

PACS numbers: 62.20.Qp, 68.35.Gy, 68.55.J-, 68.55.Nq, 68.60.Bs, 81.05.Je

Вплив захисних нанокompозитних покриттів на стан теплових та деформаційних полів у різальній пластині

Д. О. Білоус, А. Ю. Бадалян, О. А. Гончаров, О. В. Хоменко,
С. А. Гончарова

*Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2,
40007 Суми, Україна*

В роботі представлено результати дослідження впливу теплових полів на деформаційні процеси, що виникають у поверхневих шарах різального інструменту в зоні різання. Запропонований модель тертя, який враховує структурно-фазовий склад матеріалу покриття, деформаційні процеси в покритті та виникаючі напруження під впливом температурного потоку в області контакту. Досліджено термодинамічний вплив на фізико-механічні характеристики покриття методом фазової площини шляхом аналітичного дослідження та побудови фазових портретів числовим інтегруванням відповідної системи диференціальних рівнянь за алгоритмом Рунге–Кутти. Проведено аналізу показників Ляпунова для особливих точок системи, зроблено висновки щодо особливостей поведінки системи «динамічне напруження–деформація» для поверхонь інструментів із покриттям і без нього.

Ключові слова: багатшарове покриття, деформаційні процеси, зсувні деформації, температурне поле, зона тертя, трибологічний контакт.

The paper presents the results of the study of the influence of thermal fields on the deformation processes occurring in the surface layers of the cutting tool in the cutting zone. The proposed friction model takes into account the

Corresponding author: Oleksandr Andriyovych Goncharov
E-mail: o.goncharov@mss.sumdu.edu.ua

*Sumy State University,
2 Rymsky-Korsakov Str., UA-40007 Sumy, Ukraine*

Citation: D. A. Belous, A. Yu. Badalian, A. A. Goncharov, O. V. Khomenko, and S. A. Goncharova, Influence of Protective Nanocomposite Coatings on the State of Thermal and Strain Fields in Cutting Plate, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **44**, No. 11: 1495–1508 (2022) (in Ukrainian). DOI: [10.15407/mfint.44.11.1495](https://doi.org/10.15407/mfint.44.11.1495)

structural and phase composition of the coating material, deformation processes in the coating and emerging stresses under the influence of temperature flow in the contact area. The thermodynamic influence on the physical and mechanical characteristics of the coating was studied by the phase plane method through analytical research and construction of phase portraits by numerical integration of the corresponding system of differential equations using the Runge–Kutta algorithm. An analysis of Lyapunov indices for special points of the system was carried out, conclusions were drawn regarding the characteristics of the behavior of the ‘dynamic stress-strain’ system for tool surfaces with and without coating.

Key words: multilayer coating, deformation processes, shear strain, temperature field, friction zone, tribological contact.

(Отримано 14 серпня 2022 р.; остаточн. варіант — 23 вересня 2022 р.)

1. ВСТУП

Модифікація поверхонь, що знаходяться в складних експлуатаційних умовах із високою температурою, значними механічними навантаженнями, агресивним середовищем та іншими локальними фізико-хімічними процесами, ефективно реалізується нанесенням багатошарових зносостійких покриттів на основі нітридів, карбідів та карбонітридів тугоплавких металів [1–5]. Наявність на поверхні такого захисного покриття приводить до корінної зміни механіки та фізико-хімічної контактної взаємодії об’єктів впливу. Це визначається перерозподілом напружень на поверхнях інструменту, зміною коефіцієнта тертя і, як наслідок, сил і температури різання [6–10]. Покриття підвищує такі важливі властивості інструментального матеріалу як твердість, теплостійкість, зносостійкість, фізико-хімічну пасивність по відношенню до матеріалу, що обробляється, сприятливо впливає на контактні процеси та параметри різання, що визначають характеристики зношування інструменту. Актуальними є карбідні та нітридні багатошарові покриття [11–14]. Такі покриття забезпечують високу термічну стабільність при високих швидкостях різання та достатню зносостійкість інструменту.

Складність процесів у системі «динамічне напруження–деформація» є проблемою моделювання термодинамічних процесів в зоні механічного оброблення металів інструментом із покриттям. Такі процеси залежать від розвитку мікроструктури поверхонь, часто вимагають даних про мікроструктуру, зміни розміру зерна як функції деформації, швидкості деформації та температури тощо. Аналіза впливу наноструктурних нанокомпозитних багатошарових покриттів на процеси теплопереносу та формування деформаційних полів в різальному інструменті залежно від структурного стану, а відповідно і фізико-механічних характеристик багатошарових плі-

вкових покриттів є актуальним питанням інженерії поверхні.

Метою роботи є дослідження впливу наноструктурних наноконкомпозитних багатшарових покриттів на процеси теплопереносу та формування деформаційних полів в різальному інструменті.

2. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

2.1. Термодинамічні явища в контактній зоні

Зона контакту характеризується значним тепловиділенням в результаті того, що механічна робота різання переходить в теплову енергію. Поширення теплового потоку представляється рівнянням теплового балансу [15], яке описує рівновагу теплоти, що виділяється в зоні різання, і теплоти, що видаляється з неї за той же проміжок часу. Теплота, що переходить в інструмент, концентруючись у малих об'ємах матеріялу інструменту, приводить до сильного розігріву його поверхні та пониження різальних властивостей та зносостійкості інструменту.

Поверхнєве покриття, завдяки своїм властивостям, вносить деякі зміни в розподіл теплоти. Багатшарове покриття забезпечує функції пов'язані із екрануванням або блокуванням теплових потоків від фрикційних джерел тепла інструменту, впливає на характеристики тертя між поверхнями, змінює параметри процесів пластичної деформації тощо [16]. На даний час не існує узгодженості щодо тлумачення процесів термозахисної функції багатшарових покриттів [17–20].

Дослідження теплових процесів [21, 22], що відбуваються в зоні різання, показало теплові профілі та поле температур в різці з різальною пластиною без покриття та з тришаровим (TiCN/ α -Al₂O₃/TiN) покриттям. Аналіза даних (рис. 1, 2) показує, що зменшення температури різання відбувається за рахунок зменшення теплового потоку від тертя в зоні різання, що спричиняється меншим коефіцієнтом тертя пари деталь–різець у випадку різальної пластини з покриттям. Менший коефіцієнт тертя приводить до пониження зносу різця та збільшення його стійкості.

Результати узгоджуються з дослідженнями [23], де встановлено, що максимальна температура зони різання формується поблизу різальної кромки для тришарового покриття TiC/Al₂O₃/TiN. Встановлено, що міжфазне тертя інструментальної стружки впливає на температурні поля при використанні інструмента з покриттям.

Розрахунки [24] показують, що пластична деформація є домінантним явищем тертя інтегрованим в молекулярно-механічну теорію тертя. Виділено складові цього явища: адгезія (m_a), яка включає зсув мікрозварних з'єднань, утворених контактними нерівностями поверхні під високим тиском і температурою; пластичну деформацію не-

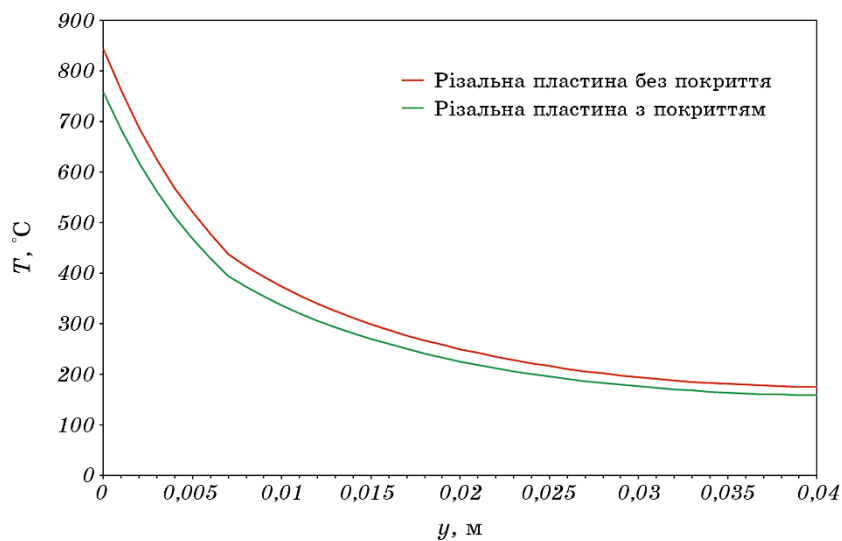


Рис. 1. Теплові профілі у різці з різальною пластиною без покриття та з покриттям в перерізі, що відповідає $x = 0,037$ м [21].

Fig. 1. Thermal profiles in a cutter with a cutting plate without coating and with coating in the section corresponding to $x = 0.037$ m [21].

рівностей (m_d), що викликає потік матеріялу при ковзанні тіла по іншому, що відповідає за статичний коефіцієнт тертя; розорювальна дія закруглених різальних кромки (m_p), що створює канавку за рахунок пластичного потоку, але без видалення матеріялу.

На думку авторів [24], генезис тертя базується на трьох встановле-

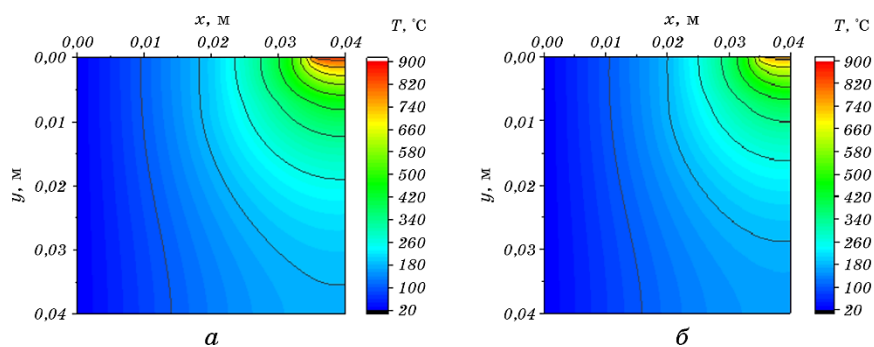


Рис. 2. Температурне поле в області різання: різальна пластина без покриття (а); різальна пластина з тришаровим покриттям [21] (б).

Fig. 2. Temperature field in the cutting area: cutting plate without coating (а); cutting plate with a three-layer coating [21] (б).

них складових коефіцієнта тертя (максимальні значення в дужках): $m_a = 0-0,4$ (0,51), $m_d = 0-0,43$ (0,75) і $m_p = 0-0,4$ (1,0). Відповідно, важливим механізмом тертя є розорювання контактних поверхонь твердими нерівностями і частинками зношування. Однак його участь залежить від умов трибологічного контакту. Наявність покриттів з низьким коефіцієнтом тертя різко зменшує показники тертя.

В роботі [25] досліджено змінне місцеве тертя через відмінності контактної поведінки через наявність мікротекстур. Встановлено, що періодична або аперіодична мікроскопічна ієрархія на текстурованій поверхні інструменту змінює трибологічні характеристики та продуктивність різання металу. Покриття та текстура на твердостопових штифтах зменшили тертя на 27% порівняно з гладкими твердостоповими зразками без покриття.

2.1. Деформаційні процеси в контактній зоні

Фізико-механічні процеси, що відбуваються під час оброблення металевих матеріалів різанням, багатоаспектні та взаємопов'язані. У процесі різання металу під час дії механічного навантаження зростає пластична деформація, що приводить до зсувних деформацій — зсування елементів або кристалів один щодо одного. Зсувні деформації викликають ковзання окремих частин зерен по кристалографічних площинах у певних напрямках. Площини ковзання, що виникають внаслідок незворотнього переміщення атомів, дроблять зерна на окремі частини (пластини), які в процесі деформації повертаються у певному напрямку до діяльної сили. Всі фізико-механічні процеси відбуваються в динамічному тепловому полі.

В результаті пластичної деформації відбувається зміна параметрів ґратниці та збільшення внутрішньої енергії. Для пониження внутрішнього напруження в зоні різання між обробним та інструментальним матеріалами віддають перевагу покриттю, яке підвищує працездатність інструменту завдяки жорсткій структурі за рахунок властивостей матеріалів його багатосарової конструкції.

Основною проблемою в розробці моделей тертя для опису процесів оброблення металу є складність одержання даних про систему «динамічне напруження σ –деформація ε » та даних про тертя в зоні нестационарного температурного поля. При моделюванні тертя, часто використовують дуже спрощені моделі тертя, наприклад, кулонівське тертя [25, 26]. Деякі моделі [27–29] включають залежні від температури теплофізичні властивості та дані мікроструктури заготовки, які часто важко знайти або виміряти для відповідних матеріалів і умов деформації. Частина новітніх моделей [30] базується на мікроструктурних аспектах пластичної деформації. Вони математично описують силу течії металу як функцію мікромасштабних фізичних процесів, відповідальних за зміцнення, наприклад, взаємо-

дія дислокації та перешкоди або пом'якшення, наприклад, динамічне відновлення, безперервна динамічна рекристалізація, ковзання по межі зерен металу. Але часто не враховується, що при пластичній деформації мікроструктура безперервно змінюється, оскільки термічно активовані рухомі дислокації взаємодіють з найближчими та далекими перешкодами, включаючи кристалічну ґратницю, атоми розчиненої речовини, дислокації та межі зерен [31].

Моделювання тертя стає дуже складним завданням через низку потенційних чинників впливу, включаючи мікрогеометрію контакту (шерсткість поверхні), відносний рух (постійність руху, поверхнева швидкість), прикладені сили (контактний тиск, постійність прикладених зусиль), температуру (термічні сили), вплив на властивості матеріялу і мастила), а також жорсткість і вібрацію (відповідність контакту, гасіння тертя вібрацій, зворотний зв'язок між тертям і структурною реакцією). Загалом значення коефіцієнта тертя, які використовуються при аналітичному та чисельному моделюванні різання металу, значно нижчі, ніж ті, що вимірюються в випробуваннях на ортогональне різання. Моделі враховують коефіцієнт тертя $\mu = 0-0,5$ (0,6), тоді як експериментально одержані результати розрахунку такого коефіцієнта можуть перевищувати 1, а іноді наближатися до 2 [32]. В той же час [33] спостерігається явно виражена залежність механічних властивостей покриттів від їх структурного стану та складу.

Тому залишається актуальним питання представлення моделі тертя, що враховує структурно-фазовий склад матеріялу покриття, деформаційні процеси в покритті та виникаючі напруження під впливом температурного потоку в області різання.

2.3. Дослідження деформаційних процесів під впливом температури

Згідно синергетичній концепції розгляду процесів пластичної деформації [34–39], деформаційні зміни, напруження, густина дефектів ведуть себе не автономно, а самоузгоджено. На феноменологічному рівні така поведінка описується системою диференціальних рівнянь, які містять нелінійні доданки. Розв'язок таких систем ефективно представляється графічно у вигляді фазових портретів.

Модель, взятий за основу, — це поверхнева плівкова структура для зміцнення та підвищення термічної стабільності різального інструменту. Маємо систему рівнянь для аналізу цього моделю [39]:

$$\tau_\varepsilon \frac{d\varepsilon}{dt} = -\varepsilon + \sigma; \quad (1)$$

$$\tau_\sigma \frac{d\sigma}{dt} = -\sigma + g(T - 1)\varepsilon; \quad (2)$$

$$\tau_T \frac{dT}{dt} = (T_e - T) - \sigma \varepsilon. \quad (3)$$

Тут введені часи релаксації напружень τ_σ , температури τ_T та деформації τ_ε , температура T_e — температура вдалі від поверхні різання, тобто термостату, стала $g < 1$. Ці рівняння формально впливають із синергетичної системи Лоренца, в якій роль параметра порядку відіграє деформація, спряжене поле зводиться до напруження, а температура є керувальним параметром.

Використаємо методу фазової площини, яка дає змогу визначити фазові портрети системи. Точний вигляд їх знаходиться шляхом числового інтегрування рівнянь методом Рунге–Кутти 4-го порядку точності [35–39]. Фактично, система рівнянь (1)–(3) є безрозмірною, але для зручності введемо масштаб τ_ε для міряння часу. Оскільки $\tau_\sigma \ll \tau_\varepsilon, \tau_T$, то в (2) можна покласти $d\sigma/dt = 0$, що дає зв'язок

$$\sigma = g(T - 1)\varepsilon, \quad (4)$$

підстановка якого в (1), (3) приводить до системи

$$\tau_\varepsilon \frac{d\varepsilon}{dt} = -\varepsilon + g\varepsilon(T - 1); \quad (5)$$

$$\tau_T \frac{dT}{dt} = (T_e - T) - g(T - 1)\varepsilon^2. \quad (6)$$

Введемо безрозмірний час $z = t/\tau_\varepsilon$ і параметер $\tau \equiv \tau_T/\tau_\varepsilon$. Для визначення стійких станів системи з точки зору методи фазової площини необхідно знайти координати особливих точок. Для знайдення особливих точок системи розділимо (5) на (6). Одержуємо

$$\frac{d\varepsilon}{dT} = \frac{-\varepsilon + g\varepsilon(T - 1)}{\tau^{-1}[(T_e - T) - g(T - 1)\varepsilon^2]}. \quad (7)$$

Використовуючи (7), знайдемо особливі точки фазової площини, в яких напрям дотичної до фазової траєкторії $\varepsilon = \varepsilon(T)$ невизначений. Для цього напишемо систему рівнянь $d\varepsilon/dT = 0, d\varepsilon/dT = \infty$:

$$-\varepsilon[1 - g(T - 1)] = 0, \quad (8)$$

$$\tau^{-1}[(T_e - T) - g(T - 1)\varepsilon^2] = 0. \quad (9)$$

Розглянемо можливі випадки.

1) $\varepsilon = 0$. Тоді в (8) вираз у квадратних дужках може набувати будь-яких значень. Підставимо $\varepsilon = 0$ в (9). Одержимо $T = T_e$. Таким чи-

ном, перша особлива точка $D(T_e, 0)$.

2) $\varepsilon \neq 0$. У цьому разі вираз зліва в (8) дорівнює нулю, якщо дорівнює нулю вираз в квадратних дужках. Одержимо критичну температуру різання $T_c = 1 + g^{-1}$. Підставимо в (9), в результаті маємо координати другої точки $O(T_c, \sqrt{T_e - T_c})$. Очевидно, що система більше не має особливих точок.

Знайдемо показники Ляпунова для особливих точок.

1) Для точки $D(T_e, 0)$ показник Ляпунова має вигляд:

$$\lambda_D = \frac{1}{2} [g(T_e - 1) - \tau^{-1} - 1] \left\{ 1 \pm \sqrt{1 + 4\tau^{-1} \frac{g(T_e - 1) - 1}{[\tau^{-1} - g(T_e - 1) + 1]^2}} \right\}. \quad (10)$$

2) Для точки $O(T_e, \sqrt{T_e - T_c})$

$$\lambda_O = \frac{1}{2\tau} \left[(1 + g\sqrt{T_e - T_c}) \left\{ 1 \pm \sqrt{1 - 8\tau \frac{g(T_e - T_c)}{(1 + g\sqrt{T_e - T_c})^2}} \right\} \right]. \quad (11)$$

Для визначення виду особливих точок необхідно визначити, за яких значень параметрів показники Ляпунова набувають комплексних, а за яких — дійсних значень.

Для точки D показники λ_D будуть дійсними, якщо підкореневий вираз в (10) буде невід'ємним:

$$1 + 4\tau^{-1} \frac{g(T_e - 1) - 1}{[\tau^{-1} - g(T_e - 1) + 1]^2} \geq 0. \quad (12)$$

Аналіза останнього виразу показала, що показники Ляпунова можуть набувати лише дійсних значень, тобто точка D може бути лише або вузлом, або сідлом. Визначимо умови, за яких точка D є вузлом, а за яких — сідлом.

Із виразу (12) випливає наступне.

а) Якщо $g(T_e - 1) > 1$ (що аналогічно умові $T_e > 1 + g^{-1}$), то дріб у (12) додатний, отже, корінь в (10) більше 1, і залежно від того, віднімається або додається корінь у фігурних дужках, знак буде або «+» або «-». Оскільки знак виразу в квадратних дужках має сталі значення, то показники Ляпунова мають різні знаки. Висновок: точка D для $T_e > 1 + g^{-1}$ є сідлом.

б) Якщо $g(T_e - 1) < 1$ (що аналогічно умові $T_e < 1 + g^{-1}$), то корінь в (10) менше 1; отже, показники Ляпунова мають однаковий знак. Оскільки при зазначеній умові вираз у фігурних дужках додатний, а

вираз у квадратних дужках від'ємний, то показники Ляпунова від'ємні. Висновок: точка D для $T_e < 1 + g^{-1}$ є стійким вузлом.

2) Для точки O показники Ляпунова мають вигляд (11). Із співвідношення $\varepsilon = \sqrt{T_e - T_c}$, випливає, що точка реалізується лише при $T_e > 1 + g^{-1}$, оскільки ε — фізична величина, що не може набувати комплексних значень. Визначимо умови, залежно від яких показники Ляпунова набувають або комплексних, або дійсних значень. Знайдемо критичне значення τ_c , при переході через яке в (11) з'являється уявна частина

$$\tau_c = \frac{1 + 2g\sqrt{T_e - T_c} + g(T_e - T_c)}{8g(T_e - T_c)}.$$

Розглянемо можливі випадки.

а) Якщо $\tau < \tau_c$, вираз $8\tau^{-1} \frac{g(T_e - T_c)}{(\tau^{-1} + g\tau^{-1}\sqrt{T_e - T_c})^2} < 1$, корінь в (11) є

дійсним і меншим за 1 (оскільки у підкореновому виразі із 1 віднімають деяке додатне число, менше за 1); після віднімання в квадратних дужках із 1 кореня виходить дійсне додатне число. Отже, показники Ляпунова дійсні і від'ємні. Висновок: для $\tau < \tau_c$ точка O — стійкий вузол.

б) Якщо $\tau > \tau_c$, вираз $8\tau^{-1} \frac{g(T_e - T_c)}{(\tau^{-1} + g\tau^{-1}\sqrt{T_e - T_c})^2} > 1$, корінь в (11) є

уявним. Показники Ляпунова — комплексні з від'ємною дійсною частиною. Висновок: для $\tau > \tau_c$ точка O — стійкий фокус.

Аналіза показників Ляпунова показує, що при значеннях $0 < T_e < T_c$ точка D подає стійкий вузол. Беручи до уваги, що за таких значень T_e особлива точка O не реалізується, робимо висновок — з плином часу система еволюціонує у відповідній точці D стаціонарний тепловий режим згідно з фазовим портретом, наведеним на рис. 3, а. При $T_e > T_c$ одержимо стійкий фокус O (рис. 3, б).

Аналіза результатів дослідження та наведених математичних співвідношень показує, що фазовий портрет пластичної деформації характеризується наявністю двох особливих точок (рис. 3), розглянутих для поверхні без покриття і з покриттям. Вхідними параметрами системи було обрано такі значення: $T_e = 1$ та $T_e = 5$, $g = 0,5$, $\tau = 1$.

Спостерігається еволюція системи у відповідній точці $D(T_e, 0)$ у стаціонарному стані згідно з графіком, що наведений на рис. 3, а. У передкритичній області, де $T_e \leq T_c$ вона дає стійкий вузол. Результати вказують на те, що зростання параметра $\tau = \tau_T/\tau_c$ приводить до закручування траєкторій навколо особливої точки. Таким чином,

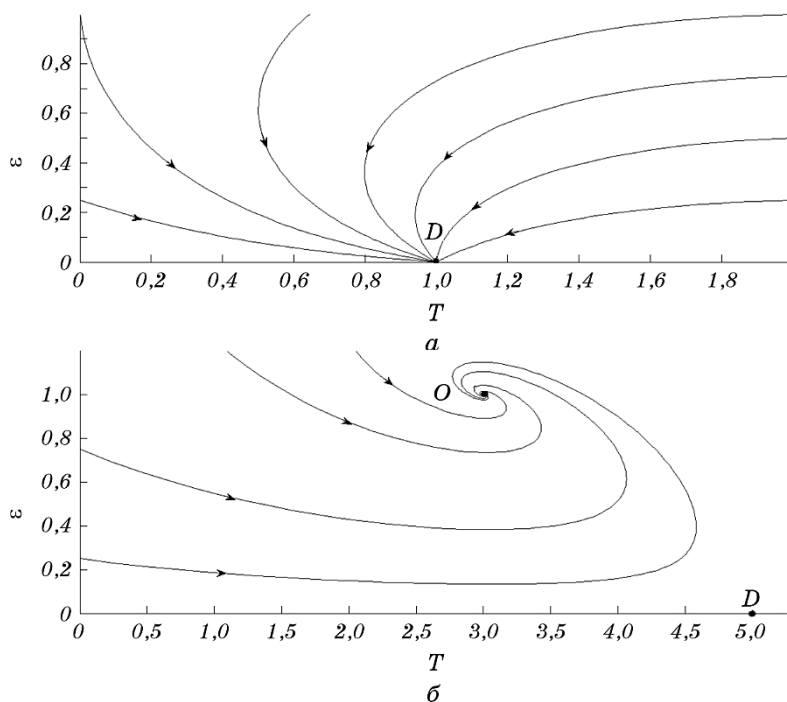


Рис. 3. Фазові портрети ($g = 0,5$, $\tau = 1$): $0 < T_e < T_c$, $T_e = 1$ (а); $T_e > T_c$, $T_e = 5$ (б).
Fig. 3. Phase portraits ($g = 0.5$, $\tau = 1$): $0 < T_e < T_c$, $T_e = 1$ (a); $T_e > T_c$, $T_e = 5$ (b).

цей стан відповідає відносно повільній зміні температури та швидкій зміні напружень, що характерно переривчастому режиму оброблення різанням. При малих напруженнях або значному їх пониженні пластична деформація розвивається в режимі близькому до плазучості (рис. 3, а). При цьому втрати стійкості не відбуваються.

З ростом густини дислокацій, що характерно для багат шарового покриття, до значень, за яких взаємодія їх характеризується напруженням, створеним зовнішнім полем, поведінка ансамблю дефектів стає колективною, і принципова роль належить процесам релаксації напруження [40]. Фазовий портрет має вигляд (рис. 3, б), що відповідає поверхні із покриттям. За напружень, набагато вищих поля взаємодії дислокації, колективні ефекти піддаються зовнішньому впливу, й ансамбль дефектів еволюціонує до кінцевих густин дефектів.

3. ВИСНОВКИ

Нанесення багат шарового покриття впливає на поширення теплового навантаження в глибині поверхні інструменту, що пов'язано із

зменшенням теплового потоку від тертя в зоні різання, що спричиняється меншим коефіцієнтом тертя пари деталь–різець у випадку різальної пластини з покриттям. Теплота із зони різання частково поглинається у процесах міжфазного тертя, пластичної деформації, зміни деформаційних напружень, які відбуваються у багатошаровій структурі покриття під час різання, що приводить до пониження інтенсивності теплового потоку в глибині інструменту і пояснює частково теплоекранувальну дію поверхневого шару покриття. Представлений математичний модель деформаційних процесів, що відбуваються у поверхневих шарах різальної поверхні у вигляді системи диференціальних рівнянь, які формально даються синергетичною системою Лоренца, в якій роль параметра порядку відіграє деформація, спряжене поле зводиться до напруження, а температура є керувальним параметром.

Результати моделювання у вигляді побудованих фазових портретів системи показали дві особливі точки у вигляді вузлу/фокусу, що характерні для поверхні без покриття та із покриттям. Досліджено еволюцію системи. Показано, що для поверхні без покриття спостерігається відносно повільна зміна температури та швидка зміна напружень. За малих напружень або значного пониження їх пластична деформація розвивається в режимі, близькому до плазучості. Зростання густини дислокацій у поверхневому покритті приводить до відчутного впливу релаксації напруження.

ПОДЯКА

Автори висловлюють подяку МОН України за фінансову підтримку роботи в рамках проекту «Механізми формування та моделювання структурного стану плівок тугоплавких сполук с прогнозованими механічними характеристиками» (№ 0122U000776).

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. A. D. Pogrebnjak, V. N. Borisyuk, and A. A. Bagdasaryan, *Condens. Matter Phys.*, **16**, No. 3: 33803 (2013).
2. A. D. Pogrebnjak and V. M. Beresnev, *Nanocomposites—New Trends and Developments* (Ed. Farzad Ebrahimi) (2012), p. 123.
3. M. Pogorelov, K. Smyrnova, S. Kyrylenko, O. Gogotsi, V. Zahorodna, and A. Pogrebnjak, *Nanomaterials*, **11**, No. 12: 3412 (2021).
4. W. Grzesik, *J. Mach. Eng.*, **20**: 24 (2020).
5. Sh. N. Melkote, W. Grzesik, J. Outeiro, J. Rech, V. Schulze, H. Attia, P.-J. Arrazola, R. M'Saoubi, and C. Saldana, *CIRP Annals*, **66**, No. 2: 731 (2017).
6. А. Д. Погребняк, М. А. Лисовенко, А. Турлыбекулы, В. В. Буралич, *УФН*, **191**: 262 (2021).

7. J. Zhang and Z. Liu, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **91**: 59 (2017).
8. A. D. Pogrebnyak, A. A. Bagdasaryan, I. V. Yakushchenko, and V. M. Beresnev, *Russ. Chem. Rev.*, **83**, No. 11: 1027 (2014).
9. В. М. Береснев, А. Д. Погребняк, Н. А. Азаренков, В. И. Фареник, Г. В. Кирик, *PSE*, **5**, № 1–2: 4 (2007).
10. P. K. Huang and J. W. Yeh, *Surf. Coat. Technol.*, **203**, No. 13: 1891 (2009).
11. V. V. Uglov, V. M. Anishchik, S. V. Zlotski, and G. Abadias, *Surf. Coat. Technol.*, **200**, Nos. 22–23: 6389 (2006).
12. A. Raveh, I. Zukerman, R. Shneck, R. Avni, and I. Fried, *Surf. Coat. Technol.*, **201**: 6136 (2007).
13. S. Veprek and M. J. G. Veprek-Heijman, *Surf. Coat. Technol.*, **202**: 5063 (2008).
14. А. Д. Погребняк, А. А. Гончаров, *Металлофиз. новейшие технол.*, **38**, № 9: 1145 (2016).
15. О. А. Гончаров, Д. О. Білоус, А. М. Юнда, О. В. Хоменко, Є. В. Міроненко, Л. В. Васильєва, С. А. Гончарова, *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*, **20**, 2: 385 (2022).
16. B. Haddag, S. Atlati, M. Nouari, and M. Zenasni, *Heat Mass Transfer*, **51**: 1355 (2015).
17. B. Wang, Z. Liu, X. Hou, and J. Zhao, *Materials (Basel, Switzerland)*, **11**, No. 4: 461 (2018).
18. W. Zhang, J. Weng, and K. Zhuang, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **118**: 2105 (2022).
19. D. Ulutan and T. Özel, *J. Mater. Processing Technol.*, **213**: 2217 (2013).
20. W. Grzesik, J. Rech, and K. Žak, *Wear*, **317**, Nos. 1–2: 8 (2014).
21. A. Goncharov, A. Yunda, E. Mironenko, D. Belous, and L. Vasilyeva, *High Temp. Mater. Process.*, **22**: 279 (2018).
22. A. Goncharov, A. Yunda, E. Mironenko, L. Vasilyeva, and D. Belous, *High Temp. Mater. Process.*, **24**: 81 (2020).
23. W. Grzesik, M. Bartoszek, and P. Nieslony, *J. Mater. Processing Technol.*, **164–165**: 1204 (2005).
24. I. V. Kragelsky, M. N. Dobychin, and V. S. Kombatov, *Friction and Wear: Calculation Methods* (Pergamon: Elsevier: 2013).
25. Y. Guo, C. Saldana, W. D. Compton, and S. Chandrasekar, *Acta Mater.*, **59**, No. 11: 4538 (2011).
26. S. Lee, J. Hwang, and M. R. Shankar, *Metall. Mater. Trans. A*, **37**: 1633 (2006).
27. T. Brown, C. Saldana, T. G. Murthy, J. B. Mann, Y. G. L. F. Allard, A. H. King, W. D. Compton, K. P. Trumble, and S. Chandrasekar, *Acta Mater.*, **57**, No. 18: 5491 (2009).
28. C. Huang, T. G. Murthy, M. R. Shankar, R. M'Saoubi, and S. Chandrasekar, *Scr. Mater.*, **58**, No. 8: 663 (2008).
29. L. A. Denguir, J. C. Outeiro, G. Fromentin, V. Vignal, and R. Besnard, *Procedia CIRP*, **46**: 238 (2016).
30. S. Melkote, W. Grzesik, J. Outeiro, J. Rech, and V. Schulze, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, **66**, No. 2: 731 (2017).
31. H. Mecking and U. F. Kocks, *Acta Metall.*, **29**, No. 11: 1865 (1981).
32. N. Maharjan, W. Zhou, and N. Wu, *Surf. Coat. Technol.*, **385**: 125399 (2020).
33. А. А. Гончаров, С. Н. Дуб, А. В. Агулов, В. В. Петухов, *Сверхтвердые материалы*, **6**: 76 (2015).
34. Г. Хакен, *Синергетика* (Москва: Мир: 1980) (пер. с англ.).

35. А. В. Хоменко, Д. С. Троценко, Л. С. Метлов, П. Е. Трофименко, *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*, **15**, № 2: 203 (2017).
36. A. V. Khomenko and I. A. Lyashenko, *J. Phys. Studies*, **11**, No. 3: 268 (2007).
37. A. V. Khomenko and I. A. Lyashenko, *Fluctuation and Noise Letters*, **7**, No. 2: 111 (2007).
38. O. Mazur, K.-I. Tozaki, Y. Yoshimura, and L. Stefanovich, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **599**: 127436 (2022).
39. A. Khomenko, M. Khomenko, B. Persson, and K. Khomenko, *Tribology Letters*, **65**, No. 2: 71 (2017).
40. Б. М. Мордюк, О. О. Мікосянчик, Р. Г. Мнацаканов, *Металлофиз. новейшие технол.*, **42**, № 2: 175 (2020).

REFERENCES

1. A. D. Pogrebnyak, V. N. Borisyuk, and A. A. Bagdasaryan, *Condens. Matter Phys.*, **16**, No. 3: 33803 (2013).
2. A. D. Pogrebnyak and V. M. Beresnev, *Nanocomposites—New Trends and Developments* (Ed. Farzad Ebrahimi) (2012), p. 123.
3. M. Pogorielov, K. Smyrnova, S. Kyrylenko, O. Gogotsi, V. Zahorodna, and A. Pogrebnyak, *Nanomaterials*, **11**, No. 12: 3412 (2021).
4. W. Grzesik, *J. Mach. Eng.*, **20**: 24 (2020).
5. Sh. N. Melkote, W. Grzesik, J. Outeiro, J. Rech, V. Schulze, H. Attia, P.-J. Arrazola, R. M'Saoubi, and C. Saldana, *CIRP Annals*, **66**, No. 2: 731 (2017).
6. A. D. Pogrebnyak, M. A. Lisovenko, A. Turlybekuly, and V. V. Buranich, *Phys.-Usp.*, **191**: 262 (2021) (in Russian).
7. J. J. Zhang and Z. Liu, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **91**: 59 (2017).
8. A. D. Pogrebnyak, A. A. Bagdasaryan, I. V. Yakushchenko, and V. M. Beresnev, *Russ. Chem. Rev.*, **83**, No. 11: 1027 (2014).
9. V. M. Beresnev, A. D. Pogrebnyak, N. A. Azarenkov, V. I. Farenik, and G. V. Kirik, *PSE*, **5**, Nos. 1–2: 4 (2007) (in Russian).
10. P. K. Huang and J. W. Yeh, *Surf. Coat. Technol.*, **203**, No. 13: 1891 (2009).
11. V. V. Uglov, V. M. Anishchik, S. V. Zlotski, and G. Abadias, *Surf. Coat. Technol.*, **200**, Nos. 22–23: 6389 (2006).
12. A. Raveh, I. Zukerman, R. Shneck, R. Avni, and I. Fried, *Surf. Coat. Technol.*, **201**: 6136 (2007).
13. S. Veprek and M. J. G. Veprek-Heijman, *Surf. Coat. Technol.*, **202**: 5063 (2008).
14. O. D. Pogrebnyak and O. O. Goncharov, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **38**, No. 9: 1145 (2016) (in Russian).
15. A. Goncharov, A. Yunda, E. Mironenko, D. Belous, and L. Vasilyeva, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **20**, 2: 385 (2022).
16. B. Haddag, S. Atlati, M. Nouari, and M. Zenasni, *Heat Mass Transfer*, **51**: 1355 (2015).
17. B. Wang, Z. Liu, X. Hou, and J. Zhao, *Materials (Basel, Switzerland)*, **11**, No. 4: 461 (2018).
18. W. Zhang, J. Weng, and K. Zhuang, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, **118**: 2105 (2022).
19. D. Ulutan and T. Özel, *J. Mater. Processing Technol.*, **213**: 2217 (2013).

20. W. Grzesik, J. Rech, and K. Žak, *Wear*, **317**, Nos. 1–2: 8 (2014).
21. A. Goncharov, A. Yunda, E. Mironenko, D. Belous, and L. Vasilyeva, *High Temp. Mater. Process.*, **22**: 279 (2018).
22. A. Goncharov, A. Yunda, E. Mironenko, L. Vasilyeva, and D. Belous, *High Temp. Mater. Process.*, **24**: 81 (2020).
23. W. Grzesik, M. Bartoszek, and P. Nieslony, *J. Mater. Processing Technol.*, **164–165**: 1204 (2005).
24. I. V. Kragelsky, M. N. Dobychin, and V. S. Kovalov, *Friction and Wear: Calculation Methods* (Pergamon–Elsevier: 2013).
25. Y. Guo, C. Saldana, W. D. Compton, and S. Chandrasekar, *Acta Mater.*, **59**, No. 11: 4538 (2011).
26. S. Lee, J. Hwang, and M. R. Shankar, *Metall. Mater. Trans. A*, **37**: 1633 (2006).
27. T. Brown, C. Saldana, T. G. Murthy, J. B. Mann, Y. G. L. F. Allard, A. H. King, W. D. Compton, K. P. Trumble, and S. Chandrasekar, *Acta Mater.*, **57**, No. 18: 5491 (2009).
28. C. Huang, T. G. Murthy, M. R. Shankar, R. M'Saoubi, and S. Chandrasekar, *Scr. Mater.*, **58**, No. 8: 663 (2008).
29. L. A. Denguir, J. C. Outeiro, G. Fromentin, V. Vignal, and R. Besnard, *Procedia CIRP*, **46**: 238 (2016).
30. S. Melkote, W. Grzesik, J. Outeiro, J. Rech, and V. Schulze, *CIRP Annals–Manufacturing Technology*, **66**, No. 2: 731 (2017).
31. H. Mecking and U. F. Kocks, *Acta Metall.*, **29**, No. 11: 1865 (1981).
32. N. Maharjan, W. Zhou, and N. Wu, *Surf. Coat. Technol.*, **385**: 125399 (2020).
33. A. A. Goncharov, S. N. Dub, A. V. Agulov, and V. V. Petukhov, *Superhard Materials*, **6**: 76 (2015) (in Russian).
34. H. Haken, *Synergetics* (Moscow: Mir: 1980) (Russian translation).
35. A. V. Khomenko, D. S. Troshchenko, L. S. Metlov, and P. E. Trofimenko, *Nanosistemi, Nanomateriali, Nanotehnologii*, **15**, No. 2: 203 (2017) (in Russian).
36. A. V. Khomenko and I. A. Lyashenko, *J. Phys. Studies*, **11**, No. 3: 268 (2007).
37. A. V. Khomenko and I. A. Lyashenko, *Fluctuation and Noise Letters*, **7**, No. 2: 111 (2007).
38. O. Mazur, K.-I. Tozaki, Y. Yoshimura, and L. Stefanovich, *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **599**: 127436 (2022).
39. A. Khomenko, M. Khomenko, B. Persson, and K. Khomenko, *Tribology Letters*, **65**, No. 2: 71 (2017).
40. B. N. Mordyuk, O. O. Mikosyanchik, and R. G. Mnatsakanov, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **42**, No. 2: 175 (2020) (in Ukrainian).