

А. П. Марченко, В. В. Пильов

ПРОБЛЕМАТИКА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ БІЧНОЇ ПОВЕРХНІ ПОРШНІВ ФОРСОВАНИХ ДВЗ

Проаналізовано перспективні напрямки і тенденції розвитку двигунів техніки спеціального призначення. Підвищення літрової потужності двигунів призводить до критичного зростання теплової та механічної напруженості елементів їх конструкцій та відповідного зменшення ресурсу. До найбільш схильних до виходу з ладу деталей форсованих двигунів належать поршині. Серед характерних критичних зон конструкції поршня, в яких спостерігається втрата параметричної і фізичної надійності, виділяють окрему критичну зону на навантаженій та ненавантаженій сторонах спідниці поршня біля пальцевого отвору. Проведено аналіз публікацій і показано, що виникнення явища натирання чи задирання бічної поверхні спідниці поршня, що спостерігається для форсованих конструкцій в означеній зоні, не пояснено вичерпно в існуючій системі наукових поглядів. Розуміння причин описаного явища втрати надійності є необхідним для діагностування і розробки заходів щодо його запобігання на стадії проектування. В роботі висунуто гіпотезу, що пояснює настання чи ненастання втрати надійності в процесі деформування локальної зони бічної поверхні спідниці поршня при нерівномірному розширенні матеріалу, пов'язане з явищем повзучості і одночасної релаксації напружень при можливому змінненні матеріалу за властивістю повзучості. Розглянуто принципові можливі випадки деформування певної локальної зони бічної поверхні поршня у пружній постановці і при наявності процесів повзучості та релаксації. Показано, що процес деформування розглянутої зони внаслідок повзучості може зупинитися до виникнення втрати надійності навіть для матеріалів, що не зміцнюються за властивістю повзучості або зміцнюються несуттєво. Окреслено принципові шляхи підвищення надійності бічної поверхні поршня, пов'язані з забезпеченням рівня локальних напружень нижче межі повзучості, забезпеченням завершення процесу повзучості до набуття зазором критичних значень, а також досягненні зміцнення матеріалу за властивістю повзучості, для матеріалів здатних до цього, до виникнення процесів повзучості в експлуатації.

Ключові слова: форсовані ДВЗ; бічна поверхня поршня; втрата надійності; повзучість; релаксація напружень; межа повзучості; шляхи підвищення надійності.

Вступ

Тривалі наукові дискусії щодо перспектив розвитку двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) [1-4], відповідні управлінські [5,6] та новітні технічні рішення в галузі двигунобудування, наприклад, описані в [7-11], останнього часу окреслили чіткий, значно вагомий сегмент ДВЗ в майбутньому. В повній мірі вказане стосується розвитку сучасної світової економіки і перспектив переходу до концепції циркулярної енергетики. Остання передбачає наряду із застосуванням відновлювальних джерел енергії використання енергетичних засобів з наявним вуглецевим слідом [12,13]. Беззаперечно, що вказане стосується, як комерційних транспортних засобів, так і, особливо, ДВЗ технічних засобів спеціального призначення.

Загальновідомо, що розвиток ДВЗ широкою номенклатури призначень супроводжується постійним зростанням їх форсування. Наприклад, для дизелів наземного комерційного транспорту це зростання складає 0,5 кВт/л в рік та сьогодні досягнутим є рівень 35 кВт/л. В той самий час, для спеціальної техніки, зокрема, важкої військової, вже існують конструкції з літровою потужністю 50-70 кВт/л і вище. Наприклад, двигун MT-883 KA-500 (виробництва MTU Friedrichshafen GmbH) має літрову потужність 40,1 кВт/л, AVCR-1360-2 (Teledyne Continental Motors) – 49,3 кВт/л, XAV-28 (Cummins

Inc.) – 52,8 кВт/л, 6TD-2E (ДП «Завод імені Малишева») – 54,1 кВт/л, SACM V8X (Wärtsilä Corp.) – 66,5 кВт/л, MT-883 Ka-523 (MTU) – 73,7 кВт/л [14-17].

Тенденція підвищення літрової потужності реалізується у два шляхи – через підвищення потужності двигуна або зменшення його габаритів і маси. Так двигуни MTU охоплюють діапазон потужності від 735 до 2016 кВт [18]. Порівняння двигунів номінальною потужністю 1100 кВт засвідчує, що силовий блок EuroPowerPack з дизелем MT-883 має габаритний об'єм 4,3 м³, а силовий блок з дизелем V-12 HighPowerDensity (HPD) із робочим об'ємом від 13,5 до 20 л дозволить отримати питому потужність 55-82 кВт/л, при цьому значно скоротити об'єм моторно-трансмісійного відділення до 3,2 м³ при зменшеній масі на 20% [16]. Це призводить до критичного підвищення теплової та механічної напруженості елементів конструкції та відповідного зменшення ресурсу. Так, танкові двигуни проєктують на наробіток до 500-1000 годин, який навіть може зменшуватись до 300 годин на практиці [19,20]. Значимо, що згідно вимог НАТО цей показник повинен бути не менше ніж 300 годин.

Виконаний в [4] аналіз щодо тенденцій розвитку бронетанкової техніки засвідчує, що останнього часу основна увага розробників була зосереджена на поглибленій модернізації існуючих конструкцій. Результатом цього стало обмеження можливості щодо

подальшої їх модернізації.

Перспективним напрямом підвищення надійності конструкцій ДВЗ, що працюють на межі механічних характеристик, вважається застосування двох автономних силових установок [16,20]. У цьому випадку втрата фізичної надійності одного ДВЗ призведе до зниження продуктивності, але не до втрати мобільності через зупинку силового блоку. При цьому, наприклад, застосування двох дизелів V-6 HPD сумарною потужністю 1100 кВт замість дизеля V-12 HPD призводить до зростання об'єму силового блоку тільки на 10%. Рівень форсування і теплової напруженості деталей кожного з двох двигунів, слід зазначити, залишається на критично високому рівні.

Як інший перспективний напрямок розвитку силових агрегатів розглядається використання гібридних установок з ДВЗ та електродвигунами, завдяки чому досягається значне покращення вихідного крутного моменту, витрати палива, легкості керування [4,20,21]. Для гібридних установок питання забезпечення надійності навантажених деталей виявляється ще більш гострим, оскільки ДВЗ у них працюють на номінальному режимі переважну частину часу.

Згідно до статистичних даних, серед відмов, що ведуть до поломки танків, механічні поломки складають 35%, з них 48% викликані поломкою дизеля [22]. До найбільш схильних до виходу з ладу деталей форсованих дизелів належать поршні. Високі термічні і механічні навантаження призводять

до їх роботи практично на межі міцності матеріалів. Це викликає втрати як параметричної, так і фізичної надійності цих деталей [23-26].

В конструкції поршня можна виділити дев'ять характерних критичних зон, в яких втрата фізичної і параметричної надійності призводить до невиконання ним складного комплексу його функціональних призначень [27]. До цих зон відносять: кромку та периферію вогневого денця; центральну зону камери згоряння та охолоджувану, протилежну до неї, поверхню всередині поршня; стінки між камерою згоряння та порожнинами головки поршня; зону канавок компресійних кілець; дві зони на поверхнях контакту отвору під поршневий палець в бобишках; зону спідниці поршня, особливо в площині качання шатуна. Відомими є моделі опису явищ втрати надійності в цих зонах [27-30].

Провідні розробники поршнів ДВЗ виділяють десять окрему критичну зону на навантаженій та ненавантаженій сторонах поршня біля пальцевого отвору [24]. (Для спрощення в подальшому будемо називати її зоною 10.) Для форсованих конструкцій виникнення натирання та задирання у ній спостерігається навіть під час обкатувальних випробувань [31]. При цьому корпус поршня у складених його конструкціях, який виготовлено з алюмінієвого сплаву, може втрачати надійність навіть під жароміцною сталеву накладкою [32]. Приклади відповідних пошкоджень представлено на рис. 1.

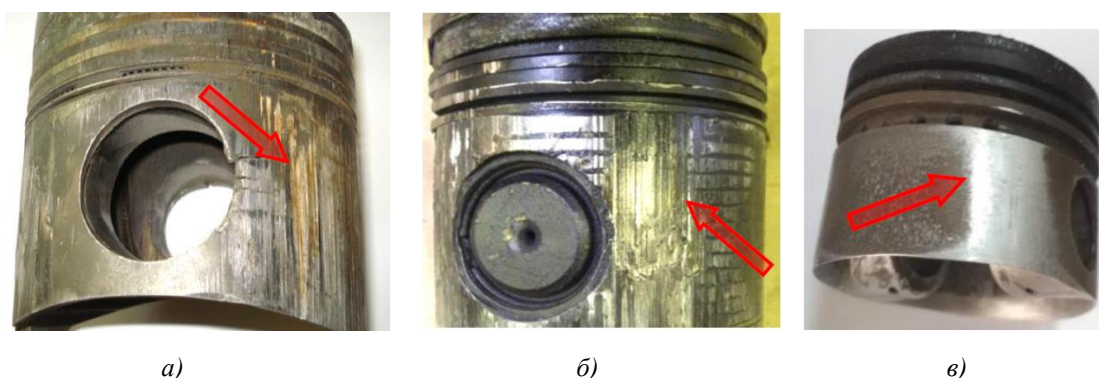


Рис. 1. Характерні пошкодження бічної поверхні поршнів в зоні пальцевого отвору: а – чотиритактного дизеля; б – двотактного дизеля [27]; в – двотактного бензинового ДВЗ

Значна кількість конструкцій поршнів ДВЗ може уникнути означених втрат надійності через виконання вибірок в спідниці поршня і викликану цим відсутність контакту матеріалу поршня з гільзою циліндра в переважній частині цієї критичної зони (хоча відомі випадки наявності натирання і задирання біля країв цих вибірок). Проте, для кон-

струкцій двохтактних ДВЗ спідниця поршня додатково задіяна в організації процесів газообміну, керуючи відкриттям і закриттям вікон у гільзі. В разі розташування вікон по усьому периметру гільзи, що притаманно форсованим ДВЗ, спідниця поршня має залишатися суцільною.

Забезпечення надійності роботи поршнів фор-

сованих ДВЗ є одним із головних трендів у світовому двигунобудуванні спеціального призначення, де, як показано вище, розробка науково-технічних концепцій уникнення явищ натирання і задирання спідниці поршня поблизу пальцевого отвору є ще не вирішеною гостро актуальною проблемою. Її розв'язання, у тому числі, для вітчизняних танкових дизелів, визначається запитом практики. Для формування шляхів утворення означених концепцій однією із головних задач є наукове пояснення природи явища виникнення натирання і задирання спідниці поршня поблизу пальцевого отвору, та факторів, що його зумовлюють.

Аналіз публікацій

Поршень є однією з першорядних ресурсоємних деталей ДВЗ, конструкція якого суттєво впливає практично на всі показники досконалості енергетичної установки. При цьому питанню мінімізації тертя в sprzęженні спідниці поршня і циліндру приділяють значної уваги, наприклад, [33-35].

Ключовим конструктивним параметром, що критично впливає на тертя між поршнем і гільзою циліндра, а також надійність цієї пари тертя, є форма спідниці поршня. Методики синтезу бічної поверхні поршня також є добре відомими [29,36-38]. Так, відповідно до [29] означений профіль пропонується отримувати за формулою:

$$R(h, \theta) = R_0 - \Delta R_t(h, \theta) - \Delta R_p(h, \theta) - \Delta R_J(h, \theta) - f(\Delta R_k(h, \theta)) - \Delta R_a(h, \theta) - \Delta R_{уст.} + \Delta R_r, \quad (1)$$

де R_0 – номінальний радіус поршня; h, θ – висота та кутова координата локальної точки зовнішньої поверхні; $\Delta R_t(h, \theta)$ – локальні термічні деформації поверхні поршня на режимі максимального теплового потоку через нього (Ne_{max}); $\Delta R_p(h, \theta)$ – локальні деформації поршня від впливу тиску в циклі (поблизу P_c) на режимі Me_{max} ; $\Delta R_J(h, \theta)$ – локальні деформації поршня від дії прискорень у ВМТ на режимі Me_{max} ; $\Delta R_k(h, \theta)$ – поправка на зміну периметру спідниці; $\Delta R_a(h, \theta)$ – поправка на «від'ємний зазор» головки поршня при повороті поршня в зазорі поршень-гільза та деформації шатунної групи; $\Delta R_{уст.}$ – установчий зазор; ΔR_r – термічна деформація гільзи у нижньому поясі на режимі холостого ходу.

Під час створення нового двигуна проектування бічної поверхні поршня спирається на забезпечення оптимального зазору між поршнем і дзеркалом циліндру. Цей зазор визначається з урахуванням початкового профілю бічної поверхні поршня (1) відповідно до моделі навантаження двигуна певного призначення Ξ . З урахуванням підходу [28] поточний зазор можна представити через фактичні

профілі бічної поверхні поршня $R_c(h, \theta, \Xi)$ та дзеркала циліндра $R_r(h, \theta, \Xi)$,

$$\Delta R_{уст.}(h, \theta, \Xi) = R_r(h, \theta, \Xi) - R_c(h, \theta, \Xi). \quad (2)$$

Відповідно, для певного вагового режиму ξ_1^{base} , що відповідає максимальному тепловому потоку характерної групи двигунів певного призначення, вираз (2) набуває вигляду:

$$\Delta R_{уст.}(h, \theta, \xi_1^{base}) = R_r(h, \theta, \xi_1^{base}) - R_{ю.}(h, \theta, \xi_1^{base}). \quad (3)$$

Однак, незалежно від методики синтезу початкового профілю бічної поверхні поршня, рівня форсування двигуна, матеріалу поршня, форми камери згоряння, організації робочого процесу, властивостей обраної оливи та способу змащування типи пошкоджень, що спостерігаються на бічній поверхні поршня та поверхні циліндру залишаються незмінними за своїм виглядом та розташуванням [24].

Механізми виникнення натирання і задирання бічної поверхні поршня з фізичної точки зору є недостатньо вивченими. Висунуто ряд гіпотез [39], що знаходяться на стадіях, які ще не дозволяють здійснювати прогнозування явища, у т.ч. в умовах напівсухого тертя [37].

Однак, визначеними і науково обґрунтованими є перелік чинників, поява яких викликає означені втрати надійності. До цих чинників відносять набуття зазором між поршнем і гільзою критично малих величин, наявність недостатньої кількості змащувальної оливи у парі тертя, а також перегрів поршня, що веде до втрати оливою змащувальних властивостей. Ці чинники виникають у ситуаціях надмірних та різкої зміни навантажень двигуна, а також через помилки при його виготовленні, зборці, ремонті. Вони обумовлюють виникнення натирання і задирання у будь якій частині спідниці поршня, але конкретні прояви і вигляд пошкоджень відрізняються в залежності від того, чим була обумовлена конкретна ситуація [24].

Як правило, однакові зони натирання і задирання з навантаженої та ненавантаженої сторін спідниці виникають внаслідок критично малих зазорів, однобічне пошкодження є ознакою недостатнього змащування, а суцільне окружене натирання, імовірно, – перегрівом поршня. Вважається, що така візуальна діагностика пошкоджень дозволяє оцінити перелік впливових чинників задля їх усунення.

Особливістю пошкоджень в зоні 10, є їх локальний характер. Вважається, що надмірне підвищення температури бобишок в ній та викликане ним

локальне розширення матеріалу поршня призводять до зменшення зазору між поршнем і гільзою [25].

Бобишки містять більше матеріалу і розширюються у більшій мірі, порівняно до інших частин спідниці поршня, що є добре відомим і враховується при профілюванні функцією $\Delta R_i(h, \theta)$. Отже, у штатній ситуації пошкодження означеної частини бічної поверхні поршня виникати не повинно.

Існують пояснення підвищення локальної температури бобишок через порушення в роботі певних систем чи елементів конструкції ДВЗ. Серед відомих причин, що ведуть до виникнення цієї ситуації, називають порушення режиму згоряння, що призводить до перевантаження підшипників поршневого пальця та (або) залягання поршневого кільця; порушення режиму охолодження поршня оливою через несправність форсунки або недостатній тиск оливи у системі; недостатнє змащування, у т.ч. поршневого пальця в момент запуску ДВЗ; вихід з ладу втулки верхньої головки шатуна або дефект монтажу пальця [25]. Існування таких випадків підтверджуються спостереженням супутніх пошкоджень систем ДВЗ, задирання на поверхні пальця чи отворів бобишок, кольорів мінливості поверхонь пальця.

Проте, також відомими є випадки, коли пошкодження в зоні 10 можуть виникати для двигуна за відсутності жодної з перерахованих вище обставин. Експериментальні дані [31], що отримані в контрольованих умовах на стенді, свідчать про виникнення явища на штатних режимах роботи двигуна, при дотриманні умов достатнього змащування і відсутності порушень роботи з'єднання поршня з поршневим пальцем. Методика профілювання бічної поверхні поршня у цьому дослідженні урахувувала всі відомі чинники, що визначають зазор.

Втрата надійності бічної поверхні поршня в зоні пальцевого отвору в попередніх роботах [27,40-44] базувалась на аналізі теплонапруженого стану поршнів в пружній постановці. Така постановка лише дозволяє встановити, чи був перевищений поріг повзучості, а також деформації у випадку, коли цього не відбулося.

Таким чином встановлено, що *виникнення настирання чи задирання бічної поверхні поршня в зоні бобишок пальцевого отвору не пояснено вичерпно в існуючій системі наукових поглядів*. Виникнення відповідної втрати надійності виявляється непрогнозованим.

В процесі експлуатації двигуна для більшості випадків втрати параметричної чи фізичної надійності поршня можна запобігти шляхом діагностування параметрів систем впуску, паливостачання, випуску, змащення, охолодження [22], застосуванням

методів вібродіагностування [45], на основі впровадження технології цифрових двійників ДВЗ [46]. Підкреслимо, ці підходи є дієвими при вірному трактуванні факторів впливу та фізичних явищ, якими вони спричинені, тобто для випадків прогнозованої поведінки системи.

Висування гіпотези щодо причин описаного явища втрати надійності є необхідним як для впевненого діагностування, так і для розробки заходів його запобігання на стадії проектування форсованих двигунів.

Формулювання цієї гіпотези та попереднє визначення шляхів вирішення проблеми забезпечення надійності бічної поверхні поршнів високофорсованих ДВЗ є задачею цієї роботи.

Удосконалення методики визначення параметричної та фізичної надійності бічної поверхні поршня шляхом залучення критерію порогу повзучості незміцненого та зміцненого у часі матеріалу і пошук коефіцієнтів математичної моделі опису повзучості для сплаву АК4, здійснені докторантом PhD Ликовим С.В. [44] для двигунів меншої питомої потужності, заклали основу подальшого наукового пошуку у цьому напрямі.

Викладення гіпотези

Висувається гіпотеза, що настання чи ненастання втрати надійності в процесі деформування локальної зони бічної поверхні поршня при нерівномірному розширенні спідниці пов'язане з явищем повзучості матеріалу і одночасної релаксації напружень при можливому зміцненні матеріалу за властивістю повзучості.

В залежності від рівня температури, напруження і властивостей матеріалу може мати місце випадок пружного деформування або тривалого в часі деформування внаслідок повзучості.

Формування наведених поглядів базується на раніше виконаних роботах [40-44,47,48], аналіз теплонапруженого стану поршнів в яких виконано в пружній постановці.

Розглянемо принципові схеми можливих випадків деформування певної локальної зони бічної поверхні поршня, що подані на рис. 2-4. Вони представляють собою діаграми в координатах напружень σ та деформацій в радіальному напрямку поршня R . Для спрощення представлення зміни зазору установчий зазор $\Delta R_{уст.}$ в холодному ненавантаженому стані ДВЗ та поточний зазор в навантаженому стані відповідають положенню поршня в середній частині циліндру з його нульовим нахилом – при співпадінні осі поршня з віссю циліндра. Умовою втрати надійності вважається торкання поверхнею поршня гі-

льзи циліндру. Гідродинамічний шар оливи не враховується. Ці припущення не впливають на перебіг процесу деформування, що досліджується.

На рис. 2 представлено процес деформування бічної поверхні поршня в пружній постановці.

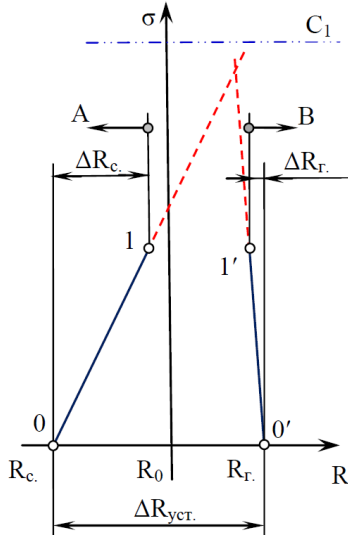


Рис. 1. Деформування локальної зони бічної поверхні поршня в умовах пружних деформацій

Тут і на подальших рисунках цифрами без штриха позначено напружено-деформовані стани спідниці поршня, зі штрихами – гільзи циліндру. При навантаженні двигуна від холодного ненавантаженого стану 0, 0' при локальних радіусах спідниці

R_c та гільзи R_r до найбільш навантаженого режиму 1, 1' мають місце деформації спідниці ΔR_c та гільзи ΔR_r . Поточний зазор є мінімальним, що спостерігається при штатній надійній роботі означеної пари тертя. Зношення спідниці в напрямі А та гільзи в напрямі В збільшує поточний зазор, що з часом призведе до прогнозованої втрати параметричної надійності пари тертя.

Порушення в роботі певних систем чи елементів конструкції ДВЗ призводить до зменшення поточного зазору, що подано пунктирними лініями. Ситуація втрати надійності в умовах пружних деформацій відбудеться, якщо зазор стане нульовим або від'ємним при напруженнях, нижчих за межу повзучості матеріалу поршня, умовно позначену лінією C_1 .

Зростання температур та напружень в межах певних локальних зон h, θ при підвищенні рівнів форсування двигунів може привести до ситуації, коли рівень теплової напруженості конструкції перевищить поріг повзучості застосованого матеріалу. Розгляд такої ситуації щодо поверхні камери згоряння поршня подано, наприклад, в роботі [28]. Розглянемо процеси деформування бічної поверхні поршня в умовах повзучості.

Можливі випадки деформування бічної поверхні поршня для матеріалів, що не зміцнюються в процесі повзучості, або це зміцнення є несуттєвим, подані на рис. 3.

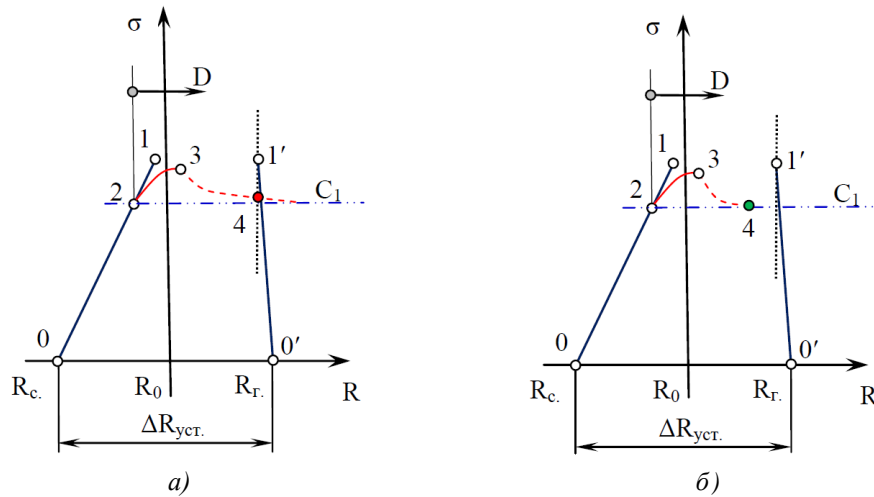


Рис. 3. Деформування локальної зони бічної поверхні поршня для матеріалів, що не зміцнюються в процесі повзучості

Тут, при досягненні порогу повзучості матеріалу поршня в точці 2 при подальшому підвищенні рівня напруження деформація розглянутої зони бічної поверхні відбувається не у напрямі 2-1, а за лінією 2-3, тобто збільшується порівняно до пружного

випадку. При цьому внаслідок релаксації напружень, що відбувається при деформуванні в умовах повзучості, напруження в розглянутій локальній зоні на найбільш навантаженому режимі (в стані 3)

буде меншим від напруження стану 1, отриманому у випадку виключно пружної деформації.

В подальшому на стаціонарному режимі роботи двигуна під дією процесу повзучості деформація бічної поверхні не припиняється, розвиваючись у напрямі D , що відповідає радіальному напрямку поршня R . Поточний зазор між поршнем та гільзою в процесі експлуатації двигуна зменшується. Водночас внаслідок релаксації напружень величина напруження на стаціонарному режимі роботи двигуна зменшується за лінією 3-4. Звернемо увагу, що крива процесу 3-4 при цьому наближається до порогу повзучості C_1 . В результаті може мати місце два принципово відмінних практичних результати, поданих як рис. 3 а та рис. 3 б.

На рис. 3 а подано випадок, коли стан втрати надійності при нульовому зазорі настає раніше, ніж крива процесу 3-4 зустрічається з порогом повзучості.

На рис. 3 б подано випадок, коли крива процесу 3-4 досягає порогу повзучості C_1 при додатному значенні зазору. Процес повзучості та зміна величини

зазору зупиняється. Величина зазору при цьому відповідає відстані між точками станів 4 та 1' в радіальному напрямі R . Таким чином, процес деформування розглянутої зони внаслідок повзучості може зупинитися самостійно навіть для матеріалів, що не зміцнюються в процесі повзучості.

Розглянемо можливі випадки деформування бічної поверхні поршня для матеріалів, що зміцнюються в процесі повзучості. До таких матеріалів, зокрема, відносяться поршневі алюмінієві сплави АЛ25(АК12М2МгН) та АК4 [48]. Випадки деформування бічної поверхні поршня для таких матеріалів подані на рис. 4.

Тут межа повзучості C_2 , що була досягнута теплонапруженим станом в локальній зоні в процесі збільшення навантаження в точці 2 і зображена для температур відповідних станів процесу, в процесі подальшої деформації повзучості змінюється в напрямку більших напружень. Відповідно, в процесі навантаження двигуна лінією 2-3 і далі на стаціонарному режимі 3-4 має місце зміцнення матеріалу за властивостями повзучості.

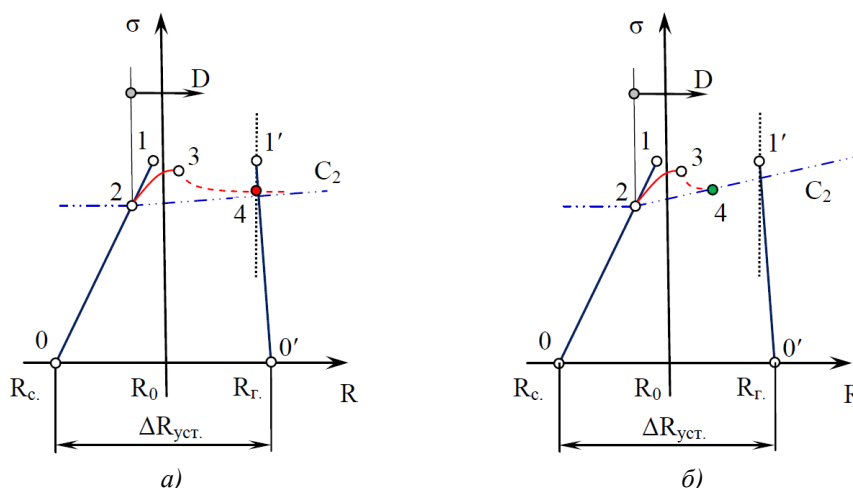


Рис. 4. Деформування локальної зони бічної поверхні поршня для матеріалів, що зміцнюються в процесі повзучості

На рис. 4 а подано випадок, аналогічний до рис. 3 а, коли стан втрати надійності при нульовому зазорі настає раніше, ніж крива процесу 3-4 зустрічається з порогом повзучості. В даному випадку критичний стан конструкції 4 не є залежним від зміцнення матеріалу.

Рис. 4 б відповідає варіанту, коли одночасно відбувається релаксація напружень та збільшення напруження, що відповідає порогові повзучості, до їх зустрічі у стані 4, при якому деформація повзучості припиняється. Зазор між бічною поверхнею поршня та гільзою є додатним і втрати надійності не спостерігається.

Розглянуті випадки пружної та деформації повзучості можуть співіснувати одночасно для різних локальних зон h, θ .

Наведена гіпотеза пояснює втрату надійності в зоні 10 спідниці поршнів форсованих ДВЗ, що може спостерігатися. У ряді практичних випадків мають місце деформації, величини яких не обумовлені у пружній постановці наявним рівнем температур і напружень. Це призводить до появи натирання і задирання невдовзі після початку експлуатації двигуна (згідно з рис. 3 а, 4 а). У ряді випадків процес повзучості припиняється до виникнення критичних

значень зазору, прямо не проявляючи себе в подальшій експлуатації (рис. 3 б, 4 б).

Напрями подальших досліджень

Для наукового підтвердження викладеної гіпотези планується виконання аналізу теплонапруженого та деформованого стану поршнів ДВЗ при рівні форсування конструкцій комерційного призначення та рівні форсування конструкцій спеціального призначення у пружній постановці та з урахуванням процесу повзучості, у вісесиметричній та несиметричній постановках, на стаціонарних режимах та в перехідних процесах навантаження двигунів як в процесі обкатки, так і в подальшій експлуатації. Такий підхід повною мірою відповідає стратегіям Індустрії 4.0 та Індустрії 5.0, якими передбачено широке використання технологій моделювання процесів і явищ та сучасних можливостей ІТ-технологій.

Попередня оцінка фізики процесів і явищ дозволила сформувати три принципові шляхи підвищення надійності бічної поверхні поршня в зоні пальцевого отвору. Перший пов'язаний із забезпеченням рівня локальних напружень нижче межі повзучості. Другий – завершення процесу повзучості до набуття зазором критичних значень. Третій, можливий для матеріалів, що здатні до зміцнення за властивістю повзучості, полягає в досягненні цього зміцнення до виникнення процесів повзучості в експлуатації.

Один з можливих напрямів відповідно до третього шляху підвищення надійності реалізованих на сьогодні полягає у обробці поршня на тепловому стенді для модифікації матеріалу від рівня повзучості незміцненого стану до рівня порогу повзучості зміцненого стану [44].

Наукове обґрунтування досягнення результату за визначеними шляхами в подальшій роботі планується здійснити комплексом стадій життєвого циклу конструкції, а саме під час проектування, виготовлення, обкатувальних випробувань. Планується сформулювати методологію забезпечення надійності конструкції в експлуатації через впровадження нових підходів, технологій, методів та засобів в процесі виготовлення на етапах термічної та механічної обробки поршня.

Висновки

Забезпечення надійності роботи поршнів форсованих ДВЗ є одним із головних трендів у світовому двигунобудуванні спеціального призначення, у т.ч. танкового двигунобудування. Але розробка науково-технічних концепцій уникнення явищ натирання і задирання спідниці поршня поблизу пальцевого отвору є ще не вирішеною гостро актуальною проблемою. Для формування шляхів утворення

означених концепцій однією із головних задач є наукове пояснення природи явища виникнення натирання і задирання спідниці поршня поблизу пальцевого отвору, та факторів, що його зумовлюють.

Втрата надійності бічної поверхні поршня в зоні пальцевого отвору на сьогодні базується на аналізі теплонапруженого стану поршнів в пружній постановці з оцінкою порогу повзучості матеріалу. Тому виникнення натирання чи задирання бічної поверхні поршня не пояснено вичерпно в існуючій системі поглядів.

Висунуто гіпотезу щодо умов появи чи відсутності явищ втрати надійності в локальній зоні бічної поверхні в процесі деформування в умовах повзучості і одночасної релаксації напружень при можливому зміцненні матеріалу за властивістю повзучості.

Показано, що процес деформування розглянутої зони внаслідок повзучості може зупинитися навіть для матеріалів, що не зміцнюються за властивістю повзучості.

Окреслено принципові шляхи підвищення надійності бічної поверхні поршня, пов'язані з забезпеченням рівня локальних напружень нижче межі повзучості, забезпеченням завершення процесу повзучості до набуття зазором критичних значень, а також досягненні зміцнення матеріалу за властивістю повзучості, для матеріалів здатних до цього, до виникнення процесів повзучості в експлуатації.

Подальший напрямок робіт пов'язаний з розробкою нової методології забезпечення надійності конструкції в експлуатації через впровадження нових підходів, технологій, методів та засобів в процесі виготовлення на етапах термічної та механічної обробки поршня.

Список літератури:

1. *The Future of the Combustion Engine / Assessment of the Diesel Engine Situation. Wissenschaftliche Gesellschaft für Kraftfahrzeug- und Motorentechnik e.V. (WKM). – 2017. Available at: <https://www.wkm-ev.de/images/20170708-englisch-Die-Zukunft-des-Verbrennungsmotors.pdf>*
2. Reitz R.D. *IJER editorial: The future of the internal combustion engine / R.D. Reitz, H. Ogawa, R. Payri, T. Fansler et al. // International Journal of Engine Research. – 2019. – № 21(1), P. 3-10. doi: <https://doi.org/10.1177/1468087419877990>*
3. Парсаданов І.В. *Двигуни внутрішнього згоряння і навколишнє середовище / І.В. Парсаданов, А.П. Марченко, О.П. Строков // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2022. – №2, – С. 3-12. doi: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2022.2.01>*
4. Kunz A. *Development trends in armored weaponry / A. Kunz // Scientific Journal of the Military University of Land Forces. – 2020. – Vol. 52, № 2 (196), – P.339–351. doi: [10.5604/01.3001.0014.2537](https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.2537)*
5. *Factsheet. Delivering the European Green Deal. – 2021. Available at: <https://commission.europa.eu/publications/delivering-european-green->*

- deal_en б. Про внесення змін до Податкового кодексу України щодо встановлення ставки нуль гривень екологічного податку за викиди двоокису вуглецю для установок, якими здійснюються такі викиди в результаті спалювання біопалива [Електронний ресурс] : Проект Закону України № 9596. Очікує розгляду : станом на 25.08.2023р. – Режим доступу : <https://www.kmu.gov.ua/bills/proekt-zakonu-pro-vnesennya-zmin-do-podatkovogo-kodeksu-ukraini-shchodo-vstanovlennya-stavki-nul-griven-ekologichnogo-podatku-za-vikidi-dvookisu-vugletsyu-dlya-ustanovok-yakimi-zdiysnyatsya-taki-vikidi-v-rezultati-spaluvannya-biopaliwa> (дата звернення: 30.05.2024).
7. Karimi M. Status, challenges and opportunities of dual fuel hybrid approaches-a review / M. Karimi, X. Wang, J. Hamilton, M. Negnevitsky, and S. Lyden // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2021. – Vol. 46, Is. 70, – P. 34924-34957. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.08.008>
 8. Ravikumar D. The environmental opportunity cost of using renewable energy for carbon capture and utilization for methanol production / D. Ravikumar, G. Keoleian, S. Miller // *Applied Energy*. – 2020. – Vol. 279, 115770, – P. 1-12, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115770>
 9. Li J. Continuous ammonia synthesis from water and nitrogen via contact electrification / J. Li, Y. Xia, X. Song, B. Chen, R. N. Zare // *Proceedings of the National Academy of Sciences*. – 2024. – Vol. 121, № 4, e2318408121, doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.2318408121>
 10. Parsadanov I. V. Increasing the efficiency of intra-cylinder catalysis in diesel engines / I. V. Parsadanov, N. D. Sakhnenko, M. V. Ved, I. V. Rykova, V. A. Khyzhniak, A. V. Karakurkchi, A. S. Gorokhivskiy // *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. – 2017. – № 6, – pp. 75-81. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vchem_2017_6_14
 11. Marchenko A. Estimation of strength of the combustion chamber of the ICE piston with a TBC layer / A. Marchenko, V. Pylyov, O. Linkov // In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds) *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering* – 2020. *Lecture Notes in Networks and Systems*, Springer, Cham. – 2021. – Vol. 188, – pp. 415-426. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-66717-7_35
 12. Sick V. The need for and path to harmonized life cycle assessment and techno-economic assessment for carbon dioxide capture and utilization / V. Sick, K. Armstrong, G. Cooney, L. Cremonese, A. Eggleston, G. Faber et al. // *Energy Technology*. – 2019. – Vol. 8, Is.11, 1901034. doi: <https://doi.org/10.1002/ente.201901034>
 13. Managing our footprint. Circular carbon economy // Saudi Arabian Oil Co. – 2024 (accessed on 30.05.2024). Available at: <https://www.aramco.com/en/sustainability/climate-change/managing-our-footprint/circular-carbon-economy>
 14. Grundy J. AVCR 1360-2 High Specific Output-Variable Compression Ratio Diesel Engine / J. Grundy, L. Kiley, E. Brevick // *SAE Technical*. – 1976. – Paper 760051. doi: <https://doi.org/10.4271/760051>
 15. Марченко А. П. Двигуни внутрішнього згоряння : серія підручників у 6 т. Т. 1: Розробка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин / А. П. Марченко, М. К. Рязанцев, А. Ф. Шеховцов ; ред.: А. П. Марченко, А. Ф. Шеховцов. – Харків : Прапор, 2004. – 384 с.
 16. Ogorkiewicz R. M. Armored vehicles power-up with new smaller diesel-electric packs / R. M. Ogorkiewicz // *Janes International Defense Review*. – 2001. – № 34(6), P. 71-3.
 17. Серія двотактних дизельних двигунів 6ТД // *Ukrainian Military Pages*. – 2016 (accessed on 30.05.2024). Available at: <https://www.ukrmilitary.com/2016/06/engine-6td.html>
 18. MTU Diesel Drive Systems for Military Vehicles [Electronic resource] // *DT Medya Ltd*. – 2008. – Vol. 3, Is. 12. (accessed on 30.05.2024). Available at: <https://www.defenceturkey.com/en/content/mtu-diesel-drive-systems-for-military-vehicles-284>
 19. Ткачук М. А. Аналіз конструкцій, моделей та методів дослідження динаміки високооборотових елементів танкових двигунів (оглядова стаття) / М. А. Ткачук, С. О. Назаренко, А. В. Грабовський, М. М. Ткачук, О. Ю. Шуть, А. І. Лінейко та ін. // *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. Сер. : *Машинознавство та САПР* = *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Ser. : *Engineering and CAD* : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2023. – № 2. – С. 69-105. Available at: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/72437>
 20. Piancastelli L. Electric Hybrid Powertrain for Armored Vehicles / L. Piancastelli, M. Toccaceli, M. Sali, C. Leon-Cardenas, E. Pezzuti // *Energies*. – 2023. – Vol. 16(6), 2605. doi: 10.3390/en16062605
 21. Hybrid And Over 1100 Kw Strong: Rolls-Royce Presents New MTU Propulsion Concepts For Military Vehicles Of The Future [Electronic resource] // *Rolls-Royce Power Systems AG*. – 2024. (Posted on 17.06.2024). Available at: <https://www.mtu-solutions.com/eu/en/pressreleases/2024/hybrid-and-over-1100-kw-strong-rolls-royce-presents-new-mtu-propulsion-concepts-for-military-vehicles-of-the-future.html>
 22. Liu Z. et al. (2023). *Research Progress and Development Trend of Prognostics and Health Management Key Technologies for Equipment Diesel Engine* / Z. Liu, C. Zhang, E. Dong, R. Wang, S. Li, Y. Han // *Processes*. – 2023, – Vol. 11, № 7:1972. doi: <https://doi.org/10.3390/pr11071972>
 23. Failure analysis // *DFCdiesel*. – 2024. (accessed on 30.05.2024). Available at: <http://www.dfc diesel.com/warranty-info/failure-analysis>
 24. Waldhauer B. Piston damage – Recognizing and rectifying / B. Waldhauer, U. Schilling, S. Schnaibel, J. Szopa. Editors: U. Schilling, A. Schäfer // *MS Motorservice International GmbH*. – 1 Edition. – Part-No 50 003 973-02, Date 04.08. – 103 p.
 25. Piston damage – recognizing and rectifying / Edited by: *Motorservice, Technical Market Support* // *MS Motorservice International GmbH*. – 50 003 973-02 – EN – 07/15 (012020), – 92 p.
 26. Влияние химической неоднородности отливки поршня из сплава АК12М2МГН (АЛ25) на задиорообразование в цилиндропоршневой группе / Булаков 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
 27. Марченко А. П. Концептуальні положення щодо забезпечення надійності поршнів форсованих дизелів протягом заданого ресурсу / А. П. Марченко, О. Ю. Ліньков, В. В. Пильов, С. В. Люков, Р. Ариан, В. О. Пильов // *Двигуни внутрішнього згоряння = Internal Combustion Engines*. – 2022. – № 1. – С. 3-12. doi: 10.20998/0419-8719.2022.1.01
 28. 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 et al. // *Proceedings of 24th International Scientific Conference Transport Means*. – Kaunas. – 2020. – Part 1. – P 107–113.
 29. Білогуб О. В. Профілювання зовнішньої поверхні поршня / О. В. Білогуб // *Двигуни внутрішнього згоряння = Internal Combustion Engines*. – 2023. – № 2. – С. 20-25. doi: 10.20998/0419-8719.2023.2.03
 30. Zabala B. Friction and wear of a piston ring/cylinder liner at the top dead centre: Experimental study and modelling / B. Zabala, A. Igartua, X. Fernández, C. Priestner, H. Ofner, O. Knaus, M. Abramczuk, P. Tribotte, F. Girot, E. Roman, R. Nevshupa // *Tribology International*. – 2017. – Volume 106. – P. 23-33. doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.10.005>
 31. Алехин

- C. A. 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.
32. Лыков С. В. Шатунно-поршневая группа двигателей для бронетанковой техники / С. В. Лыков // Двигатели внутреннего сгорания. – 2006. – №1. – С. 17-23. 33. Kang J. Investigation of Friction Loss Characteristics of Engine Pistons for Different Engine Operating Conditions / J. Kang, J. Cho, S. Park // Int.J Automot. Technol. – 2023. – Vol.24, – P. 503–51. <https://doi.org/10.1007/s12239-023-0042-5>
34. Zhang J. Low-Friction and -Knocking Diesel Engine Cylindrical-Tapered Bore Profile Design / J. Zhang, N. Wang, J. Wang, H. Wang, X. Zhang, H. Dai, J. Lin // Energies. – 2024. – Vol. 17, – № 9 : 2042. <https://doi.org/10.3390/en17092042>
35. Kikuhara K. Effects of a Cylinder Liner Microstructure on Lubrication Condition of a Twin-Land Oil Control Ring and a Piston Skirt of an Internal Combustion Engine / K. Kikuhara, P. S. Koester, T. Tian // Tribology Letters – 2022. – Vol. 70, – № 6. <https://doi.org/10.1007/s11249-021-01546-3>
36. Москаленко И. Н. Обзор методов профилирования юбок поршней / И. Н. Москаленко, В. Н. Доценко, А. В. Белозуб // Двигатели внутреннего сгорания. – 2013 – № 2. – С. 75–87. 37. Доценко В. Н. Методика проектирования профиля поршня ДВС / В.Н. Доценко, А.В. Белозуб, И.Н. Москаленко // Вестник двигателестроения. – 2015. – № 1. – С. 74-80. 38. Totaro P. Introducing a New Piston Skirt Profile to Reduce Engine Friction / P. Totaro, Z. Westerfield, T. Tian // SAE Technical Paper. – 2016. Technical Paper 2016-01-1046. <https://doi.org/10.4271/2016-01-1046>.
39. Ye Z. An experimental investigation of piston skirt scuffing: a piston scuffing apparatus, experiments, and scuffing mechanism analyses / Z. Ye, C. Zhang, Y. Wang, H. S. Cheng, S. Tung, Q. J. Wang, X. He // Wear. – 2004. – Vol. 257, Is. 1–2, – P. 8-31. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00538-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00538-6)
40. Пылев В. А. Повышение надежности поршня форсированного быстроходного дизеля / В. А. Пылев, А. В. Белозуб, О. Ю. Лыньков, В. В. Пылев, С. В. Лыков [и др.] // Двигатели внутреннего сгорания. – 2016. – № 2. – С. 55-58. doi: 10.20998/0419-8719.2016.2.10. 41. Лыньков О. Ю. Удосконалення моделі прогнозування надійності теплонапружених зон поршнів високофорсованих ДВЗ / О. Ю. Лыньков, В. В. Пылев, С. В. Лыков // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я = Information technologies: science, engineering, technology, education, health : тези доп. 30-ї Міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2022, 19-21 жовтня 2022 р. / ред. Є. І. Сокол ; уклад. Г. В. Лісачук. – Харків : НТУ "ХПИ", 2022. – С. 103.
42. Марченко А. П. Оцінка теплонапруженого стану поршнів ДВЗ з урахуванням порогу повзучості їх бічної поверхні / А. П. Марченко, О. Ю. Лыньков, В. В. Пылев, С. В. Лыков // Двигуни внутрішнього згорання = Internal Combustion Engines. – 2023. – № 2. – С. 3-13. doi: 10.20998/0419-8719.2023.2.01 43. Linkov O. Assessment of the Parametric Reliability of the Side Surface of the Diesel Engine Piston during Its Design / O. Linkov, A. Marchenko, V. V. Pylyov, S. Lykov // Proceedings of the 27th International Scientific Conference Transport Means. – Kaunas. – 2023. – Part I. – P. 340-346. Doi: 10.5755/e01.2351-7034.2023.P1.
44. Лыков С. В. Забезпечення надійності поршня форсованого транспортного дизеля шляхом врахування повзучості матеріалу [Електронний ресурс] : дис. ... д-ра філософії : спец. 142 : галузь знань 14 / Сергій Валентинович Лыков ; наук. керівник Марченко А. П. ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків, 2024. – 144 с. 45. Moosavian A. Piston scuffing fault and its identification in an IC engine by vibration analysis / A. Moosavian, G. Najafi, B. Ghobadian, M. Mirsalim, S. M. Jafari, P. Sharghi // Applied Acoustics. – 2016, – Vol. 102, – P. 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.09.002>
46. Minchev D. Marine Diesel Engines Operating Cycle Simulation for Diagnostics Issues / D. Minchev, R. Varbanets, N. Aleksandrovskaya, L. Pisintsaly // Acta Polytechnica. – 2021. – Vol. 61, – № 3. doi: 10.14311/AP.2021.61.0435. 47. Лыньков О. Ю. Методика визначення порогу повзучості матеріалу поршня для оцінки параметричної надійності його бічної поверхні / О. Ю. Лыньков, В. В. Пылев, С. В. Лыков, В. О. Пылев // Двигуни внутрішнього згорання = Internal Combustion Engines. – 2022. – № 2. – С. 56-61. doi: 10.20998/0419-8719.2022.2.10. 48. Пылев В. О. Порівняння порогу повзучості поршневих алюмінієвих сплавів з урахуванням їх зміцнення в часі / В. О. Пылев, О. Ю. Лыньков, С. В. Лыков // Двигуни внутрішнього згорання = Internal Combustion Engines. – 2023. – № 1. – С. 18-24. doi: 10.20998/0419-8719.2023.1.03.

Bibliography (transliterated):

- (2017), "The Future of the Combustion Engine / Assessment of the Diesel Engine Situation", Wissenschaftliche Gesellschaft für Kraftfahrzeug- und Motorentechnik e.V. (WKM), available at: <https://www.wkm-ev.de/images/20170708-englisch-Die-Zukunft-des-Verbrennungsmotors.pdf>
- Reitz, R.D., Ogawa, H., Payri, R., Fansler, T. et al. (2019), "IJER editorial: The future of the internal combustion engine", International Journal of Engine Research, No 21(1), pp. 3-10. doi: <https://doi.org/10.1177/1468087419877990>
- Parsadanov, I.V., Marchenko, O.P., Stokov, O.P. (2022), "Internal combustion engines and environment", Internal combustion engines ["Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia i navkolyshnie seredovyshe"], Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia, No 2, pp. 3-12. doi: <https://doi.org/10.20998/0419-8719.2022.2.01>
- Kunz A. (2020), "Development trends in armored weaponry", Scientific Journal of the Military University of Land Forces, Vol. 52, No 2 (196), pp.339–351. doi: 10.5604/01.3001.0014.2537
- (2021), "Factsheet. Delivering the European Green Deal", available at: https://commission.europa.eu/publications/delivering-european-green-deal_en
- "On amendments to the Tax Code of Ukraine regarding the establishment of a zero hryvnia environmental tax rate for carbon dioxide emissions for installations that produce such emissions as a result of burning a biofuel : Draft Law of Ukraine No 9596", as of 08/25/2023 is awaiting consideration ["Pro vnesennia zmin do Podatkovoho kodeksu Ukrainy shchodo vstanovlennia stavky nul hryven ekologichnoho podatku za vykydy dvoookysu vuhletsiu dlia ustanovok, yakymy zdiisniuutsia taki vykydy v rezultati spaljuvannia biopalyva"] : Proekt Zakonu Ukrainy No 9596", ochukiue rozghliadu stanom na 25.08.2023r], available at: <https://www.kmu.gov.ua/bills/proekt-zakonu-pro-vnesennya-zmin-do-podatkovogo-kodeksu-ukraini-shchodo-vstanovlennya-stavki-nul-griven-ekologichnoho-podatku-za-vykidy-dvoookysu-vugletsyu-dlya-ustanovok-yakimi-zdiys>
- Karimi, M., Wang, X., Hamilton, J., Negnevitsky, M., Lyden, S. (2021), "Status, challenges and opportunities of dual fuel hybrid approaches-a review", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 46, Is. 70, pp. 34924-34957. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.08.008>
- Ravikumar, D., Keoleian, G., Miller, S. (2020), "The environmental opportunity cost of using renewable energy for carbon capture and utilization for methanol production", Vol. 279, 115770, pp. 1-12. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115770>
- Li, J., Xia, Y., Song, X., Chen, B., Zare, R. N. (2024), "Continuous ammonia synthesis from water and nitrogen via contact electrification", Proceedings of the National Academy of Sciences, Vol. 121, No 4, e2318408121. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.2318408121>
- Parsadanov, I. V., Sakhnenko, N. D., Ved, M. V., Rykova, I. V., Khyzhiak, V. A.,

- Karakurkchi, A. V. et al. (2017), "Increasing the efficiency of intra-cylinder catalysis in diesel engines", *Issues of chemistry and chemical technologies [Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii]*, No 6, pp. 75-81, available at: http://nbw.gov.ua/UJRN/Vchem_2017_6_14
11. Marchenko, A., Pylyov, V., Linkov, O. (2021), "Estimation of strength of the combustion chamber of the ICE piston with a TBC layer" In "Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2020. Lecture Notes in Networks and Systems", edited by M. Nechyporuk, V.Pavlikov, D. Kritskiy, Springer, Cham, Vol. 188, pp. 415–426. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-66717-7_35
12. Sick, V., Armstrong, K., Cooney, G., Cremonese, L., Eggleston, A., Faber, G. et al. (2019), "The need for and path to harmonized life cycle assessment and techno-economic assessment for carbon dioxide capture and utilization", *Energy Technology*, Vol. 8, Is.11, 1901034. doi: <https://doi.org/10.1002/ente.201901034>
13. (2024), "Managing our footprint. Circular carbon economy", Saudi Arabian Oil Co., available at: <https://www.aramco.com/en/sustainability/climate-change/managing-our-footprint/circular-carbon-economy>.
14. Grundy, J., Kiley, L., Brevick, E. (1976), "AVCR 1360-2 High Specific Output-Variable Compression Ratio Diesel Engine", SAE Technical Paper 760051. doi: <https://doi.org/10.4271/760051>
15. Marchenko, A. P., Riazantsev, M. K., Shekhovtsov, A. F. (2004), "Internal combustion engines: a series of textbooks in 6 vol. Vol. 1: Development of the design of boosted engines of ground transport vehicles" ["Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia : seriia pidruchnykiv u 6 t. T. 1: Rozrobka konstruktzii forsovanykh dvyhuniv nazemnykh transportnykh mashyn"], edited by A. P. Marchenko, A. F. Shekhovtsov, Prapor, Kharkiv, 384 p. 16. Ogorkiewicz, R. M. (2001), "Armored vehicles power-up with new smaller diesel-electric packs", *Janes International Defense Review*, No 34(6), pp. 71-3. 17. (2016), "A series of two-stroke diesel engines 6TD" ["Seriia dvotaknykh dyzelnykh dvyhuniv 6TD"], *Ukrainian Military Pages*, available at: <https://www.ukrmilitary.com/2016/06/engine-6td.html>
18. (2008), "MTU Diesel Drive Systems for Military Vehicles", *DT Medya Ltd*, Vol. 3, Is. 12, available at: <https://www.defenceturkey.com/en/content/mtu-diesel-drive-systems-for-military-vehicles-284>
19. Tkachuk, M. A., Nazarenko, S., Hrabovskiy, A., Tkachuk, M. M., Shut, O., Lipeiko, A. et al. (2023), "Analysis of designs, models and methods of studying the dynamics of highrotation elements of tank engines (review article)", *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : Engineering and CAD* ["Analiz konstruktzii, modelei ta metodiv doslidzhenia dynamiky vysokoobertovykh elementiv tankovykh dvyhuniv (ohliadova stattia)", *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "KhPI". Ser. : Mashynoznavstvo ta SAPR*], NTU "KhPI", Kharkiv, No 2, pp. 69-105, available at: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/72437>
20. Piancastelli, L., Toccaceli, M., Sali, M., Leon-Cardenas, C., Pezzuoli, E. (2023), "Electric Hybrid Powertrain for Armored Vehicles", *Energies*, Vol. 16(6), 2605. doi: [10.3390/en16062605](https://doi.org/10.3390/en16062605)
21. (2024), "Hybrid And Over 1100 Kw Strong: Rolls-Royce Presents New MTU Propulsion Concepts For Military Vehicles Of The Future", *Rolls-Royce Power Systems AG.*, available at: <https://www.mtu-solutions.com/eu/en/pressreleases/2024/hybrid-and-over-1100-kw-strong-rolls-royce-presents-new-mtu-propulsion-concepts-for-military-vehicles-of-the-future.html>
22. Liu, Z., Zhang, C., Dong, E., Wang, R., Li, S., Han, Y. (2023), "Research Progress and Development Trend of Prognostics and Health Management Key Technologies for Equipment Diesel Engine", *Processes*, Vol. 11, No 7:1972. doi: <https://doi.org/10.3390/pr11071972>
23. (2024), "Failure analysis", *DFC Diesel*, available at: <http://www.dfc-diesel.com/warranty-info/failure-analysis>
24. Waldhauer, B., Schilling, U., Schnaibel, S., Szopa, J. (4/2008), "Piston damage – Recognizing and rectifying", Part-No 50 003 973-02", 1 Edition, edited by U. Schilling, A. Schäfer, MS Motorservice International GmbH, 103 p. 25. (7/2015), "Piston damage – recognizing and rectifying – 50 003 973-02", edited by Motorservice, Technical Market Support, MS Motorservice International GmbH, 92 p. 26. Bulhakov, V. P., Chebotarev, Y. V., Ruban, Y. N. (2016), "The effect of chemical inhomogeneity of the cast piston made of AK12M2MgN (AL25) alloy on seizure occurrence in the cylinder and piston friction pair", *Bulletin of the State University of the Sea and River Fleet named after Admiral S.O. Makarov* ["Vlyaniye khimicheskoi neodnorodnosti otlyvki porshnia yz splava AK12M2MgN (AL25) na zadyroobrazovanye v tsylindroporshnevoi hruppe"] *Vestnyk Hosudarstvennogo unyversyteta morskoho y rechnoho flota ymeny admyrala S.O. Makarova*, Is. 5 (39), pp. 151-158. doi: [10.21821/2309-5180-2016-8-5-151-158](https://doi.org/10.21821/2309-5180-2016-8-5-151-158)
27. Marchenko, A. P., Linkov, O. Y., Pylov, V. V., Lykov, S. V., Aryan, R., Pylyov V. O. (2022), "Conceptual issues on ensuring the reliability of a forced diesel engines pistons during a given resource", *Internal Combustion Engines* ["Kontseptualni polozhennia shchodo zabezpechennia nadiinosti porshniv forsovanykh dyzeliv protiahom zadanoho resursu"], *Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia*, No 1, pp. 3-12. doi: [10.20998/0419-8719.2022.1.01](https://doi.org/10.20998/0419-8719.2022.1.01)
28. Pylyov, V. O., Linkov, O., Samoilenko, D., Kravchenko, S. O., Pylyov, V.V., Mordivintseva I. et al. (2020), "The influence of load modes on the resource reliability of engine parts of agricultural machinery", *Proceedings of 24th International Scientific Conference Transport Means, Part 1, Kaunas*, pp. 107–113. 29. Bilohub, O. V. (2023), "Profiling of the outer surface of the piston", *Internal Combustion Engines* ["Profiluvannia zovnishnoi poverkhni porshnia"], *Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia*, No 2, pp. 20-25. doi: [10.20998/0419-8719.2023.2.03](https://doi.org/10.20998/0419-8719.2023.2.03)
30. Zabala, B., Igartua, A., Fernández, X., Priestmer, C., Ofner, H., Knaus, O. et al. (2017), "Friction and wear of a piston ring/cylinder liner at the top dead centre: Experimental study and modelling", *Tribology International*, Volume 106, pp. 23-33. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.10.005>
31. Alyokhin, S. A., Lykov, S. V., Pylyov, V. O. (2013), "Analysis of the temperature state of bodies of composite pistons of two-stroke special purpose diesel engines", *Internal Combustion Engines* ["Analiz temperaturnoho sostoiannia korpusov sostavnykh porshnei dvukhtaknykh dyzelei spetsialnogo naznachennia"], *Dvyhately vnutrenneho shoranyia*, No 1, pp. 33-36. 32. Lykov, S. V. (2006), "Connecting rod and piston elements of armored vehicles", *Internal Combustion Engines* ["Shatunno-porshnevaia hruppa dyhatelei dlia bronetankovoi tekhniky"], *Dvyhately vnutrenneho shoranyia*, No 1, pp. 17-23. 33. Kang, J., Cho, J., Park, S. (2023), "Investigation of Friction Loss Characteristics of Engine Pistons for Different Engine Operating Conditions", *Int.J Automot. Technol.*, Vol. 24, pp. 503–51. <https://doi.org/10.1007/s12239-023-0042-5>
34. Zhang, J., Wang, N., Wang, J., Wang, H., Zhang, X., Dai, H., Lin, J. (2024), "Low-Friction and -Knocking Diesel Engine Cylindrical-Tapered Bore Profile Design", *Energies*, Vol. 17, No 9 : 2042. <https://doi.org/10.3390/en17092042>
35. Kikuhara, K., Koeser, P. S., Tian, T. (2022), "Effects of a Cylinder Liner Microstructure on Lubrication Condition of a Twin-Land Oil Control Ring and a Piston Skirt of an Internal Combustion Engine", *Tribology Letters*, Vol. 70, No 6. <https://doi.org/10.1007/s11249-021-01546-3>
36. Moskalenko, Y. N., Dotsenko, V. N., Bilohub, O. V. (2013), "Overview of piston skirt profiling methods", *Internal Combustion Engines* ["Obzor metodov profilyrovannia yubok porshnei"], *Dvyhately vnutrenneho shoranyia*, No 2, pp. 75–87. 37. Dotsenko, V. N., Bilohub, O. V., Moskalenko, Y. N. (2015), "Methodology for designing an ICE piston profile", *Bulletin of ICE Manufacturing* ["Metodyka proektirovannia profylya porshnia DVS"], *Vestnyk dvyhatelestroenyia*, No 1, pp. 74-80. 38. Totaro, P., Westerfield, Z., Tian, T. (2016), "Introducing a New Piston Skirt Profile to Reduce Engine Friction", *SAE Technical Paper, Technical Paper 2016-01-1046*. <https://doi.org/10.4271/2016-01-1046>
39. Ye, Z., Zhang, C., Wang, Y., Cheng, H. S., Tung, S., Wang, Q. J., He, X. (2004), "An experimental investigation of piston skirt scuffing: a piston scuffing apparatus, experiments, and scuffing mechanism analyses", *Wear*, Vol. 257, Is. 1–2, pp. 8-31. [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00538-6](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00538-6)
40. Pylyov, V. O., Belohub, O. V., Linkov, O. Y., Pylyov, V. V., Lykov, S. V. et al. (2016), "Improving the reliability of the piston of high-speed boosted diesel engine", *Internal Combustion Engines* ["Povyshenye nadezhnosti porshnia forsovannoho bystrokhodnogo dyzelia"], *Dvyhately*

vnutremeho shoranyia], No 2, pp. 55-58. doi: 10.20998/0419-8719.2016.2.10. 41. Linkov, O. Y., Pylyov, V. V., Lykov, S. V. (2022), "Improving the model for predicting the reliability of thermal-stressed zones of pistons of boosted diesel engines", *Information technologies: science, engineering, technology, education, health : theses of reports of the 30th International Scientific and practical conference MicroCAD-2022, Oct. 19-21, 2022, edited by Y.I. Sokil* ["Udoskonalennia modeli prohnozuvannia nadiinosti teplonapruzhenykh zon porshniv vysokoforsovanykh DVZ"], *Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia : tezy dop. 30-yi Mizhnar. nauk.-prakt. konf. MicroCAD-2022, 19-21 zhovtnia 2022 r., red. Ye. I. Sokol*, NTU "KhPI", Kharkiv, pp. 103. 42. Marchenko, A. P., Linkov, O. Y., Pylyov, V. V., Lykov, S. V. (2023), "Estimation of the thermally stressed state of internal combustion engine pistons, taking into account the creep threshold of their side surface", *Internal Combustion Engines* ["Otsinka teplonapruzhenoho stanu porshniv DVZ z urakhuvanniam porohu povzuchosti yikh bichnoi poverkhni", *Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia*], No 2, pp. 3-13. 43. Linkov, O., Marchenko, A., Pylyov, V. V., Lykov, S. (2023), "Assessment of the Parametric Reliability of the Side Surface of the diesel engine piston during its design", *Proceedings of the 27th International Scientific Conference Transport Means, Kaunas, Part I*, pp. 340-346. doi: 10.5755/e01.2351-7034.2023.P1. 44. Lykov, S. V. (2024), "Ensuring the reliability of the high-performance transport diesel piston by taking into account the creep of the material: PhD dissertation : specialty 142 – Power

machinary (14 – Electrical engineering)" ["Zabezpechennia nadiinosti porshnia forsovanooho transportnooho dyzelia shliakhom vrakhuvannia povzuchosti materialu: dys. ... d-ra filosofii : spets. 142 – Enerhetychne mashynobuduvannia (haluz znan 14 – Elektrychna inzheneriia)"], NTU "KhPI", Kharkiv, 144 p. 45. Moosavian, A., Najafi, G., Ghobadian, B., Mirsalim, M., Jafari, S. M., Sharghi, P. (2016), "Piston scuffing fault and its identification in an IC engine by vibration analysis", *Applied Acoustics*, Vol. 102, pp. 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.09.002> 46. Minchev, D., Varbanets, R., Aleksandrovska, N., Pisintaly, L. (2021), "Marine Diesel Engines Operating Cycle Simulation for Diagnostics Issues", *Acta Polytechnica*, Vol. 61, No 3. doi: 10.14311/AP.2021.61.0435. 47. Linkov, O. Y., 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", *Internal Combustion Engines* ["Metodyka vyznachennia porohu povzuchosti materialu porshnia dlia otsinky parametrychnoi nadiinosti yoho bichnoi poverkhni", *Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia*], No 2, pp. 56-61. doi: 10.20998/0419-8719.2022.2.10. 48. Pylyov, V. O., Linkov, O. Y., Lykov, S. V. (2023), "Comparison of the creep threshold of piston aluminum alloys with time", *Internal Combustion Engines* ["Porivniannia porohu povzuchosti porshnevykh aliuminiievykh splaviv z urakhuvanniam yikh zmitsnennia v chasi", *Dvyhuny vnutrishnoho zghoriannia*], No 1, pp. 18-24. doi: 10.20998/0419-8719.2023.1.03.

Надійшла до редакції 01.07.2024 р.

Марченко Андрій Петрович – доктор техн. наук, професор, проректор з наукової роботи Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: marchenko@kpi.kharkov.ua, orcid.org/0000-0001-9746-4634.

Пильов Вячеслав Володимирович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теплотехніки та енергоефективних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна, e-mail: viacheslav.pylov@kpi.edu.ua, orcid.org/0000-0002-1514-1020.

THE PROBLEMATICS OF ENSURING THE RELIABILITY OF THE SIDE SURFACE OF THE PISTONS OF BOOSTED ICES

A. P. Marchenko, V. V. Pylyov

Prospective directions and trends in the development of special-purpose engines are analyzed. An increase in swept volume power density of engines leads to a critical raise in thermal and mechanical stress in the engine structural elements and to a corresponding reduction in its resource. Pistons are among the elements of boosted engines that are most prone to failure. Among the characteristic critical zones of the piston design, in which losses of parametric and physical reliability were observed, a separate critical zone on the loaded and unloaded side of the piston skirt near the piston pin bores is singled out. An analysis of publications was carried out and it was shown that the occurrence of the phenomenon of wear or seizures of the side surface of the piston skirt, which is observed for the boosted designs in the specified zone, is not explained exhaustively in the existing system of scientific views. Understanding the causes of the described phenomenon of loss of reliability is necessary for diagnosing and developing measures to prevent it at the design stage. The paper puts forward a hypothesis that explains the occurrence or non-occurrence of the loss of reliability in the process of deformation of the local zone of the side surface of the piston skirt during uneven expansion of the material in presence of creep and simultaneous stress relaxation with possible strengthening of the material by the property of creep limit. The possible cases of deformation of a certain local zone of the side surface of the piston in an elastic setting and in the presence of creep and stress relaxation processes are considered. It is shown that the process of creep deformation in the studied zone can end before the occurrence of reliability loss even for the materials that are unable to be strengthened by the property of creep limit or could be strengthened only insignificantly. The general ways of increasing the reliability of the side surface of the piston are outlined, related to ensuring the level of local stresses being below the creep limit, ensuring the completion of the creep process before the clearance reaches the critical values, as well as achieving strengthening of the material by the property of creep limit, for materials capable of it, before the occurrence of creep in operation.

Keywords: boosted ICEs; side surface of the piston; loss of reliability; creep; stress relaxation; creep limit; ways of increasing reliability.