

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ІОННОАЗОТОВАНИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ НА ІЗОТЕРМІЧНУ ТА ТЕРМОЦИКЛІЧНУ ПОВЗУЧІСТЬ**

**А. В. Рутковский**, канд. техн. наук, ст.н.с.,

*Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренко НАН України, м. Київ, Україна*

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

**С.С. Михайлюта**, асп.,

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна*

Зростання експлуатаційних параметрів двигунів внутрішнього згорання викликає неухильне підвищення робочої температури конструктивних елементів двигуна, особливо деталей циліндро-поршнєвої 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°C, 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 іонноазотованих 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 теплозмінах. 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 фокусуючу 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 фокусуючої дії дозволяють досягти необхідний рівномірний розподіл температур по зразку і можуть бути убудовані в стандартну розривну машину. В якості джерел промєневої енергії застосовують графітові нагрівання, 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 ВТ5-1 з жаростійкими емалєвими покриттями [13] та ін.

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

**Виклад основного матеріалу.** Для дослідження використовується 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 0.8а, згідно ДСТУ 2637-94, в умовах осьового розтягу при нагріванні робочої ділянки зразка шляхом фокусування промєневої 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. Це дозволяє нагрівати зразок до 1000 °С, без впливу електромагнітопластичного ефекту та здійснювати охолодження зразка зі швидкістю до 100 град/с. Характеристики термічного циклу: 500 °С ↔ 720 °С. 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 та зразки без обробки.

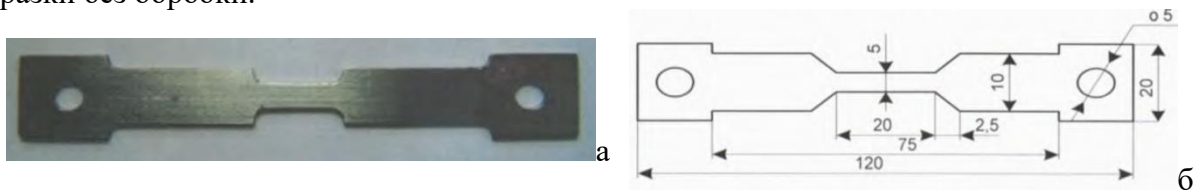


Рисунок 1. Загальний вигляд та креслення зразка для випробування на ізотермічну та термоциклічну повзучість згідно ДСТУ 2637-94 [5].

Навантаження  $P$  визначали за формулою:

$$P = \sigma \cdot F$$

де:  $\sigma$  - 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 Нормах 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  $\varepsilon$  у відсотках визначали вимірюванням переміщення рухомого захвату зразка (видовження зразка)  $\Delta l$  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  $293 \pm 5$  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  $\varepsilon_p$  зразка (покриття) визначали у відсотках за формулою

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

де:  $\Delta l_p$  - 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  $293 \pm 5$  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  $\varepsilon$  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:  $\varepsilon_2$  - визначається за формулою 1.

Таким чином, крива повзучості є чуттєвим інструментом, що характеризує стан покриття й поверхні адгезійного контакту. Крім того, побудова залежності комплексу термомеханічних характеристик покриття від часу та числа теплосмін 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.

В результаті експериментальних досліджень було встановлено, що величина деформації при руйнуванні не має яскраво вираженої зміни при температурі дослідження до 500 °С. 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 і, 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 $\epsilon_i, c^{-1}$	Швидкість термоциклічної повзучості $\epsilon_i, c^{-1}$
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

**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 [Текст] / Л. И. Гречихин. – Минск : Наука і техника, 1995. – 270 с.
2. Шалай А.Н. Как повысить долговечность поршня? [Текст] / А.Н. Шалай // Двигателестроение. – 1996. – №2. – С. 42-51.
3. Kouta F.H.H. Cyclic-temperature cyclic-stress torsion machine // Modell. Simul. and Contr. - 1985. - В2, № 4. - P.11-21.
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. 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 эффекта 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—
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. Устройство для нагрева образцов при механических испытаниях: А. с. 678384 СССР, МКИ С23С14/48 / Б.А. Ляшенко, З.С. Уманский, В.М. Товт, О.В. Цыгулев (СССР). - № 2432985/22-02; Заяв. 10.05.77; Оpubл. 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