

increase in the mass fraction of chromium from 0,3% to 0,5%. With a further increase in the chromium content, the impact resistance of white low-alloy cast iron increases less noticeably, and in the presence of chromium 0,7-0,8% reaches a maximum. The difference in hardness from the surface (~ 52 HRC) to the center of the ball (~ 42 HRC) is a value of about 10 units.

The established impact resistance of grinding bodies made it possible to conclude: when grinding solid rocks with high content of solid quartz, the use of low chromium cast iron as a material for grinding media is the most effective, as in terms of achieve high impact resistance, and to ensure cost-effective performance.

cast iron, melt, ball, chill mold, alloying, chrome, impact resistance

Одержано (Received) 20.05.2020

Прорецензовано (Reviewed) 05.06.2020

Прийнято до друку (Approved) 19.10.2020

УДК 621.432

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).72-81](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).72-81)

А.В. Рутковський, канд. техн. наук, ст. наук. співр.

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.

Центральнoукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна

e-mail: markob0@ukr.net; sergejmihajluta2@gmail.com

Теплостійкість іонноазотованих алюмінієвих сплавів при ізотермічному та термоциклічному впливі

В роботі проведено дослідження основного параметру, що обмежує застосування поршнів з алюмінієвих сплавів при форсуванні двигунів - теплостійкості та її залежності від дифузійних іонноазотованих шарів. При аналізі останніх досліджень і публікацій визначено найбільш поширені методи нагрівання зразків при випробуваннях, їх переваги та недоліки. Завдання дослідження - виявити взаємозв'язок факторів, що визначають теплостійкість іонноазотованих алюмінієвих сплавів при ізотермічному та термоциклічному впливі для ефективного аналізу механізму явищ та управління технологічним процесом зміцнення поршнів. Для дослідження використовувався комплекс лабораторного устаткування на основі установки "Щелкунчик", що забезпечує циклічну зміну температури й навантаження зразка, контроль та запис значень температури, навантаження й деформації та функціонування в автоматичному режимі. При цьому використовувалися плоскі зразки з алюмінієвого сплаву АЛ21 з теплозахисними дифузійними іонноазотованими шарами, що нанесені в установці ВІПА-1 та зразки без обробки. Характеристики термічного циклу: 500 °С ↔ 720 °С. час нагрівання - 10 сек., охолодження 15 сек., що відповідає реальним умовам експлуатації поршнів. Визначені криві ізотермічної та термоциклічної повзучості що мають чітко виражені три ділянки повзучості, в залежності від температури тривалість їх різна. Це зумовлено наявністю в поверхневому шарі зміцнюючої фази AlN_i; рівномірністю розподілу компонентів покриття по поверхні й ступінню їх тугоплавкості. З цим пов'язано ускладнення руху дислокацій, які на своєму шляху зіштовхуються з необхідністю долати при своєму русі великі перепони, що викликані наявністю зміцненого шару. Вид кривих повзучості залежить від температури та умов її впливу на композицію "основа-покриття". Час до руйнування при термоциклічному режимі випробувань менший, ніж при ізотермічному. В процесі повзучості алюмінієвого сплаву АЛ21 із теплозахисними дифузійними іонноазотованими шарами спостерігається два конкуруючих процеси: зміцнення в наслідок пластичної деформації та зняття зміцнення під впливом підвищеної температури. Опір ізотермічній та термоциклічній повзучості зміцненого алюмінієвого сплаву АЛ21 підвищився в 1,8...2,2 рази.

вакуумне азотування, алюмінієві сплави, теплостійкість, ізотермічні та термоциклічні випробування, криві повзучості

А. В. Рутковский, канд. техн. наук, ст. научн. сотр.

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, г. Киев, Украина

С.І. Маркович, доц., канд. техн. наук, **С.С. Михайлюта**, асп.

Центральноукраїнський національний технічний університет, г. Кропивницький, Украина

Теплостойкость ионноазотированных алюминиевых сплавов при изотермическом и термоциклическом влиянии

В работе проведено исследование основного параметра, что ограничивает применение поршней из алюминиевых сплавов при форсировании двигателей - теплостойкости и ее зависимости от диффузионных ионноазотированных слоев. При анализе последних исследований и публикаций определены наиболее распространенные методы нагревания образцов при испытаниях, их преимущества и недостатки. Задание исследования - обнаружить взаимосвязь факторов, которые определяют теплостойкость ионноазотированных алюминиевых сплавов при изотермическом и термоциклическом влиянии для эффективного анализа механизма явлений и управления технологическим процессом укрепления поршней. Для исследования использовался комплекс лабораторного оборудования на основе установки "Щелкунчик", которая обеспечивает циклическое изменение температуры и нагрузку образца, контроль и запись значений температуры, нагрузки и деформации и функционирования в автоматическом режиме. При этом использовались плоские образцы из алюминиевого сплава АЛ21 с теплозащитными диффузионными ионноазотированными слоями, которые нанесены в установке ВИПА-1 и образцы без обработки. Характеристики термического цикла: 500 °С - 720 °С. время нагревания - 10 сек., охлаждение 15 сек., которое отвечает реальным условиям эксплуатации поршней. Определены кривые изотермической и термоциклической ползучести что имеют четко выраженные три участка ползучести, в зависимости от температуры длительность их разная. Это предопределено наличием в поверхностном слое укрепляющей фазы AlNi; равномерностью распределения компонентов покрытия по поверхности и степенью их тугоплавкости. С этим связано осложнение движения дислокаций, которые на своем пути сталкиваются с необходимостью преодолевать при своем движении большие преграды, которые вызваны наличием укрепленного слоя. Вид кривых ползучести зависит от температуры и условий ее влияния на композицию "основа-покрытие". Время до разрушения при термоциклическом режиме испытаний меньше, чем при изотермическом. В процессе ползучести алюминиевого сплава АЛ21 с теплозащитными диффузионными ионноазотированными слоями наблюдается два конкурирующих процесса: укрепление вследствие пластической деформации и снятие укрепления под воздействием повышенной температуры. Соппротивление изотермической и термоциклической ползучести укрепленного алюминиевого сплава АЛ21 повысился в 1,8...2,2 раза.

вакуумное азотирование, алюминиевые сплавы, теплостойкость, изотермические и термоциклические испытания, кривые ползучести

Постановка проблеми. Зростання експлуатаційних параметрів двигунів внутрішнього згорання викликає неухильне підвищення робочої температури конструктивних елементів двигуна, особливо деталей циліндро-поршньової групи [1]. Застосування для виготовлення поршнів алюмінієвих сплавів обумовлено їх високою питомою міцністю і малою питомою вагою, проте великим недоліком цих матеріалів є низька теплостійкість [2].

Перспективним для поверхневого зміцнення деталей автотракторних двигунів внутрішнього згорання вважається метод іонно-плазмового азотування. Його сутність полягає у тому, що у розрідженому газовому середовищі, яке містить азот, між катодом (деталлю) та анодом (стінками вакуумної камери) збуджується тліючий розряд. При цьому позитивні іони газу з високою енергією, бомбардуючи поверхню катоду, нагрівають її до температури насичення та дифундують в цю поверхню, формуючи твердий розчин азоту в металі, а при досягненні межі розчинності - нітридні фази. Температура азотування 470-580 °С, тиск $(1,33-13)10^2$ Па, робоча напруга коливається від 400 до 1000 В [2,3]. Разом з тим актуальною є задача дослідження основного параметру, що обмежує застосування алюмінієвих сплавів при форсуванні двигунів - теплостійкості та її залежності від дифузійних іонноазотированих шарів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При проведенні термомеханічних випробувань, до яких належить і дослідження на повзучість матеріалів, найбільш поширені три методи нагрівання: прямим пропусканням струму (резистивне нагрівання), струмом високої частоти (СВЧ) і пічне радіаційне нагрівання. Усі ці

методи розглядаються як альтернативні. Резистивний метод нагрівання й нагрівання струмом високої частоти особливо привабливі для проведення випробувань на термовтому при різких тепловмінах. Та сама програма досліджень використовує для ізотермічних випробувань звичайну нагрівальну піч, а для термоциклічних - нагрівання струмом високої частоти [2].

Порівняльна оцінка методів нагрівання показує істотні розходження (більш ніж у 2 рази) характеристик міцності, що отримані при зовнішньому радіаційному нагріванні та електричними методами [3, 4]. Ще більш істотний недолік електричних методів нагрівання виявляється при наявності тріщин у зразку. Неоднорідність у виділенні тепла й щільності струму у вершини тріщини є основними причинами збільшення швидкості росту тріщин.

Рівень знань, що отриманих в інших галузях науки, дозволяє відзначити специфічні явища, які виникають при електричних методах нагрівання:

- електропластичний ефект, що полягає в підвищенні пластичності й зниженні опору деформуванню при безпосередньому припущенні електричного струму через зразок [5].

- магнітопластичний ефект як результат впливу магнітних полів на взаємодію дислокацій із границями магнітних доменів і посилення їх рухливості [6, 7].

- явище електроміграції чи перенесення маси при підвищених температурах і високій щільності струму. Це явище приводить до прискореної дифузії у результаті взаємодії електронів провідності з атомами, що дифундують у метал [8].

Некоректність і недоліки електричних методів нагрівання зразка привели до необхідності пошуку методів, найбільш придатних для дослідження покриттів. Головною вимогою є зовнішнє підведення контрольованого теплового потоку, питома величина якого повинна відповідати умовам експлуатації конструктивних елементів. Тому однією з тенденцій розвитку високотемпературних лабораторних засобів є більш широке застосування променевого нагрівання [9].

Промєневе нагрівання не робить специфічного впливу на механічні характеристики конструктивних матеріалів. Тому, запропоновано принцип, що поєднує замкнутість дзеркальної порожнини і її фокусуєчу дію. На основі цього принципу в Інституті проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України, під керівництвом доктора технічних наук професора Ляшенко Б.А., розроблено ряд лабораторних установок в т.ч. установка "Щелкунчик". Фокусоване промєневе нагрівання особливо зручне для термоциклювання при максимальних швидкостях нагрівання за рахунок мінімальної теплової інерційності пристрою. Реалізується термоциклювання відсіченням чи перерозподілом променевого потоку [10,11].

Спеціальні оптичні камери фокусуєчої дії дозволяють досягти необхідний рівномірний розподіл температур по зразку і можуть бути убудовані в стандартну розривну машину. В якості джерел промєневої енергії застосовують графітові нагрівані, Хе-дугові лампи потужністю до 30 кВА, галогенні і вольфрамові лампи.

З застосуванням зазначеного обладнання проведені значні дослідження на ізотермічну та термоциклічну повзучість лопаток компресора авіаційних газотурбінних двигунів змінених багатофункціональними градієнтними вакуум-плазмовими покриттями (PVD) [12], титанових сплавів BT5-1 з жаростійкими емалєвими покриттями [13] та ін.

Разом з тим недостатньо вивчено повзучість іонноазотованих алюмінієвих сплавів при ізотермічних і термоциклічних режимах.

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. Наявність цієї інформації дозволить

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

Виклад основного матеріалу. Для дослідження використовувався комплекс лабораторного устаткування на основі установки “Щелкунчик”, що забезпечує циклічну зміну температури й навантаження зразка, контроль та запис значень температури, навантаження й деформації та функціонування в автоматичному режимі. Установка складається з пристроїв для циклічної зміни температури й навантаження зразка, а також включає системи виміру й запису температури, навантаження й деформації.

Система навантаження установки забезпечує лінійний напружений стан у зразку і складається з механізмів навантаження, важеля й систем тяг із шарнірами із співвідношенням плеч 1 : 10. Проводили порівняльні випробування на ізотермічну та термоциклічну повзучість при фіксованому значенні навантаження $0,8\sigma_B$, згідно ДСТУ 2637-94, в умовах осьового розтягу при нагріванні робочої ділянки зразка шляхом фокусування променевої енергії у замкнутій оптичній безінерційній системі. Це дозволяє нагрівати зразок до 1000°C , без впливу електромагнітопластичного ефекту та здійснювати охолодження зразка зі швидкістю до 100 град/с. Характеристики термічного циклу: $500^\circ\text{C} \leftrightarrow 720^\circ\text{C}$. час нагрівання - 10 сек., охолодження 15 сек., що відповідає реальним умовам експлуатації поршнів.

При цьому використовувалися плоскі зразки з алюмінієвого сплаву АЛ21 (рис. 1) з теплозахисними дифузійними іонноазотованими шарами, що нанесені в установці ВПА-1 [14] та зразки без обробки.

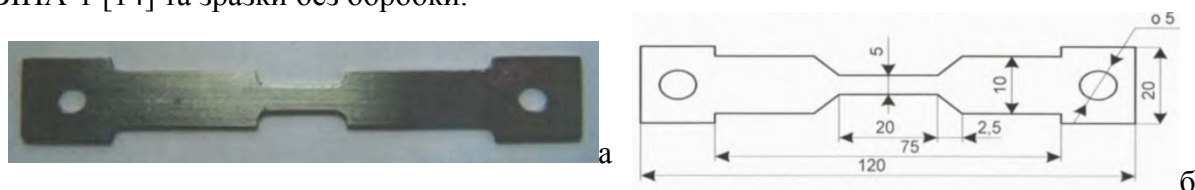


Рисунок 1 – Загальний вигляд та креслення зразка для випробування на ізотермічну та термоциклічну повзучість згідно ДСТУ 2637-94

Джерело: [5]

Навантаження P визначали за формулою:

$$P = \sigma \cdot F$$

де σ – задане напруження, МПа; F - площа поперечного перерізу робочої частини зразка, мм.

Фіксоване значенні навантаження складало $0,8\sigma_B$ згідно ДСТУ 2637-94 та критеріїв визначення допустимого напруження в Нормам ASME (80% середньої величини напружень які приводять до сумарної деформації 1%). Навіть у реальних металевих матеріалах із низькою пластичністю при сумарній деформації $< 1\%$ не проходить руйнування, тому цей параметр і прийнято в якості вказаного критерію.

Відносну деформацію ε у відсотках визначали вимірюванням переміщення рухомого захвату зразка (видовження зразка) Δl і подальшим розрахунком за формулою:

$$\varepsilon = \left(\frac{\Delta l}{l_0} \right) \cdot 100, \quad (1)$$

де l_0 – початкова розрахункова довжина зразка, що вимірюється при температурі 293 ± 5 К перед випробуваннями, м.

Результати випробувань відображено у вигляді графіків кривих повзучості в координатах відносна деформація повзучості час. Загальний інтервал часу до руйнування зразка з покриттям становить

$$t = t_1 + t_2 + t_3$$

де $t_1 + t_2 + t_3$ – відповідно час деформації 1,2 та 3 ділянок кривої повзучості, с.
Граничну деформацію при руйнуванні ε_p зразка (покриття) визначали у відсотках за формулою

$$\varepsilon_p = \left(\frac{\Delta l_p}{l_0} \right) \cdot 100$$

де Δl_p – видовження робочої частини зразка при руйнуванні, м;

$$\Delta l_p = l_k - l_n = \Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3$$

де l_k – кінцева розрахункова довжина зразка після руйнування покриття, виміряна при температурі 293 ± 5 К, м;

$\Delta l_1 + \Delta l_2 + \Delta l_3$ – відповідно подовження робочої частини зразка на 1, 2 та 3 ділянках кривої повзучості, м.

Швидкість повзучості ε в одиницях за секунду визначалася на ділянці сталої повзучості 2 кривої повзучості за формулою

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_2}{(\tau_2 \cdot 60)}, \quad (2)$$

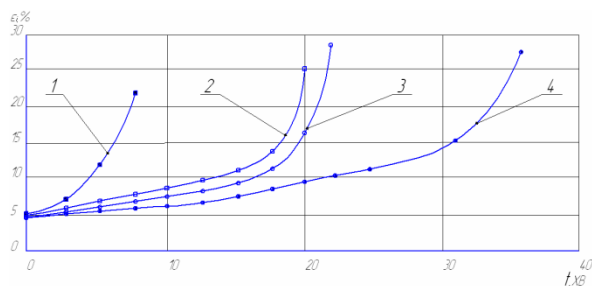
де ε_2 – визначається за формулою 1.

Таким чином, крива повзучості є чутливим інструментом, що характеризує стан покриття й поверхні адгезійного контакту. Крім того, побудова залежності комплексу термомеханічних характеристик покриття від часу та числа теплозмін дозволяє визначити такі важливі характеристики як термостабільність властивостей та спрогнозувати ресурс покриття.

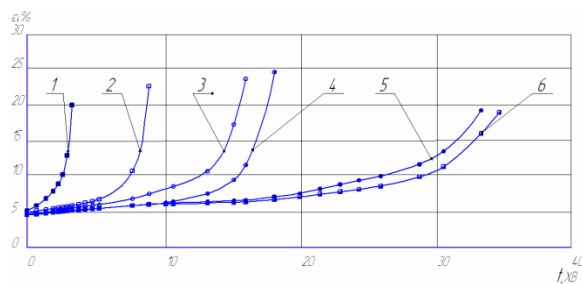
Спільний розгляд таких характеристик як ізотермічна та термоциклічна повзучість дозволяє створити метод оцінки працездатності теплозахисних дифузійних іонноазотованих шарів в умовах, що наближені до експлуатаційних. Цей метод базується на порівняльному аналізі кривих ізотермічної та термоциклічної повзучості алюмінієвого сплаву зі зміцненим поверхневим шаром, що несуть у собі інформацію про кінетику деформування та накопичення пошкоджень під впливом експлуатаційних факторів. Для отримання достовірних кривих повзучості та отримання з них необхідної інформації було проведено ряд заходів, що включають подальше вдосконалення методики проведення досліджень та модернізації експериментальної установки.

В результаті проведених порівняльних експериментальних досліджень зразків із алюмінієвого сплаву АЛ21, як без обробки так і з зміцненим поверхневим шаром отримано криві повзучості та встановлено вплив конструктивних, технологічних і експлуатаційних факторів на ізотермічну та термоциклічну повзучість.

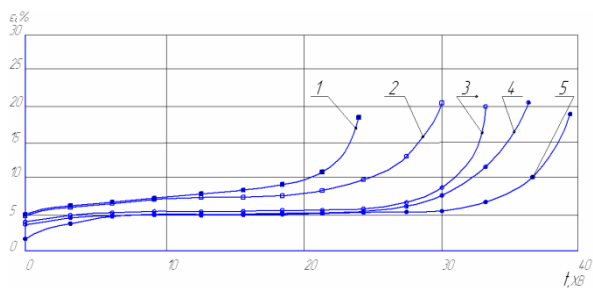
На рис. 2 представлено криві ізотермічної повзучості.



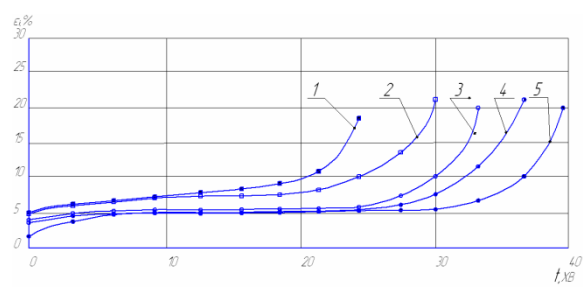
1 - (без обробки) при $T = 670$ °С; 2 - при $T = 670$ °С;
3 - при $T = 650$ °С; 4 - при $T = 570$ °С



1- (без обробки) при $T = 690$ °С; 2 - при $T = 710$ °С;
3, 4 - при $T = 590$ °С та при $T = 680$ °С; 5,6- при $T = 610$ °С та при $T = 580$ °С



1 - (без обробки) при $T = 640\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2, 3 - при $T = 640\text{ }^{\circ}\text{C}$ та при $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4, 5 - при $T = 560\text{ }^{\circ}\text{C}$ та при $T = 510\text{ }^{\circ}\text{C}$

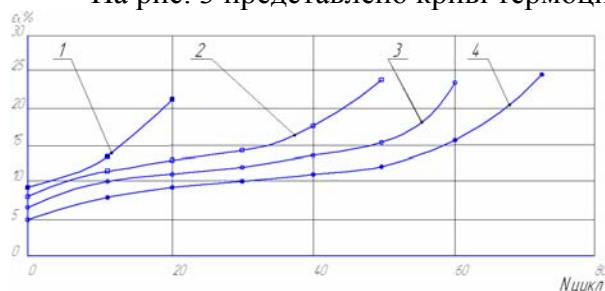


1 - (без обробки) при $T = 640\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 - при $T = 620\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3, 4 - при $T = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ та при $T = 540\text{ }^{\circ}\text{C}$; 5 - при $T = 530\text{ }^{\circ}\text{C}$

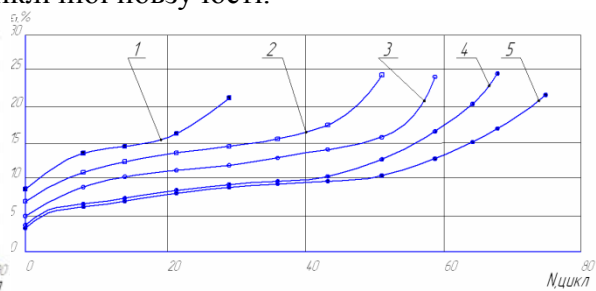
Рисунок 2 – Криві ізотермічної повзучості зміцненого алюмінієвого сплаву АЛ21

Джерело: розроблено автором

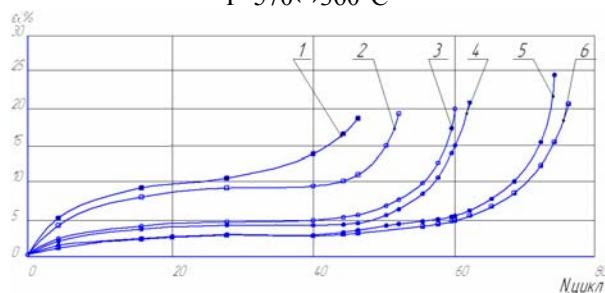
На рис. 3 представлено криві термоциклічної повзучості.



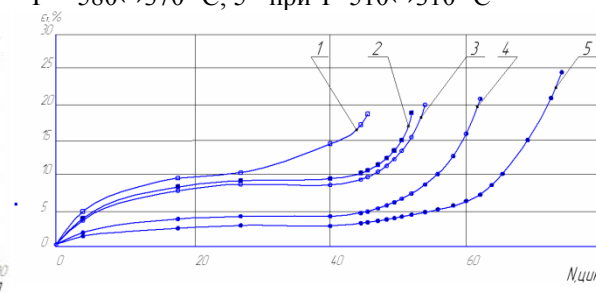
1 - (без обробки) при $T=710\leftrightarrow 500\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 - при $T=710\leftrightarrow 500\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 - при $T=620\leftrightarrow 400\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 - при $T=570\leftrightarrow 360\text{ }^{\circ}\text{C}$



1 - (без обробки) при $T=690\leftrightarrow 470\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 - при $T=670\leftrightarrow 470\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3, 4 - при $T=640\leftrightarrow 430\text{ }^{\circ}\text{C}$ та при $T=580\leftrightarrow 370\text{ }^{\circ}\text{C}$; 5 - при $T=510\leftrightarrow 310\text{ }^{\circ}\text{C}$



1 - (без обробки) при $T=680\leftrightarrow 470\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 - при $T=690\leftrightarrow 480\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3, 4 - при $T = 610\leftrightarrow 410\text{ }^{\circ}\text{C}$ та при $T = 600\leftrightarrow 390\text{ }^{\circ}\text{C}$; 5, 6 - при $T = 560\leftrightarrow 360\text{ }^{\circ}\text{C}$ та при $T = 530\leftrightarrow 330\text{ }^{\circ}\text{C}$



1 - (без обробки) при $T = 670\leftrightarrow 470\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 - при $T = 680\leftrightarrow 470\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3, 4 - при $T = 650\leftrightarrow 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ та при $T = 600\leftrightarrow 400\text{ }^{\circ}\text{C}$; 5 - при $T = 540\leftrightarrow 330\text{ }^{\circ}\text{C}$

Рисунок 3 – Криві термоциклічної повзучості зміцненого алюмінієвого сплаву АЛ21

Джерело: розроблено автором

В результаті експериментальних досліджень було встановлено, що величина деформації при руйнуванні не має яскраво вираженої зміни при температурі дослідження до $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Очевидно, цей факт можна пояснити тим, що ця температура, близька до температури формування зміцненого шару.

Також, відмінність термоциклічних випробувань від ізотермічних пов'язана з двома причинами:

- зміна в часі полів температур і напруг приводить до різкої інтенсифікації дифузійних процесів між окремими шарами покриттів і між покриттям і основою;
- зміна напруг у шарах покриття, за абсолютною величиною і за знаком є основною причиною виникнення тріщин.

При всіх режимах випробування криві ізотермічної повзучості зразків аналогічні кривим повзучості при термоциклічних умовах і мають три стадії. Зміна температури в циклі приводить до зміни кривих повзучості. Якщо при дослідженні зразків при більш

високих температурах криві повзучості мають тривалу за часом третю ділянку, то на кривих повзучості зразків, що випробувані при менших температурах, переважає ділянка сталої повзучості. Це можна пояснити тим, що цикли зміни деформацій протягом більшого часу дослідження носять, практично, стабільний характер. При цьому ділянка несталої повзучості з миттєвими швидкостями повторюється циклічно. Накопичена за цикл деформація повзучості має постійне для будь-якого циклу значення $\dot{\epsilon}_i$, отже, стає прямою лінією, тобто процес нестационарної повзучості стає сталим. Лише в декількох перших циклах і на заключному етапі випробувань перед руйнуванням такої стабільності не спостерігається. Це тому, що високі температури володіють більш негативним впливом на алюмінієвий сплав, то і пристосованість матеріалу до даних режимів дослідження здійснюється гірше і, отже, вичерпання пластичних властивостей матеріалу наступить раніше.

Встановлено, що величина швидкості повзучості має кореляційний зв'язок із твердістю теплозахисних дифузійних іонноазотованих шарів та залежить від їх товщини. В таблиці 1 представлено значення швидкості ізотермічної та термоциклічної повзучості зміцненого алюмінієвого сплаву АЛ21. Розрахунок значень швидкості ізотермічної та термоциклічної повзучості проводився за формулою 2;

Таблиця 1 – Швидкість ізотермічної та термоциклічної повзучості

№ п/п	Швидкість ізотермічної повзучості $\dot{\epsilon}_i, \text{c}^{-1}$	Швидкість термоциклічної повзучості $\dot{\epsilon}_i, \text{c}^{-1}$
1	10,278	7,619
2	1,135	0,658
3	17	32,635
4	1,882	1,481
5	0,808	0,235
6	57,333	37,866
7	5,814	5,025
8	0,721	0,398
9	10,095	1,562
10	1,923	0,33
11	84,26	62,33
12	7,956	5,694
13	4,177	2,85
14	43,225	10
15	0,702	2,41
16	1,675	1,531

Джерело: розроблено автором

Висновки. На основі отриманих кривих ізотермічної та термоциклічної повзучості встановлено, що:

- криві ізотермічної та термоциклічної повзучості алюмінієвого сплаву АЛ21 із теплозахисними дифузійними іонноазотованими шарами мають чітко виражені три ділянки повзучості, в залежності від температури тривалість їх різна. Це зумовлено наявністю в поверхневому шарі зміцнюючої фази AlNi; рівномірністю розподілу компонентів покриття по поверхні й ступінню їх тугоплавкості. З цим пов'язано ускладнення руху дислокацій, які на своєму шляху зіштовхуються з необхідністю

- долати при своєму русі великі перепони, що викликані наявністю зміцненого шару;
- вид кривих повзучості залежить від температури та умов її впливу на композицію “основа-покриття”;
 - час до руйнування при термоциклічному режимі випробувань менший, ніж при ізотермічному;
 - у процесі повзучості алюмінієвого сплаву АЛ21 із теплозахисними дифузійними іонноазотованими шарами спостерігається два конкуруючих процеси: зміцнення в наслідок пластичної деформації та зняття зміцнення під впливом підвищеної температури;
 - незважаючи на різний склад теплозахисних дифузійних іонноазотованих шарів, опір ізотермічній та термоциклічній повзучості зміцненого алюмінієвого сплаву АЛ21 підвищився в 1,8...2,2 рази.

Список літератури

1. Гречихин Л.И. Двигатели внутреннего сгорания: физические основы технической диагностики и оптимального управления. Минск : Наука і техніка, 1995. 270 с.
2. Шалай А.Н. Как повысить долговечность поршня? *Двигателестроение*. 1996. №2. С. 42-51.
3. Kouta F.H.H. Cyclic-temperature cyclic-stress torsion machine. *Modell. Simul. and Contr.* 1985. B2, № 4. P.11-21.
4. Woodford D.A. The effects of prior temperature cycling on rupture life of superalloys. *Adv. Res. Strength Fract : Mater.* 4th Int. Conf. Fract. Waterloo. New York e.a. 1977. P.803-812.
5. Клыпин Б.А. Установка для испытаний на растяжение и кратковременную длительную прочность при высоких температурах. *Вопросы высокотемпературной прочности в машиностроении*. Киев: АН УССР. 1963. С.95-105.
6. Конради Г.Г., Федотов М.А. Замечания к методу прямого нагрева образцов при исследовании механических свойств материалов. *Вопросы высокотемпературной прочности в машиностроении*. Киев: АН УССР. 1963. С.58-63.
7. Копанев А.А. К вопросу о природе электропластического зффекта в металлах. *Пробл. прочности*. 1991. № 1. С.47-51.
8. Гиндин И.А., Лавриненко И.С., Неклюдов И.М. Влияние магнитного поля на ползучесть никеля. *Физ. твердого тела*. 1976. 18, №4. С.1182-1185.
9. Каменецкая Д.С., Пилецкая И.Б., Ширяев В.И. Влияние магнитного поля на пластическую деформацию ферромагнитных материалов. *Пробл. металловед. и физ. мет.* Москва: Металлургия. 1973. №2. С. 119- 126
10. Мірненко В.І., Рутковський А.В., Зенкін М.А. Автоматизована система контролю та управління дослідженням ізотермічної та термоциклічної повзучості. *Технологические системы*. 2004. №3. С. 69-72.
11. А. с. 678384 СССР, МКИ С23С14/48. Устройство для нагрева образцов при механических испытаниях / Б.А. Ляшенко, З.С. Уманский, В.М. Товт, О.В. Цыгулев (СССР). № 2432985/22-02; Заяв. 10.05.77; Опубл. 04.03.79, Бюл № 29. 4 с.
12. Артюшин Л.М., Мірненко В.І., Громенко В.Ю. Технологічне забезпечення довговічності лопаток компресора авіаційних газотурбінних двигунів. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації*. Київ: 2009. Вип. №12. С. 43-48.
13. Товт В.М., Ліпатов С.Ю. Дослідження процесів складного теплообміну та визначення термомеханічних характеристик титанового сплаву ВТ5-1 з жаростійкими покриттями при ізотермічному та термоциклічному режимах. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. Київ: 2009. № 3. С. 64-67
14. 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.* 2017. Вип. 47, ч. 1. С. 158-166.

Referencis

1. Hrechykhyn, L.Y. (1995). *Dvyhately vnutrenneho shoranyia: fyzicheskye osnovy tekhnicheskoy dyagnostyky y optymal'noho upravleniya [Internal combustion engines: physical foundations of technical diagnostics and optimal control]*. Mynsk : Navuka i tekhnika [in Russian].

2. Shalaj, A.N. (1996). Kak povysyt' dolhovechnost' porshnia? [How to improve piston durability?]. *Dvyhatelestroenye – Engine building*, 2, 42-51. [in Russian].
3. Kouta, F.H.H. (1985). Cyclic-temperature cyclic-stress torsion machine. *Modell. Simul. and Contr.*, B2, № 4, 11-21 [in English].
4. Woodford D.A. The effects of prior temperature cycling on rupture life of superalloys // Mater. 4th Int. Conf. Fract. Waterloo. "Adv. Res. Strength Fract." - New York e.a. - 1977 - P.803-812.
5. Klypyn B.A. Ustanovka dlia yspytanyj na rastiashenye y kratkovremennuiu dlytel'niu prochnost' pry vysokikh temperaturakh // Voprosy vysokotemperaturnoj prochnosti v mashynostroenyy. - Kyev: AN USSR. - 1963.-S.95-105. [in Russian].
6. Konrady H.H., Fedotov M.A. Zamechaniya k metodu priamoho nahreva obraztsov pry yssledovanny mekhanicheskikh svoystv materyalov // Voprosy vysokotemperaturnoj prochnosti v mashynostroenyy. - Kyev: AN USSR. - 1963. - S.58-63.
7. Kopanev A.A. K voprosu o pryrode elektroplasticheskogo zffekta v metallakh // Probl. prochnosti. - 1991. - № 1. - S.47-51. [in Russian].
8. Hyndyn Y.A., Lavrynenko Y.S., Nekliudov Y.M. Vlyaniye mahnytnoho polia na polzuchest' nykelia // Fyz. tverdogo tela. - 1976. - №4, 1182-1185. [in Russian].
9. Kamenetskaia D.S., Pyletskaia Y.B., Shyriaev V.Y. Vlyaniye mahnytnoho polia na plasticheskiyu deformatsiyu ferromahnytnykh materyalov // Probl. metalloved. y fiz. met. - Moskva: Metallurhiya. - 1973. - №2. S. 119— 126. [in Russian].
10. Mirnenko V.I., Rutkovsk'iy A.V., Zenkin M.A. Avtomatyzovana systema kontroliu ta upravlinnia doslidzhenniam izotermichnoi ta termotsyklichnoi povzuchosti // Tekhnolohicheskyye systemy. - 2004. - №3. - S. 69-72. [in Ukrainian].
11. Ustrojstvo dlia nahreva obraztsov pry mekhanicheskikh yspytaniyakh: A. s. 678384 SSSR, MKY S23S14/48 / B.A. Liashenko, Z.S. Umanskyj, V.M. Tovt, O.V. Tsyhulev (SSSR). - № 2432985/22-02; Zaiav. 10.05.77; Opubl. 04.03.79, Biul № 29. -4 s. [in Russian].
12. Artiushyn L.M., Mirnenko V.I., Hromenko V.Yu. Tekhnolohichne zabezpechennia dovhovichnosti lopatok kompresora aviatsijnykh hazoturbinnykh dvyhuniv.// Zbirnyk naukovykh prats' Derzhavnogo naukovogo-doslidnogo instytutu aviatsii. - Kyiv: 2009. Vyp. №12. S. 43-48. [in Ukrainian].
13. Tovt V.M., Lipatov S.Yu. Doslidzhennia protsesiv skladnogo teploobminu ta vyznachennia termomekhanichnykh kharakterystyk tytanovoho splavu VT5-1 z zharostijkymy pokryttiamy pry izotermichnomu ta termotsyklichnomu rezhymakh.// Visnyk Kyivs'koho natsional'nogo universytetu tekhnolohij ta dyzajnu.-Kyiv: 2009. № 3. S. 64-67 [in Ukrainian].
14. Liashenko B.A., Markovykh S.I., Mykhajliuta S.S. Rozrobka tekhnolohichnogo protsesu vakuumnogo azotuvannia porshniv dvyhuniv v pul'suiuchomu puchku plazmy. Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil'skohospodars'kykh mashyn: zahal'noderzh. mizhvid. nauk.-tekhn. zb. 2017. Vyp. 47, ch. 1. S. 158-166. [in Ukrainian].

Anatoly Rutkovskiy, PhD tech. sci, Senior Researcher

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

Sergiy Markovykh, Assos. Prof., PhD tech. sci., **Sergiy Myhajlyta**, post-graduate

Central Ukrainian National Technical University, Kropivniiskiy, Ukraine

Thermostability of Ionic Nitriding of Aluminium Alloys at Isothermal and Thermal-cycle Influence

The study of the main parameter that limits the use of pistons made of aluminum alloys in boosting engines - heat resistance and its dependence on diffusion ion-nitrided layers. In the analysis of recent studies and publications, the most common methods of heating samples during tests, their advantages and disadvantages are identified. The task of the study is to identify the relationship of factors that determine the heat resistance of ion-nitrided aluminum alloys under isothermal and thermocyclic effects for effective analysis of the mechanism of phenomena and control of the technological process of strengthening the pistons. The availability of this information will increase the strength and reliability of both the coatings themselves and the parts with coatings at the stage of their design.

A set of laboratory equipment based on the Nutcracker installation was used for the study, which provides cyclic change of temperature and load of the sample, control and recording of temperature values, loading and deformation and operation in automatic mode. Flat samples of aluminum alloy AL2I with heat-protective diffusion ion-nitrided layers applied in the VIPA-1 installation and samples without treatment were used. Characteristics of the thermal cycle: 500 ° C ↔ 720 °C. heating time - 10 sec., cooling 15 sec., which corresponds to the real operating conditions of the pistons. The fixed value of the load was $0.8\sigma_B$ according to DSTU 2637-94 and the criteria for determining the allowable stress in the Standards of ASME (80% of the average value of stresses that lead to a total deformation of 1%). The curves of isothermal and thermocyclic creep having three clearly expressed sites of creep are defined, depending on temperature their duration is different. Isothermal and thermocyclic creep curves of aluminum alloy AL2I with heat-protective diffusion ion-

nitrided layers have three distinct creep areas, depending on the temperature their duration is different. This is due to the presence in the surface layer of the reinforcing phase AlNi; uniformity of distribution of components of a covering on a surface and degree of their refractoryness. This is due to the complexity of the movement of dislocations, which on their way face the need to overcome large obstacles in their movement, caused by the presence of a reinforced layer.

Conclusions. Based on the obtained curves of isothermal and thermo cyclic creep, it is established that the type of creep curves depends on the temperature and conditions of its influence on the composition "base-coating"; the time to failure in the thermo cyclic test mode is less than in the isothermal; in the process of creep of aluminum alloy AL21 with heat-protective diffusion ion-nitrided layers, two competing processes are observed: hardening due to plastic deformation and removal of hardening under the influence of elevated temperature; despite the different composition of heat-protective diffusion ion-nitrided layers, the resistance to isothermal and thermo cyclic creep of the reinforced aluminum alloy AL21 increased by 1.8 ... 2.2 times.

vacuum nitriding, aluminum alloys, heat resistance, isothermal and thermo cyclic tests, creep curves

Одержано (Received) 11.09.2020

Прорецензовано (Reviewed) 30.09.2020

Прийнято до друку (Approved) 19.10.2020

УДК 621.791.927.5

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3\(34\).81-87](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2020.3(34).81-87)

О.О. Іванов, асп.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна

e-mail: o.ivanov@nung.edu.ua

Дослідження структури та властивостей зносостійких покриттів отриманих методом наплавлення порошковими електродами на основі системи Fe-Ti-B-C

Проаналізовані сучасні та класичні публікації щодо зносостійких покриттів на основі карбідо- та боридоутворюючих перехідних металів IV-VI груп періодичної системи хімічних елементів. Розглянуто та проаналізовано передумови формування фаз дослідженої системи та мікроструктуру зносостійких покриттів. Запропонована система забезпечує дрібнозернисту структуру з рівномірно розподіленими карбідами та боридами разом з високою твердістю 67-69 HRC.

наплавлення порошковими електродами, зносостійкі покриття, карбід титану, борид титану

А.А. Іванов, асп.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна

Исследование структуры и свойств износостойких покрытий, полученных методом наплавки порошковыми электродами на основе системы Fe-Ti-B-C

Проанализированы современные и классические публикации о износостойких покрытиях на основе карбидо- и боридоформирующих переходных металлов IV-VI групп периодической системы химических элементов. Рассмотрены и проанализированы предпосылки формирования фаз рассматриваемой системы и микроструктуру износостойких покрытий. Предложенная система обеспечивает мелкозернистую структуру с равномерно распределенными карбидами и боридами вместе с высокой твердостью.

наплавка порошковыми электродами, износостойкие покрытия, карбид титана, бориды титана