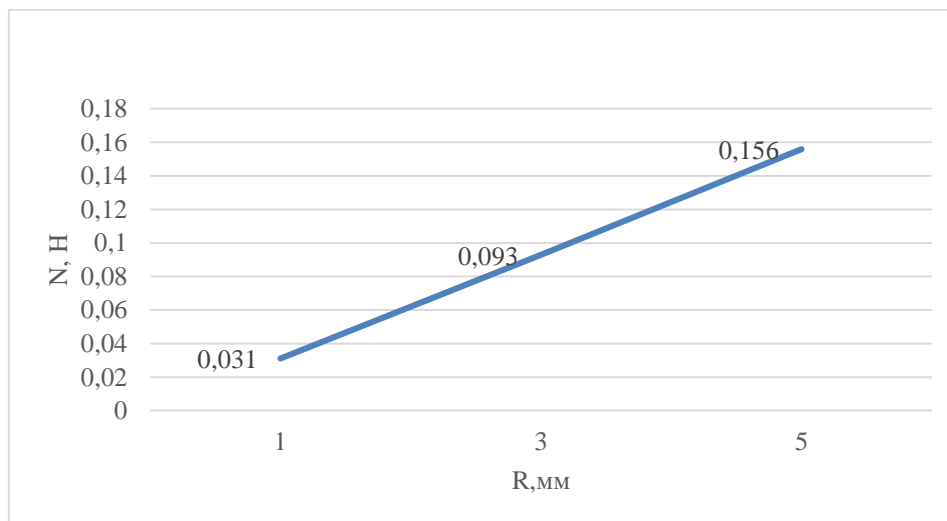


Рис. 2. Залежність нормальної сили, що діє на задню поверхню, від відстані до центру свердла

Для визначення характеру взаємодії глобули, розміщеної на дискретній ділянці покриття на задній поверхні інструмента з оброблюваним матеріалом, необхідно розглянути напруження, що виникає в результаті релаксації композита в різних точках задньої поверхні інструмента. Як зазначалось вище, для досліджень були вибрані глобули радіусом: $r_1 = 3$ мкм, $r_2 = 5$ мкм, $r_3 = 7$ мкм. Якщо наближено представити глобулу як полусферу з відповідними радіусами, то $S_1 = 5,655 \times 10^{-11} \text{ м}^2$, $S_2 = 1,5708 \times 10^{-10} \text{ м}^2$, $S_3 = 3,0788 \times 10^{-10} \text{ м}^2$.

Результати розрахунків представлені на рисунку 3.

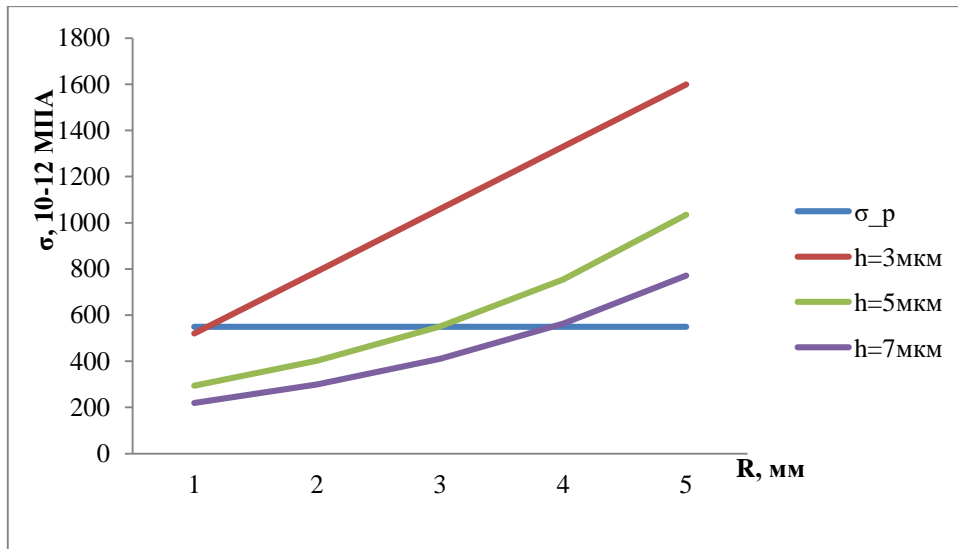


Рис. 3. Залежність величини напружень від радіуса глобул та відстані від центру свердла на задній поверхні

За результатами дослідження можна зробити висновок, що залежно від умов обробки та висоти глобул, розміщених на дискретних ділянках покриття, нанесеного на задню поверхню інструмента, глобули виконують функції деформувальних елементів, унаслідок взаємодії яких з оброблюваним матеріалом відбувається руйнування композита. Залежності від положення глобули відносно центру свердла (рис. 3) та її радіуса напруження, що виникають в результаті взаємодії інструмент – ПКП, перевищують σ_p – напруження руйнування композита.

Оскільки ПКМ є анізотропним матеріалом і його властивості залежать від багатьох факторів, то розрахунки проводять наближено, більш точні результати можна отримати тільки експериментальним шляхом для конкретного матеріалу.

Для підтвердження гіпотези, що глобула є деформуючим елементом і при взаємодії з ПКМ, внаслідок релаксації композита залежно від висоти глобул, умов обробки, положення дискретної ділянки з розміщеними на ній глобулами на задній поверхні інструмента, відбувається руйнування композита, необхідно дослідити процес стружкоутворення та слід, що залишає задня поверхня в тілі ПКМ.

У дослідженнях використовувалися свердла зі швидкорізальної сталі Р6М5 ГОСТ 19265-73 $\varnothing 8$ мм з модифікованою задньою поверхнею покриттям $\text{TiCrB}_2+\text{AlN}$ у вигляді дискретних ділянок з регулярно розташованими на них глобулами товщиною, розміри яких співвідносні з розмірами армувальника композита – $h = 3 \mu\text{m}$, $h = 5 \mu\text{m}$, $h = 7 \mu\text{m}$ (рис. 4) та рекомендовані, за даними літературних джерел свердла Guhring 732, робоче креслення якого представлено на рисунку 5. Процес різання досліджувався при свердлінні склопластику.

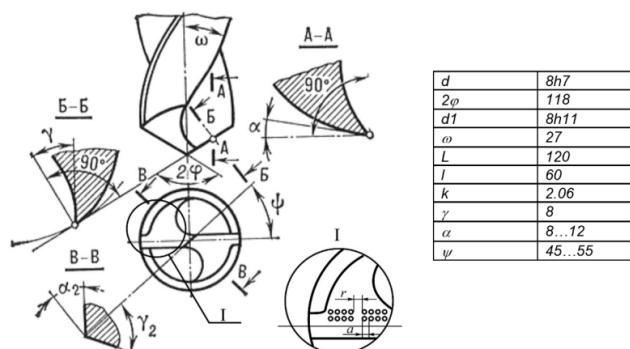


Рис. 4. Швидкорізальне свердло з дискретним глобулярним покриттям

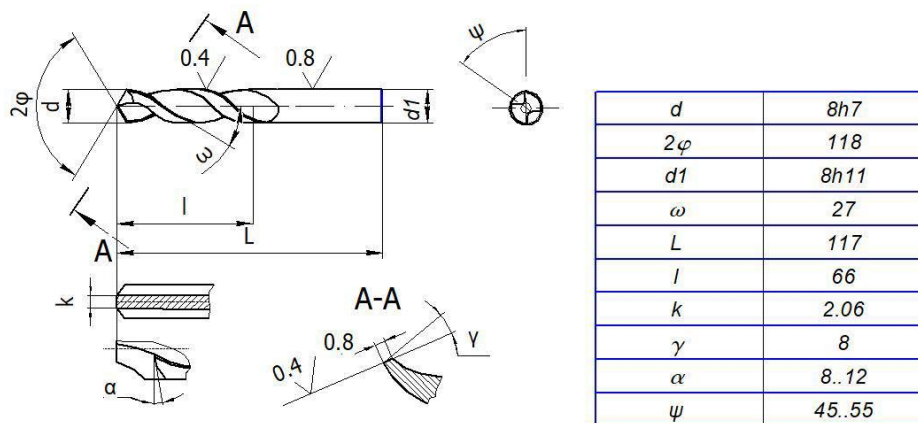


Рис. 5. Свердло Guhring 732. Дослідження проводили свердлами (рис. 4), при $h = 3$ мкм, $h = 5$ мкм, $h = 7$ мкм та свердлами (рис. 5) при швидкості різання $V = 0,3$ м/с та подачею – $S = 0,4$ мм/об

В результаті процесу свердління задньої поверхні свердел були досліджені фрагменти ПКМ, що залишилися на цій поверхні (рис. 6).

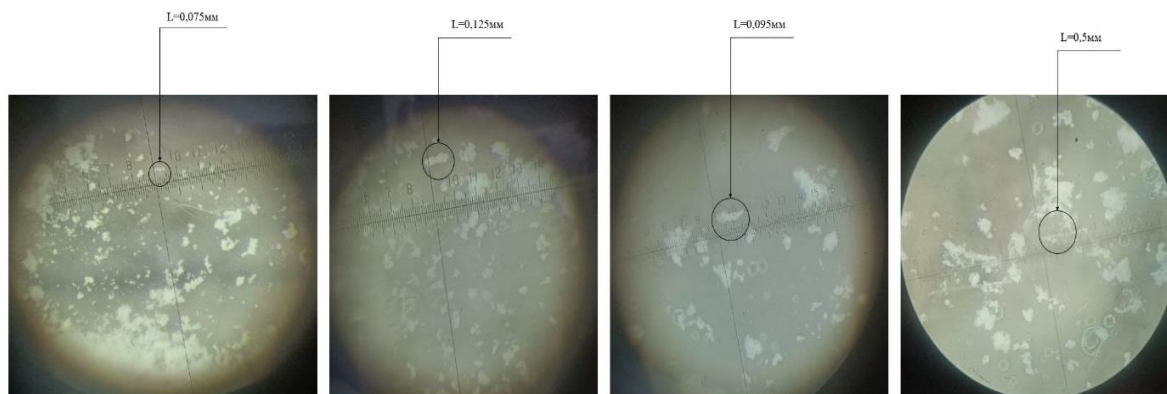


Рис. 6. Залежність величини розмірів фрагментів ПКМ від архітектури задньої поверхні свердла

За результатами досліджень можна зробити висновок, що за однакових умов свердління розміри стружки залежать від висоти глобул і збільшуються зі зростанням їхньої висоти. При свердлінні свердлом з суцільною задньою поверхнею з рисунку видно, що під дією сил тертя було витягнуто волокно армувальника, тобто процес руйнування матриці ПКМ не відбувається.

Для більш детального опису процесу необхідно дослідити «слід», що залишає задня поверхня інструмента на поверхні матеріалу, що обробляється.

Результати наведено на рисунку 7.

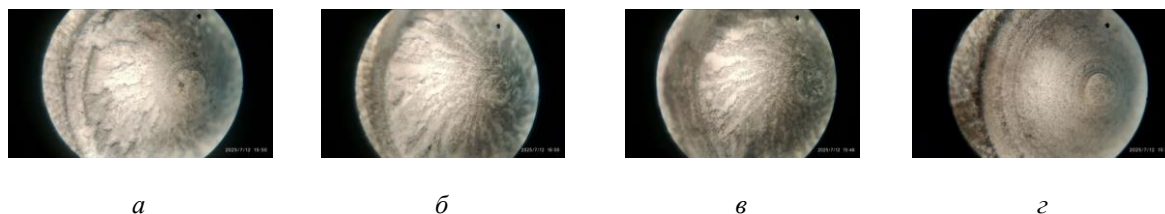


Рис. 7. Слід задньої поверхні при а) $h = 3$ мкм, б) $h = 5$ мкм, в) $h = 7$ мкм, г) суцільна задня поверхня

З експериментальних досліджень можна зробити висновок, що при використанні інструменту з дискретним покриттям відбувається руйнування матеріалу виробу з ВПКМ і ступінь руйнування залежить від висоти глобул. Під час використання інструменту зі суцільною задньою поверхнею руйнування матеріалу ВПКМ не відбувається, з рисунку видно підпали, що викликані силою тертя.

Відмінність між аналітичними та експериментальними дослідженнями можна пояснити анізотропією властивостей ПКМ, також при розрахунках не враховувалися кути армування ПКМ.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У результаті досліджень встановлено, що при обробці ПКМ інструментом із дискретно модифікованою поверхнею, глобули, що розташовані на дискретних ділянках в процесі пружного відновлення композита, виконують функції деформуючих елементів, в результаті чого відбувається руйнування матриці композита і в зоні задньої поверхні інструмента, крім тертя, відбувається супутній процес диспергування матеріалу. Зі збільшенням відстані від центра свердла руйнування композита збільшується. Величина диспергування залежить від архітектури покриття, фізико-механічних властивостей композита, параметрів обробки та положення глобули на задній поверхні.

Перспективним напрямом подальших досліджень є визначення оптимальної архітектури дискретного покриття та умов різання ПКМ, що забезпечать продуктивність обробки зі збереженням необхідної якості.

Список використаної літератури:

1. Формування якості отворів свердлінням авіаційних конструкцій із полімерних композиційних матеріалів / Б.В. Лупкін, О.В. Андрєєв, В.С. Антонюк, С.Вислоух // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2023. – № 3/1 (123).
2. Kumar A. Surface Integrity and Kerf Characteristics in Abrasive Water Jet Machinig of Carbon Fiber Reinforced Polymers / A.Kumar, M.Shukla // *Journal of Composite Materials*. – 2023. – Vol. 57, № 12. – P. 1945–1962.
3. Саленко О.Ф. Функціональний підхід до створення гібридних процесів у машинобудуванні (практичні аспекти) / О.Ф. Саленко, С.А. Клименко, В.М. Орел // *Mechanics and Advanced Technologies*. – 2022. – № 3. – С. 317–327.
4. Крижанівський В.А. Удосконалення конструкції осьового інструмента для обробки отворів у ПКМ / В.А. Крижанівський, С.О. Ковальов // *Машинобудування та техніка*. – 2021. – Вип. 15. – С. 88–94.
5. Удосконалення характеристик процесу різання волокнистих композиційних матеріалів / Ю.І. Сичов, О.С. Бринюк, К.С. Вародов, Я.А. Гречаниук // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2025. – Т. 3, № 1. – С. 76–84.
6. Петров О.Д. Перспективи застосування свердел із дискретно модифікованими робочими поверхнями для забезпечення якості отворів у деталях із волокнистих полімерних композиційних матеріалів / О.Д. Петров, С.В. Корбут // *Технічні науки та технології*. – 2024. – № 2 (36).
7. Калініченко В.І. Напружено-деформований стан різального інструменту з дискретним покриттям / В.І. Калініченко, В.С. Марчук, С.В. Корбут // *Проблеми тертя та зношування*. – 2017. – Вип. 1 (74). – С. 104–109.
8. Franz G. A revive on drilling of multiplayer fiber-reinforced polymer composites and aluminum sacks / G.Franz, P.Vantomme, M.N. Hassan // *Fibers*. – 2022. – Vol. 10, № 9. – 78 p.
9. Davim J.P. *Machining of Composite materials* / J.P. Davim. – London : Wiley, 2010. – 262 p.
10. Wang X.M. An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforce plastics / X.M. Wang, L.C. Zhang // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2003. – Vol. 115, № 4. – P. 1015–1022.

References:

1. Lupkin, B.V., Andrieiev, O.V., Antoniuk, V.S. and Vysloukh, S. (2023), «Formuvannia yakosti otvoriv sverdlinniam aviatsiinykh konstrukttsii iz polimernykh kompozytsiinykh materialiv», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 3/1 (123).
2. Kumar, A. and Shukla, M. (2023), «Surface Integrity and Kerf Characteristics in Abrasive Water Jet Machinig of Carbon Fiber Reinforced Polymers», *Journal of Composite Materials*, Vol. 57, No. 12, pp. 1945–1962.
3. Salenko, O.F., Klymenko, S.A., Orel, V.M. et al. (2022), «Funksionalnyi pidkhid do stvorennia hibrydnykh protsesiv u mashynobuduvanni (praktychni aspekty)», *Mechanics and Advanced Technologies*, No. 3, pp. 317–327.
4. Kryzhanivskiy, V.A. and Kovalov, S.O. (2021), «Udoskonalennia konstrukttsii osovoho instrumenta dlia obrobky otvoriv u PKM», *Mashynobuduvannia ta tekhnika*, Issue 15, pp. 88–94.
5. Sychov, Yu.I., Bryniuk, O.S., Varodov, K.S. and Hrechaniuk, Ya.A. (2025), «Udoskonalennia kharakterystyk protsesu rizannia voloknystykh kompozytsiinykh materialiv», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 3, No. 1, pp. 76–84.
6. Petrov, O.D. and Korbut, Ye.V. (2024), «Perspektyvy zastosuvannia sverdel iz dyskretno modyfikovanymy robochymy poverkhniamy dlia zabezpechennia yakosti otvoriv u detaliakh iz voloknystykh polimernykh kompozytsiinykh materialiv», *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*, No. 2 (36).
7. Kalinichenko, V.I., Marchuk, V.Ie. and Korbut, Ye.V. (2017), «Napruzheno-deformovanyi stan rizalnoho instrumentu z dyskretnym pokryttiam», *Problemy tertia ta znoshuvannia*, Issue 1 (74), pp. 104–109.
8. Franz, G., Vantomme, P. and Hassan, M.N. (2022), «A revive on drilling of multiplayer fiber-reinforced polymer composites and aluminum sacks», *Fibers*, Vol. 10, No. 9, 78 p.
9. Davim, J.P. (2010), *Machining of Composite materials*, Wiley, London.
10. Wang, X.M. and Zhang, L.C. (2003), «An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforce plastics», *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 115, No. 4, pp. 1015–1022.

Корбут Євген Валентинович – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського».

<https://orcid.org/0000-0002-1221-4052>.

Наукові інтереси:

- процеси різання;
- інженерія поверхні;
- обробка композиційних матеріалів.

E-mail: Korbut113@ gmail.com.

Korbut E.V.

Investigation of the cutting process using drills with a discrete modified surface

This article examines the machining process of polymer composite materials (PCMs). The interaction between the cutting tool – which has a discrete modified coating with a globular structure applied to its rake face – and the composite material is investigated and described. To determine the effect of the tool's rear surface discretization, the magnitude of the normal forces arising on the tool's rear surface as a result of the PCM cutting process at arbitrary points on the surface was calculated, and the magnitude of the stresses on the globules located on this surface was determined. A comparative study was conducted of the stresses arising on the rake face when using a tool with continuous cutting surfaces and a tool with a discretely modified rake face. The article investigates the influence of the coating architecture applied to the tool on the magnitude of the stresses. It has been established that when machining polymer composite materials with a tool having a discretely modified surface, the globules located within the discrete surface regions, under the action of forces arising on the tool's rear surface, act as deforming elements, resulting in the destruction of the composite matrix and a concomitant process of material dispersion occurring in the region of the tool's rear surface. The obtained results can be used to optimize machining processes for polymer composite materials.

Keywords: cutting process; polymer composite materials; wear-resistant coatings; discretization of the cutting tool's working surface; globule; deforming element; cutting forces.

Стаття надійшла до редакції 22.12.2025.