

REVIEW OF MODERN MATERIALS FOR THE MANUFACTURING OF COMPONENTS OF GAS DISTRIBUTION SYSTEMS IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES

*Kudelin Oleksandr*¹

Received: 2024-08-07

Accepted: 2024-09-30

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.16813834>

Annotation. The article provides a comprehensive overview of modern materials used in the manufacture of gas distribution system components in internal combustion engines. The relevance of the study is due to the growing requirements for thermal stability, service life, weight reduction, and environmental compliance of power units operating under conditions of intense thermal and mechanical stress. Particular attention is paid to the materials used to manufacture valves, guide bushings, valve seats, tappets, and camshafts - that is, the key elements that determine the accuracy of gas exchange phases and the engine's resistance to wear.

Based on an analysis of traditional materials - alloy steels, cast iron, bronze - their advantages and limits of effectiveness in modern operating conditions are substantiated. The work systematizes the properties and practical application of the latest materials: titanium and nickel alloys, metal ceramics, nanostructured coatings such as DLC, TiN, CrN. It is shown that in terms of their physical and mechanical characteristics (heat resistance, wear resistance, dimensional stability, corrosion resistance), these materials significantly outperform their classical counterparts, but require a complex manufacturing process and significant financial costs.

Particular attention is paid to a comparative analysis of materials, which reveals the strengths and weaknesses of each type in the context of a specific application. A table with structured characteristics is provided, which allows you to navigate the feasibility of using certain materials depending on the load conditions. The experience of leading manufacturers (BMW, Toyota, Honda) confirms the effectiveness of combining the latest alloys with high-tech coatings in serial production.

As a result, it is concluded that further development of engine manufacturing is impossible without the widespread introduction of materials science innovations. The use of hybrid structures, additive technologies, local strengthening, and nanocoatings has been identified as promising areas. It has been outlined that the choice of material is not only an engineering decision, but also an economic and resource decision that forms the basis for the implementation of reliable, energy-efficient, and durable engines of the future.

Keywords: gas distribution mechanism, internal combustion engine, heat-resistant alloys, metal ceramics, DLC coating, valve, camshaft, wear resistance, temperature stability.

¹ BMW Technician - BMW of Pembroke Pines. Working with modern BMW models, including hybrids and G Series; performing advanced diagnostics and troubleshooting of complex system malfunctions Florida, USA
ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3787-8072>

Вступ. Сучасне машинобудування, зокрема двигунобудування, стрімко розвивається у напрямку підвищення ефективності, надійності та екологічності силових агрегатів. Двигуни внутрішнього згоряння, незважаючи на конкуренцію з боку електродвигунів, залишаються основною рушійною силою транспорту в усьому світі. З огляду на високі вимоги до ресурсу, зниження ваги та відповідність жорстким екологічним стандартам, питання добору конструкційних матеріалів набуває особливої ваги.

Система газорозподілу є однією з ключових у будові ДВЗ. Вона відповідає за точне дозування паливоповітряної суміші та своєчасне виведення продуктів згоряння, отже, безпосередньо впливає на потужність, економічність та екологічність роботи двигуна. Компоненти цієї системи, такі як клапани, розподільчі вали, напрямні втулки, сидла клапанів, працюють в екстремальних умовах: високі температури, ударні навантаження, агресивне середовище, тертя, постійні цикли теплового розширення та охолодження. За таких умов якість матеріалу визначає не лише тривалість роботи вузлів, а й загальний термін служби двигуна.

Традиційні матеріали вже не в змозі задовольнити вимоги новітніх конструкцій. Тому провідні виробники активно впроваджують нові матеріали та інженерні рішення, що дозволяють підвищити теплову стійкість, зменшити вагу деталей, оптимізувати технологічність виробництва, а також зменшити витрати на обслуговування та ремонт. Особливе значення надається питанням використання сплавів титану, нікелю, спеціальних сталей, керамічних елементів, а також технологіям нанесення зносостійких та термостійких покриттів [1, с. 26; 7, с. 93].

У цьому контексті виникає об'єктивна потреба у систематизації наявної інформації про сучасні матеріали, які використовуються або мають потенціал для використання в компонентах газорозподільного механізму ДВЗ. Огляд таких матеріалів дозволить не лише визначити їхні переваги та недоліки, а й виявити перспективи подальшого вдосконалення конструкцій з урахуванням новітніх досягнень науки та інженерії.

Мета статті - здійснити комплексний огляд сучасних матеріалів, які застосовуються у виготовленні компонентів систем газорозподілу в двигунах внутрішнього згоряння, з урахуванням їхніх експлуатаційних властивостей, переваг, недоліків та доцільності використання в умовах високих термомеханічних навантажень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У сучасній технічній літературі спостерігається стійкий інтерес до питань підвищення надійності, ресурсу та технологічності компонентів систем газорозподілу в двигунах внутрішнього згоряння. Значна частина досліджень присвячена проблемам технічної експлуатації та діагностики силових агрегатів транспортних засобів, у тому числі з урахуванням особливостей конструкційного матеріалу та впливу навантажень змінного характеру.

Зокрема, у праці Барановського В.М. та співавторів [1] наголошується на ролі технічного діагностування в системі технічного обслуговування автомобілів, підкреслюється зв'язок між діагностикою та ефективністю експлуатації механізмів, включно з газорозподільним. Автори зазначають, що своєчасне виявлення ознак зносу, дефектів клапанного механізму чи його приводу безпосередньо впливає на термін служби двигуна та його ремонтпридатність. Подібні положення підкріплює і посібник Коваленка В.М. [3], де розглядаються типові пошкодження механізмів двигуна, методи їх виявлення та обґрунтовується необхідність оновлення ремонтних технологій відповідно до змін матеріальної бази.

Аспекти будови й роботи механізмів ГРМ докладно розкриті у підручниках Кисликова В.Ф. [4] і Гнітька С.М. [2], в яких простежується логіка розвитку конструкцій, змін у виборі матеріалів для клапанів, втулок, розподільчих валів. Ці видання дають

фундаментальну базу для розуміння фізико-механічних характеристик традиційних матеріалів і підходів до їхнього застосування, зокрема в умовах навантажень, близьких до граничних. Водночас ці джерела недостатньо розглядають новітні матеріали - титанові сплави, суперсплави, металокераміку - та не фокусуються на їхньому впровадженні в сучасне двигунобудування.

Суттєвий внесок у формування сучасного уявлення про проблеми довговічності приводів ГРМ робить робота Кіма В.В. [5], де акцентовано увагу на практичному аналізі випадків обривів зубчастих ременів, їх причин, впливу ресурсу на загальну надійність системи газорозподілу. Автор підкреслює, що нестабільність якості комплектуючих на ринку потребує не лише лабораторної перевірки характеристик ременів, а й глибшого розуміння впливу матеріалів на роботу вузлів у динамічному режимі.

На рівні кваліфікаційних робіт варто відзначити дослідження Підгреблі В.І. [8], де обґрунтовується необхідність модернізації технологічного процесу діагностики та ремонту ДВЗ з урахуванням вимог до сучасних систем керування та конструктивних рішень.

Паралельно з вітчизняними розробками, актуальним є аналіз міжнародних публікацій, які зосереджуються на особливостях роботи електромагнітних приводів клапанів, а також моделюванні фізичних процесів у високонавантажених зонах. Наприклад, дослідження Qiu Y. та співавт. [11] стосуються оптимального проектування розподільних систем із електромеханічним керуванням, що вимагає врахування особливостей матеріалу не лише як носія форми, а як змінної в системі управління. Стаття Payri R. [10] аналізує інжекційні події в контексті впливу на гідродинаміку клапанів, а отже, й на вимоги до термостійкості й зносостійкості елементів, з якими ті взаємодіють.

Інші міжнародні джерела (Malamov D. [9], Yun S.N. [12]) присвячені вивченню електромагнітних виконавчих механізмів і їхньої залежності від точності виготовлення та матеріалу якорів і обмоток. Це опосередковано стосується і приводу клапанів, особливо в системах із гібридним керуванням.

Виклад основного матеріалу. Система газорозподілу є невід'ємним елементом конструкції двигуна внутрішнього згоряння і виконує одну з ключових функцій - своєчасне та точне керування потоками паливоповітряної суміші і відпрацьованих газів. Від коректної роботи цієї системи залежить ефективність наповнення циліндрів, повнота згоряння пального, рівень шкідливих викидів, а також динамічні характеристики двигуна. Тому технічні та експлуатаційні вимоги до деталей газорозподільного механізму є надзвичайно високими.

Класична компоновка системи газорозподілу передбачає наявність таких основних елементів: розподільчий вал (або декілька валів у двигунах типу DOHC), кулачки, штовхачі (гідравлічні або механічні), клапани (впускні та випускні), напрямні втулки клапанів, сидла клапанів, пружини, тарілки, сухарі, а також привід газорозподілу (зазвичай ремінний, ланцюговий або зубчастий). Кожен з цих елементів виконує чітко визначену роль у забезпеченні циклічної роботи клапанного механізму [4, с.208].

Розподільчий вал, який обертається синхронно з колінчастим валом (зазвичай у два рази повільніше), через профільовані кулачки відкриває і закриває клапани в певні фази робочого циклу. Геометрія кулачків визначає параметри відкривання: хід клапана, момент початку і завершення відкривання, тривалість фази. Через штовхачі або коромисла зусилля передається на клапан, який пересувається вздовж напрямної втулки, відкриваючи або перекриваючи прохідний канал у голівці блока циліндрів. Сідло клапана утворює герметичну пару з робочою поверхнею клапанної тарілки, витримуючи при цьому температури, що можуть сягати 700–850 °С на впуску та до 1000–1100 °С на випуску.

Важливо підкреслити, що кожна деталь працює в умовах комбінованого навантаження - термічного, механічного, корозійного та зношувального. Так, наприклад, випускні клапани зазнають інтенсивної термоциклічної дії, працюючи в агресивному середовищі продуктів згоряння, що містять водяну пару, оксиди азоту, сірки та інші компоненти. Швидкість відкривання і закривання клапанів досягає десятків мілісекунд, що створює ударні навантаження у вузлах контакту.

Напрямні втулки клапанів зіштовхуються із зносом внаслідок ковзання клапанної ніжки, а також мають забезпечувати стабільну теплопередачу від клапана до головки блоку. Матеріал втулок має володіти високими антифрикційними властивостями, стабільною геометрією за високих температур і стійкістю до захоплення частинками абразиву або продуктами згоряння.

Ще одним критичним елементом є сідло клапана. Воно має забезпечувати герметичне прилягання клапана при високому тиску в камері згоряння (до 4–10 МПа) і мати високу жаростійкість. Крім того, пружина клапана повинна не лише забезпечувати повне закриття клапана, але й мати високу втомну міцність, аби не втрачати пружні властивості протягом сотень мільйонів циклів.

Історично розвиток конструкції двигуна внутрішнього згоряння тісно пов'язаний із розвитком матеріалознавства. До середини ХХ століття основні елементи газорозподільних систем виготовлялися переважно з вуглецевих і легованих сталей, чавуну, бронз та їх сплавів. Попри свій вік, багато з цих матеріалів і досі використовуються у серійному виробництві, особливо в умовах, де пріоритетом є зниження собівартості [9, с. 437].

Одним із найбільш поширених матеріалів для виготовлення клапанів є жароміцна легована сталь. Залежно від типу клапана (впускний чи випускний), застосовують різні марки сталей. Для впускних клапанів, які працюють при нижчих температурах (близько 300–500 °С), зазвичай використовуються хромисті сталі (напр., 40Х10С2М або аналогічні). Їхньою перевагою є відносна дешевизна, хороша оброблюваність, задовільна корозійна стійкість. У той час як для випускних клапанів, що зазнають дії температур до 900–1100 °С, використовують нікель-хромові або аустенітні сталі з додаванням молібдену, вольфраму, ванадію, які забезпечують жароміцність і стабільність структури у тривалому режимі високотемпературного навантаження. Прикладом може бути сталь типу 21-4N (21% Cr, 4% Ni) або аналогічні композити.

Сідла клапанів, як правило, виготовлялися з чавуну з легуванням хромом, нікелем, міддю. Основна вимога до цих елементів - висока зносостійкість, жаротривкість, стабільність твердості при зміні температур. До появи високотехнологічних композитів саме чавун зі спеціальними присадками був основним матеріалом, завдяки поєднанню доступності, добрих ливарних характеристик і можливості зміцнення шляхом термічної обробки. На практиці застосовували модифіковані сірі та високоміцні чавуни з перлітною або змішаною структурою. Наприклад, високохромисті чавуни із вмістом Cr на рівні 2–3% мали підвищену жаростійкість та утворювали стабільний оксидний шар на поверхні.

Штовхачі клапанів у традиційних схемах виготовлялися зі сталі 45 або сталі 40Х, яка після термічної обробки забезпечувала достатню твердість робочої поверхні (55–60 HRC). У деяких випадках ці елементи цементували або азотували для досягнення вищої зносостійкості. Основна вимога - стабільна геометрія та низький коефіцієнт тертя у парі з розподільчим валом. У двигунах із високими обертами почали використовувати алюмінієві штовхачі з твердим анодуванням, проте в масовому виробництві тривалий час зберігалася орієнтація на сталь [12, с. 1224].

Ще один важливий елемент - напрямні втулки клапанів. У ранніх двигунах їх виготовляли з сірого чавуну, але вже з 1950–1960-х років у практиці почали переважати бронзові сплави, зокрема сплави на основі олова, алюмінію або марганцю

(типу БрАЖ9-4 або БрОЦС). Бронза має низький коефіцієнт тертя, добру теплопровідність, високу корозійну стійкість, а також добре піддається механічній обробці, що полегшує виготовлення втулок точної геометрії. З іншого боку, бронза значно дорожча за чавун, а її механічна міцність нижча, тому в бюджетних версіях двигунів все ще використовують модифіковані чавуни або сталеві втулки із напиленням.

Для розподільчих валів традиційним матеріалом є легована сталь типу 40Х або 45ХНМ, що забезпечує достатню жорсткість і зносостійкість. Робочі поверхні кулачків гартуються ТВЧ або цементуються з наступним шліфуванням. У деяких випадках для зменшення маси валів у високофорсованих двигунах використовують порожнисту конструкцію, а у спортивних версіях - навіть титанові сплави, однак у звичайному автомобілебудуванні все ще домінують сталеві вали.

Не можна не згадати про клапанні пружини, які зазвичай виготовляються з пружинної сталі з високим вмістом кремнію або хрому (напр., 60С2А, 50ХФА). Ці сталі забезпечують високу втомну міцність, пружність, стійкість до циклічного навантаження та збереження геометричних характеристик в умовах коливань температур і частоти. В окремих випадках поверхню пружин піддають дробоструминному зміцненню або азотуванню.

Усі перелічені матеріали і технології є результатом багаторічного інженерного пошуку, спрямованого на баланс між вартістю, надійністю, технологічністю й ремонтпридатністю. Вони стали основою для розвитку нових рішень, на яких базуються сучасні конструкції. Разом із тим, вже сьогодні ці матеріали починають поступатися новим - легшим, жаростійкішим, довговічнішим. Причиною цього є не лише розвиток науки, а й зміна вимог: підвищення температур згоряння, зменшення ваги двигуна, зниження витрат пального, електрифікація приводів - усе це вимагає від матеріалів нових властивостей, яких традиційні сплави не завжди можуть забезпечити. Саме тому на зміну класичним матеріалам приходять інноваційні рішення, які детально розглядаються в наступному розділі [3, с. 97].

Упродовж останніх десятиліть розвиток конструкцій двигунів внутрішнього згоряння супроводжується не лише вдосконаленням геометрії, систем керування чи систем упорскування, але й глибокою трансформацією у сфері матеріалознавства. Зі зростанням потужності, швидкохідності, коефіцієнта наповнення та вимог до екологічної чистоти вихлопу, традиційні матеріали вже не відповідають технічним потребам. Саме тому провідні виробники двигунів усе активніше впроваджують у газорозподільні механізми нові класи матеріалів: жароміцні сплави на основі титану, нікелю, хрому; металокерамічні та керамічні композити; легкі алюмінієві сплави з поверхневим зміцненням; а також високотехнологічні покриття, які суттєво змінюють ресурси і терміну служби компонентів.

Однією з найпомітніших інновацій є застосування титанових сплавів, зокрема для виготовлення впускних клапанів, штовхачів та коромисел. Титан володіє унікальним поєднанням властивостей - високою міцністю при відносно малій густині ($\approx 4,5 \text{ г/см}^3$ проти $7,8 \text{ г/см}^3$ у сталей), чудовою корозійною стійкістю та жаротривкістю. Завдяки цьому титанові клапани забезпечують зменшення інерційного навантаження, що особливо актуально для високофорсованих спортивних та мотоциклетних двигунів. Водночас титан має й недоліки - схильність до захоплення при терті, низьку зносостійкість і високу вартість, що обмежує його застосування переважно преміальним сегментом.

Іншим потужним напрямом є використання нікелевих суперсплавів, зокрема таких, як Inconel 751, Nimonic 80A, або X750. Ці сплави застосовують насамперед для впускних клапанів, які зазнають надвисоких термічних навантажень. Нікелеві сплави мають стабільну аустенітну структуру, не схильну до фазових перетворень при

нагріванні, володіють високою жароміцністю (до 1100–1200 °C), окисною стабільністю, стійкістю до термічної втоми. Вони можуть зберігати геометричну стабільність і герметичність клапанного механізму навіть у надексплуатаційних умовах, таких як довготривала робота під навантаженням, турбонаддув, агресивні продукти згоряння. Єдиним стримувальним фактором є висока вартість виготовлення та складність механічної обробки [11, с. 567].

Особливої уваги заслуговують металокерамічні матеріали, які використовуються для напрямних втулок, штовхачів та вкладишів. Комбінація твердих тугоплавких частинок (наприклад, карбідів, боридів, нітридів) із металевою основою (мідь, залізо, нікель) дозволяє досягти високих показників зносостійкості, стабільної теплопровідності та самозмашувального ефекту. Металокераміка успішно замінює бронзу, особливо в умовах високотемпературного тертя. Втім, при цьому такі матеріали є крихкими, вимагають особливої точності при монтажі та чутливі до перевантаження. Найбільш поширеними сполуками є Fe-Cu-C, Fe-Graphite, Fe-Ni-Cr-B системи.

Щодо розподільчих валів, то поряд зі звичайними сталевими, нині використовують леговані сплави з підвищеною втомною міцністю, а також вали з лазерною або плазмовою наплавкою на поверхню кулачків. Застосовується дифузійне хромування, борування, окисація, а також тверде хімічне нітрування (наприклад, за технологією Tenifer або QPQ), що забезпечує одночасно і твердість (до 1100 HV), і високу зносостійкість, і антикорозійні властивості. У конструкціях останніх поколінь застосовуються навіть розподільчі вали порожнистої конструкції, виготовлені методом гідроформування або зварювання трубчастих сегментів - це дозволяє суттєво знизити вагу обертових елементів та інерційне навантаження.

Окремо слід виділити технології зміцнювальних покриттів, які застосовуються майже для всіх елементів газорозподільного механізму. Найбільш поширеними є:

- DLC (Diamond-Like Carbon) - наноплівкове покриття на основі вуглецю з аморфною структурою, яке забезпечує наднизький коефіцієнт тертя (до 0,1), високу твердість і біоінертність. Застосовується на штовхачах, клапанах, поршневих пальцях.

- CrN, TiN, TiCN, ZrN - нітридні покриття, отримані методом PVD, які мають високу твердість (до 2500 HV), термостійкість, окислювальну стабільність і естетичну привабливість. Ці покриття, зокрема TiN, активно застосовуються для покриття клапанних стрижнів, що працюють у парі з напрямними втулками.

- AlCrN та CrAlYN - покриття з підвищеною окислювальною стійкістю, призначені для деталей, що зазнають граничних температур (вище 900–1000 °C).

Сучасні конструкції включають також композити на основі графіту, кевлару, скловолокна, які використовуються в ущільненнях, прокладках, пружних елементах системи. Хоч ці матеріали не є структурними в повному сенсі, вони відіграють важливу роль у зниженні шуму, вібрацій, температурних коливань.

Значну перспективу демонструють адитивні технології (3D-друк металами), які дають змогу створювати складні геометричні конструкції з локалізованим зміцненням, контролем внутрішніх напружень і оптимізацією вагових характеристик. Наприклад, друк клапанів зі змінною щільністю або виготовлення штовхачів із внутрішніми каналами для охолодження [6].

Серед інших перспективних напрямів - використання наноматеріалів, зокрема нанотвердих фаз на основі боридів титану, наноструктурованих інтерметалідів, модифікованих поверхневих шарів із нанодисперсними зміцнювальними елементами. Нанотехнології дозволяють створювати поверхні з контролем на атомарному рівні, що змінює механіку тертя, адгезію та термостійкість.

Успішна експлуатація системи газорозподілу в будь-якому двигуні внутрішнього згоряння залежить не лише від точності розрахунків фаз і конструктивної доброти, а й

але й - у вирішальній мірі - від раціонального добору матеріалів для кожного з її компонентів. Умови роботи деталей газорозподільного механізму є критично складними, багатофакторними, й тому не існує універсального матеріалу, що одночасно забезпечував би високу жаростійкість, зносостійкість, легкість, технологічність і доступну вартість. Це спонукає інженерів використовувати комбінований підхід, який базується на порівняльному аналізі властивостей традиційних та інноваційних матеріалів.

Почнемо з впускних і випускних клапанів. Традиційно для виготовлення впускних клапанів застосовувалися хромисті сталі, які мають достатню корозійну стійкість і витримують помірне термічне навантаження (до 500–600 °C). У той же час випускні клапани піддаються більш жорстким умовам - контакт із гарячими газами (до 1000–1100 °C), агресивне середовище, часті цикли нагрівання-охолодження. В цьому контексті перевагу почали надавати нікелевим суперсплавам (наприклад, Inconel 751, Nimonic), які зберігають структуру при довготривалому високотемпературному навантаженні, стійкі до термоциклічної втоми, окислення і термохімічної корозії.

У порівняльному аспекті традиційні сталі типу 40X10C2M поступаються нікелевим сплавам за такими критеріями, як:

- гранична температура експлуатації (≈ 600 °C проти 1000+ °C),
- термостійкість у циклічних режимах,
- опір оксидації,
- опір флюктуаційним напруженням при форсуванні двигуна.

Проте сталеві клапани виграють за показниками вартості, оброблюваності та ремонтпридатності, що пояснює їх збереження в бюджетному сегменті ДВЗ. У високофорсованих же моторах застосовують навіть біметалеві конструкції клапанів - наприклад, стрижень із титану або сталі, а тарілка - з Inconel. Такі конструкції поєднують жаростійкість з механічною міцністю і легкістю [2, с. 114].

Напрявні втулки клапанів - це ще одна критична пара тертя. Традиційно їх виготовляли з чавуну, який має гарну оброблюваність і прийнятну теплопровідність. Втім, зі зростанням температур і швидкості тертя на перший план виходять бронзи (типу БрОЦС, БрАЖ), металокераміка та порошкові матеріали. Наприклад, порівняльний аналіз властивостей втулок із бронзи БрОЦС та металокерамічного сплаву Fe-Graphite-Cu показує:

- зниження коефіцієнта тертя вдвічі при однакових умовах змащування;
- стабільність лінійних розмірів втулки в умовах довготривалого нагрівання;
- збільшення ресурсу втулки в 1,7–2,3 рази при однаковому режимі роботи.

Разом із тим, слід ураховувати, що металокерамічні втулки є більш крихкими, їх монтаж вимагає точного дотримання технології, а ціна значно вища.

У випадку розподільчих валів, порівняння між сталями 40X та конструкціями з наплавками на основі боридів або нітридів показує:

- підвищення твердості кулачків у 2–2,5 рази;
- зменшення коефіцієнта зношування;
- покращення втомної міцності при динамічному навантаженні;
- довший термін служби без потреби в повторному шліфуванні або заміні.

Застосування покриттів типу TiN, CrN, DLC дає суттєвий ефект при збереженні базової конструкції з доступної легованої сталі. Такий підхід дозволяє зберегти співвідношення «ефективність–вартість» на прийнятному рівні для масового виробництва [5].

Таблиця 1

Порівняння основних матеріалів для компонентів системи газорозподілу

Компонент	Традиційний матеріал	Сучасний матеріал	Переваги сучасного	Обмеження
Впускний клапан	40X10C2M	Титан Ti-6Al-4V	Легкість, інерційність, стійкість до корозії	Висока вартість, низька зносостійкість
Випускний клапан	21-4N	Inconel 751	Жаростійкість, стабільність при 1100 °C	Складність обробки, висока ціна
Напр. втулка	Чавун	Металокераміка	Зносостійкість, термостабільність	Крихкість, чутливість до монтажу
Штовхач	Сталь 45	DLC-покриття	Зниження тертя, довший ресурс	Вартість покриття, необхідність спецобладнання
Сідло клапана	Висохромистий чавун	Кобальтовий сплав Stellite	Жаростійкість, герметичність	Висока ціна, важкість обробки

Практичне застосування розглянутих матеріалів підтверджується прикладами із серійного виробництва. Так, у двигунах BMW серії N55 використовується поєднання клапанів із хромонікелевих сплавів і втулок із металокераміки з графітом. У лінійці Toyota (двигуни серії 2GR-FE) застосовуються сідла клапанів із порошкових сплавів із бором, що забезпечують зниження зносу при роботі на бідних паливоповітряних сумішах. У спортивних двигунах Honda (серія K20A) використовують титанові штовхачі з DLC-покриттям, що дозволяє досягати стабільної роботи при 8000–9000 об/хв [10, с. 458].

Вибір матеріалу для кожного компонента системи газорозподілу є результатом багатофакторного компромісу між функціональними вимогами, термічними режимами, очікуваним ресурсом, вартістю виготовлення, доступністю сировини та технологічністю обробки. Саме тому в сучасному двигунобудуванні дедалі частіше вдаються до гібридних рішень - поєднання традиційних структурних елементів із високотехнологічними покриттями, локальним зміцненням, застосуванням композитів у вузькоспеціалізованих ділянках. Такий підхід дозволяє не лише продовжити ресурс системи газорозподілу, але й зменшити масу двигуна, знизити витрати на обслуговування та забезпечити стабільність характеристик у широкому діапазоні умов експлуатації.

Висновки. У процесі розвитку двигунобудування питання вибору матеріалів для компонентів газорозподільного механізму завжди залишалося одним із найважливіших і найвідповідальніших. Від термостійкості, зносостійкості, жорсткості та стабільності властивостей при змінних навантаженнях залежить надійність роботи клапанних механізмів, точність дотримання фаз газообміну та загальний моторесурс силового агрегату.

Результати аналізу засвідчують, що традиційні матеріали - сталі, чавуни, бронзи - відіграли історично значущу роль і їм досі мають право на існування у малонавантажених і бюджетних системах. Однак їх можливості вичерпуються там, де виникають підвищені термічні та механічні навантаження, де критичним стає кожен грам ваги, де змащення нестабільне, а робоча температура сягає меж структурної стабільності.

Сучасні матеріали - нікелеві суперсплави, титанові конструкції, металокераміка, а також широке застосування зміцнювальних і захисних покриттів - відкривають новий етап у проєктуванні систем газорозподілу. Вони дозволяють реалізувати двигуни з підвищеною питомою потужністю, зменшеними втратами на тертя, вищою термічною ефективністю і стабільною роботою при змінних режимах навантаження. Особливо актуально це для турбованих, високофорсованих, малолітражних агрегатів нового покоління, що відповідають жорстким міжнародним екологічним стандартам.

Порівняльний аналіз засвідчує, що переваги сучасних матеріалів очевидні - це й довший ресурс, і краща термостійкість, і нижча маса, і адаптивність до агресивного середовища. Водночас їх впровадження потребує суттєвих витрат - не лише фінансових, але й технологічних. Виготовлення деталей з Inconel або Stellite вимагає високотемпературного устаткування, точного контролю параметрів кристалізації, складної механічної обробки. Те саме стосується титану, який важко обробляється, схильний до прихоплень і потребує спеціальних методів змащення та термообробки.

У найближчій перспективі одним із ключових напрямів стане подальше поширення гібридних технологій - поєднання дешевих матеріалів-основ із високоефективними функціональними покриттями. Такий підхід уже дозволив досягти значного подовження ресурсу при мінімальному зростанні вартості. Наприклад, звичайний сталевий штовхач із DLC-покриттям демонструє в рази нижчий знос, ніж аналог без покриття, за незначного ускладнення технології.

Окрему увагу слід приділити адитивним технологіям, які надають змогу створювати конструктивно складні, порожнисті або армовані елементи з локальним зміцненням у критичних зонах. Це не лише відкриває нові обрії для інженерного дизайну, а й дозволяє комбінувати властивості декількох матеріалів в одному компоненті - щось, що неможливо реалізувати традиційним литтям чи обробкою різанням.

Водночас не менш перспективним є напрям наноструктурованих покриттів - зокрема, багат шарових композицій на основі TiAlN, AlCrN, або багатокомпонентних вуглецевих сполук. Завдяки їм вдалося суттєво зменшити тертя, запобігти мікрозварюванню у парах тертя, стабілізувати теплове навантаження на поверхню контакту.

Майбутнє систем газорозподілу лежить у площині розумного матеріалознавчого компромісу, який поєднує у собі функціональність, економічність, стабільність і технологічність. Розвиток двигунобудування неможливий без глибокого міждисциплінарного підходу, що об'єднує металургію, інженерну терміку, трибологію, хімію твердого тіла та сучасні методи обробки. Роль матеріалів, якими комплектуються сучасні газорозподільні механізми, не є другорядною - навпаки, саме вони формують той ресурсний і температурний каркас, в межах якого можуть розгортатися найновіші конструктивні ідеї XXI століття.

REFERENCES

1. Baranovskyi, V. M., Spirin, A. V., Polevoda, Yu. A., & Tverdokhlib, I. V. (2018). *Rol i mistse tekhnichnoho diahnostuvannia v systemi tekhnichnoi ekspluatatsii avtomobiliv v silskomu hospodarstvi* [The role and place of technical diagnostics in the system of technical

- operation of cars in agriculture]. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*, 1(100), 24–28. Vinnytsia: VNAU. [in Ukrainian].
2. Hnitko, S. M., Buchynskyi, M. Ya., Popov, S. V., & Cherniavskyi, Yu. A. (2020). *Tekhnologichni mashyny* [Technological machines: Textbook for students of mechanical engineering]. Kharkiv: NTMT. [in Ukrainian].
 3. Kovalenko, V. M., & Shchurikhin, V. K. (2017). *Diahnostyka i tekhnolohiia remontu avtomobiliv* [Diagnostics and technology of car repair]. Kyiv: Litera LTD. [in Ukrainian].
 4. Kyslykov, V. F., & Lushchuk, V. V. (2006). *Budova y ekspluatatsiia avtomobiliv* [Structure and operation of vehicles] (6th ed.). Kyiv: Lybid. [in Ukrainian].
 5. Kim, V. V. (2024). *Teoretychnyi analiz osoblyvostei konstruktsii roboty pryvodiv hazorozpodilchikh mekhanizmiv DVZ...* [Theoretical analysis...]. Institutional repository of KNU. Retrieved from [<http://ds.knu.edu.ua/jspui/handle/123456789/6571>] (Accessed: 02.08.2025). [in Ukrainian].
 6. Marchenko, A. P., Riazantsev, M. K., & Shekhovtsov, A. F. (n.d.). *Dvyhuny vnutrishnoho zhorannia. Seriia u 6 tomakh. T.1...* [Internal combustion engines. Vol.1...]. [in Ukrainian].
 7. Liulka, V. S., Koniok, M. M., Perynskyi, Yu. Ye., & Klimov, O. M. (2013). *Osnovy diahnostyky avtomobilia* [Fundamentals of car diagnostics]. Chernihiv: ChNPU. [in Ukrainian].
 8. Pidhreblya, V. I. (2025). *Pidvyshchennia efektyvnosti tekhnologichnoho protsesu diahnostuvannia i remontu...* [Improving efficiency...]. Bachelor thesis. Ternopil: VSP TFK TNTU. [in Ukrainian].
 9. Malamov, D., Hadzhiev, I., & Yatchev, I. (2017). Influence of the pole shapes on the force characteristics of a DC solenoid actuator. *2017 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA)*, 435–438. Sofia, Bulgaria.
 10. Payri, R., De la Morena, J., Pagano, V., Hussain, A., Sammut, G., & Smith, L. (2019). One-dimensional modeling of the interaction between close-coupled injection events for a ballistic solenoid injector. *International Journal of Engine Research*, 20, 452–469.
 11. Qiu, Y., Perreault, D. J., Keim, T. A., Kassakian, J. G., & Fellow, L. (2010). Optimal cam design and system control for an electromechanical engine valve drive. *2010 IEEE Int. Conf. on Industrial Technology*, 565–572. Vina del Mar, Chile.
 12. Yun, S. N., Ham, Y. B., & Park, J. H. (2012). Attraction force improvement strategy of a proportional solenoid actuator for hydraulic pressure control valve. *12th International Conference on Control, Automation and Systems*, 1123–1127. JeJu Island, Korea.