

УДК 629.3.083

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.236-249](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.236-249)**О.В. Іванкова**, доц., канд. техн. наук, **О.А. Бурлака**, доц., канд. техн. наук*Полтавський державний аграрний університет, м. Полтава, Україна**e-mail: olena.ivankova@pdau.edu.ua, oleksii.burlaka@pdau.edu.ua***В.Ю. Бартош**, директор*ТОВ Авто-Моторна Компанія, м. Полтава, Україна**e-mail: amksto01@gmail.com*

Матеріали та технології для відновлення зношених поверхонь автомобільних деталей

Проведено дослідження зношених поверхонь колінчастих валів автомобільних двигунів. Проаналізовано закономірності утворення дефектів колінчастих валів двигунів вантажних автомобілів. З цією метою досліджено вибірку з 20 двигунів. Визначено які саме дефекти найбільше впливають на ресурс колінчастих валів. Проаналізували методи відновлення та вибрали оптимальний. Проведені дослідження використання електроіскрового нарощування, експерименти з нарощування шару на сталіні зразки.

Досліджені: залежність сумарного приросту катода від вмісту карбону та числа проходів електрода, визначено товщину нанесеного на поверхню деталі шару, твердість зразків з покриттям, міцність зчеплення нарощеного шару з основним. Визначили оптимальні матеріали для нарощування, а також параметри технологічного процесу.

Випробуваннями на міцність зчеплення нарощеного шару з основою встановлено високий (638,7 МПа) рівень міцності. На основі проведених випробувань встановили, що зразки сталі з нанесеним покриттям мають вищу твердість у порівнянні зі зразком після термічної обробки. Досліди показали що для електроіскрового нарощування зразків сталей 45Г, 40Х оптимальними електродні матеріали з вмістом карбону 1,0%Ст хрому 17,0% Сг.

автомобіль, колінчастий вал, зношування, електроіскрове нарощування, міцність зчеплення, твердість

Постановка проблеми. Повноцінний розвиток та конкурентоспроможність різних галузей економіки країни в значній мірі залежить від рівня ефективності транспортного комплексу. Саме автомобільний транспорт в сучасних умовах забезпечує раціональну організацію виробництва та транспортування продукції промисловості та аграрного виробництва [1, 2]. Існує суттєва залежність успішної діяльності сільськогосподарських виробників від якості експлуатації автомобілів.

Матеріали, з яких виготовляють деталі автомобілів, визначають: рівень технологічності в процесі виготовлення; надійність та довговічність в період експлуатації; економічність та ремонтнопридатність автомобіля.

Розробка і вдосконалення технологій відновлення поверхонь деталей була і залишається можливістю сповільнення дії зношування та руйнування деталей. Застосування якісних матеріалів з високими фізико-механічними властивостями для виготовлення деталей машин та удосконалення конструкції механізмів - основні шляхи підвищення якості деталей та трибологічних умов експлуатації sprzęжень.

Технологічність у виробництві, надійність і довговічність в експлуатації, а також ремонтнопридатність, і звичайно ж економічні показники усього життєвого циклу деталей машин визначаються матеріалом, з якого вони виготовлені.

Будь-який автомобіль можна охарактеризувати безліччю різних показників, зокрема: витрата палива, максимальна швидкість, норма викиду токсичних речовин та інші [3, 4].

Двигуни сучасних автомобілів стають потужнішими та більш економними за попередників. Їх форсують турбонаддувом, змінюють фази газорозподілу, тощо. Але, значна потужність двигуна при невеликому робочому об'ємі двигуна призводить до зниження його ресурсу мінімум на третину. Досягнення більшої потужності одночасно із підвищенням економічності та екологічності веде до ускладнення конструкції та надмірного навантаження деталей двигуна. Через те невідворотно знижується надійність роботи двигуна.

Певний час (термін експлуатації) двигун працює без збоїв, а потім втрачає свої характеристики, виходить з ладу. Тоді виникає необхідність проведення капітального ремонту. Наявність характерного стуку, зниження потужності двигуна, значне підвищення витрати пального та оливи можуть бути критеріями несправності двигуна і необхідності проведення капітального ремонту [5, 6].

Ресурс вузлів із встановленими в них відремонтованими деталями є дещо нижчим, ніж нових. Але, витрати на відновлення деталей автомобіля значно нижчі порівняно з виготовленням нових аналогічних деталей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням підвищення надійності деталей машин присвячено багато робіт видатних вчених. Над дослідженнями відновлення надійності колінчастих валів працювало і працює велика кількість науковців, а також практиків-інженерів. Вони аналізують і на практиці випробовують результати застосування тих чи інших способів відновлення [7, 8].

Для усунення більшості дефектів, розроблено поопераційну послідовність технологічних процесів і маршрути відновлення. Традиційно технологію ремонту колінчастих валів складають такі операції: очищення та миття, дефектація, ремонт центральних отворів, правка (рихтування) валу, наплавлення, чи напилення (посадочних місць, шліців, різьби та шпонкових пазів), проточування та шліфування, зміцнення гартуванням СВЧ з відпусканням, балансування валу, контроль якості.

Над розробкою технологій відновлення зношених поверхонь колінчастих валів успішно працювали такі науковці: Чорновол М.І., Скобло Т.С., Сідашенко А.І., Стороженко М.С., Аулін В.В., Марченко Д.Д. та інші. Досліджувались технологічні методи наплавлення (зварювання TIG) [10], високошвидкісного дугового напилення [11], газотермічні методи, зокрема, електродугового напилення [12], лазерного відновлення, термічного напилення [13], електроіскрового нарощування [14] та інші.

Технологічній відновлення зношених деталей машин на сьогодні розроблено достатньо багато [8, 9]. Але, очевидно, ні один з них не вирішує комплексного завдання забезпечення якості обробки, ресурсозбереження та екологічності.

Оскільки більшість пошкоджень та несправностей колінчастих валів автомобільних двигунів виникає з причини зношування робочих поверхонь деталей у процесі їх експлуатації, то до цього часу актуальним залишається завдання ефективного й раціонального відновлення зношених поверхонь. Вибір методу та прийняття технології відновлення зношених поверхонь валів залежить від властивостей матеріалу деталей та способу їх виготовлення. У сучасному світі необхідною умовою стало також дотримання вимог щодо економічності технологічного процесу (ресурсозбереження) та екологічної безпеки для довкілля.

Постановка завдання. Мета: дослідити зноси поверхонь колінчастих валів автомобільних двигунів визначити які саме дефекти найбільше впливають на їх ресурс.

Вибрати оптимальний спосіб відновлення. Провести експерименти по електроіскровому нарощуванню.

Для цього потрібно вирішити завдання: вивчити рівень дефектів валу, які можливо відновити електроіскровим способом; визначити оптимальний матеріал та параметри технологічного процесу, а саме: залежність сумарного приросту катода від вмісту карбону та числа проходів електрода, товщину нанесеного на поверхню деталі шару, твердість зразків з покриттям, міцність зчеплення нарощеного шару з основним.

Виклад основного матеріалу. Ресурс дизельного автомобільного двигуна до капітального ремонту залежить переважно від стану кривошипно-шатунного механізму. Колінчастий вал є основною ланкою цього механізму. Він передає крутний момент і сприймає навантаження сил тиску газів та інерції мас, які обертаються та рухаються прямолінійно. Ці сили спричиняють виникнення у валах циклічних стискаючих і розтягуючих навантажень, а також обертальних та згинальних моментів.

Якщо ми говоримо про вибір матеріалу електрода, то вибір починається з аналізу фізико-механічних властивостей матеріалу, з якого виготовлена деталь. А також, необхідно розглянути вплив умов експлуатації деталі та рівень зношеності деталі.

Колінчасті вали дизельних двигунів виготовляють зі сталі 45Г-50Г. Корінні та шатунні шийки обробляють струмами високої частоти (СВЧ) на глибину 2.5-6.5 мм до твердості HRC 46-60. Сучасний автопарк України наповнюють вантажівки провідних європейських виробників - DAF (особливо серій DAF XF та DAF CF) та MAN різних модифікацій [3, 4]. Колінчасті вали таких автомобілів виготовлені зі сталі SA-29 1045 (G13450), яка є аналогом сталі 45Г2 по діючих в даний час Українських стандартах (ДСТУ 7809:2015).

Хімічний склад таких сталей і термічний обробіток забезпечують високі механічні властивості, які є запорукою довговічності колінчастих валів. Але в процесі тривалої експлуатації колінчасті вали зношуються, отримують цілий ряд дефектів і можуть втратити роботоздатність.

Визначальний вплив на довговічність колінчастого валу мають: жорсткість валу та його опор, зміцнення галтелей та поверхонь шийок, залишковий прогин валу після правки, режими навантаження в експлуатації двигуна, якість мастила.

Вали автомобільних двигунів відновлюються у разі наявності зносів однієї або кількох робочих поверхонь. Характерними дефектами колінчастих валів є: деформації, тріщини та руйнування поверхонь, а також зноси і задири шийок.

Розглянемо основні з них. В результаті експлуатації двигунів внутрішнього згорання в небезпечних перерізах колінчастого валу виникають та накопичуються втомні пошкодження. Межа витривалості валу через це знижується на 20...25% від витривалості нового валу. Різний характер розподілу таких пошкоджень мають вали дизельних та карбюраторних двигунів. У валах карбюраторних двигунів вони накопичуються в центральній частині шийок у біля масляних каналів У дизелів - в зоні переходу галтелей у щоки валу. Тому колінчасті вали дизелів руйнуються, в більшості випадків, по щоках через дію згинальних моментів. Колінвали карбюраторних двигунів можуть руйнуватись по шийках через дію обертаючих моментів.

Залежно від характеру дефектів та величини зносів деталей процеси відновлення відносять до двох основних груп: відновлення механічних пошкоджень деталей та відновлення зношених поверхонь деталей.

Стосовно колінчастих валів двигунів автомобілів, то до них висуваються підвищені вимоги щодо міцності та зносостійкості. В зв'язку з цим важливим є питання визначення ефективних методів їх ремонту.

Дослідження проводились на базі товариства з обмеженою відповідальністю «Авто-Моторна Компанія» (м. Полтава). Для оцінки наявності та повторюваності дефектів колінчастих валів двигунів нами було проаналізовано стан колінчастих валів 20 двигунів вантажних автомобілів, що надійшли в капітальний ремонт.

Після розбирання двигуна колінчаті вали розбирались (видалялися шпонки, заглушки і пробки з масляних каналів, підшипники з отвору у фланці і т.д.), ретельно очищалися, а потім дефектувались.

При дефектації ми вимірювали геометричні розміри, визначали рівень овальності шийок, а також перевіряли вали на наявність і розташування тріщин методом магнітної дефектоскопії (рис.1).



Рисунок 1 - Визначення геометричних розмірів поверхонь валу та виявлення тріщин
Джерело: розроблено авторами

Вали з тріщинами вважаються небезпечними і не допускаються до ремонту. Тобто, вибраковують вали, що мають тріщини: на галтелях шатунних та корінних шийок; на циліндричній поверхні шийок ближче 6 мм від торців щік; на краях отворів масляних каналів (при довжині тріщини понад 15 мм).

Дослідженнями колінчастих валів у процесі дефектації були виявлені такі дефекти: спрацювання шатунних шийок 95 % і корінних шийок 93,8 %, зноси шпонкового паза 45,5%, зноси отвору під направляючий штифт 15 %, вигин валу 10 %, і тріщини в галтелях та на шийках 6,5 % (рис. 2). Тобто, переважна кількість досліджуваних колінчастих валів мали зношені поверхні шатунних та корінних шийок.

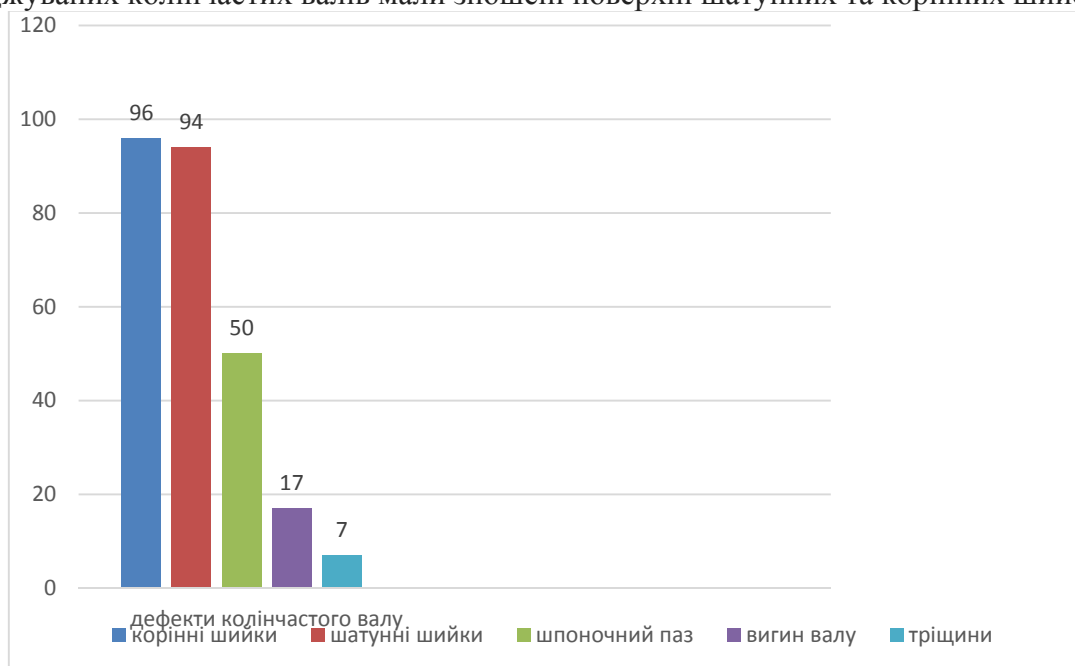


Рисунок 2 - Повторюваність дефектів колінчастих валів
Джерело: розроблено авторами

Основним методом ремонту колінчастих валів являється ремонт на ремонтний розмір, тобто, перешліфування зношеної шийки до ремонтного розміру (рис.3)

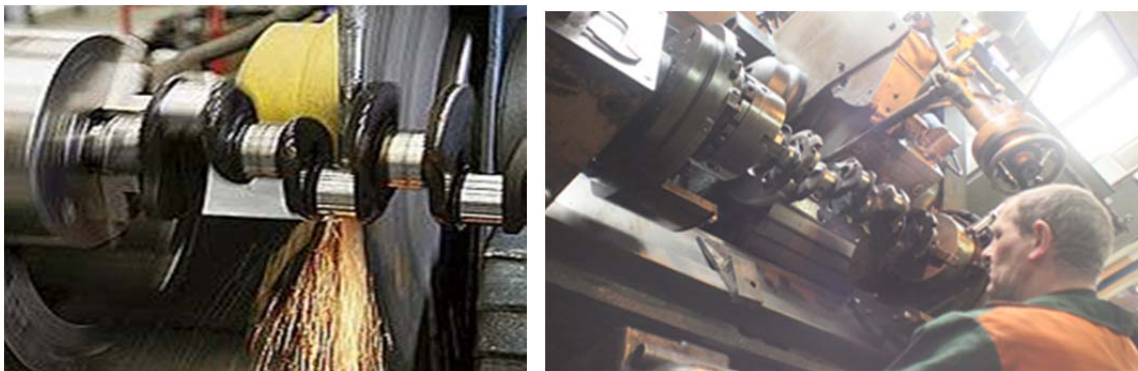


Рисунок 3 – Шліфування шийки колінчастого валу

Джерело: розроблено авторами

Розглянемо переваги та недоліки деяких методів відновлення деталей на номінальний розмір. На нашу думку, переваги мають такі технологічні процеси, які не спричиняють високотемпературного впливу на матеріал відновлюваної деталі. Термічний вплив на поверхню деталей викликає утворення в них значних залишкових напружень у результаті нерівномірного розподілу тепла по перерізу та неоднакової зміни об'єму різних зон термічного впливу (структурні напруження). Через це у наплавленому шарі виникають напруження стиснення, а у серцевині – розтягуючі напруження [10, 11].

Процесами, які не роблять вплив високої температури на метал відновлюваної деталі є газотермічні методи, а саме електродугова металізація, а також електроіскрове нарощування.

При ремонті двигунів (колінчастих валів) PACCAR MX 265, які стоять на автомобілях DAF MX 265, основною технологією відновлення прийняте ремонтне наплавлення, яке було запропоноване компанією Castolin Eutectic [9].

Суть електродугового наплення полягає у тому, що в спеціальному пристрої - металізаторі електрична дуга розплавляє присадний метал, потім потоком стисненого повітря з великою швидкістю він направляє на поверхню відновлюваної деталі [8, 12]. Завдяки можливості застосування як суцільних так і порошкових дротів, дозволяє отримувати покриття високої якості

Електродугова металізація характеризується незначним тепловим впливом на поверхню оброблюваної деталі і значними швидкостями охолодження. В результаті, зона термічного впливу (ЗТВ) незначна, отже поверхня деталі нагрівається незначно. Тому не визиває утворення внутрішніх напружень матеріалу деталі та покриття. Це безперечно є значною перевагою. Але, дослідження виявили доволі суттєві недоліки, основний з яких невисока міцність зчеплення покриття з основою.

Одним із методів поверхневої обробки деталей машин концентрованими потоками енергії є електроіскрове нарощування. Електроіскрова обробка має найбільшу концентрацією енергії в зоні нагріву [16].

Суть методу електроіскрового нарощування у тому, що під впливом імпульсних електричних розрядів у газовому середовищі, відбувається ерозійне руйнування матеріалу електродів (анодів), та перенесення та відкладення на поверхні деталі-катода частинок їх металу [17, 18].

Електроіскрове легування дає нам можливість моделювати практично усі види покриттів при виготовленні або при відновленні деталей.

Імпульсні потоки з частинками матеріалу дають можливість створення шару покриття з різних металевих та керамічних матеріалів. Велика кількість теоретичних та практичних досліджень, результати яких використовуються при виготовленні та відновленні деталей машин: від ракето- і літакобудування до сільського господарства. Наукові дослідження, присвячені вивченню структури та властивостей покриттів, отриманих у процесі електроіскрового легування містять дані про значну міцність зчеплення покриття з основою.

Використання даної технології має також і певні недоліки: це висока шорсткість, низька продуктивність та обмеження товщини шару покриття.

Такі науковці, як Лузан С.О., Сідашенко О.І., Козак Ф. В., Прунько І. Б., Іщенко Є. В., Скобло Т. С., Рыбалко Н. Н., Тихонов А. В., Мартыненко А. Д. та інші ґрунтовно досліджували питання застосування електроіскрового нарощування (ЕІЛ) для відновлення зношених поверхонь та їх зміцнення. В науковій літературі існує велика кількість публікації досліджень по відновленню зношених поверхонь деталей електроіскровим нарощуванням з наступним аналізом зносостійкості та твердості отриманих покриттів. Але даних стосовно досліджень відповідних покриттів, сформованих методом ЕІЛ недостатньо. Тому дослідження формування покриттів на сталі 45Г2 методом ЕІЛ електродами з різних матеріалів є актуальною задачею.

Використання електроіскрового нарощування для відновлення зношених деталей дає не тільки відновлення їх геометричних розмірів, але і змінює фізико-механічні властивості поверхні, покращуючи їх експлуатаційні характеристики.

Характеристики процесу електроіскрового легування залежать від: матеріалу деталі; матеріалу електрода; режимів обробки.

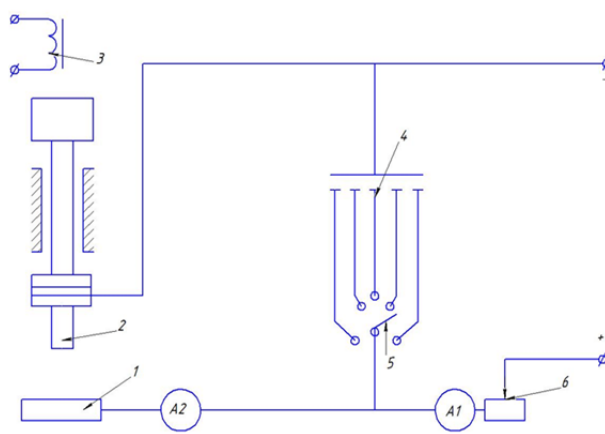
Можемо стверджувати, що застосування одного чи іншого способу відновлення зношених деталей машин залежить не тільки від характеру дефектів, а також і від матеріалу та способу виготовлення деталі. Отже, завдання можливо вирішувати тільки комплексним підходом. А комплексний підхід включає й вибір матеріалу для нарощування зношених поверхонь.

Нами проведені дослідження процесу електроіскрового нарощування.

Експерименти проводились з використанням експериментальної установки, основним технологічним вузлом якої було обладнання для електроіскрового нарощування БІГ - 4.



а)



б)

1 - оброблювана деталь; 2 - електрод; 3 - вібратор; 4-конденсатор; 5-перемикач; 6 - реостат;
 A_1 - амперметр мережі живлення; A_2 - амперметр розрядного ланцюга

Рисунок 4: а) - Установка для електроіскрового відновлення БІГ - 4; б) - Схема електроіскрової установки
 Джерело: розроблено на підставі [13]

Вибір матеріалу електроду [15, 17, 19] залежить від матеріалу відновлюваної деталі та від вимог до властивостей поверхні. Хімічний склад аноду визначає експлуатаційні показники: рівень фізико-механічних властивостей (міцність, твердість та інші), зносостійкість, міцність зчеплення нарощеного шару з поверхнею деталі, схильність до викришування та інші. Беручи це до уваги, ми повинні розглянути взаємозв'язок сумарного приросту катоди (катода) від енергії імпульсу обробки та матеріалу аноду (електроду).

Найбільша якість нарощеного шару досягається при умові, коли застосовуються матеріали для анода і катода, коефіцієнти лінійного розширення яких рівні.

Результати аналізу наукової апріорної інформації, експериментальні дослідження підтверджують тезу про те, що найвища зносостійкість може бути досягнена, якщо робити покриття легуваними матеріалами, особливо - хромистими сплавами. Але ж, анод з таких матеріалів характеризується також і підвищеною ерозійною стійкістю. Колективом науковців [16] на чолі з академіком Скобло Т.С. була здійснена оцінка ефективності та якості покриттів хромистими сплавами. Для експериментів брали як анод 12 легуваних сплавів, які відрізнялися вмістом хрому (Cr – від 10% до 30%) і вуглецю (C - від 1,0% до 2,5 %) з метою, оцінки ролі карбидоутворення, а також оцінки можливості утворення різних зміцнюючих фаз при формуванні покриття.

Так як масоперенос металу з аноду на катод визначається матеріалом анода, числом проходів електроду і енергією імпульсу, то для виявлення впливу цих факторів був застосований метод планування експерименту 2^4 . У результаті, отримали висновки: максимальний приріст катода $\sum_{i=1}^n \Delta k_i$ отримали при енергії імпульсу на верхній межі значень $E=3,4$ Дж, та при концентрації вуглецю і хрому в аноді на – нижньому.

Тому, ґрунтуючись на результатах цих досліджень, ми провели дослідження залежності сумарного приросту катода (деталі) від матеріалу аноду (електроду) та енергії імпульсу обробки (E). Для досліджень обрали сталі з різним вмістом вуглецю та хрому (табл. 1). Нарощування робили за три проходи електродом зі сплаву 100X17 (17,0% Cr і 1,0%С).

Обробку проводили за двома режимами: $E_1=0,9$ Дж; $E_2=3,5$ Дж. Було встановлено, що із підвищенням енергії імпульсів від E_1 до E_2 приріст катода $\sum_{i=1}^n \Delta k$ також збільшується для всіх матеріалів.

Сумарна ерозія анода $\sum_{i=1}^n \Delta a_i$ і приріст катода $\sum_{i=1}^n \Delta k$ при електроерозійній обробці підвищуються із підвищенням вмісту карбону у зразках. У низьковуглецевих сталях - найнижча, у середньовуглецевих - вище. Підвищення сумарної ерозії анода найбільш суттєве при найменших значеннях енергії імпульсу ($E=0,9$ Дж).

Таблиця 1 - Сумарна ерозія анода і приріст катода при електроіскровій обробці конструкційних сталей

Матеріал катода	Енергія імпульсу, E, Дж	Приріст катода, $\sum_{i=1}^n \Delta k_i$, г/см ²	Ерозія анода, $\sum_{i=1}^n \Delta a_i$, г/см ²
Ст. 3	0,9	0,5	1,5
	3,5	1,2	3,0
45Г	0,9	0,5	1,5
	3,5	1,25	3,0
40Х	0,9	0,6	1,4
	3,5	1,3	3,0

Джерело: розроблено авторами

Підвищення ерозії аноду $\sum_{i=1}^n \Delta a_i$ не перевищує 20%, а – приріст катоду $\sum_{i=1}^n \Delta k_i$ досягає майже 35%. Із підвищенням енергії імпульсу від 0,9 до 3,4Дж.

Приріст катода $\sum_{i=1}^n \Delta k_i$ в залежності від матеріалу зростає в 2,17–2,5 рази, ерозія анода $\sum_{i=1}^n \Delta a_i$ в 2,00–2,14 рази. Обробка вибраних сталей з високою енергією імпульса ($E=3,4$ Дж) менше впливає на $\sum_{i=1}^n \Delta k_i$ і на $\sum_{i=1}^n \Delta a_i$.

Із збільшенням концентрації карбону зростає доля крихкої карбідної фази, що сприяє інтенсивному росту ерозії анода [17, 18]. На основі цих досліджень підтверджується, що і в цьому випадку масоперенос металу з аноду на катод визначається матеріалом анода, числом проходів електрода і енергією імпульсу.

Нами проведено дослідження залежності сумарного приросту катода від кількості проходів електрода (анода) та його хімічного складу при нанесенні покриття. Для цього використали рівняння регресії [16]:

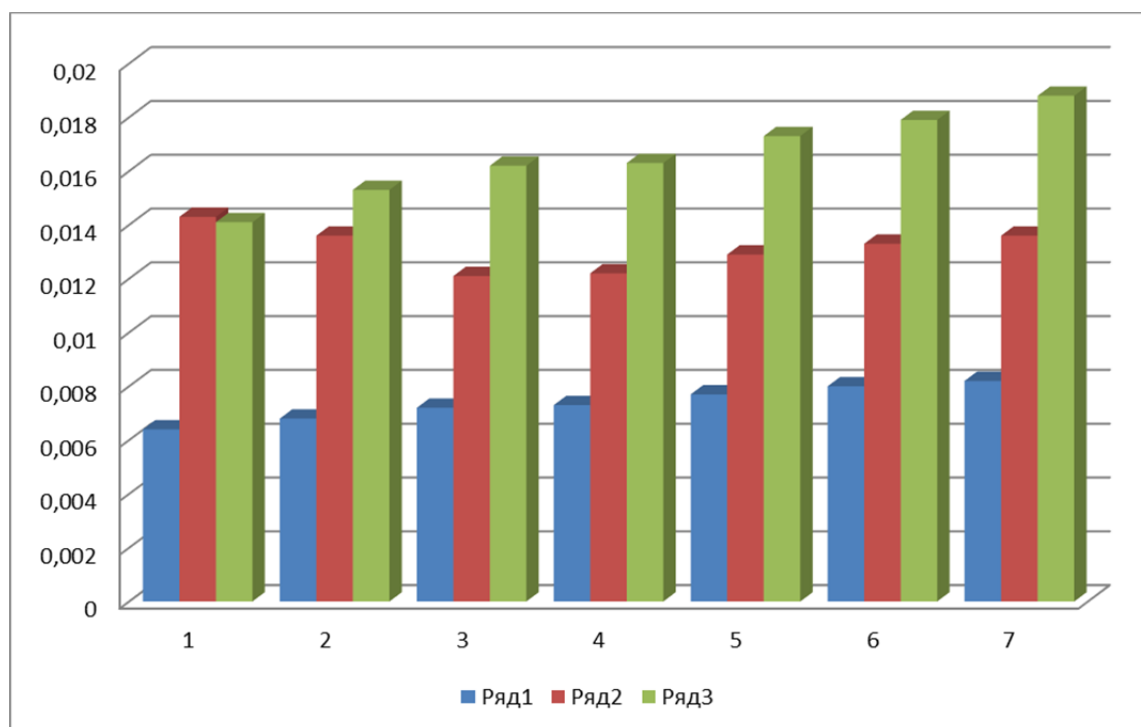
$$\sum \Delta k = 1.11 \frac{\sqrt{C \cdot E_u}}{C r^2} \cdot n - 0.02 \frac{E_u \cdot \sqrt{C}}{C_r} \cdot n^2, \quad (1)$$

де C , C_r - вміст карбону і хрому в матеріалі електрода відповідно, %;

n - число проходів електрода;

E_u - значення енергії імпульсу обробки, Дж.

Приймаємо вміст $C_r=17\%$ та величину енергії імпульсу $E_u=0,22$ Дж та отримуємо залежність (рис. 5).



Ряд1 – 1 прохід електрода, ряд 2 – 2 проходи електрода, ряд 3 – 3 проходи електрода; 1 – 1,5%С, 2 – 1,7%С, 3 – 1,9%С, 4 – 2%С, 5 – 2,2%С, 6 – 2,4%С, 7 – 2,5%С.

Рисунок 5 – Залежність сумарного приросту катода від вмісту карбону та числа проходів електрода
Джерело: розроблено авторами

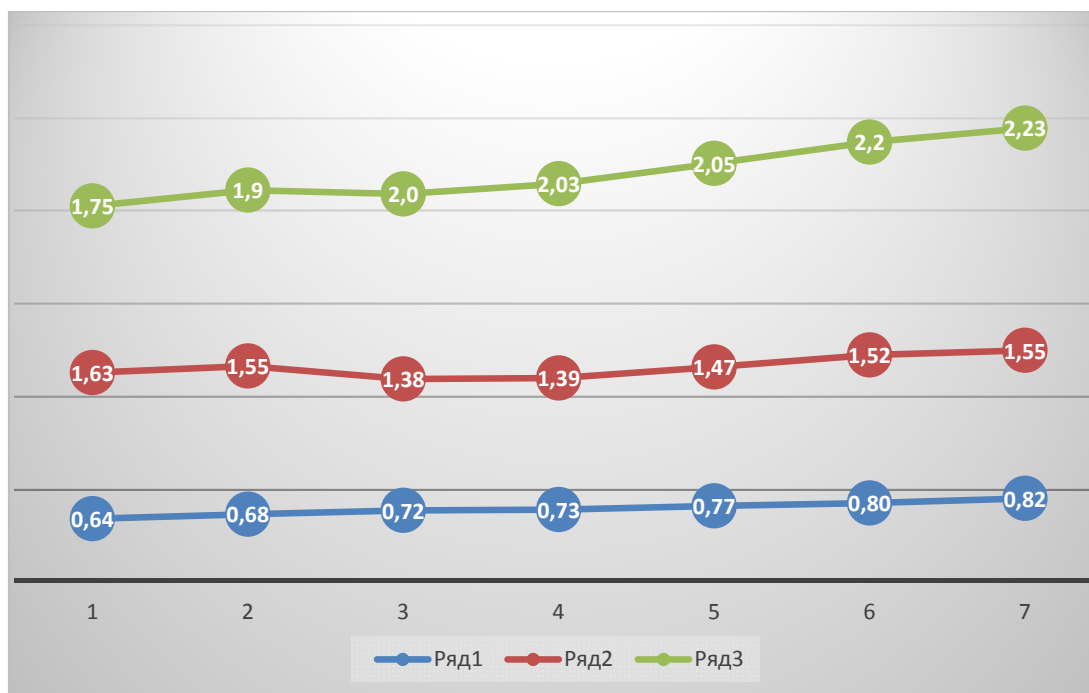
При збільшенні числа проходів електрода вміст хімічних елементів анода в шарі практично відсутній [17, 20]. Із збільшенням кількості проходів електрода зростає пористість покриття.

При 1-3 проходах електроду формується дисперсна структура на основі складових катода і анода. При великій енергії імпульсів (понад $E = 3,4$ Дж) при наступних проходах електроду формуються пори, що спричиняє крихкість покриття. При збільшенні числа проходів електроду хімічні елементи катода в шарі майже відсутні. Натомість починається кристалізація оксидної фази та зростає кількість карбідних включень, що пов'язано із збільшенням у шарі частки карбідоутворюючого елементу анода і зменшенням матричної фази катода.

Величина сумарного приросту катода $\sum \Delta k$ (Y), дозволяє визначити товщину шару h (мкм), що наноситься на поверхню деталі [16]:

$$h = \frac{\beta \cdot \sum \Delta k}{\rho}, \quad (2)$$

де β - поправочний коефіцієнт, що враховує несучільність покриття та наявність пор:
 $\beta \geq 0,78$ при $n=1$, $\beta = 0,89$ при $n=2$, $\beta = 0,97$ при $n=3$,
 ρ - питома вага матеріалу електроду, г/см^3 .



Ряд1 – h за 1 проход електроду, ряд 2 – h за 2 проходи електроду, ряд 3 – h за 3 проходи електроду

Рисунок 6 – Зміна товщини шару покриття

Джерело: розроблено авторами

Проведені дослідження (рис. 5 і 6) показують, що використання як електродів матеріалів з вмістом карбону 1,5-2,5 % та хрому 10,0-25,0% не доцільно робити більше 3 проходів електроду, так як забезпечується приріст катода, який забезпечує достатню товщину покриття.

Твердість зразків з покриттям й контрольного зразка без покриття були визначені за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3М при навантаженні 0,98 Н відповідно до ДСТУ ISO 6507-1:2007. Контрольний зразок із сталі 45Г загартували при

температурі 970 °С и відпустили при температурі 540 °С протягом 2 годин. Результати по твердості наведено у вигляді діаграми (рис. 7)

На основі проведених випробувань встановили, що зразки сталі з нанесеним покриттям мають вищу твердість у порівнянні зі зразком після термічної обробки.

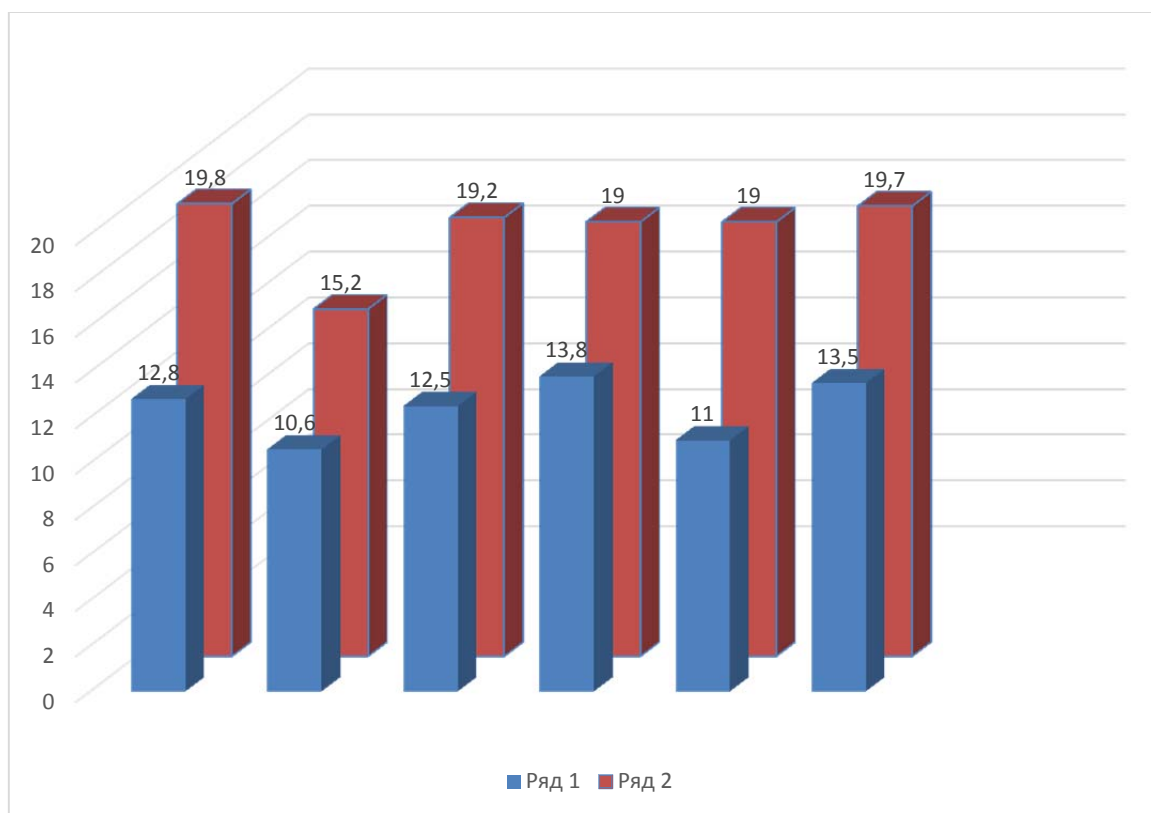


Рисунок 7 – Твердість поверхні зразків ряд1 – контрольного зразка з термообробкою; ряд 2 – електроіскрового покриття

Джерело: розроблено авторами

Міцність зчеплення нарощеного шару з основним ми досліджували за методикою, розробленою А.П. Гуляєвим та Н.Т. Гудцовим [18]. Оцінку рівня міцності зчеплення провели при навантаженні на індентор $P=50$.

Так як відшаровування нанесеного шару від матеріалу деталі не відбулось, то вважаємо, що міцність зчеплення не може бути меншою, ніж величина, визначена за залежністю:

$$\sigma = 1,854 \frac{P}{d^2}, \quad (3)$$

де P – навантаження, прикладене до алмазного наконечника, кгс;

d – середнє значення довжин діагоналей відтиска, мм;

1,854 – коефіцієнт, який пов'язує значення довжини діагоналі до площі відтиска

Оцінюємо міцність зчеплення за формулою (3). Значення міцності зчеплення нарощеного металу з основним матеріалом деталі приводимо у вигляді діаграми (рис.8).



Рисунок 8 - Рівень міцності зчеплення нарощеного шару з поверхнею деталі

Джерело: розроблено авторами

Отже, результати випробувань свідчать про те, що зразки після електроіскрового нарощування електродом мають високий рівень міцності зчеплення покриття з основою мають

Висновки:

1. Досліджено зноси поверхонь колінчастих валів автомобільних двигунів. Більшість колінчастих валів, які надійшли у капітальний ремонт мали зноси шатунних (95%) та корінних шийок (93,8%). Усунення цих дефектів можливе методом електроіскрового нарощування.

2. Визначено оптимальний склад електроду для електроіскрового нарощування – сплав 100X17 (17,0% Cr і 1,0%С).

3. Результати експериментів з електроіскрового нарощування показують:

- при нанесенні покриття на зразки зі сталей 45Г і 40Х приріст катода збільшується із підвищенням енергії імпульсів, а саме: із підвищенням енергії імпульсу від 0,9 до 3,4Дж приріст катода досягає майже 35%;

- три проходи електроду забезпечують достатні приріст катода та товщину покриття, яка сягає 2,00 мм;

- зразки сталі з нанесеним покриттям визначеним сплавом мають вищу твердість у порівнянні зі зразком після термічної обробки та високий (638,7 МПа) рівень міцності зчеплення нарощеного шару з основою.

4. Підтверджено можливість використання даного методу на підприємствах технічного сервісу для підвищення довговічності відновлених деталей.

Тому, дослідження по розробці технології відновлення конкретних деталей техніки методом електроіскрового нарощування, є досі актуальною задачею і потребує продовження досліджень.

Список літератури

1. Комчатних О.В., Петровська С.І., Редько Н.О. Сучасний стан та перспективи розвитку транспортної інфраструктури в Україні. *Причорноморські економічні студії. Економічний науково-практичний журнал.* 2021. №64. С. 11-16. <https://doi.org/10.32843/bses.64-2>

2. Multimodal freight transportation planning: A literature review/ Steadie Seifi M. at al. *European Journal of Operational Research*. 2014. No233(1). P.1–15.
3. Марченко А.П., Парсаданов І.В., Строков О.П. Двигуни внутрішнього згоряння і навколишнє середовище. *Загальні проблеми двигунобудування*. № 2, 2022. С.3-12. DOI: 10.20998/0419-8719.2022.2.01
4. Двигун DAF XF105 з 2006 р. Загальна інформація. Монолит.укр: веб-сайт. URL: <https://monolith.in.ua/dvigatel-daf-xf105/> (дата звернення: 04/02/2024).
5. Аулін В.В., Гриньків А.В., Лівіцький О.М. Підвищення надійності мобільної та автотранспортної техніки сільськогосподарського виробництва на основі діагностики їх стану. *Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації с.-г. техніки*. Матеріали X Міжнар. наук.-практ. конф. Кіровоград: КНТУ, 2015. С.163-164.
6. Оцінка довговічності металоконструкцій автотранспортних засобів./ Буряк М.В. та ін. *Вісник машинобудування та транспорту* No1(15), 2022. С.11-16. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-15-1-11-16>
7. Аулін В.В., Голуб Д.В., Гриньків А.В., Лисенко С.В. Методологічні і теоретичні основи забезпечення та підвищення надійності функціонування автомобільних транспортних систем: монографія під заг. ред. д.т.н., проф. Ауліна В.В. Кропивницький: Видавець «КОД», 2017. 370с.
8. Дослідження методів відновлення зношених деталей сільськогосподарської техніки. / Іванкова О.В. та ін. *Вісник ПДАА*. 2020. № 4. С. 283–292. doi: 10.31210/visnyk 2020.04.36
9. Our technologies to best serve you. *Eutectic Castolin* URL: <https://www.castolin.com>. (дата звернення: 27.06.2024)
10. O. Chivu Virlan, C. Rontescu, D. Cicic, M. Vasile, "Reconditioning of Crankshaft in the Automotive Industry by Using TIG Welding", *Advanced Materials Research*, Vol. 1111, p. 43, 2015. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1111.43>
11. Tian, H., Wang, C., Guo, M., Wei, S., Liang, X., Xu, B. High velocity arc spraying remanufacture process and thermal control for engine crankshaft (2017) *Jinshu Rechuli/Heat Treatment of Metals*, 42 (12), pp. 117-121. doi: 10.13251/j.issn.0254-6051.2017.12.024 http://www.eastview.com/peri/product.asp?sku=P33299&active_tab=4
12. Дослідження відновлення корпусних деталей автомобільних двигунів методом електродугової металізації. Іванкова О.В., Бурлака О.А. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2024. Вип. 9(40), ч.1 DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1) С. 127-134.
13. Ding S., Ma G., Chen S., He P., Wang Y., Wang H., Xu B. Research State on Heat Accumulation Behavior and Temperature Control in Thermal Spraying Forming Process. (2019) *Cailiao Daobao/Materials Reports*, 33 (11), pp. 3644 – 3653. DOI: 10.11896/cldb.18110093
14. Аналіз способів виготовлення, зміцнення і відновлення лап культиватора / Скобло Т. С. та ін. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2019. № 15. С. 60-85
15. Гринь О. Г., Трембач Б. О., Трембач І. О. Сучасні матеріали для підвищення зносостійкості деталей машин наплавленням при гідроабразивному зносі. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. № 2 (44), 2018. С. 41-46.
16. Підвищення якості покриттів нанесених електроіскровим методом / Скобло Т. С. та ін. *Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства: збірник наукових праць / ХДТУСГ*. Вип. 23: *Технічний сервіс АПК, техніка та технології у сільськогосподарському машинобудуванні*. Харків: ХДТУСГ 2004. С. 191-198.
17. Розробка технологій і матеріалів для електроіскрового нанесення покриттів з метою підвищення терміну експлуатації і надійності деталей технологічного і енергетичного обладнання та інструментів. Стороженко М.С. та ін. *Автоматичне зварювання*, №10, 2020.с. 21-25. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.10.04>
18. Marchenko D. D., Matvuyeva K. S. Increasing the Wear Resistance of Restored Car Parts by Using Electrospark Coatings. *Problems of Tribology* 28.1/107. 2023. P. 65-72.
19. Дем'янчук Я. М., Войцехівська Т. Й., Сумер А. Р. Вплив хімічного складу електродів для електроіскрового легування на трибологічну поведінку штоків нафтових насосів. *Наукові нотатки*. 2015. № 49. С. 47-50.
20. Оптимізація процесу нанесення електроіскрових покриттів при зміцненні автомобільних деталей типу "вал" / Козак Ф. В., Прунько І. Б., Феденько В. Я., Гладун М. Р. *Матеріали, конструкції та обладнання об'єктів нафтогазового комплексу. Нафтогазова енергетика* 2023. № 2(40) ISSN 1993–9868 print ISSN 2415–3109 online УДК 621.789 DOI: 10.31471/1993-9868-2023-2(40)-66-7 2

References

1. Komchatnykh, O.V., Petrovs'ka, S.I. & Red'ko, N.O. (2021). Suchasnyy stan ta perspektyvy rozvytku transportnoyi infrastruktury v Ukraini. [The current state and prospects for the development of transport

- infrastructure in Ukraine] *Prychornomors'ki ekonomichni studiyi. Ekonomichnyy naukovo-praktychnyy zhurnal*. №64. S. 11-16. <https://doi.org/10.32843/bses.64-2> [in Ukrainian].
2. Multimodal freight transportation planning: A literature review. 2014./ Steadie Seifi M. et al. *European Journal of Operational Research*. No233(1). P.1–15. [in English].
 3. Marchenko, A.P., Parsadanov, I.V., & Stokov, O.P. (2022). Dvyhuny vnutrishn'oho z-horyannya i navkolyshnye seredovyshe. [Internal combustion engines and the environment]. *Zahal'ni problemy dvyhunobuduvannya*. № 2, S.3-12. DOI: 10.20998/0419-8719.2022.2.01 [in Ukrainian].
 4. Dvyhun DAF XF105 z 2006 r. Zahal'na informatsiia. Monolyt.ukr: veb-sajt [DAF XF105 engine from 2006. General information. Monolyt.ukr: website]. Retrieved from: <https://monolith.in.ua/dvigatel-daf-xf105/> [in Ukrainian].
 5. Aulin, V.V., Hryn'kiv, A.V., & Livits'kyi, O.M. (2015) Pidvyshchennya nadiynosti mobil'noyi ta avtotransportnoyi tekhniky sil's'kohospodars'koho vyrobnytstva na osnovi diahnostryky yikh stanu. [Increasing the reliability of mobile and motor vehicles of agricultural production on the basis of diagnostics of their condition] *Problemy konstruyuvannya, vyrobnytstva ta ekspluatatsiyi s.-h. tekhniky. Materialy X Mizhnar. nauk.-prakt. konf.* Kirovohrad: KNTU. S.163-164. [in Ukrainian].
 6. Buryak, M.V. et al. (2022). Otsinka dovhovichnosti metalokonstruktсий avtotransportnykh zasobiv. [Assessment of durability of metal structures of motor vehicles]. *Visnyk mashynobuduvannya ta transportu* No1(15) S.11-16. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2022-15-1-11-16>. [in Ukrainian].
 7. Aulin, V.V., Holub, D.V., Hryn'kiv, A.V., & Lysenko, S.V. (2017). *Metodolohichni i teoretychni osnovy zabezpechennya ta pidvyshchennya nadiynosti funktsionuvannya avtomobil'nykh transportnykh system: monohrafiia* [Methodological and theoretical foundations of ensuring and improving the reliability of the functioning of automobile transport systems: monograph]. Kropyvnyts'kyi: Vydavets' «KOD». 370s. [in Ukrainian].
 8. Ivankova, O.V. et al. (2020). Doslidzhennia metodiv vidnovlennia znoshenykh detalej sil's'kohospodars'koi tekhniky [Research of methods of restoration of worn parts of agricultural machinery]. *Visnyk PDAA - PDAA Bulletin*, 4, 283-292 [in Ukrainian].
 9. Our technologies to best serve you. *Eutectic Castolin*. URL: <https://www.castolin.com>. (date of access: 27/06/2024). [in English].
 10. O. Chivu Virlean, C. Rontescu, D. Cicic, M. Vasile, (2015). Reconditioning of Crankshaft in the Automotive Industry by Using TIG Welding, *Advanced Materials Research*, Vol. 1111, p. 43. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1111.43> [in English].
 11. Tian, H., Wang, C., Guo, M., Wei, S., Liang, X., Xu, B. (2017) High velocity arc spraying remanufacture process and thermal control for engine crankshaft. *Jinshu Rechuli/Heat Treatment of Metals*, 42 (12), pp. 117-121. doi: 10.13251/j.issn.0254-6051.2017.12.024 http://www.eastview.com/peri/product.asp?sku=P33299&active_tab=4 [in English].
 12. Ivankova, O.V., Burlaka, O.A. (2024). Doslidzhennya vidnovlennya korpusnykh detaley avtomobil'nykh dvyhuniv metodom elektroduhovoyi metalizatsiyi. [Research on the restoration of body parts of automobile engines by the method of electric arc metallization]. *Tsentral'noukrayins'kyi naukovyy visnyk. Tekhnichni nauky*. Vyp. 9(40), ch.1. S. 127-134.: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9\(40\).1](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1). [in Ukrainian].
 13. Ding S., Ma G., Chen S., He P., Wang Y., Wang H., Xu B. (2019). Research State on Heat Accumulation Behavior and Temperature Control in Thermal Spraying Forming Process. *Cailiao Daobao/Materials Reports*, 33 (11), pp. 3644 – 3653. DOI: 10.11896/cldb.18110093 [in English].
 14. Skoblo, T. S. et al. (2019). Analiz sposobiv vyhotovlennya, zmitsnennya i vidnovlennya lap kul'tyvatora. [Analysis of methods of manufacturing, strengthening and restoration of cultivator paws]. *Tekhnichnyy servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv - Technical service of agro-industrial, forestry and transport complexes*. No. 15. P. 60-85. [in Ukrainian].
 15. Hryn', O. H., Trembach, B. O., Trembach, I. O. (2018). Suchasni materialy dlya pidvyshchennya znosostiysti detaley mashyn naplavlenniam pry hidroabrazynomu znosi. [Modern materials for increasing the wear resistance of machine parts by surfacing during hydroabrasive wear]. *Visnyk Donbas'koyi derzhavnoyi mashynobudivnoyi akademiyi*. № 2 (44), S. 41-46. [in Ukrainian].
 16. Skoblo, T. S. et al. (2004). Pidvyshchennya yakosti pokryttiv nanesennykh elektroiskrovym metodom. [Improving the quality of coatings applied by the electrospark method]. *Visnyk Kharkivs'koho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu sil's'koho hospodarstva: zbirnyk naukovykh prats': Tekhnichnyy servis APK, tekhnika ta tekhnolohiyi u sil's'kohospodars'komu mashynobuduvanni - Bulletin of the Kharkiv State Technical University of Agriculture: collection of scientific works / KhDTUSG*. Vol. 23. 191-198. Kharkiv: KHDTUS. [in Ukrainian].
 17. Storozhenko, M.S. et al. (2020). Rozrobka tekhnolohiy i materialiv dlya elektroiskrovoho nanesennya pokryttiv z metoyu pidvyshchennya terminu ekspluatatsiyi i nadiynosti detaley tekhnolohichnogo i

- enerhetychnoho obladnannya ta instrumentiv. [Development of technologies and materials for electrospark coating in order to increase the service life and reliability of parts of technological and energy equipment and tools]. *Avtomatychnе zvaryuvannya-Automatic welding*, 10, 21-25. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2020.10.04>. [in Ukrainian].
18. Marchenko, D. D. & Matvyeyeva, K. S. (2023). Increasing the Wear Resistance of Restored Car Parts by Using Electrospark Coatings. [Development of technologies and materials for electrospark coating in order to increase the service life and reliability of parts of technological and energy equipment and tools]. *Problems of Tribology*, 28.1/107, 65-72. [in Ukrainian].
 19. Dem"yanchuk, YA. M. & Voytsekhivs'ka, T. Y., & Sumer, A. R. (2015). Vplyv khimichnoho skladu elektrodів dlya elektroiskrovoho lehuвання na trybolohichnu povedinku shtokiv naftovykh nasosiv. [Influence of the chemical composition of electrodes for electrospark alloying on the tribological behavior of oil pump rods]. *Naukovi notatky - Scientific notes*, 49, 47-50. [in Ukrainian].
 20. Kozak F. V. et al. (2023). Optymizatsiya protsesu nanesennya elektroiskrovyykh pokryttiv pry zmitsnenni avtomobil'nykh detaley typu "val". [Optimization of the process of applying electrospark coatings during strengthening of automobile parts of the "shaft" type]. *Materialy, konstruktsiyi ta obladnannya ob"yektiv naftohazovoho kompleksu. Naftohazova enerhetyka - Materials, constructions and equipment of oil and gas complex objects. Oil and gas energy*, № 2(40), 66-72. DOI: 10.31471/1993-9868-2023-2(40)-66-72. [in Ukrainian].

Olena Ivankova, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Alexei Burlaka**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Poltava State Agrarian University, Poltava, Ukraine

Vitaly Bartosh, director

Auto-Motor Company LLC, Poltava, Ukraine

Materials and Technologies for Restoration of Worn Surfaces of Automobile Parts

The materials from which car parts are made determine: the level of manufacturability in the manufacturing process; reliability and durability during operation; economy and maintainability of the car. The **purpose** of the article. To study the level of defects of crankshafts of automobile engines, to analyze methods of restoration and to choose the optimal one. To conduct experiments on the use of electric spark build-up, to determine the optimal materials for build-up, as well as the parameters of the technological process.

The regularities of the formation of defects in the crankshafts of truck engines have been analyzed. A sample of 20 engines was studied. It has been determined which defects have the greatest effect on the service life of crankshafts. Recovery methods were analyzed and the optimal one was selected. Conducted research on the use of electrospark build-up, experiments on layer build-up on steel samples. The following were investigated: the dependence of the total growth of the cathode on the carbon content and the number of electrode passes, the thickness of the layer applied to the surface of the part, the hardness of the coated samples, and the adhesion strength of the built-up layer to the main one were determined. We determined the optimal materials for building up, as well as the parameters of the technological process. A high (638.7 MPa) level of strength was established by tests on the adhesion strength of the built-up layer to the base. On the basis of the conducted tests, it was established that the steel samples with the applied coating have a higher hardness compared to the sample after heat treatment. Experiments have shown that electrode materials with a carbon content of 1.0-2.5% and chromium content of 10.0-25.0% are optimal for electrospark build-up of 45G, 40X steel samples.

Conclusions. Most of the crankshafts that were overhauled had worn connecting rods (95%) and main journals (93.8%). Elimination of these defects is possible by applying a coating using the electrospark build-up method. Experiments on the dependence of the total growth of the cathode and the thickness of the coating on the chemical composition of the anode and the number of electrode passes when coating samples made of 45G and 40X steels showed that the growth of the cathode increases with increasing pulse energy. It was established that when using electrodes with a carbon content of 1.5-2.5% and chromium content of 10.0-25.0%, it is not advisable to make more than 3 passes of the electrode, since 3 passes provide sufficient growth of the cathode and coating thickness. It was established that the steel samples with the applied coating have a higher hardness compared to the sample after heat treatment and a high (638.7 MPa) level of adhesion strength of the built-up layer to the base. The possibility of using this method at technical service enterprises to increase the durability and reliability of parts has been confirmed. Therefore, research on the development of the technology for the restoration of specific parts of the equipment by the method of electrospark build-up is still an actual task and requires continued research.

car, crankshaft, defects, spark build-up, clutch strength, hardness

Одержано (Received) 18.04.2024

Прорецензовано (Reviewed) 23.05.2024

Прийнято до друку (Approved) 28.10.2024