

Єфименко В.В.

Національний університет біоресурсів та природокористування України

Олександренко В.П.

Хмельницький національний університет

Кустовська А.Д.

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Руденко В.М.

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Матвєєва О.Л.

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Трофімов І.Л.

Державний університет «Київський авіаційний інститут»

ПОЛІМЕРНІ МАТЕРІАЛИ В ТЕХНОЛОГІЯХ ВИРОБНИЦТВА ІМПЛАНТАНТІВ ТА ПРОТЕЗІВ

Стаття присвячена актуальним питанням використання полімерних матеріалів у виробництві імплантатів та протезів, з особливим акцентом на фторполімерні покриття для титанових конструкцій. Розглянуто перспективи й виклики застосування полімерів у сучасній біоінженерії, зокрема в ортопедії та імплантології, де традиційно домінують титанові сплави. Незважаючи на високі механічні характеристики та біосумісність титану, його протизношувальні властивості є обмеженими, що потребує застосування інноваційних покриттів.

У роботі проаналізовано переваги фторопластів – матеріалів із надзвичайно низьким коефіцієнтом тертя та високою хімічною стійкістю, водночас зазначено їх недоліки, зокрема низьку адгезію до металевих поверхонь. Для усунення цих обмежень запропоновано використання тришарових фторполімерних покриттів на основі Ф-30П, модифікованих нанодобавками оксидів цирконію, графіту та аміноорганокремнезему.

Експериментальні дослідження показали, що введення наночастинок $Zr(Y)O(OH)_2$ значно підвищує адгезію, зносостійкість, еластичність і мікротвердість покриттів. Найкращі результати отримано при використанні 2 мас. % модифікаторів: стійкість до подряпин зросла у 14,35 разів, мікротвердість – у 3,4 рази, термостійкість – до 235 °С. Описано механізми, що лежать в основі підвищення характеристик – формування сферолітичних структур, каркасних міжфазних зв'язків та захисного шару на межі «полімер-метал».

Охарактеризовано класифікацію медичних полімерів за походженням, біодеградацією та біосумісністю, наведено порівняння природних і синтетичних полімерів. Значну увагу приділено біомастилам – нанорідинам на полімерній основі, які використовуються для зменшення тертя у штучних суглобах. Наведено сучасні напрями досліджень у галузі біоактивних покриттів, «розумних» матеріалів та нанокомпозитів.

Застосування модифікованих фторполімерних покриттів суттєво підвищує довговічність і ефективність імплантантів, знижуючи ризики, пов'язані з їх експлуатацією, і відкриває перспективи для подальших досліджень у галузі функціональних полімерних матеріалів у медицині.

Ключові слова: медичні вироби, високомолекулярні сполуки, полімерні матеріали, фторопластові покриття, властивості, адгезія, зносостійкість, технологічні фактори.

Постановка проблеми. У сучасній медицині однією з найперспективніших галузей є біоінженерія, зокрема розробка та впровадження імплантів і протезів, які здатні відновлювати функції органів і тканин людського тіла. Одним з ключових чинників, що визначають успішність таких технологій, є вибір матеріалів, з яких виготовляються відповідні конструкції.

Розвиток біоінженерії в ортопедії призвів до широкого використання титанових сплавів у якості основного матеріалу для виготовлення ендопротезів. Особливо актуальним є застосування титанових вставок при заміні кульшового, колінного, плечового та ліктьового суглобів. Висока біосумісність, стійкість до корозії та сприятливі механічні властивості роблять титан незамінним матеріалом у хірургії кістково-суглобової системи. Не дивлячись на переваги титанові сплави мають незадовільні протизношувальні властивості, що призводить до пошуку протизношних рідин, які заповнили б порожнини між суглобом і титановою вставкою для зменшення сили тертя.

Серед усього різноманіття матеріалів особливе місце займають полімерні матеріали – речовини, що поєднують у собі гнучкість, міцність, біосумісність і можливість модифікації для конкретних клінічних задач.

Полімери активно використовуються у виробництві ортопедичних, стоматологічних, кардіологічних імплантів, штучних органів, а також у тимчасових та постійних протезах. Їхні властивості дають змогу не лише створювати високо-ефективні та функціональні пристрої, але й розширювати можливості персоналізованої медицини за допомогою 3D-друку, біопринтингу та інших інноваційних методів [1].

Фторопластові покриття знаходять широке застосування як у машинобудуванні та і в медичних виробках. Вони унікальні за своїми властивостями, особливо за хімічною стійкістю, стійкі практично до всіх хімічних речовин. Покриття з фторопластів мають низький коефіцієнт тертя, стійкі до зношування та ударів.

Недоліком фторопластових покриттів є їх низька адгезійна міцність до металевої підложки і недостатньо висока зносостійкість. Тому дослідження спрямовані на подолання цих недоліків є досить актуальними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Титанові вставки стали основою сучасного ендопротезування завдяки своїм унікальним властивостям. Водночас ефективність імплантації

значною мірою залежить від індивідуального підходу до пацієнта, вибору технології фіксації та подальшого моніторингу. Подальші дослідження спрямовані на мінімізацію ускладнень і вдосконалення біоінженерних характеристик імплантів.

Титанові імпланти використовуються при:

- дегенеративно-дистрофічних змінах (артрозах);
- наслідках тяжких переломів;
- ревматоїдному артриті;
- онкологічних резекціях.

Імпланти можуть бути встановлені цементним способом (з використанням поліметилметакрилату) або через безцементне кріплення, що ґрунтується на біологічному зрощенні з кісткою.

Незважаючи на переваги, застосування титанових вставок пов'язане з низкою проблем:

- *Остеоліз.* У результаті мікрорухів або тертя між компонентами протеза утворюються частки зносу (переважно поліетиленові), які можуть викликати асептичне запалення й резорбцію кістки навколо імпланта.

- *Періімплантна інфекція.* Може проявлятися як у гострій, так і в хронічній формі, вимагаючи ревізійного втручання або повної заміни протеза.

- *Нестабільність імпланта.* Пов'язана з недостатньою фіксацією або неадекватною остеointegraцією, особливо в осіб з остеопорозом.

- *Алергічні реакції.* Хоча рідкісні, існують повідомлення про індивідуальну гіперчутливість до титану або домішок у сплавах.

- *Металоз* – накопичення іонів металу в тканинах навколо імпланта, що може спричинити запалення або навіть некроз.

Титанові вироби (Ti) медичного призначення характеризується низькою щільністю (приблизно 4,5 г/см³), високим модулем пружності (105–120 ГПа) та чудовою стійкістю до агресивного впливу біологічного середовища. Найпоширенішими у медичній практиці є сплави Ti-6Al-4V (титан-алюміній-ванадій) та Ti-6Al-7Nb, які демонструють високу механічну міцність та знижений ризик токсичності. Окрім того, титан підтримує процес остеointegraції – прямого зрощення з кістковою тканиною без утворення фіброзного шару, що забезпечує тривалу стабільність імпланта.

Використовуючи титанові вставки у суглобах, особливо при стираннях чашечки кістки, щоб зменшити силу тертя та знос у вузли тертя суглобів вводять біомасила – біозмашуванні нанорідини на основі полімерів, які забезпечують

покращені характеристики змащування та біосумісність, що значно зменшує тертя у штучних суглобах, а наявність дисульфиду молібдену та йонів міді покращують протизношувальні властивості до 20%, продовжуючи термін служби штучних суглобів. Біосумісні матеріали, такі як наночастинки на основі хітозану, зменшують тертя та мають протизапальні властивості, що робить їх ідеальними для лікування остеоартриту [2-4]. Крім того, екологічно чисті біомастила, модифіковані багатостінними вуглецевими нанотрубками, покращують змащування, мінімізуючи вплив на навколишнє середовище. Структурно, насичені маслом полімерні композити з мезопористими структурами забезпечують стабільне змащування при різних навантаженнях, а нанорідини можуть адаптуватися до динамічних умов синовіальних суглобів, підтримуючи змащування навіть під високим тиском [5-6].

Метою статті є аналіз сучасного стану застосування полімерних матеріалів у виробництві імплантатів та протезів, характеристика їх властивостей, переваг і недоліків, а також пошук високоадгезійних полімерних покриттів для нанесення на титанові поверхні для покращення протизносних та біосумісних властивостей.

Виклад основного матеріалу. Останні дослідження дозволяють говорити про активний розвиток титанових імплантів із покриттями, структурованою поверхнею, нанотехнологіями. Ключові цілі – покращення остеоінтеграції, зменшення інфекцій та максимально тривала стабільність.

Водночас, з'являються і нові виклики: корозія, виділення наночастинок, гіперчутливість у деяких пацієнтів і механізми тканинного фіброзу. Для впровадження нових технологій необхідні клінічні випробування та довгострокове спостереження.

Полімери, що застосовуються в медицині, класифікують за кількома критеріями: за походженням, за властивостями, за здатністю до біодеградації та взаємодією з біологічним середовищем.

За походженням:

- Природні полімери – колаген, желатин, хітозан, альгінати. Характеризуються високою біосумісністю та біоактивністю, однак можуть мати обмежену механічну міцність і стабільність.

- Синтетичні полімери – поліетилен, поліметилметакрилат, поліуретан, полілактидна кислота. Вони забезпечують високу міцність, контрольовані властивості, але можуть потребувати додаткових заходів для підвищення біосумісності.

За здатністю до біодеградації:

- Біодеградовані полімери – розкладаються в організмі з утворенням нетоксичних метаболітів (наприклад, PLA, PCL). Використовуються для тимчасових імплантів, які не потребують повторного хірургічного втручання.

- Нерозкладні полімери – зберігають стабільність в організмі протягом тривалого часу (наприклад, PE, PMMA). Застосовуються для постійних конструкцій.

За ступенем біосумісності:

- Біоінертні – практично не взаємодіють з біологічними тканинами (наприклад, поліетилен високої щільності).

- Біоактивні – сприяють інтеграції з навколишніми тканинами або навіть стимулюють ріст клітин (наприклад, композити на основі гідроксиапатиту з полімерною матрицею).

Для ефективного використання в медичних пристроях полімери мають відповідати низці специфічних вимог. Основні з них:

Механічні властивості: міцність на розтяг, гнучкість, пружність і в'язкість мають відповідати біомеханічним властивостям тканин, які замінюються. Наприклад, для ортопедичних імплантів потрібні високоміцні матеріали, тоді як для м'якотканинних протезів – еластичні.

Хімічна стабільність: Полімери повинні бути стійкими до впливу біологічних рідин, ферментів і змін pH, не піддаючись гідролізу чи окисненню.

Біосумісність: матеріали не повинні викликати токсичних, алергічних або імунних реакцій. В ідеалі – повинні сприяти інтеграції з живими тканинами.

Стерилізація: полімерні вироби мають зберігати свої властивості після обробки методами стерилізації (етиленоксид, гамма-опромінення, автоклавування).

Які ж проблеми та виклики щодо використання полімерів у медицині.

Попри значні переваги, полімерні матеріали не позбавлені недоліків. Розуміння потенційних проблем є ключем до безпечного та ефективного їх використання в імплантології та протезуванні.

Довговічність. Деякі полімери з часом піддаються старінню, втрачають механічні властивості, тріскаються або зношуються. Це особливо критично для імплантів, що мають служити протягом десятиліть.

Біологічна відповідність. Навіть біосумісні матеріали можуть викликати локальні запальні реакції, фіброз або капсульне утворення. Випадки алергії на компоненти полімерів хоч і рідкісні, але можливі.

Контрольована біодеградація. Для біорозкладних полімерів надзвичайно важливо забезпечити прогнозований і рівномірний процес розкладу. Занадто швидкий або нерівномірний розпад може спричинити механічну нестабільність або запалення.

Стерилізація. Деякі полімери нестійкі до стандартних методів стерилізації, що може обмежити їх використання у клінічній практиці.

Екологічні та етичні аспекти.

Виробництво полімерів може бути ресурсомістким і супроводжуватися забрудненням довкілля. У разі використання природних полімерів виникають також питання біоетики.

Галузь полімерних матеріалів у медицині стрімко розвивається, зосереджуючи увагу на інтелектуальних рішеннях та інтеграції з біотехнологіями. Це спонукає розвиток нових матеріалів:

Нанополімери. Використання наночастинок у полімерній матриці дає змогу змінювати поверхневі властивості матеріалів, поліпшувати адгезію клітин, контролювати вивільнення лікарських речовин.

Смарт-матеріали. Такі полімери реагують на зовнішні стимули (температуру, pH, вологу) – наприклад, змінюють форму або вивільняють активні речовини. Перспективні для «розумних» імплантів і систем доставки ліків.

Тканинна інженерія. Поєднання полімерів з клітинними технологіями дозволяє створювати гібридні системи – каркаси, заселені живими клітинами, що з часом перетворюються на функціональні тканини (кістка, шкіра, хрящ).

Гібридні та біоактивні композити. Поєднання полімерів з керамікою або металами дає змогу оптимізувати механічні та біологічні властивості матеріалів для більшої універсальності у хірургії.

Біомастила є ключовим фактором у підвищенні продуктивності та довговічності біомедичних пристроїв, особливо штучних суглобів та імплантів, шляхом імітації природних механізмів змащування в біологічних системах. Біополімери, такі як альгінат, хітозан та полімолочна кислота (PLA), поєднуються з наночастинами для створення нанокомпозитів з покращеними механічними та біологічними властивостями [6-8]. Ці матеріали демонструють підвищену теплопровідність, стабільність та біосумісність, що робить їх придатними для застосування в доставці ліків та тканинній інженерії. Розробка передових біомас-тил, включаючи мережі полімер-наночастинок, усуває багато обмежень традиційних мас-тил.

Наприклад, композити з надвисокомолекулярного поліетилену (UHMWPE), армовані вуглецевими нанотрубками, демонструють виняткову зносостійкість, зменшуючи об'єм зносу до 93% та досягаючи показників зносу до $5,6 \times 10^{-6}$ мм³/Нм. Такі досягнення ілюструють трансформаційний потенціал нанорідин на основі полімерів у біомедичних застосуваннях.

Визнаючи міждисциплінарний характер біотрибології, Ахай та Вадхва (2024) виступають за посилення співпраці між експертами в галузі трибології, матеріалознавства та біомеханіки для ефективного вирішення постійних проблем.

Нанорідини на основі полімерів також демонструють універсальні властивості зниження тертя. Наприклад, тиксотропні гідрогелі в поєднанні з UHMWPE досягають коефіцієнтів тертя нижче 0,01, тоді як кополімери РМРС, щеплені хітозаном, демонструють порівнянне зниження тертя в біологічних середовищах. Крім того, захисні плівки, утворені внаслідок синергетичної взаємодії між Nano-MoS₂ та графеном, значно покращують трибологічні характеристики, зменшуючи знос через механізми кочення та ковзання. Завдяки своїй високій площі поверхні та структурній міцності, вуглецеві нанотрубки сприяють зменшенню площі зносу на 29% навіть при низьких концентраціях [9-10].

Незважаючи на ці досягнення, біомастила на основі полімерів стикається з проблемами, пов'язаними зі стабільністю в біомедичних середовищах. Включення природних біополімерів забезпечує нетоксичність та екологічність, що є важливим для медичного використання. Наночастинок додатково підвищують механічну міцність та біологічну активність, що сприяє застосуванню в загоєнні ран, доставці ліків та регенеративній медицині. Однак такі фактори, як іонна сила та коливання температури, можуть погіршити дисперсію та ефективність наночастинок. Досягнення у впровадженні добавок, таких як оксид графену та тиксотропні гідрогелі, подовжили термін служби біомас-тил у суглобах, дозволяючи біомастилам, отриманим з жирних кислот, підтримувати змащення та протистояти окислювальній деградації за фізіологічних умов [5-11].

Поява технологій самовідновлення та інтелектуального змащування пропонує нові можливості для підвищення довговічності та адаптивності біомас-тильних матеріалів у штучних суглобах та інших медичних пристроях.

Водночас, еволюційна траєкторія мастильних матеріалів на основі рослинних олій привернула

значну увагу, що підтверджується їхньою екологічною стійкістю та зменшеним впливом на навколишнє середовище. Як уточнюють Павар та ін. (2022), рослинні олії мають помітні переваги завдяки своїй біорозкладності, відновлюваності та мінімалістичному впливу на навколишнє середовище. Ці мастильні матеріали на біологічній основі демонструють покращені реологічні та трибологічні властивості при поєднанні з наночастинками. Однак постійні проблеми, такі як неоптимальна термоокиснювальна стабільність та незадовільна продуктивність за низьких температур, вимагають рішучого вирішення. Таким чином, необхідні ґрунтовні дослідницькі зусилля для уточнення властивостей мастильних матеріалів на основі рослинних олій, позиціонуючи їх як можливі замітники звичайних мінеральних та синтетичних олів.

Було показано, що включення нанодобавок підвищує стабільність, затримуючи деградацію до $37,5^{\circ}\text{C}$, а також покращуючи в'язкість та трибологічні характеристики. Окислювальна деградація також створює проблеми, хоча антиоксиданти, такі як оксид графену ($\text{C}_x\text{O}_y\text{H}_z$), можуть допомогти пом'якшити ці ефекти. Крім того, рівень рН може суттєво впливати на ефективність біомастила в суглобах, як це спостерігалось в дослідженнях, зосереджених на фізіологічних умовах.

Сумісність із матеріалами з'єднань, включаючи поліетилен надвисокої молекулярної маси (UHMWPE), є важливою для зменшення зносу та збільшення терміну експлуатації пристрою. У штучних суглобах знос впливає на функціональність пристрою, а такі фактори, як змішане змащення, можуть ускладнювати вантажопідйомність при різних навантаженнях.

Полімерні покриття, такі як поліетиленгліколь (ПЕГ) та метакрилат, ефективно запобігають адсорбції білка на наночастинках, зберігаючи таким чином змащувальну здатність у біологічних середовищах. Наночастинки, покриті такими матеріалами, як борат та полімермодифікований оксид цинку, здатні утворювати міцні трибоплівки, що призводить до зменшення тертя на 95% та зносу на 90%. Крім того, самовідновлювальні трибоплівки можуть зменшити тертя на 83%. Функціоналізовані наночастинки, включаючи графен та маггеміт, відомі тим, що затримують початок окиснення на $18\text{--}37,5^{\circ}\text{C}$, тим самим покращуючи трибологічні характеристики. Крім того, амфіфільні та діоксидні (SiO_2) покриття покращують дисперсійну стабільність та термостійкість, одночасно зменшуючи агрегацію. Біо-

сумісні покриття мають вирішальне значення для вирішення проблем токсичності, пов'язаних з наночастинками [10-12].

Нанорідини відіграють вирішальну роль у біомедичних імплантатах, значно зменшуючи тертя та покращуючи продуктивність за допомогою різних механізмів. Одним з ключових механізмів є згладжування поверхні, де наночастинки, такі як поліметилметакрилат (ПММА) та полімолочна кислота (ПЛА), ефективно заповнюють нерівності поверхні, зменшуючи коефіцієнт тертя до 24,3%. Ці наночастинки, заповнюючи нерівності поверхні, одночасно утворюють захисну наноплівку, яка заповнює поверхневі порожнини, що призводить до плавнішого руху, зменшення зносу та мінімізації втрат енергії. Цей захисний шар не тільки покращує змащування, але й підвищує біосумісність, сприяючи покращеній продуктивності імплантатів.

Для подальшого підвищення однорідності та точності нанесення наночастинок були розроблені такі методи, як струменевий друк, що дозволяють точно контролювати осадження наночастинок та забезпечувати стабільний захист поверхні. Крім того, моделювання молекулярної динаміки забезпечує глибше розуміння можливостей цих наночастинок щодо зниження тертя, демонструючи зниження тертя до 96,75% за оптимальних умов. Ці результати підкреслюють значний потенціал нанорідин для покращення експлуатаційних властивостей біомедичних імплантатів.

Для підтримки оптимальної продуктивності нанорідин поверхнево-активні речовини відіграють вирішальну роль, зменшуючи в'язкість, покращуючи характеристики текучості та забезпечуючи стабільну роботу мастила. Однак, незважаючи на перспективність нанорідин, їхня ефективність залежить від таких факторів, як концентрація та розмір наночастинок, що підкреслює необхідність ретельної оптимізації для максимізації їх практичних переваг. Подальший прогрес у цій галузі ще більше розширить застосування нанорідин у біомедичних імплантатах.

Нанорідини на основі полімерів є дуже перспективним інноваційним рішенням для тотального ендопротезування суглобів (TJR), особливо при ендопротезуванні кульшового та колінного суглобів. Основними цілями є покращення змащування, мінімізація зносу та підвищення біосумісності імплантатів. Нещодавні дослідження зосереджені на використанні біосумісних полімерних наночастинок (NP), таких як поліметилметакрилат (PMMA) та полімолочна кислота (PLA),

для покращення змащування суглобів. Наприклад, у дослідженні Сіму та ін. (2023) наночастинки PLA у поєднанні з гіалуроновою кислотою (НА) та поверхнево-активними речовинами використовувалися для моделювання контакту кістки та хряща між сталеною кулькою та силіконовим еластомером. Їхні результати показали, що нанорідини PLA зменшили коефіцієнт тертя (CoF) до 24,3%, головним чином шляхом згладжування поверхні та покращення змащування. Це відкриття свідчить про потенційне раннє втручання при остеоартриті (ОА). Зниження CoF підкреслює потенціал нанорідин на основі полімерів для мінімізації зносу, що має вирішальне значення для продовження терміну експлуатації штучних суглобів [8-12].

У нашій роботі [13-14] розглядається інший шлях вирішення проблеми протизношувальних властивостей протезів суглобів, а саме, не використання біозмащувальних матеріалів, а застосування модифікованих полімерних матеріалів нанесених на підложку.

Виклад основного матеріалу. Застосовуючи прилад для визначення адгезії та стійкості покриттів до пошкодження шкрябанням NOVOTEST ЦІ-М вивчено стійкість тришарових фторполімерних покриттів Ф-30П до пошкоджень шляхом шкрябання за навантаження 7 кг (68,6 Н). Грунтовий шар складався з 72 мас. % фторполімеру Ф-30П, 25 мас. % графіту С-1 та 3 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу. Проміжний шар містив меншу кількість промоторів адгезії, необхідних для зчеплення з основою, а також наповнювачі з високою тепло- та електропровідністю: 79 мас. % Ф-30П, 20 мас. % графіту С-1 та 1 мас. % аміноорганокремнезему.

Оплавлення ґрунтувального і проміжного шарів на основі фторполімеру Ф-30П викону-

вали за температури 245–250 °С протягом однієї години.

Оскільки основне завдання нанесення зовнішнього шару фторопластового покриття на основі Ф-30П – підвищення зносостійкості, то до його складу було введено 1–3 мас. % $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (500 °С), або 1–3 мас. % $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (700 °С), або 1–3 мас. % аморфного гідроксиду цирконію, легованого йонами ітрію (кількість ітрію в перерахунку на оксиди складає 3 моль %): $Zr(Y)O(OH)_2$ і 17 мас. % графіту С-1, а також 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу. Масовий вміст графіту С-1 у зовнішньому шарі в порівнянні з проміжним був зменшений від 20% до 17% для забезпечення достатньої адгезійної міцності, теплопровідності і електропровідності покриття. Оплавлення зовнішнього шару тришарового покриття на основі фторполімеру Ф-30П виконували при температурі 228–235 °С протягом двох годин та охолоджували до кімнатної температури зі швидкістю 30–40 °С за годину.

Аналіз отриманих результатів показав, що введення наномодифікаторів оксидів цирконію сприяє інтенсивному структуруванню матриці, оскільки наночастинки можуть створювати ансамблі за типом кластерів. В результаті створюється армована полімерна система, що відрізняється підвищеними міцнісними і триботехнічними характеристиками. Застосування наночастинок призвело до армування полімерної матриці, що підвищило її міцність і триботехнічні властивості. Показник стійкості до шкрябання підвищився залежно від типу нанодобавки:

- у 5,02 рази з 1% $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (500 °С),
- у 8,98 разів з 1% $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (700 °С),
- у 14,35 разів з 2% $Zr(Y)O(OH)_2$ – порівняно з немодифікованим покриттям Ф-30 П (рис. 1).

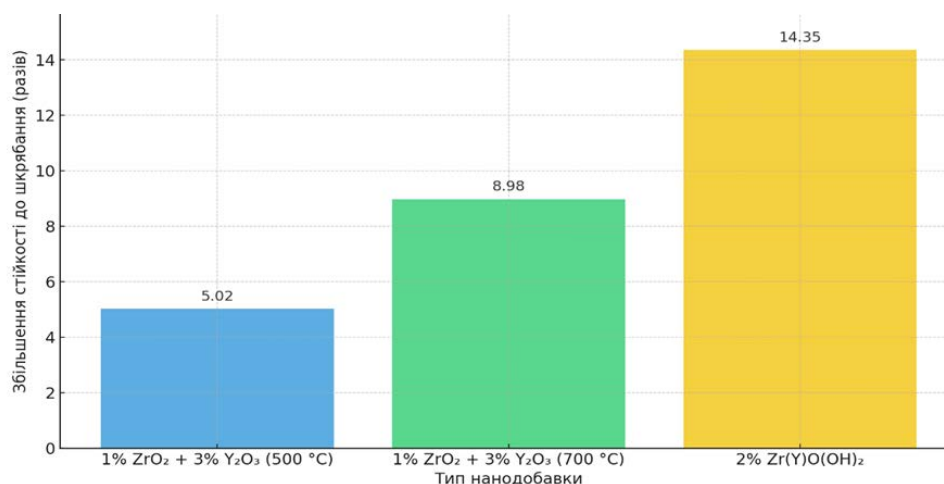


Рис. 1. Залежність стійкості до шкрябання від типу нанодобавки

Видно, що найефективнішим модифікатором є $Zr(Y)O(OH)_2$ при вмісті 2% мас., який забезпечує підвищення стійкості у 14,35 разів.

Поліпшення адгезії обумовлене взаємодією наночастинок з макромолекулами на межі полімеру та наповнювача сприяє утворенню сферолітичних структур, підвищує пластичність і міцність матеріалу, особливо при використанні аморфного гідроксиду цирконію з ітрієм.

Дослідження на абразивостійкість фторопластових покриттів виконували на приладі для випробування матеріалів на стійкість до стирання ДИТ-М. Цей показник особливо важливий, коли медичний виріб, такий як суглоб, експлуатується тривалий час. Встановлено, що при введенні до складу зовнішнього шару тришарового фторопластового покриття на основі Ф-30 П 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (500 °С) абразивостійкість покриття зростає у 1,38 разів. Результати досліджень представлені на рис. 2.

Встановлено, що еластичність збільшилась для тришарового фторопластового покриття до складу зовнішнього шару якого входять:

а) 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (500 °С) у 1,64 рази, б) 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % $ZrO_2 + 3\% Y_2O_3$ (700 °С) у 1,68 разів, в) 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % аморфного гідроксиду цирконію, ле-

ваного іонами ітрію (кількість ітрію в перерахунку на оксиди складає 3 моль %): $Zr(Y)O(OH)_2$ у 1,84 рази в порівнянні з немодифікованим фторопластовим покриттям Ф-30 П. (рис. 2).

Механізм дії наномодифікаторів у фторполімерній матриці Ф-30П полягає у підвищенні щільності структурних утворень завдяки формуванню міжфазних шарів із впорядкованим розміщенням на межі «полімер – наповнювач». За низького вмісту наповнювача (1–3 мас. %) спостерігається прискорення процесу кристалізації, тоді як перевищення цієї концентрації призводить до її уповільнення через взаємодію частинок між собою, їх агломерацію, зростання розмірів і зниження активності в структуроутворенні.

У межах 1–3 мас. % наповнювача в композиції відбуваються такі структурні трансформації: з'являються сфероліти, спочатку неоднорідні за формою і розмірами, які згодом уніфікуються, збільшується щільність пакування, а наночастинки рівномірно розподіляються в об'ємах між полімерними елементами, зв'язуючись між собою в каркасні структури. Це сприяє підвищенню зносостійкості матеріалу при збереженні або незначному покращенні фізико-механічних властивостей.

Паралельно спостерігається активізація як руйнівних, так і стабілізуючих процесів у поверхневих шарах матеріалу, де наповнювач виконує функцію зшивального агента для продуктів трибохімічного розкладу макромолекул. Саме це забезпечує зростання зносостійкості композицій. Крім того, наночастинки беруть участь у формуванні

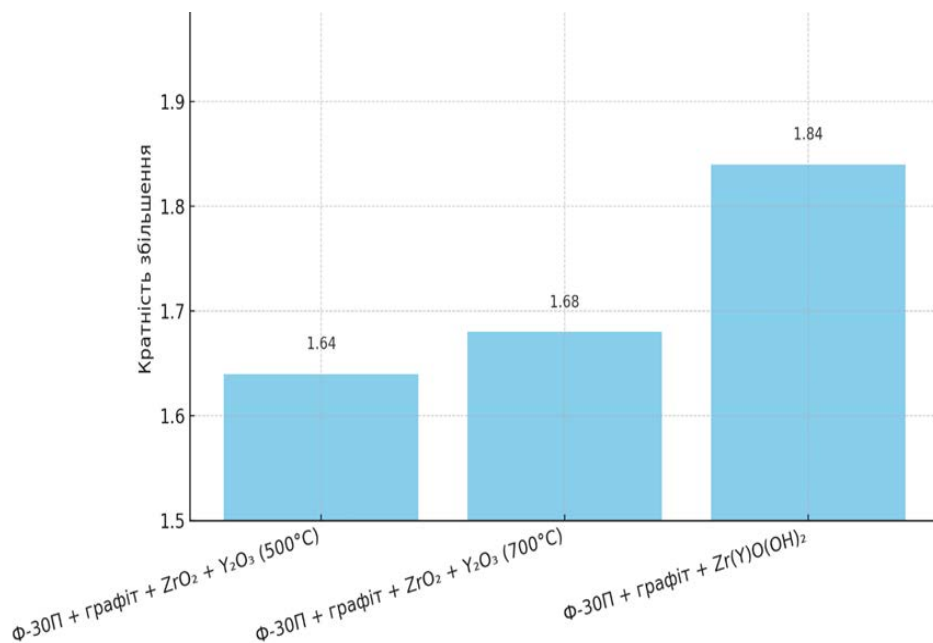


Рис. 2. Збільшення еластичності тришарового фторопластового покриття

Таблиця 1

Властивості промислового та модифікованого фторполімеру

Показник	Без модифікаторів	З модифікаторами (ZrO ₂ , графіт, аеросил)	Зміна
Мікротвердість (ум.од.)	1.0	2.8–3.4	Зростає у 3.4 рази
Опір подряпинам	5.02	14.35	Зростає у 2.8 рази
Еластичність	Середня	Вища	Зростає
Теплопровідність	Висока	Помірна	Зменшується
Термостійкість	До 200°C	До 230–235°C	Зростає
Зносостійкість	Низька	Висока	Значно зростає
Адгезія до металу	Посередня	Висока	Зростає

міцного захисного шару з високою стійкістю до контактних деформацій і поліпшеною адгезією плівки переносу до поверхні контртіла, що обумовлено їхньою координативною активністю.

Таким чином, узагальнюючі властивості застосування промислового фторполімеру Ф-30П та модифікованого, можливо навести таблично (табл. 1).

Запропоновані фторполімерні покриття дозволяють збільшити термін служби не лише технологічного обладнання, а й виробів, що використовуються для протезування та імплантації. Це, своєю чергою, сприяє підвищенню їх довговічності.

Висновки. Полімерні матеріали відіграють дедалі важливішу роль у сучасній медицині, забезпечуючи ефективні рішення для імплантології та протезування.

Проведені дослідження довели, що фторполімерні покриття на основі фторопласту Ф-30П, модифіковані наночастинками цирконію та графіту, демонструють суттєве покращення фізико-механічних характеристик:

1. Найбільше підвищення стійкості до подряпин (у 14,35 разів) спостерігалось при введенні 2% аморфного гідроксиду цирконію, легovanого ітрієм. Так, стійкість до пошкодження шкрябанням збільшилась для тришарових фторопластових покриттів до складу зовнішнього шару якого

входять: а) 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 1 мас. % ZrO₂ + 3% Y₂O₃ (500 °C) у 5,02 разів, б) 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 1 мас. % ZrO₂ + 3% Y₂O₃ (700 °C) у 8,98 разів, в) 17 мас. % графіту С-1 + 1 мас. % аміноорганокремнезему на основі аеросилу + 2 мас. % аморфного гідроксиду цирконію, легovanого іонами ітрію (кількість ітрію в перерахунку на оксиди складає 3 моль %): Zr(Y)O(OH)₂ у 14,35 разів в порівнянні з немодифікованим фторопластовим покриттям Ф-30 П.

2. Покращення абразивостійкості (до 1,38 разів), еластичності (до 1,84 разів), мікротвердості (до 3,4 рази) і термостійкості (до 235°C).

3. Оптимальна концентрація нанодобавок у межах 1–3 мас. % сприяє утворенню рівномірно розподіленої армованої структури з високою щільністю пакування.

4. Модифікатори також забезпечують утворення стабільного захисного шару з високою адгезією та зносостійкістю.

Таким чином, модифіковані фторполімерні покриття перспективні для застосування у медичних імплантах і технологічному обладнанні завдяки значному підвищенню довговічності та експлуатаційних властивостей.

Список літератури:

1. Moore M. J., Tan R. P., Yang N., Rnjak-Kovacina J., Wise S. G. Bioengineering artificial blood vessels from natural materials. *Trends in biotechnology*. 2022. Pp. 693–707. DOI: 10.1016/j.tibtech.2021.11.003.
2. Yuan P., Chen M., Lu X., Yang H., Wang L., Bai T., Zhou W. Application of advanced surface modification techniques in titanium-based implants: latest strategies for enhanced antibacterial properties and osseointegration. *Journal of Materials Chemistry*. 2024. Vol. 12. DOI: 10.1039/D4TB01714E.
3. Bin L., Liang M., Yiwa L., Xuecheng P. Titanium Alloys for Biomedical Applications: A Review on Additive Manufacturing Process and Surface Modification Technology. *JOJ Material Science*. 2024. Vol. 8, No. 5. DOI: 10.19080/JOJMS.2024.08.555746.
4. Zhang H., Wu Z., Wang Z., Yan X., Duan X., Sun H. Advanced surface modification techniques for titanium implants: a review of osteogenic and antibacterial strategies Biomaterials. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*. 2025. No 13. DOI: 10.3389/fbioe.2025.1549439.
5. Opia et al. Tribological properties enhancement through organic carbon nanotubes as nanoparticle additives in boundary lubrication conditions. *Jurnal Tribologi*. 2020. No. 27. Pp.116–131. Scopus.
6. Opia A. C., Abdollah M. F. B., Hamid M. K. A., Veza I. A review on bio-lubricants as an alternative green product: tribological performance, mechanism, challenges and future opportunities. *Tribology Online*. 2023. Vol.18, No. 2. Pp.18–33. DOI: 10.2474/trol.18.18. Scopus.

7. Owuna F.J. et al. Chemical modification of vegetable oils for the production of biolubricants using trimethylolpropane: A review. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2020. Vol. 29, No. 1. Pp. 75–82. DOI: 10.1016/j.ejpe.2019.11.004.
8. Lin W., Klein J. Recent progress in cartilage lubrication. *Advanced Materials*. 2023. Vol. 33, No. 18. Article 2005513. DOI: 10.48550/arXiv.2311.02681.
9. Raut H.K., Das R., Liu Z., Liu X., Ramakrishna S. Biocompatibility of Biomaterials for Tissue Regeneration or Replacement. *Biotechnol J*. 2020. Vol. 15, No. 12. DOI 10.1002/biot.202000160.
10. Al-Shalawi F. D. et al. Biomaterials as Implants in the Orthopedic Field for Regenerative Medicine: Metal versus Synthetic Polymers. *Polymers*. 2023. Vol. 15, No. 12. DOI: 10.3390/polym15122601.
11. Teo A. J. T. et al. Polymeric Biomaterials for Medical Implants and Devices. *ACS Biomaterials Science & Engineering*. 2016. Vol. 2, No. 4. Pp. 454–472. DOI: 10.1021/acsbiomaterials.5b00429.
12. Ardelean L. C. et al. Advances in Dentures: Novel Polymeric Materials and Manufacturing Technologies. In *Advances in Dentures—Prosthetic Solutions, Materials and Technologies*. 2023. DOI: 10.5772/intechopen.113936.
13. Олександренко В., Свідерський В., Кириченко Л., Даніленко І., Єфіменко В., Нелюбін Ю. Дослідження властивостей наномодифікованих покриттів на основі фторполімеру Ф-30П. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2023. Т. 329, № 6. С. 125–134. DOI: 10.31891/2307-5732-2023-329-6-125-379
14. Actual problems of modern science. Monograph: edited by Matiukh S., Musial J., Polishchuk O., Macko M. Bydgoszcz, *Kazimierz Wielki University*. 2024. 1078 p. URL: <https://elar.khmnu.edu.ua/handle/123456789/16382> (дата звернення: 01.08.2025).

Yefymenko V.V., Oleksandrenko V.P., Kustovska A.D., Rudenko V.M., Matveeva O.L., Trofimov I.L.
POLYMERIC MATERIALS IN THE TECHNOLOGIES OF IMPLANT AND PROSTHESIS MANUFACTURING

The article is devoted to the pressing issue of using polymeric materials in the production of implants and prostheses, with a particular focus on fluoropolymer coatings for titanium components. The authors explore the prospects and challenges of applying polymers in modern bioengineering, especially in orthopedics and implantology, where titanium alloys remain dominant. Despite titanium's high mechanical strength and biocompatibility, its wear resistance is limited, necessitating the development of innovative surface coatings.

The study highlights the advantages of fluoropolymers – materials with extremely low friction coefficients and outstanding chemical resistance – while acknowledging their key limitation: poor adhesion to metal substrates. To address this, the authors propose using three-layer fluoropolymer coatings based on F-30P, modified with zirconium oxide nanoparticles, graphite, and aminoorganosilicon compounds.

Experimental findings indicate that the introduction of $Zr(Y)O(OH)_2$ nanoparticles significantly improves the coatings' adhesion, wear resistance, elasticity, and microhardness. The best performance was achieved with 2 wt.% modifiers: scratch resistance increased by 14.35 times, microhardness by 3.4 times, and thermal resistance up to 235 °C. The article explains the mechanisms behind these improvements, such as the formation of spherulitic structures, interfacial frameworks, and protective films at the "polymer-metal" interface.

The article also provides a classification of medical polymers by origin, biodegradability, and biocompatibility, comparing natural and synthetic types. Considerable attention is given to biomimetic lubricant s– polymer-based nanofluids – that reduce friction in artificial joints. Current research directions include bioactive coatings, smart materials, and nanocomposites.

The study concludes that modified fluoropolymer coatings substantially enhance the durability and functionality of implants, reduce operational risks, and present promising opportunities for further development of functional polymeric materials in medicine.

Key words: *medical devices, high-molecular compounds, polymeric materials, fluoropolymer coatings, properties, adhesion, wear resistance, technological factors.*

Дата надходження статті: 02.09.2025

Дата прийняття статті: 22.09.2025

Опубліковано: 16.12.2025