

С.Ж. Боду, А.В. Новошицький, О.П. Шумілов, В.А. Поліщук

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ДОВГОВІЧНІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ ПАЛИВНОЇ СИСТЕМИ

Проведено системний інженерно-науковий аналіз комплексного набору технологічних чинників, які безпосередньо визначають довговічність, працездатність та надійність елементів паливної апаратури дизельних двигунів внутрішнього згорання. Основна увага зосереджена на отворах розпилювачів форсунок як критичних зонах, що функціонують в умовах значних температурних, гідродинамічних, механічних та хімічних навантажень. Проведено поглиблену оцінку впливу мікрогеометрії, шорсткості внутрішніх поверхонь, залишкових напружень, а також стану вхідних і вихідних кромок отворів на розвиток деградаційних процесів, зокрема кавітації, ерозії, коксування, втомного та термохімічного руйнування. Методологія дослідження базується на комплексному узагальненні сучасних теоретичних підходів, чисельного моделювання, експериментальних спостережень, а також аналізу реальних відмов обладнання. У роботі порівняно ефективність різних методів фінішної обробки: традиційних механічних (свердління, шліфування, притирання) і безконтактних (електроерозійна, електрохімічна, анодно-механічна). Доведено, що безконтактні технології забезпечують високу точність, зниження шорсткості (до $Ra \leq 0,02$ мкм), стабільність геометрії та мінімізацію пошкоджень поверхні. Встановлено, що початкові дефекти, сформовані на ранніх стадіях виготовлення, не усуваються подальшими операціями та знижують надійність форсунок. Наведено кількісні дані про зміни діаметра отворів, коефіцієнта витікання пального, гідродинамічної стабільності та симетрії паливного факела в умовах реальної експлуатації. Сформульовано рекомендації щодо оптимізації технологічного маршруту обробки, вибору матеріалів, контролю мікрорельєфу та залишкових напружень. Запропоновані рішення можуть бути впроваджені в серійне виробництво з метою підвищення ресурсу, зниження частоти відмов і забезпечення довготривалої стабільності дизельної паливної апаратури. Представлені результати мають прикладну цінність для машинобудування, а підхід може бути адаптований до інших типів високонавантажених елементів.

Ключові слова: форсунка; розпилювач; отвори; кавітація; ерозія; мікрогеометрія; залишкові напруження; шорсткість; деградація; ресурс.

Вступ

Підвищення надійності та довговічності паливної апаратури залишається одним із ключових завдань сучасного двигунобудування. Серед елементів паливної системи, які найбільше піддаються навантаженням, форсунок відіграють вирішальну роль. Вони працюють в умовах екстремальних температур, високих тисків і мінімальних зазорів, що створює підвищені вимоги до точності їх виготовлення й стабільності геометричних параметрів.

Наявні дослідження свідчать, що навіть незначні геометричні відхилення в каналах або мікрорельєфі внутрішніх поверхонь отворів форсунок можуть призводити до розвитку кавітації, ерозії, утворення відкладень та, як наслідок, передчасного виходу з ладу. У зв'язку з цим, увага дослідників дедалі більше зосереджується не лише на конструктивних особливостях, але й на технологічних аспектах виробництва – якісних показниках механічної й термічної обробки, параметрах мікро- та макрогеометрії, а також впливі залишкових напружень.

Слід зауважити, що створення конструктивної моделі виробу – це лише початковий етап: її реалізація на практиці повністю залежить від технологічних рішень. Проте саме технологія – від вибору заготовки до фінішної обробки – формує так звану «технологічну якість», яка визначає експлуатаційні властивості деталі. Кожне технологічне рішення мі-

стить у собі певну ступінь невизначеності: існує декілька шляхів досягнення необхідного результату, і не кожен із них гарантує стабільний ресурс.

Більше того, статистика експлуатаційних відмов свідчить, що більшість з них зумовлені саме помилками на етапі технологічного забезпечення. Навіть такі «невидимі» фактори, як стан ріжучого інструменту, режими обробки, спосіб охолодження, тип заготовки чи комбінація видів обробки, впливають на величину залишкових напружень та параметри мікрорельєфу. Саме ці чинники можуть відіграти вирішальну роль у деградації отворів розпилювачів та скороченні міжремонтного ресурсу дизельних двигунів.

Метою даного дослідження є здійснення системного аналізу ключових чинників, що зумовлюють деградацію ресурсу дизельних форсунок, з акцентом на критичну роль стану отворів розпилювачів. Особливу увагу зосереджено на обґрунтуванні технологічних рішень, здатних істотно впливати на подовження строку служби зазначених елементів паливної системи.

Аналіз попередніх досліджень

На сучасному етапі розвитку двигунобудування все більшу увагу приділяють не лише конструктивним характеристикам вузлів паливної апаратури, а й технологічним факторам, які значною мірою визначають їх ресурс. Особливо це стосується

дизельних форсунок, що зазнають складної комбінації навантажень – термічних, гідродинамічних, абразивних, а також впливу агресивного середовища.

Згідно з даними, наведеними у [2], підвищення температури та тривалості роботи суттєво прискорює зношення та деформацію сидла корпусу форсунки. Водночас, термічна обробка, зокрема гартування, може знижувати швидкість розвитку пошкоджень. Дослідження [9] підтвердили, що форма отвору і ступінь гладкості внутрішньої поверхні суттєво впливають на продуктивність двигуна і рівень шкідливих викидів: конічні отвори з меншою шорсткістю зменшують тверді викиди, хоча й збільшують концентрацію NO_x .

У роботі [12] за допомогою сканувальної електронної мікроскопії були виявлені багаточисельні відкладення в отворах форсунок, що змінюють умови розпилення палива та ефективність згоряння. Розвиток кавітації, що нерідко супроводжується ерозійними ушкодженнями, детально досліджено у [7], де за допомогою прозорих моделей та чисельного моделювання було показано, що кавітаційні бульбашки при схлопуванні викликають локальну ерозію саме у критичних зонах отворів.

Вивченню впливу геометрії отворів і їхньої шорсткості на інтенсивність кавітаційних процесів присвячено роботи [13] і [15]. Зменшення цих ефектів можливе шляхом оптимізації конструкції та впровадженням удосконалених методів доведення. У цьому контексті заслуговують на увагу дослідження [4, 11], де аналізується вплив параметрів гідроерозійної обробки на стабільність та ефективність розпилення. Як показано, правильне формування вхідної геометрії отворів дозволяє суттєво знизити кавітацію, покращити паливорозпилення та зменшити екологічне навантаження.

Окремий напрям досліджень стосується контролю дефектів поверхні, що виникають у процесі механообробки: мікротріщин, задирок, овальності та неоднорідностей структури. Так, встановлено критичне значення шорсткості внутрішньої поверхні, після якого істотно зростає інтенсивність кавітаційної ерозії [8]. Це доводить важливість забезпечення стабільної якості поверхні не лише на заключному етапі, але й на попередніх технологічних стадіях.

У роботі [16] змодельовано вплив геометрії сопла і шорсткості стінок на розвиток турбулентних компонентів потоку. Зростання шорсткості призводить до підвищення об'ємної частки пари, що, в свою чергу, сприяє ерозійним процесам. Аналогічно, описано випадок відмови форсунки через кавітаційне пошкодження, що супроводжувалось втом-

ним розтріскуванням металу – типовий приклад акумуляції пошкоджень, що починаються на мікрорівні [1].

Узагальнюючи наявні дані, можна стверджувати: надійність роботи форсунок і зокрема їхніх отворів визначається цілим комплексом чинників, більшість з яких є результатом вибраної технології виготовлення. Формування залишкових напружень, мікрогеометрії та шорсткості – процеси не лише багаточисельні, але й накопичувальні. Похибки, що виникають на ранніх етапах життєвого циклу виробу, часто неможливо компенсувати фінішною обробкою.

Це формує новий виклик: дослідити, які саме технологічні параметри мають критичний вплив на деградацію ресурсу форсунок, як їх можна контролювати або компенсувати, і які рішення здатні забезпечити стабільну якість при серійному виробництві.

Мета та завдання дослідження

Оцінка факторів, що впливають на довговічність отворів форсунок, свідчить про те, що регламентовані геометричні допуски та високі вимоги до точності є лише частковим аспектом загальної проблеми. Визначальний вплив у процесах деградації ресурсу часто мають технологічні чинники, зокрема параметри механічної обробки, залишкові напруження, шорсткість внутрішніх поверхонь і стабільність геометрії країв отворів.

Водночас, саме технологічні фактори залишаються найменш стандартизованими й контрольованими на масовому виробництві. Різноманітність методів, наявність альтернативних шляхів до досягнення однакових геометричних показників та параметрів точності, невизначеність взаємодії суміжних процесів зумовлює потребу в глибшому розумінні їх ролі.

Метою даної роботи є здійснення системного аналізу ключових технологічних чинників, що визначають деградацію ресурсу дизельних форсунок, з акцентом на критичне значення якості обробки отворів розпилювачів. Особливу увагу зосереджено на виявленні та обґрунтуванні таких технологічних рішень, які здатні суттєво впливати на стабільність експлуатаційних характеристик і подовження строку служби вказаних елементів паливної системи.

Для досягнення поставленої мети у дослідженні передбачено вирішення таких завдань:

– Узагальнити та систематизувати результати сучасних досліджень щодо впливу геометричних і мікрогеометричних параметрів отворів на роботу форсунок.

– Проаналізувати технологічні джерела дефектів, що сприяють деградації ресурсних характеристик – зокрема, мікротріщини, заусенці, овальність, нестабільна шорсткість та залишкові напруження.

– Оцінити ефективність сучасних методів фінішної обробки, які дозволяють знизити ймовірність ерозійного пошкодження та коксування отворів, з урахуванням їх практичної реалізованості.

– Встановити взаємозв'язок між якістю отворів та характером зношування, з урахуванням впливу експлуатаційних факторів (склад палива, температура, тиск, вміст домішок).

– Запропонувати практичні рекомендації щодо оптимізації технологічного маршруту виготовлення отворів форсунок з метою підвищення їх довговічності.

Викладення основного матеріалу

Проблема забезпечення довговічності дизельних форсунок у значній мірі зводиться до якості виготовлення їхніх критичних елементів – отворів розпилювачів. Саме ці елементи, що працюють у граничних режимах тиску, температури й швидкості, визначають характер формування паливного факела, а отже – ефективність сумішоутворення і згоряння.

У низці джерел, зокрема [18] стверджується, що досягнення точності отворів розпилювачів на рівні 0,1 мкм потенційно дозволило б подвоїти або навіть потроїти моторесурс дизеля. Однак реалізація такого рівня точності в умовах серійного виробництва залишається малореалістичною. Це пояснюється не лише обмеженнями верстатного парку, але й принциповою нестабільністю параметрів при роботі з отворами діаметром у межах 0,1-1,0 мм – саме такі канали характерні для сучасних розпилювачів.

Виготовлення отворів малого діаметра потребує використання високошвидкісних свердильних верстатів (10 000 об/хв і більше) зі стабілізованим крутним моментом, що забезпечує необхідну точність обробки [10]. Однак навіть при таких підходах виникають труднощі зі збереженням форми інструмента, стабільністю різального процесу та забезпеченням геометричної точності. Зазвичай додатково застосовується прокачування абразивної суспензії або електрохімічне травлення для поліпшення мікрогеометрії. Водночас такі методи не гарантують досягнення належної круглості та циліндричності, що є критичними для стабільного розпилення.

Особливу складність становить не лише отримання необхідного діаметру, а й формування заданого мікрорельєфу отвору. Параметри шорсткості впливають на розвиток кавітації, осадження домішок, а отже і на швидкість деградації сопла. Саме

тому багато дослідників нині розглядають шорсткість як визначальний експлуатаційний критерій, навіть важливіший за абсолютну точність [8].

Для розуміння складності ситуації доцільно провести аналогію з історичним розвитком технології. Інженерне уявлення про точність значно еволюціонувало від початку індустріальної революції. Джеймс Уатт відзначав, що циліндри, виготовлені Джоном Вілкінсоном, мали відхилення в діаметрі не більше товщини старої монети – шилінга (приблизно 2,5 мм). «Пан Вілкінсон просвердлив для нас кілька циліндрів майже без помилки, циліндр діаметром 50 дюймів... не має відхилень більше за товщину старого шилінга в будь-якій частині». Сьогодні досягаються допуски на рівні часток мікрометра, однак це стало можливим завдяки розвитку не лише точності верстатів, а й удосконалення систем контролю, розвитку матеріалознавства, конструкцій інструментів та ін.

Проте навіть за умови доступу до сучасного обладнання – наприклад, координатно-прошивальних електроерозійних верстатів типу Fine Sodick A30R з точністю обробки $\pm 0,005$ мм і шорсткістю до 0,01 мкм Ra [14] – досягнення стабільних результатів вимагає ретельного відпрацювання технології. Крім того, такі системи малопродуктивні та часто економічно недоцільні для великих серій, що зумовлює необхідність пошуку компромісів між точністю, шорсткістю, ресурсом і витратами.

Таким чином, уже на етапі формування отворів розпилювача технолог стикається з багатофакторною задачею: забезпечити необхідну мікрогеометрію в умовах обмеженої стабільності інструменту, високої чутливості результату до умов різання і жорстких вимог до чистоти поверхні. Технологічні похибки, допущені на цьому етапі, рідко можуть бути виправлені в наступних операціях і, як правило, прямо впливають на деградацію ресурсу форсунки.

Якість внутрішньої поверхні отворів розпилювача – один із найкритичніших чинників, що впливає на стабільність процесу впорскування та сумішоутворення. З практичної точки зору, саме шорсткість стінок і стан вхідних та вихідних кромок отвору визначають, наскільки стійким буде факел палива при багаторазовому циклічному навантаженні.

При подачі палива під тиском понад 20 МПа, із тривалістю циклу близько 2 мс, рідина проходить отворами на високій швидкості – іноді зі звуковими параметрами витікання. У таких умовах будь-які нерівності стінок, мікротріщини або задирки стають точками концентрації напружень, а також зонами ініціації відкладень і руйнувань.

Вже після 500-600 годин експлуатації форсунок діаметр соплових отворів збільшується в середньому на 9-10 мкм. При цьому загальне порушення форми спостерігається дещо пізніше – зазвичай після 3000-3500 годин роботи [5, 6]. На вихідних кромках формуються зазубрини, відбувається локальне руйнування металу. Все це негативно позначається на симетрії й дальності факела, що виявляється у зменшенні повноти згоряння, зростанні димності та витрати пального.

Окремої уваги заслуговує явище коксування отворів, що виникає внаслідок утворення осадів на мікронерівностях стінок. У випадках, коли паливо містить домішки (сірку, ванадій, алюмосилікати, воду або механічні частинки) ймовірність формування осадів зростає у кілька разів. У присутності води сірка утворює сірчану кислоту, яка додатково руйнує вихідні кромки отворів. Це підсилює ерозійні процеси та призводить до утворення характерних зон облітерації.

Як показано в [17], гладкість внутрішньої поверхні отворів прямо пов'язана з імовірністю накопичення домішок. Чим менша шорсткість, тим нижча адгезія частинок, і тим стабільніше зберігається пропускна здатність та геометрія каналу. Тобто висока якість поверхні не лише зменшує знос, але й перешкоджає вторинному руйнуванню через осадження продуктів горіння.

Нарешті, змінюється й гідродинаміка потоку: порушення вхідної кромки знижує коефіцієнт витікання (μ_c), що безпосередньо впливає на витрату палива через отвір. Як зазначається у [17], значення μ_c для нових отворів становить 0,6–0,85, тоді як після зносу й деформації падає через утворення вихрових зон, порушення симетрії отвору та зменшення ефективного перерізу.

Таким чином, зношення отворів – це не лише втрата розміру, але й глибока трансформація мікрорельєфу, яка призводить до багаторівневого погіршення робочого процесу. Підвищення димності, зростання витрати палива, зниження коефіцієнтів корисної дії – усе це є наслідком спотворення характеристик розпилення, що починається на рівні мікронерівностей.

Зі зношенням соплових отворів змінюється не лише геометрія каналів, але й гідравлічні характеристики подачі пального. З практичної точки зору, важливим показником є об'ємна витрата палива dv через отвори форсунки у даний момент часу, яка може бути описана рівнянням (1):

$$dv = \mu_c f_c u_c dt, \quad (1)$$

де μ_c – коефіцієнт витікання палива через сопло форсунки; f_c – сумарний ефективний переріз усіх соплових отворів; u_c – швидкість витікання палива з сопел.

За відомого сумарного перерізу соплових отворів і перепаду тиску, при якому відбувається витікання пального, можна визначити коефіцієнт витікання μ_c , який враховує різницю між витратою пального, визначеною за рівнянням Бернуллі, та фактичною витратою, за наступним рівнянням (2):

$$\mu_c f_c = \frac{Q}{\sqrt{2g\Delta p Y_T t}} \text{ мм}^2, \quad (2)$$

де Q – витрата пального через сопло, г/с; $\mu_c f_c$ – ефективний переріз сопла форсунки, мм²; g – прискорення сили тяжіння, см/с²; Δp – перепад тиску між середовищем, куди відбувається витікання, і тиском, при якому відбувається витікання пального, кг/см²; Y_T – питома вага пального, г/см³; t – час витікання, с.

З огляду на критичність якості поверхні соплових отворів, питання вибору оптимального методу фінішної обробки виходить на перший план. Класичні методи, що передбачають механічну обробку після термообробки (свердління, шліфування, притирання), мають низку суттєвих обмежень. Зокрема, силове різання неминуче супроводжується утворенням деформованих поверхневих шарів, мікротріщин, зон термічного впливу, а також залишкових напружень, що негативно позначаються на ресурсі деталі.

Оскільки форсунки потребують високої твердості (до 60 HRC), обробка отворів у матеріалі після гартування є надзвичайно складною. Крім того, у випадках мікроотворів механічна обробка ускладнюється низькою жорсткістю інструменту, зменшенням перерізом і ризиком утворення мікрозадирок.

Альтернативу становлять безконтактні або комбіновані методи, зокрема:

- анодно-механічне полірування, що дозволяє досягати шорсткості на рівні 0,08...0,02 мкм Ra ;
- електрохімічне хонінгування (EXO) – 0,16...0,02 мкм Ra ;
- електрохімічне травлення, яке застосовується як для тонких (анодне), так і товстих плівок (катодне), або у біполярному режимі [19].

Усі зазначені методи мають спільну перевагу: відсутність силового впливу на оброблювану поверхню, що дозволяє уникнути наклепу, локального перегріву та утворення структурних дефектів. Обробка здійснюється за рахунок контрольованого електрохімічного розчинення металу – в першу чергу на вершинах мікронерівностей, де щільність струму вища. Таким чином досягається згладження рельєфу

і формування блискучої, рівномірної поверхні (рис. 1).

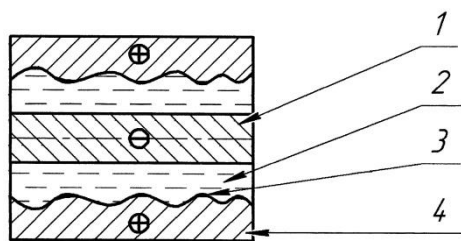


Рис. 1. Принципова схема електрохімічного полірування:

1 – електрод-інструмент; 2 – електроліт;
3 – окисна плівка; 4 – деталь-анод

Втім, навіть ці методи потребують спеціалізованих інструментів – електродів, що дублюють геометрію отвору, а також точного підбору параметрів електроліту, струму і тривалості обробки. У серійному виробництві перевагу часто надають електроерозійній обробці на координатно-прошивальних верстатах, таких як Fine Sodick A30R, здатних забезпечити точність $\pm 0,005$ мм і шорсткість Ra до 0,01 мкм навіть у надтвердих сплавах [14].

Залежно від конкретної мети можуть застосовуватись такі комбінації:

- механічне свердління + ЕХО – для стабілізації мікрогеометрії після грубої обробки;
- електроерозійне прошивання + анодно-механічне полірування – для прецизійної доведення в твердому матеріалі;
- травлення як підготовчий етап перед поліруванням або контрольованим «притупленням» гострих кромки.

Останній аспект особливо важливий. Як показано у низці досліджень [3], гострі вхідні та вихідні кромки соплових отворів – зона підвищеної концентрації напружень, точка зародження кавітації та ерозії. Їхнє локальне притуплення, навіть на рівні кількох мікрометрів, дозволяє суттєво зменшити швидкість розвитку руйнування. Якщо механічне заокруглення кромки утруднене або недоступне, це може бути реалізовано методом ЕХО, що знімає задирки та знижує градієнт тиску на вхідній ділянці.

Таким чином, ефективність форсунки – це не лише результат точної обробки отвору, але й комплексної реалізації цілого маршруту: від способу отримання заготовки до завершального формування мікропрофілю. І саме тут криється основна складність, оскільки технологічна якість формується на кожному етапі життєвого циклу деталі, а не лише на фінальному.

Висновки

Початкова точність обробки соплових отворів у межах $\pm 0,01$ мм може бути досягнута на сучасному координатно-прошивальному обладнанні (наприклад, Sodick A30R). Проте емпіричні дані свідчать, що ця точність має обмежений вплив на ефективність розпилення і поступається таким чинникам, як шорсткість та стабільність стану вхідних і вихідних кромки отвору.

Шорсткість внутрішніх поверхонь, мікрорельєф і твердість матеріалу сопла є ключовими параметрами, що визначають його довговічність. Оптимальними вважаються значення твердості 58 ± 2 HRC і шорсткості Ra у межах 0,02-0,08 мкм. Саме ці характеристики впливають на стійкість до ерозії, зношування та коксування.

Гострі кромки отворів є зонами підвищеної вразливості до ерозійного руйнування і кавітації. Їх доцільно притупляти механічно або шляхом застосування електрохімічного хонінгування (ЕХО), яке дозволяє ефективно знімати задирки та зменшувати градієнт навантаження.

Ерозійно-корозійне руйнування вихідної частини отвору часто зумовлене взаємодією сірки у паливі з водою, що утворює сірчану кислоту. Цей механізм призводить до так званого «розпушення» металу та формування зон коксування. Для протидії цим процесам доцільно застосовувати жароміцні, термооброблювані та кислотостійкі сталі як матеріал для розпилювачів.

Вибір технологічного маршруту обробки має критичне значення. Найкращі результати досягаються при поєднанні електроерозійного формування отворів з подальшою електрохімічною доведенням або поліруванням. Такий підхід дозволяє зберегти форму отвору, забезпечити необхідну якість поверхні та усунути дефекти, що ініціюють деградацію.

Формування технологічної якості – це не локальне завдання, а результат взаємодії всіх етапів виготовлення: від способу отримання заготовки, режимів термообробки та механічної обробки, до фінішної доведення та контролю. Саме інтегрований підхід дозволяє забезпечити стабільність ресурсу та зниження частоти відмов паливної апаратури дизельних двигунів.

Упровадження запропонованих технологічних підходів сприятиме підвищенню надійності роботи форсунок, подовженню міжремонтних інтервалів та стабілізації режимів експлуатації дизельних силових агрегатів у складних умовах.

Список літератури:

1. Asi O. Failure of a diesel engine injector nozzle by cavitation damage / O. Asi // *Eng. Fail. Anal.* – 2006. – Vol. 13. – P. 1126–1133. doi: 10.1016/j.engfailanal.2005.07.021. 2. Butmarasri A. Wear and Deformation of Nozzle Body Seat of Diesel Fuel Injector / A. Butmarasri, S. Sato, H. Kosaka // *Int. J. Automot. Technol.* – 2022. – Vol. 23. – P. 243–255. doi: 10.1007/s12239-022-0021-2. 3. Cai T. Effects of nozzle lip geometry on the cavitation erosion characteristics / T. Cai, Y. Pan, F. Ma // *Exp. Therm. Fluid Sci.* – 2020. – Vol. 117. – Article 110137. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2020.110137. 4. Chen T.-Y. An Experimental and Numerical Study on Micro-Orifice Injectors / T.-Y. Chen, C.-C. Yang, K. Ouyang // *Energies*. – 2024. – Vol. 17(5). – Article 1045. doi: 10.3390/en17051045. 5. Costa J. Failure in Fuel Injector Nozzles Used in Diesel Engines / J. Costa, J. de Macedo Neto, M. Oliveira, E. Campo, R. Wilson, R. Cruz, N. Nascimento, J. Neto // *Proc. Conf.* – 2015. – P. 237–240. doi: 10.17265/2159-5275/2015.05.005. 6. El Marnissi Y. Microscopic Imaging on Diesel Spray and Atomization Process / Y. El Marnissi, J. Hwang // *Processes*. – 2024. – Vol. 12. – Article 359. doi: 10.3390/pr12020359. 7. Gavaises M. Link Between Cavitation Development and Erosion Damage in Diesel Injector Nozzles / M. Gavaises, D. Papoulias, A. Andriotis, E. Giannadakis et al. // *SAE Tech. Paper.* – 2007. – № 2007-01-0246. doi: 10.4271/2007-01-0246. 8. Li D. Effects of nozzle inner surface roughness on cavitation erosion / D. Li, Y. Kang, X. Wang, X. Ding, Z. Fang // *Exp. Therm. Fluid Sci.* – 2016. – Vol. 74. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2016.01.009. 9. Miers S. Effect of Injector Nozzle Finish on Performance and Emissions / S. Miers, S. Ciatti // *SAE Tech. Paper.* – 2006. – № 2006-01-0200. doi: 10.4271/2006-01-0200. 10. Muhammad T. The Effect of Spindle Speed and Feed Rate on Hole Diameter of High-Speed Micro-Drilling / T. Muhammad, S. Suhaeri, M. Syamsuddin, U. Aulia, F. Rahmatsyah // *Defect and Diffusion Forum.* – 2020. – Vol. 402. – P. 125–130. doi: 10.4028/www.scientific.net/DDF.402.125. 11. Popa D. Influence of the parameters of abrasive flow machining on injection performance / D. Popa // *Technium: Romanian Journal of Applied Sciences and Technology.* – 2022. – Vol. 4(10). – P. 74–82. doi: 10.47577/technium.v4i10.7912. 12. Rounthwaite N. A Chemical and Morphological Study of Diesel Injector Nozzle Deposits / N. Rounthwaite, R. Williams, C. McGivern, J. Jiang et al. // *SAE Int. J. Fuels Lubr.* – 2017. – Vol. 10(1). – P. 106–114. doi: 10.4271/2017-01-0798. 13. Shibata S. Evaluation of cavitation in injector nozzle and correlation with atomization / S. Shibata, S. Nishio, A. Sou et al. // *J. Vis.* – 2015. – Vol. 18. – P. 481–492. doi: 10.1007/s12650-015-0282-1. 14. Sodick Co., Ltd. Електроерозійне устаткування [Електронний ресурс] / Sodick Co. // Режим доступу: <https://www.sodick.co.jp/en/>. 15. Wang X. A numerical study of cavitating flows in high-pressure nozzles / X. Wang, W. Su // *Chin. Sci. Bull.* – 2009. – Vol. 54. – P. 1655–1662. doi: 10.1007/s11434-009-0301-5. 16. Zainab S. Investigation of nozzle geometry and wall roughness effects / S. Zainab, K.S. Syed // *AIP Advances*. – 2023. – Vol. 13. – Article 115129. doi: 10.1063/5.0172988. 17. Дяченко В.Г. Двигуни внутрішнього згорання. Теорія / В.Г. Дяченко // Харків : ХАІ, 2018.

– 284 с. 18. Канарчук В.Є. Надійність машин / В.Є. Канарчук, С.К. Паляньський, М.М. Дмитрієв // К. : Либідь, 2003. – С. 10. 19. Кіяновський М.В. Електрофізичні та електрохімічні методи обробки поверхонь деталей у машинобудуванні / М.В. Кіяновський, Н.І. Цивінда // Кривий Ріг : Вид. центр КТУ, 2011. – 412 с.

Bibliography (transliterated):

1. Asi, O. (2006), "Failure of a diesel engine injector nozzle by cavitation damage", *Engineering Failure Analysis*, 13, pp.1126–1133. doi: 10.1016/j.engfailanal.2005.07.021. 2. Butmarasri, A., Sato, S. and Kosaka, H. (2022), "Wear and deformation of nozzle body seat of diesel fuel injector", *International Journal of Automotive Technology*, 23, pp.243–255. doi: 10.1007/s12239-022-0021-2. 3. Cai, T., Pan, Y. and Ma, F. (2020), "Effects of nozzle lip geometry on cavitation erosion characteristics", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 117, Article 110137. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2020.110137. 4. Chen, T.-Y., Yang, C.-C. and Ouyang, K. (2024), "Cavitation and spray of micro-orifice injectors under low-pressure conditions", *Energies*, 17(5), 1045. doi: 10.3390/en17051045. 5. Costa, J., de Macedo Neto, J., Oliveira, M., Campo, E., Wilson, R., Cruz, R., Nascimento, N. and Neto, J. (2015), "Failure in fuel injector nozzles used in diesel engines", *Proceedings*, pp.237–240. doi: 10.17265/2159-5275/2015.05.005. 6. El Marnissi, Y. and Hwang, J. (2024), "Microscopic imaging on diesel spray and atomization process", *Processes*, 12, p.359. doi: 10.3390/pr12020359. 7. Gavaises, M., Papoulias, D., Andriotis, A., Giannadakis, E. et al. (2007), "Link between cavitation and erosion in diesel injector nozzles", *SAE Technical Paper*, No. 2007-01-0246. doi: 10.4271/2007-01-0246. 8. Li, D., Kang, Y., Wang, X., Ding, X. and Fang, Z. (2016), "Effects of inner surface roughness on cavitation erosion", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 74. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2016.01.009. 9. Miers, S. and Ciatti, S. (2006), "Effect of injector nozzle finish on performance and emissions", *SAE Technical Paper*, No. 2006-01-0200. doi: 10.4271/2006-01-0200. 10. Muhammad, T., Suhaeri, S., Syamsuddin, M., Aulia, U. and Rahmatsyah, F. (2020), "The effect of spindle speed and feed rate on hole diameter of high-speed micro-drilling", *Defect and Diffusion Forum*, 402, pp.125–130. doi: 10.4028/www.scientific.net/DDF.402.125. 11. Popa, D. (2022), "Influence of abrasive flow machining parameters on injector nozzle performance", *Technium: Romanian Journal of Applied Sciences and Technology*, 4(10), pp.74–82. doi: 10.47577/technium.v4i10.7912. 12. Rounthwaite, N., Williams, R., McGivern, C., Jiang, J. et al. (2017), "Diesel injector nozzle deposits: formation and growth mechanisms", *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 10(1), pp.106–114. doi: 10.4271/2017-01-0798. 13. Shibata, S., Nishio, S., Sou, A. et al. (2015), "Evaluation of cavitation in injector nozzle and correlation with atomization", *Journal of Visualization*, 18, pp.481–492. doi: 10.1007/s12650-015-0282-1. 14. Sodick Co., Ltd. (n.d.), *Electroerosion equipment [Elektroeroziine ustatkuvannia]* [online]. Available at: <https://www.sodick.co.jp/en/>. 15. Wang, X. and Su, W. (2009), "A numerical study of cavitating flows in high-pressure diesel injector nozzles", *Chinese Science Bulletin*, 54, pp.1655–1662. doi: 10.1007/s11434-009-0301-5. 16. Zainab, S. and Syed, K.S. (2023), "Investigation of nozzle geometry and wall roughness", *AIP Advances*, 13, 115129. doi: 10.1063/5.0172988. 17. Dyachenko, V.H. (2018), *Internal combustion engines. Theory [Dvyhuny vnutrishnoho zhorannia. Teoriia]*, Kharkiv: KhAI. 18. Kanarchuk, V.E., Palyansky, S.K. and Dmitriev, M.M. (2003), *Reliability of machines [Nadiinist mashyn]*, Kyiv: Lybid. 19. Kiyonovskiy, M.V. and Tsyvinda, N.I. (2011), *Electrophysical and electrochemical methods of surface treatment in mechanical engineering [Elektrofizychny ta elektrohimichni metody obrobky poverkhon detaley u mashynobuduvanni]*, Kryvyi Rih: Vydavnychiy tsentr KTU

Надійшла до редакції 12.07.2025 р.

Боду Світлана Жаківна – старший викладач кафедри інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: svitlana.bodu@nuos.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0003-1932-0955>.

Новошицький Антон Володимирович – кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: anton.novoshytskyu@nuos.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0002-3232-4718>.

Шумілов Олександр Павлович – кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: aleksandr.shumilov@nuos.edu.ua, <http://orcid.org/0000-0002-1325-454X>.

Поліщук Віталій Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерної механіки та технології машинобудування, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна, e-mail: vitalii.polishchuk@nuos.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0003-0320-4327>.

TECHNOLOGICAL FACTORS AND THEIR INFLUENCE ON THE DURABILITY OF FUEL SYSTEM COMPONENTS

S.Zh. Bodu, A.V. Novoshytskyi, O.P. Shumilov, V.A. Polishchuk

A systematic engineering-scientific analysis has been conducted of a complex set of technological factors that directly determine the durability, operational performance, and reliability of the components of diesel internal combustion engine fuel equipment. The primary focus is on the injector nozzle holes as critical zones operating under significant thermal, hydrodynamic, mechanical, and chemical loading conditions. An in-depth assessment of the influence of microgeometry, internal surface roughness, residual stresses, as well as the condition of the inlet and outlet edges of the holes on the development of degradation processes—specifically cavitation, erosion, coking, fatigue, and thermochemical destruction—is conducted. The research methodology is based on a comprehensive synthesis of current theoretical approaches, numerical modeling, experimental observations, and detailed analysis of actual equipment failures. The work compares the effectiveness of various finishing methods: traditional mechanical (drilling, grinding, lapping) and non-contact (electroerosion, electrochemical, anodic-mechanical). It is demonstrated that non-contact technologies ensure high dimensional accuracy, reduction of roughness (down to $Ra \leq 0.02 \mu\text{m}$), geometric stability, and minimization of surface damage. It is established that initial defects formed at early manufacturing stages are not eliminated by subsequent operations and significantly reduce the injector's reliability. Quantitative data on changes in hole diameter, fuel leakage coefficient, hydrodynamic stability, and fuel spray symmetry under real operating conditions are provided. Recommendations are formulated regarding the optimization of the technological processing route, material selection, microrelief control, and residual stress management. The proposed solutions can be implemented in serial production to increase service life, reduce failure frequency, and ensure long-term operational stability of diesel fuel equipment. The presented results have practical applied value for mechanical engineering, and the proposed approach can be adapted to other types of highly loaded components.

Keywords: injector; nozzle; orifice; cavitation; erosion; microgeometry; residual stress; roughness; degradation; durability.

УДК 621.4

DOI: 10.20998/0419-8719.2025.2.12

А.В. Савченко, П.Б. Кіценко

МЕТОДИ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ПАЛИВА ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ДИЗЕЛЬНИХ СИСТЕМ ЖИВЛЕННЯ

У статті проведено порівняльний аналіз сучасних лабораторних та бортових технологій контролю якості дизельного палива, що мають критичне значення для забезпечення стабільної роботи систем живлення типу Common Rail в умовах експлуатації. Актуальність дослідження зумовлена потребою підвищення надійності та екологічної безпеки дизельних двигунів на фоні зростаючих вимог до паливної економічності та адаптації до концепції Індустрії 5.0. Метою роботи є систематизація знань про існуючі методи оцінювання якості палива та обґрунтування перспектив використання бортових сенсорних систем як елементу превентивного обслуговування дизельних систем. Основними завданнями є: аналіз стандартних лабораторних методик визначення фізико-хімічних характеристик палива (цетанове число, густина, в'язкість, вміст сірки, FAME, води та ароматичних сполук), огляд існуючих технологій для інтеграції засобів діагностики безпосередньо на борту транспортного засобу, а також оцінка точності, надійності й доцільності таких технологій у практичному застосуванні. У роботі використано методи порівняльного аналізу літературних джерел, стандартів та патентної документації, а також методологію технічної експертизи конструкцій і принципів роботи сенсорних систем. Новизна підходу полягає у комплексному зіставленні можливостей традиційної лабораторної діагностики з результатами, які можуть надавати сучасні бортові сенсори на основі камертона, спектроскопії в ближній ІЧ-області, ультразвукових, MEMS- і діелектричних технологій. Результати дослідження свідчать, що більшість лабораторних методик забезпечують високу точність, але є ресурсозатратними, малопридатними до умов реального часу та не завжди інформативними для швидкого реагування систем керування двигуном. Водночас бортові сенсори продемонстрували здатність з достатньою достовірністю оцінювати ключові фізичні параметри пального — зокрема густину, в'язкість, діелектричну проникність і вміст FAME. Визначено, що найбільш перспективними є системи, що поєднують кілька сенсорних технологій із алгоритмами машинного навчання для побудови повного профілю палива. Встановлено, що саме такі гібридні