

integrated application of computer modeling, additive technologies, and microstructure control of alloys, which are considered essential for ensuring sustainability in this field. It is noted that the implementation of the proposed approach enables the minimization of waste, improvement of mechanical properties of components, enhancement of energy efficiency in manufacturing processes, and reduction of the product development life cycle for new designs. Research in this area opens up new prospects for realizing circular economy principles and creating more environmentally responsible production in engine manufacturing. Technological casting processes for producing the cylinder of a two-stroke engine were modeled to analyze crystallization characteristics and phase transformations during the cooling of the casting. As a result of numerical simulations, data were obtained regarding mold filling, temperature field distribution, cooling and solidification sequences, and the kinetics of phase transitions, with an assessment of the areas prone to shrinkage-related defects. Control over these processes made it possible to prevent crystal growth irregularities in the transition zones of the casting, thus mitigating their negative impact on the mechanical properties of the component during operation. Conclusions were drawn on the application of simulation within PLM systems for automating the improvement of casting technologies. The integration of additive manufacturing into technological stages of shape formation in ICE casting production was also examined. It was determined that the implementation of these technologies in engine manufacturing allows for the creation of components with optimized designs that meet the requirements of sustainable development. As a model tooling case, a printed cast cylinder part was developed, and the key parameters of the 3D printing process were presented. Directions for future research on the use of additive technologies were outlined. The study also highlights the enhancement of microstructure control using machine learning and artificial intelligence as a promising area for future research in sustainable manufacturing. The paper proposes fundamental steps for a methodology for the comprehensive application of Industry 4.0 technologies in the sustainable production of cast ICE components. An interaction algorithm between major production stages was developed, placing the concept of the digital twin at the center as the core management unit. It is concluded that the proposed approach enables systematic improvements of technological processes, ensuring production adaptability to sustainable development challenges through the comprehensive integration of Industry 4.0 technologies and laying the foundation for the transition to Industry 5.0.

Key words: Industry 4.0 technologies; cast ICE components; two-stroke engine cylinder; design; computer modeling; additive technologies; alloy microstructure control.

УДК 539.3

DOI: 10.20998/0419-8719.2025.1.12

М.М. Ткачук, А.В. Грабовський, М.А. Ткачук, С.О. Кравченко, Г.В. Ткачук, О.С. Льозний

ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНІ МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ЗМІЦНЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ МАШИН ВІЙСЬКОВОГО ТА ЦИВІЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

У роботі описане вирішення актуальної та важливої науково-прикладної проблеми – розроблення методів та засобів дискретно-континуального зміцнення при відновленні елементів військової та техніки для стратегічних галузей народного господарства. Робота покликана до реалізації нагальною необхідністю у відновленні зразків військової та важливої цивільної техніки у короткі терміни та з високою інтенсивністю. Ця техніка в умовах інтенсивних навантажень при експлуатації та виконанні бойових завдань в умовах ведення бойових дій досить швидко зношується у результаті контактної взаємодії та взаємного відносного руху. При цьому процеси навантаження, контактування, тертя та зношування розвиваються за прогресуючим сценарієм протягом терміну експлуатації. А це призводить до виходу із ладу цінних об'єктів. Для усунення цих проблемних ситуацій розроблено основи технології та засоби дискретно-континуального зміцнення. Вона полягає у дискретній обробці однієї із контактуючих деталей та континуальній – іншої. Здійснені дослідження процесів і станів при контактній взаємодії зміцнених деталей дали можливість на цій основі створити пристрій, який реалізує технологію дискретного зміцнення та дає можливість визначати раціональні технологічні режими при дискретно-континуальному зміцненні елементів військової та техніки для стратегічних галузей народного господарства. Така установка дає можливість суттєво підвищити твердість, зносостійкість та міцність оброблених деталей конструкцій. Усі ефекти, які призводять до поліпшення технічних характеристик зміцнених таким чином деталей, базуються на ефектах зміни профіля контактуючих поверхонь. Цей профіль набуває пагорбистого характеру. На цих пагорбах відбувається локалізація контактного тиску. Завдяки цьому напруження зміцнюються до матеріалу дискретно зміцнених зон. Враховуючи високі механічні характеристики матеріалу цих зон, відбувається підвищення загальної міцності. Крім того, підвищуються і трибологічні характеристики. Підвищується ККД, збільшується довговічність, знижується тертя у такому з'єднанні.

Ключові слова: військова техніка; техніка для стратегічних галузей; відновлення; дискретно-континуальне зміцнення; напружено-деформований стан; контактна взаємодія; ресурс; мікродугове окислювання; електроіскрове легування; прототип пристрою.

Вступ

В умовах, що склалися в Україні та у світі в цілому, у практичному аспекті відбулася різка зміна умов експлуатації складних технічних об'єктів.

По-перше, це стосується військової техніки: танків, бронемашин, тягачів, автомобілів тощо. У мирних умовах їх ресурс був достатньо великим - десятки років. Це було викликано ощадним режимом

© М.М. Ткачук, А.В. Грабовський, М.А. Ткачук, С.О. Кравченко, Г.В. Ткачук, О.С. Льозний, 2025

ISSN 0419-8719 ДВИГУНИ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ 1'2025

97

їх використання та ретельним дотриманням регламентних робіт за цих обставин. Отже, мало зношувалися елементи найбільш відповідальних систем і агрегатів, зокрема та у першу чергу – двигуни. Проте в умовах бойових дій ці умови порушуються: навантаження різко зростають, а якість технічного обслуговування не завжди може бути належно забезпеченою. Своєю чергою, у цих агрегатах і системах обмежувальними є найбільш навантажені та відповідальні компоненти. Так, у двигунах – це колінчасті вали, поршні, гільзи циліндрів тощо. Таким чином, забезпечивши відновлення властивостей саме цих компонентів, можна забезпечити досягнення заданих або підвищених тактико-технічних характеристик об'єктів військової техніки в цілому.

Слід особливо зазначити, що саме ремонт та відновлення військової техніки (у т. ч. – у польових умовах) є гарантом підтримання боєздатності військ.

По-друге, це стосується об'єктів стратегічних галузей народного господарства: теплових та турбодетандерних електростанцій, двигунів тепловозів, установок безперебійного живлення важливих об'єктів тощо. Для них у немирних умовах стає характерним «рваний» нерегулярний режим навантажень із різким їх накидами та роботою на підвищених нестационарних навантаженнях.

Це також висуває на передній план проблему забезпечення підвищеного ресурсу, у першу чергу – основних компонентів: роторів і валів турбін, циліндрів та поршнів двигунів тощо.

Таким чином, у кінцевому підсумку задача зводиться до підвищення ресурсу контактуючих під навантаженням та при взаємному русі елементів конструкцій.

Відомі технології досягнення цієї мети (азотування, ціанування, іонна імплантація, лазерне оброблення тощо) значною мірою досягли «стелі можливостей». Більш того, ці технології дуже чутливі до порушення штатних режимів експлуатації найбільш навантажених елементів. Тому потрібен пошук альтернативних технологій. Серед них перспективними є авторські розробки [1]: 1) мікродугове оксидування та 2) дискретне електроіскрове легування. Подальшим розвитком цих технологій є авторські розробки, які полягають у поєднанні цих технологій. При цьому одна із контактуючих у парі деталей зміцнюється за першою технологією, а друга – за іншою із перелічених. Цим самим різко підвищується загальний ефект, який перевищує суму ефектів від залучення кожної із технологій, застосованих окремо. При цьому різко розширюється простір параметрів та режимів, у якому здійснюється пошук найбільш прогресивних конструктивно-технологічних

рішень. Також важливу роль починають відігравати установки, інструменти та технологічне оснащення, які цю розроблену технологію реалізують.

Таким чином, виникає прикладна наукова проблема визначення загальної методології, раціональних параметрів та створення конструкції пристрою, який реалізує розроблену технологію дискретно-континуального зміцнення, а також дослідження процесів і станів дискретно-континуального зміцнення елементів конструкцій задля обґрунтування раціональних режимів зміцнення. Це, своєю чергою, передбачає дослідження із залученням та розвитком математичних моделей і чисельних методів аналізу процесів і станів у контактуючих зміцнених елементах конструкцій. Окрім того, необхідні експериментальні дослідження із застосуванням розробленого пристрою для зміцнення деталей. Переважна увага – якраз пристрою для дискретного зміцнення, оскільки саме у цьому процесі – більша варіативність режимів і параметрів. Отже, він і визначає в основному кінцевий ефект.

Саме на основі зазначених досліджень можуть бути установлені закономірності впливу конструктивно-технологічних параметрів та режимів на характеристики напружено-деформованого стану, контактної взаємодії, тертя та зношування зміцнюваних елементів військової та техніки для стратегічних галузей народного господарства. А вже на цій основі – розробляється прототип пристрою для дискретного зміцнення у парі дискретно-континуально зміцнюваних елементів конструкцій.

Зазначені аспекти склали напрямки розробок та досліджень, описаних у роботі.

Аналіз методів зміцнення та дослідження напружено-деформованого стану контактуючих деталей конструкцій

Проблема, яка сформована, має декілька аспектів. Серед них – власне методи зміцнення контактуючих деталей конструкцій, а також – дослідження їх напружено-деформованого стану.

Дійсно, на теперішній час технології зміцнення елементів конструкцій досягли суттєвого розвитку [1, 2]. Вони дають можливості суттєво поліпшити міцність, трибомеханічні характеристики, довговічність деталей, виготовлених із традиційних матеріалів (зокрема, чорні та кольорові метали) [3–12]. У першу чергу це – технології, пов'язані або із енергетично-силовим впливом на поверхневі шари матеріалу, або із нанесенням різного роду покриттів (азотування, ціанування, загартування, вакуумно-дугове покриття тощо). Окрім позитивного впливу на поверхневі шари матеріалу деталей, вони спричиняють певні проблеми: із-за неоднорідності фізико-механі-

чних властивостей цих шарів та покриттів за глибиною та порівняно із основним матеріалом при навантаженні зміцнених деталей, а особливо – при підвищених чи ненормативних сплесках навантажень, потенційно може відбуватися їх розтріскування, відставання, лущення, руйнування тощо.

Як альтернатива цим технологіям – не нанесення, а вирощування покриттів на поверхні матеріалів. Наприклад, це формування шарів корундової кераміки при мікродуговому оксидуванні деталей із алюмінієвих сплавів [13–22]. Перевагою цього способу є природна адгезія та поступовий плавний перехід властивостей у корундовому шарі по товщині від основного матеріалу до зовнішньої поверхні. При цьому розміри деталі зберігаються, а властивості (корозійна стійкість, твердість, міцність, зношувальні властивості) – різко зростають.

Іншою альтернативою переліченим методам є технології дискретного зміцнення. Замість нанесення суцільних шарів матеріалу (або їх оброблення) здійснюється нанесення множини зон зміцнення. Наприклад, це нанесення покриттів через трафарет, імпульсне оброблення лазерним променем, імплантація алмазних зерен тощо [1]. У результаті матеріал цих зміцнених зон у першу чергу сприймає навантаження, визначає процеси тертя і зношування тощо. Разом із тим у силу різко відмінних властивостей матеріалів зон дискретного зміцнення та основного матеріалу можуть виникнути проблемні ситуації на границях між ними. Для їх усунення розроблені нові технології дискретного зміцнення шляхом електроіскрового легування. У моменти імпульсного розряду великої інтенсивності між катодом і анодом виникає електрична дуга. Матеріал електрода (наприклад, високолегована сталь) переноситься у рідкому вигляді на деталь, індентується у неї, переміщується при цьому із основним матеріалом та формує множину зон дискретного зміцнення із властивостями, що набагато вищі за властивості основного матеріалу.

Як альтернатива цим двом прогресивним методам зміцнення розроблено гібридний метод, який поєднує у рамках однієї пари контактуючих деталей і континуальне зміцнення (першої деталі), і – дискретне (іншої) [1,2,23,24]. Це рішення створює принципові переваги перед випадками застосування тільки однієї із технологій. Проте виникають певні проблеми. Зокрема, оскільки простір варіюваних параметрів розширюється порівняно із випадками застосування «ординарних» технологій, то їхні оптимальні режими та параметри перестають бути такими у силу взаємовпливу чинників із різних груп (належать до різних технологій). Тому потрібні до-

даткові дослідження для визначення закономірностей такого впливу та розроблення відповідних рекомендацій. Крім того, необхідні чисельні та лабораторні дослідження, спрямовані на розроблення пристрою для дискретного зміцнення, який дає можливість працювати і у обладнаних майстернях, і у польових умовах (тобто, наприклад, безпосередньо у військах).

Слід зазначити, що у роботах [1, 2, 23–25] розроблено та описано підходи до аналізу напружено-деформованого стану дискретно-континуально зміцнених тіл. Разом із тим ці дослідження потребують розширення та продовження.

Таким чином, сформована проблема, яка потребує математичного та чисельного дослідження напружено-деформованого стану і контактної взаємодії дискретно-континуально зміцнених елементів конструкцій, а також розроблення та лабораторних досліджень результатів застосування пристрою для їх зміцнення. Такі дослідження та розробки на теперішній час відсутні, а необхідність у їх здійсненні достатньо нагальна. Це зумовлює актуальність вирішення науково-прикладної проблеми, що сформована.

Мета роботи – дослідження процесів і станів при застосуванні та обґрунтування структури і параметрів прототипу установки для дискретного зміцнення при дискретно-континуальному зміцненні елементів військової та техніки для стратегічних галузей народного господарства.

Завдання: 1. Установлення закономірностей впливу параметрів процесів і станів при дискретно-континуальному зміцненні елементів конструкцій, що дає основу для визначення структури параметрів і параметрів технологій дискретного зміцнення деталей конструкцій. 2. Обґрунтування структури і параметрів конструкції пристрою для дискретного зміцнення елементів військової та техніки для стратегічно важливих галузей народного господарства. 3. Визначення параметрів технологічного процесу зміцнення задля забезпечення ресурсу та навантажувальної здатності елементів конструкцій у процесі їх виготовлення, а також відновлення в ході планового та позапланового ремонту.

Саме це створює базу для збереження боєздатності Сил оборони України в умовах інтенсивних уражень військової техніки, а також ресурсу техніки для стратегічних галузей народного господарства.

Загальні підходи до розв’язання проблеми

У цілому можливо виділити такі складові при розв’язанні сформованої проблеми.

1) Удосконалення фізичних, математичних та чисельних моделей напружено-деформованого

стану та контактної взаємодії дискретно-континуально зміцнених елементів конструкцій військової та техніки для стратегічно важливих галузей народного господарства України.

2) Здійснення чисельного моделювання напружено-деформованого стану та контактної взаємодії представницьких елементів дискретно-континуально зміцнюваних фрагментів деталей конструкцій на прикладі системи «алюміній – корундова кераміка – сталь – сталь (чавун)».

3) Аналіз закономірностей впливу параметрів та режимів зміцнення на напружено-деформований стан та контактну взаємодію дискретно-континуально зміцнюваних елементів конструкцій.

4) Розроблення рекомендацій стосовно технологічних режимів дискретного зміцнення.

5) Обґрунтування структури і параметрів пристрою для дискретного зміцнення елементів конструкцій та виготовлення прототипу.

6) Здійснення лабораторних досліджень властивостей деталей, зміцнених із застосуванням розробленого пристрою.

Методологія досліджень полягає у реалізації зазначених напрямків та складових.

Перший із них – створення методологічних основ досліджень. Задля цього застосовується та розвивається підхід на основі методу узагальненого параметричного моделювання процесів і станів у складних механічних системах [1,2].

При цьому формується узагальнений параметричний простір, який об'єднує конструктивні, технологічні та експлуатаційні параметри та режими. На цій основі можливе, з одного боку, визначення чутливості характеристик напружено-деформованого стану та контактної взаємодії до варіювання цих узагальнених параметрів. З іншого боку, це створює основу для цілеспрямованого пошуку прогресивних технічних рішень як технологічного процесу, так і пристрою, що створюється.

Другий напрямок і складова методології досліджень - математична і чисельна модель, які описують напружено-деформований стан і контактну взаємодію фрагментів дискретно-континуально зміцнених деталей конструкцій [1, 2, 23–25].

Для цього розвивається та адаптується варіаційна постановка задачі про контактну взаємодію на основі теорії варіаційних нерівностей. У кінцевому підсумку задача зводиться до проблеми мінімізації енергетичного функціоналу на множині односторонніх обмежень. На відміну від традиційних формулювань, цей функціонал, окрім того, що будується на множині пробних базисних функцій, ще й параметрично залежить від узагальнених параметрів.

Отже, паралельно відбувається пошук екстремумів енергетичного функціоналу та функції якості, побудованої для системи досліджуваних контактуючих тіл. Для дискретизації задачі залучається метод скінченних елементів, за допомогою якого формується задача квадратичного програмування. У ході розв'язання цієї задачі визначаються розподіли контактного тиску та компонент напружено-деформованого стану у представницькому фрагменті дискретно-континуально зміцнених тіл. Враховуючи інтегровану у побудовані моделі параметричну залежність від узагальнених параметрів, це створює можливість для установлення їх впливу, з одного боку, на напружено-деформований стан та контактну взаємодію, а з іншого – на характеристики міцності, тертя та зношування і довговічності.

Саме завдяки зазначеній можливості реалізовуватиметься третя складова – визначення перелічених закономірностей.

І уже на створеній методологічній базі, на основі комплексу досліджень здійснюється обґрунтування прогресивних конструктивно-технологічних рішень, які є основою обґрунтування структури і параметрів самої технології та пристрою, що створюється. Це складає зміст четвертого напрямку [1, 2, 23–25].

П'ятою складовою та напрямком досліджень є лабораторні дослідження властивостей дискретно-континуально зміцнених зразків деталей. Із цією метою визначаються характеристики твердості, тертя і зношуваності на зразках дискретно-континуально зміцнених елементах конструкцій.

Шостою складовою методології досліджень є коригування технічних рішень створеного пристрою для дискретного зміцнювання елементів військової та техніки для стратегічних галузей народного господарства на етапі виготовлення, ремонту та відновлення [25].

Реалізація розробленого підходу до дослідження зміцнених деталей

Удосконалення фізичних, математичних та чисельних моделей напружено-деформованого стану та контактної взаємодії дискретно-континуально зміцнених елементів конструкцій військової та техніки для стратегічно важливих галузей народного господарства України частково описане у роботах [1, 2, 23–25].

Здійснення чисельного моделювання напружено-деформованого стану та контактної взаємодії представницьких елементів дискретно-континуально зміцнюваних фрагментів деталей конструкцій на прикладі системи «алюміній – корундова кераміка – сталь – сталь (чавун)» описане у роботах [1,2].

Зокрема, як зазначено у [2], задача аналізу формується у вигляді

$$L(u, P) = 0, \quad (1)$$

де u - масив змінних стану,

P - масив варійованих параметрів,

а задача синтезу – у вигляді

$$P^*: I(P) \rightarrow extr, \quad (2)$$

де I – деяка функція якості (твердість, напруження, маса тощо).

Там же наведено аналіз закономірностей впливу параметрів та режимів зміцнення на напружено-деформований стан та контактну взаємодію дискретно-континуально зміцнюваних елементів конструкцій.

На цій основі здійснено розроблення рекомендацій стосовно технологічних режимів дискретного зміцнення.

У роботі [25] описано обґрунтування базової структури і параметрів пристрою для дискретного зміцнення елементів конструкцій та виготовлення прототипу.

У цілому у ході виконання попередніх досліджень застосований та розвинений підхід на основі методу узагальненого параметричного моделювання процесів і станів у складних механічних системах. При цьому сформований узагальнений параметричний простір, який об'єднує конструктивні, технологічні та експлуатаційні параметри та режими. На цій основі можливе, з одного боку, визначення чутливості характеристик напружено-деформованого стану та контактної взаємодії до варіювання цих узагальнених параметрів. З іншого боку, це створило основу для цілеспрямованого пошуку прогресивних технічних рішень як технологічного процесу, так і відповідного пристрою. Другий напрямок і складова досліджень – математична і чисельна моделі, які описують напружено-деформований стан і контактну взаємодію дискретно-континуально зміцнених деталей конструкцій. Для цього розвинено та адаптовано варіаційну постановку задачі про контактну взаємодію на основі теорії варіаційних нерівностей. У кінцевому підсумку задачу зведено до проблеми мінімізації енергетичного функціоналу на множині односторонніх обмежень. На відміну від традиційних формулювань, цей функціонал, окрім того, що будується на множині пробних базисних функцій, ще й параметрично залежить від узагальнених параметрів. Отже, як уже зазначалося, паралельно відбувається пошук екстремумів енергетичного функціоналу та функції якості системи контактуючих тіл.

Усі ці попередні розробки та дослідження продовжилися в ході лабораторних досліджень.

Для аналізу температурного впливу на дискретно-континуально зміцнені деталі машинобудівних до розгляду залучається розрахункова модель представницького фрагмента дискретно-континуально зміцнених тіл, описана у роботах [1,2, 23–25]. На рис. 1 – схема досліджуваного фрагмента.

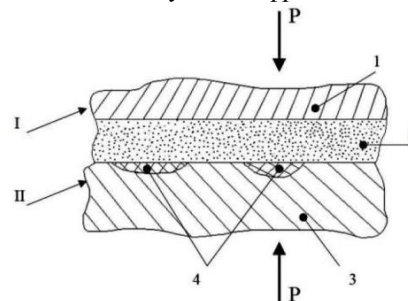


Рис. 1. Схема контактної взаємодії деталей:

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))

На відміну від раніше здійснених досліджень [1,2, 23–25], враховується новий чинник – підвищення температури нагріву T контактуючих деталей та урахування впливу коефіцієнту лінійного температурного розширення α матеріалу зон дискретного зміцнення. Цей коефіцієнт може відчутно відрізнятися від відповідного коефіцієнта основного матеріалу дискретно зміцненого тіла. Отже, це спричиняє зміну мікропрофілю поверхні зміцненого таким способом тіла, а, врешті – впливатиме на умови його контактної взаємодії із континуально зміцненим тілом.

Дослідження зміцнених деталей здійснено на прикладі представницького їх фрагмента (рис. 2).

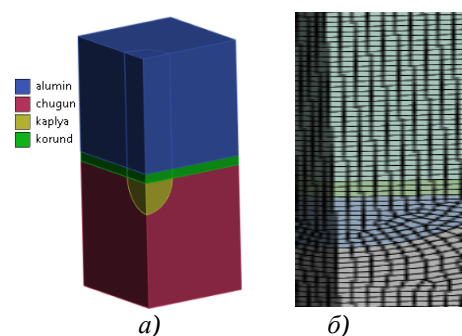


Рис. 2. До дослідження представницького фрагменту (1/4 у силу симетрії):

а – досліджувана геометрія та матеріали;
б – скінченно-елементна модель (640 тис. елементів, 1 млн вузлів)

Силове навантаження – тиск на верхній поверхні, який варіюється і приймає значення: $p=[0,25, 50, 75, 100]$ МПа. Це – перший варійований параметр.

Другий варійований параметр – коефіцієнт температурного розширення сталі $\alpha=[10^{-8}, 5 \cdot 10^{-7}, 10^{-6}, 5 \cdot 10^{-6}, 10^{-5}]$ $1/^\circ\text{C}$.

На рис. 3–4 – характерні залежності розподілів контактної тиску (МПа) та еквівалентних напружень (МПа) від коефіцієнту температурного розширення та прикладеного зовнішнього навантаження.

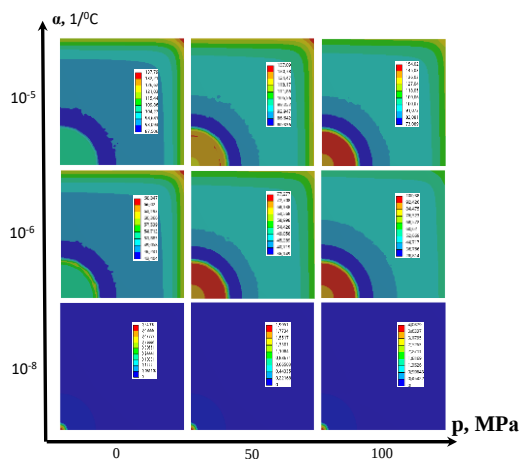


Рис. 3. Залежність розподілів контактної тиску (МПа) від коефіцієнту температурного розширення α та прикладеного зовнішнього навантаження p

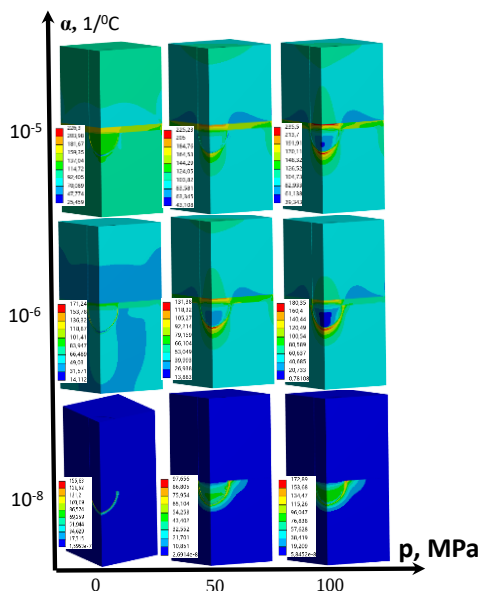


Рис. 4. Залежність розподілів еквівалентних напружень (МПа) від коефіцієнту температурного розширення α та прикладеного зовнішнього навантаження p

При цьому отримані інтегральні залежності контрольованих рівнів контактної тиску та еквівалентних напружень від варійованих параметрів. Разом зі здійсненими раніше дослідженнями [1, 2, 23, 24] це стало підґрунтям для формування рекомендацій стосовно технологічних режимів, а також структури пристрою для здійснення дискретного зміцнення у складів комплексу, який реалізує комбіноване дискретно-континуальне зміцнення елементів конструкцій військової та техніки для стратегічних галузей народного господарства.

На рис. 5 – робочі моменти процесу дискретного зміцнення на розробленій установці.

На рис. 6 – зміцнені фрагменти (корінні та шатунні шийки зміцненого колінчастого валу).

У результаті зміцнення досягнуто відновлення усіх характеристик твердості зміцнюваної деталі.

У результаті розробок створено та отримано:

- удосконалені моделі та методи досліджень напружено-деформованого стану та контактної взаємодії дискретно-континуально зміцнених тіл;
- закономірності змін компонент напружено-деформованого стану елементів дискретно-континуально зміцнених тіл при варіюванні технологічних режимів дискретно-континуального зміцнення;
- рекомендації стосовно обґрунтування конструктивних параметрів пристрою та технологічних режимів дискретно-континуально зміцнених елементів конструкцій;
- структура і параметри пристрою, що створюється задля реалізації технології дискретного зміцнення при ремонті та відновленні елементів військової та техніки для стратегічних галузей народного господарства України;
- прототип пристрою для дискретного зміцнення елементів військової та техніки для стратегічних галузей народного господарства України.

Результати, висновки та рекомендації

1) Розроблена удосконалена математична модель процесів і станів при дискретно-континуальному зміцненні елементів конструкцій, яка відрізняється урахуванням усієї множини варійованих режимів та параметрів. Це дає можливість більш обґрунтованого вибору цих параметрів за критеріями міцності, тертя, довговічності тощо;

2) розроблена нова математична модель процесів і станів має властивість структурної варіативності. Завдяки цьому, на відміну від існуючих моделей, вона може бути застосована для аналізу напружено-деформованого стану та контактної взаємодії при зміні способу зміцнення;

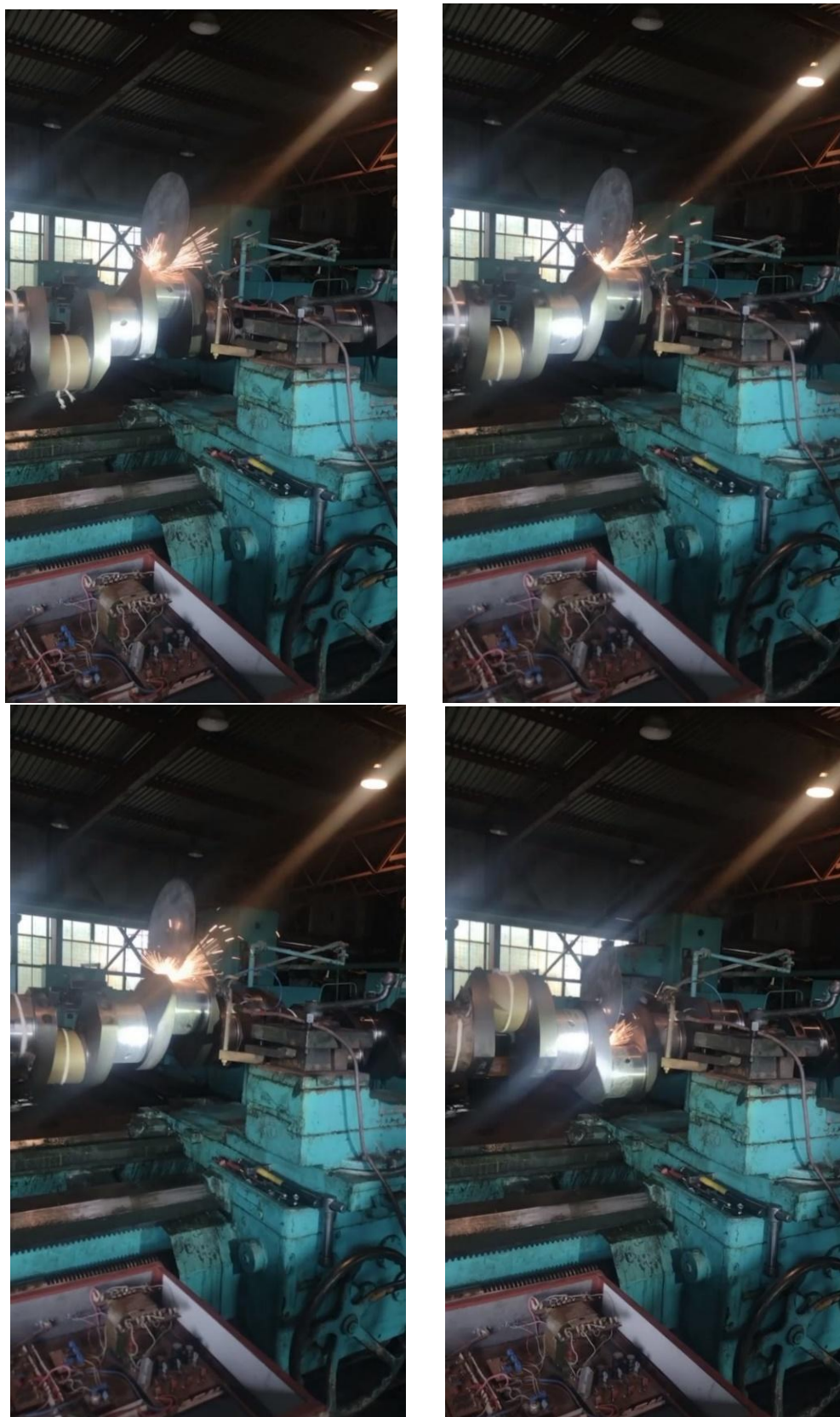


Рис. 5. Робочі моменти процесу дискретного зміцнення на розробленій установці

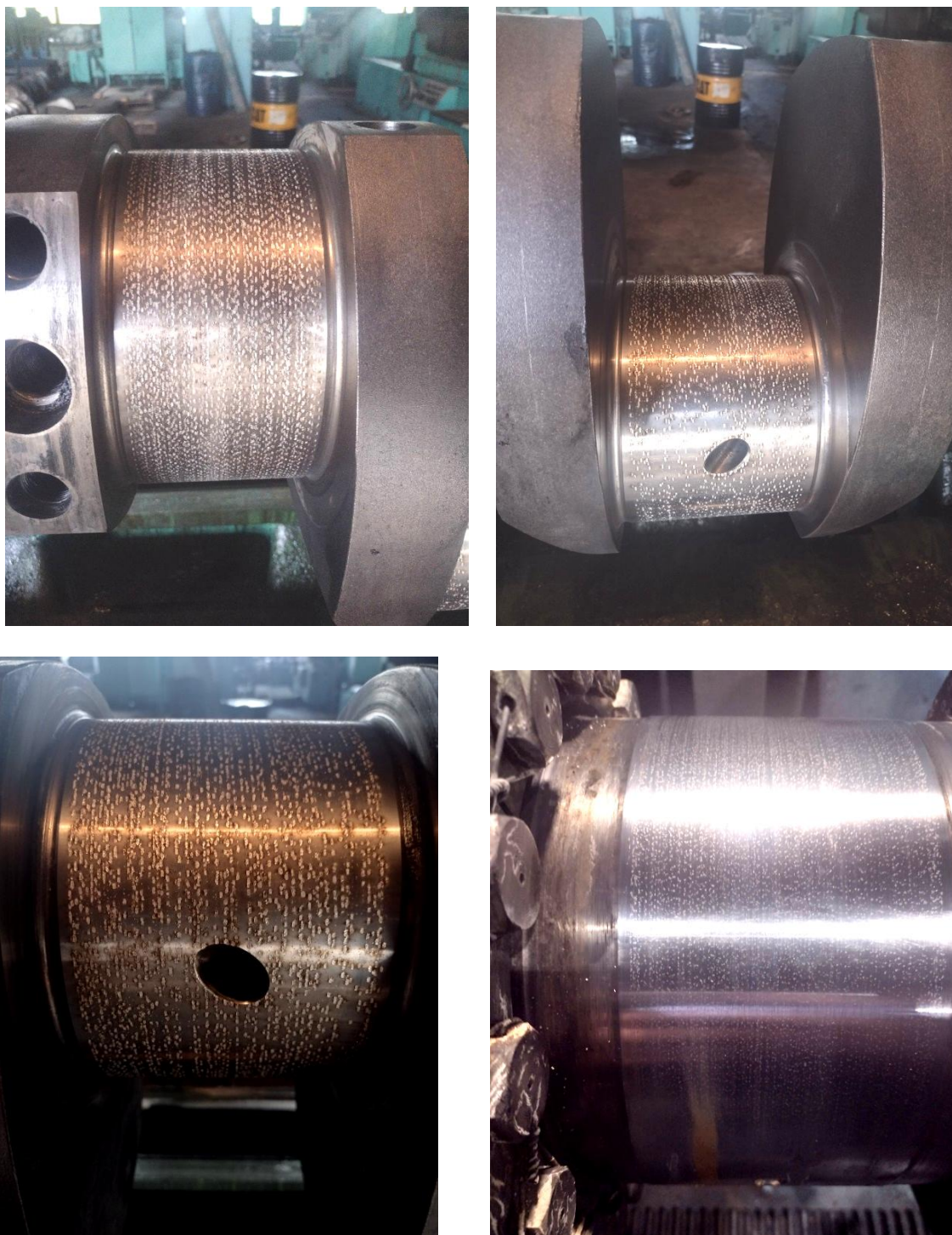


Рис. 6. Зміцнені фрагменти (корінні та шатунні шийки зміцненого колінчастого валу)

3) розроблений пристрій дає можливість наносити шари зміцнення на деталі конструкцій, надаючи їм трибомеханічні властивості, які вищі, ніж надавані штатними технологіями;

4) створений пристрій дає можливість, на відміну від відомих рішень, наносити зміцнення «поверх» будь-якого попереднього способу зміцнення;

5) створений пристрій дає можливість, на

відміну від існуючих, застосовувати його у польових умовах, що важливо в обставинах ведення бойових дій для відновлення військової техніки.

При цьому, зокрема, у практичному аспекті:

І) важливими є удосконалені знання про нові методи зміцнення. Це відкриває нові можливості у

пошуку нових методів підвищення технічних і тактико-технічних характеристик військової та техніки для стратегічних галузей народного господарства України;

II) економічний аспект полягає у тому, що створений пристрій у декілька разів більш енергоєфективний, ніж традиційні, а ресурс зміцнених деталей може підвищуватися у півтора та більше разів;

III) технологічний процес є екологічно безпечним;

IV) пристрій дає можливість застосування у польових умовах, що створює переваги при веденні бойових дій завдяки оперативності та ефективності;

V) пристрій достатньо простий і може бути легко тиражованим, що підвищує ефект від його застосування.

Потенційні можливості подальшого розвитку і використання.

1. Розроблений пристрій може бути використаний для широкої множини конструкцій.

2. На основі пристрою можуть бути створені більш досконалі його варіанти.

3. На основі принципу поширення можуть бути досліджені інші варіанти поєднання технологій зміцнення. Зокрема, потенційно замість технології мікродугового оксидування можуть бути застосовані технології нанесення вакуумно-дугових наноструктурованих нітридних покриттів.

4. Створений пристрій може стати початковим ядром польової ремонтно-відновлювальної майстерні, у якій будуть зібрані різні пристрої, що реалізують різні технології зміцнення деталей конструкцій військової техніки.

5. Пристрій може бути підготовлений для серійного виробництва та поширюватися на відповідному ринку.

Робота здійснена у рамках виконання 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. Ткачук М. А. Високотехнологічні автономні турбодетандерні електричні станції для енергобезпеки та енергонезалежності: монографія / М. А. Ткачук, С. О. Кравченко, Г. І. Львов, С. В. Моїсєєв [та ін.] – Харків : ФОП Панов А. М., 2025. – 196 с. 2. Ткачук М.М. Ефекти при дискретно-континуальному зміцненні елементів машин / М.М. Ткачук, А.В. Грабовський, М.К. Новіков, М.А. Ткачук, С.О. Кравченко, О.С. Лёзний // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2024 – № 2. – С. 65-72. 3. 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. 4. Subbotina V. Structure and properties of microarc oxide coatings on high-temperature aluminum alloy / V. Subbotina, O. Sobol. // *Machines. Technologies. Materials.* – 2020. V. 14, issue. 6, pp. 247-250. 5. 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. – т. 16. – С. 134-140. 6. Sathiyamoorthi P. High-Entropy Alloys: Potential Candidates for High-Temperature Applications - An Overview / Sathiyamoorthi Praveen, Hyoung Seop Kim // *Advanced Engineering Materials.* 2017. V. 20. DOI:10.1002/adem.201700645. 7. 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. 8. 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. 9. Tkachenko V.G. Dislocation mechanisms and strengthening methods in metal crystals / V.G. Tkachenko. - Kyiv : Akadempriodyka. – 2021. - 298 p. 10. George E.P. High-entropy alloys / E.P. George, D. Raabe, R.O. Ritchie // *Nat Rev Mater.* – 2019. v. 4. – P. 515–534. <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0121-4>. 11. Волков О.О. Теплові розрахунки швидкого нагрівання та охолодження при випробуванні технології комбінованого поверхневого гартування наплавлених деталей з робочою частиною із сталі 15X11МФ / О.О. Волков, В.В. Субботіна, С.А. Князев, В.А. Рябоштан [та ін.] // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Машинознавство та САПР*. 2024. № 2. С. 22-27. 12. Babaei K. The effects of carbon-based additives on corrosion and wear properties of plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings applied on Aluminum and its alloys: a review / Babaei K., Fattah-alhosseini A., Molaei M. // *Surface and Interfaces*. 2020. V. 21. 100677. 13. Subbotina V. Determination of influence of electrolyte composition and impurities on the content of α -Al₂O₃ phase in MAO-coatings on aluminum / V. Subbotina, U.F. Al-Qawabehe, V. Belozarov, [and oth.] // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 6, no. 12 (102), pp. 6-13. 14. Субботін О. В. Досліджування залежності фазового складу і твердості від товщини МДО-покриттів / О. В. Субботін, В. В. Білозеров, В. В. Субботіна, О. О. Волков [та ін.] // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: *Машинознавство та САПР*. 2025. № 1. С. 67–73. 15. Kossenko A., Zinigrad M. (2015). A universal electrolyte for the plasma electrolytic oxidation of aluminum and magnesium alloys, *Mater Des*, 88, pp. 302-309. 16. Tang M., Li W., Liu H., Zhu L. Influence of titania sol in the electrolyte on characteristics of the microarc oxidation coating formed on 2A70 aluminum alloy // *Surf Coating Technol.* 2011. v. 205, pp. 4135-4140. 17. Barati N., Meletis E.I., Fard F.G., Yerokhin A., Rastegari S., Faghihi-Sani M.A. (2015). Al₂O₃-ZrO₂ nanostructured coatings using DC plasma electrolytic oxidation to improve tribological properties of Al substrates, *Appl Surf Sci*, 356, pp. 927-934. 18. Subbotina V., Sobol O., Belozarov V., Subbotin O. (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*. Vol. 4, no. 12 (106), pp. 14–23. 19. Dehghanghadikolaei A. Improving corrosion resistance of additively manufactured nickel-titanium biomedical devices by micro-arc oxidation process / Dehghanghadikolaei A., Ibrahim H., Amerinatanzi A., Hashemi M., Moghaddam N.S., Elahinia M. // *Journal of Materials Science*, 2019. v. 54, pp. 7333-7355. 20. Zhu L.

Growth mechanisms for initial stages of plasma electrolytic oxidation coating on Al / Lujun Zhu, Xiaoxing Ke, Jingwei Li [and oth.] // *Surface and Interfaces*. 2021. V. 25, 101186. 21. Javidi M. Plasma electrolytic oxidation of 2024-T3 aluminum alloy and investigation on microstructure and wear behavior / M. Javidi, H. Fadaee // *Appl. Surf. Sci.*, 2015. v. 286, pp. 212-219. 22. Subbotina V. Investigation of the influence of electrolyte composition on the structure and properties of coatings obtained by microarc oxidation / V. Subbotina, V. Bilozero, O. Subbotin, O. Barmin, S. Hryhorieva, N. Pysarska // *Physics and chemistry of solid state*. 2022, Vol. 23, Iss. 2. – P. 380–386. 23. 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. Moiseiev, M. Novikov, A. Burniashev, G. Pakki, S. Podrieza // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2023. – vol. 4, 7(124), pp. 98–105. 24. 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. 25. Ткачук М. А., Грабовський А. В., Кравченко С. О., Ткачук М. М., Лещенко В. М., Кохановська О. В., Марусенко С. І., Храмова І. Я., Бондаренко Л. М., Коба А. М., Льозний О. С. Синтез проєктно-технологічних рішень установок для дискретного зміцнення машинобудівних конструкцій. *Механіка та машинобудування*. – 2025. – №1. – С. 103-127.

Bibliography (transliterated):

1. Tkachuk M. A., Kravchenko S. O., Lvov G. I., Moiseev S. V. [et al.] (2025). High-tech autonomous turbo-expander power plants for energy security and energy independence: monograph [Vysokotekhnolohichni avtonomni turbo-detanderni elektrychni stantsiyi dlya enerhobezpeky ta enerhonzalezhnosti]. Publisher FOP Panov A. M. Kharkiv. 196 p. 2. Tkachuk M. M., Grabovsky A. V., Novikov M. K., Tkachuk M. A., Kravchenko S. O., Lyozny O. S. (2024). Effects during discrete-continuous strengthening of machine elements [Efekty pry dyskretno-kontynual'nomu zmitsnenni elementiv mashyn] // *Internal combustion engines* 2024. No. 2. P. 65-72. 3. Firstov S.A., Rogul T.G., Shut O.A. Hardening in the Transition to Nanocrystalline State in Pure Metals and Solid Solutions (Ultimate Hardening). *Powd.Met.and Met.Ceram.* 2018. no. 3-4. P. 161-174. 4. Subbotina V., Sobol O. Structure and properties of microarc oxide coatings on high-temperature aluminum alloy. *Machines. Technologies. Materials*. 2020. V. 14, issue. 6, pp. 247-250. 5. Subbotina V.V., Bilozero V.V., Sobol' O.V. (2020) Electrical strength of oxide coatings formed by microarc oxidation. Promising technologies and devices [Elektrychna mitsnist' oksydneykh pokryttiv, sformovanykh metodom mikroduhovoho oksyduvannya. perspektyvni tekhnolohiyi ta prylady]. V. 16. P. 134-140. 6. Sathiyamoorthi P., Hyoung S. (2017) High-Entropy Alloys: Potential Candidates for High-Temperature Applications - An Overview. *Advanced Engineering Materials*. V. 20. DOI:10.1002/adem.201700645. 7. 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. 8. K.Ming, X.Bi, J.Wang (2019). Strength and ductility of CrFeCoNiMo alloy with hierarchical microstructures *International Journal of Plasticity*. Pp. 1-14. 9. Tkachenko V.G. (2021). Dislocation mechanisms and strengthening methods in metal crystals. *Kyiv : Akadempriodyka Publisher*. 298 p. 10. George, E.P., Raabe, D., Ritchie, R.O. (2019). High-entropy alloys. *Nat Rev. Mater.* v. 4. P. 515–534. <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0121-4>. 11. Subbotin, O. V., Bilozero, V. V., Subbotina, V. V., Volkov, O. O. [et all]

(2025)/ Study of the dependence of the phase composition and hardness on the thickness of MDO coatings. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Mechanical Engineering and CAD [Doslidzhuvannya zalezhnosti fazovoho skladu i tverdosti vid tovshchyny MDO-pokryttiv]. Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI»*. Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR] № 1. pp. 67–73. 12. Babaei K., Fattah-alhosseini A., Molaei M. (2020). The effects of carbon-based additives on corrosion and wear properties of plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings applied on Aluminum and its alloys: a review. *Surface and Interfaces*. V. 21. 100677. 13. Subbotina V., Al-Qawabea, U.F., Belozero, V. [et al.] (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*. Vol. 6, no. 12 (102), pp. 6–13. 14. Subbotin O. V., Bilozero V. V., Subbotina, V. V., Volkov O. O. [et al.] (2025) Study of the dependence of the phase composition and hardness on the thickness of MDO coatings. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Mechanical Engineering and CAD [Doslidzhuvannya zalezhnosti fazovoho skladu i tverdosti vid tovshchyny MDO-pokryttiv. Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «KHPI»*. Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR]. No. 1. P. 67–73. 15. Kossenko A., Zinigrad M. (2015). A universal electrolyte for the plasma electrolytic oxidation of aluminum and magnesium alloys, *Mater Des*, 88, pp. 302-309. 16. Tang M., Li W., Liu H., Zhu L. (2011). Influence of titania sol in the electrolyte on characteristics of the microarc oxidation coating formed on 2A70 aluminum alloy. *Surf Coating Technol.*, v. 205, pp. 4135-4140. 17. Barati N., Meletis E.I., Fard F.G, Yerokhin A., Rastegari S., Faghihi-Sani M.A. (2015). Al₂O₃-ZrO₂ nanostructured coatings using DC plasma electrolytic oxidation to improve tribological properties of Al substrates, *Appl Surf Sci*, 356, pp. 927-934. 18. Subbotina V., Sobol O., Belozero V., Subbotin O. (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*. Vol. 4, no. 12 (106), pp. 14–23. 19. Dehghanghadikolaei A., Ibrahim H., Amerinatanzi A., Hashemi M., Moghaddam N.S., Elahinia M. (2019). Improving corrosion resistance of additively manufactured nickel-titanium biomedical devices by micro-arc oxidation process. *Journal of Materials Science*. v. 54, pp. 7333-7355. 20. Zhu L., Xiaoxing Ke, Jingwei Li [et al.] (2021). Growth mechanisms for initial stages of plasma electrolytic oxidation coating on Al. *Surface and Interfaces*. V. 25, 101186. 21. Javidi M., Fadaee H. (2015). Plasma electrolytic oxidation of 2024-T3 aluminum alloy and investigation on microstructure and wear behavior. *Appl. Surf. Sci.*, v. 286, pp. 212-219. 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 state*. Vol. 23, Iss. 2. P. 380–386. 23. 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), pp. 98–105. 24. Tkachuk M.M., Grabovsky, A.V., Tkachuk, M.A., Marchenko, A.P., Kravchenko, S.O. (2023) Conceptual foundations of discrete-continuous strengthening of engine elements and turboexpander units. *Internal combustion engines. Internal Combustion Engines [Kontseptual'ni osnovy dyskretno-kontynual'noho zmitsnennya elementiv dyvuhuniv ta turbodetandernykh ustanovok. Dvyhuny vnutrishn'oho zhoryannya]*. No. 1. P. 49-54. 25. Tkachuk M. A., Grabovsky A. V., Kravchenko S. O., Tkachuk M. M., Leshchenko V. M., Kokhanovskaya O. V., Marusenko S. I., Khramtsova I. Ya., Bondarenko L. M., Koba A. M., Lyozny O. S. (2025) Synthesis of design and technological solutions of installations for discrete strengthening of machine-building structures. *Mechanics and Mechanical Engineering. [Syntez proyektno-tekhnolohichnykh rishen ustanovok dlya dyskretnoho zmitsnennya mashynobudivnykh konstruktiv. Mekhanika ta mashynobuduvannya]* No. 1. P. 103-127.

Надійшла до редакції 07.07.2025 р.

Ткачук Микола Миколайович - доктор техн. наук, старший дослідник, провідний наук. співр. 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>.

Грабовський Андрій Володимирович – доктор техн. наук, с.н.с., провідний наук. співр. 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>.

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, с.н.с., провідний наук. співр. 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>.

Ткачук Ганна Володимирівна – канд. техн. наук, с.н.с., старший наук. співр. кафедри «Інформаційні технології і системи колісних та гусеничних машин ім. О. О. Морозова» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна; e-mail: tkachuckAV@tmm-sapr.org. <https://orcid.org/0000-0003-0435-1847>.

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. <https://orcid.org/0009-0008-0311-6400>.

DISCRETE AND CONTINUOUS METHODS AND TOOLS OF STRENGTHENING OF MILITARY AND CIVIL MACHINES ELEMENTS

M.M. Tkachuk, A.V. Grabovskiy, M.A. Tkachuk, S.O. Kravchenko, H.V. Tkachuk, O.S. Loznyi

The work describes the solution of an urgent and important scientific and applied problem: the development of methods and means of discrete and continuous strengthening in the restoration of military and technical elements for strategic sectors of the national economy. The work is designed to meet the urgent need to restore samples of military and important civilian equipment in a short time and with high intensity. This equipment, under conditions of intensive loads during operation and the performance of combat missions in conditions of combat operations, wears out quite quickly as a result of contact interaction and mutual relative motion. At the same time, the processes of loading, contact, friction and wear develop according to a progressive scenario during the service life. And this leads to the failure of valuable objects. To eliminate these problem situations, the basics of technology and means of discrete and continuous strengthening have been developed. It consists in discrete processing of one of the contacting parts and continuous processing of the other. The conducted studies of processes and states during contact interaction of hardened parts made it possible to create a device on this basis that implements the technology of discrete hardening and makes it possible to determine rational technological modes during discrete and continuous strengthening of military and technical elements for strategic sectors of the national economy. Such device makes it possible to significantly increase the hardness, wear resistance and strength of machined structural parts. All effects that lead to an improvement in the technical characteristics of parts strengthened in this way are based on the effects of profile changing of contacting surfaces. This profile becomes hilly. Contact pressure is localized on these hills. Due to this, stresses are shifted to the material of discretely strengthened zones. Taking into account the high mechanical characteristics of material of these zones, the overall strength increases. In addition, tribological characteristics also increase. Efficiency increases, durability extends, and friction is reduced in such connection.

Keywords: military equipment; equipment for strategic industry; recovery; discrete and continuous strengthening; stress-strain state; contact interaction; resource, micro-arc oxidation; electrosparc alloying; device prototype.