

3. Wang, G.C., Zhao, Y., Xiao Y.Y., Jin, P.L., Li S.L., Sridhar, S. Diversified aggregated patterns of alumina inclusions in high-Al iron melt. 2020. – Met. Mater. Trans. – Vol. 51. – P. 3051–3066.
4. Yang, J., Chen D.F., Zhu M.Y., Crystallization and heat transfer of CaO–SiO₂-based slag for high-Mn–high-Al steel. 2020. – J. Iron Steel Res. Int. – Vol. 27. – P. 788–795.
5. Chen G.J., He, S.P., Wang Q. Dissolution behavior of Al₂O₃ into tundish slag for high-Al steel. 2020. – J. Mater. Res. Technol. – Vol. 9. – P. 11311–11318.
6. Dewangan S., Behera S., Chowrasia M.K. Comparative analysis into mechanical properties and microstructural attributes of quenched and tempered 0.2 %-C steel. 2020. – World J. Eng. – Vol. – P. 17, 127–133.

Жовтобрюх В. О., Поліщук Д. В., Алтухов П. М.

(Філія КПУ в м. Кременчук)

**ВПЛИВ НАНОКОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ
ДЕТАЛЕЙ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ**

E-mail: kpudmytro@gmail.com

Знос є ключовим фактором, що обмежує довговічність, надійність та паливну ефективність двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ). Застосування навантажуваних матеріалів представляє собою перспективний напрямок для вирішення цієї проблеми, пропонуючи фундаментально нові механізми захисту поверхонь. У дослідженні розглянуто вплив навантажуваних матеріалів, які застосовуються у формі захисних покриттів та присадок до мастильних матеріалів, на підвищення зносостійкості критично важливих деталей ДВЗ. Аналіз показує, що навантажуваних матеріалів значно знижують коефіцієнт тертя та інтенсивність зносу, підвищують механічні властивості компонентів та, як наслідок, суттєво продовжують їхній ресурс. Ключовим аспектом їхньої ефективності є здатність модифікувати трибологічну систему, зокрема, шляхом формування стабільних трибоплівок, які виступають у ролі «третього тіла».

Довговічність та надійна робота двигунів внутрішнього згорання (ДВЗ)

критично залежать від зносостійкості їхніх компонентів. Зношування, що відбувається в процесі експлуатації, є головним чинником, який призводить до втрати потужності, збільшення витрати палива та масла, а також до передчасного виходу двигуна з ладу. Знос деталей шатунно-поршневої групи може зростати в десятки разів при роботі двигуна за знижених температур або на паливі з високим вмістом сірки. Крім того, наявність механічних домішок у мастильних матеріалах багаторазово підвищує інтенсивність зношування, що підкреслює необхідність нових, більш ефективних підходів до захисту.

Традиційні методи покращення експлуатаційних характеристик, такі як використання високоякісних паливних та мастильних матеріалів, часто є недостатніми для протистояння агресивним умовам роботи сучасних ДВЗ. Ця ситуація створює нагальну потребу в інноваційних рішеннях у сфері матеріалознавства. Нанотехнології, як інтегруючий напрямок у сфері критичних технологій, пропонують фундаментально нові можливості для розробки матеріалів з винятковими властивостями. Здатність маніпулювати речовиною на атомарному та молекулярному рівнях дозволяє створювати нанокомпозити – матеріали з модифікованою структурою та покращеними механічними та трибологічними характеристиками, які неможливо досягти у звичайних матеріалах. Такі матеріали стають основою для розробки більш легких, міцних і довговічних компонентів, що знаходять широке застосування в аерокосмічній, автомобільній та інших галузях.

Зношування деталей ДВЗ є комплексним процесом, що включає кілька взаємопов'язаних механізмів. Згідно з класифікацією, можна виділити статичне та динамічне зношування, а також низку типових видів, які проявляються у вузлах тертя. Адгезійне зношування відбувається при терті ковзання, коли дві поверхні зчіплюються, що призводить до відриву частинок матеріалу та утворення ямок, наприклад, у підшипниках ковзання. Абразивне зношування спричиняється потраплянням твердих частинок (наприклад, піску) між поверхнями, що труться, що призводить до їхнього постійного дряпання та пошкодження. Окислювальне та корозійне зношування виникає внаслідок хімічної взаємодії поверхонь з агресивними речовинами, такими як кисень та продукти згоряння палива, що

призводить до утворення оксидів і, як наслідок, до руйнування матеріалу. Зношування шляхом відшарування відбувається при високих контактних тисках і терті кочення, викликаючи пластичну деформацію та втому матеріалу, що згодом призводить до відшарування частинок.

Ці механізми часто діють одночасно, тому для ефективного захисту потрібні матеріали, здатні протистояти різним видам деградації. У цьому контексті нанокompозити демонструють виняткові властивості. Вони являють собою матеріали, до складу яких входять наночастинки, що модифікують їхні фізико-хімічні та механічні характеристики. Відмінною рисою нанокompозитів є надзвичайно розвинена поверхня ізольованих наночастинок, що дозволяє суттєво підвищити міцність, жорсткість та зносостійкість базової матриці, наприклад, полімерної.

Механізм покращення властивостей нанокompозитів ґрунтується не лише на простому армуванні, а й на фундаментальних змінах у мікроструктурі матеріалу. Наприклад, додавання наночастинок графену до полімерних композитів значно підвищує їхню мікротвердість та зносостійкість. Цей ефект можна пояснити механізмом зміцнення, який корелює з теорією Холла-Петча. Рівномірна дисперсія наночастинок призводить до зменшення розміру зерен у матриці, що, своєю чергою, збільшує щільність границь зерен. Ці границі діють як перешкоди для руху дислокацій, ефективно блокуючи їх та підвищуючи міцність та мікротвердість матеріалу. Таким чином, наночастинки не просто заповнюють об'єм, а активно змінюють мікроструктуру, роблячи матеріал більш стійким до пластичної деформації та абразивного зношування. Види зношування, опис механізму і типові прояви вказані в табл. 1.

Таблиця 1 – Основні види зношування та їх прояви в деталях двигунів внутрішнього згоряння.

Вид зношування	Опис механізму	Типові прояви в деталях ДВЗ
Адгезійне	Руйнування контактних мікростиків, утворених при недостатньому змащенні	Утворення ямок на підшипниках ковзання та шестернях
Абразивне	Вирізання матеріалу твердими частинками (наприклад, піском) у зоні тертя	Зношення при сухому терті або при забрудненні мастила
Окислювальне/ Корозійне	Формування оксидів металу під впливом кисню, вологості та температури	Зношування в підшипниках ковзання, особливо в сільськогосподарській техніці
Відшарування	Втома матеріалу та його відшарування внаслідок циклічних високих тисків	Відбувається в недостатньо змащених підшипниках кочення та передачах

Нанокompозитні матеріали можуть бути інтегровані в конструкцію ДВЗ двома основними способами: як захисні покриття на поверхнях деталей або як присадки до мастильних матеріалів. Кожен підхід має унікальні механізми дії та переваги.

Високоякісні нанокompозитні покриття можуть значно покращувати трибологічні властивості деталей двигуна, таких як поршні та циліндри. Для їхнього нанесення застосовуються передові технології, зокрема фізичне осадження з парової фази (PVD), хімічне осадження (CVD) та вакуумно-плазмові методи. Ці методи дозволяють створювати покриття, чії характеристики можуть контролюватися на нанометровому рівні. Одним з важливих аспектів є попередня іонно-плазмова обробка поверхні, яка підвищує адгезію покриття до основи.

Дослідження показують, що різні типи нанокompозитних покриттів, такі як TiN, TiAlN, CrAlN та Mo-N, демонструють значні переваги. Наприклад, покриття на основі молібден-нітриду (Mo-N) мають високу твердість (понад 22 ГПа) та відмінні трибологічні властивості, що робить їх придатними для використання на

алюмінієво-кремнієвих сплавах, з яких виготовляють поршні. Порівняльний аналіз показав, що покриття TiN та TiAlN мають низький коефіцієнт тертя та низьку інтенсивність зносу. Проте, вибір оптимального покриття залежить від конкретних умов експлуатації, оскільки не існує універсального рішення. Наприклад, CrAlN покриття, завдяки утворенню стабільних оксидів хрому (Cr_2O_3) та алюмінію (Al_2O_3) під час роботи, демонструє вищу стійкість до корозійного та абразивного зношування в агресивних середовищах, таких як морська вода. Це підкреслює, що трибохімічна поведінка матеріалу є такою ж важливою, як і його початкові механічні властивості.

Таблиця 2 – Трибологічні та механічні властивості нанокompозитних покриттів

Тип покриття	Нанотвердість [GPa]	Товщина [μm]	Коефіцієнт тертя	Макс. темп. [$^{\circ}\text{C}$]	Застосування
TiN	до 24	1-7	0.55	600	Менш тверді матеріали (сталь < 900 N/mm ²)
TiCN	до 32	1-4	0.2	400	Тверді матеріали (сталь < 1300 N/mm ²)
TiAlN	до 35	1-4	0.5	700	Тверді матеріали (сталь < 1100 N/mm ²)
AlTiN	до 38	1-4	0.7	900	Дуже тверді матеріали (сталь < 1300 N/mm ²)
RUNaTEC	до 45	1-4	0.45	1200	Дуже тверді матеріали (сталь < 1300 N/mm ²)
CrAlN	Н/Д	Н/Д	Н/Д	Н/Д	Ефективне проти корозійного зносу

Додавання наночастинок до мастильних матеріалів є ще одним ефективним методом підвищення зносостійкості та зниження тертя. Ці присадки діють за унікальним «двобічним» ефектом. З одного боку, наночастинок, такі як багат шарові фулерени дисульфиду вольфраму (WS_2), функціонують як крихітні

підшипники, що котяться між поверхнями тертя, мінімізуючи безпосередній контакт металу з металом і значно знижуючи коефіцієнт тертя. З іншого боку, під впливом високого тиску та тертя ці наночастинки можуть вивільняти трибоплівки, які осідають у мікротріщинах та нерівностях на поверхнях, ефективно «ремонтуючи» їх. Цей процес самовідновлення призводить до згладжування поверхонь і формування стабільного, низькозсувного захисного шару, який залишається навіть після заміни мастила.

Дослідження показують, що додавання наночастинок до базових мастильних масел може знизити тертя на 40 % і зменшити знос на понад 50 %. Наприклад, лабораторичні тести продемонстрували, що наночастинки графену можуть зменшити тертя в мінеральному маслі на 45-65 %. Комерційні продукти, такі як NanoLub, Nanoguard та Ceratec, використовують ці механізми для збільшення ресурсу обладнання та продовження інтервалів технічного обслуговування.

Таблиця 3 – Кількісний вплив наночастинок-присадок на трибологічні характеристики мастильних матеріалів

Тип наночастинок	Тип базового мастила/матриці	Зменшення тертя (%)	Зменшення зносу (%)
Наноалмаз (НА)	Поліамід 6 (ПА6)	Н/Д	Збільшення зносостійкості
Наноклина (ММТ)	Гумова піна	Н/Д	Збільшення зносостійкості на 58.89 %
Оксид титану (TiO_2), Оксид заліза (Fe_2O_3)	SAE 10W-30	Н/Д	Зменшення зносу
Оксиди металів	Базові масла	Зменшення на 30-40 %	Зменшення на понад 50 %
Графен	Мінеральне масло	Зменшення на 45-65 %	Н/Д

Одним з ключових механізмів, що пояснює високу ефективність нанокompозитів у зниженні тертя та зносу, є концепція «третього тіла» в трибології.

Це проміжний шар, що формується між двома поверхнями, що труться, і складається з продуктів зносу, частинок мастила та елементів покриття. Замість того, щоб руйнування відбувалося на основних поверхнях, воно переноситься на цей проміжний шар, який приймає на себе навантаження.

Нанокompозитні покриття та присадки активно сприяють формуванню стабільного та міцного «третього тіла» у вигляді трибоплівки. Дослідження показують, що для деяких покриттів, таких як Ti-Si-C-N, формування стабільної трибоплівки призводить до значного зниження тертя, незалежно від початкових механічних властивостей самого покриття. Це свідчить про те, що ключовий аспект зносостійкості полягає не стільки у статичній твердості матеріалу, скільки в його динамічній здатності формувати захисний шар безпосередньо в процесі експлуатації.

Аналіз поведінки таких покриттів, як аморфний алмазоподібний нанокompозит (a-C:H:Si:O), показав, що після початкового періоду високого тертя та зносу, на поверхні контр-тіла швидко утворюється трибоплівка. Цей процес супроводжується різким падінням коефіцієнта тертя більш ніж на 80 %. При цьому, більша частина зниження тертя відбувається, коли товщина трибоплівки не перевищує 2 нм, що вказує на вирішальну роль приповерхневих властивостей та хімічних реакцій, що відбуваються на нанорівні. Це підтверджує, що для оптимізації трибологічних характеристик недостатньо спиратися лише на механічні властивості; необхідне поглиблене вивчення трибохімічних процесів та поведінки «третього тіла» у динаміці.

Застосування нанокompозитів у двигунобудуванні приносить значні економічні та експлуатаційні переваги. Підвищення зносостійкості деталей та зниження тертя призводить до збільшення довговічності двигуна, зменшення витрат на технічне обслуговування та капітальний ремонт, а також до покращення паливної економічності. Завдяки зменшенню тертя, двигун працює тихіше, а його паливна ефективність може зрости на 8 %.

Сьогодні ця технологія перетнула межу від суто академічних досліджень до широкого комерційного застосування. Це підтверджується інвестиціями великих

гравців автомобільної індустрії. Наприклад, BMW і Ventures інвестувала у компанію Actnano, що розробила нанопокриття для захисту електроніки, демонструючи стратегічний інтерес до нанотехнологічних рішень для підвищення надійності компонентів. На ринку вже існують різноманітні комерційні продукти, такі як присадки NanoLub з наночастинками WS_2 та добавки з наночастинками графену, які доступні для кінцевого споживача. Завдяки масовому виробництву вартість наноматеріалів почала знижуватися, що створює сприятливі умови для їхнього широкого впровадження в найближчому майбутньому.

Проте, існують і певні виклики. Зокрема, додавання занадто великої кількості наночастинок може призвести до їх агломерації у матриці, що, навпаки, погіршує властивості матеріалу. Тому дослідження зосереджені на оптимізації дисперсії та розробці нових методів отримання нанокомпозитів, які забезпечують рівномірний розподіл наповнювача.

Нанокомпозитні матеріали та технології на їхній основі є ключовим напрямком у розвитку триботехніки та двигунобудування. Дослідження показують, що ці матеріали фундаментально покращують зносостійкість деталей ДВЗ, діючи через кілька взаємодоповнюючих механізмів: структурне зміцнення матеріалу на нанорівні, зниження тертя за рахунок ефекту «кочення» наночастинок та, що найважливіше, динамічне формування захисних трибоплівок, що запобігають руйнуванню основних поверхонь тертя.

Впровадження нанокомпозитних рішень сприятиме не лише підвищенню довговічності та ефективності ДВЗ, а й забезпечить екологічні переваги за рахунок зниження викидів та меншої потреби в обслуговуванні.