

Рисунок 17 – Зависимость относительных максимальных давлений q от параметра χ при $L = 0$ и изменяемой силе притяжения P , кН

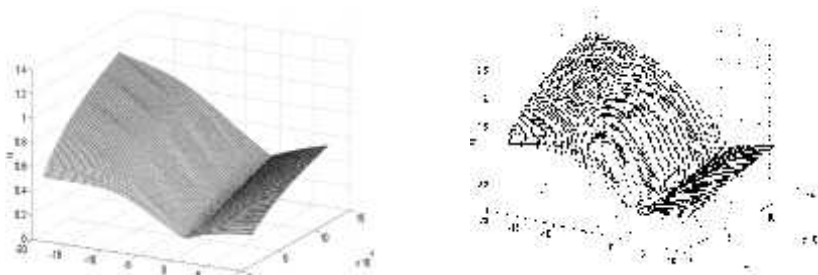


Рисунок 18 – Зависимость относительных максимальных давлений q от параметра χ при $L = 20$ и изменяемой силе притяжения P , кН

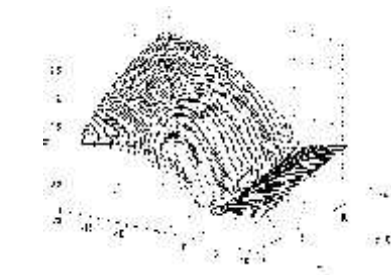


Рисунок 19 – Зависимость относительных максимальных давлений q от параметра χ при $L = 1$ и изменяемой силе притяжения P , кН

Выводы. Предложен общий подход к анализу контактного взаимодействия с привлечением модели Герца, МКЭ и МГЭ, причем в последнем предложен способ учета локальной податливости тел в зоне контакта за счет учета влияния шероховатости их поверхности на контактную жесткость. Известные оценки величины контактной податливости слоя шероховатости соответствуют определенным способам обработки [11]. Продемонстрирована также продуктивность постановки и решения задач оптимизации профиля беговой дорожки гидрообъемной передачи.

Полученные результаты планируется в дальнейшем применить при проектных исследованиях широкого класса машиностроительных конструкций, содержащих сложнопрофильные тела, находящиеся в условиях силового контакта.

Список литературы: 1. Ткачук Н.Н. Методы и модели для исследования контактного взаимодействия шарового поршня с беговой дорожкой в радиальной гидропередаче / Н.Н. Ткачук // Вестник НТУ "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ", 2008. – Вып. 2. – С.159–166. 2. Ткачук Н.Н. Анализ контактного взаимодействия сложнопрофильных элементов машиностроительных конструкций с кинематически сопряженными поверхностями: дисс... канд. техн. наук: спец. 05.02.09. – Харьков, 2011. – 203 с. 3. Львов Г.И., Ткачук Н.Н. Анализ контактного взаимодействия сложнопрофильных тел: вариант реализации метода граничных интегральных уравнений // Вестник НТУ "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2008. – № 42. – С.81–95. 4. Аврунин Г.А., Кабаненко И.В., Хавилью В.В. Объемная гидропередача с шариковыми поршнями ГОП-900: характеристики и технико-экономический уровень // Механика та машинобудування. – 2004. – №1. – С.14–21. 5. Hertz H. Über die Berührung fester elastischer Körper / H. Hertz // J. Reine Angew. Math. – 1881. – Vol. 92. – S. 156–171. 6. Ткачук Н.Н., Мо-

шович И.Я., Ткачук Н.А., Скрипченко Н.Б., Литвиненко А.В. Анализ контактного взаимодействия гладких и шероховатых тел методом граничных элементов: модели и разрешающие уравнения // КШП. ОМД. – М.: ООО "Тисо Принт", 2014. – № 3 – С. 3–10. 7. Ткачук Н.Н., Мошович И.Я., Ткачук Н.А., Скрипченко Н.Б., Литвиненко А.В. Анализ контактного взаимодействия гладких и шероховатых тел методом граничных элементов: модели и разрешающие уравнения // КШП. ОМД. – М.: ООО "Тисо Принт", 2014. – № 4 – С. 3–8. 8. Крауч С., Старфилд А. Методы граничных элементов в механике твердого тела. – М.: Мир, 1987. – 328 с. 9. Hughes T.J.R. The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis. – Courier Dover Publications, 2012. – 672 с. 10. Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / К. Джонсон. – М.: Мир, 1989. – 509 с. 11. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков. – М.: Машиностроение, 1986. – 336 с.

Bibliography (transliterated): 1. Tkachuk N.N. Metody i modeli dlya issledovaniya kontaktnogo vzaimodeystviya sharovogo porshnja s begovoy dorozhkoj v radialnoj gidroperedache / N. N. Tkachuk // Vestnik NTU "KhPI". – Kharkov: NTU "KhPI", 2008. – Vol. 2. – P.159–166. 2. Tkachuk N.N. Analiz kontaktnogo vzaimodeystviya slozhnoprofilnyh jelementov mashinostroitel'nyh konstrukcij s kinematicheski sopryazhennymi poverhnostjami: diss... kand. tehn. nauk: spec. 05.02.09. – Kharkov, 2011. – 203 p. 3. L'vov G.I. Analiz kontaktnogo vzaimodeystviya slozhnoprofilnyh tel: variant realizacii metoda granichnyh integralnyh uravnenij / L'vov G.I., Tkachuk N.N. // Vestnik NTU "KhPI". – Kharkov: NTU "KhPI", 2008. – No 42. – P. 81–95. 4. Avrunin G.A. Ob'emnaja gidroperedacha s sharikovymi porshnjami GOP-900: harakteristiki i tehniceskij uroven' / Avrunin G.A., Kabanenko I.V., Havil'ju V.V. // Mehanika ta mashinobuduvannja. – 2004. – No 1. – P.14–21. 5. Hertz H. Über die Berührung fester elastischer Körper / H. Hertz // J. Reine Angew. Math. – 1881. – Vol. 92. – P. 156–171. 6. Analiz kontaktnogo vzaimodeystviya gladkih i shegohovatyh tel metodom granichnyh jelementov: modeli i razreshajushhie uravnenija / Tkachuk N.N., Movshovich I.Ja., Tkachuk N.A., Skripchenko N.B., Litvinenko A.V. // KShP. OMD. – Moscow: ООО "Tiso Print", 2014. – No 3 – P. 3–10. 7. Analiz kontaktnogo vzaimodeystviya gladkih i shegohovatyh tel metodom granichnyh jelementov: modeli i razreshajushhie uravnenija / Tkachuk N.N., Movshovich I.Ja., Tkachuk N.A., Skripchenko N.B., Litvinenko A.V. // KShP. OMD. – Moscow: ООО "Tiso Print", 2014. – No 4 – P. 3–8. 8. Krauch S. Metody granichnyh jelementov v mehanike tverdogo tela / Krauch S., Starfield A. – Moscow: Mir, 1987. – 328 p. 9. Hughes T.J.R. The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis. – Courier Dover Publications, 2012. – 672 p. 10. Dzhonson K. Mehanika kontaktnogo vzaimodeystviya / K. Dzhonson. – Moscow: Mir, 1989. – 509 p. 11. Reshetov D.N. Tochnost' metallorazhushhih stankov / Reshetov D.N., Portman V.T.. – Moscow: Mashinostroenie, 1986. – 336 p.

Поступила (received) 21.05.2015

УДК 621.43:62-192

М. А. ТКАЧУК, д.т.н., проф., зав. каф. "ТММіСАПР" НТУ "ХПІ";
М.Л. БЕЛОВ, к.т.н., ген. директор ДП "Завод ім. В.О. Малишева", Харків;
О.І. ШЕЙКО, гол. інж. ДП "Завод ім. В.О. Малишева", Харків;
С.О. КРАВЧЕНКО, к.т.н., ст. наук. співр. каф. "ДВЗ" НТУ "ХПІ";
Е. К. ПОСВЯТЕНКО, д.т.н., проф., проф. каф. "Виробництво, ремонт та матеріалознавство" Національного транспортного університету, Київ;
В.В. ШПАКОВСЬКИЙ, д.т.н., проф., проф. каф. "ДВЗ" НТУ "ХПІ";
С.С. ДЯЧЕНКО, д.т.н., проф., проф. каф. "Технологія машинобудування і ремонту машин" Харк. нац. автомоб.-дор. ун-ту;
В.Г. ГОНЧАРОВ, к.т.н., ген. директор приватної науково-дослідної виробничо-комерційної фірми "ТАВІ", Харків;
І.В. ПОНОМАРЕНКО, к.т.н., доц., доц. каф. "Технологія машинобудування і ремонту машин" Харк. нац. автомоб.-дор. ун-ту;
В. М. ШЕРЕМЕТ, здобувач каф. ТММіСАПР, НТУ "ХПІ"

МЕТОДИ, ЗАСОБИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ДИСКРЕТНО-КОНТИНУАЛЬНОГО ЗМІЦНЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

В роботі на основі теоретико-множинного підходу запропоновані нові концепції і методи підвищення ресурсу серії двигунів і спеціальної техніки шляхом створення нових технологій зміцнення поверхонь їхніх деталей, а також на вирішена низка фундаментальні та прикладні задачі. Розроблена концепція узагальненого параметричного моделювання складних механічних систем при нечітких критеріях, аналізу процесів

© М. А. Ткачук, М.Л. Белов, О.І. Шейко, С.О. Кравченко,
Е.К. Посвятенко, В.В. Шпаковський, С.С. Д'яченко,
В.Г. Гончаров, І.В. Пономаренко, В. М. Шеремет, 2015

та синтезу нових технологій зміцнення для збільшення ресурсу серії двигунів і агрегатів спеціальної техніки. Науково обгрунтовані матеріали, режими та параметри процесів зміцнення для розроблених методів дискретного зміцнення, корундування та іонного бомбардування зі створенням мікронаноструктур та проектно-технологічні рішення при створенні та ремонті двигунів і агрегатів спеціальної техніки.

Ключові слова: технологія зміцнення поверхонь, підвищення ресурсу, дискретне зміцнення, корундування, іонне бомбардування

Вступ. Проблема створення міцних, довговічних надійних машин, в т.ч. двигунів і агрегатів для цивільної та військової техніки, забезпечення їхніх високих технічних і тактико-технічних характеристик (ТХ і ТТХ) за мінімальних витрат, енергоефективних та екологічно безпечних методів виробництва, безумовно, є одним із важливих завдань для України, як і для інших світових країн. Як відомо, об'єкти сучасної техніки працюють у важких умовах експлуатації. На деталі та агрегати одночасно здійснюється вплив багатьох чинників – високих і неоднорідно розподілених напружень, циклічних навантажень, які викликають втому матеріалу деталей, високі температури та тертя, результатом якого є підвищений знос контактуючих поверхонь, вплив агресивного середовища тощо. Тому при виробництві машинобудівних конструкцій необхідний пошук і застосування таких технологій, які дозволили би хоча б частково вирішити ці завдання.

Метою роботи є розробка науково-технічних основ підвищення ресурсу та забезпечення міцності, довговічності, ТХ і ТТХ сучасних машин за рахунок застосування технологій дискретного та дискретно-континуального зміцнення робочих поверхонь чавунних і сталевих деталей та зміцнення поверхонь алюмінієвих деталей гальвано-плазмовим методом, створення комплексної технології, яка об'єднує переваги перших двох, а також способу іонного бомбардування. У роботі дослідження здійснювалися на прикладі двигунів та агрегатів спеціальної техніки.

Аналіз існуючих рішень. До об'єктів спеціальної техніки, які розглядаються в цій роботі, відносяться бронемашини, тягачі, автомобілі, тепловози різного призначення, автономні установки енергозабезпечення тощо, а також різноманітні агрегати і захисні елементи конструкцій. Основними вимогами до них є надійність та безвідмовність у роботі. Так, двигуни бойових машин працюють у важких умовах, піддаються впливу високих теплових і механічних навантажень, особливо за високих та низьких температур навколишнього середовища. Це сприяє збільшенню

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.

Зазвичай для деталей, що працюють в умовах підвищених навантажень, тертя і зносу, застосовують комплексну термічну обробку – спочатку виконують об'ємне зміцнення, яке знімає залишкові напруження і забезпечує властивості серцевини, потім – поверхневе зміцнення для досягнення високої зносостійкості [1, 2]. Матеріал таких деталей в серцевині повинен мати високу міцність, в тому числі і в'язкість, певний запас пластичності. Наприклад, для сталевих і чавунних колінчастих валів найчастіше такий комплекс властивостей досягається нормалізацією. Зміцнення робочих поверхонь шийок таких валів забезпечують застосуванням різних технологій, у тому числі азотуванням або загартовуванням з використанням СВЧ. Ці методи не є оптимальними. Азотування є дуже тривалим процесом (більше 70 годин) і призводить до істотної втрати міцності серцевини та, як наслідок, до великої залишкової деформації вала в кінцевому результаті. Поверхневе зміцнення знижує втомну міцність, що неприпустимо, оскільки, як правило, зношування поверхонь тертя відбувається при багатоциклового навантаженні.

Для підвищення зносостійкості поверхонь тертя також застосовують нанесення різного роду покриттів. Цей спосіб найчастіше застосовують при ремонті деталей. Але нанесення покриттів вимагає збільшення припусків на механічну обробку для усунення деформації деталі. До того ж не завжди забезпечується якісне зчеплення покриття з основою деталі. Серцевина деталі може перегрітися, що викличе втрату її міцності. При цьому у зв'язку із різними теплопровідністю і коефіцієнтом теплового розширення основного металу і матеріалу покриття на поверхні деталі можуть виникнути тріщини і відколи покриття. Також можуть утворитися технологічні концентратори напружень, які знижують втомну міцність деталі. Внаслідок зазначених обставин ресурс двигунів у реальних умовах експлуатації є нижче нормативного.

Постановка задачі. У роботі проблема підвищення ресурсу та надійності роботи алюмінієвих, чавунних і сталевих деталей двигунів і агрегатів спеціальної техніки досягається за рахунок розробки і застосування технологій гальвано-плазмового перетворення алюмінієвих поверхонь та дискретного зміцнення робо-

чих поверхонь чавунних і сталевих деталей, холодного пластичного деформування та іонного бомбардування, а також комплексного застосування цих технологій у одному вузлі тертя.

Методи зміцнення. Розглянемо технологію дискретного зміцнення робочих поверхонь чавунних і сталевих деталей (рисунк 1). В основі технології електроіскрового зміцнення лежить метод, запропонований більше 70 років тому радянськими вченими Лазаренко, що базується на використанні електророзрядів для керованого руйнування матеріалу деталі з отриманням необхідних форм і розмірів [3, 4]. Застосовувався для зміцнення дрібних деталей та інструменту. Проте проблемним є отримання стабільного шару суцільного покриття по-



Рисунок 1 – Дискретне зміцнення елементів двигунів і агрегатів спеціальної техніки

верхні. У цій роботі замість суцільного пропонується дискретне покриття.

При розробці нових технологій однією з основних проблем є пошук рішення при нечітко вираженому і варійованому просторі даних, при нечітких критеріях, обмеженнях і невизначених характеристиках самого технологічного процесу. Це стосується, в першу чергу, науково-технічної проблеми розробки ефективних технологій поверхневого зміцнення високонавантажених елементів машин, які знаходяться в рухомому контакті. Як уже було зазначено, традиційні технології при вирішенні цієї проблеми мають ряд принципових недоліків. Важливо те, 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, по-перше, розробити теоретичну основу, математичну модель для багатоваріантного дослідження та оптимізації характеристик стану поверхневого шару у поєднанні зі станом матеріалу у глибині, по-друге, провести із застосуванням розроблених підходів дослідження та синтез схем і параметрів нової технології. З цієї метою в роботі вирішені нові наукові проблеми та прикладні **завдання**:

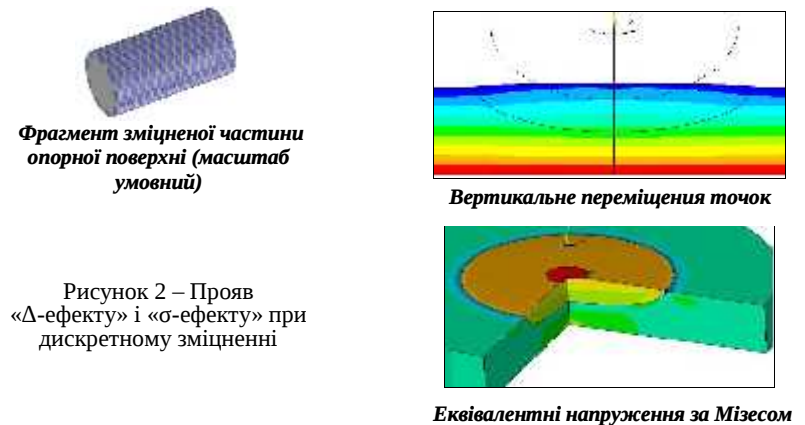
- 1) розробка нових теоретико-множинних підходів до генерації математичних, числових і фізичних моделей досліджуваних і створюваних технологій і станів зміцнених елементів машин;
- 2) реалізація розробленого підходу в комплексній математичній моделі дослідження напружено-деформованого стану (НДС) елементів машин в контакті, 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 оброблені із застосуванням нових технологій зміцнення;
- 5) розробка науково обґрунтованих технологічних режимів та підвищення ТХ і ТТХ спеціальної техніки.

Оскільки перелічені наукові проблеми і завдання є новими, актуальними і важливими, що стоять на сьогодні перед механікою, технологією машинобудування та машинознавством, то для їх вирішення були задіяні найбільш передові теоретичні, комп'ютерно-інформаційні та апаратні розробки, системи та засоби.

Аналіз та узагальнення отриманих результатів дало можливість встановити два типи ефектів впливу на НДС, що виникають при виконанні дискретно-континуального зміцнення: "Δ-ефект" і "σ-ефект" [5]. Перший полягає в тому, що легована область дискретного зміцнення при дії нормального тиску в деформованому стані дещо виступає над незміцненою областю (на величину Δ). Числовою характеристикою при цьому є відношення Δ до діючого тиску p, розрахункова величина якого може досягати 0,1 мкм/МПа і більше. Таким чином, ця виступаюча область поверхні приймає на себе більшу частину сил контактного тиску у сполю-

ченні 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, цим створюються на поверхні лабіринти для проходження мастила. Найбільший "Δ-ефект" досягається при відносній площі зміцнення 60...80%.

Інший ("σ-ефект") з'являється із-за характерного розподілу напружень в зоні дискретного зміцнення: напруження великі в цій зоні навіть при рівномірному прикладанні тиску на поверхню, в результаті цього еквівалентні напруження більші 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 "σ-ефект" досягає при відносній площі зміцнення 65...75%. Зіставлення інтервалів найбільшого позитивного прояву "Δ-ефекту" і "σ-ефекту" дає можливість визначити рекомендований інтервал зони дискретності в області 60...75% (рисунк 2). На цій підставі можна стверджувати, що інтегральний вплив запропонованої технології на НДС зміцнених тіл в приповерхневому шарі дуже сприятливий як для його загальної міцності та твердості, так і для стійкості проти зношування.



Металографічний аналіз зразків після дискретного зміцнення показав, що у приповерхневому шарі досліджуваних зразків чітко проявляється зона, яка різко відрізняється від основного матеріалу. Вона має вигляд світлої блискучої точки. Умовно цю зону можна назвати "білим" шаром, мікротвердість якого перевищує мікротвердість основного матеріалу і знаходиться в межах 500...1000 МПа. Результати фазового, мікрорентгено-спектрального і спектрального аналізу та металографії показали, що "білим" шаром є твердий

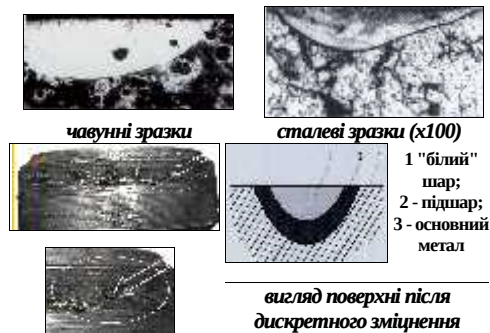


Рисунок 3 – Зміцнені зони

розплав із суміші матеріалів електрода і зразка, які перемішалися в момент електричного розряду (в полум'ї дуги), а потім кристалізувався при охолодженні з великою швидкістю. Безпосередньо під "білим" шаром розташовується зона змінного хімічного складу і мікротвердості (рисунок 3). Експлуатаційними випробуваннями встановлено, що дискретне зміцнення чавунних колінвалів забезпечує підвищення їх зносостійкості у 8...10 разів порівняно зі станом після нормалізації і в 1,3...1,5 разів – порівняно із гартуванням СВЧ. Для сталевих колінвалів зносостійкість збільшується в 1,6...3,5 рази порівняно із азотуванням. Одночасно з цим як у двигунів та інших силових агрегатів, деталі яких виготовлені з чавуну і сталі, так й у чавунних валів поліпшується припрацьовуваність і збільшується зносостійкість валу та вкладиша, а також підвищується втомна міцність.

У результаті на базі розробок і багаторічного досвіду із адаптації та впровадження у виробництво дискретного зміцнення Національним технічним університетом "ХПІ", ДП "Завод ім. В.О. Малишева" (ДП "ЗіМ"), приватною науково-дослідною виробничо-комерційною фірмою "ТАВІ", Національним транспортним університетом, Харківським національним автомобільно-дорожнім університетом була вирішена комплексна цілісна проблема розробки способів зміцнення поверхні високонавантажених деталей, що виключає недоліки традиційних технологій зміцнення. Так, 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 та ін.); електродугової металізації (CRP Industry, США). Більш того, цей метод є кращим, оскільки не має недоліків, властивих кожному з вище названих способів зміцнення. Дискретне зміцнення деталей виконується на додатково обладнаних станках. 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;

задиристійкість; оптимальне перекриття зміцнених зон (плям), тобто площа зміцнення; доступна ціна матеріалу електрода.

При впровадженні технології дискретного зміцнення на ДП "ЗіМ" для визначення впливу масштабного чинника на властивості колінчастих валів двигунів типу Д80, зміцнених методом дискретного зміцнення (високоміцний легований чавун з кульовим графітом), проведено натурні випробування на втомнісну міцність. Випробування були проведені на двох кривошипних колінчастих валах дизеля Д80. Аналіз проведених випробувань показав, що масштабний фактор впливає несуттєво. Одночасно підтверджено, що дискретне зміцнення не призводить до зниження втомної міцності виробу. Такий же результат отриманий і для сталевих колінчастих валів. На підставі отриманих експериментальних даних дискретне зміцнення рекомендовано для корінних і шатунних шийок колінчастих валів високофорсованих двигунів та інших силових агрегатів, деталі яких виготовлені з чавуну і сталі. Двигун був підданий експлуатаційним випробуванням в депо "Основа" ДП "Укрзалізниця", де в умовах експлуатації підтвердив отримані результати.



Рисунок 4 – Магістральний тепловоз 2ТЕ10М з модернізованим двигуном зі зміцненим валом

З метою розширення використання технології дискретного зміцнення для колінчастих валів інших двигунів також були проведені дослідницькі роботи по зміцненню шийок колінвалів, виготовлених з різних легованих сталей, які використовуються для двигунів типу 10Д100, Д80, 5Д49 (тепловози) і КамАЗ-740 (шасі установок "Град", бронетранспортери тощо). У результаті, наприклад, пробіг тепловозів зростає до 4-х разів, автомобіля – у 1,5-2,0 рази. Дана технологія виготовлення

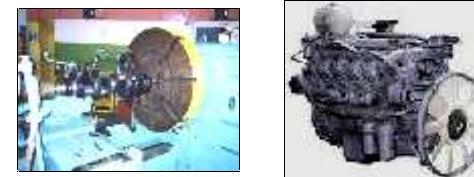


Рисунок 5 – Дискретно зміцнений колінчастий вал двигуна КамАЗ для встановлення на шасі установки "Град"



та ремонту колінчастих валів використовується на Ізюмському тепловозоремонтному заводі при ремонті та модернізації магістральних тепловозів серії 2ТЕ10 та 2ТЕ116 (рисунок 4). Крім того, технологія дискретного зміцнення при ремонті колінчастих валів використана для двигунів автомобілів (ри-

сунок 5) та інших машин на підприємствах Міністерства оборони України.

Для забезпечення автономного живлення спеціальних об'єктів розроблено установки на основі модернізованого двигуна Д80 із зміцненими елементами (ДП "Завод ім. Малишева") (рисунк 6). Крім проведених вище випробувань, в період з 2001 року до теперішнього дня були здійснені експлуатаційні випробування дискретно зміцнених деталей двигунів автомобілів КамАЗ, КраЗ та інших транспортних засобів на ВАТ "ХЗТСП" та Добропільській автобазі. Доцільність застосування технології дискретного зміцнення була також підтверджена на ВАТ "Краматорський завод важких верстатів" при виробництві деталей шпиндельної групи верстатів моделей 9А350Ф1, 9А340. Ця технологія апробована на Криворізькому меткомбінаті при обробці декількох комплектів прокатних валків, що забезпечило випуск додаткової продукції на 15 млн. грн.

Досліджено та рекомендовано дискретне зміцнення робочих поверхонь деталей гідропередач, зміцнення елементів бронетранспортерів БТР-70, 80, БТР-94Б (ДП "Завод ім. Малишева").

За останні 20 років в НТУ "ХПІ" розроблена і впроваджена у виробництво також технологія гальвано-плазмового перетворення алюмінієвих поверхонь [7] (рисунк 7). Розробка і доведення цього технологічного процесу здійснювалися на дослідницькій установці "Корунд-7" в лужному електроліті при робочій напрузі 1000-1200 В та щільності струму до $1 \cdot 10^4$ А/м². Ця технологія відрізняється від раніше відомих методів МДО електрофізичними параметрами процесу, конфігурацією імпульсів напруги, має більш високу швидкість формування корундового керамічного шару за рахунок високої щільності струму, дозволяє обробляти відносно великі поверхні, видаляє з поверхневого шару деталі неметалеві домішки, легкоплавкі сполуки, які мають малу адгезію до основного металу і більш низьку теплостійкість. При цьому корундовий шар набуває більш високу мікротвердість (17-20 ГПа) і теплостійкість до 1200°C.

На рисунку 8 чітко видно сліди зношування покриття дисульфиду молібдену та мікронерівностей. Після гальвано-плазмової обробки цього ж порш-



Рисунк 6 – Форсовані двигуни для установок автономного енергоживлення спеціальних об'єктів на базі модернізованих двигунів Д80



Рисунк 7 – Електролітична ванна для гальвано-плазмового перетворення алюмінієвої поверхні



Рисунк 8 – Бокова поверхня поршня СМД після випробувань і після корундування



Рисунк 9 – Циліндрична поверхня поршня з АЛ 25 до і після корундування

ня і поліровки поверхня поршня стає пористою і має дзеркальну поверхню. Розміри діаметра поршня при цьому не змінюються. Корундовий шар складається з гексагональних комірок з центрально орієнтованими порами, в основному має кристалічну будову з хаотичним орієнтуванням кристалів (рисунки 8-10).

Експлуатаційні випробування поршнів проводилися в локомотивному депо Харків-Сортувальний. У жовтні 1992 р. була виконана технологічна гальвано-плазмова обробка 12 поршнів дизелів тепловозів ЧМЕ-3.

Контрольні параметри рівня експлуатаційних характеристик тепловозів ЧМЕ-3 вимірювалися при проведенні реостатних випробувань під час поточних ремонтів (рисунки 10-12). Здійснювалися контрольний огляд і мікрометраж гільз циліндрів, які показали, що нижче контакту з компресійним кільцем усі гільзи мають дзеркальну поверхню без поздовжніх подрятин і видимого зношування. Установлено, що знос гільз зростає поступово і знаходиться в допустимих межах, ресурс поршнів зріс у 2,8-4,0 рази, трати палива знизилися до 5%.

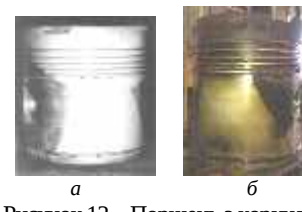
Також розроблено новий метод зміцнення за допомогою іонного бомбардування - ІБ [7-10]. Підвищення механічних характеристик – на рівні до 40%. Воно досягається за рахунок створення на поверхні деталей субмікроструктури із наноелементами (рисунки 13-15, таблиці 1 (примітка: Вих. – вихідний стан (поліпшення); шліф. – шліфування; полір. – полірування; пор. – порівняно), 2). Він продемонстрував різке підвищення механічних властивостей деталей.



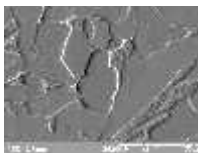
Рисунк 10 – Поршень дизеля з корундовим шаром К6S310DK відпрацював 114676 мотогодин



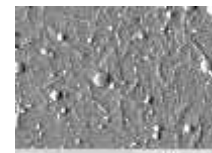
Рисунк 11 – Серійний поршень дизеля К6S310DK відпрацював 46512 мотогодин



Рисунк 12 – Поршень з корундовим шаром дизеля тепловоза ЧМЕ-3: а – до випробувань, б – після напрацювання 114676 мотогодин



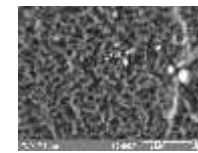
а (до ІБ)



б (після ІБ)



в (до ІБ)



г (після ІБ)

Рисунк 13 – Мікроструктура відпаленої сталі 20 (а, б – х500; в, г – х10000)

Таблиця 1 – Механічні властивості, їх середні квадратичні відхилення (S) і шорсткість (Ra) зразків після різної обробки (сталь 18ХГТ; вихідний стан – поліпшення)

№	Обробка	σ_b , МПа	$\sigma_{0.2}$, МПа	δ , %	ψ , %	Ra, мкм
1	Вих. шліф.	854; S = 13	717; S = 15	18	64	0,49
2	Вих. полір.	934 (+ 9 %); S = 24	875 (+22 %); S = 26	16	64	0,12
3	Вих. шліф. + ІБ	1003 (+ 17 % пор. з 1, + 7 % пор. з 2); S = 10	962 (+ 34 % пор. з 1, + 10 % пор. з 2); S = 13	15	67	0,17
4	Вих. шліф. + ІБ+ TiN	1056 (+ 24 % пор. з 1, + 5 % пор. з 3); S = 31	1007 (+40 % пор. з 1, + 5 % пор. з 3); S = 33	15	67	0,29
5	Після вида- лення шару	852; S = 14	716; S = 14	18	64	0,47

Таблиця 2 – Вплив ІБ на циклічну довговічність сталей

Матеріал і обробка	Величина напружень, МПа	Кількість циклів до руйнування	Результат випробувань
Сталь 40Х, без ІБ	380	297600	зруйнувався
Сталь 40Х, після ІБ	430	453840	зруйнувався
Сталь 60Г, без ІБ	380	937440	зруйнувався
Сталь 60Г, після ІБ	550	1116000	не зруйнувався

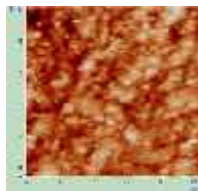


Рисунок 14 – Топографія поверхні зразка після ІБ

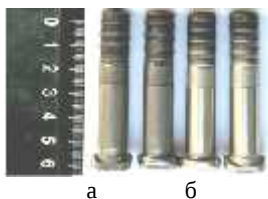


Рисунок 15 – Шатунні болти двигуна ЗМЗ-406: а – у початковому стані; б – після ІБ

Висновки. На основі проведених фундаментальних і прикладних досліджень вперше науково обґрунтована та експериментально підтверджена можливість підвищення ресурсу високонавантажених деталей двигунів і агрегатів спеціальної техніки методами гальвано-плазмового перетворення алюмінієвих поверхонь і дискретного зміцнення деталей з чавунних і сталевих сплавів та іонного бомбардування. Ці методи забезпечують більш високий, порівняно з відомими способами зміцнення, рівень зносостійкості і міцності з одночасним підвищенням задиростійкості та зниженням зношування. Запропоновані технології здійснюють мінімальний вплив на навколишнє сере-

довище. При цьому в 5...8 разів зменшується час і вартість технологічних операцій з дискретного зміцнення. Границя між зміцненим шаром і основним металом не є технологічним концентратором напружень і не знижує втомну міцність деталі. Організоване серійне виробництво, ремонт та реконструкція серії двигунів КамАЗ, 10Д100, Д80, Д49, а також агрегатів спеціальної техніки: автомобільні двигуни для військової техніки, тепловозні двигуни, колісні пари рухомого складу залізничного транспорту, верстати, валки прокатних станів тощо. Досягнуто значний економіч-

ний ефект. Впровадження результатів проведених дослідних робіт в серійне виробництво дало можливість підвищити до світового рівня технічні і тактико-технічні характеристики та скоротити закупівлю дорогих імпорتنих запасних частин до двигунів, а також інших агрегатів спеціальної техніки.

Запропоновані методи, способи та технології планується у подальшому удосконалити та впровадити при виробництві широкої множини машинобудівних конструкцій.

Список літератури: 1. Інженерія поверхні / К.А. Ющенко, Ю.С. Борисов, В.Д. Кузнецов, В.М. Корж. – К.: Наук. думка, 2007. – 558 с. 2. Канарчук В.Є. Інженерія поверхні деталей транспортних засобів / В.Є. Канарчук, Е.К. Посвятенко, Л.А. Лопата // Вісник НТУ. – К.: Вісник НТУ, 2000. – Вип. 4. – С. 3-14. 3. Гончаров В.Г. Підвищення ресурсу транспортної техніки удосконаленням технології ремонту колінчастих валів: Автореф. ... канд. техн. наук: 05.22.20 / В.Г. Гончаров: Харківський національний автомобільно-дорожній ун-т. – Х., 2008. – 19 с. 4. Кравченко С.А. Повышение надежности деталей двигателей методом дискретного упрочнения / С.А. Кравченко, В.Г. Гончаров. // Двигатели внутреннего сгорания. – 2009. – №1. – С. 97-99. 5. Кравченко С. Комбинированные технологии повышения износостойкости высоконагруженных пар трения / С. Кравченко, Е. Посвятенко, М. Ткачук, О. Веретельник // Системы і засоби транспорту samochodowego. Wybrane zagadnienia. Monografia nr 5. Seria: Transport. – Rzeszów: Politechnika Rzeszowska, 2014 – S. 269-280. 6. Шпаковский В.В. Результаты математического моделирования температурного состояния поверхности камеры сгорания поршня с керамическим поверхностным слоем / В.В. Шпаковский, А.П. Марченко, В.В. Пылев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 3(60) – С.80-84. 7. Дяченко С.С. Вплив іонно-плазмового покриття на механічні характеристики виробу / С.С. Дяченко, І.В. Дошечкіна, І.В. Пономаренко // Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх оброблення для підвищення надійності та довговічності виробів. 36. мат. Х Міжн. наук.-техн. конф. Запоріжжя, 20-22 вересня, 2005 р., – С. 89-91. 8. Дяченко С.С. Іонно-плазмова обробка як фактор підвищення конструкційної міцності сталевих виробів / С.С. Дяченко, І.В. Пономаренко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2009. – №1. – С. 71-77. 9. Дяченко С.С. Підвищення надійності виробів створенням поверхневої нанокристалічної структури при іонному бомбардуванні / С.С. Дяченко, І.В. Пономаренко // Тр. Межд. конф. "Физико-химические принципы формирования и модифицирования микро- и наноструктур". ХГУ им. Каразина. – 2009. – С. 123-131. 10. Дяченко С.С. Топографические особенности поверхности стальных изделий після різних технологічних воздействий / С.С. Дяченко І.В. Пономаренко // Межд. сб. науч. тр. "Прогрессивные технологии и системы машиностроения". – ДОННТУ. – 2014. – № 1(47). – С. 128-138.

Bibliography (transliterated): 1. Inzheneriya poverkhni / K.A. Yushchenko, Yu.S. Borysov, V.D. Kuznetsov, V.M. Korzh. – Kyiv: Nauk. dumka, 2007. – 558 p. 2. Kanarchuk V.Ye. Inzheneriya poverkhni detaley transportnykh zasobiv / V.Ye. Kanarchuk, E.K. Posvyatenko, L.A. Lopata // Visnyk NTU. – Kyiv: Visnyk NTU, 2000. – Vol. 4. – P. 3-14. 3. Honcharov V.H. Pidvyshchennya resursu transportnoyi tekhniki udoskonalenniam tekhnolohiyi remontu kolinchastykh valiv: Avtoref. ... kand. tekhn. nauk: 05.22.20 / V.H. Honcharov: Kharkivskyy natsional'nyy avtomobil'no-dorozhniy un-t. – Kharkov, 2008. – 19 p. 4. Kravchenko S.A. Povyshenie nadezhnosti detaley dvigateley metodom diskretnogo uprochneniya / S.A. Kravchenko, V.G. Goncharov. // Dvigateli vnutrennego sgoraniya. – 2009. – No 1. – P. 97-99. 5. Kravchenko S. Kombinirovannyye tekhnologii povysheniya iznosostojkosti vysokonagruzhennykh par treniya / S. Kravchenko, E. Posvyatenko, M. Tkachuk, O. Veretel'nik // Systemy i srodki transportu samochodowego. Vybrane zagadnienia. Monografia nr 5. Seria: Transport. – Rzeszów: Politechnika Rzeszowska, 2014 – P. 269-280. 6. Shpakovskiy V.V. Rezul'taty matematicheskogo modelirovaniya temperaturnogo sostojaniya poverhnosti kamery sgoraniya porshnja s keramicheskim poverhnostnym sloem / V.V. Shpakovskiy, A.P. Marchenko, V.V. Pylev // Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija. – 2009. – No 3(60) – P. 80-84. 7. Dyachenko S.S. Vplyv ionno-plazmovoho pokryttya na mekhanichni kharakterystyky vyrobu / S.S. Dyachenko, I.V. Doshchekina, I.V. Ponomarenko // Novi konstruktivni stali ta stopy i metody yikh obroblyennya dlya pidvyshchennya nadiynosti ta dovhovichnosti vyrobiv. Zb. mat. Kh Mizhn. nauk.-tekhn. konf. Zaporizhzhya, 20-22 veresnya, 2005 g., P.

89–91. 8. Dyachenko S.S. Ionno-plazmova obrobka yak faktor pidvyshchennya konstruktivnoyi mitsnosti stalevykh vyrobiv / S.S. Dyachenko, I.V. Ponomarenko // Novi materialy i tekhnolohiyi v metalurhii ta mashynobuduvanni. – 2009. – No 1. – P. 71-77. 9. Dyachenko S.S. Pidvyshchennya nadiynosti vyrobiv stvorenyam poverkhnivoyi nanokrysta-lichnoyi struktury pry ionnomu bombarduvanni / S.S. Dyachenko, I.V. Ponomarenko // Tr. Mezhd. konf. "Fiziko-himicheskie principy formirovaniya i modifitsirovaniya mikro- i nanostruktur". HGU im. Karazina. – 2009. – P. 123-131. 10. Djachenko S.S. Topograficheskie osobennosti poverhnosti stal'nykh izdelij pislja razlichnykh tehnologicheskikh vozdeystvij / S.S. Djachenko I.V. Ponomarenko // Mezhd. sb. nauch. tr. "Progressivnye tehnologii i sistemy mashinostroeniya". – DonNTU. – 2014. – No 1(47). – P. 128-138.

Надійшла (received) 09.03.2013

УДК 539.3: 629.4

А.Д. ЧЕПУРНОЙ, д-р техн. наук, проф., директор по научно-техническому развитию "УК "РТХ", Москва;
А.В. ЛИТВИНЕНКО, к.т.н., ген. директор НИЦ "УК "РТХ", Мариуполь;
Р.И. ШЕЙЧЕНКО, нач. сектора Представительства "УК "РТХ", Мариуполь;
Р.В. ГРАБОРОВ, нач. группы технич. расчетов Представительства "УК "РТХ";
М.А. ЧУБАНЬ, асп. каф. ТММ и САПР НТУ "ХПИ"

ХОДОВЫЕ ПРОЧНОСТНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ВАГОНА-ПЛАТФОРМЫ

В статье описаны методика и результаты ходовых прочностных, динамических и ресурсных испытаний вагона-платформы модели 13-9975, проведенных с целью экспериментальной проверки соответствия динамических напряжений в основных несущих элементах вагона при его движении, а также показателей качества хода требованиям нормативно-технической документации. Описана разработанная схема загрузки длиннобазного вагона-платформы, учитывающая особенности его конструкции, восприятия и передачи нагрузок при эксплуатации. Приведены и оценены показатели ходовых качеств вагона при движении с различными режимами загрузки и различными скоростями на характерных участках железнодорожного пути. Сделан вывод об удовлетворении критериев динамичности, безопасности и прочности, предъявляемых к конструкциям данного типа.

Ключевые слова: вагон-платформа, эксперимент, испытания, тензорезистор, оценка динамичности, оценка прочности, напряженное состояние, динамические параметры

Введение. Для создания надежной, долговечной и в то же время рациональной конструкции вагона наряду с расчетными исследованиями [1, 2] и исследованиями с использованием аналитических методов моделирования [3, 4] предусматриваются также и экспериментальные исследования [5, 6]. Причем проведение натурных испытаний является базовым методом для оценки конструкции.

Целью данной статьи является описание ходовых прочностных и динамических испытаний вагона-платформы для крупнотоннажных контейнеров модели 13-9975, построенный на ОАО "Новозыбковский машиностроительный завод". Задача испытаний – определить величину и характер напряжений в основных несущих

элементах вагона при его движении на различных участках пути (многократное их воздействие вызывает явления, связанные с усталостью металла, что приводит к зарождению и накоплению повреждений, появлению трещин) и показатели качества хода вагона.

Общие положения. Испытания проводились для проверки соответствия вагона параметрам, значения которых регламентированы [7] в соответствии с "Методикой проведения динамико-прочностных испытаний грузового вагона" и методикой АЛВЯ.ИЦ 004 ПМ "Методика сертификационных испытаний. Определение коэффициента устойчивости колеса от схода с рельсов и коэффициента устойчивости вагона от опрокидывания", а также [8]. Технические характеристики опытного образца вагона приведены в таблице 1, общий вид рамы показан на рисунке 1.

© А.Д. Чепурной, А.В. Литвиненко, Р.И. Шейченко, Р.В. Граборов, М.А. Чубань, 2015



Рисунок 1 – Общий вид рамы вагона-платформы модели 13-9975

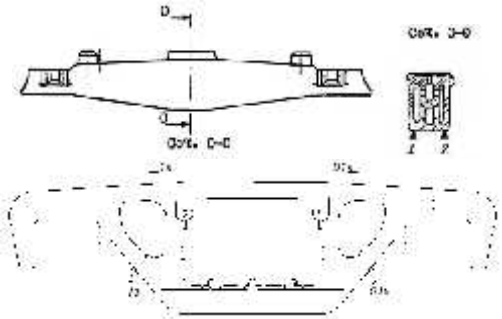


Рисунок 2 –
Схема наклейки
тензорезисторов
на тележку

Высота от уровня верха головок рельсов максимальная, мм	1608
Количество осей, шт.	4
Типы транспортируемых контейнеров (контейнеры ГОСТ Р51876 серии 11СО)	1AAA, 1AA, 1A, 1AX, 1BB, 1BBB, 1B, 1BX, 1CC, 1C, 1CX, 1EEE, 1EE

Для загрузки вагона-платформы до полной грузоподъемности использовались два контейнера-сухогруза типоразмера 1СС (груженные песком) массами по 5400 кг и два контейнера-цистерны типа 22Т6, модели Т-11-25Н-02 (груженные водой) массами по 29400 кг.

Для проведения ходовых испытаний тензорезисторами оборудовались две тележки, которые были подкатаны под вагон так, чтобы оборудованные стороны боковых рам тележек находились со стороны автосцепок. На шкворневой балке рамы вагона над оборудованной