

М.М. Ткачук, А.В. Грабовський, М.К. Новіков, М.А. Ткачук, С.О. Кравченко, О.С. Льозний

ЕФЕКТИ ПРИ ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНОМУ ЗМІЦНЕННІ ЕЛЕМЕНТІВ МАШИН

У роботі описані підходи до вирішення проблеми оперативного та ефективного підвищення технічних і тактико-технічних характеристик машин військового та цивільного призначення: танків, бронемашин, тепловозів, турбодетандерних електростанцій, установок автономного живлення стратегічних об'єктів тощо. Із цієї метою розвиваються принципово нові методи зміцнення контактуючих елементів машин. Ці методи поєднують переваги дискретних та континуальних методів зміцнення, які натепер значним чином вичерпали свої можливості. Якісні особливості та переваги запропонованих дискретно-континуальних методів зміцнення потребують ефективної реалізації. Мова йде про обґрунтування прогресивних технічних рішень за критеріями міцності та довговічності. Задля цього удосконалюватиметься методологія багатокритеріального синтезу у розширеному просторі проектно-технологічних параметрів. Крім того, як базу для обґрунтування прогресивних технологічних рішень формується комплекс зв'язаних задач аналізу напружено-деформованого стану, тертя та зношування. Отже, на основі удосконаленого системного підходу досягається значно вищий рівень міцності та довговічності зміцнюваних деталей конструкцій, ніж за традиційними методиками. Прілюстровані результати розв'язання тестових задач. У кінцевому результаті узагальнені мікромакромоделі для визначення сумісного впливу конструктивних та технологічних чинників, мікроструктури, фізико-механічних властивостей матеріалів зміцнених шарів на контактну взаємодію і напружено-деформований стан представницьких фрагментів системи дискретно-континуально зміцнених тіл. Установлені результати аналізу сумісного впливу конструктивних та технологічних чинників, мікроструктури, фізико-механічних властивостей матеріалів зміцнених шарів на контактну взаємодію і напружено-деформований стан тестових представницьких фрагментів системи дискретно-континуально зміцнених тіл. При цьому встановлено суттєвий вплив властивостей зміцнюваних шарів на міцність контактуючих тіл.

Ключові слова: дискретно-континуальне зміцнення; міцність; напружено-деформований стан; контактна взаємодія; теорія варіаційних нерівностей.

Вступ

Проблема підвищення технічних і тактико-технічних характеристик (ТТТХ) машин військового та цивільного призначення (МВЦП) дедалі частіше стикається із недостатнім арсеналом засобів досягнення цієї мети. У першу чергу це стосується методів зміцнення поверхневих шарів високонавантажених деталей цих машин. На вирішення проблеми, що постала, спрямовано низку досліджень та розробок [1-4]. Як відзначається у цих роботах, як теоретичну основу досліджень розвинено теорію узагальненого параметричного моделювання процесів і станів у складних механічних системах [4]. Це дає можливість варіювати технічні рішення, у т.ч. – на мікрорівні, а контролювати ефекти – на нано- та макрорівні. У свою чергу, це створює можливості цілеспрямованого пошуку та обґрунтування проривних технічних рішень стосовно елементів МВЦП. Із точки зору охопту проблеми, що постала, сформована концепція поєднання переваг та усунення недоліків існуючих методів методів зміцнення елементів МВЦП шляхом обґрунтування ефективного методу дискретно-континуального зміцнення (ДКЗ). Здійснено попередній аналіз напружено-деформованого стану (НДС) та контактної взаємодії (КВД) фрагментів тіл, оброблених методами корундування (перше тіло) та електроіскрового дискретного зміц-

нення (друге тіло) [1-3]. Установлено нові типи ефектів: 1) перерозподіл зусиль КВД на мікро- та макрорівнях; 2) більше зношування матриці, менше – зон дискретного зміцнення; 3) формування сприятливого нанопрофілю контактуючих поверхонь при навантаженні; 4) поєднання ефектів на макро-, мікро- та нанорівнях. Разом із тим не здійснено системне дослідження ефектів при ДКЗ МВЦП. Слід розробити стратегію та здійснити обґрунтування ефективних технічних рішень досліджуваних об'єктів, здійснити аналіз впливу властивостей матеріалів покриттів та зон зміцнення на КВД та розробити відповідні рекомендації для елементів МВЦП. Ці питання стали предметом досліджень, описаних у роботі.

Аналіз існуючих методів досліджень та зміцнення елементів машин військового та цивільного призначення

Як зазначається у роботах [1-3], протягом останніх десятиліть велике значення набувають роботи вітчизняних та зарубіжних вчених, спрямовані на удосконалення технологій зміцнення робочих поверхонь найбільш високонавантажених та відповідальних елементів машин військового та цивільного призначення.

Методи інженерії поверхні (нанесення покриттів, модифікування поверхневого шару, плазмові технології тощо) та зміцнення описані у роботах [5-

14]. Серед них достатньо ефективними є дослідження, описані у роботах [5,6]. Мова йде про фізико-механічні властивості чистих металів, низьколегованих сплавів та багатокомпонентних твердих розчинів, включаючи сплави з високою ентропією. Привертають увагу роботи із напрямків багатопарових покриттів та мікродугового оксидування («корундування»), а також пластичного деформування [7-9].

Усі перелічені методи досліджень та зміцнення мають низку переваг та недоліків. Проте принциповим загальним їх недоліком є можливість поліпшення певних характеристик, як правило, за рахунок погіршення інших. Відповідно, високі механічні властивості покриттів супроводжуються проблемами розтріскування або відшарування тощо. У роботах же [1-3], навпаки, передбачається поліпшення не однієї окремо взятої, а комплексу характеристик. Ця проривна властивість особливо важлива для елементів МВЦП.

Також суттєве значення мають публікації [10-12], у яких увагу звертають на сплави з високою ентропією, однофазні багатоелементні сплави та наноструктуровані металеві матеріали.

У роботах [13,14] описані дослідження контактної взаємодії твердих тіл із реальною мікрогеометрією поверхні.

Усі перелічені публікації в основному спрямовані на методи аналізу властивостей існуючих металів, сплавів, покриттів. Разом із тим у практичному плані високу актуальність та важливість набули проблеми синтезу матеріалів та покриттів саме із бажаними фізико-механічними властивостями. Тут експериментальні дослідження [5-12,15-22] можуть дати вихідні дані стосовно тенденцій впливу тих чи інших чинників на властивості певних об'єктів. Моделі [13,14] дають можливість досліджувати вплив окремих чинників на контактну взаємодію, напружено деформований стан, міцність та довговічність. Проте ні перші, ні другі не містять постановок, підходів, моделей та методів розв'язання обернених задач. Тобто виникає проблема створення та удосконалення таких засобів досліджень, які формують варіативний об'єкт та уможливають обґрунтування технічних рішень із заданими властивостями.

Якраз такі підходи, моделі та методи частково розроблені авторами робіт [1-4]. На їх основі забезпечується практична складова – можливість здійснення досліджень та розроблення рекомендацій стосовно проектно-технологічних параметрів зміцнення елементів МВЦП із підвищеними ТТГХ. Тобто, на противагу відомим, метод, що розвивається, спирається не на один, а на два фізичних процеси: формуються не дискретні чи континуальні, а

дискретно-континуальні розподіли зон зміцнення; створюється не однофакторна, а багатофакторна математична варіативна модель напружено-деформованого стану контактуючих тіл; здійснюється вплив не окремо на проектні чи технологічні чинники, а на їх сукупність; і, нарешті, досягається поліпшення не однієї, а комплексу властивостей елементів конструкцій [1-4].

Таким чином, проблема, яка постала, потребує розвитку теоретичних постановок, їх реалізації у вигляді чисельних моделей та здійснення відповідних досліджень НДС та КВД зміцнених елементів конструкцій.

Мета роботи – забезпечення технічних і тактико-технічних характеристик машин військового та цивільного призначення шляхом аналізу впливу на контактну взаємодію і міцність їх елементів та обґрунтування рекомендацій щодо ефективних проектно-технологічних параметрів дискретно-континуального зміцнення.

Основні завдання:

1. Розробити базові підходи до обґрунтування високоефективних технічних рішень шляхом пошуку раціональних наборів проектно-технологічних параметрів систем тіл «дискретно зміцнена деталь – континуально зміцнена деталь».

2. Сформулювати варіативну постановку задачі аналізу контактної взаємодії зміцнених тіл.

3. Дослідити вплив варіюваних проектно-технологічних параметрів дискретно-континуального зміцнення на напружено-деформований стан контактуючих тіл.

Базові підходи до обґрунтування високоефективних технічних рішень шляхом пошуку раціональних наборів проектно-технологічних параметрів систем тіл

На розвиток підходу, описаному у роботах [1-3], для вирішення сформованих проблем пропонується залучити та адаптувати метод узагальненого параметричного моделювання процесів і станів у складних системах [4]. Відповідно, формується узагальнений параметричний простір зі складовими:

$$P = P_E U P_T U P_C, \quad (1)$$

де P_E , P_T , P_C – підмножини параметрів, які описують робочі процеси E , технологічні T та конструктивні C рішення МВЦП, відповідно.

Тобто, уже на цьому етапі закладається єдина методологічна база опису об'єкта досліджень як цілісного.

Якщо записати в операторному вигляді різні процеси і стани, які описуються змінними станів

$$U = U_E \cup U_T, U_C. \quad (2)$$

$$L_E(P_E, P_T, P_C) = 0, \quad (3)$$

$$L_T(P_E, P_T, P_C) = 0, \quad (4)$$

$$L_C(P_E, P_T, P_C) = 0, \quad (5)$$

то уже на рівні моделювання робочих процесів (L_E), технологій (L_T) та конструктивів (L_C) співвідношення (3)–(5) формально взаємоув'язують, з одного боку, різні процеси і стани (описувані відповідними змінними стану $E - U_E, T - U_T, C - U_C$), а, з іншого, різні типи узагальнених параметрів. Отже, співвідношення (1)–(5) формують єдину комплексну модель аналізу фізико-механічних процесів і станів у МВЦП.

Окрім задач аналізу (1)–(5), привертають увагу і задачі синтезу. Формально їх можна подати у вигляді

$$I(u(P), P) \rightarrow \text{extr}, \quad (6)$$

$$H(u(P), P) \rightarrow [H], \quad (7)$$

де I – певні критеріальні функції (маса, потужність, довговічність, ККД тощо), H – певні характеристики, на які накладаються деякі обмеження $[H]$.

Знову ж таки, формально співвідношення (6), (7) відрізняються від традиційних оптимізаційних постановок саме комплексністю опису самого об'єкта (1) та його поведінки (2)–(5). В силу цього розв'язок P^* задачі (6), (7), побудований у розширеному просторі (1), більш ефективний, ніж набір розв'язків P_k^* ($k = 1, 2, \dots$) за частинними критеріями та обмеженнями. Разом із тим слід зазначити, що таке підвищення ефективності такого розв'язку досягається за рахунок зростання громіздкості та складності комплексних моделей (1)–(5).

Основна відмінність моделей та просторів і критеріїв (1)–(7) від раніше задекларованих [1-3] полягає у тому, що як технологічні параметри передбачається використати не однорідний розподіл фізико-механічних властивостей зміцнених шарів контактуючих тіл, а – градієнтний їх розподіл.

Варіаційна постановка задачі аналізу контактної взаємодії зміцнених тіл

На розвиток відомих підходів [4] у роботі пропонується розширена варіаційна постановка задачі аналізу КВД та НДС контактуючих тіл. При цьому узагальнюється формулювання на основі теорії варіаційних нерівностей. Тобто розв'язок цієї задачі відшукується як мінімум функціоналу I повної енергії системи контактуючих тіл на множині пружних переміщень U , що задовольняють умовам непроникнення тіл одне в одне:

$$J(u(P)) \rightarrow \min, \quad (8)$$

$$\delta(u) \leq \Delta(P). \quad (9)$$

Тут δ – актуальний зазор між контактуючими тілами під навантаженням, Δ – початковий зазор між ними.

Співвідношення (8), (9) містять параметричні залежності від узагальнених параметрів P , що відрізняє їх від відомих постановок [4].

Вплив варійованих проєктно-технологічних параметрів дискретно-континуального зміцнення на напружено-деформований стан контактуючих тіл

Звернемося до тестового варіанту застосування дискретно-континуального методу зміцнення. Із контактуючих макродеталей виокремлено презентаційний фрагмент (рис. 1).

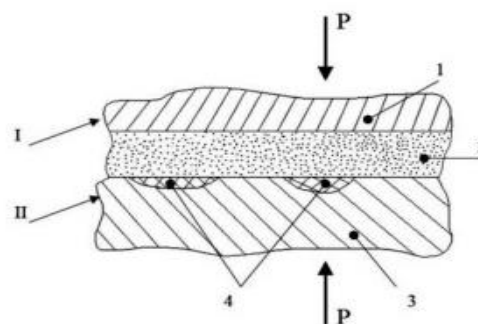


Рис. 1. Схема контактної взаємодії деталей: I – деталь з алюмінієвого сплаву, зміцнена шляхом гальвано-плазмового перетворення поверхні зі створенням корундового шару (2), II – деталь (основний матеріал – сталь, чавун (3)), зміцнена методом дискретного зміцнення (дискретно-зміцнена зона (4)) [1-3]

Цей фрагмент містить, з одного боку, алюмінієву деталь із вирошеним поверхневим шаром Al_2O_3 методом мікродугового оксидування. З іншого боку, у системі присутня деталь, зміцнена шляхом індентації в основний матеріал (сталь, чавун) високоміцних зон (високолегована сталь, твердий сплав тощо). На виокремлений фрагмент (зовнішня неконтактна поверхня) діє навантаження 100 МПа.

Дослідження поведінки фрагменту сформованого функціонально-градієнтного (ФГ) матеріалу здійснено на моделі, наведеній на рис. 2, 3. Тут модуль пружності $E_2 = 10 \cdot 10^{10}$ Па, а варійований модуль пружності – $E_1 = [7; 15; 20; 17; 14; 11; 10.5; 10] \cdot 10^{10}$ Па. Модуль пружності ФГ матеріалу оксиду алюмінію змінюється за товщиною лінійно (див. рис. 2).

Результати аналізу НДС цього фрагменту – на рис. 4-6.

У зоні контактування відбувається нерівномірне деформування контактуючих поверхонь – т. з. « δ -ефект» [1-3].

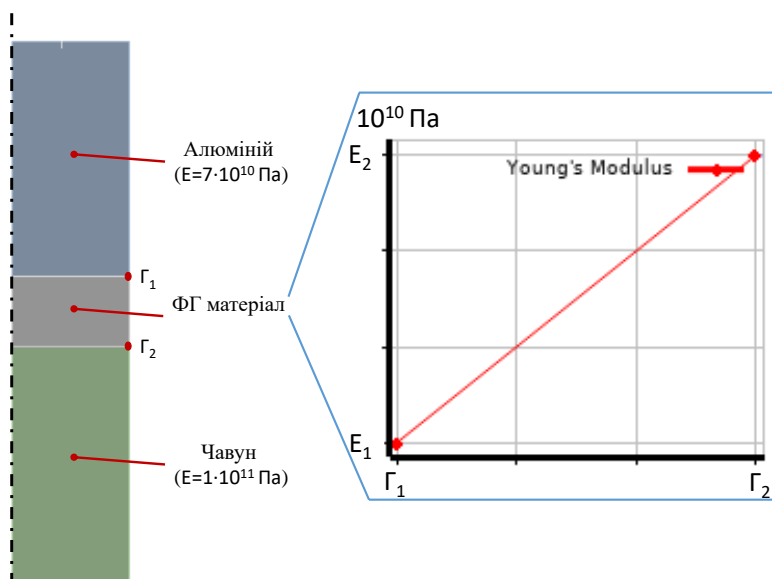


Рис. 2. Геометрія та характеристики досліджуваного фрагменту

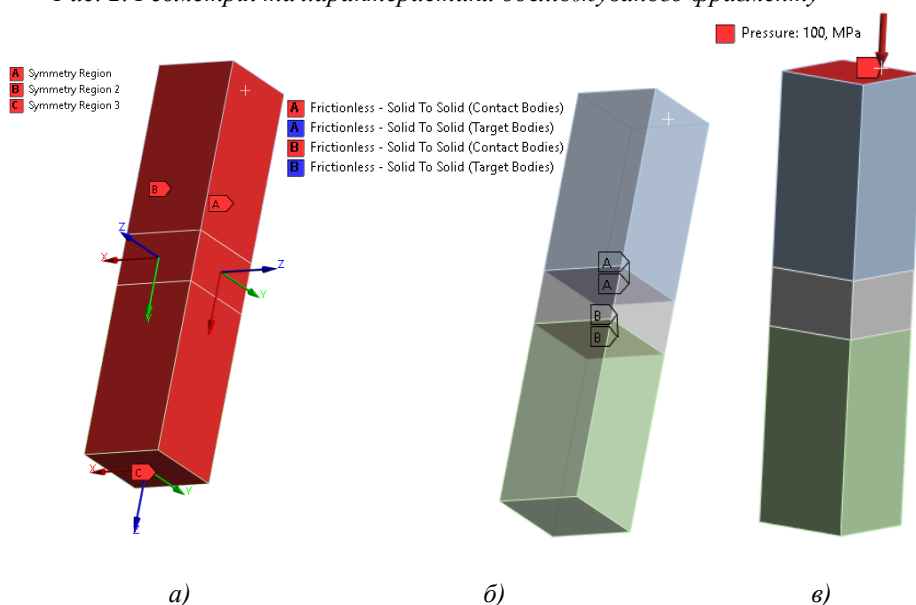


Рис. 3. Граничні умови для досліджуваного фрагменту:

а – 3 площини симетрії; б – 2 контактних пари (frictionless, жорсткість = 10^{15} Н/м³); в – навантаження

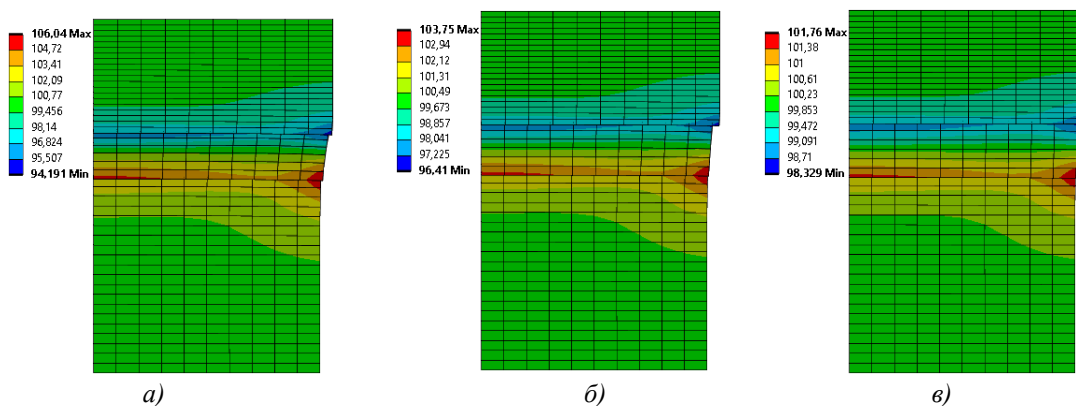


Рис. 4. Аналіз НДС досліджуваного фрагменту: а – еквівалентні напруження при $E_1=7 \cdot 10^{10}$ Па; б – еквівалентні напруження при $E_1=8 \cdot 10^{10}$ Па; в – еквівалентні напруження при $E_1=9 \cdot 10^{10}$ Па

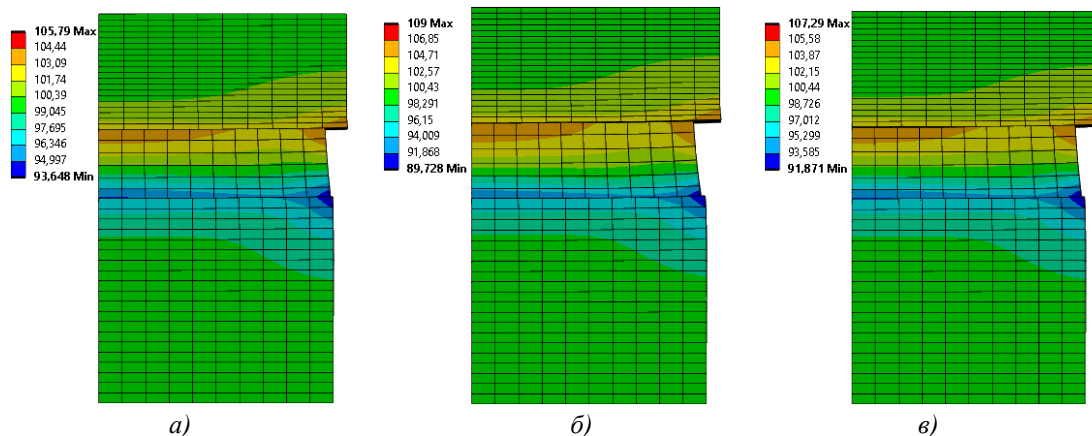


Рис. 5. Аналіз НДС досліджуваного фрагменту:

а – еквівалентні напруження при $E_1=15 \cdot 10^{10}$ Па; б – еквівалентні напруження при $E_1=20 \cdot 10^{10}$ Па; в – еквівалентні напруження при $E_1=17 \cdot 10^{10}$ Па

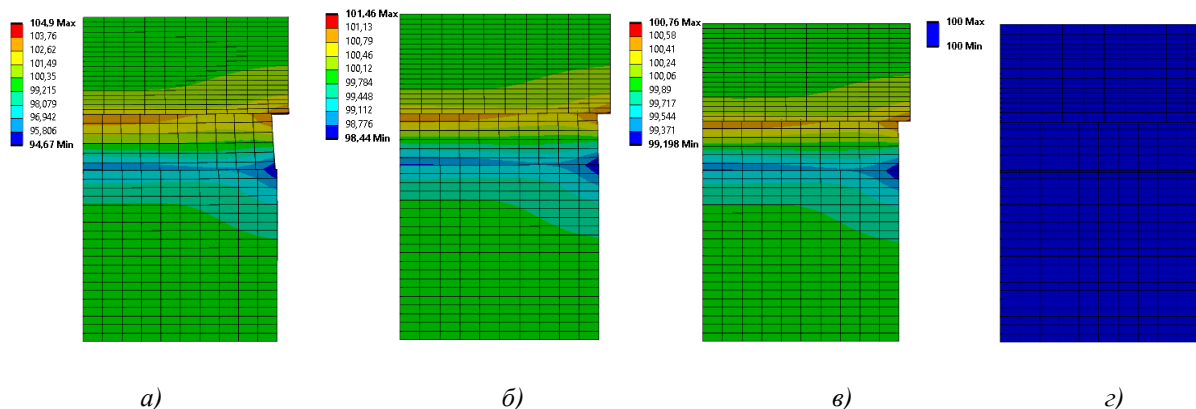


Рис. 6. Аналіз НДС досліджуваного фрагменту:

а – еквівалентні напруження при $E_1=14 \cdot 10^{10}$ Па; б – еквівалентні напруження при $E_1=11 \cdot 10^{10}$ Па; в – еквівалентні напруження при $10,5 \cdot 10^{10}$ Па; г – еквівалентні напруження при $E_1=10^{11}$ Па

На рис. 7 – залежність зміни розмаху відносних еквівалентних напружень $((\sigma_{max} - \sigma_{min})/100)$ від відносного модуля пружності $(E/E_{чавун})$

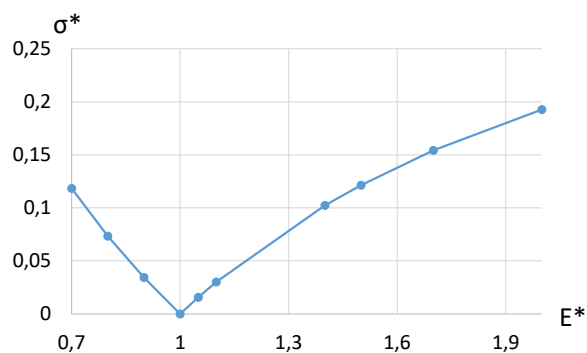


Рис. 7. Залежність зміни розмаху відносних еквівалентних напружень $((\sigma_{max} - \sigma_{min})/100)$ від відносного модуля пружності $(E/E_{чавун})$

Таким чином, спостерігається деякий «оптимум» еквівалентних напружень при варіюванні відносного модуля пружності $E/E_{чавун}$.

Висновки

У ході досліджень розроблені, здійснені та отримані такі складові результати:

1. Загальні підходи до порівняльного аналізу методів дослідження впливу мікроструктури, фізико-механічних властивостей матеріалів зміцнених шарів на контактну взаємодію і напружено-деформований стан системи дискретно-континуально зміцнених тіл.

2. Узагальнені мікромакромоделі для визначення сумісного впливу конструктивних та технологічних чинників, мікроструктури, фізико-механічних властивостей матеріалів зміцнених шарів на контактну взаємодію і напружено-деформований стан представницьких фрагментів системи дискретно-континуально зміцнених тіл.

3. Результати аналізу сумісного впливу конструкторських та технологічних чинників, мікроструктури, фізико-механічних властивостей матеріалів зміцнених шарів на контактну взаємодію і напружено-деформований стан тестових представницьких фрагментів системи дискретно-континуально зміцнених тіл.

При цьому встановлено суттєвий вплив властивостей зміцнюваних шарів на міцність контактуючих тіл.

Робота здійснена у рамках виконання Project EU #3055 EURIZON “Combined technologies of metallic surface modification by micro-arc oxidation and boriding for critical machine parts with high contact loads” та проекту Національного фонду досліджень України «Дослідження та розробка пристрою для відновлення елементів військової техніки шляхом дискретно-континуального зміцнення конструкцій» за реєстраційним номером №2023.04/0036.

Список літератури:

1. Моїсєєв С. В. Розроблення проривних технологій зміцнення елементів турбодетандерних установок / С.В. Моїсєєв, М. К. Новіков, А. В. Бурняшев, Г. В. Паккі, М.А. Ткачук, Г. І. Львов, С. О. Кравченко, С. М. Подреза // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР. – 2023. – № 1. – С. 53-67.
2. Ткачук М.М. Концептуальні основи дискретно-континуального зміцнення елементів двигунів та турбодетандерних установок / М.М. Ткачук, А.В. Грабовський, М.А. Ткачук, А.П. Марченко, С.О. Кравченко // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2023. – №1. – С. 49-54.
3. Tkachuk M. Substantiating promising technical solutions for turbo-expander power plants based on the research into working processes and states / M. Tkachuk, G. Lvov, S. Kravchenko, S. Moiseyev, M. Novikov, A. Burniashev, G. Pakki, S. Podrieza // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2023. – vol. 4, 7(124), 98–105.
4. Ткачук М. М. Контактна механіка тіл із урахуванням нелінійних властивостей поверхневих та проміжних шарів: монографія / М. М. Ткачук. – Видання друге. – Дніпро: Видавець Обдмко Ольга Станіславівна. – 2023. – 255 с.
5. Firstov S.A. Hardening in the Transition to Nanocrystalline State in Pure Metals and Solid Solutions (Ultimate Hardening) / S.A. Firstov, T.G. Rogul, O.A. Shut // Powd.Met.and Met.Ceram. – 2018. – N 3-4. – P. 161-174.
6. Tkachenko V.G. Dislocation mechanisms and strengthening methods in metal crystals / V.G. Tkachenko / - Kyiv : Akadempriodyka. – 2021. - 298 p.
7. Subbotina V. Structure and properties of microarc oxide coatings on high-temperature aluminum alloy. / V. Subbotina, O. Sobol // Machines. Technologies. Materials. 2020. Vol. 14, Vur. 6, pp. 247-250.
8. Субботіна В.В. Електрична міцність оксидних покриттів, сформованих методом мікродугового оксидування / В.В. Субботіна, В.В. Білозеров, О.В. Соболю // Перспективні технології та прилади. – 2020. – №16. – С. 134-140.
9. Nemyrovskiy Ya. Technical-Economic Aspects of the Use of Technological Process of Deforming Broaching / Ya. Nemyrovskiy, E.Posvyatenko // DSMIE 2019, pp. 238-247.
10. George E.P. High-entropy alloys / E.P. George, D. Raabe, R.O. Ritchie // Nat Rev Mater 2019. – v. 4. – P. 515–534.
11. Ovid'ko I.A. Review on

superior strength and enhanced ductility of metallic nanomaterials / I.A. Ovid'ko, R.Z. Valiev, Y.T. Zhu // Progress in Materials Science. 2018. Vol. 94. Pp. 462-540.
12. Ming K. Strength and ductility of CrFeCoNiMo alloy with hierarchical microstructures / K.Ming, X.Bi, J.Wang // International Journal of Plasticity, 2019. Pp. 1-14.
13. Yastrebov V.A. The Elastic Contact of Rough Spheres Investigated Using a Deterministic Multi-Asperity Model / V.A. Yastrebov // Journal of Multiscale Modelling (2019), 10(1):1841002.
14. Papangelo A., Ciavarella, M.. Viscoelastic normal indentation of nominally flat randomly rough contacts / Papangelo A., Ciavarella M. // Int. J. Mech. Sci. V. 211, 2021.
15. Subbotina V.V. Use of the method of micro-arc plasma oxidation to increase the antifriction properties of the titanium alloy surface / V.V. Subbotina, O.V. Sobol', V.V. Belozarov, A.I. Makhatilova, V.V. Shnayder // J. Nano- Electron. Phys. – 2019. – Vol. 11, No 3. – P. 03025.
16. Subbotina V.V. Al-Qawabah Increase of the α -Al₂O₃ phase content in MAO-coating by optimizing the composition of oxidized aluminum alloy / V.V. Subbotina, U.F. Al-Qawabeha, O.V. Sobol', V.V. Belozarov, V.V. Schneider, T.A. Tabaza, S.M. // Funct. Mater. – 2019. – Vol. 26 (4). – P. 752-758.
17. Subbotina V. Determination of influence of electrolyte composition and impurities on the content of α -Al₂O₃ phase in MAO-coatings on aluminum / V.V. Subbotina, U.F. Al-Qawabeha, O.V. Sobol', V.V. Belozarov, V.V. Schneider, T.A. Tabaza, S.M. // Eastern-european journal of enterprise technologies. – 2019. – Vol. 6. – № 12 (102). – P. 6–13.
18. Subbotina V. Al-Qawabah, T.A. Tabaza, S.M. Al-Qawabah, V. Shnayder. A study of the electrolyte composition influence on the structure and properties of mao coatings formed on AMG6 alloy / V. Subbotina, O. Sobol, V. Belozarov, S.M. Al-Qawabah, T.A. Tabaza, S.M. Al-Qawabah, V. Shnayder. // Eastern-european journal of enterprise technologies. – 2020. – Vol. 3. – № 12(105). – P. 6–14.
19. Subbotina V. A study of the phase-structural engineering possibilities of coatings on D16 alloy during micro-arc oxidation in electrolytes of different types / V. Subbotina, O. Sobol, V. Belozarov, A. Subbotin, Y. Smyrnova // Eastern-european journal of enterprise technologies. – 2020. – Vol. 4. – № 12 (106). – P. 14–23.
20. Subbotina V. Identification of regularities of formation of the phase-structural state and properties of coatings obtained by micro-arc oxidation of high-strength V95 alloy / V. Subbotina, O. Sobol, V. Belozarov // Eastern-european journal of enterprise technologies. – 2020. – Vol. 6. – № 12 (108). – P. 45–54.
21. Subbotina V. Influence of electrical parameters of the micro-arc oxidation mode on the structure and properties of coatings / V. Subbotina, V. Bilozarov, O. Subbotin, O. Barmin, S. Hryhorieva, N. Pysarska // Functional materials, 2022. – Vol. 29. – P. 456-461.
22. Subbotina V. Investigation of the influence of electrolyte composition on the structure and properties of coatings obtained by microarc oxidation / V. Subbotina, V. Bilozarov, O. Subbotin, O. Barmin, S. Hryhorieva, N. Pysarska // Physics and chemistry of solid state this link is disabled, 2022, Vol. 23, Iss. 2. – P. 380–386.

Bibliography (transliterated):

1. Moiseyev S. V., Novikov M. K., Burnyashev A. V., Pakki H. V., Tkachuk M. A., Lvov H. I., Kravchenko S. O., Podryeza S. M. (2023), “Development of breakthrough technologies for strengthening of turbo-expander plant elements”, Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Mechanical engineering and CAD. [Rozroblennya proryvnykh tekhnolohiy zmitsnennya elementiv turbodetandernykh ustanovok. Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPi». Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR] 1, 53-67.
2. Tkachuk, M.M. Grabovskyy, A.V., Tkachuk, M.A., Marchenko, A.P.,

- Kravchenko, S.O. (2023), "Conceptual bases of discrete-continuous strengthening of elements of engines and turbo-expander units", *Internal combustion engines [Kontseptual'ni osnovy dyskretno-kontynual'noho zmitsnennya elementiv dryhunyv ta turbodetander-nykh ustanovok, Dvyhuny vnutrishn'oho zhoryannya]* 1, 49-54. 3. Tkachuk, M., Lvov, G., Kravchenko, S., Moiseiev, S., Novikov, M., Burniashev, A., Pakki, G., Podrieza, S. (2023). Substantiating promising technical solutions for turbo-expander power plants based on the research into working processes and states. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 4, 7(124), 98–105. 4. Tkachuk, M. M. (2023) "Contact mechanics of bodies taking into account nonlinear properties of surface and intermediate layers" [Kontaktna mekhanika til iz urakhuvannyam neliniynykh vlastyvostey pov-erkhnevyykh ta promizhnykh shariv] / Publisher Obdymko Olga Stanislavivna, Dnipro. 255 p. 5. Firstov S.A., Rogul T.G., Shut O.A. (2018) *Hardening in the Transition to Nanocrystalline State in Pure Metals and Solid Solutions (Ultimate Hardening)*. *Powd.Met.and Met.Ceram.* 3-4, 161-174. DOI:10.1007/s11106-018-9964-2. 6. Tkachenko, V.G. (2021). "Dislocation mechanisms and strengthening methods in metal crystals". *Akademperiodyka*, Kyiv. 298 p. doi: <https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.439.298>. 7. Subbotina, V., Sobol, O. (2020). "Structure and properties of microarc oxide coatings on high-temperature aluminum alloy". *Machines. Technologies. Materials.* Vol. 14, 6, 247-250. 8. Subbotina, V.V., Bilozero, V.V., Sobol, O.V. (2020), "Electrical strength of oxide coatings formed by the method of micro-arc oxidation", *Promising technologies and devices [Elektrychna mitsnist' oksydneykh pokrytyv, sformovanykh metodom mikroduhovoho oksyduvannya. Perspektivni tekhnolohiyi ta pryklady]* 16, 134-140. <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2020-16-19> 9. Nemyrovskiy, Ya., Posvyatenko, E. (2019) "Technical-Economic Aspects of the Use of Technological Process of Deforming Broaching". *DSMIE*, pp. 238-247. DOI:10.1007/978-3-030-22365-6_24. 10. George, E.P., Raabe, D. & Ritchie, R.O. (2019), "High-entropy alloys". *Nat Rev Mater* 4, 515–534. <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0121-4>. 11. Ovid'ko, I.A., Valiev, R.Z., Zhu, Y.T. (2018) "Review on superior strength and enhanced ductility of metallic nanomaterials". *Progress in Materials Science*. Vol. 94. Pp. 462-540. DOI:10.1016/J.PMATSCI.2018.02.002. 12. Ming, K., Bi, X., Wang, J. (2019) Strength and ductility of CrFeCoNiMo alloy with hierarchical microstructures. *International Journal of Plasticity*, 113, 1-14. DOI:10.1016/J.IJPLAS.2018.10.005. 13. Yastrebov, V.A. (2019) "The Elastic Contact of Rough Spheres Investigated Using a Deterministic Multi-Asperity Model". *Journal of Multiscale Modelling*, 10(1):1841002. DOI: 10.1142/S1756973718410020. 14. Papangelo, A., Ciavarella, M. (2021) "Viscoelastic normal indentation of nominally flat randomly rough contacts". *Int J Mech Sci*, V. 211. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106783>. 15. Subbotina, V.V., Sobol', O.V., Belozero, V.V., Schneider, V.V., Tabaza, T.A., Al-Qawabaha, S.M. (2019) "Increase of the α -Al₂O₃ phase content in MAO-coating by optimizing the composition of oxidated aluminum alloy" *Funct. Mater.* 26 (4), 752-758. 17. Subbotina, V., Al-Qawabaha, U.F., Belozero, V., Sobol', O., Subbotin, A., Tabaza, T.A., Al-Qawabaha, S.M. (2019) "Determination of influence of electrolyte composition and impurities on the content of α -Al₂O₃ phase in MAO-coatings on aluminum". *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 6, 12 (102), 6–13. 18. Subbotina, V., Sobol, O., Belozero, V., Al-Qawabaha, S.M., Tabaza, T.A., S.M. Al-Qawabaha, V. Shnayder. (2020). "A study of the electrolyte composition influence on the structure and properties of mao coatings formed on AMG6 alloy". *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 3, 12(105), 6–14. 19. Subbotina, V., Sobol, O., Belozero, V., Subbotin, A. Smyrnova, Y. (2020) "A study of the phase-structural engineering possibilities of coatings on D16 alloy during micro-arc oxidation in electrolytes of different types // Eastern-european journal of enterprise technologies. 4, 12 (106), 14–23. 20. Subbotina, V., Sobol, O., Belozero, V. (2020). "Identification of regularities of formation of the phase-structural state and properties of coatings obtained by micro-arc oxidation of high-strength V95 alloy". *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 6, 12 (108), 45–54. 21. Subbotina, V., Bilozero, V., Subbotin, O., Barmin, O., Hryhorieva, S., Pysarska, N. (2022), "Influence of electrical parameters of the micro-arc oxidation mode on the structure and properties of coatings". *Funct. Mater.* 2022; 29 (3): 456-461. <https://doi.org/10.15407/fm29.03.456>. 22. Subbotina, V., Bilozero, V., Subbotin, O., Barmin, O., Hryhorieva, S., Pysarska, N. (2022), "Investigation of the influence of electrolyte composition on the structure and properties of coatings obtained by microarc oxidation". *Physics and chemistry of solid statethis link is disabled*, 23, 2, 380–386.

Надійшла до редакції 01.07.2024 р.

Ткачук Микола Миколайович - доктор техн. наук, старший дослідник, провідний науковий співробітник кафедри «Інформаційні технології і системи колісних та гусеничних машин ім. О. О. Морозова» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; e-mail: m.tkachuk@tmm-sapr.org. <http://orcid.org/0000-0002-4753-4267>.

Гравовський Андрій Володимирович – доктор техн. наук, старш. науков. співр., провідний науковий співробітник кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; e-mail: andrej8383@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-6116-0572>.

Новіков Максим Костянтинович – головний інженер, заступник Голови Правління ПрАТ «ТУРБОГАЗ», Харків, Україна; e-mail: novikovmaxim1980@ukr.net.

Ткачук Микола Анатолійович – доктор техн. наук, проф., професор кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: tma@tmm-sapr.org; <https://orcid.org/0000-0002-4174-8213>.

Кравченко Сергій Олександрович – доктор техн. наук, старш. науков. співр., провідний науковий співробітник кафедри «Двигуни та гібридні енергетичні установки» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: dvs.khpi2016@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-2882-7814>.

Льозний Олег Сергійович – аспірант кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: s1708@tmmsapr.org.

EFFECTS IN DISCRETE AND CONTINUOUS STRENGTHENING OF MACHINES ELEMENTS

M.M. Tkachuk, A.V. Grabovskiy, M.K. Novikov, M.A. Tkachuk, S.O. Kravchenko, O.S. Loznyi

The work describes approaches to problem solving of operational and effective improvement of the technical and tactical characteristics of military and civilian machines: tanks, armored vehicles, diesel locomotives, turbo-expander power plants, autonomous power plants of strategic objects, etc. For this purpose, fundamentally new methods of strengthening of contacting machines

elements are being developed. These methods combine the advantages of discrete and continuous strengthening methods, which have largely exhausted their capabilities by now. Qualitative features and advantages of proposed discrete-continuous strengthening methods require effective implementation. We are talking about the justification of progressive technical solutions based on the criteria of strength and durability. For this purpose, the methodology of multi-criteria synthesis in the expanded space of design and technological parameters will be improved. In addition, as a basis for substantiating advanced technological solutions, a set of related problems of analysis of the stress-strain state, friction and wear is formed. Therefore, based on the improved system approach, a much higher level of strength and durability of the reinforced structural parts is achieved than with traditional methods. The results of test problems solving are illustrated. In the result, micro-macromodels are generalized to determine the joint influence of structural and technological factors, microstructure, physical and mechanical properties of materials of reinforced layers on the contact interaction and stress-strain state of representative fragments of the system of discrete-continuous reinforced bodies. The results of analysis of combined influence of structural and technological factors, microstructure, physical and mechanical properties of materials reinforced layers have been established on the contact interaction and stress-strain state of test representative fragments of the system of discrete-continuously reinforced bodies. At the same time, a significant influence of reinforced layers properties was established on strength of contacting bodies.

Keywords: discrete and continuous strengthening; strength; stress-strain state; contact interaction; theory of variational inequalities.