

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.432

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.126-132>**А.В. Рутковський**, ст. наук. співр., канд. техн. наук*Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренко НАН України, м. Київ, Україна**e-mail: coating@ipp.kiev.ua***С.І. Маркович**, доц., канд. техн. наук, **С.С. Михайлюта**, асп.*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна**e-mail: markob0@ukr.net; sergejmihajluta2@gmail.com*

Фрактографічний аналіз іонноазотованих зразків з алюмінієвих поршнів двигунів сільськогосподарської техніки

В роботі проведено фрактографічний аналіз іонноазотованих зразків з алюмінієвих поршнів двигунів сільськогосподарської техніки з використанням методу растрової електронної мікроскопії на мікроскопі мікро аналізаторі “CamScan-4DV”. Визначення хімічного складу поверхні зразків, а також різних фаз, недосконалостей і включень проводилось в даній роботі з використанням методу рентгеноспектрального мікроаналізу (РСМА). Установлено, що механізм кінетики процесу руйнування зводиться до поступового росту мікротріщин до критичного розміру в результаті розриву атомних зв'язків у вершині тріщини при напруженнях, що перевищують умовну межу текучості композиції «основа-покриття». Спостерігається зародження та ріст однакових за видом тріщин. Потім тріщини все більше розкриваються і довжина та глибина їх збільшується. Показано, що механізм процесу руйнування зводиться до поступового росту мікротріщин в результаті розриву атомних зв'язків у вершині тріщини при напруженнях, що перевищують умовну межу текучості композиції “основа-покриття”. Установлено наявність ділянок основи, які внаслідок порушення суцільності зміцненого поверхневого шару взаємодіють з оточуючим середовищем та впливають на підвищення пластичності за рахунок розкриття дефектів. Це збільшує швидкість повзучості, що у свою чергу, приводить до прогресуючого процесу руйнування при одночасній дії експлуатаційних факторів.

фрактографічний аналіз, іонноазотовані зразки, алюмінієві поршні, кінетика руйнування

Постановка проблеми. Однією з особливостей експлуатації двигунів сільськогосподарської техніки в умовах інтенсифікації землеробства є необхідність зростання експлуатаційних параметрів, що викликає неухильне підвищення робочої температури конструктивних елементів. [1,2]. Особливо це актуально для поршнів з алюмінієвих сплавів, що мають низьку теплостійкість. Одним з прогресивних методів підвищення їх теплової стійкості є іонне азотування (іонно-плазмове азотування) [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх досліджень і публікацій щодо застосування методу іонноплазмового азотування свідчить про те, що постійно відбувається пошук шляхів його удосконалення.

Автори робіт [3,4] пропонують вести процес дифузійного насичення азотом у плазмі пульсуючого струму, що забезпечує недопущення переходу тліючого розряду у дуговий (через малу тривалість імпульсів великої напруги) з одночасним збільшенням швидкості процесу.

У роботі [5] показано застосування комбінованого пульсуючого режиму насичення азотом та вуглецем при циклічному нагріванні та охолодженні садки, що призводить до ефекту прискорення дифузійних процесів. Розроблено математичну модель та методику для теоретичного опису кінетики процесу дифузійного насичення металів в режимі хіміко - термоциклічної обробки за оцінкою енергетичних характеристик (енергії активації та активаційного об'єму) процесу. Показано [6], що застосування термічних циклів при азотуванні, наприклад, титану обумовлює підвищення його міцності при задовільній пластичності.

Автори [7] вказують на переваги газотермоциклічного методу регулювання процесу азотування. Технологія обробки при цьому полягає у періодичному чередуванні циклів насичення при проточному азотуванні та розсіювання азотованого шару при максимально можливому зниженні насичуючої здатності атмосфери. Додаткова інтенсифікація процесу відбувається за рахунок його двостадійності - насичення та розсіювання газу проходить при різних температурах.

Широке впровадження цієї прогресивної технології стримується відсутністю систематичних досліджень, що дозволяють оптимізувати режими формування іонноазотованих шарів за критеріями міцності, які враховують теплостійкість [8, 9].

Таким чином, основною причиною, яка перешкоджає вирішенню задач докорінного удосконалення автотракторних двигунів внутрішнього згорання на базі застосування зміцнювальних іонноазотованих шарів є те, що, не зважаючи на накопичений досвід, загальну позитивну оцінку та доцільність застосування у виробництві та ремонтній практиці, технологія вакуумного азотування в пульсуючому пучку плазми має ряд невирішених проблем, недостатня вивченість яких ускладнює розробку науково-обґрунтованих принципів її реалізації [10]. Це обумовлює необхідність цілеспрямованого продовження дослідження механізму процесу руйнування теплозахисного іонноазотованого покриття при термічному впливі

Постановка завдання. Для ефективного аналізу механізму явищ та управління технологічним процесом зміцнення поршнів, що виготовлені із алюмінієвих сплавів необхідно виявити взаємозв'язок факторів, що визначають хід процесу, і їх вплив на властивості дифузійних іонноазотованих шарів.

Для більш детального вивчення кінетики та механізму руйнування, впливу оточуючого середовища та навантаження на опір зразків з теплозахисними дифузійними іонноазотованими шарами необхідно провести ряд додаткових фрактографічних досліджень.

Наявність цієї інформації дозволить підвищити міцність і надійність як самих покриттів, так і деталей з покриттями на стадії їхнього конструювання.

Виклад основного матеріалу. Дослідження проводили з застосуванням зразків з алюмінієвого сплаву AL21 із теплозахисними дифузійними іонноазотованими шарами ізотермічній та термоциклічній повзучості проводились.

Фрактографічні дослідження в даній роботі проводилися з використанням методу растрової електронної мікроскопії на мікроскопі мікро аналізаторі "SamScan-4DV" основне призначення якого полягає у відтворенні за допомогою електронно-променевої трубки тримірною зображення поверхні зразка за загально прийнятою методикою [11]. При цьому можливе дослідження мікро топографії грубих поверхонь та масивних зразків, що не є можливим у випадку традиційних методів світової й трансмісійної електронної мікроскопії. Дослідження зображення при задовільних умовах фотографування може досягати 5...6 нм, а значна глибина фокусу, що виникає внаслідок малого кута розходження електронного пучка (~10 мрад), більше ніж в 300

разів перевищує глибину фокусу в світовому мікроскопі, що працює в аналогічних умовах.

При взаємодії електронного пучка із зразком виникають вторинні електрони малої енергії (ті, що генеруються в зразку пучком), а також високоенергетичні відбиті електрони (первинні електрони, що відбилися від поверхні зразка). Детектування низькоенергетичних вторинних електронів здійснюється скінцилятором із накладанням потенціалу 12 кВ. Сигнал від електронів даного виду дозволяє фіксувати зображення ділянок поверхонь.

У випадку роздільного детектування сигналів від зворотно розсіяних електронів, які в даному приборі здійснюються за допомогою твердотільного чотирьохполюсного детектора, можливе отримання додаткової інформації. Тобто, так як відношення зворотного розсіювання відбитих електронів до падаючих зростає із зростанням атомного номеру матеріалу зразка або його ділянки, даний режим зображення широко використовується у випадку контраста, що зумовлений різницею в атомних номерах аналізованих елементів чи середнього ефективного номеру у випадку багатоелементних зразків. Ця методика дозволяє також детектувати поверхневе забруднення на зразках.

Визначення хімічного складу поверхні зразків, а також різних фаз, недосконалостей і включень проводилось в даній роботі з використанням методу рентгеноспектрального мікроаналізу (РСМА), фізична сутність якого полягає в генерації рентгенівського випромінювання при попаданні первинного електронного пучка на поверхню зразка, що досліджується.

Рентгенівський спектр, що випромінюється, складається із спектру нерозривного рентгенівського випромінювання, який включає рентгенівські промені всіх значень енергії, аж до енергії пучка, що падає, і із ліній характеристичного рентгенівського випромінювання (відомих як ряд ліній К- і М-серій), за допомогою яких можна однозначно ідентифікувати хімічний склад зразка. Детектування і аналіз рентгенівських променів, що випромінюються зразком під дією електронного пучка, в даній роботі проводились за допомогою дисперсного енергетичного спектрометра LZ-5 з обробкою отриманих результатів, включаючи кількісний аналіз із врахуванням всіх поправок, в мінікомп'ютерній системі "LINK-860".

Методика кількісного мікрорентгеноспектрального аналізу 2AP-4, що використовується в роботі, базується на використанні еталонів відомого складу. При проведенні кількісного мікроаналізу визначається величина відношення інтенсивностей рентгенівського випромінювання елемента, що досліджується, в зразку і в еталоні. Дослідження інтенсивності рентгенівського випромінювання, як в зразку, так і в еталоні проводяться в однакових експериментальних умовах: прискорюване напруження - 20 кВ; струм пучка - $1 \dots 2 \cdot 10^{-10}$ А; кут нахилу площини зразка до детектору – 100. Крім цього, для отримання даних кількісного мікроаналізу необхідно додатково вводити в розрахунок три поправки: 1) поправка на різницю в розсіюванні і гальмуванні електронів у зразку і в еталоні, тобто поправка на атомний номер елемента; 2) поправка на поглинання генеруючого рентгенівського випромінювання зразком; 3) поправка на ефект флуоресценції через безупинне рентгенівське випромінювання.

Проте, у ряді випадків стандартна програма автоматичного розрахунку концентрацій дає великі похибки. Це пов'язано із взаємним впливом профілей характеристичних ліній елементів. В цьому випадку найбільш достовірні результати розрахунку вмісту елементів можуть бути отримані за допомогою підпрограми ручного розрахунку концентрацій. Ця підпрограма оперує не реальними профілями піків елементів, а їх площами. При цьому діапазони енергій "вікон" встановлюються

довільно, що дозволяє уникнути взаємний вплив ліній і підвищити точність аналізування.

Використання програми “Linescan”, яка передбачає розбиття ліній і сканування на 128 точок із послідуочим кількісним хімічним аналізом, дозволяє реєструвати і обробляти рентгенівське випромінювання зразка, що досліджується. За допомогою цієї програми можна зафіксувати характерні діапазони енергій, керувати розгорткою растрового електронного мікроскопу і збирати інформацію про відносний вміст елементів вздовж визначеної лінії із послідуочною обробкою і роздрукуванням результатів дослідження.

Установлено, що механізм кінетики процесу руйнування зводиться до поступового росту мікротріщин до критичного розміру в результаті розриву атомних зв'язків у вершині тріщини при напруженнях, що перевищують умовну межу текучості композиції «основа-покриття». Спостерігається зародження та ріст однакових за видом тріщин. Потім тріщини все більше розкриваються і довжина та глибина їх збільшується. Дослідження показують, що на поверхні без зміцнення тріщини утворюються після прикладення навантаження на різного роду дефектах: включеннях, подряпинах, неоднорідностях і т.п. Наявність зміцненого поверхневого шару знижує інтенсивність зростання тріщин (рис. 1).

Установлено наявність ділянок основи, які внаслідок порушення суцільності покриття взаємодіють з оточуючим середовищем та впливають на підвищення пластичності за рахунок розкриття дефектів. Початок інтенсивного місцевого окислювання основи в області дефекту покриття приводить до скорочення поперечного перерізу і росту діючого напруження. Наслідком цього є збільшення швидкості повзучості, що у свою чергу, приводить до розвитку початкового дефекту і до прогресуючого процесу руйнування при неадитивній дії експлуатаційних факторів (рис. 2). Виявлено, що дефекти основи руйнують покриття. Крім того, виявлено, що деформація зразка здійснюється за рахунок процесів зсуву. Підтвердженням цього є характерні лінії Чернова-Людерса (рис. 3, 4 та 5, за варіантами плану експерименту).

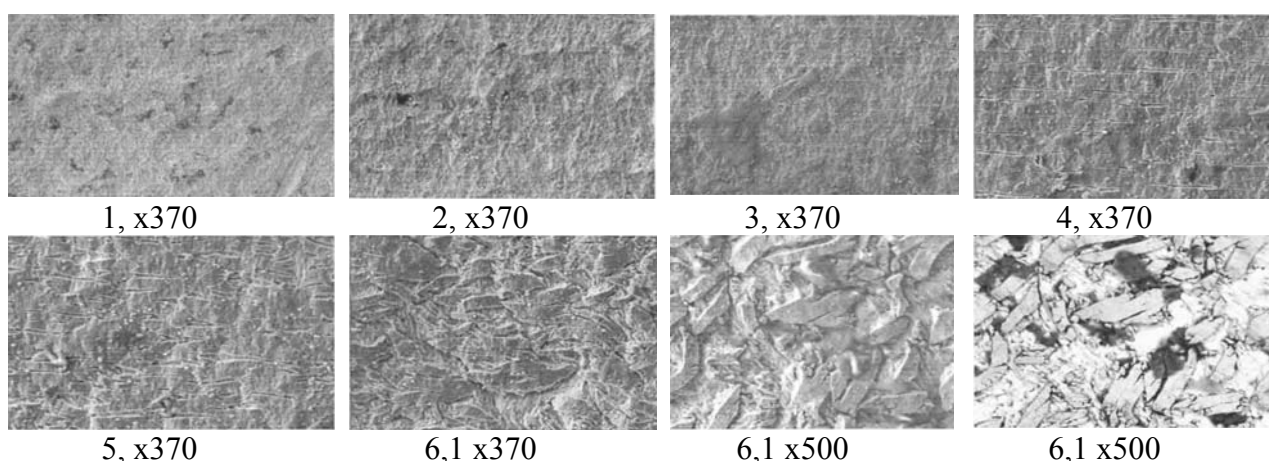


Рисунок 1 – Кінетика руйнування: 1 - ділянка сталої повзучості; 2 - перехід від сталої до прискореної повзучості; 3, 4, 5, 6.1 - ділянка прискореної повзучості; 6.2 - топограма зруйнованої поверхні; 6.3 - фазовий контраст зруйнованої поверхні

Джерело: розроблено авторами

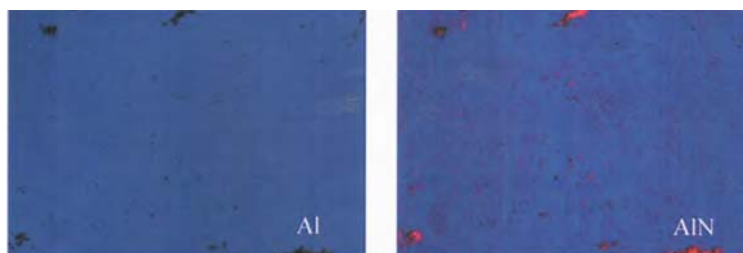
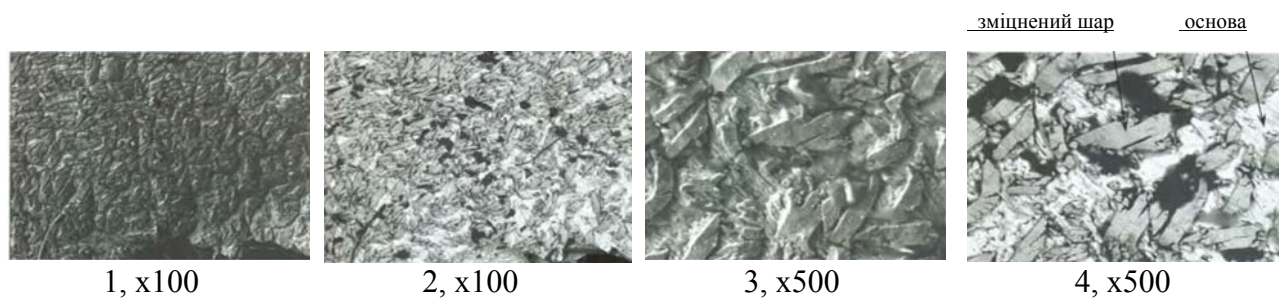
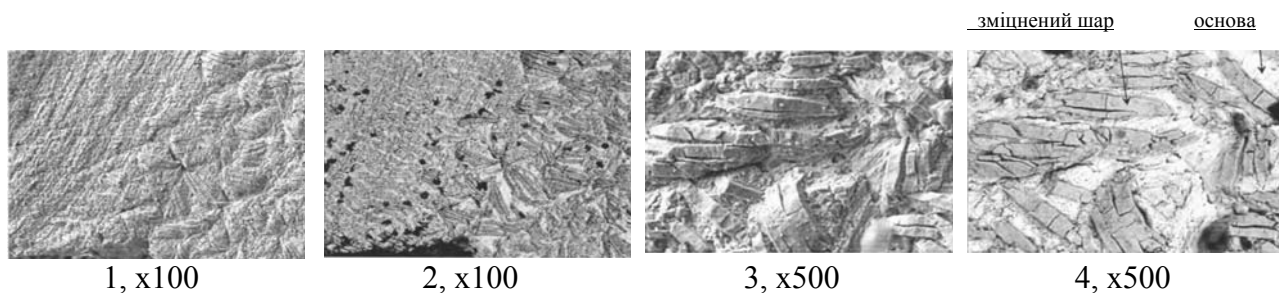


Рисунок 2 – Розподіл хімічних елементів по зруйнованій поверхні, x 300

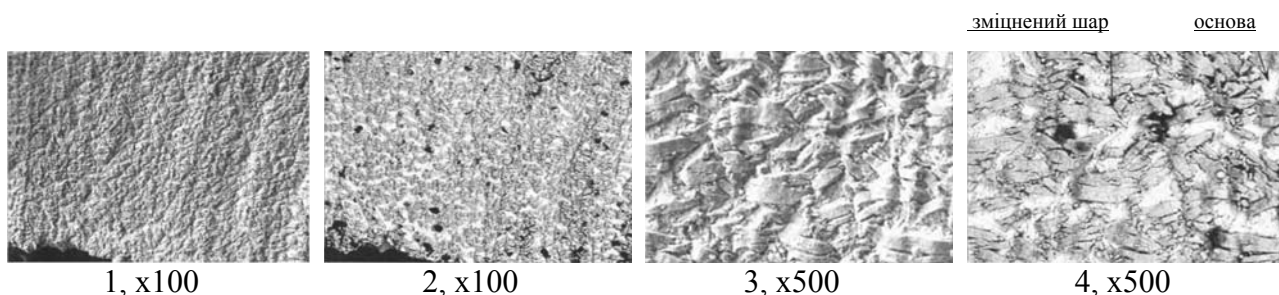
Джерело: розроблено авторами

Рисунок 3 – Топограма поверхні зразка: 1, 3 - загальний вигляд зруйнованої зміцненої поверхні;
2, 4 - фазовий контраст зруйнованої зміцненої поверхні

Джерело: розроблено авторами

Рисунок 4 – Топограма поверхні зразка: 1,3 - загальний вигляд зруйнованої зміцненої поверхні;
2, 4 - фазовий контраст зруйнованої зміцненої поверхні

Джерело: розроблено авторами

Рисунок 5 – Топограма поверхні зразка: 1, 3 - загальний вигляд зруйнованої поверхні покриття;
2, 4 - фазовий контраст зруйнованої поверхні покриття

Джерело: розроблено авторами

Висновки. Показано, що механізм процесу руйнування зводиться до поступового росту мікротріщин в результаті розриву атомних зв'язків у вершині тріщини при напруженнях, що перевищують умовну межу текучості композиції “основа-покриття”. Установлено наявність ділянок основи, які внаслідок порушення суцільності зміцненого поверхневого шару взаємодіють з оточуючим середовищем та

впливають на підвищення пластичності за рахунок розкриття дефектів. Це збільшує швидкість повзучості, що у свою чергу, приводить до прогресуючого процесу руйнування при одночасній дії експлуатаційних факторів.

Список літератури

1. Ляшенко Б.А., Рутковский А.В. О достоинствах технологии вакуумного. *Оборудование и инструмент*. 2005. №12. С. 45-47.
2. Ляшенко Б.А., Маркович С.І., Михайлюта С.С. Розробка технологічного процесу вакуумного азотування поршнів двигунів в пульсуючому пучку плазми. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж.міжвід.наук.-техн. зб.* Вип. 47, ч. 1. 2017. С. 158-166.
3. Afonso A., Ferran G., Chi F. Development of fiber reinforced aluminium alloy for diesel piston application. *SAE Techn. Pap. Ser.*1991. №910632. P. 1-9.
4. Aluminium alloy composite material with intermetallic compound finely dispersed in matrix among reinforcing elements: Пат. 5449421 США: МКИ C22C21/00. Оpubл. 12.09.95.
5. Murakami Shoji. Plasma jet sprayed alumina coating on automobile piston. *SAE Techn. Pap. Ser.* 1987. №870158. P. 179-184.
6. Surface hardened aluminium part and method of producing same: Пат. 5352538 США: МКИ B22P7/04. Оpubл. 04.10.94
7. Кровяков К.С., Радченко М.В. Упрочнение кольцевых канавок поршня дизеля электронно-лучевой обработкой. *Техн. машиностр.* 2000. №3. С. 23-25.
8. Нанесение износостойких покрытий на быстрорежущий инструмент / Внуков Ю.Н. и др. К.: Техника, 1992. 143 с.
9. Рутковский А.В., Маркович С.І., Михайлюта С.С. Дослідження іонноазотованих алюмінієвих сплавів на ізотермічну та термоциклічну повзучість. *Підвищення надійності машин і обладнання: зб. матеріалів конф. Міжнар. наук.-практ. конф., 15-17 квітня 2020 р.* Кропивницький: ЦНТУ. 2020. Вип. 2. С. 45-50.
10. Jom Larsen-Basse. Surface engineering and the new millennium. *Surface Engineering*. 1998. Vol. 14. №2. P. 81 -83.
11. Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д., Зчлин И. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ: пер. с англ. М.: Мир, 1984. 552 с.

Referencis

1. Ljashenko, B.A. & Rutkovskij, A.V. (2005). O dostoinstvah tehnologii vakuumnogo. *Oborudovanie i instrument*, 12, 45-47 [in Russian].
2. Liashenko, B.A., Markovych, S.I. & Mykhajliuta, S.S. (2017). Rozrobka tekhnolohichnoho protsesu vakuumnoho azotuvannia porshniv dvyhuniv v pul'suiuchomu puchku plazmy. *Zahal'noderzhavnyj mizhvidomchyj naukovo-tekhnichnyj zbirnyk. Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil's'kohospodars'kykh mashyn, Vol. 47, ch. 1*, 158-166 [in Ukrainian].
3. Afonso, A., Ferran, G. & Chi, F. (1991). Development of fiber reinforced aluminium alloy for diesel piston application. *SAE Techn. Pap. Ser. №910632*. p.1-9.
4. Aluminium alloy composite material with intermetallic compound finely dispersed in matrix among reinforcing elements. pat. 5449421 USA, MCI C22C21/00. Opubl. 12.09.95.
5. Murakami Shoji. (1987). Plasma jet sprayed alumina coating on automobile piston. *SAE Techn. Pap. Ser., №870158*, p. 179-184.
6. Surface hardened aluminium part and method of producing same. Pat. 5352538 USA, MCI B22P7/04. Opubl. 04.10.94
7. Krovjakov, K.S. & Radchenko, M.V. (2000). Uprochnenie kol'cevyh kanavok porshnja dizelja zlektronno-luchevoj obrabotkoj. *Tehn. mashinostr*, 3, 23-25. [in Russian].
8. Vnukov, Ju.N., Markov, A.A., Lavrova, L.V. et al. (1992). Nanesenie iznosostojkih pokritij na bystrozeshushhij instrument. Kyiv: Tehnika [in Russian].
9. Rutkovskij, A.V., Markovych, S.I., Mykhajliuta, S.S. (2020). Doslidzhennia ionnoazotovanykh aliuminiievyykh spлавiv na izotermichnu ta termotsyklichnu povzuchist'. *Pidvyschennia nadijnosti mashyn i obladdannia: zb. materialiv konf. Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia (15-17 kvitnia 2020 r)*. Kropyvnyts'kyj: TsNTU, Vol. 2. S. 45-50.

10. Jom Larsen-Basse (1998). Surface engineering and the new millennium. *Surface Engineering, Vol. 14, 2*, p. 81 -83.
11. Gouldstejn Dzh., N'juberi D. & Zchlin I. (1984). Rastrovaja zlektronnaja mikroskopija i rentgenovskij mikroanaliz. (Trans.) Moskow: Mir [in Russian].

Anatoly Rutkovskiy, Senior Researcher, PhD tech. sci.

National Academy of sciences of Ukraine G.S. Pisarenko institute for problems of strength

Sergiy Markovych, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Sergiy Myhajlyta**, post-graduate

Central Ukrainian National Technical University, Kropivnitskiy, Ukraine

Fraktografichniy Analysis of the Ion Nitrided Standards From the Aluminium Pistons of Engines of Agroindustrial Technique

For a more detailed study of kinetics and the mechanism of destruction, the influence of the environment and the load on the resistance of the samples with heat-protecting diffusion ion-accounted layers, a number of additional fractographic studies should be carried out. The presence of this information will increase the strength and reliability of both coatings and coatings in the stage of their design.

In the work, a fractographic analysis of ionic nitrogen samples from aluminum pistons of agro-industrial machinery engines using a method of raster electron microscopy on a microscope Micro analyzer "Samssn-4DV" was performed. Determination of the chemical composition of the surface of the samples, as well as various phases, imperfections and inclusions was carried out in this paper using the X-ray spectral microanalysis method (RSMA). It has been established that the mechanism of kinetics of the process of destruction is reduced to the gradual growth of microcracks to a critical size as a result of the rupture of atomic bonds in the vertex of the crack with stresses, which exceeds the conditional limit of the content of the "base-coating" composition. There is an emergence and growth of the same types of cracks. Then the cracks are increasingly revealed and the length and depth increases. The intensive local oxidation of the base in the area of the coating defect leads to a reduction in the cross-section and the growth of acting stress. The consequence of this is an increase in the creep speed, which in turn leads to the development of the initial defect and to the progressive process of destruction in non-additive operating factors. It has been found that the bases defects are destroying the coating. In addition, it has been found that the deformation of the sample is carried out at the expense of the displacement processes. Confirmation of this is the characteristic lines of Chernova-Leuders.

Conclusions. It has been shown that the mechanism of destruction process is reduced to the gradual growth of microcracks as a result of the rupture of atomic bonds in the vertex of the crack at strains, which exceeds the conditional line of fluidity of the "base-coating" composition. The presence of areas of the base is established, which as a result of a violation of the strength of the strengthened surface layer interact with the environment and affect the increase of plasticity due to the disclosure of defects. This increases the creep speed, which in turn leads to the progressive process of destruction in the simultaneous operation of operational factors.

fractographic analysis, ion-nitrided samples, aluminum pistons, fracture kinetics

Одержано (Received) 12.11.2021

Прорецензовано (Reviewed) 23.11.2021

Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021