

*Марченко А.П., д-р техн. наук; Ткачук М.А., д-р техн. наук; Соболев О.В., д-р фіз.-мат. наук; Посвятенко Е. К., д-р техн. наук; Хлань О.В., Шейко О.І., Бабіч О.О., Фрід О.Ю., Погрібний М.А., канд. техн. наук; Кравченко С.О., канд. техн. наук*

## **ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ КОМПОЗИЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНІ ЕЛЕМЕНТІВ ВИРОБІВ ДЛЯ ОБОРОННОЇ ТА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗЕЙ**

**Вступ.** З метою вирішення масштабних проблем, які натеper постали перед Україною, конче необхідні інноваційні рішення, втілені у різних галузях економіки, оборони та інших сторонах суспільного життя. Зокрема, серед найбільш значимих – виклики у сфері забезпечення обороноздатності та енергетичної безпеки.

За економічних та безпекових обставин, що на сьогодні склалися, розробка та застосування інноваційних технологій, адаптованих до умов та потреб України, є найбільш прогресивним шляхом розвитку. До них висувуються наступні вимоги: проривний характер; наукова обґрунтованість; висока ефективність; помірні ресурсні вимоги; оперативність; реалізація на базі існуючого обладнання.

У руслі вирішення найбільш актуальних, масштабних та важливих для України проблем протягом останнього часу колективом дослідників НТУ «ХП», ДП «Завод ім. В.О. Малишева», ДП «ХКБМ ім. О.О. Морозова», ДП «ХКБД», Національного транспортного університету (НТУ) науково обґрунтовано, розроблено, удосконалено та впроваджено у виробництво комплекс інноваційних технологій композиційного зміцнення поверхні виробів для оборонної та енергетичної галузей України. Дослідження ефективності цих технологій складає мету роботи. Робота є продовженням та розвитком робіт [1-9].

**Методи забезпечення функціональних характеристик виробів.** До об'єктів військової та цивільної техніки, які розглядаються в цій роботі, відносяться танки, бронемашини, тягачі, автомобілі та їхні двигуни внутрішнього згоряння (ДВЗ), силові установки з ДВЗ магістральних тепловозів, автономні установки енергозабезпечення стратегічних об'єктів, а також різноманітні двигуни, агрегати і силові елементи цих конструкцій, а також обладнання для електростанцій. Основними вимогами до них є ресурс, міцність, довговічність, енергоефективність, надійність та безвідмовність у роботі.

Так, двигуни внутрішнього згоряння танків, бронетранспортерів та інших бойових машин працюють у важких умовах, піддаються впливу високих теплових і механічних навантажень, особливо за високих та низьких температур навколишнього середовища. Це сприяє зростанню навантажень на деталі високонавантажених пар, що збільшує їх зношування. Захисні елементи підлягають дії ударно-імпульсних навантажень. Це істотно підвищує вимоги до властивостей матеріалу, якості і стану робочих поверхонь деталей. В енергетичній галузі, збільшуючи потужність, надійність та довговічність турбін, можливо повніше використовувати паливні ресурси. Потужність сучасних турбін можливо збільшувати, тільки впроваджуючи нові технології, конструкції та матеріали. Це є критично необхідним, тому що, на відміну від пошкоджень трубних елементів парогенерувального тракту, пошкодження роторів турбін створюють серйозну небезпеку, можуть призвести до катастрофічних наслідків і колосальних матеріальних затрат. Тому матеріали турбін повинні забезпечувати підвищену надійність.

Зазвичай основними показниками якості машин є надійність і коефіцієнт корисної дії, які переважно визначаються властивостями поверхневих шарів деталей і з'єднань (границею витривалості, корозійною стійкістю, зносостійкістю, коефіцієнтом

© А.П. Марченко, 2017

тертя, контактною жорсткістю, міцністю посадок, герметичністю з'єднань тощо). Кожна зупинка машин через пошкодження окремих елементів або зниження технічних характеристик нижче допустимого рівня не тільки тягне за собою, як правило, великі матеріальні збитки, але й у низці випадків (особливо для оборонної техніки) призводить до катастрофічних наслідків. Крім того, досягнення високої якості та експлуатаційної надійності деталей машин, вузлів і агрегатів, а також зниження їх вартості, є умовами забезпечення високого і стійкого рівня конкурентоздатності. Усе це стає можливим тільки на основі нових матеріалів та технологій, до яких відноситься комплекс створених та описаних в роботі інноваційних технологій спрямованої інженерії поверхні.

Зокрема, на відміну від традиційних технологій, проблема підвищення ресурсу та надійності роботи двигунів і агрегатів військової та цивільної техніки у запропонованій роботі досягається за рахунок розробки і застосування технологій дискретного зміцнення робочих поверхонь чавунних і сталевих деталей, інтенсивного холодного пластичного деформування (ХПД), спрямованого мікродугового оксидування (МДО), інноваційної високощільної вакуумно-плазмової обробки, комплексної обробки струмами високої частоти (СВЧ) та термічного впливу, а також комплексного застосування декількох технологій у одному технологічному процесі.

**Технологія дискретного зміцнення.** Науковою основою інноваційної технології дискретного зміцнення робочих поверхонь чавунних і сталевих деталей є використання електророзрядів для керованого руйнування матеріалу деталі з отриманням необхідних форм і розмірів (рис. 1,2). При цьому проблемним є отримання стабільного шару суцільного покриття поверхні. У запропонованій роботі замість суцільного пропонується дискретне покриття, що усуває проблему.

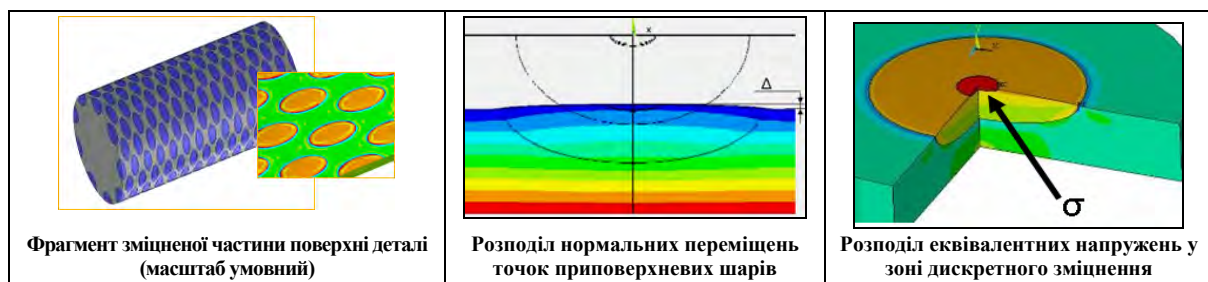


Рис. 1. Прояв « $\Delta$ -ефекту» і « $\sigma$ -ефекту» при дискретному зміцненні

Для різних умов функціонування у цій роботі розраховано на основі математичного підходу форму та розмір дискретного покриття. Одна із основних наукових проблем, що була вирішена, пов'язана із розв'язанням задач аналізу при нечітко вираженому і варіюваному просторі даних та нечітких критеріях, обмеженнях і невизначених характеристиках самого технологічного процесу. Це стосується, в першу чергу, науково-технічної проблеми поверхневого зміцнення високонавантажених елементів машин, які знаходяться в рухомому контакті.

Варто зазначити, що традиційні технології можуть вдосконалюватися, в основному, тільки за рахунок компромісних, а не оптимізаційних рішень. Вихід з цієї ситуації – відмова від жорсткої регламентації даних, пошук принципово нових фізико-механічних процесів та оптимізація їх впливу на комплекс критеріїв, які визначають характеристики поверхневого зміцнення елементів машин.

При цьому, для реалізації даного підходу необхідно було, по-перше, розробити теоретичну основу, математичну модель для багатоваріантного дослідження та оптимізації характеристик стану поверхневого шару у поєднанні із пошаровим станом матеріалу по глибині. По-друге, провести із застосуванням розроблених підходів дослідження та синтез схем

і параметрів нової технології. Для досягнення цієї мети в роботі вирішені такі нові наукові проблеми та прикладні завдання: 1) розробка нових теоретико-множинних підходів до генерації математичних, числових і фізичних моделей досліджуваних і створюваних технологій та станів зміцнених елементів машин; 2) реалізація розробленого підходу в комплексній математичній моделі дослідження напружено-деформованого стану (НДС) елементів машин в контактї, а також у вигляді спеціалізованого програмно-модельного комплексу із застосуванням методу скінченних елементів; 3) формування потужного програмно-апаратного комплексу на основі кластерних комп'ютерних технологій; 4) аналіз НДС елементів досліджуваних машин, поверхні яких модифіковані із застосуванням нових технологій зміцнення; 5) розробка науково обґрунтованих технологічних режимів та підвищення технічних і тактико-технічних характеристик виробів для оборонної та енергетичної галузей.

Аналіз та узагальнення отриманих результатів дало можливість встановити два типи ефектів впливу на НДС, що виникають при виконанні дискретно-континуального зміцнення: « $\Delta$ -ефект» і « $\sigma$ -ефект». Перший полягає в тому, що легована частина поверхні дискретного зміцнення при дії нормального тиску в деформованому стані дещо виступає над незміцненою частиною (на величину  $\Delta$ , див. рис. 1). Поверхня деталі під навантаженням стає мікропагорбистою. Числовою характеристикою цього ефекту при цьому є відношення  $\Delta$  до діючого тиску  $p$ , розрахункова величина якого може досягати 0,1 мкм/МПа і більше. Таким чином, ця виступаюча частина поверхні приймає на себе більшу частину сил контактного тиску у сполученні з іншою деталлю. Завдяки більш високій якості поверхні дискретної зони зменшується сила тертя при відносному русі контактуючих деталей. Крім того, матеріал матриці зношується в першу чергу, і цим створюються на поверхні лабіринти для проходу мастила. Найбільший « $\Delta$ -ефект» досягається при відносній площі зміцнення 60...80%.

Інший (« $\sigma$ -ефект») з'являється із-за характерного розподілу напружень в зоні дискретного зміцнення, див. рис. 1: напруження високі у цій зоні навіть при рівномірному прикладанні тиску на поверхню, в результаті цього еквівалентні напруження вищі на 10...15% порівняно з зоною основного матеріалу зміцненого елемента машини. Разом із тим механічні властивості в зоні зміцнення значно (до 50%) вищі, ніж основного матеріалу в цілому. Тому загальна міцність зростає. Найбільших значень « $\sigma$ -ефект» досягає при відносній площі зміцнення 65...75%.

Зіставлення інтервалів найбільшого позитивного прояву « $\Delta$ -ефекту» і « $\sigma$ -ефекту» дає можливість визначити рекомендований інтервал зони дискретності - 60...75% (див. рис. 1). На підставі аналізу « $\Delta$ -ефекту» та « $\sigma$ -ефекту» встановлено, що інтегральний вплив запропонованої технології на напружено-деформований стан зміцнених тіл у приповерхневому шарі дуже сприятливий як для його загальної міцності та твердості, так і для стійкості проти зношування.

При цьому після дискретного зміцнення у приповерхневому шарі чітко проявляється зона, яка різко відрізняється від основного матеріалу. Це – твердий розплав, утворений сумішшю матеріалів основного матеріалу та зміцнювального компонента (з електрода), див. рис. 2.

Експлуатаційними випробуваннями встановлено, що дискретне зміцнення чавунних колінвалів забезпечує підвищення їх зносостійкості у 6...8 разів порівняно зі станом після нормалізації та в 1,3...1,5 разів – порівняно із гартуванням СВЧ. Для сталевих колінчастих валів зносостійкість збільшується в 1,5...3 рази порівняно із азотуванням. Одночасно з цим як у сталевих, так і у чавунних колінчастих валів поліпшується припрацьовуваність і збіль-

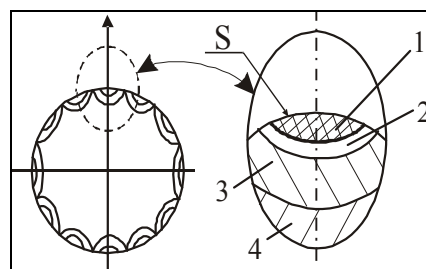


Рис. 2. Структура матеріалу (у розрізі) в зоні зміцнення:  
1 – дискретно зміцнена зона S;  
2, 3 – перехідні шари; 4 – основний матеріал

шується зносостійкість валу та вкладиша.

Таким чином, у результаті на базі розробок і багаторічного досвіду із адаптації та впровадження у виробництво дискретного зміцнення Національним технічним університетом "ХПІ", ДП «ЗіМ», ДП «ХКБМ ім. О.О. Морозова», ДП «ХКБД», НТУ та фірмою «ТАВІ» була вирішена комплексна цілісна проблема розробки способів зміцнення поверхні високонавантажених деталей, що виключає недоліки традиційних технологій зміцнення [1-9]. Спосіб формування зносостійких поверхонь металевих виробів (дискретне зміцнення) за отриманими фізико-механічними і триботехнічними характеристиками не поступається кращим світовим аналогам: низькотемпературного ціанування ("Хонда", Японія); газового азотування (Росія, Великобританія); електродугової металізації (CRP Industry, США). Більш того, цей метод є кращим, оскільки не має основних недоліків, властивих кожному з вище названих способів зміцнення. Дискретне зміцнення деталей виконується на додатково обладнаних універсальних верстатах. При виборі матеріалу електрода і розробці технології дискретного зміцнення критеріями оптимізації були: висока зносостійкість поверхні шийок колінчастих валів; підвищення втомної міцності деталі; підвищення термостійкості поверхні тертя; задиростійкість; оптимальне покриття зміцненими зонами (плямами) поверхні деталі; доступна ціна матеріалу електрода. Вибір матеріалу залежить від конкретного об'єкта. Зазвичай це – високолегована сталь.

При впровадженні технології дискретного зміцнення на ДП «Завод ім. В.О. Малишева» проводилося зміцнення шийок колінчастих валів, виготовлених із різних легованих сталей, які використовуються для двигунів різного типу. Крім того, технологія дискретного зміцнення при ремонті колінчастих валів використана для двигунів бронетранспортерів та військових автомобілів на підприємствах Міністерства оборони України. Для забезпечення автономного живлення стратегічних об'єктів розроблено установки на основі модернізованого двигуна Д80 зі зміцненими елементами тощо (рис. 3).



Рис. 3. Зміцнені колінчасті вали тепловозних дизелів для магістральних тепловозів

Розроблені та впроваджені технології зміцнення елементів танкових двигунів серії 5ТДФ та 6ТД для модернізації танків «Булат» та перспективних танків «Оплот» (рис. 4), що дає змогу досягти сучасного рівня тактико-технічних характеристик та успішно протидіяти сучасним бойовим машинам противника у ході реальних бойових дій. Важливим результатом впровадження запропонованих інноваційних технологій зміцнення поверхонь високонавантажених деталей ДВЗ при складному циклічному термічному і механічному навантаженні є те, що вони створюють умови для форсування вітчизняних танкових дизелів за їх потужністю.



Рис.4. Форсовані двигуни 5ТДФ для модернізації бойових машин «Булат»

Також запропоновані комплексні технології, які поєднують дискретне та континуа-

льне зміцнення відповідно однієї та іншої поверхні спряжених пар контактуючих пар деталей (рис. 5). Таке поєднання дає набагато вищий результат, ніж сумарний від дії окремих технологій.

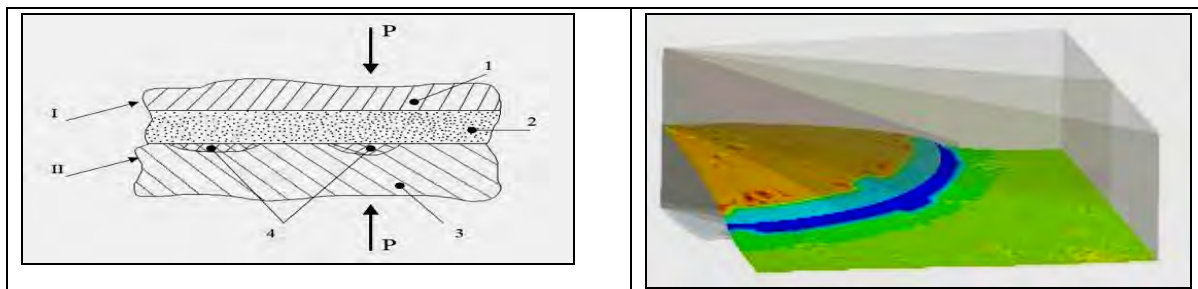


Рис. 5. Комплексна технологія, що поєднує дискретне і континуальне зміцнення, та контактний тиск:  
 I - континуально зміцнена за технологією МДО деталь (1) та поверхневий шар (2), II - деталь (основний матеріал – сталь, чавун (3)), оброблена методом дискретного зміцнення (зміцнена зона (4))

**Технології холодного пластичного деформування (ХПД).** Також запропоновані технології модифікації поверхонь боєприпасів з метою підвищення ефективності їх використання. Так, для отримання поздовжніх і гвинтових канавок глибиною до 3 мм, за якими відбувається поділ деталі на осколки при ініціюванні вибухової речовини, застосовано один із методів ХПД – редукування. Цей метод (рис. 6) полягає у проштовхуванні штовхача 5 разом з трубною заготовкою 1 і фасонною оправкою 2 через матрицю 4. Оправка має поздовжні виступи 3, а матриця конус 6. Таким способом були отримані канавки на внутрішній частині корпусу авіаційної бомби із сталі 30ХГСА. Процес апробовано на пресі Д–2238 зусиллям 6,3 МН. Гвинтові канавки для попереднього формування осколків ручних гранат було отримано на трубчастих сорочках виробів із сталі 20 та алюмінієвого сплаву АК6 на гідрофікованому протяжному верстаті моделі 7Б56.

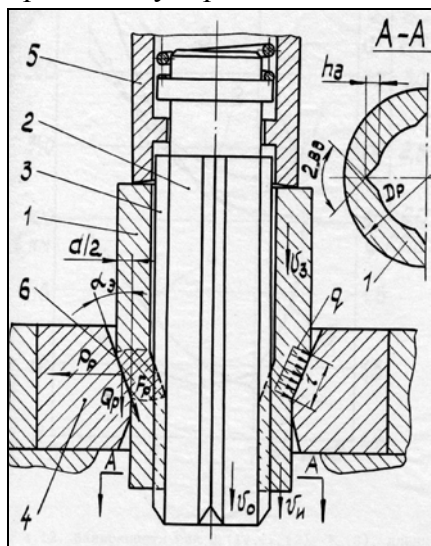


Рис. 6. Схема отримання поздовжніх канавок

працюють в умовах тертя, є висока зносостійкість, яка значною мірою залежить від твердості поверхні. При цьому серцевина таких деталей для забезпечення високої конструкційної міцності вимагає значно меншої твердості, але більш високих показників пластичності та в'язкості. Таким чином, необхідно забезпечити різні властивості поверхні і серцевини, що може бути досягнуто для матеріалів на основі алюмінію, титану (елементи вентильної групи) шляхом прогресивної технології на базі мікродугового оксидування, а для інших типів мате-

Використання ХПД комбінованим протягування при отриманні глибоких отворів камер згоряння некеро-ваних реактивних снарядів, корпусів гідроциліндрів тощо взамін традиційного розточування або чорнового зенкерування надає можливість підняти коефіцієнт використання матеріалу з 0,6 – 0,7 до 0,9 – 0,95 та підвищити продуктивність праці в 1,5 – 2 рази.

**Технології мікродугового оксидування та вакуумно-плазмового формування багатоелементних захисних покриттів.** Практичним завданням для розробки наукових основ новітніх технологій та матеріалів поверхневого зміцнення деталей тертя на основі плазмових технологій спрямованого мікродугового оксидування (МДО) та вакуумно-плазмового формування багатоелементних захисних покриттів є те, що визначальним чинником, який обумовлює довговічність деталей, що

ріалів – шляхом нанесення композиційних покриттів.

Завдяки розробленій технології зі спрямованим вибором необхідних режимів та електродів, які забезпечують формування надтвердих фаз (наприклад  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  на деталях на основі алюмінію), значно спрощено технологію виготовлення шатунів пари тертя (рис. 7) герметичних поршневих компресорів (при цьому не застосовуються антифрикційні вкладиші), а для ущільнюючого елементу поршня МДО-покриття забезпечило технологічність та високі трибологічні властивості в парах тертя з традиційними матеріалами (чавун, сталь, бронза), для поршня – обробка МДО захистило від високотемпературної газової ерозії та знизила температуру металу основи приблизно в 1,5 рази, для крильчатки насоса системи охолодження високофорсованих двигунів, зміцнення за технологією МДО, збільшено ресурс роботи в 10 разів за рахунок підвищення кавітаційної стійкості, для торцевих ущільнень МДО-обробка дала можливість використовувати сплав АК4-1 замість нержавіючої сталі та при цьому збільши ресурс роботи в 5–10 разів, що значно підвищило тактико-технічні характеристики виробів бронетехніки.

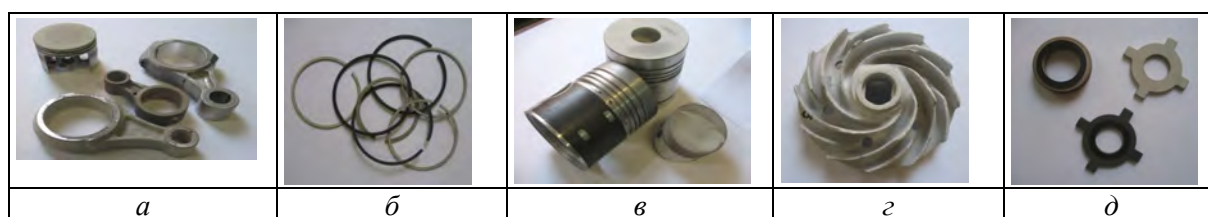


Рис. 7. Елементи виробів бронетехніки з підвищеними властивостями завдяки інноваційній спрямованій технології мікродугового оксидування: *а* – шатуни двигуна, *б* – ущільнюючий елемент поршня, *в* – поршень, *з* – крильчатка насоса системи охолодження високофорсованих двигунів, *д* – торцеві ущільнення

Розробка наукових основ структурної інженерії іонно-плазмових багатоелементних покриттів для критичних вузлів енергетичного обладнання була обумовлена тим, що одним із критичних елементів у газотурбінному агрегаті, що потребує інженерії поверхні для підвищення його ерозійної стійкості, є блок клапанів високого тиску і, зокрема, вузли тертя-ковзання (тертьові поверхні штоків клапанів, втулок тощо) його кінематичної частини. Структура цього блоку містить у собі елементи, які утворюють пару тертя, що працює при динамічних навантаженнях та зазнає також процесу стирання/корозії. Завдяки використанню вузько спрямованого іонного потоку високої швидкості, а також використанню інноваційних методик структурної інженерії стало можливим розробити, провести комплексні оптимізуючі випробування та освоїти новий клас наноструктурних високотвердих нітридних покриттів на основі нітриду титану: низьколеговані кремнієм та ітрієм з високою твердістю, корозійною, абразивною і кавітаційною стійкістю, а також надтверді жаростійкі нітридні покриття, що самовпорядковуються, на основі багатоелементних сплавів.

Додавання як легуючих елементів кремнію або ітрію зі вмістом 1–2 % відповідно в  $\text{Ti-}$  й  $(\text{Ti,Al})\text{N}$  покриття приводить до підвищення їх зносостійкості більш ніж в 3 рази, підвищення стійкості до окислювання для  $(\text{Ti,Si})\text{N}$  вище  $600\text{ }^\circ\text{C}$ , а для  $(\text{Ti,Al,Y})\text{N}$  – вище  $800\text{ }^\circ\text{C}$ , корозійної стійкості в 2 рази, кавітаційної стійкості в 5–7 разів. Розроблення технології нанесення покриттів, що мають різні склади, було викликано необхідністю подолання ефекту схоплювання, типового для матеріалів того ж складу.

**Технології обробки струмами високої частоти.** Величезною проблемою сучасного вітчизняного і світового енергетичного комплексу є ерозійне зношування робочих лопаток останніх ступенів потужних парових турбін. Інтенсивна ерозія кромок

робочих лопаток (рис. 8) призводить до: – зниження ресурсу і надійності експлуатації лопаток; – зменшення «парусності» лопаток, і, як наслідок, зменшення ККД турбоагрегату та, відповідно, кількості виробленої електроенергії; – передчасної вимушеної заміни великої кількості зношених лопаток на нові, які мають високу собівартість. Розроблена інноваційна технологія дає можливість проводити поверхневе загартування з нагрівом СВЧ вхідних кромок робочих лопаток парових турбін різних типів і модифікацій. При цьому ширина зміцненої зони на вхідній кромці може досягати 25-30 мм, довжина впродовж пера лопатки – 600-1000 мм, глибина загартування – до 2,5 мм (рис. 9). Проведене на оптимальних режимах загартування уможливило підвищити твердість вхідних кромок лопаток до 50-55 HRC і, таким чином, суттєво підвищити їх ерозійну стійкість (рис. 8-10). Після поверхневого загартування ерозійна стійкість лопаток зростає в 5-6 разів порівняно з початковим станом. Проведені дослідження показали, що розроблена технологія захисту робочих лопаток парових турбін від ерозії має цілу низку суттєвих переваг перед існуючими промисловими аналогами, перш за все, перед електроіскровим зміцненням твердим сплавом T15K6.

Створений шляхом загартування з нагрівом СВЧ на вхідних кромках лопаток поверхневий шар відрізняється специфічною дрібнозернистою структурою із залишковим напруженням стиснення, що, як показали експериментальні дослідження, підвищує циклічну витривалість матеріалу лопаток порівняно, наприклад, з електроіскровою обробкою, у 2-3 рази. Поверхневе загартування СВЧ на основі розробленої інноваційної технології надає безальтернативну можливість здійснення ефективного проти-ерозійного захисту лопаток турбін, які працюють на першому контурі атомних енергетичних станцій, оскільки у зміцненій нагрівом СВЧ поверхні, на відміну від зміцненої електроіскровим способом, відсутні елементи, що утворюють радіоактивні ізотопи. На сьогодні розроблена інноваційна технологія на основі СВЧ загартування є єдиним ефективним захистом від ерозійного зношування робочих лопаток першого контуру атомних електростанцій.

Використання розробленої технології дало можливість повністю автоматизувати процес поверхневого зміцнення, що призвело до підвищення продуктивності праці на технологічній операції захисту лопаток від ерозійного зношування порівняно з електроіскровою обробкою у 5-10 разів.

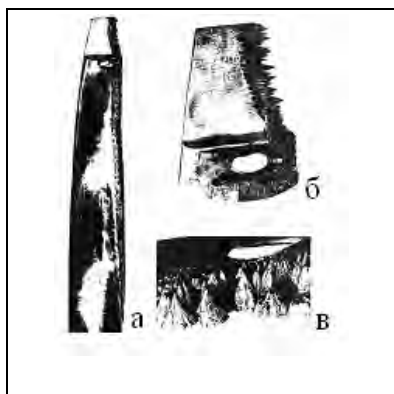


Рис. 8. Характер ерозійного зносу робочої лопатки 5-го ступеня ЦНТ турбіни К-300-240 після 23000 годин експлуатації: а - Х0,25; б -Х0,75; в - Х2



Рис. 9. Макроструктура вхідних кромок лопатки (в різних перетинах) після загартування СВЧ

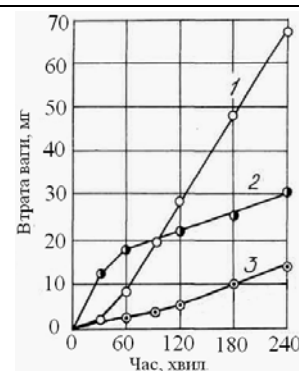


Рис. 10. Кінетичні криві ерозії деталей із сталі 15X11МФ: 1 - в початковому стані; 2 - після поверхневої обробки електроіскровим методом; 3 - після поверхневого загартування з нагрівом СВЧ

**Аналіз результатів.** Основна принципова новизна та перевага розроблених інноваційних технологій полягає в наступному. На відміну від традиційних існуючих технологій зміцнення, які можуть вдосконалюватися, в основному, тільки за рахунок компромісних, а не оптимізаційних рішень і передбачають створення однорідної суцільної зміцненої поверхневої зони на поверхні виробу, для запропонованої технології втілюється принцип генерування суттєво неоднорідних у плані та (або) за товщиною поверхневих структур зміцненого матеріалу на елементах машин, споруд, обладнання.

Таким чином, суть роботи полягає у тому, що замість суцільної гомогенності висувається на перший план принцип *контрольованої композиційності*. Це забезпечує на стадіях створення, модернізації та ремонту нових виробів для оборонної та енергетичної галузей досягнення якісно нових та кількісно переважаючих тактико-технічних та техніко-економічних їхніх характеристик.

**Науково-технічний рівень** роботи відповідає світовому рівню та його переважає, оскільки за багатьма аспектами принципово відрізняється від традиційних розробок. Нові технології, які розроблені, апробовані та впроваджені в роботі – це комплекс технологій дискретно-континуального зміцнення на основі імпульсного електроіскрового легування; мікродугового оксидування; високошвидкісні іонно-плазмові методи поверхневого та приповерхневого модифікування; інтенсивної обробки струмами високої частоти та наплавлення у комплексі з прогресивною термічною обробкою; високоінтенсивного холодного пластичного деформування. Цей комплекс інноваційних технологій переважає традиційні технології не тільки за окремими трибомеханічними характеристиками, а й за їх множиною. При цьому характерною рисою традиційних технологій є можливість поліпшення однієї окремої характеристики за рахунок погіршення інших, тоді як запропонований комплекс інноваційних технологій надає можливість поліпшення цілої множини характеристик без погіршення інших. Ця якісна перевага має також кількісний вимір у багатократному підвищенні характеристик довговічності, тертя, зношуваності, міцності тощо.

Усі заявлені технології зміцнення володіють високим ступенем новизни:

– уперше науково обґрунтовані режими дискретно-континуального зміцнення приповерхневих шарів важконавантажених деталей, що перебувають у рухомому контакті, на основі комп'ютерного моделювання, лабораторних та дослідно-промислових випробувань;

– уперше виявлені два нових фізичних ефекти, які названі « $\Delta$ -ефект» та « $\sigma$ -ефект». Перший із них полягає у тому, що при нанесенні на поверхню архіпелагу дискретно зміцнених зон та зовнішнього навантаження окремі островки у деформованому стані виступають над номінальним середнім рівнем, тобто створюються сприятливі умови для роботи контактуючих пар за рахунок більш низького тертя у цих зонах та завдяки появі об'ємів для потоків мастила. Другий (« $\sigma$ -ефект») зумовлений тією обставиною, що контактний тиск передається, в основному, через зони дискретного зміцнення, а оскільки матеріал цієї зони – більш міцний (порівняно із основним матеріалом), то у підсумку інтегрально досягається більший запас міцності;

– вперше науково обґрунтовані інноваційні технології оптимізації метода мікродугового оксидування для високоефективної обробки важконавантажених елементів пар тертя із сплавів на основі алюмінію;

– вперше на основі підходу структурної інженерії обґрунтовані та розроблені нові технологічні рішення вакуумно-плазмової обробки поверхонь для підвищення функціональних характеристик критичних елементів деталей тертя;



- отримали подальший розвиток методи зміцнення лопаток турбін на основі обґрунтування високоефективних режимів обробки струмами високої частоти;
- вперше розроблені методи зміцнення шляхом високоінтенсивного холодного пластичного деформування елементів машинобудівних конструкцій та отримання цим методом регулярних макрорельєфів, у тому числі і для осколкових сорочок боєприпасів.

Важливою особливістю, перевагою та новизною є поєднання розроблених нових та традиційних технологій зміцнення із синергійним ефектом, причому із адаптацією цих комплексних технологій до реалізації на нових виробках, проте із застосуванням наявного технологічного обладнання (тобто без суттєвих витрат фінансових ресурсів і часу) та за допомогою наявного кадрового потенціалу.

**Значимість одержаних результатів у порівнянні з кращими вітчизняними та світовими аналогами** визначається наступними показниками:

- розроблені принципово нові технічні рішення щодо забезпечення високої міцності та ресурсу деталей високонавантажених пар та вузлів двигунів і агрегатів для оборонної та енергетичної галузей техніки;
- розроблена та впроваджена у виробництво (виготовлення й ремонт) військової та цивільної техніки гама методів зміцнення, які, порівняно із традиційними, суттєво (у 2-4 рази) підвищують ресурс, міцність та стійкість;
- запропоновано спосіб посилення дії кожного з перелічених методів шляхом їх комбінації із набагато більшим ефектом, ніж від кожного зокрема. Це дає ефект одночасного поліпшення усіх трибомеханічних характеристик пар тертя. Так, для колінвалів форсованих двигунів ресурс підвищується на 40% та зменшуються виробничі витрати до 70%; при корундуванні ресурс циліндро-поршневої групи збільшується в 3...4 рази; рівень конструктивної міцності виробів зі зміцнених вакуумно-плазмовим нанесенням покриттів деталей дає приріст механічних характеристик до 40 %. Подібний ефект спостерігається і для інших видів військової та цивільної техніки;
- комплексне використання іонного азотування та нанесення вакуумно-дугових покриттів забезпечує збільшення твердості поверхні (до 35 ГПа), підвищення корозійної стійкості деталей тертя турбоагрегату (до 5 разів), підвищення абразивної стійкості (у 10-25 разів), підвищення стійкості в умовах кавітаційного зносу (у 2,3-2,7 разів);
- у 1,5–2 рази підвищується ресурс та знижуються витрати на виготовлення деталей складної форми при застосуванні технології інтенсивного холодного пластичного деформування;
- у 2–3 рази порівняно із вітчизняними та зарубіжними аналогами зростає ресурс ерозійної стійкості лопаток, зміцнених струмами високої частоти за запропонованими режимами обробки. За період після впровадження розробленої технології на ПАТ «Турбоатом» були ефективно захищені від ерозійного зношення десятки тисяч лопаток турбін різних типів і потужності, перш за все, – для атомних електростанцій України та країн близького та далекого зарубіжжя. Порівняльний промисловий експеримент, який був проведений у 2010 році на АЕС «Пакш» (Угорщина) з метою виявлення найбільш ефективного методу захисту від ерозійного зношування і в якому приймали участь лопатки ПАТ «Турбоатом», зміцнені за технологією СВЧ, а також лопатки провідних фірм Німеччини і Швейцарії, засвідчив найбільш високу стійкість лопаток «Турбоатома» з поврхневим загартуванням СВЧ;
- енерговитрати на здійснення розроблених та впроваджених технологічних операцій зміцнення виробів для оборонної та енергетичної галузей у 2–2,5 рази нижчі, ніж для традиційних технологій.

**Практична цінність та перспективність** результатів роботи полягає в розробці принципово нових технічних рішень щодо забезпечення високих технічних і тактико-технічних характеристик військової та цивільної техніки та енергобезпеки за рахунок високої надійності та ресурсу деталей високонавантажених пар двигунів і агрегатів машин, зміцнених за допомогою створених технологій нового покоління, а на цій основі:

1. Розроблена та впроваджена у виробництво (виготовлення й ремонт) військової та цивільної техніки гама високотехнологічних методів зміцнення (зокрема, дискретно-континуальне зміцнення на базі розвитку електроіскрового легування, холодне пластичне деформування, мікродугове окисидування, вакуумно-плазмове напилення з новими, більш досконалими комплексними покриттями, вдосконалені технології обробки струмами високої частоти, а також комплексні технології, що поєднують окремі види із перелічених); вони, порівняно із традиційними, суттєво (у 2-3 рази й вище) підвищують ресурс, міцність та довговічність, знижують в 1,5-2 рази втрати на тертя і зношування, створюють умови для розробки нових зразків військової техніки та виробів енергетичної галузі з більш високими питомими характеристиками. Крім того, вони позбавлені недоліків існуючих технологій зміцнення (розтріскування, ослаблення серцевини, залишкові деформації тощо).

2. Запропоновано спосіб посилення дії кожного з перелічених методів шляхом їх комбінації, що дає набагато більший ефект, ніж кожний з них окремо.

3. Запропоновані технології відрізняються від відомих способами і режимами перетворення поверхні. У результаті це дає ефект одночасного поліпшення трибомеханічних характеристик пар тертя, зокрема, порівняно із традиційними, збільшується не тільки твердість, але і втомна міцність матеріалу деталей. Застосування запропонованої технології дискретного зміцнення, наприклад, для колінчастих валів форсованих двигунів, підвищує їхній ресурс на 40% з одночасним зменшенням витрат на їх виробництво до 70%. Подібний ефект спостерігається також і для інших видів військової та цивільної техніки.

4. Обґрунтовано оптимальні технологічні режими зміцнення робочих поверхонь відповідальних деталей, а також розроблене та виготовлене обладнання і технологічне оснащення. На цій основі створено й освоєно виробництво низки двигунів для військової та цивільної техніки із підвищеними технічними і тактико-технічними характеристиками, у т.ч. при модернізації: серій 5ТДФ для важких бойових машин «Булат» та 6ТД - для танків «Оплот»; 10Д100, Д80, 5Д49 та інших – для створення агрегатів автономного живлення стратегічних об'єктів та для магістральних тепловозів; а також агрегатів, вузлів та систем: елементи танкових трансмісій, автомобільні двигуни для військової техніки, стволи танкових гармат, верстати, елементи ходових частин танків тощо.

5. Із застосуванням прогресивних технологій освоєно серійне виробництво танків «Булат» та «Оплот», що дало змогу забезпечити ЗСУ високоефективним сучасним озброєнням.

6. Освоєно виробництво на основі процесів холодного пластичного деформування гільз камер згоряння некерованих реактивних снарядів типу С5, ББ7, "Град"; гідроциліндрів, амортизаторів та деталей ходової частини гусеничних машин; нерухомих частин занурюваних насосів та двигунів для докачування нафти зі свердловин; осколочних сорочок ручних гранат, авіабомб та інших боєприпасів.

7. Розроблена та впроваджена на ПАТ «Турбоатом» унікальна технологія, що дає можливість у 2-3 рази подовжити термін експлуатації найбільш відповідальних, складних для виготовлення та високовартісних деталей сучасних парових турбін - робочих лопаток останніх ступенів.

**Висновки.** Таким чином, на сьогодні завдяки комплексу інноваційних технологій, що розроблені та впроваджені, вирішені масштабні, актуальні та важливі проблеми оборонної та енергетичної галузей із забезпечення на світовому рівні технічних і тактико-технічних характеристик, зокрема, ресурсу, надійності, довговічності, міцності виробів, споруд та обладнання, а також досягнення високого рівня енергоефективності та імпортонезалежності.

Крім того, ці розроблені та впроваджені технології дають змогу забезпечити високо-темповий розвиток машинобудівної галузі України. Більш того, існує певна множина проблем, які не можуть бути вирішені без застосування розроблених та впроваджених технологій. Це стосується, зокрема, розробки перспективного танкового двигуна для вітчизняних танків. У цьому випадку без запропонованих у роботі інноваційних технологій неможливо забезпечити потрібні технічні характеристики деталей циліндро-поршневої групи, колінчастих валів, кривошипно-шатунних механізмів, трансмісії тощо.

На основі проведених фундаментальних і прикладних досліджень вперше науково обґрунтована та експериментально підтверджена можливість підвищення технічних і тактико-технічних характеристик, ресурсу, енергоефективності, міцності, твердості, зносостійкості та довговічності високонавантажених деталей виробів для оборонної та енергетичної галузей завдяки використанню інноваційних технологій композиційного зміцнення поверхні. Це є базою при проектно-технологічному забезпеченні тактико-технічних і технічних характеристик військових та цивільних машин та енергетичного обладнання вітчизняного виробництва.

Розроблені та впроваджені новітні технології забезпечують більш високий, порівняно з відомими способами зміцнення, рівень зносостійкості і міцності з одночасним підвищенням задиростійкості та зниженням зношування, підвищення енергоефективності. При цьому в 5...8 разів зменшується час і вартість технологічних операцій. Границя між зміцненим шаром і основним металом не є технологічним концентратором напружень і не знижує втомну міцність деталі. Запропоновані технології є екологічно безпечними.

Організоване серійне виробництво, модернізація та реконструкція серії двигунів 5ТДФМ, 6ТД, 10Д100, Д80, Д49, а також агрегатів військової та цивільної техніки: танкові трансмісії, автомобільні двигуни для військової техніки, стволи танкових гармат, тепловозні двигуни, агрегати автономного живлення для стратегічних об'єктів, елементи турбін для енергогенеруючих станцій тощо. Завдяки застосуванню інноваційних технологій композиційного зміцнення поверхні забезпечені високі технічні і тактико-технічні характеристики бойових машин «Булат» та «Оплот», установок для автономного енергопостачання стратегічних об'єктів, військових автомобілів, магістральних тепловозів 2ТЕ10 та 2ТЕ116 тощо.

Розроблено та впроваджено на ПАТ «Турбоатом» технологія поверхневого загартування вхідних кромок робочих лопаток останніх ступенів парових турбін, яка дає можливість подовжити термін експлуатації лопаток, що працюють в умовах інтенсивного ерозійного зношування, в 2-3 рази. Завдяки впровадженню інноваційної технології стало можливим проводити поверхневе загартування з нагрівом СВЧ лопаток турбін різних типів: К-500-65/3000, К-750-65/3000 та інших, а також унікальних робочих лопаток турбін потужністю один мільйон кіловат.

Впровадження результатів проведених дослідних робіт у серійне виробництво дало можливість підвищити до світового рівня (а для низки показників - перевершити цей рівень) тактико-технічні та технічні характеристики танків, військових машин, автомобільної техніки, енергетичного та технологічного обладнання та устаткування, а також скоротити закупівлю дорогих імпортних запасних частин до двигунів та інших агрегатів військової та цивільної техніки і енергогенеруючого обладнання.

**Литература:** 1. *Континуальная и дискретно-континуальная модификация поверхностей деталей: монография / Н.А. Ткачук, С.С. Дьяченко, Э.К. Посвятенко, С.А. Кравченко, В.Г. Гончаров, В.В. Шпаковский, Н.Л. Белов, А.И. Шейко, А.К. Олейник, И. В. Пономаренко. – Х. : «Щедра садиба плюс», 2015. – 259 с.* 2. *Марченко А.П. Применение комбинированных технологий упрочнения трущихся поверхностей двигателей внутреннего сгорания и численное моделирование их контактного взаимодействия / А.П. Марченко, С.А. Кравченко, Н.А. Ткачук, Е.В. Белоусов, В.В. Шпаковский // Механіка та машинобудування. Науково-технічний журнал. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – №1. – С. 142-148.* 3. *Веретельник О. В. Дискретное упрочнение как эффективный метод повышения ресурса работы элементов механизма / О. В. Веретельник, Ю. В. Веретельник, В. В. Веретельник // Вісник НТУ «ХПІ». Зб. наук. праць. Серія: Транспортне машинобудування. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2015. – №43 (1152). – С. 17–20.* 4. *Научное обоснование параметров дискретного упрочнения высоконагруженных деталей транспортных энергетических установок / И. В. Парсаданов, С. А. Кравченко, Н. А. Ткачук [и др.]. // Наук. Вісник Херсонської держ. морської ак-ії. –2012. – №1 (6). –С. 298-310.* 5. *Веретельник О.В. Контактное взаимодействие поршня с гальваноплазменной обработкой боковой поверхности со стенками цилиндра ДВС / О.В. Веретельник, Н.А. Ткачук, С.Ю. Белик // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків : НТУ "ХПІ", 2012. – № 22. – С. 32–39.* 6. *Ткачук М. А. Розробка наукових основ створення сприятливих поверхневих дискретно - континуальних полів напружень у високонавантажених елементах машин/ М.А. Ткачук, В.М. Шеремет, Г.В. Ткачук, А. В. Грабовський// Механіка та машинобудування. – 2009. – №1. –С. 147-156.* 7. *Шеремет В. М. Дослідження напружено - деформованого стану деталей машин з дискретним зміцненням / В. М. Шеремет, М.А. Ткачук, Т. О. Васильєва// Вісник НТУ«ХПІ». Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – 2010. – №19. – С. 150-155.* 8. *Шеремет В.Н. Повышение ресурса тяжело нагруженных элементов ДВС путем дискретного упрочнения деталей. Моделирование напряженно - деформированного состояния/ В.Н. Шеремет, Н.А. Ткачук, В. Г . Гончаров// Двигатели внутреннего сгорания. – 2010. – №2. – С. 118-123.* 9. *Шеремет В.Н. Особенности распределения контактных давлений в сопряжении деталей с дискретным упрочнением / В.Н. Шеремет, О.В. Веретельник, Б.Я. Литвин, А.И. Шейко, С.А. Кравченко // Вісник НТУ «ХПІ». Зб. наук. праць. Серія: Машинознавство та САПР. – Харків : НТУ «ХПІ», 2013. – № 1 (975). – С. 175-179.*

**Bibliography (transliterated):** 1. *Kontinualnaya i diskretno-kontinualnaya modifikatsiya poverhnostey detaley: monografiya / N.A. Tkachuk, S.S. Dyachenko, E.K. Posvyatenko, S.A. Kravchenko, V.G. Goncharov, V.V. Shpakovskiy, N.L. Belov, A.I. Sheyko, A.K. Oleynik, I. V. Ponomarenko. – H. : «Schedra sadyba plyus», 2015. – 259 s.* 2. *Marchenko A.P. Primenenie kombinirovannykh tehnologiy uprochneniya truschihsya poverhnostey dvigateley vnutrennego sgoraniya i chislennoe modelirovanie ih kontaktного vzaimodeystviya / A. P. Marchenko, S.A. Kravchenko, N.A. Tkachuk [i dr.] // Mekhanika ta mashynobuduvannya. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – # 1. – S. 142-148.* 3. *Veretelnik O. V. Diskretnoe uprochnenie kak effektivniy metod povyisheniya resursa raboty elementov mehanizma / O. V. Veretelnik, Yu. V. Veretelnik, V. V. Veretelnik // Visnyk NTU «KhPI». Zb. nauk. prats'. Seriya: Transportne mashynobuduvannya. – Kh. : NTU «KhPI». – 2015. – #43 (1152). – S. 17–20.* 4. *Nauchnoe obosnovanie parametrov diskretnogo uprochneniya vyisokonagruzhennykh detaley transportnykh energeticheskikh ustanovok / I. V. Parsadanov, S. A. Kravchenko, N. A. Tkachuk [i dr.].// Nauk. Visnyk Khersons'koyi derzh. mors'koyi ak-iyi. –2012. – #1 (6). –S. 298-310.* 5. *Veretelnik O.V. Kontaktное vzaimodeystvie porshnya s galvanoplazmennoy obrabotkoy bokovoy poverhnosti so stenkami tsilindra DVS / O.V. Veretelnik, N.A. Tkachuk, S.Yu. Belik // Visnyk NTU "KhPI". – Kharkiv : NTU "KhPI", 2012. – # 22. – S. 32–39.* 6. *Tkachuk M. A. Rozrobka naukovih osnov stvorenniya spriyatlivih poverhnevih diskretno - kontinualnih poliv napruzhen u visokonavantazhenih elementah mashin/ М.А. Tkachuk, V.M. Sheremet, G.V. Tkachuk, A. V. Grabovskiy// Mekhanika ta mashynobuduvannya. – Kharkiv: NTU*

"KhPI", 2009. – # 1. – S. 147-156. 7. Sheremet V. M. Doslidzhennya napruzhenno - deformovanoho stanu detaley mashyn z dyskretnym zmitsnennyam / V. M. Sheremet, M.A. Tkachuk, T. O. Vasylyeva// *Visnyk NTU«KhPI»*. Tem. vyp.: *Ma-shynoznavstvo ta SAPR*. – 2010. – #19. – S. 150-155. 8. Sheremet V.N. Povyshenie resursa tyazhelonagruzhenykh elementov DVS putem diskretnogo uprochneniya detaley. Modelirovanie napryazhenno - deformirovannogo sostoyaniya/ V.N. Sheremet, N.A. Tkachuk, V. G. Goncharov// *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*. – 2010. – #2. – S. 118-123. 9. Sheremet V.N. Osobennosti raspredeleniya kontaktnykh davleniy v sopryazhenii detaley s diskretnym uprochneniem / V.N. Sheremet, O.V. Veretelnik, B.Ya. Litvin, A.I. Sheyko, S.A. Kravchenko // *Visnyk NTU «KhPI»*. *Zb. nauk. prats'*. *Seriya: Mashynoznavstvo ta SAPR*. – *Kharkiv : NTU «KhPI»*, 2013. – # 1 (975). – S. 175-179.

Марченко А.П., Ткачук М.А., Соболев О.В., Посвятенко Е.К., Хлань О.В., Шейко О.І., Бабич О.О., Фрид О.Ю., Погрибний М.А., Кравченко С.О.

#### ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ КОМПОЗИЦІЙНОГО ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНІ ЕЛЕМЕНТІВ ВИРОБІВ ДЛЯ ОБОРОННОЇ ТА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗЕЙ

Для вирішення актуальної та важливої проблеми підвищення міцності деталей бойових броньованих машин та інших об'єктів військової та цивільної техніки розроблено метод дискретного зміцнення. Крім того, розроблено та досліджено технології інтенсивного холодного пластичного деформування, спрямованого мікродугового оксидування, інноваційної високощільної вакуумно-плазмової обробки, комплексної обробки струмами високої частоти та термічного впливу, а також комплексного застосування декількох технологій у одному технологічному процесі.

Марченко А.П., Ткачук Н.А., Соболев О.В., Посвятенко Э.К., Хлань А.В., Шейко А.И., Бабич А.А., Фрид А.Ю., Погребной Н.А., Кравченко С.А.

#### ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КОМПОЗИЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗДЕЛИЙ ДЛЯ ОБОРОННОЙ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОТРАСЛЕЙ

Для решения актуальной и важной проблемы повышения прочности деталей боевых бронированных машин и других объектов военной и гражданской техники разработан метод дискретного упрочнения. Кроме того, разработаны и исследованы технологии интенсивного холодного пластического деформирования, направленного микродугового окисления, инновационной высокоплотной вакуумно-плазменной обработки, комплексной обработки токами высокой частоты и термического воздействия, а также комплексного применения нескольких технологий в одном технологическом процессе.

A. Marchenko, M. Tkachuk, O. Sobol, E. Posviatenko, O. Khlan, O. Sheiko, O. Babich, O. Frid, M. Pohribnyi, S. Kravchenko

#### INNOVATIVE TECHNOLOGIES OF COMPOSITE STRENGTHENING OF ELEMENTS SURFACES FOR DEFENSE AND ENERGY INDUSTRIES PRODUCTS

The discrete strengthening method is developed for solving the actual and important problem of strength increasing of the components of armored combat vehicles and other objects of military and civil engineering. In addition, the technologies of intensive cold plastic deformation, directed micro-arc oxidation, innovative high-density vacuum-plasma treatment, complex treatment of high-frequency currents and thermal effects, as well as the complex application of several technologies in one technological process are developed and studied.