

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

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПОРОГУ ПОВЗУЧОСТІ МАТЕРІАЛУ ПОРШНЯ ДЛЯ ОЦІНКИ ПАРАМЕТРИЧНОЇ НАДІЙНОСТІ ЙОГО БІЧНОЇ ПОВЕРХНІ

Постійне підвищення питомої потужності двигунів призводить до роботи матеріалів, що утворюють камеру згоряння, на межі їх міцності та зменшення надійності конструкцій двигунів. Передбачення надійної роботи елементів конструкції двигуна стає все більш актуальним і вимагає наявності відповідних методик для такої оцінки. За найбільш показовий елемент камери згоряння взято поршень. Він працює при значних термічних навантаженнях і саме його поверхні можуть працювати на межі призначених показників надійності. Аналіз публікацій показав актуальність поставленої задачі через зафіксовані випадки втрати параметричної надійності поршня з цілого ряду причин. Для забезпечення параметричної надійності бічної поверхні поршня під час проектування необхідно застосовувати додатковий критерій, якій повинен враховувати значення порогу повзучості матеріалу в продовж експлуатації. В роботі відмічена специфічність багатьох матеріалів – незначна тривалість першої стадії повзучості – їх зміцнення. В дослідженні розглянуто схему деформування критичної зони юбки поршня при визначенні порогу повзучості матеріалу за традиційною методикою та при врахуванні факту наявності стадії повзучості початкового зміцнення матеріалу. Встановлено відмінності результатів при врахуванні властивостей незміцненого та зміцненого поршневого алюмінієвого сплаву АК12М2МгН внаслідок повзучості. Показано, що результати досліджень щодо порогу повзучості незміцненого алюмінієвого сплаву слід враховувати в оцінках параметричної надійності бокової поверхні поршнів форсованих за потужністю двигунів. Саме для цієї зони межа повзучості матеріалу найбільше відрізняється для зміцненого і незміцненого матеріалу. Наступний напрям робіт пов'язано з визначенням порогу повзучості інших матеріалів та застосування отриманих даних в критерії параметричної надійності.

Ключові слова: двигун внутрішнього згоряння; поршень; алюмінієві сплави; надійність; моделювання; деформації; повзучість.

Вступ

Подальший розвиток конструкцій двигунів внутрішнього згоряння, окрім іншого, однозначно передбачає зростання питомої потужності. Це неодмінно приводить до підвищення термнапруженості деталей камери згоряння, роботи матеріалів на межі їх міцності та зменшення фізичної надійності конструкцій [1-3]. Одним з найбільш навантажених елементів камери згоряння є поршень, тому при форсуванні двигунів до цієї деталі привертається значна увага. При цьому в [4] вказується, що поява натирів, ризик і задирів на юбці поршня в деяких випадках спостерігається навіть в процесі обкатки високофорсованих конструкцій. В [4-5] цю проблему пов'язують з перевищенням термонапруженого стану в окремих зонах юбки поршня порогу повзучості матеріалу, що приводить до непрогнозованої деформації юбки та втрати параметричної надійності конструкції. З цього приводу актуальною постає проблема розробки методики визначення порогу повзучості матеріалу поршня, як моменту досягнення критичного стану матеріалу для оцінки параметричної надійності його бічної поверхні.

Аналіз публікацій та постановка задачі дослідження

Достатньо цілісний підхід та детальний аналіз щодо випадків втрати фізичної та параметричної надійності поршнів наведено в [6]. Опис характерних відзнак втрати параметричної надійності юбки

поршня має наступний узагальнений опис пошкодження:

- має місце декілька схожих задирів на поверхні юбки поршня;
- задири мають місце як на навантаженому, так і не навантаженому боці юбки поршня;
- задири розміщені зі зміщенням під 45° відносно вісі пальця;
- задири мають певну поверхню зі значним «натиском» з переходом до відносно гладких місць стирання;
- в зоні кілець пошкодження відсутні.

Відповідними причинами втрати параметричної надійності конструкції в [6] задекларовано:

- зазор між юбкою поршня та робочою поверхнею циліндра був занадто малого розміру, або звужився, імовірно в процесі роботи двигуна;
- основна частина задиру на поршні розташована в місці спряження бобишки поршня та юбки поршня; бобишка поршня занадто нагрілась; бобишка з більш товстими стінками розширюється сильніше, внаслідок чого виникає зменшення потрібного зазору та утворюється заDIR на поршні.

В [6] також наводиться 13 можливих помилок персоналу, які можуть бути допущені при виконанні ремонтних робіт або бути наслідком певних несправностей системи охолодження. Водночас звертається увага на той факт, що на відміну від задиру при роботі двигуна за умов недостатнього зма-

щення пари тертя, вказана вище втрата параметричної надійності поршня виникає завжди через малий проміжок часу з початку експлуатації. За такий самий факт свідчать дані робіт [4, 7], в яких вказується, що поява натирів і задирів на юбці поршня при форсуванні двигунів за потужністю може спостерігатися навіть в процесі обкатки конструкції.

При профілюванні бічної поверхні поршня неодмінно враховується температурний та пружно-деформований стан поршня і циліндра [8]. Це означає, що у випадках втрати параметричної надійності нових конструкцій забезпечення їх працездатності повинно враховувати додаткові можливі фізичні процеси, що впливають на зміну деформованого стану юбки поршня через малий проміжок часу експлуатації форсованого двигуна. Без врахування таких процесів неможливо винайти рекомендації щодо забезпечення працездатності поршня.

В [4, 5, 7] пропонується для забезпечення параметричної надійності бічної поверхні поршня застосовувати додатковий критерій, пов'язаний зі встановленням порогу повзучості матеріалу конструкції. Іншими словами, коли термонапружений стан певної зони юбки поршня перевищує поріг повзучості, то бічна поверхня поршня в цій зоні починає деформуватись в часі, що порушує призначений профіль юбки та зменшує до критичного зазор між юбкою поршня та робочою поверхнею циліндра.

Таким чином, задачею роботи є розробка методики визначення порогу повзучості матеріалу

поршня для використання в критерії оцінки параметричної надійності бічної поверхні конструкції.

Викладення основного матеріалу дослідження

У загальному вигляді деформування певного матеріалу в часі внаслідок явища повзучості, що виникає під дією високих рівнів температур і напружень, умовно розділяють на три стадії, зображені на рис. 1 [1, 7]. Тут стадія I відповідає першій ділянці повзучості матеріалу, на якій має місце певне початкове його зміцнення зі зменшенням швидкості деформування матеріалу в часі, стадія II відповідає ділянці сталої швидкості деформації повзучості, стадія III – ділянці подальшого прискорення швидкості повзучості, що завершується руйнуванням матеріалу в момент часу τ^* . Слід звернути увагу на величину пружної початкової деформації матеріалу $\varepsilon_{пр}$. Саме її значення використовують в методиках профілювання бічної поверхні поршня. При цьому видно, що коли рівень температур і напружень перевищує поріг повзучості матеріалу, реальна величина деформації навіть через малий проміжок часу може суттєво перевищити значення $\varepsilon_{пр}$.

При цьому важливо, що для поршневих алюмінієвих сплавів специфічним є те, що тривалість першої стадії повзучості не перевищує 5–20 годин та скорочується при підвищенні температури. Деформація повзучості на цій ділянці не перевищує 0,05 – 0,1% при деформації в момент руйнування 1-2% в умовах розтягу та приблизно на порядок вище в умовах стиску [7, 9, 10].

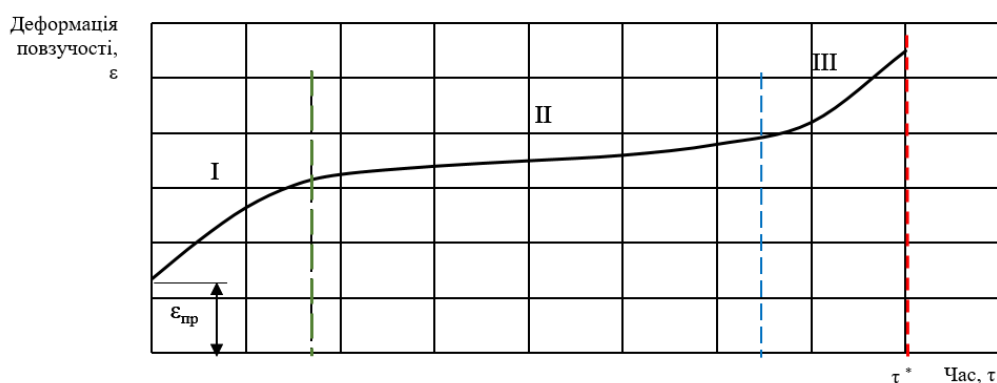


Рис. 1. Загальний вигляд кривої деформування матеріалу в часі внаслідок явища повзучості

Загальна методика визначення порогу повзучості певного матеріалу є відомою [1]. Цей поріг встановлюють на основі розрахунку релаксації напружень

$$d\varepsilon/dt = -(1/E) \cdot d\sigma/dt, \quad (1)$$

де ε – деформація повзучості; E – модуль пружності матеріалу при температурі T даного дослідження; σ – поточне значення напруження.

Швидкість повзучості в (1) встановлюють за експериментально визначеними коефіцієнтами моделі повзучості, наприклад,

$$\dot{\varepsilon} = A_0 \cdot \exp(-k_1/T) \cdot (1 + D \cdot \varepsilon^{-\alpha}) \cdot [\sigma / (1 - \omega^r)]^n, \quad \varepsilon_0 = 0; \quad (2)$$

$$\dot{\omega} = B_0 \cdot \exp(-k_2/T) \cdot [\sigma / (1 - \omega^r)]^n, \quad \omega(0) = 0, \quad (3)$$

де D , α – константи матеріалу, що характеризують стадію повзучості I; A_0 , k_1 , n – константи матеріалу, що характеризують стадію повзучості II; B_0 , r –

константи матеріалу, що характеризують стадію повзучості III; ω – параметр, що характеризує ступінь пошкодження матеріалу (в момент руйнування $\omega = 1$).

Межу повзучості певного матеріалу можливо встановити за моделлю (1)-(3) на основі розрахунку релаксації напружень величиною $\Delta\sigma$ при даному початковому напруженні σ_0 в умовах дії певної температури T для кількох моментів часу τ ,

$$\Delta\sigma = f(\sigma_0, T, \tau), T = \text{const}, \tau = \text{const}. \quad (4)$$

Практично завжди внаслідок малості стадії

повзучості I, нею нехтують, та визначають поріг повзучості за (4) з урахуванням моментів часу τ , що відповідає стадії II. Для зміцненого матеріалу розрахунковий час рекомендується обирати з діапазону 50–1000 годин. В результаті отримують сукупність лінійних залежностей, перетин яких при значенні $\Delta\sigma = 0$ надає шукане рішення при температурі T . Графічна інтерпретація методики подана на рис. 2 (пунктирні лінії, значення τ подано в годинах).

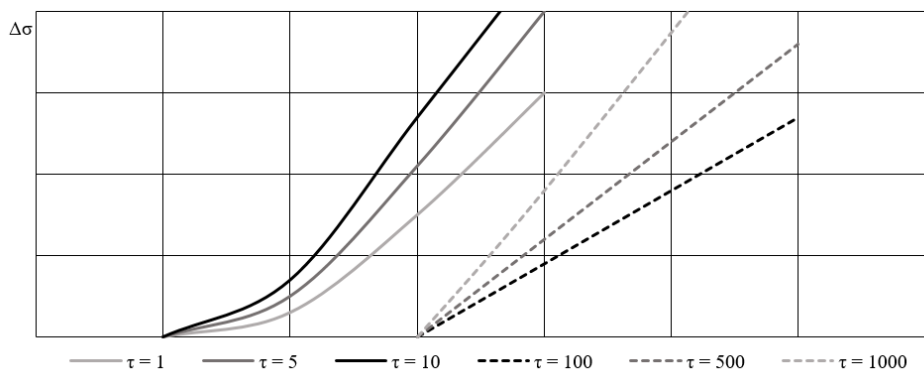


Рис. 2. Типові теоретичні результати визначення порогу повзучості для умов зміцненого (пунктирна лінія) та незміцненого (суцільна лінія) матеріалу

Але виходячи з (2) до певної величини деформації повзучості, що визначається множителем $(1 + D \cdot \varepsilon^{-\alpha})$, межа повзучості буде меншою фактично до моменту $D \cdot \varepsilon^{-\alpha} \approx 0$. Цей теоретичний факт продемонстровано на рис. 2 суцільною лінією.

З урахуванням вказаного розглянемо схему деформування критичної зони юбки поршня при визначенні порогу повзучості матеріалу за традиційною методикою та при врахуванні факту наявності стадії повзучості I початкового зміцнення матеріалу. На рис. 3 схему деформування критичної зони деталі за традиційною методикою представлено маршрутом 1-2^{II}-3^{II}-4-5. Тут ділянки 1-2^{II}-3^{II} позначають початкове навантаження двигуна при перевищенні порогу повзучості, 3^{II}-4 – роботу на стаціонарному важкому експлуатаційному режимі, 4-5 – зменшення навантаження до певного часткового режиму та роботу на стаціонарному частковому режимі. При цьому ділянка 1-2^{II} відповідає пружному деформуванню матеріалу, точка 2^{II} відповідає розрахунковому порогу повзучості σ^{II} , а ділянка 2^{II}-3^{II}-4 деформації повзучості ε , що збільшується в часі. Але при застосуванні методики пошуку порогу повзучості з урахуванням стадії повзучості I, тобто факту реального зміцнення матеріалу в перші часи навантаження двигуна, схема де-

формування критичної зони деталі буде відповідати маршруту 1-2^I-3^I-4-5.

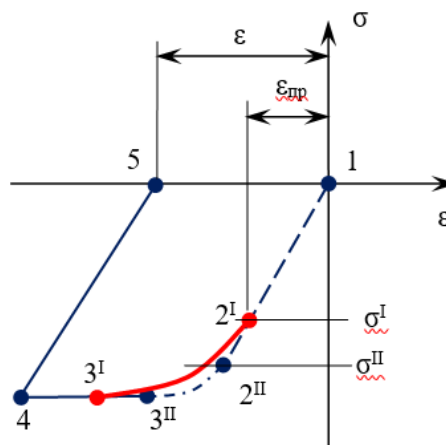


Рис. 3. Варіанти моделювання деформування критичної зони юбки поршня при перевищенні порогу повзучості матеріалу

Тоді виключно пружному деформуванню матеріалу відповідає ділянка 1-2^I, точка 2^I відповідає дійсному порогу повзучості σ^I нової деталі на початку експлуатації, а ділянка 2^I-3^I-4 реальній деформації повзучості ε , що збільшується в часі на початку експлуатації двигуна. Бачимо, що при врахуванні реального деформування матеріалу з ураху-

ванням стадії I та при навантаженні двигуна до напруження σ^{II} дійсна деформація ε перевищує розрахункову за моделлю 1-2^{II}-3^{II}-4-5. Цей теоретично встановлений факт потребує практичної перевірки.

Нами виконано відповідне дослідження і встановлені відмінності результатів при врахуванні властивостей незміцненого та зміцненого поршневого алюмінієвого сплаву АК12М2МгН внаслідок повзучості. Коефіцієнти повзучості моделі (2), (3) використано з [9]. Для незміцненого матеріалу за розрахункові інтервали досліджень було обрано 1-30 годин, для зміцненого 50-1000 годин. Приклад результатів дослідження при $t=220^{\circ}\text{C}$ подано на рис. 4.

На основі отриманих даних встановлено, що для незміцненого матеріалу при даній температурі

поріг повзучості складає 5-10 МПа, а для зміцненого в часі він зростає до 14-18 МПа.

Отримані нами результати для температурного діапазону поршнів подано на рис 5.

Видно, що при зростанні робочих температур поршня для сплаву АК12М2МгН межі повзучості незміцненого і зміцненого матеріалів стають несуттєвими, що можна не враховувати при розгляді тривалої міцності камер згоряння поршнів, але для температур бічної поверхні поршня ця різниця є суттєвою. Таким чином, представлені результати досліджень щодо порогу повзучості незміцненого алюмінієвого сплаву слід враховувати в оцінках параметричної надійності юбки поршня форсованих за потужністю двигунів.

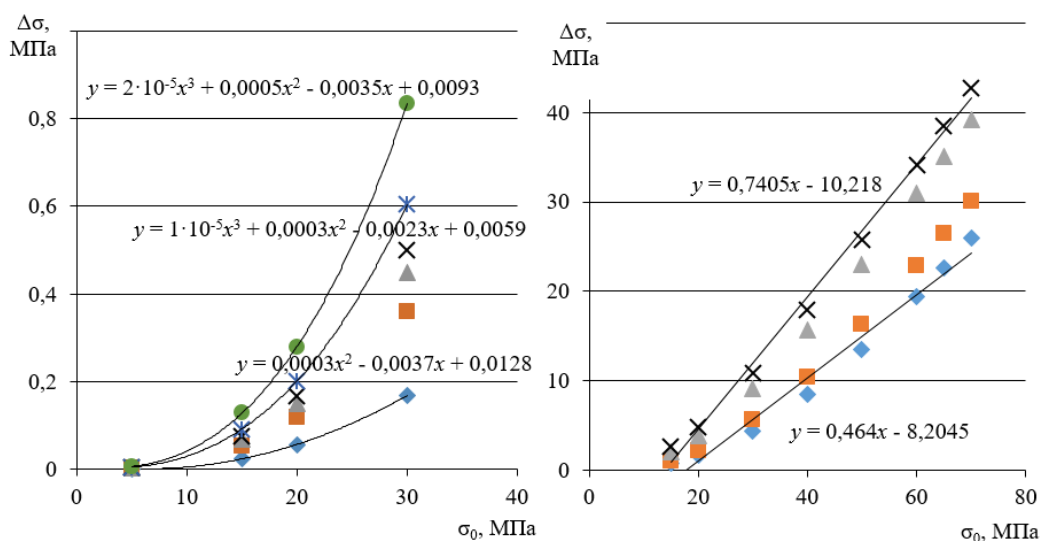


Рис. 4. Приклад визначення порогу повзучості сплаву АК12М2МгН при $t=220^{\circ}\text{C}$: а – незміцнений матеріал; б – зміцнений в процесі тривалого навантаження матеріал

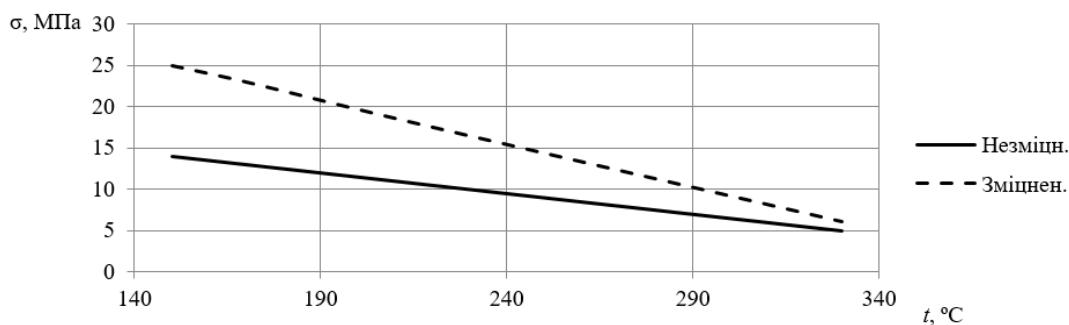


Рис. 5. Поріг повзучості незміцненого та зміцненого при навантаженні в часі поршневого сплаву АК12М2МгН

Висновки

Виконано аналіз умов втрати параметричної надійності бічної поверхні поршнів формованих двигунів в перші години їх експлуатації при доста-

тньому змащенні пари тертя з поверхнею циліндра та працездатних інших системах двигуна.

Теоретично доведено, що в оцінках параметричної надійності бічної поверхні поршнів слід використовувати дані щодо порогу повзучості ма-

теріалу. При цьому методика визначення порогу повзучості матеріалу повинна передбачати врахування процесу зміцнення матеріалу в початковий період його термонавантаження при експлуатації двигуна.

Для поршневого сплаву АК12М2МгН встановлено поріг повзучості незміцненого матеріалу, визначено чисельні відмінності параметру порогу повзучості незміцненого та зміцненого матеріалу.

Подальший напрям робіт направлено на визначення порогу повзучості інших матеріалів поршнів та застосування отриманих даних в критерії параметричної надійності поршня.

Список літератури:

1. Пильов В.О. Автоматизоване проектування поршнів швидкохідних дизелів із заданим рівнем тривалої міцності / В. О. Пильов. – Харків: Видавничий центр НТУ «ХПІ», 2001. – 332 с. 2. Damage analysis of details of ICE, DFC DIESEL available at. [Електронний ресурс]. – Режим доступу <http://www.dfcdiesel.com/warranty-info/failure-analysis> 3. Pylyov V. O. The Influence of Load Modes on the Resource Reliability of Engine Parts of Agricultural Machinery / V. O. Pylyov, O. Linkov, D. Samoilenko, S. O. Kravchenko, V. V. Pylyov, I. Mordivintseva, S. Lykov / Proceedings of 24th International Scientific Conference Transport Means. September 30 – October 02, 2020 Online Conference. – Kaunas, Lithuania. Part 1. Pp. 107–113. 4. Пылев В. А. Повышение надежности поршня форсированного быстроходного дизеля / В. А. Пылев, А. В. Белогуб, О. Ю. Линьков, В. В. Пылев, С. В. Лыков, П. С. Баглай, А. А. Терно // Двигатели внутреннего сгорания. – 2016. – №2. – с. 55–58. Doi: 10.20998/0419-8719.2016.2.10 5. Марченко А. П. Концептуальні положення щодо забезпечення надійності поршнів форсованих дизелів протягом заданого ресурсу / А. П. Марченко, О. Ю. Линьков, В. В. Пильов, С. В. Лыков, Р. Ариан, В. О. Пильов // Двигуни внутрішнього згорання. – 2022. – №1. – с. 3–12. 6. Piston damage –recognizing and rectifying. MS Motorservice International GmbH –50 003 973-02 –EN –07/15 (012020), 92p. 7. 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 / A. P. Marchenko, V. O. Pylyov, O. Yu. Linykov, S. V. Lykov // Двигатели внутреннего сгорания. – 2021. – № 2. – С. 43–49. doi: 10.20998/0419-8719.2021.2.06 8. Доценко В. Н. Методика проектирования профиля поршня ДВС / В. Н. Доценко, А. В. Белогуб, И. Н. Москаленко // Вестник двигателестроения. – 2015. – № 1. – С. 74–80. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vidv_2015_1_17 9. Со-временные 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. 10. Чайнов Н. Д. Особенности нагружения и ползучесть материалов, образующих камеры сгорания форсированных тракторных дизелей / Н. Д. Чайнов, А. Ф. Шеховцов, А. Ф. Абрамчук, В. А. Пылев // Двигатели внутреннего сгорания. – 1987. – Вып. 46, – с. 19–25.

Bibliography (transliterated):

1. Pylov, V.O. (2001) Automated design of pistons of high-speed diesels with the set level of duration of durability: the monograph [Automatyzovane proektuvannia porshniv shvydkokhidnykh dyzeliv iz zadanyim rivnem trivalosti mitsnosti: monohrafiia] Kharkiv: NTU "KhPI" Publishing Center. 2001, 332p. 2. Damage analysis of details of ICE, DFC DIESEL available at. [Electronic resource]. – Access mode <http://www.dfcdiesel.com/warranty-info/failure-analysis> 3. Pylyov, V.O., Linkov, O., Samoilenko, D., Kravchenko, S.O., Pylyov, V.V., Mordivintseva, I., Lykov, S. (2020) The Influence of Load Modes on the Resource Reliability of Engine Parts of Agricultural Machinery. Proceedings of 24th International Scientific Conference Transport Means. September 30 – October 02, Online Conference. – Kaunas, Lithuania. Part 1, Pp. 107–113. 4. Pylev V.A., Belogub A.V., Linkov O.Yu., Pylev V.V., Lykov S.V., Baglai P.S., Terno A.A. (2016) The high-power speed diesel engine piston reliability increasing [Povyshenie nadezhnosti porshnya forsirovannogo bystrohodnogo dizelya] Internal combustion engines. No. 2, Pp. 55–58. 5. 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 [Konseptualni polozhennya schodo zabezpechennya nadylnosti porshniv forsovanih dizeliv protyagom zadanoogo resursu] Internal combustion engines. No. 1, Pp. 3–12. 6. Piston damage –recognizing and rectifying. MS Motorservice International GmbH –50 003 973-02 –EN –07/15 (012020), 92p. 7. 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. 8. Dotsenko V.N., Belogub A.V., Moskalenko I.N. (2015) Methodology for designing the profile of the piston of the internal combustion engine [Metodika proektirovaniya profilya porshnya DVS] Vestnik dvigatelestroeniya. No. 1, Pp. 74–80. 9. Abramchuk, F.I., Marchenko, A.P., Razlejczev, N.F., Tret'yak, E.I., Shekhovtsov, A.F., Shokotov, N.K. (1992) Modern diesel engines: improved fuel efficiency and durability [Sovremennye dizeli: pov'yshenie toplivnoy e'konomichnosti i dilitel'noj prochnosti] Kyiv: Tehnika, 272 p. 10. Chainov N.D., Shekhovtsov A.F., Abramchuk A.F., Pylev V.A. (1987) Features of loading and creep of materials forming combustion chambers of forced tractor diesels [Osobennosti nagruzheniya i polzuchest materialov, obrazuyuschih kameryi sgoraniya forsirovannykh traktornykh dizeley] Internal combustion engines. No. 46, Pp. 19–25.

Надійшла до редакції 22.07.2022 р.

Линьков Олег Юрійович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: linkov@ukr.net, orcid.org/0000-0002-2780-2412.

Пильов Вячеслав Владимирович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теплотехніки та енергоефективних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: vv2pylyov@gmail.com, orcid.org/0000-0002-1514-1020.

Лыков Сергей Валентинович – аспірант кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: sergsowar@gmail.com.

Пильов Володимир Олександрович – доктор техн. наук, професор, професор кафедри двигунів та гібридних енергетичних установок Національного технічного університету «ХПІ», Харків, Україна, e-mail: v.pylyov@gmail.com, orcid.org/0000-0002-3185-1604

A METHOD FOR DETERMINING THE CREEP THRESHOLD OF A PISTON MATERIAL TO EVALUATE THE PARAMETRIC RELIABILITY OF ITS SIDE SURFACE

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

The constant increase in the specific power of engines leads to the work of the materials that form the combustion chamber, on the verge of their strength and reduce the physical reliability of engine designs. The prediction of reliable operation of engine structural elements is becoming increasingly important and requires the availability of appropriate methods for such an assessment. The piston is taken as the most significant element of the combustion chamber. It works under large thermal loads and it is its surfaces that can work on the verge of reliability. The analysis of publications showed the relevance of the task due to the recorded cases of loss of the parametric reliability of the piston due to a number of reasons. To ensure the parametric reliability of the piston side surface, an additional criterion must be applied during design, which should take into account the value of the creep threshold of the material during operation. The work noted the specificity of aluminum alloys - a small duration of the first stage of creep. The study considers the scheme of deformation of the critical zone of the piston skirt when determining the creep threshold of the material according to the traditional method and taking into account the fact of the presence of the creep stage of the initial strengthening of the material. In the course of the study, differences in the results were established when taking into account the properties of non-hardened and hardened piston aluminum alloy AK12M2MgN due to creep. It is shown that the results of studies on the creep threshold of an unhardened aluminum alloy should be taken into account in assessing the parametric reliability of the side surface of pistons in forced engines. It is for this zone that the creep limit of the material differs most of all for the hardened and non-hardened material. The further direction of research is related to the determination of the creep threshold of other materials and the application of the obtained data in the criterion of parametric reliability.

Key words: internal combustion engine; piston; aluminum alloys; reliability; modeling; deformations; creep.

УДК 539.413

DOI: 10.20998/0419-8719.2022.2.11

Г.А. Фролов, Н.А. Ефимов, В.М. Кисель, Ю.И. Евдокименко, Д.В. Боровик, С.В. Бучаков

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ HVAF-ПОКРЫТИЯ ИЗ
КВАЗИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВА СИСТЕМЫ Al-Cu-Fe

В статье представлены результаты определения коэффициента теплопроводности квазикристаллических покрытий системы Al-Cu-Fe в диапазоне температур до 900 °С. Квазикристаллический сплав Al-Cu-Fe приобрел большой интерес для практического использования как материал для получения защитных покрытий. Сплав Al-Cu-Fe применяется для получения термобарьерных покрытий в двигателях внутреннего сгорания, антипригарных покрытий на оборудовании химического синтеза и пищевой промышленности, а также для предотвращения обледенения в авиации. Квазикристаллы системы Al-Cu-Fe имеют низкую плотность, высокую твердость, высокий модуль упругости, высокие значения коррозионностойкости и износостойкости, низкий коэффициент трения, пониженную адгезию, низкую теплопроводность в сочетании с коэффициентом теплового расширения, который близок по своей величине к некоторым металлам. Для напыления использовали порошок состава $Al_{63}Cu_{25}Fe_{12}$ дисперсностью +40/-63 мкм, полученный распылением расплава водой высокого давления и имеющий содержание квазикристаллической фазы около 60 вес. %. Покрытия наносили на торец цилиндрической подложки из стали 45 (диаметр – 25 мм, высота – 10 мм), который перед напылением подвергали струйно-абразивной обработке порошком корунда с определяющим размером частиц 1 мм при давлении распыляющего воздуха 0,5 МПа. Покрытие Al-Cu-Fe толщиной более 0,8 мм было нанесено методом высокоскоростного воздушно-топливного напыления (high-velocity air-fuel (HVAF) spraying) с использованием горелки ГВО-РВ12 при следующем режиме напыления: давление в камере сгорания горелки 1,0 МПа; коэффициент избытка окислителя $\alpha \approx 1,2$, дистанция напыления – 270 мм. Образцы устанавливали на боковой поверхности барабана (диаметр 120 мм), вращающегося со скоростью 2,0 об/с (скорость перемещения пятна напыления – 0,8 м/с). Напыление производили в три захода по 10 секунд каждый и с выдержкой для охлаждения по 30 секунд между ними. Определение температурной зависимости теплопроводности покрытия проводили путем решения обратной задачи теплопроводности по одномерным полям температуры в образцах, полученных односторонним струйным нагревом промышленным факелом горячего воздуха (при температурах поверхности до 450 °С) и кислородно-пропановой сварочной горелки (при температуре выше 450 °С). Показано, что значения коэффициента теплопроводности квазикристаллических покрытий и Al-Cu-Fe в диапазоне 20 °С...900 °С изменяются в пределах $\lambda = 1,9 - 2,31$ Вт/(м·К).

Ключевые слова: коэффициент теплопроводности; квазикристаллическое покрытие; тепловая защита; напыление.

Введение

Квазикристаллы (КК) – твердые тела со стопкой атомов, характеризующейся совершенным дальним порядком при отсутствии трансляционной симметрии и наличии вращательной симметрии с 5-, 8-,

10- или 12-кратными осями, запрещенными в кристаллическом веществе [1]. В настоящее время КК-фазы встречаются более чем в 100 системах, большинство из них - сплавы на основе алюминия.

Необычная упаковка атомов в ряде случаев