

В. О. Пильов, О. Ю. Лінков, С. В. Ликов

## ПОРІВНЯННЯ ПОРОГУ ПОВЗУЧОСТІ ПОРШНЕВИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ З УРАХУВАННЯМ ЇХ ЗМІЦНЕННЯ В ЧАСІ

Напрями робіт, що пов'язані з покращенням показників економічності та екологічності при збереженні тенденції збільшення питомої потужності двигунів внутрішнього згоряння, призводять до зростання теплової напруженості деталей камери згоряння і, зокрема, поршня. Це зумовлює випадки втрати параметричної надійності бічної поверхні поршнів як під час експериментальних досліджень, так і під час початкової експлуатації. Такі випадки характеризуються появою натирів в зоні бобишки пальцевого отвору. Вказані факти свідчать за високу актуальність додаткових досліджень властивостей алюмінієвих поршневих сплавів, особливо на початковому етапі термічних навантажень конструкції. Метою роботи є отримання порівняльних відомостей щодо порогу повзучості матеріалів, перевищення якого викликає деформування бічної поверхні поршня в часі та, відповідно, виникнення непрогнозованого зменшення зазору в парі тертя поршень – дзеркало циліндру. В роботі представлено принциповий підхід, за яким визначено поріг повзучості матеріалів в процесі їх зміцнення. Враховано процес повзучості матеріалу на перших двох її стадіях. Досліджено поріг повзучості сплавів АЛ25 та АК4 у їх початково незміцненому та зміцненому з часом стані. Встановлено залежності між рівнем температур і термічних напружень, що визначають пороги повзучості досліджуваних поршневих алюмінієвих сплавів. Показано, що зміцнення досліджуваних сплавів відбувається протягом перших 10 годин термонапруженого навантаження. Встановлено, що межа повзучості незміцнених сплавів АЛ25 та АК4 є меншою у 1,5–2 рази у порівнянні зі межею повзучості зміцнених матеріалів. Запропоновано підхід до забезпечення параметричної надійності бічної поверхні поршня, який полягає в унеможливленні термонавантаження матеріалу рівнем, що перевищує поріг повзучості незміцнених матеріалів. Представлений підхід рекомендується до використання з урахуванням концепції гарантованого забезпечення надійності конструкцій на початкових етапах їх проектування. Детальне викладення основного матеріалу дослідження подано на прикладі сплаву АК4. Наведений підхід щодо визначення змінного в часі порогу повзучості може бути використаний для довірливих матеріалів.

**Ключові слова:** поршень; бічна поверхня поршня; термічна навантаженість; поршневі алюмінієві сплави; повзучість матеріалів; межа повзучості

### Вступ

Вимоги постійного форсування дизелів, у тому ряду і вітчизняних двигунів спеціального призначення, привели до такого рівня теплонапруженості деталей камери згоряння, зокрема, і поршня, коли конструкційні матеріали вже працюють на межі міцності. Це призводить до зменшення, а інколи і до втрати як параметричної, так і фізичної надійності цих деталей [1-3]. Одна із критичних зон поршня, що сприймає термомеханічні навантаження, є бічна поверхня. При цьому для складених конструкцій поршнів його корпус, який виготовлено з алюмінієвого сплаву, може втрачати надійність навіть під жароміцною сталеву накладку [4]. Означені проблеми спостерігались навіть під час обкатувальних випробувань для корпусів поршнів, виготовлених з алюмінієвого поршневого сплаву сімейства АК4 [5]. Спроби перейти на більш досліджений сплав АЛ25 не мали успіху.

Практикою доведено, що коли під час обкатувально-здавальних випробувань корпус поршня не втрачає параметричної надійності, то під час подальшої експлуатації виходи з ладу трапляються дуже рідко і здебільшого з вини експлуатації. Таким чином актуальним є дослідження властивостей поршневих алюмінієвих сплавів в початковий період їх термічних навантажень.

Відомо, що вагомими чинниками, які визна-

чають надійність конструкції в процесі її тривалої експлуатації, є процеси утоми та повзучості матеріалу. Водночас швидкість деформації повзучості є змінною в часі та в початковий період термомеханічних навантажень може бути в рази більшою, ніж в подальшому. Це пов'язано з процесами зміцнення матеріалу, і для різних матеріалів проявляється в різному ступені [6-9].

Для форсованих двигунів процес повзучості матеріалу в зоні поверхні камери згоряння поршня практично завжди є присутнім. Це явище разом з іншими чинниками враховують в розрахунках часу експлуатації двигуна до розтріскування кромки камери згоряння поршня [6]. Але забезпечення потрібного рівня параметричної та фізичної надійності бічної поверхні поршнів потребує формулювання вимог неприпустимості прояву повзучості матеріалу, починаючи з перших годин навантаження двигуна.

Критерієм неприпустимості процесу повзучості є, так званий, її поріг, що визначається припустимими збігами температур і напружень. В [10] показана реальна можливість перевищення порогу повзучості матеріалу в зоні бічної поверхні поршня. Методику визначення порогу повзучості незміцненого та зміцненого в часі матеріалу нами наведено в [11].

**Метою даної роботи** є отримання порівняльних відомостей щодо порогу повзучості сплавів

АК4 та АЛ25, пов'язаного з процесами зміцнення матеріалу в часі. Це дозволить розширити сукупність методик та відповідних критеріїв оцінки параметричної і фізичної надійності поршнів від впливу надвисоких термонавантажень, практично застосовувати ці критерії при проектуванні поршнів нових форсованих двигунів.

#### Аналіз публікацій та постановка задачі

Проблеми працездатності бічної поверхні поршнів існують з моменту створення ДВЗ. На сьогодні існує значна кількість методик, які дозволяють з різною ефективністю та затратами вирішувати цю проблему, наприклад [12-14].

Під час створення нового двигуна проектування бічної поверхні поршня спирається на забезпечення гарантованого установчого зазору між поршнем і дзеркалом циліндру  $\Delta R_{уст}(h_i, \theta_i, \tau)$ . Цей зазор визначається фактичним початковим профілем бічної поверхні корпусу поршня (юбки)  $R_{ю}(h_i, \theta_i, \tau)$  та розміром дзеркала циліндру  $R_r(h_i, \theta_i, \tau)$  як по висоті  $h_i$ , так і по кутовій координаті  $\theta_i$  для кожної точки  $i$  зовнішньої поверхні поршня в початковий момент часу  $\tau$ :

$$\Delta R_{уст}(h_i, \theta_i, \tau) = R_r(h_i, \theta_i, \tau) - R_{ю}(h_i, \theta_i, \tau), \tau = 0. \quad (1)$$

За час роботи  $\tau$  процес збільшення зазору  $\Delta R_{уст}(h_i, \theta_i, \tau)$  протікає під впливом зношення пари тертя поршень – дзеркало циліндру. Величина  $R_r(h_i, \theta_i, \tau)$  зростає, величина  $R_{ю}(h_i, \theta_i, \tau)$  зменшується. Це призводить до збільшення реального зазору  $\Delta R_{уст}(h_i, \theta_i, \tau)$  до допустимого значення  $[R_{уст}]$ . Таким чином параметричну надійність від зношування пари тертя за час роботи двигуна  $\tau$  з призначеним ресурсом  $P$  можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} [\Delta R_{уст}] - \Delta R_{уст}(h_i, \theta_i, \tau) &\geq 0, \\ \Delta R_{уст}(h_i, \theta_i, \tau) &> 0, 0 \leq \tau \leq P. \end{aligned} \quad (2)$$

Критерій параметричної надійності вигляду (2) використовують, наприклад, у методиках [15-17].

Але трапляються випадки, коли при зростанні теплової напруженості поршня навіть на початку експлуатації (або під час обкатувальних випробувань нового дизеля) зазор  $\Delta R_{уст}(h_i, \theta_i, \tau)$  для певного масиву точок  $i$  починає зменшуватися, що приводить спочатку до натиру, а далі й до задиру. Тобто з'являється випадок, коли

$$\Delta R_{уст}(h_i, \theta_i, \tau) \leq 0, \tau \ll P. \quad (3)$$

В результаті має місце втрата параметричної, а з часом і фізичної надійності конструкції. Це можливо пояснити збільшенням радіального розміру бічної поверхні поршня внаслідок виникнення процесу повзучості в умовах роботи матеріалу на межі міцності,

$$\begin{aligned} R_{ю}(h_i, \theta_i, 0) &< R_{ю}(h_i, \theta_i, \tau), \\ R_r(h_i, \theta_i, 0) &\approx R_r(h_i, \theta_i, \tau), \tau \ll P. \end{aligned} \quad (4)$$

Критерій втрати параметричної та фізичної

надійності вигляду (3,4) запропоновано в [18].

Явище повзучості виникає під дією високих рівнів температур  $t$  і напружень  $\sigma$ . У загальному випадку розглядають 3 стадії деформування певного матеріалу в часі [6,7,19]. Стадія 1 характеризується зміцненням матеріалу в залежності від величини досягнутої на момент часу  $\tau$  деформації повзучості  $\varepsilon_s(\tau)$ . На цій стадії спостерігається зменшення швидкості повзучості. Стадія 2 відповідає ділянці сталої швидкості деформації повзучості. Стадія 3 визначає прискорення швидкості повзучості, що завершується руйнуванням матеріалу. В момент руйнування матеріалу на стадії 3 деформація повзучості  $\varepsilon$  на 1-2 порядки більшою, ніж на стадії 1 [6-8]. Тому при розгляді втрати надійності бічної поверхні поршня достатньо скористатись моделюванням швидкості повзучості для стадій 1 і 2 у вигляді [19]:

$$\varepsilon_s = A \cdot [1 + D \cdot \varepsilon_s(\tau)^{-\alpha}] \cdot [\sigma(\tau)]^n, \varepsilon_s(0) = 0, \quad (5)$$

де  $D, \alpha$  – константи матеріалу, що характеризують стадію 1;  $A, n$  – константи матеріалу, що характеризують стадію 2.

В загальному випадку означені коефіцієнти є залежними від матеріалу та температури. Коефіцієнти кривих повзучості для сплавів АЛ25 та АК4 нами визначено в [6,19]. Це дозволяє встановити і порівняти пороги повзучості  $\sigma_n \leq f(t, \tau)$  досліджуваних поршневих сплавів шляхом забезпечення умови:

$$\varepsilon_s(t, \sigma_n, \tau) = 0, \quad (6)$$

На даному етапі наукових досліджень пропонується унеможливлення ситуації (3,4) здійснювати з використанням умови

$$\varepsilon_s(t, \sigma_n, \tau) = 0. \quad (7)$$

У цьому випадку рівняння (7) відповідає гарантованому забезпеченню параметричної надійності конструкції в процесі її створення чи модернізації.

Практичне вирішення задачі, сформульованої у вигляді виразу (7), дозволяє визначити по-перше чисельні відмінності порогу повзучості (6) як на початку експлуатаційного навантаження поршня (при  $\tau \approx 0$ ), так і зі зміною часу навантаження. По-друге на наступному етапі досліджень це дозволить визначити можливі зони втрати параметричної та фізичної надійності бічної поверхні поршня через перевищення порогу повзучості.

Означені дослідження нами були розпочаті в [11] щодо поршневого сплаву АЛ25. На цій основі нами поставлені наступні задачі:

- дослідження змінного в часі порогу повзучості поршневого сплаву АК4 як наслідок термічного навантаження поршня в процесі експлуатації двигуна;

- здійснення порівняння порогу повзучості сплавів АК4 та АЛ25 в часі при різних рівнях тер-

монапруженості матеріалів;

- сформулювати загальні рекомендації щодо унеможливлення натирів і задирів на бічній поверхні поршнів форсованих двигунів.

**Теоретичні підходи до визначення змінного в часі порогу повзучості як властивості поршне-вих алюмінієвих сплавів**

В умовах обмежених деформацій повзучості, що є характерним явищем для деталей складної конфігурації та (або) при складному просторовому розподілі температур та термічних напружень, має місце релаксація напружень, процес якої можна представити виразом

$$\dot{\epsilon}_s = - (1/E) (d\sigma/dt), \quad (8)$$

де  $E$  – модуль пружності матеріалу при температурі дослідження  $t$ .

Для можливості встановлення порогу повзучості  $\sigma_n$  розрахунковим методом необхідно взяти до уваги величину релаксації напружень матеріалу  $\Delta\sigma$  під впливом температури  $t$  впродовж дискретних проміжків часу  $\tau$  для кількох початкових напружень  $\sigma_0$  [11]:

$$\Delta\sigma = \sigma_0 - \sigma(\tau) = f(t, \sigma_0, \tau), \quad t = \text{const}, \tau = \text{const}. \quad (9)$$

Отримані залежності у точках, де  $\Delta\sigma = 0$  дають шукане рішення згідно рівняння (6) як  $\sigma_n = \sigma_0$ .

Виходячи з (5), до певної величини деформації повзучості, що визначається множителем  $[1 + D \cdot \epsilon_s(\tau)^{-\alpha}]$ , поріг повзучості буде зростати факти-

чно до моменту  $D \cdot \epsilon_s(\tau)^{-\alpha} \approx 0$ . Тоді можна встановити змінний в часі поріг повзучості  $\sigma_n(\tau)$  для стадії 1. Очевидно, що на стадії 2 поріг повзучості буде незмінним. Також слід зауважити, що при фізичній появі стадії 3 поріг повзучості знову буде зменшуватись. Тоді для моменту часу, близького до 0, будемо мати початкову межу повзучості (незміщеного матеріалу). Відповідно, найбільший поріг повзучості назвемо межею повзучості зміщеного матеріалу.

**Викладення основного матеріалу дослідження**

Дослідження змінного в часі порогу повзучості  $\sigma_n(\tau)$  поршневих алюмінієвих сплавів АЛ25 та АК4 здійснено в діапазоні температур 250°C...350°C. Це дозволяє оцінити і порівняти пороги повзучості матеріалів в області високих температурних станів поршнів. Дані щодо фізичних властивостей матеріалів узято з [6,8,19,20].

Розглянемо за приклад отримання результатів для сплаву АК4 при температурі 250°C. Фізичні властивості сплаву, а також найближчі закордонні аналоги наведені в [20]. Коефіцієнти кривих повзучості використано з [16]. Отримані величини релаксації напружень  $\Delta\sigma$  в залежності від початкового рівня напруження  $\sigma_0$  та часу термонапруженого навантаження  $\tau$  наведені у табл. 1. Ці відомості утворюють масив даних, що відповідає залежності (9).

Таблиця 1. Величина релаксації напружень  $\Delta\sigma$  поршневого сплаву АК4 при температурі 250°C, МПа

Початкове напруження $\sigma_0$ , МПа	Час термонапруженого навантаження $\tau$							
	5 хв	10 хв	30 хв	40 хв	60 хв	10 год	50 год	100 год
50	0,68	0,97	1,74	2,03	2,53	8,7	19,1	24,8
60	0,89	1,28	2,31	2,71	3,38	11,9	25,5	32,6
70	1,12	1,62	2,95	3,46	4,33	15,6	32,6	40,9
80	1,37	1,99						
90	1,64	2,39						

Графічне відтворення даних, представлених в табл. 1, подано на рис. 1. Тут перетин кожної з залежностей (9) з віссю  $\Delta\sigma$  у точці 0 відповідає порогу повзучості відповідно до (6). Видно, що в результаті зміни властивостей матеріалу в часі під дією сукупності факторів (5), (8) поріг повзучості сплаву є змінною величиною. Так, наприклад, для моменту часу  $\tau = 5...10$  хв, поріг повзучості дорівнює  $\sigma_n = 7-8$  МПа, а для періоду часу  $\tau = 30...60$  хв, поріг повзучості зростає до  $\sigma_n = 19 - 22$  МПа, для моменту часу 10 годин поріг повзучості досягає величини  $\sigma_n = 24$  МПа, тобто відповідно до (6)  $\epsilon_s(t, \sigma_n, \tau) = \epsilon_s(250, 24, 10) = 0$ .

Характер зміни порогу повзучості сплаву АК4 в часі для температур 250°C та 350°C подано на

рис. 2. Видно, що зміцнення матеріалу АК4 відбувається протягом перших 10 годин термонапруженого навантаження.

Виходячи з отриманих результатів за початкову межу повзучості нами було обрано значення порогу повзучості для моменту часу 5 хвилин. Іншими словами це значення порогу незміщеного матеріалу. Дані порогу повзучості через 10 годин термонапруженого навантаження нами прийняті за межу повзучості зміщеного матеріалу.

При цьому повинно бути ясно, що нижче від кривих за рис. 2 повзучість матеріалу не відбувається, а вище – має місце. Наведений підхід щодо визначення змінного в часі порогу повзучості може бути використаний для довільних матеріалів.

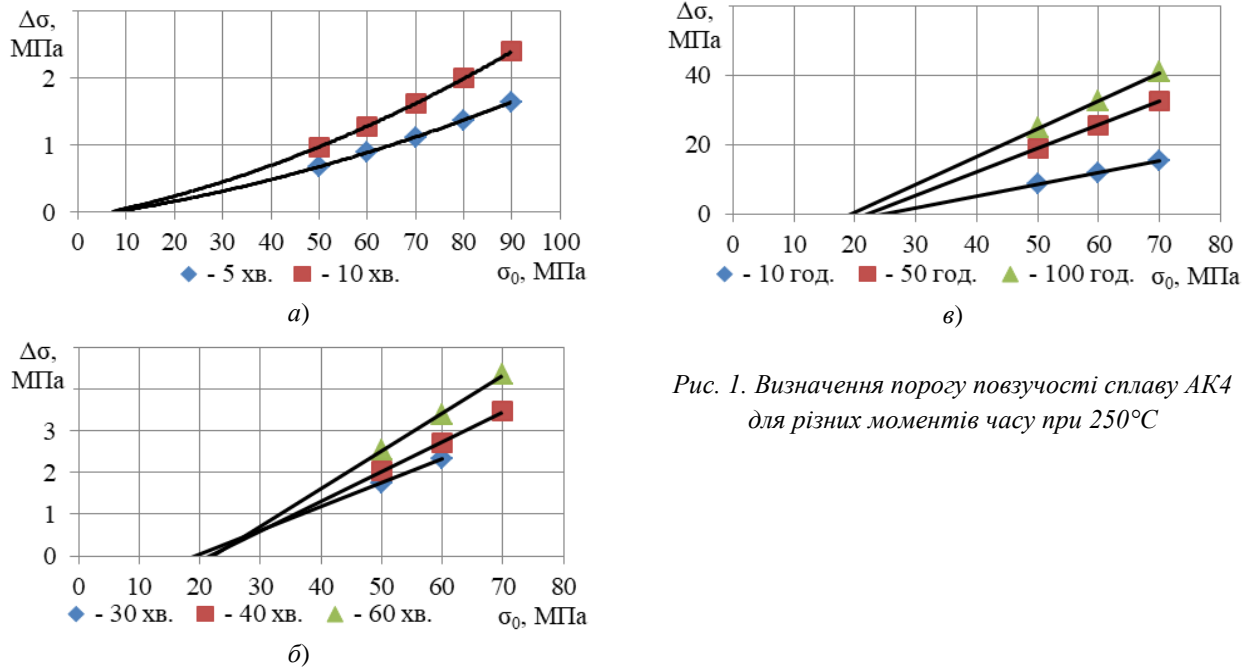


Рис. 1. Визначення порогу повзучості сплаву АК4 для різних моментів часу при 250°C

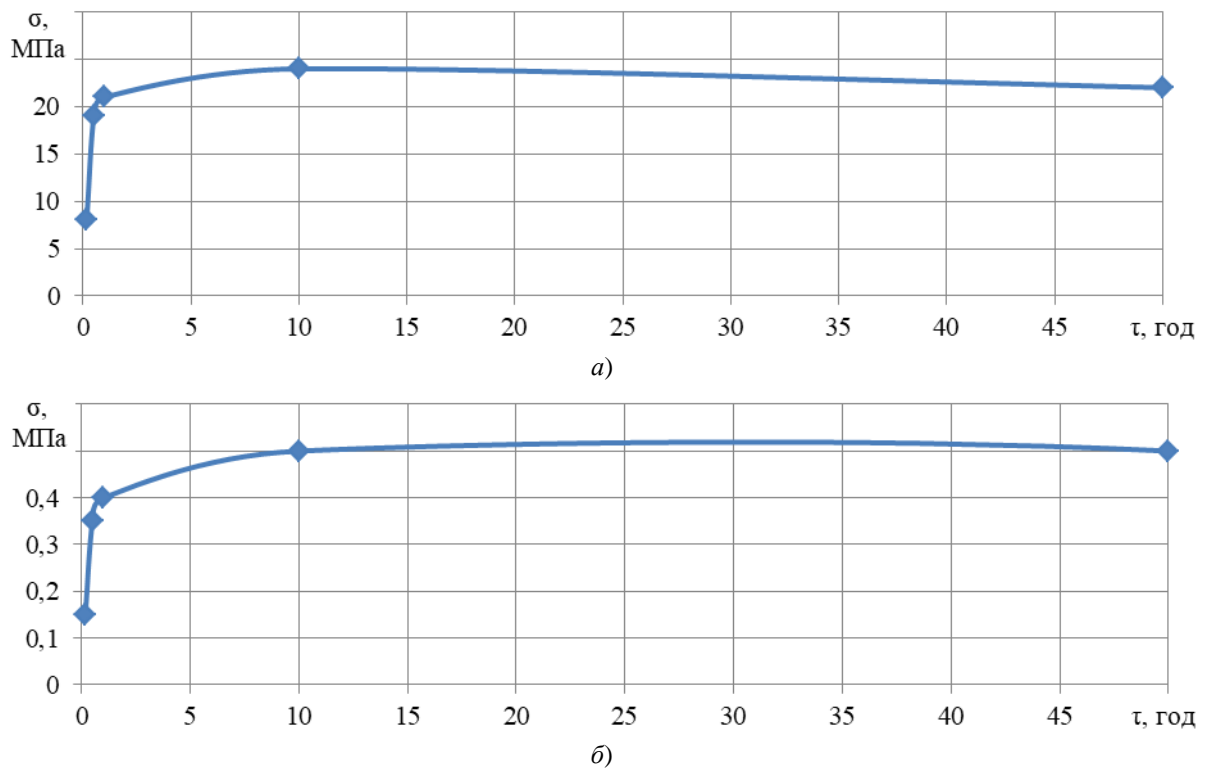


Рис. 2. Зміна порогу повзучості сплаву АК4 з часом термомеханічного навантаження: а – при  $t = 250^\circ\text{C}$ ; б – при  $t = 350^\circ\text{C}$

Встановлені дані щодо порогу повзучості незміцненого та зміцненого сплавів АЛ25 та АК4 подані рис. 3. Видно, що при гранично високих температурах, що дорівнюють 330–350°C, досліджувані матеріали практично не мають властивості зміцнення та мають суттєво малий поріг повзучості, значення якого наближається до 0. При віднос-

но менших температурах матеріалів, що є властивим для бічної поверхні поршня, початкова межа повзучості для розглянутих сплавів відрізняється несуттєво, але вона є меншою у 1,5–2 рази у порівнянні зі межею повзучості зміцнених матеріалів.

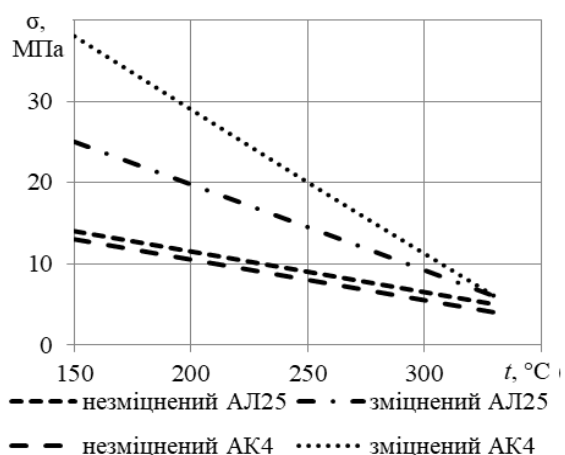


Рис. 3. Пороги повзучості незміцнених та зміцнених поршневих сплавів АЛ25 та АК4

Таким чином показана можлива суттєва зміна властивостей повзучості поршневих алюмінієвих сплавів в часі під дією температури і напруження, що необхідно враховувати при форсуванні двигунів.

На підставі отриманих даних відповідно до (6) нами встановлені залежності порогів повзучості від температури.

Вони мають вигляд:

– для незміцненого у часі матеріалу АЛ25  

$$\sigma_n = 21,5 - 0,05 \cdot t; \quad (10)$$

– для зміцненого у часі матеріалу АЛ25  

$$\sigma_n = 40,846 - 0,1055 \cdot t; \quad (11)$$

– для незміцненого у часі матеріалу АК4  

$$\sigma_n = 20,5 - 0,05 \cdot t; \quad (12)$$

– для зміцненого у часі матеріалу АК4  

$$\sigma_n = 64,615 - 0,1779 \cdot t. \quad (13)$$

Таким чином, на підставі поданих відмінностей порогу повзучості незміцненого та зміцненого матеріалів слід констатувати наступне. Для запобігання втрати надійності бічної поверхні поршня необхідно забезпечити в процесі проектування та форсування двигунів такий рівень температур і термічних напружень в означеній зоні, який не перевищує поріг повзучості незміцнених матеріалів (10), (12) в початковий період їх експлуатації.

В процесі подальшої експлуатації двигунів рівень температур і термічних напружень бічної поверхні поршня не повинен перевищувати поріг повзучості зміцненого матеріалу.

Таким чином, поставлені в роботі задачі вирішено. Подальший напрям робіт пов'язаний з визначенням рівнів навантаження бічної поверхні поршнів у порівнянні з даними щодо порогу повзучості їх матеріалів.

### Висновки

Під час розробки нових конструкцій або при модернізаціях, пов'язаних з форсуванням за потужністю існуючих конструкцій двигунів, можуть виникати випадки непрогнозованої втрати надійності бічної поверхні поршня. Це негативне явище характеризується зникненням зазору в частині парі тертя поршень – дзеркало циліндру. Важливо, що вказана критична ситуація може виникати за короткий термін навантаження двигуна і може мати місце навіть на перших годинах експериментальних випробувань перспективної конструкції.

Для поршневих алюмінієвих сплавів АК4 та АЛ25 встановлені відмінності порогу повзучості незміцненого та зміцненого в часі матеріалу, представлені відповідні залежності для розрахунку.

На прикладі аналізу зміни порогу повзучості в часі для поршневих алюмінієвих сплавів АК4 та АЛ25 запропоновано підхід до забезпечення надійності бічної поверхні поршня. Він полягає в обмеженні співвідношення рівнів температур і термічних напружень в означеній зоні, яке не перевищує поріг повзучості незміцнених матеріалів.

Запропонований підхід рекомендується до використання з урахуванням концепції гарантованого забезпечення надійності конструкцій.

Подальший напрям робіт пов'язаний з визначенням рівнів термічного навантаження бічної поверхні поршнів у порівнянні з даними щодо порогу повзучості їх матеріалів.

### Список літератури:

1. (2023) *Damage analysis of details of ICE, DFCDIESEL*. Available at: <http://www.dfcdiesel.com/warranty-info/failure-analysis>
2. *Piston damage – recognizing and rectifying*. MS Motorservice International GmbH –50 003 973-02 – EN –07/15 (012020), 92р.
3. Влияние химической неоднородности отливки поршня из сплава АК12М2МГН (АЛ25) на задиорообразование в цилиндропоршневой группе / Булгаков В. П., Чеботарев Ю. В., Рубан И. Н. // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. – 2016. – Вып. 5 (39). – с. 151-158 DOI:10.21821/2309-5180-2016-8-5-151-158.
4. Шатунно-поршневая группа двигателей для бронетанковой техники / С.В. Лыков // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2006. – №1. – С. 17-23.
5. Алехин С.А. Анализ температурного состояния корпусов составных поршней двухтактных дизелей специального назначения / С.А. Алехин, С.В. Лыков, В.А. Пылёв // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2013. – №1. – С. 33-36.
6. Пильов В.О. Автоматизоване проектування поршнів швидкохідних дизелів із заданим рівнем тривалості міцності: монографія / В.О.Пильов. – Харків: Видавничий центр НТУ «ХПІ». – 2001. – 332 с.
7. *Современные дизели: повышение топливной экономичности и длительной прочности*. Под ред. А. Ф. Шеховцова / Ф. И. Абрамчук, А. П. Марченко, Н. Ф. Разлейцев, Е. И. Третьяк, А. Ф. Шеховцов, Н. К. Шокотов. – Київ: Техніка, – 1992. – 272 с.
8. *Процессы в перспективных дизелях* / А.Ф. Ше-

ховцов, Ф.И. Абрамчук, В.И. Крутов, А.П. Марченко и др. / Под ред. А.Ф. Шеховцова. – Харьков: Изд-во «Основа» при Харьк. ун-те, 1992. – 352 с. 9. Creep behavior of in situ TiCP/2618 aluminum matrix composite / F. Ji, M.Z. Ma, A.J. Song, W.G. Zhang, H.T. Zong, S.X. Liang, Y. Osamu, R.P. Liu // *Materials Science and Engineering: A*. – 2009, – Volume 506, Issues 1–2, – P. 58-62. Doi: 10.1016/j.msea.2008.11.010 10. Марченко А.П. Аналіз причин задиру поршнів транспортних двотактних дизелів і можливі шляхи вирішення цієї проблеми / А.П. Марченко, В.О. Пильов, О.Ю. Лінков, С.В. Ликов // *Marine power plants and operation 2021 (MPP&O-2021): Матеріали 3-ї Міжнар. наук.-практ. мор. конф. каф. СЕУ і ТЕ навч.-наук. ін-ту мор. флоту Одес. нац. мор. ун-ту, квітень 2021 р., м. Одеса. – Харків. – 2021. – С. 202-206. 11. Лінков О.Ю. Методика визначення порогу повзучості матеріалу поршня для оцінки параметричної надійності його бічної поверхні / О.Ю. Лінков, В.В. Пильов, С.В. Ликов, В.О. Пильов // *Двигуни внутрішнього згорання. – 2022. – № 2. – С. 56-61. Doi: 10.20998/0419-8719.2022.2.10. 12. Доценко В. Н. Методика проектування профіля поршня ДВС / В.Н. Доценко, А.В. Белозуб, И.Н. Москаленко // *Вестник двигателестроения. – 2015. – № 1. – С. 74-80. 13. Mechanical properties and microstructure of aluminum alloy 2618 with Al3(Sc, Zr) phases/ Kun Yu, Wenxian Li, Songrui Li, Jun Zhao // *Materials Science and Engineering: A. – 2004. – Volume 368, Issues 1–2, – P. 88-93. Doi: 10.1016/j.msea.2003.09.092. 14. Шпаковский В. В. Влияние корундовой поверхности поршней дизеля тепловоза ЧМЭ-3 на эксплуатационные характеристики цилиндра-поршневого группы / В. В. Шпаковский, В. В. Осейчук // *Двигатели внутреннего сгорания. – 2007. – № 2. – С. 101-105. 15. Goritskiy Y.A. Numerical model of mechanical interaction between rough surfaces of tribosystem of the high forced diesel engine / Y.A. Goritskiy, K.V. Gavrilo, Y.V. Rozhdestvenskii, A.A. Doikin // *Procedia Engineering. – 2015. – № 129. P. 518 – 525. doi:10.1016/j.proeng.2015.12.052. 16. Zabala B. Friction and wear of a piston ring/cylinder liner at the top dead centre / B. Zabala, A. Igartua, X. Fernández, C. Priestner et al. // *Experimental study and modelling, Tribology International, – 2017.– №106. – P. 23-33. doi: 10.1016/j.triboint.2016.10.005. 17. Ma Z. A Model for Wear and Friction in Cylinder Liners and Piston Rings / Z. Ma, N.A. Henein, W. Bryzik / *Tribology Transactions. – 2006. – №49(3). – P. 315-327. doi:10.1080/05698190600678630. 18. Марченко А.П. Концептуальні положення щодо забезпечення надійності поршнів форсованих дизелів протягом заданого ресурсу / А.П. Марченко, О.Ю. Лінков, В.В. Пильов, С.В. Ликов, Р. Ариан, В.О. Пильов // *Двигуни внутрішнього згорання. – 2022. – №1. – С. 3–12. Doi: 10.20998/0419-8719.2022.1.01. 19. Марченко А.П. Порівняльна оцінка повзучості поршневих алюмінієвих сплавів / А.П. Марченко, В.О. Пильов, О.Ю. Лінков, С.В. Ликов // *Двигуни внутрішнього згорання. – 2021. – № 2. – С. 43-49. doi: 10.20998/0419-8719.2021.2.06. 20. (2023) Database of Steel and Alloy. Available at: [http://www.splav-kharkov.com/mat\\_start.php?name\\_id=1407](http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=1407).**********

#### **Bibliography (transliterated):**

1. (2023) Damage analysis of details of ICE, DFCDIESEL. Available at: <http://www.dfcdiesel.com/warranty-info/failure-analysis> 2. (2020) Piston damage – recognizing and rectifying. MS Motorservice International GmbH –50 003 973-02 – EN –07/15 (012020), 92p. 3. Bulgakov V.P., Chebotarev U.V., Ruban I.N. (2016) Influence of chemical inhomogeneity of piston casting from alloy AK12M2MGN

(AL25) on scuffing in the cylinder-piston group [Vliyanye khymycheskoi neodnorodnosti otlyvki porshnia yz splava AK12M2MHN (AL25) na zadyroobrazovanye v tsylyndroporshnevoi hruppe] *Bulletin of the Admiral S.O. Makarov. No.5 (39). pp. 151-158 DOI:10.21821/2309-5180-2016-8-5-151-158* 4. Lykov S.V. (2006) Connecting rod-piston engine group for armored vehicles [Shtatunno-porshnevaia hruppa dvyhatelei dlia bronetankovoi tekhniki] *Internal combustion engines. No. 1, Pp. 17-23. 5. Alekhin S.A., Lykov S.V., Pylov V.O. (2013) Analysis of the thermal state of housings of composite pistons of two-stroke diesel engines for special purposes [Analiz temperaturnoho sostoiannya korpusov sostavnykh porshnei dvykhaknykh dyzelei spetsyalnoho naznacheniya] *Internal combustion engines. No. 1, Pp. 33-36. 6. Pylov V.O. (2001) Automated design of pistons of high-speed diesels with the set level of duration of durability: the monograph [Avtomatyzovane proektuvannya porshniv shvydkokhidnykh dyzeliv iz zadanyim rivnem tryvalosti mitsnosti: monohrafiia] *Kharkiv: NTU "KhPI" Publishing Center. 332p. 7. Shekhovtsov A.F. (1992) Modern diesels: improving fuel economy and long-term durability [Sovremennye dyzeli: povyshenye toplivnoi ekonomichnosti y dlytelnoi prochnosti] - Kiev: Technique. - 272 p. 8. Shekhovtsov A.F. (1992) Processes in perspective diesel engines [Protsessy v perspektivnykh dyzeliakh] *Kharkiv: Osнова. 352 p. 9. Ji F. (2009) Creep behavior of in situ TiCP/2618 aluminum matrix composite. F. Ji, M.Z. Ma, A.J. Song, W.G. Zhang, H.T. Zong, S.X. Liang, Y. Osamu, R.P. Liu. *Materials Science and Engineering: A. Volume 506, Issues 1–2, – P. 58-62. Doi: 10.1016/j.msea.2008.11.010 10. Marchenko A.P., Pylyov V.O., Linkov O.U., Lykov S.V. (2021) Analysis of the causes of scuffing of pistons of transport two-stroke diesel engines and possible solutions to this problem [Analiz prychny zadyru porshniv transportnykh dvotaknykh dyzeliv i mozhyly shliakhy vyrisheniya tsiiiey problemy] *Marine power plants and operation 2021 (MPP&O-2021). Pp. 202-206. 11. Linkov O.U., Pylyov V.V., Lykov S.V., Pylyov V.O. (2022) A method for determining the creep threshold of a piston material to evaluate the parametric reliability of its side surface [Metodyka vyznachenniya poruhu povzuchosti materialu porshnia dlia otsinky parametrychnoi nadiinosti yoho bichnoi povzuchosti] *Internal combustion engines № 2, pp 56-61. Doi: 10.20998/0419-8719.2022.2.10 12. Dotsenko V.N., Belogub A.V., Moskalenko I.N. (2015) Methodology for designing the profile of the piston of the internal combustion engine [Metodyka proektuvannya profilya porshnya DVS] *Vestnik dvigatelestroeniya. No. 1, Pp. 74-80. 13. Kun Yu, Wenxian Li, Songrui Li, Jun Zhao (2004) Mechanical properties and microstructure of aluminum alloy 2618 with Al3(Sc, Zr) phases. *Materials Science and Engineering: A. Volume 368, Issues 1–2, pp. 88-93. Doi: 10.1016/j.msea.2003.09.092 14. Shpakovsky V.V., Oseychuk V.V. (2007) Influence of the corundum surface of diesel locomotive pistons ChME-3 on the operational characteristics of the cylinder-piston group [Vliyanye korundovoi poverkhnosti porshnei dyzelia teplovoza ChME-3 na ekspluatatsyonnye kharakterystyky tsylyndro-porshnevoi hruppy] *Internal combustion engines. No. 2. pp. 101-105. 15. Goritskiy Y., Gavrilo K.V., Rozhdestvenskii Y.V., Doikin A.A. (2015) "A numerical model of mechanical interaction between rough surfaces of tribosystem of the high forced diesel engine", *Procedia Engineering. № 129. Pp. 518 – 525. Doi:10.1016/j.proeng.2015.12.052. 16. Zabala B., Igartua A., Fernández X., Priestner C. et al. (2017) "Friction and wear of a piston ring/cylinder liner at the top dead centre" *Experimental study and modelling, Tribology International, No.106. pp. 23-33. doi: 10.1016/j.triboint.2016.10.005 17. Z. Ma, N.A. Henein, W. Bryzik (2006) "A Model for Wear and Friction in Cylinder Liners and Piston Rings", *Tribology Transactions. №49(3). – Pp. 315-327. Doi:10.1080/05698190600678630. 18. Marchenko A.P., Linkov O.U., Pylyov V.V., Lykov S.V., Aryan R., Pylyov V.O. (2022) Conceptual issues on ensuring the reliability of a forced diesel piston during a given resource [Kontseptualni polozhennya shchodo zabezpechennya nadiynosti porshniv forsovanih dizeliv protyagom zadanogo resursu] *Internal combustion engines. No. 1, Pp. 3-12. Doi: 10.20998/0419-8719.2022.1.01. 19. Marchenko A.P., Pylyov V.O., Linkov O.U., Lykov S.V. (2021) Ensuring reliable operation of the forced internal combustion engine piston [Porivnyalna otsinka povzuchosti porshnevih alyuminievih splaviv] *Internal combustion engines. No. 2, pp. 43–49. Doi: 10.20998/0419-8719.2021.2.06. 20. (2023) Database of Steel and Alloy. Available at: [http://www.splav-kharkov.com/mat\\_start.php?name\\_id=1407](http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=1407)***************

Надійшла до редакції 28.06.2023 р.

**Пильов Володимир Олександрович** – доктор техн. наук, професор, професор кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «ХПІ», Харків, Україна, e-mail: volodymyr.pylov@khpі.edu.ua, orcid.org/0000-0002-3185-1604.

**Ліньков Олег Юрійович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: Oleh.Linkov@khpі.edu.ua, orcid.org/0000-0002-2780-2412.

**Ликов Сергій Валентинович** – аспірант кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: sergsowar@gmail.com, orcid.org/0000-0003-3234-5970.

## COMPARISON OF THE CREEP THRESHOLD OF PISTON ALUMINUM ALLOYS WITH TIME

*V. O. Pylyov, O. U. Linkov, S. V. Lykov*

The direction of work associated with the increase and improvement of efficiency and environmental performance while maintaining the trend of increasing specific power, leads to an increase in the thermal stress of the combustion chamber parts. This leads to cases of loss of parametric reliability of the side surface of the pistons both during experimental studies and during initial operation. Such cases are characterized by the appearance of rubbing in the area of the finger hole. These facts indicate the high relevance of additional studies of the properties of aluminum piston alloys, especially at the initial stage of thermal loads of structures. The aim of the work is to obtain comparative information about the creep threshold of materials, the excess of which causes deformation of the piston side surface in time and, accordingly, the occurrence of an unpredictable decrease in the gap in the friction pair piston-cylinder. This work presents a fundamental approach, in accordance with which the creep threshold of materials in the process of their hardening is determined. The creep process of the material at the first two stages is taken into account. The creep threshold of AL25 and AK4 alloys in their initially non-hardened and hardened with time state has been studied. Dependences between the level of temperatures and thermal stresses, which determine the creep thresholds of the studied piston aluminum alloys, are established. It is shown that the hardening of the studied alloys occurs during the first 10 hours of thermal loading. It has been established that the creep limit of non-hardened AL25 and AK4 alloys is 1.5-2 times less than the creep limit of hardened materials. An approach is proposed to ensure the parametric reliability of the piston side surface, which consists in the impossibility of thermal loading of the material by a level exceeding the creep threshold of unhardened materials. The presented approach is recommended to be used taking into account the concept of guaranteed reliability of structures at the initial stages of their design. A detailed presentation of the main material of the study is presented on the example of the AK4 alloy. The presented approach to the determination of the time-varying creep threshold can be used for arbitrary materials.

**Keywords:** piston; side surface of the piston; thermal load; piston aluminum alloys; creep of the material; creep limit