

Олександр Дмитрович Петров¹, Євген Валентинович Корбут²¹аспірант кафедри конструювання машин

Національний технічний університет України «КПІ» ім. Ігоря Сікорського (Київ, Україна)

E-mail: petrovsasha69@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9995-2246>²кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин

Національний технічний університет України «КПІ» ім. Ігоря Сікорського (Київ, Україна)

E-mail: korbut1@i.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1221-4052>**ВИБІР СКЛАДУ ТА ТОПОГРАФІЇ МОДИФІКОВАНОГО ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ІНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ**

У роботі розглянуто питання підвищення працездатності різального інструмента (РІ) для обробки полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) за рахунок використання зносостійких покриттів дискретного типу, які нанесено на робочі поверхні інструмента зі швидкорізальної сталі (ШР). У результаті аналізу розрахунків напружено-деформованого стану визначено склад та топографію покриттів, які можуть бути рекомендовані для використання під час різання полімерних композиційних матеріалів. Наведено методи експериментального визначення залишкових напружень та чисельний розрахунок розмірів дискретних ділянок, які було промодельовано для оцінки механічної поведінки покриттів.

Ключові слова: композитні полімерні матеріали (ПКМ); різальний інструмент (РІ); процес різання; покриття дискретного типу; залишкові напруження; когезійна міцність.

Рис.: 3. Табл.: 4. Бібл.: 14.

Актуальність теми дослідження. Зростання частки використання полімерних композиційних матеріалів, зокрема вуглепластику, в різних сферах промисловості, а також анізотропний характер їхніх властивостей вимагають застосування різального інструменту з підвищеною зносостійкістю, теплостійкістю, теплопровідністю та низьким коефіцієнтом тертя для забезпечення належної якості механічної обробки. Проблема підвищення ефективності та якості обробки полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) різанням значною мірою пов'язана з пошуком шляхів забезпечення працездатності та надійності інструменту, що використовується для їх обробки.

Для зменшення негативних наслідків вказаних проблем розглядається зміцнення робочих поверхонь методом нанесення захисного покриття дискретного типу. Фізико-механічні властивості інструментальних матеріалів підвищують за допомогою захисних покриттів, що своєю чергою зменшує потребу в дорогих сплавах та значно покращує експлуатаційні показники деталей машин і різального інструменту [1]. Питання щодо використання зносостійких покриттів на різальному інструменті досить широко розглянуто для процесу різання традиційних матеріалів – металів, але для обробки полімерних композитів дослідження проводилися недостатньою мірою і потребують подальших досліджень.

Постановка проблеми. Одним із ключових аспектів у підвищенні ефективності та якості механічної обробки ПКМ є пошук технологічних рішень, щодо методів підвищення працездатності, високої надійності та стабільної роботи різального інструменту. У зв'язку з тим, що фізико-механічні властивості ПКМ відмінні від властивостей металів, то це накладає ряд вимог як для конструкції різального інструмента, так і для інструментального матеріалу. Підвищення вимог до експлуатаційних характеристик інструментів, призначених для обробки полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), зумовлює необхідність удосконалення інструментальних матеріалів або створення нових їх видів [1; 3]. Проте в багатьох випадках така стратегія є економічно необґрунтованою. У зв'язку з цим перспективним напрямом розвитку різального інструменту для обробки ПКМ стає впровадженням методів модифікації поверхневого шару [2; 3], що дозволяє замінити традиційне покращення об'ємних властивостей матеріалу на локальну обробку робочої поверхні.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. З метою підвищення зносостійких властивостей інструментів зі швидкорізальних та твердосплавних матеріалів активно використовуються покриття на основі карбіду та нітриду титану (TiC, TiN), а також їхніх складних сполук (TiAlN, TiCN). У сучасних умовах дедалі ширше впроваджуються покриття CrN і ZrN, які забезпечують підвищення працездатності інструменту при механічній обробці [1; 3]. Хоча покриття даного складу відповідають вимогам для інструментів для обробки ПКМ – теплопровідність, зносостійкість та інші, проте, як зазначалось в дослідженнях при використанні таких покриттів у процесі різання під дією силового та температурного навантаження можливо виникнення когезійного розтріскування [1; 4].

Топографія модифікованого шару різального інструменту являє собою складний мікрорельєф, що формується функціональними покриттями (наприклад, PVD/CVD), для зниження тертя та зносу. Топографія модифікованого шару різального інструменту визначає умови контактної взаємодії на його поверхнях і безпосередньо впливає на зносостійкість, тепловий стан та загальну працездатність інструменту. Модифікація поверхні (нанесення покриттів або структурування) спрямована на створення такої топографії, яка забезпечує високий рівень надійності за рахунок зниження тертя.

Ключові аспекти топографії:

– функціональні покриття застосовуються для підвищення стійкості інструментів, що визначають верхній шар твердими або багат шаровими матеріалами.

– характеристики поверхні включають геометричні параметри, що визначають адгезію зносостійкість та теплофізичні властивості (наприклад, глобулярна структура підвищує міцність).

– вплив на знос через оптимізацію топографії передньої та задньої поверхонь (наприклад створення наноструктур) дозволяє знизити інтенсивність зносу та тертя.

– типи рельєфу включають мікрокишені для мастильно-охолоджувальної рідини (СОЖ) та стружколамні канавки.

Модифікація шарів включаючи методи PVD і CVD дозволяє створювати покриття з високою твердістю і специфічним мікрорельєфом, що критично важливо для продуктивності інструменту. Для детального аналізу стану модифікованої поверхні використовують групу параметрів, які дають інформацію про функціональні характеристики: середня арифметична висота: загальна шорсткість модифікованого шару; висота ядра: характеризує здатність поверхні утримувати мастило; зведена висота піків: пов'язана з несучою здатністю та зносостійкістю; низькі значення сприяють скороченню фази припрацювання; зведена глибина западин: також впливає на утримання змащувальних речовин у зоні різання; асиметрія та ексцес: використовуються для аналізу розподілу нерівностей після обробки.

Топографія задньої поверхні інструменту критично впливає на розвиток зносу, який виникає через тертя та хімічну реакцію між стружкою та інструментом. Поліпшення топографії задньої поверхні (наприклад, через шліфування та полірування перед нанесенням покриття) знижує інтенсивність утворення кратерів і зменшує схильність до адгезії (переносу матеріалу заготовки на інструмент). Багат шарові покриття (TiN, TiCN, TiAlN), отримані методами PVD або CVD, змінюють мікротопографію, створюючи бар'єр для дифузії та підвищуючи твердість. Початкове перенесення та нарощування шарів матеріалу заготовки локалізується на мікроскопічних нерівностях топографії задньої поверхні інструменту. PVD та CVD: Нанесення тонких плівок (наприклад, TiN товщиною близько 3 мкм) для покращення трибологічних властивостей. Навмисне створення мікрорельєфу на задній поверхні для поліпшення трибологічних явищ на межі контакту інструменту та стружки. Магнітно-абразивна обробка використовується для формування оптимальної топографії, що забезпечує довговічність інструменту.

Підвищення когезійної та контактної міцності модифікованого шару напряму пов'язано з формуванням системи з мінімальним рівнем НДС [8]. Для практичної реалізації цього підходу сформований загальний принцип – створення модифікованого поверхневого шару з підвищеною когезійною міцністю за рахунок заміни традиційного суцільного покриття на шар з дискретною будовою, що обумовлює обмеження рівня максимальних напружень як в самому модифікованому шарі, так і у площині контакту «основа-модифікований поверхневий шар». Вид руйнування в системі „основа-покриття” залежить від величини та знаку залишкових напружень [7; 10]. В умовах дії залишкових напружень розтягу ще до початку експлуатації виробу може початися розтріскування покриття, якщо величина залишкових напружень розтягу $\sigma_n^{зал}$ більше, ніж границя міцності під час розтягування матеріалу покриття. У PVD-покриттях структурні напруження зумовлені дефектами, що виникають під час конденсації, які тісно пов'язані з мікроструктурою покриття [3; 8]. Дефекти залежать від режимів осадження та від часу нанесення, який визначає товщину покриття. Температурна компонента напружень формується внаслідок різниці теплових коефіцієнтів розширення покриття і підкладки. Значний рівень залишкових стискаючих напружень сприяє підвищенню тріщиностійкості поверхні.

Залишкові напруження в покриттях [5; 6; 8] формуються внаслідок декількох факторів, таких як різниця коефіцієнтів теплового розширення основи й покриття, присутність захоплених атомів газу, а також дефектність конденсату. Термічна складова виникає через неоднакову деформацію матеріалів при охолодженні від температури нанесення до кімнатної, що спричинює появу залишкових напружень. Структурні напруження пов'язані з дефектністю конденсату та процесом росту покриття. Дослідження [8; 9; 10] показують, що напруження зростання в покриттях, які належать до структурної компоненти, не залежать від матеріалу основи, на відміну від термічних напружень. При цьому згідно з джерелом [10] відомо, що ці напруження зменшуються зі збільшенням товщини покриття.

Для запобігання когезійного розтріскування покриття професором Б. А. Ляшенко було запропоновано замість суцільного покриття використовувати дискретне. Покриття дискретного типу [5; 6] застосовуються для підвищення зносостійкості деталей із поверхнями складної форми. Відповідно до принципу Шарпі, на поверхнях формують регулярні ділянки з компактним розміщенням більш твердого матеріалу порівняно з основою, з чітко визначеним рельєфом, геометричні параметри якого можуть варіюватися в різних діапазонах. Для деталей, що експлуатуються у складних умовах, рекомендовано використовувати захисні покриття дискретного типу та розробляти на їхній основі композиційні структури з мінімальним зносом [2; 3; 7].

Мета і задачі дослідження. Мета полягає у підвищенні працездатності інструменту для обробки ПКМ шляхом формування на його робочих поверхнях дискретного покриття [3]. Для вирішення питання підвищення працездатності інструмента для обробки ПКМ необхідно вирішити такі задачі:

- визначити оптимальне за складом захисне зносостійке покриття, яке відповідає критеріям, зазначеним вище, що дозволить забезпечити якість обробки;
- визначити напружено-деформований стан дискретного покриття після його нанесення на різальний інструмент;
- на основі визначеного НДС [8] покриття і за умов забезпечення когезійної міцності покриття розробити конструктивні схеми модифікованого поверхневого шару різального інструмента для обробки ПКМ.

Матеріали та методи дослідження. Як відомо [11; 12], тверді тонкі вакуумно-плазмові покриття характеризуються наявністю значних залишкових напружень, які формуються ще на етапі їхнього осадження. Це зумовлює те, що навіть у відсутність зовнішнього навантаження покриття разом із приповерхневими шарами основи перебувають у

напружено-деформованому стані. Такий стан спричинений невідповідністю властивостей між матеріалом покриття та основою. У літературі [11; 12] розрізняють два основних механізми формування залишкових напружень: структурний та температурний. Структурні напруження виникають унаслідок дефектів, які формуються під час конденсації матеріалу покриття, та залежать від мікроструктурних характеристик, умов осадження і товщини покриття [11; 12]. Температурний механізм, у свою чергу, пов'язаний із відмінністю коефіцієнтів теплового розширення покриття й основи, що призводить до термічних напружень після охолодження. Зазвичай для PVD-покриттів характерні залишкові напруження стискального характеру, які, залежно від товщини шару та фізико-механічних властивостей основи, можуть змінюватися до слабких розтягувальних. Наявність стискальних залишкових напружень сприяє підвищенню тріщиностійкості та зносостійкості модифікованих поверхонь, а також позитивно впливає на показники витривалості й межі плинності. Водночас надмірні напруження стиску можуть знижувати механічну надійність покриття — підвищується його крихкість, зростає ризик самовільного відшарування або порушення адгезії до основи як до початку експлуатації, так і в процесі роботи виробу. Оптимальний склад покриття для різального інструменту не визначається одним універсальним параметром. Це завжди компроміс між характеристиками матеріалу інструмента, властивостями заготовки та умовами виконання процесу різання. Головним показником правильного вибору є досягнення максимальної стійкості інструмента при збереженні необхідної якості обробки. Нижче подано основні технічні критерії, за якими формують склад покриттів:

- теплостійкість і термічна стабільність, один із визначальних чинників для обробки ПКМ.

- твердість і зносостійкість характеризує здатність покриття протидіяти абразивному зношуванню, покриття має бути суттєво твердішим за матеріал, що обробляється.

- коефіцієнт тертя (трибологічні властивості) важливий аспект для запобігання та мінімізації тертя між оброблюваним матеріалом та задньою поверхнею інструмента.

- адгезійна міцність показує здатність покриття надійно утримуватися на основі (субстраті). Оскільки навіть оптимальний за складом шар буде неефективним, якщо він відшаровується під навантаженням.

- хімічна інертність забезпечує відсутність небажаних хімічних взаємодій між інструментом і деталлю, впливає на мінімізацію дифузії та взаємного розчинення матеріалів за високих температур.

Для досліджень були вибрані такі за складом матеріали покриття TiN, TiAlN, CrN та ZrN, які рекомендовані та використовуються для суцільних покриттів, нанесених на різальний інструмент для обробки ПКМ. Товщина покриття – 3, 7, 10 мкм, що співвідноситься з товщиною армуючих волокон ПКМ. Матеріал основи – швидкорізальна сталь Р6М5.

Фізико-механічні властивості даних за складом покриттів представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Фізико-механічні характеристики матеріалів покриттів

№ з/п	Покриття	Модуль пружності E, ГПа	Твердість, ГПа	Коефіцієнт тертя	Коефіцієнт Пуасона, μ	Коефіцієнт теплового розширення λ , 10^{-6} K^{-1}
1	TiN	256	20,5	0,55	0,25	9,35
2	TiAlN	342	32,0	0,5	0,3	8,0
3	CrN	320	20,0	0,5	0,28	7,5
4	ZrN	425	22,0	0,4	0,26	7,2

Під дією нормальних напружень, що виникають у покритті через зовнішнє навантаження та нагрівання інструменту, а також залишкових напружень, зумовлених різницею коефіцієнтів лінійного теплового розширення матеріалів покриття та основи [3], а також через наявність дефектів у покритті, можливе руйнування зносостійкого шару внаслідок

когезійного розтріскування [3; 8; 11]. Дискретна будова модифікованого поверхневого шару під час розтягу визначається величиною кроку регулярних тріщин [2; 6; 8]. Визначення критичного кроку дозволяє встановити оптимальні конструктивні параметри дискретного покриття. Утворення тріщини r є наслідком «недовантаження» ділянок покриття, прилеглих до тріщини, тобто зниження σ_n до нуля на кромці покриття в зоні тріщини. Процес утворення тріщин підпорядковується нормальному закону розподілу [7]. Визначивши параметр r , можна прогнозувати відстань між дискретними ділянками залежно від складу та структури покриття.

Згідно з дослідженням напруження в покритті σ_n^{ef} по його довжині, розраховуються за залежністю [8]:

$$\sigma_n^{ef} = \sigma_n^{exc} + \sigma_n^{zal} \quad (1)$$

де $\sigma_n^{exc} = \sigma_n^M + \sigma_n^T$ – напруження, які формуються в покритті внаслідок впливу зовнішніх сил; σ_n^M – напруження, що виникають у покритті під впливом механічного навантаження; σ_n^T – напруження, зумовлені неоднорідним температурним розподілом у покритті; σ_n^{zal} – залишкові напруження у покритті.

Згідно з рівністю (1), зниження залишкових напружень у системі «основа–покриття» σ_n^{zal} дає змогу підвищити рівень напружень від механічного навантаження σ_n^M , тим самим підвищуючи ефективність роботи інструмента з модифікованим шаром. Під час експлуатації різального інструменту, окрім механічних напружень, можуть з'являтися також напруження, спричинені температурними впливами в зоні різання. Однак, оскільки однією з основних вимог при обробці полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) є підтримка температури в зоні різання нижче температури деструкції матеріалу (350 °C), теплові напруження σ_n^T у даному дослідженні не враховувалися.

Напруження від дії механічного навантаження визначаємо за формулою [4]:

$$\sigma_n^M = \frac{1}{h_n} \cdot \frac{\varepsilon_{кр}}{\left(\frac{1}{E_n h_n} + \frac{1}{E_o H_o} \right)} \cdot \left[1 - \frac{ch(ky)}{ch(kl)} \right], \quad (2)$$

де $\varepsilon_{кр}$ – критична деформація основи, за перевищенням якої починається когезійне розтріскування; H_o – товщина основи; h_n – товщина покриття; E_o , E_n – модулі пружності основи і покриття; y – проміжна координата, $2l$ – базовий розмір; k – коефіцієнт, який залежить від модулів пружності основи і покриття:

$$k^2 = 2 \frac{G_o G_n}{G_o h_n + G_n H_o} \left(\frac{1}{E_n h_n} + \frac{1}{E_o H_o} \right), \quad (3)$$

де G_n , G_o – Параметри модулів зсуву основи і покриття.

Для визначення залишкових напружень, що виникають у процесі формування покриття і впливають на напружений стан системи «покриття-основа», було застосовано метод, описаний у роботі [10] – метод гнучкого зразка, заснований на тому, що під впливом залишкових напружень у покритті довга, вузька і тонка пластинка, покрита суцільним шаром, деформується у вигляді дуги кола. Для такої деформованої пластинки вимірюють прогин або визначають радіус кривизни, а потім за відповідними формулами розраховують залишкові напруження [4, 5]. Для визначення залишкових напружень у покриттях на пластинки розміром 200×15×0,5 мм зі швидкорізальної сталі Р6М5 ($E_n = 2,3 \times 10^5$ МПа) наносили покриття TiN [8; 10]. Після чого визначали радіус прогину зразка, який виникав внаслідок наявності залишкових напружень розтягу (рис. 1).

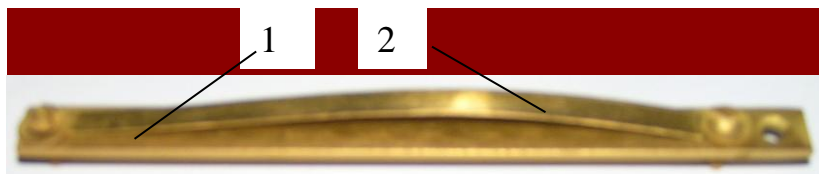


Рис. 1 Кондуктор (1) зі зразком (2) після нанесення покриття [10]

Відбулося деформування у вигляді дуги, внаслідок дії залишкових напружень. Для визначення залишкових напружень виміряли величину прогину f дуги зразка (рис. 2).

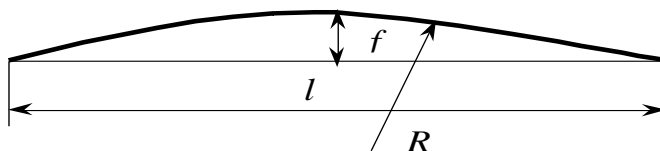


Рис. 2. Схема вимірювання кривизни R зразка [4]:
 l хорда сегмента; f – стріла сегмента

Радіус кривизни R розраховували через прогин f і хорду l за залежністю

$$R = \frac{l^2 + 4f^2}{8f}. \quad (4)$$

Проведено аналіз робіт [4; 8; 10; 12] та визначено формули для розрахунку залишкових напружень для системи “покриття-основа”.

$$\sigma_n^{зал} = \frac{32E_o H_o^3 f}{3a^2 h_n (1-\nu_o)(2H_o + h_n)}, \quad (5)$$

де $2H_o, h_n$ – товщини основи і покриття, відповідно;

E_o, ν_o – модуль пружності основи першого роду і коефіцієнт Пуасона матеріалу основи, відповідно; f – прогин зразка; a – довжина зразка.

З використанням методу розрахунку тонких пластин на вигин можна визначити $\sigma_n^{зал}$ наступним чином:

$$\sigma_n^{зал} = \frac{4E_o H_o^3}{3R h_n (1-\nu_o^2)(2H_o + h_n)}, \quad (6)$$

де R – радіус кривизни, що спричиняється залишковими напруженнями.

Для покриття малої товщини $h \ll H$, формулу (6) можна записати у вигляді [10]:

$$\sigma_n^{зал} = \frac{16E_o H_o^2 f}{3a^2 h_n (1-\nu_o)}, \quad (7)$$

а для лінійного напруженого стану:

$$\sigma_n^{зал} = \frac{16E_o H_o^2 f}{3a^2 h_n}. \quad (8)$$

Оскільки ми маємо лінійно напружений стан при $h \ll H$, залежність (6) перетворюється на відому формулу Стоней:

$$\sigma_n^{зал} = \frac{2E_o H_o^2}{3R h_n}. \quad (9)$$

Результати розрахунку залишкових напружень для покриття нанесеного на швидко-різальну сталь Р6М5 оформлені у вигляді таблиці 2 та графіку (рис. 3).

Таблиця 2 – Залишкові напруження в системі «основа-покриття» залежно від складу товщини покриття

№ з/п	Покриття	Товщина покриття, мкм	Напруження $\sigma_{п\text{зал}}$, МПа
1.	TiN	3	-683,3
		7	-545,3
		10	-320,2
2.	TiAlN	3	-720,4
		7	-580,6
		10	-353,8
3.	CrN	3	-735,2
		7	-599,9
		10	-432,8
4.	ZrN	3	-760,0
		7	-631,2
		10	-476,1

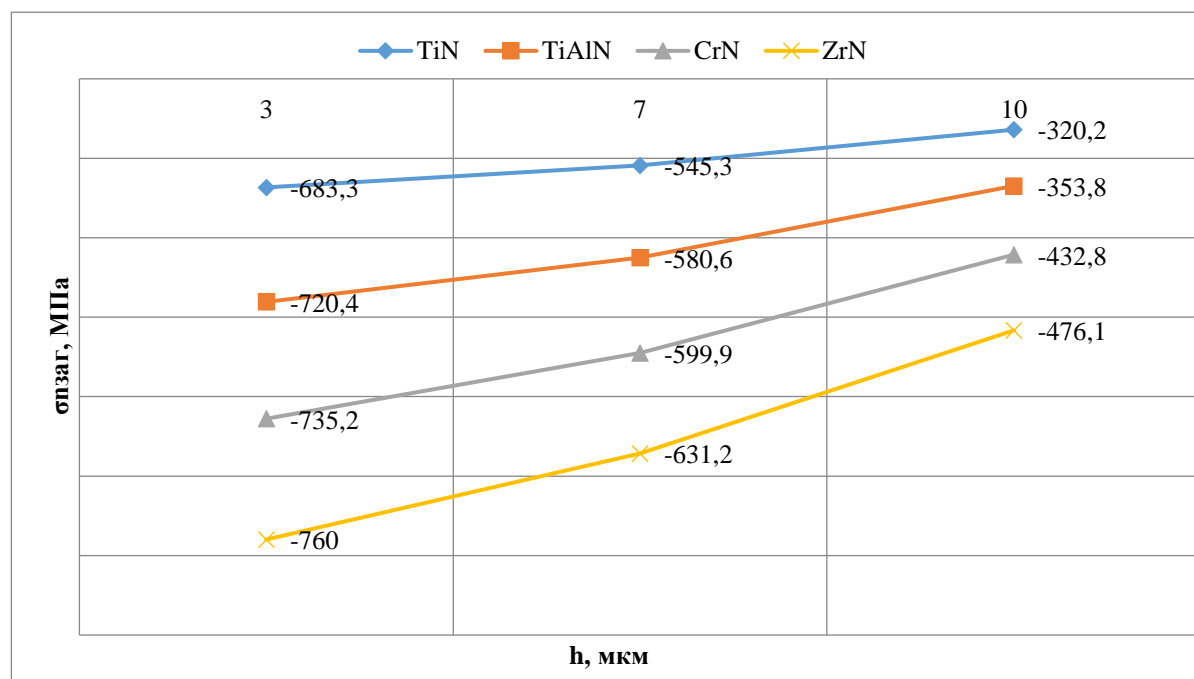


Рис. 3. Графік залежності залишкових напружень від складу та товщини покриття

Вирішальним знаком напружень для вибору матеріалу покриття ріжучого інструменту є стискаючі напруження. Стискаючі напруження є вирішальними, оскільки покриття з їх високим рівнем (особливо сформовані методом PVD) перешкоджають утворенню та розвитку тріщин, що підвищує довговічність інструмента і зміцнює різальну кромку.

Стискаючі напруження запобігають руйнуванню, оскільки вони виконують роль своєрідного «буфера» проти розтягувальних навантажень, що виникають у процесі різання, тим самим знижуючи ймовірність крихкого руйнування матеріалу. Завдяки наявності стискаючих напружень покриття ефективніше протистоїть відшаруванню і зменшує схильність до сколів та зношування. На відміну від цього, розтягувальні напруження є небажаними, оскільки вони сприяють виникненню тріщин у покритті, які згодом можуть поширюватися на основу інструмента. Попри те, що для покриттів визначальною є висока

твердість, саме внутрішні стискаючі напруження гарантують стабільну й надійну роботу інструмента в умовах значних механічних і термічних навантажень.

Більшість сучасних інструментальних покриттів, зокрема TiN, TiAlN і Al₂O₃, нанесених методами PVD (фізичне осадження з парової фази) або модифікованими технологіями CVD (хімічне осадження з парової фази), характеризуються значними внутрішніми залишковими стискаючими напруженнями. Це розглядається як позитивна характеристика, оскільки:

– Гальмування розвитку тріщин: стискаючі напруження ущільнюють поверхневий шар, ускладнюючи зародження та поширення мікротріщин.

– Зростання міцності: вони частково нейтралізують розтягувальні напруження, що виникають під час різання, тим самим зменшуючи ризик крихкого руйнування керамічного шару.

Розтягувальні напруження здебільшого небажані для покриттів, оскільки: вони прискорюють розкриття та ріст тріщин; спричиняють адгезійне руйнування і відшарування покриття від основи; часто виникають під час традиційного CVD-процесу через різницю коефіцієнтів термічного розширення матеріалу інструмента і покриття, що потребує додаткової обробки (наприклад, дробострумінного зміцнення) для формування стискаючого стану.

Таблиця 3 – Порівняння впливу напружень

Тип напруження	Вплив на інструмент	Результат
Стискаючі	Закривають мікротріщини, зміцнюють поверхневий шар	Підвищення стійкості та втомної міцності
Розтягуючі	Сприяють росту тріщин і відшаруванню	Прискорене руйнування, поява сколів

З розрахунків можна зробити висновки, що найменше значення залишкових напружень покриття нанесеного на швидкорізальну сталь Р6М5 має покриття зі складом TiN та збільшення товщини покриття призводить до зменшення залишкових напружень. Тому подальші дослідження з формування архітектури покриття проводимо з покриття складом TiN. Для встановлення розмірів дискретних ділянок D, стійких до когезійного розтріскування, з урахуванням критичної деформації підкладки та залишкових напружень у покритті, але без врахування експлуатаційних термонапружень, був проведений розрахунок максимально допустимого кроку тріщин – C_n. Приймаємо, що когезійна міцність покриття $\sigma^{коз} = \varepsilon_{kp} E_n$ в ньому розподілена за нормальним законом з стандартним відхиленням $0,1\sigma^{коз}$, то найбільш ймовірно тріщина може виникнути в перетині (l-y) при $\sigma_n^{e\phi} = 0,9\sigma^{коз}$ [3; 4; 8; 10; 14].

Максимально допустимий інтервал між тріщинами в суцільному покритті:

$$C_n = -\frac{1}{k} \ln \left(0,1 + \frac{\sigma_n^T + \sigma_n^{зал}}{\varepsilon_{kp} E_n} \cdot \left(1 + \frac{E_n h_n}{E_o H_o} \right) \right). \quad (10)$$

Максимальний приведений розмір ділянки дискретного покриття:

$$D_{max} \leq C_n \quad (11)$$

Оскільки в зоні різання ПКМ температура не повинна перевищувати 350 °С, залежність (10) можна записати у вигляді (12):

$$C_n = -\frac{1}{k} \ln \left(0,1 + \frac{\sigma_n^{зал}}{\varepsilon_{kp} E_n} \cdot \left(1 + \frac{E_n h_n}{E_o H_o} \right) \right). \quad (12)$$

Розрахункові значення кроку тріщин «C_n» залежно від товщини покриття наведені в табл. 4 та представлені на рис. 4.

Таблиця 4 – Залежність максимального кроку тріщин від товщини покриття.

Товщина покриття, мкм	C_n , мм
3	0,65
7	0,55
10	0,41

Таким чином, визначивши максимально допустимий крок тріщин у суцільному покритті, можна задати розміри дискретних ділянок покриття та відстань між ними з урахуванням експлуатаційних, залишкових та температурних напружень на етапі проектування різального інструменту з покриттям. Це дозволить запобігти когезійному розтріскуванню покриття. При формуванні поверхневих структур підвищеної стійкості використовували правило Г. Шарпі, згідно з яким для забезпечення високої несучої здатності шар робочої поверхні повинен мати пластичну основу з твердими включеннями [9;10; 11;12]. Оцінювання напруженого стану зносостійких покриттів різального інструменту базується на аналізі величини та розподілу залишкових напружень по глибині шару. У PVD-покриттях стискаючі напруження вважаються сприятливими, оскільки стримують розвиток тріщин і підвищують довговічність інструменту, тоді як розтягуючі можуть спричинити руйнування. Для визначення запасу міцності розраховують еквівалентну напругу за відповідними теоріями міцності. Важливим є також урахування градієнта напруги по товщині покриття та стану на межі розділу з основою, оскільки значний перепад напружень знижує адгезію і може вимагати застосування перехідних шарів. У багатшарових покриттях необхідно враховувати термічні залишкові напруження, які здатні викликати відшаровування. Порушення критеріїв міцності призводить до когезійного руйнування, делямінації та утворення тріщин.

Висновки. При виборі або розробці покриття прагнуть досягти саме залишкових стискаючих напружень, оскільки вони значно підвищують експлуатаційний ресурс інструмента, особливо в умовах переривчастого різання та ударних навантажень. Застосування запропонованого підходу забезпечує підвищення зносостійкості ріжучого інструменту, за рахунок формування на робочій поверхні інструменту зон з підвищеною міцністю, що дозволяє збільшити їхню працездатність у середньому на 30–50 %. Конструкція покриття була визначена розрахунковим методом на основі моделі напружено-деформованого стану. Цей підхід слугував базою для моделювання технології формування дискретного покриття з заданими параметрами щільності, розміру та просторового розподілу. Розмір дискретної ділянки обирали з умови виключення когезійного розтріскування покриття.

Список літератури

1. Ляшенко, Б., Антонюк, В., Сорока, О., Рутковский, А. (2005). Розробка нових зносостійких покриттів для підвищення експлуатаційних характеристик деталей механізмів. *Вісник Тернопільського державного технічного університету*, 10(1).
2. Криворучко, Д. В., Залого, В. А., Пасечник, В. А., Колесник, В. А., & Емельяненко, С. С. (2013). *Механическая обработка композиционных материалов при сборке летательных аппаратов: аналитический обзор*. Сумы.
3. Корбут, С. В., Парненко, В. С., Ніколаєнко, Т. П., Даниленко, О. В. (2024). Архітектура дискретного покриття робочих поверхонь інструменту для різних схем різання. *Технічні науки та технології*, 4(38), 44–56.
4. Ляшенко, Б. А., Новиков, Н. В., & Клименко, С. А. (2017). *Дискретное модифицирование поверхностного слоя деталей машин и инструментов*. ІСМ ім. В. Н. Бакуля.
5. Антонюк, В. С., Сорока, О. Б., Ляшенко, Б. А. (2007). Дискретні покриття на різальному інструменті. *Проблеми міцності*, (1), 138–143.
6. Антонюк, В. С. (2006). *Основи підвищення працездатності різального інструменту шляхом формування зносостійких покриттів дискретного типу* (Докторська дисертація, НТУУ «КПІ»).
7. Ляшенко, Б. А., Сорока, Е. Б., Рутковский, А. В. (2002). Определение параметров дискретной структуры покрытий с учетом остаточных напряжений. *Проблеми прочності*, (4), 119–125.

8. Корбут, Є. В., Парненко, В. С., Плівак, О. А., & Ніколаєнко, Т. П. (2025). Визначення розмірів дискретних ділянок покриття інструменту для обробки полімерних композитів. *Вісник ХНТУ*, 2(93), 102–110.

9. Кіндрачук, М. В., Яхья, М. С., Корнієнко, А. О., et al. (2008). Визначення параметрів дискретної структури покриттів. *Проблеми тертя та зношування*, 50, 5–15.

10. Сорока, О. Б., Клименко, С. А., Копейкіна, М. Ю. (2011). Перспективні конструктивні схеми зносостійких покриттів для інструментів та деталей машин. *Процеси механічної обробки в машинобудуванні*, 11, 259–271.

11. Сорока, О. Б. (2007). Вибір параметрів дискретно-модифікованих зносостійких поверхонь. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»: Приладобудування*, (33), 119–126.

12. Soroka, E. B. (2009). Ensuring stability of PVD coatings by producing a discrete topography with preset parameters. *Journal of Superhard Materials*, 31(5), 347–353.

13. Hanson, M., Stavlid, N., Coronel, E., et al. (2008). On adhesion and metal transfer in sliding contact between TiN and austenitic stainless steel. *Wear*, 264(9-10), 781–787.

14. Avila, R. F., Godoy, G., Abrao, A. M., et al. (2008). Topographic analysis of the crater wear on TiN, Ti(C,N) and (Ti,Al)N coated carbide tools. *Wear*, 265(1-2), 49–56.

References

1. Liashenko, B., Antonyuk, V., Soroka, O., Rutkovskiy, A. (2005). Rozrobka novykh znosostiikh pokryttiv dlia pidvyshchennia ekspluatatsiinykh kharakterystyk detalei mekhanizmiv. [Development of new wear-resistant coatings to improve the operational characteristics of mechanism parts.] *Visnyk Ternopil'skoho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu – Journal of Ternopil State Technical University*, 10(1)

2. Kryvoruchko, D. V., Zaloga, V. A., Pasechnik, V. A., Kolesnik, V. A., & Emelianenko, S. S. (2013). *Mekhanicheskaiia obrabotka kompozitsionnykh materialov pri sborke letatelnykh apparatov: analiticheskii obzor [Mechanical processing of composite materials during the assembly of aircraft: an analytical review]*. Sumy.

3. Korbut, Y. V., Parnenko, V. S., Nikolaienko, T. P., Danylenko, O. V. (2024). Arkhitektura dyskretnoho pokryttia robochykh poverkhon' instrumentu dlia ryznykh skhem rizannia [Architecture of discrete coating of tool working surfaces for various cutting schemes]. *Tekhnichni Nauky ta Tekhnologii – Technical Sciences and Technologies*, 4(38), 44–56.

4. Liashenko, B. A., Novikov, N. V., Klimenko, S. A. (2017). *Diskretnoe modifitsirovanie poverkhnostnogo sloia detalei mashin i instrumentov [Discrete modification of the surface layer of parts of machines and tools]*. ISM im. V. N. Bakulia.

5. Antonyuk, V. S., Soroka, O. B., Liashenko, B. A. (2007). Dyskretni pokryttia na rizalnomu instrumenti [Discrete coatings on the cutting tool.enri]. *Problemy Mitsnosti – Durability issues*, (1), 138–143.

6. Antonyuk, V. S. (2006). *Osnovy pidvyshchennia pratsiezdatsnosti rizalnoho instrumentu shliakhom formuvannia znosostiikh pokryttiv dyskretnoho typu [Basics of increasing the performance of cutting tools by forming wear-resistant coatings of a discrete type]* (Doctoral dissertation, NTUU “KPI”).

7. Liashenko, B. A., Soroka, E. B., Rutkovskii, A. V. (2002). Opredelenie parametrov diskretnoi struktury pokrytii s uchetom ostatochnykh napriazhenii [Determination of the parameters of the discrete structure covered with consideration of the final stresses]. *Problemy Prochnosti – Durability issues*, (4), 119–125.

8. Korbut, Y. V., Parnenko, V. S., Plivak, O. A., Nikolaienko, T. P. (2025). Vyznachennia rozmiriv dyskretnykh dilianok pokryttia instrumentu dlia obrobky polimernykh kompozytiv. *Visnyk KhNTU*, 2(93), Pt. 1, 102–110.

9. Kindrachuk, M. V., Yakhia, M. S., Korniienko, A. O., et al. (2008). Vyznachennia parametriv dyskretnoi struktury pokryttiv [Determination of parameters of the discrete structure of coatings]. *Problemy Tertia ta Znoshuvannia, Friction and wear problems*, 50, 5–15. Kyiv: NAU-druk.

10. Soroka, O. B., Klymenko, S. A., Kopeikina, M. Yu. (2011). Perspektivni konstruktyvni skhemy znosostiikh pokryttiv dlia instrumentiv ta detalei mashyn [Prospective design schemes of wear-resistant coatings for tools and machine parts]. *Protsesi mekhanichnoi obrobky v mashynobuduvanni – Processes of mechanical processing in mechanical engineering*, 11, 259–271.

11. Soroka, O. B. (2007). Vybir parametriv dyskretno-modyfikovanykh znosostiikykh poverkhon [Selection of parameters of discretely modified wear-resistant surfaces]. *Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu Ukrainy "Kyivskiy Politekhnichnyi Instytut": Pryladobuduvannia – Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute": Instrumentation*, (33), 119–126.
12. Soroka, O. B. (2009). Ensuring stability of PVD coatings by producing a discrete topography with preset parameters. *Journal of Superhard Materials*, 31(5), 347–353.
13. Hanson, M., Stavlid, N., Coronel, E., et al. (2008). On adhesion and metal transfer in sliding contact between TiN and austenitic stainless steel. *Wear*, 264(9-10), 781–787.
14. Avila, R. F., Godoy, G., Abrao, A. M., et al. (2008). Topographic analysis of the crater wear on TiN, Ti(C,N) and (Ti,Al)N coated carbide tools. *Wear*, 265(1-2), 49–56.

Дата першого надходження статті до видання: 02.01.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.01.2026

UDC 621.891

Oleksandr Petrov¹, Ievgen Korbut²

¹PhD student at the Department at the Machine Design
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: petrovsasha69@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-9995-2246>

²PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department at the Machine Design
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" (Kyiv, Ukraine)
E-mail: korbut1@i.ua. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1221-4052>

SELECTION OF THE COMPOSITION AND TOPOGRAPHY OF THE MODIFIED SURFACE LAYER OF THE TOOL FOR PROCESSING POLYMER COMPOSITES

The increasing share of the use of polymer composite materials, in particular carbon fiber, in various industries, as well as the anisotropic nature of their properties, require the use of cutting tools with increased wear resistance, heat resistance, thermal conductivity and low friction coefficient to ensure proper quality of mechanical processing. PCM have a set of properties and features that positively distinguish them from metals and their alloys, which opens up wide opportunities for the development of new designs and technologies of products for various purposes and the improvement of existing ones. However, along with this, their physical and mechanical properties cause a difficulty in cutting processing, which imposes certain requirements on the use of a cutting tool (CT). One of the key aspects in increasing the efficiency and quality of mechanical processing of PCM is the search for technological solutions regarding methods for increasing the efficiency, high reliability and stable operation of the cutting tool. Because the physical and mechanical properties of PCM are different from the properties of metals, this imposes a number of requirements for both the design of the cutting tool and the tool material. In order to increase the wear-resistant properties of tools made of high-speed cutting and hard alloy materials, coatings based on titanium carbide and nitride (TiC, TiN), as well as their complex compounds (TiAlN, TiCN), are actively used. Increasing the cohesive and contact strength of the modified layer is directly related to the formation of a system with a minimum level of stress-strain state.

For the practical implementation of this approach, a general principle has been developed, namely: - the creation of a modified surface layer with increased cohesive strength by replacing the traditional continuous coating with a layer with a discrete structure, which limits the level of maximum stresses both in the modified layer itself and in the contact plane "base-modified surface layer". The paper considers the issue of increasing the performance of a cutting tool (CT) for processing polymer composite materials (PCM) by using wear-resistant coatings of a discrete type, which are applied to the working surfaces of a tool made of high-speed steel (HSS). Due to the result of the analysis of the results of stress-strain calculations, the composition and topography of coatings were determined, which can be recommended for use in cutting polymer composite materials. Methods for experimental determination of residual stresses and numerical calculation of the sizes of discrete sections, which were modelled to assess the mechanical behavior of coatings, are presented.

Keywords: composite polymer materials (CPM); cutting tool (CT); cutting process; discrete type coating; residual stresses; cohesive strength.

Fig.: 3. Table: 4. References: 14.