УДК 621.9.02.004.6 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.13

Є. В. КОРБУТ
кандидат технічних наук,
доцент кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-1221-4052

В. С. ПАРНЕНКО
кандидат технічних наук,
доцент кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-1450-2744

О. А. ПЛІВАК
завідувач науково-дослідної (експериментальної) лабораторії НН ММІ
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0003-3680-8485

Т. П. НІКОЛАЄНКО
кандидат технічних наук,
доцент кафедри нарисної геометрії та інженерної графіки
Київський національний університет будівництва і архітектури
ORCID: 0000-0003-0960-1251

ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРІВ ДИСКРЕТНИХ ДІЛЯНОК ПОКРИТТЯ ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ОБРОБКИ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ

Підвищення зносостійкості робочих поверхонь різального інструменту є ключовим фактором забезпечення його тривалої експлуатації під час обробки складних матеріалів, зокрема полімерних композиційних матеріалів (ПКМ). Одним із перспективних напрямів є створення дискретних покриттів з особливою мікроструктурою, які можуть забезпечити не лише високу твердість і зносостійкість, а й оптимальний розподіл напружено-деформованого стану (НДС) у приповерхневих шарах інструменту. Дослідження по використанню дискретного покриття глобулярної структури, нанесеного методом електро іскрового легування на різальний інструмент зі швидкорізальної сталі для обробки полімерних композитів в теперішній час не проводились. Саме така поверхнева архітектура має потенціал для зменшення рівня залишкових напружень, попередження когезійного розтріскування покриття та утворення тріщин, що знижують ресурс інструменту.

В умовах високих динамічних навантажень під час різання полімерних композитів, доцільність застосування неперервного захисного шару викликає сумніви через схильність до виникнення тріщин при температурних коливаннях і локалізованих деформаціях. Натомість, дискретне покриття дозволяє розподілити напруження більш рівномірно, локалізувати пошкодження в окремих ділянках та уникати їхнього поширення по всій поверхні. Важливо зазначити, що геометрія та розміри окремих дискретних елементів покриття мають вирішальний вплив на формування залишкових напружень, характер контакту з оброблюваним матеріалом та загальну ефективність процесу різання.

У статті акцентується увага на необхідності розробки науково обґрунтованого підходу до визначення оптимальних розмірів та форми дискретних ділянок захисного покриття з урахуванням вимог до міцності, довговічності та технологічності нанесення. Такий підхід має враховувати вплив параметрів покриття на НДС, з урахуванням особливостей роботи інструменту з ПКМ, які відзначаються високою абразивністю, низькою теплопровідністю та схильністю до нашарування матеріалу на ріжучу кромку.

Проведення відповідних досліджень дозволить сформувати рекомендації щодо раціональної архітектури покриттів, які забезпечуватимуть підвищену стійкість інструменту та стабільність параметрів обробки. У підсумку, впровадження дискретних покриттів з контрольованими геометричними характеристиками відкриває нові можливості для створення ефективного інструменту, призначеного для високопродуктивної обробки полімерних композитів з мінімальними втратами на знос і ремонт.

Для вирішення питання розробки архітектури модифікованого поверхневого шару різального інструменту необхідно розробити підхід, щодо визначення залежності НДС покриття від розмірів та форми дискретних ділянок покриття.

Ключові слова: *захисні покриття, міцність покриттів, різальний інструмент, полімерні композити, залишкові напруження, когезійне розтріскування, тріщина.*

YE. V. KORBUT
PhD in Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Machine Design
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0002-1221-4052

V. S. PARNENKO
PhD in Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Machine Design
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0002-1450-2744

O. A. PLIVAK
Head of the Research (Experimental) Laboratory of the Educational
and Scientific Mechanical Engineering Institute
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0003-3680-8485

T. P. NIKOLAIENKO
PhD in Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Descriptive Geometry
and Engineering Graphics
Kyiv National University of Construction and Architecture
ORCID: 0000-0003-0960-1251

DETERMINING THE DIMENSIONS OF DISCRETE COATING SECTIONS FOR TOOLS USED IN POLYMER COMPOSITE MACHINING

Improving the wear resistance of cutting tool working surfaces is a key factor in ensuring their long service life during the machining of complex materials, particularly polymer composite materials (PCMs). One promising direction is the development of discrete coatings with a special microstructure, which not only provide high hardness and wear resistance but also ensure optimal distribution of the stress–strain state (SSS) in the subsurface layers of the tool. To date, no studies have been conducted on the use of discrete globular-structure coatings applied by electro-spark alloying to high-speed steel cutting tools for machining polymer composites. This type of surface architecture has the potential to reduce residual stresses, prevent cohesive cracking of the coating, and mitigate the formation of cracks that shorten tool life.

Under high dynamic loads during polymer composite machining, the use of continuous protective coatings is questionable due to their susceptibility to cracking caused by thermal fluctuations and localized deformations. In contrast, discrete coatings allow for more uniform stress distribution, localization of damage in specific areas, and prevention of its propagation across the entire surface. It is important to note that the geometry and dimensions of individual discrete coating elements have a decisive influence on the formation of residual stresses, the nature of contact with the workpiece material, and the overall cutting efficiency.

This article emphasizes the need to develop a scientifically based approach to determine the optimal sizes and shapes of discrete protective coating elements, taking into account strength requirements, durability, and the feasibility of the coating process. Such an approach should consider the influence of coating parameters on the SSS, considering the specific working conditions of tools used for PCMs, which are characterized by high abrasiveness, low thermal conductivity, and a tendency to adhere to the cutting edge.

Conducting the appropriate research will help formulate recommendations on the rational architecture of coatings that ensure improved tool durability and stability of machining parameters. Ultimately, the implementation of discrete coatings with controlled geometric characteristics opens up new opportunities for creating efficient tools designed for high-performance machining of polymer composites with minimal wear and repair losses.

To address the issue of developing a modified surface layer architecture for cutting tools, an approach must be developed to determine the dependence of the coating's SSS on the size and shape of the discrete coating elements.

Key words: *protective coatings, coating strength, cutting tools, polymer composites, residual stresses, cohesive cracking, crack.*

Постановка проблеми

Збільшення частки використання композиційних матеріалів в різних галузях промисловості, а саме волокнистих полімерних композитних матеріалів (ВПКМ), та зважаючи на їх фізико – механічні властивості, а саме анізотропію їх властивостей обумовлює використання різального інструменту (РІ) підвищеної працездатності, що забезпечує продуктивність обробки без втрати якості отриманого виробу. Одним із шляхів рішення зазначених проблем є формування на робочих поверхнях інструмента захисного зносостійкого покриття. Використання покриттів дає можливість найбільш раціонально і економічно використовувати фізико-механічні властивості інструментальних матеріалів, замінити дорогі сталі та сплави і, в більшості випадків, підвищити працездатність та надійність деталей машин і РІ.

Вирішення поставленої задачі дозволить підвищити ресурс РІ та забезпечити якість отриманих виробів деталей з ПКМ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Одним із ключових напрямів підвищення працездатності різального інструменту (РІ) є зменшення тертя та покращення зносостійкості його робочих поверхонь. Застосування зносостійких покриттів дозволяє значно – у декілька разів – збільшити довговічність інструменту [1, 2].

Відомо, що властивості покриттів суттєво залежать від вибору методу та режимів їх нанесення, складу покриття і матеріалу основи. Зокрема, температура формування покриття впливає на його мікроструктуру та когезійно – адгезійну міцність системи «основа – покриття». Висока адгезія забезпечується як молекулярними взаємодіями, так і розвитком дифузійних процесів із формуванням зон взаємної дифузії, навіть за наявності чіткої межі між покриттям і основою [3, 4].

Однак тонкі покриття в умовах абразивного зношування демонструють обмежену довговічність, що зумовлює широке впровадження багатофункціональних багатошарових систем. Такі покриття поєднують високу твердість, низьку адгезію до оброблюваного матеріалу, знижений коефіцієнт тертя та підвищену стійкість до абразивного зношування й окислення при підвищених температурах.

Особливу увагу дослідники приділяють формуванню модифікованих поверхневих шарів із підвищеною когезійною, адгезійною та контактною міцністю. Встановлено, що важливим чинником забезпечення міцності є мінімізація напружено-деформованого стану (НДС) у системі «основа – покриття». З цією метою запропоновано концепцію заміни традиційного суцільного покриття на дискретну структуру, що дає змогу обмежити максимальні напруження як у модифікованому шарі, так і в зоні його адгезійного контакту з основою. Параметри дискретних елементів – їх розмір і просторову архітектуру – визначають виходячи з умов оптимізації НДС за силових і температурних навантажень.

У роботах [5, 6, 7] показано, що застосування дискретного, сформованого методом електроіскрового легування (ЕІЛ), дозволяє замість одного потужного концентратора напружень, характерного для суцільного покриття, створити множину локалізованих дискретних ділянок. Кожна з них виступає як незалежний концентратор напружень меншої інтенсивності, що не перевищує рівень адгезійної та когезійної міцності модифікованого шару. Такий підхід сприяє формуванню однорідного НДС як у товщі глобул, так і в зоні адгезійного контакту, що відповідає принципу Шарпі [8, 9].

Проте зазначені дослідження стосуються переважно різання традиційних конструкційних сталей. Наразі відсутні відомості щодо застосування дискретних глобулярних покриттів, сформованих методом ЕІЛ, для обробки волокнистих полімерних композитних матеріалів (ВПКМ). Таким чином, актуальним є дослідження не лише стійкісних характеристик таких покриттів під час обробки ВПКМ, а й впливу розміру дискретних елементів та їх просторової архітектури на якість обробленої поверхні.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є розробка науково обґрунтованого підходу до визначення оптимальних розмірів дискретних ділянок покриття різального інструменту, призначеного для обробки полімерних композиційних матеріалів, на поверхнях які піддаються когезійному розтріскуванню. Основна увага зосереджена на формуванні дискретної архітектури поверхневого шару, яка забезпечує рівномірний розподіл напружено-деформованого стану (НДС), зменшення рівня залишкових напружень, а також запобігання когезійному руйнуванню покриття та розвитку тріщин. Обґрунтовано вибір конструктивних параметрів дискретного шару – таких як геометрія, розміри, щільність та товщина дискретних елементів – з метою забезпечення мінімізації концентрації напружень і підвищення міцності та довговічності інструменту в умовах обробки високоабразивних полімерних композитів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для проектування покриттів дискретного типу глобулярної структури на робочих поверхнях різального інструменту необхідно визначити наступні геометричні параметри: відстань між дискретними ділянками, розміри ділянок в плані, товщина поверхневого шару за умовою досягнення мінімального рівня залишкових і експлуатаційних напружень, що було запропоновано в джерелах [10, 11, 12, 13]. Для цього необхідно визначити НДС при різних видах навантажень – розтязі, повздовжньому стиску, контактному навантаженню.

Під впливом нормальних напружень, що виникають в покритті внаслідок дії зовнішнього навантаження та нагрівання інструменту, а також залишкових напружень, які виникають в процесі формування покриття і обумовлені різницею коефіцієнтів лінійного розширення матеріалів покриття та основи [14], а також наявністю дефектів в покритті може відбутися руйнування зносостійкого покриття шляхом когезійного розтріскування [15].

При розтязі дискретна будова модифікованого поверхневого шару визначається по кроку регулярних тріщин [16]. Визначивши критичний крок можливо визначити конструктивні параметри дискретного покриття. На рис. 1 представлена схема визначення роствору тріщини. Роствір тріщини є наслідком «недовантаження» ділянок покриття, прилеглих до тріщини, тобто зниження σ_n до нуля на кромці покриття в зоні тріщини [16]. Роствір тріщини також підлягає нормальному закону розподілу [17].

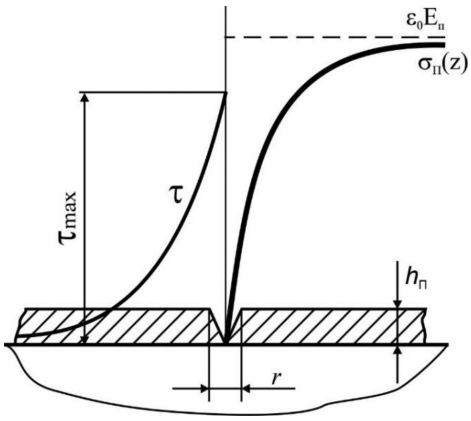

Рис. 1. Схема визначення роствору тріщини

Визначивши можно прогнозувати відстань між дискретними ділянками в залежності від складу та архітектури покриття.

Напруження в покритті $\sigma_n^{еф}$ по його довжині, розраховуються по залежності:

$$\sigma_n^{еф} = \sigma_n^{екс} + \sigma_n^{зал}, \tag{1}$$

де $\sigma_n^{екс} = \sigma_n^M + \sigma_n^T$ – напруження в покритті, що виникають під дією зовнішнього навантаження; σ_n^M – напруження в покритті, від дії механічного навантаження; σ_n^T – напруження в покритті, що виникають під дією температурного градієнта; $\sigma_n^{зал}$ – залишкові напруження у покритті.

Аналіз рівняння (1) показує, що зменшення залишкових напружень в системі «основа-покриття» $\sigma_n^{зал}$ дозволить підвищити напруження від механічного навантаження σ_n^M, що дозволить підвищити працездатність інструменту з модифікованим поверхневим шаром.

На рис. 2 наведено характер розподілу напружень від механічного навантаження. При експлуатації різального інструменту окрім напружень від механічного навантаження виникають напруження від впливу температури різання. У зв′язку з тим, що однією з основних умов обробки ВПКМ є те що температура в зоні різання не повинна перевищувати температуру деструкції матеріалу ВПКМ-350°, то σ_n^T не враховуємо.

Напруження від дії механічного навантаження визначаємо за формулою [17]:

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

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:

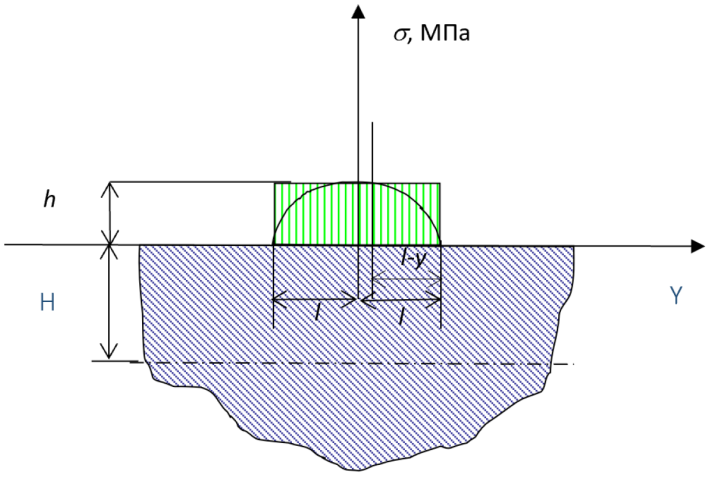

Рис. 2. Епюра напружень σ_n^M по довжині покриття

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

де G_n, G_o – модулі зсуву основи і покриття відповідно.

Фізико-механічні характеристики основи і покриття, необхідні для розрахунку параметрів конструкції покриття приведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Фізико-механічні параметри основи і покриття

Основа Р6М5			Покриття $TiCrB_2$ + 25 %AlN		
E_o, МПа	G_o, МПа	H, мм	Еп, МПа	G_n, МПа	h, мкм
$2{,}3 \cdot 10^5$	$9{,}5 \cdot 10^4$	0,5	$2{,}93 \cdot 10^5$	$2{,}5 \cdot 10^5$	3–7

Для визначення залишкових напружень, що виникають при формуванні покриття та впливають на напружений стан системи «покриття-основа» визначені методом, описаним в роботі [11, 18] – метод гнучкого зразка, заснований на тому, що під дією залишкових напружень в покритті, довга, вузька і тонка пластинка, на яку нанесено суцільне покриття, деформується у вигляді дуги кола.

У деформованої таким чином пластинки вимірюють прогин або визначають радіус кривизни зразка і по формулах розраховують залишкові напруження [13].

Для визначення залишкових напружень у покриттях на пластинки розміром 200 мм × 15 мм × 0,5 мм із швидкорізальної сталі Р6М5 ($E_n = 2{,}3 \cdot 10^5$ МПа) наносили «квазісуцільне» покриття $TiCrB_2$ +25 % AlN на установці «Элитрон-22».

Під дією залишкових напружень зразок деформувався у вигляді дуги кола. У деформованого зразка заміряли прогин f, за величиною якого визначали залишкові напруження (рис. 3).

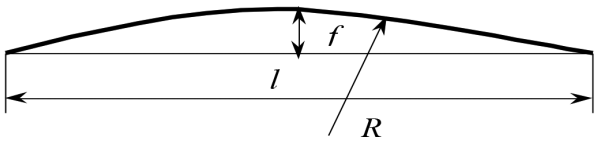

Рис. 3. Розрахункова схема обчислення радіуса кривизни *R* зразка, де *l* хорда сегменту, а *f* – стріла сегменту

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

$$R = \frac{l^2 + 4f^2}{8f}. \tag{4}$$

По даним робіт [11, 13, 14] розраховуємо залишкові напруження в системі «покриття-основа»:

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

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 [11, 19]:

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

де R – радіус кривизни, який отримує зразок в результаті деформації, що спричиняється залишковими напруженнями.

В зв'язку з тим, що ми використовуємо покриття малої товщини $h \ll H$, то формулу (6) можна записати у вигляді [13]:

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

а для лінійного напруженого стану:

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

Так як ми маємо лінійно напружений стан при $h \ll H$ залежність (6) перетворюється на відому формулу Стонея [13, 19]:

$$\sigma_n^{зал} = \frac{2E_oH_o^2}{3Rh_n}. \quad (9)$$

Розрахункові данні залишкових напружень представлені на рис. 4.

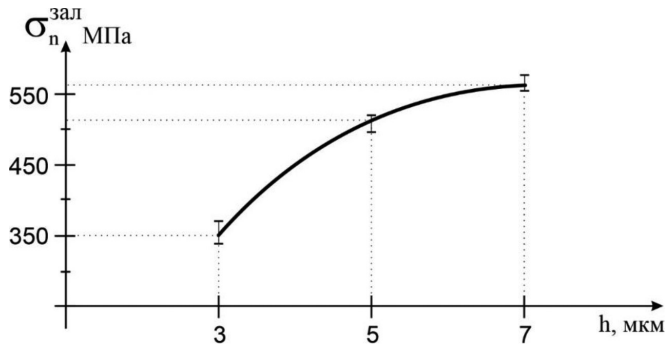

Рис. 4. Залежність залишкових напружень від товщини покриття $TiCrB_2$ + 25 %AlN на швидкорізальній сталі Р6М5

Як видно з залежності залишкові напруження зростають зі збільшенням товщини покриття.

Щоб визначити розміри дискретних ділянок – D, які несхильні когезійному розтріскуванню в залежності від критичної деформації основи та залишкових напружень в покритті без врахування експлуатаційних термонапружень, був розрахований максимальний допустимий крок тріщини – C_n.

Приймаємо, що когезійна міцність покриття $\sigma^{ког} = \varepsilon_{kp}E_n$ в ньому розподілена за нормальним законом з стандартним відхиленням $0{,}1\sigma^{ког}$, то найбільш ймовірно тріщина може виникнути в перетині $(l - y)$ при $\sigma_n^{еф} = 0{,}9\sigma^{ког}$ [11, 13].

Максимально припустимий крок тріщини 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:

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

Так як в зоні різання ВПКМ температура неповинна перевищувати 350 °С. то залежність (10) можна представити у вигляді (12):

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

Розрахункове значення кроку тріщин «С», в залежності від товщини покриття представлені на рис. 5.

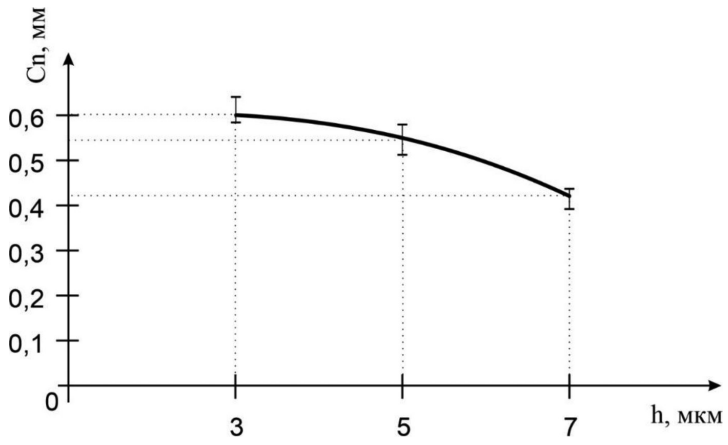

Рис. 5. Розрахункова залежність кроку тріщин від висоти покриття

Згідно літературних джерел [18] та розрахунків $\varepsilon_{кр}$змінюється від 0,6–0,8 %.

Таким чином визначивши максимально припустимий крок тріщини в суцільному покритті та розміри є можливо закласти розміри дискретної ділянки покриття та відстань між ними, з урахуванням експлуатаційних, залишкових напружень та напружень, що виникають від впливу температури, на етапі конструювання різального інструменту з покриттям, що дозволить виключити когезійне розтріскування останнього.

Висновки

У результаті дослідження запропоновано науково обґрунтований підхід до проєктування дискретного зносостійкого покриття глобулярної структури для різального інструменту, призначеного для обробки волокнистих полімерних композитних матеріалів. Показано, що застосування дискретного покриття дає змогу знизити інтенсивність напружень у поверхневому шарі інструменту, що, у свою чергу, забезпечує підвищення когезійної та адгезійної міцності, а також довговічності інструменту. Встановлено, що параметри дискретних елементів покриття, зокрема їх розміри та просторове розташування, суттєво впливають на рівномірність розподілу напружено-деформованого стану в системі «основа – покриття». Отримані результати можуть бути використані для подальшої оптимізації структури покриттів з метою підвищення ефективності різального інструменту при роботі з композиційними матеріалами.

Список використаної літератури

1. Ляшенко Б. А., Клименко С. А. Тенденции развития упрочняющей поверхностной обработки и положение в Украине // *Сучасне машинобудування*. 1999. № 1. С. 94–104.

2. Ляшенко Б. А., Соловых Є. К., Сорока Є. Б. та ін. Технологические, конструктивные и эксплуатационные особенности упрочняющих покрытий дискретной структуры на деталях машин и инструменте // *Проблеми та перспективи розвитку транспортних систем: техніка, технологія, економіка і управління: тези доп. III наук.-практ. конф. Серія «Техніка, Технологія»*. Київ, 2005. С. 22–23.

3. Tonshoff H. K., Wobker H.-G., Mohlfeld A., Fritsch A. Einflub der Substratbearbeitung auf das Einsatzverhalten beschichteter Zerspanwerkzeuge // *HTM: Härterei-Technische Mitteilungen*. 1996. Vol. 51, № 4. P. 207–213.

4. Krishnamurthy R. Thermocracking of ceramic cutting tools: bane or boone // *8th Int. Conf. Fract. «Fract. Mech.: Successes and Probl»., Kiev, 8–14 June, 1993: Collect. Abstr. Pt. 2*. Lviv, 1993. P. 663–664.

5. Корбут Є. В., Ляшенко Б. А., Подчерняєва І. І., Юрченко Д. В. Перспективи електроіскрового зміцнення твердосплавного ріжучого інструменту // *Процеси механічної обробки в машинобудуванні*. 2012. № 12. С. 67–80.

6. Ляшенко Б. А., Антонюк В. С., Сорока О. Б. та ін. Оптимизация дискретных структур электроискровых покрытий // *Артиллерийское и стрелковое вооружение: междунар. науч.-техн. сб*. К., 2004. Вип. 4(13). С. 30–34.

7. Антонюк В. С., Сорока Є. Б. Конструирование дискретно-модифицированных износостойких поверхностей // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2008. № 10. С. 8–13.

8. Антонюк В. С., Ляшенко Б. А., Сорока Є. Б. Выбор параметров покрытий дискретной структуры при модификации поверхности режущего инструмента // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2005. № 3. С. 49–50.

9. Ляшенко Б. А., Сорока Є. Б., Рутковский А. В. Определение параметров дискретной структуры покрытий с учетом остаточных напряжений // *Проблемы прочности*. 2002. № 4. С. 119–125.

10. Клименко С. А., Солових Є. К., Сорока Є. Б. та ін. Оптимизация дискретной структуры при поверхностной электроконтактной закалке // *Інженерія поверхні та реновація виробів: матеріали 6-ї міжнар. н.-техн. конф*. Київ–Ялта, 2006. С. 83–85.

11. Антонюк В. С. Основи підвищення працездатності різального інструменту шляхом формування зносостійких покриттів дискретного типу : дис. д-ра техн. наук. К. : НТУУ «КПІ», 2006. 375 с.

12. Ляшенко Б. А., Новиков Н. В., Клименко С. А. Дискретное модифицирование поверхностного слоя деталей машин и инструментов. К. : ІСМ ім. В. Н. Бакуля, 2017. 264 с.

13. Сорока О. Б. Методологія оптимізації зносостійких покриттів за критеріями міцності і роботоздатності : дис. д-ра техн. наук. К., 2011. 345 с.

14. Корбут Є. В., Парненко В. С., Ніколаєнко Т. П., Даниленко О. В. Архітектура дискретного покриття робочих поверхонь інструменту для різних схем різання // *Технічні науки та технології*. 2024. № 4(38). С. 44–56.

15. Durao L. M., Tavares J. M., Marques A. T. Comparison of Tool Effects on Hybrid Laminates after Drilling // *5th International Conference on Mechanics and Materials in Design*. Porto, 2006. P. 1–14.

16. Ляшенко Б. А., Сорока Є. Б., Рутковський А. В. Определение параметров дискретной структуры покрытий с учетом остаточных напряжений // *Проблемы прочности*. 2002. № 4. С. 119–125.

17. Vetter J., Burgmer W., Dederichs H., Perry A. The architecture and performance of compositionally gradient and multi-layer PVD coating // *Materials Science Forum*. 1994. Vols. 163–165. P. 527–532.

18. Ляшенко Б. А., Новиков Н. В., Клименко С. А. Дискретное модифицирование поверхностного слоя деталей машин и инструмента. К. : ІСМ ім. В. Н. Бакуля, 2017. 264 с.

19. Калініченко В. І., Марчук В. Є., Корбут Є. В. Напружено-деформований стан різального інструменту з дискретним покриттям // *Проблеми тертя та зношування*. Київ : НАУ, 2017. Вип. 1(74). С. 104–109.

References

1. Liashenko, B. A., & Klimenko, S. A. (1999). Tendentsii razvitiia uprochniaiushchei poverkhnostnoi obrabotki i polozhenie v Ukraine [Trends in the development of surface hardening treatment and the situation in Ukraine]. *Suchasne Mashynobuduvannia*, (1), 94–104. [in Russian]

2. Liashenko, B. A., Solovykh, E. K., Soroka, E. B., et al. (2005). Tekhnologicheskie, konstruktivnye i ekspluatatsionnye osobennosti uprochniaiushchikh pokrytii diskretnoi struktury na detaliakh mashin i instrumente [Technological, design, and operational features of hardening coatings with discrete structure on machine parts and tools]. In *Problemy ta perspektyvy rozvytku transportnykh system: tekhnika, tekhnolohiia, ekonomika i upravlinnia. Tezy dopovidei tretoi naukovo-praktychnoi konferentsii. Seriia "Tekhnika, Tekhnolohiia"* (pp. 22–23). Kyiv. [in Russian].

3. Tonshoff, H. K., Wobker, H.-G., Mohlfeld, A., & Fritsch, A. (1996). Einfluss der Substratbearbeitung auf das Einsatzverhalten beschichteter Zerspanwerkzeuge [Influence of substrate processing on the performance of coated cutting tools]. *HTM: Härterei-Technische Mitteilungen*, 51(4), 207–213. [in German]

4. Krishnamurthy, R. (1993). Thermocracking of ceramic cutting tools: Bane or boon. In *8th International Conference on Fracture: Fracture Mechanics: Successes and Problems*, Kiev, June 8–14, 1993 (Pt. 2, pp. 663–664). Lviv. [in English].

5. Korbut, E. V., Liashenko, B. A., Podcherniaeva, I. I., & Yurchenko, D. V. (2012). Perspektivy elektroiskrovogo uprochneniia tverdosplavnogo rezhushchego instrumenta [Prospects of electro-spark hardening of carbide cutting tools]. *Protsesy Mekhanichnoi Obrabotky v Mashynobuduvanni*, (12), 67–80. [in Russian].

6. Liashenko, B. A., Antoniuk, V. S., Soroka, O. B., et al. (2004). Optimizatsiia diskretnykh struktur elektroiskrovykh pokrytii [Optimization of discrete structures of electro-spark coatings]. *Artylleriiskoe i Strelkovoe Vooruzhenie: Mezhdunarodnyi Nauchno-Tekhnicheskii Sbornik*, (4), 30–34. [in Russian]

7. Antoniuk, V. S., & Soroka, E. B. (2008). Konstruirovanie diskretno-modifitsirovannykh iznosostoikikh poverkhnostei [Designing discretely modified wear-resistant surfaces]. *Uprochniaiushchie Tekhnologii i Pokrytiia*, (10), 8–13. [in Russian]

8. Antoniuk, V. S., Liashenko, B. A., & Soroka, E. B. (2005). Vybor parametrov pokrytii diskretnoi struktury pri modifikatsii poverkhnosti rezhushchego instrumenta [Selection of parameters of discrete structure coatings during modification of cutting tool surfaces]. *Uprochniaiushchie Tekhnologii i Pokrytiia*, (3), 49–50. [in Russian]

9. Liashenko, B. A., Soroka, E. B., & Rutkovskii, A. V. (2002). Opredelenie parametrov diskretnoi struktury pokrytii s uchetom ostatkovykh napriazhenii [Determination of parameters of discrete structure coatings considering residual stresses]. *Problemy Prochnosti*, (4), 119–125. [in Russian]

10. Klimenko, S. A., Solovykh, E. K., Soroka, E. B., et al. (2006). Optimizatsiia diskretnoi struktury pri poverkhnostnoi elektrokontaktnoi zakalke [Optimization of discrete structure during surface electro-contact hardening]. In *Inzheneriia Poverkhnosti i Renovatsiia Izdelyi: Materialy 6-i Mezhdunarodnoi Nauchno-Tekhnicheskoi Konferentsii*, Kyiv–Yalta (pp. 83–85). [in Russian].

11. Antoniuk, V. S. (2006). Osnovy povysheniia rabotosposobnosti rezhushchego instrumenta putem formirovaniia iznosostoikikh pokrytii diskretnogo tipa [Fundamentals of enhancing the performance of cutting tools by forming wear-resistant coatings of discrete type] (Doctoral dissertation). NTUU "KPI", Kyiv. [in Russian]

12. Liashenko, B. A., Novikov, N. V., & Klimenko, S. A. (2017). Diskretnoe modifitsirovanie poverkhnostnogo sloia detaley mashin i instrumentov [Discrete modification of the surface layer of machine parts and tools]. Kyiv : ISM im. V. N. Bakulia. [in Russian].

13. Soroka, O. B. (2011). Metodolohiia optymizatsii znosostiikykh pokryttiv za kryteriiamy mitsnosti i robotospromozhnosti [Methodology for optimizing wear-resistant coatings based on strength and performance criteria] (Doctoral dissertation). Kyiv. [in Ukrainian]

14. Korbut, Ye. V., Parnenko, V. S., Nikolaienko, T. P., & Danylenko, O. V. (2024). Arkhitektura dyskretnoho pokryttia robochykh poverkhon instrumentu dlia riznykh skhem rizannia [Architecture of discrete coating of working surfaces of tools for different cutting schemes]. *Tekhnichni Nauky ta Tekhnolohii*, (4), 44–56. [in Ukrainian].

15. Durao, L. M., Tavares, J. M., & Marques, A. T. (2006). Comparison of tool effects on hybrid laminates after drilling. In *5th International Conference on Mechanics and Materials in Design*, Porto (pp. 1–14). [in English].

16. Liashenko, B. A., Soroka, Ye. B., & Rutkovskyi, A. V. (2002). Opredelenie parametrov diskretnoi struktury pokrytii s uchetom ostatochnykh napriazhenii [Determination of parameters of the discrete structure of coatings taking into account residual stresses]. *Problemy prochnosti*, (4), 119–125.

17. Vetter, J., Burgmer, W., Dederichs, H., & Perry, A. (1994). The architecture and performance of compositionally gradient and multi-layer PVD coating. *Materials Science Forum*, 163–165, 527–532. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.163-165.527 [in English].

18. Liashenko, B. A., Novikov, N. V., & Klimenko, S. A. (2017). Diskretnoe modifitsirovanie poverkhnostnogo sloia detaley mashin i instrumentov [Discrete modification of the surface layer of machine parts and tools]. Kyiv: ISM im. V. N. Bakulia. [in Russian]

19. Kalnichenko, V. I., Marchuk, V. Ye., & Korbut, Ye. V. (2017). Napruzheno-deformovanyi stan rizalnoho instrumentu z dyskretnym pokryttiam [Stress-strain state of cutting tool with discrete coating]. *Problemy Terennia ta Znoshuvannia*, (1), 104–109. [in Ukrainian].