

КОЛОДІЙ АРТЕМ

Київський національний університет технологій і дизайну

<https://orcid.org/0009-0007-6771-6037>

e-mail: kolodii.ai@knuud.edu.ua

ВІКТОРІЯ ПЛАВАН

Київський національний університет технологій і дизайну

<https://orcid.org/0000-0001-9559-8962>

e-mail: plavan.vp@knuud.edu.ua

ВОДОНЕПРОНИКНІ ДИХАЮЧІ ПОЛІМЕРНІ ПОКРИТТЯ ДЛЯ ТЕКСТИЛЮ: ЇХ ВЛАСТИВОСТІ ТА ОСОБЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ

В статті наведені результати теоретичних досліджень водонепроникних дихаючих полімерних покриттів для текстилю різних типів, їх властивості та особливості отримання, для створення гнучкого комфортного покриття з необхідними технічними характеристиками і зовнішнім виглядом для спеціального одягу за умов збереження початкових властивостей тканини. Зроблено висновок про те, що дихаючі полімерні покриття для текстилю на основі поліуретану можуть поєднувати властивості різних полімерів та включати живлячі агенти, модифікатори, зокрема фторовані полімери або гідрофобні наночастинки, переважно кремнійорганічні. Це дозволяє досягти кращого поєднання властивостей, таких як міцність, еластичність і хімічна стійкість, що робить їх перспективними для використання у текстильній промисловості для спеціальних потреб.

Ключові слова: дихаючі покриття, водонепроникність, паропроникність, поліуретани, текстильні матеріали, спеціальний одяг.

KOLODIY ARTEM**PLAVAN VIKTORIYA**

Kyiv National University of Technology and Design

WATERPROOF BREATHABLE POLYMERIC COATINGS FOR TEXTILE: THEIR PROPERTIES AND PRODUCTION FEATURES

The article presents the results of theoretical studies of waterproof breathable polymer coatings for textiles of various types, their characteristics and features of obtaining, to create a flexible comfortable coating with the necessary technical and external appearance for special clothing while maintaining the original properties of the fabric. It is concluded that breathable polymer coatings for textiles based on polyurethane are either microporous through which vapor passes "mechanically", or solid non-porous films, where vapour diffusion occurs molecularly through hydrophilic hydrogen groups on the polymer chain, or sometimes a combination of these two. The advantage of hydrophilic polyurethane film non-porous coatings over microporous polyurethane films is that the former have high adhesion to the textile base, high gloss, resistance to water and solvents, high vapour-permeable properties, and are also less expensive and have advantages in terms of further care (dry cleaning) and durability. In addition, microporous coatings require precise control over the coating operation to create a consistent, uniform pore structure for an optimal balance of vapor permeability and water resistance, which creates certain difficulties in real-world production conditions. Another effective way to form solid non-porous polymer coatings for textile materials is to use mixtures of polymer dispersions of different types. "Breathable" polymer hybrid coatings for textiles based on polyurethane can combine the properties of different polymers and include crosslinking agents, modifiers, in particular fluorinated polymers or hydrophobic nanoparticles, mainly organosilicon. This allows for a better combination of properties, such as strength, elasticity and chemical resistance, which makes them promising for use in the textile industry for special needs.

Keywords: breathable coatings, waterproofness, vapour permeability, polyurethanes, textile materials, special clothing.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.09.2025

Прийнята до друку / Accepted 11.11.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Споживачі, які регулярно займаються активним відпочинком, таким як спорт та дозвілля, або працюють в екстремальних умовах (сніг, дощ, холод та вітер), потребують багатофункціонального захисного одягу [1]. Захисний одяг виготовляється для захисту користувача від небезпечних середовищ та/або хімічних, біологічних, ядерних чи подібних загроз [2]. Відповідно світовий ринок водонепроникних та дихаючих текстильних виробів щорічно зростає. Обсяг ринку водонепроникного дихаючого текстилю оцінюється в 2,29 млрд доларів США у 2025 році та, як очікується, досягне 2,92 млрд доларів США до 2030 року, зі середньорічним темпом зростання понад 5% протягом прогнозованого періоду (2025-2030). У короткостроковій перспективі очікується, що зростаючий попит з боку індустрії одягу для активного відпочинку і спорту стимулюватиме зростання ринку водонепроникних дихаючих тканин. Очікується, що зростання обізнаності про переваги водонепроникних дихаючих текстильних виробів у спортивній індустрії ще більше стимулюватиме ринок протягом прогнозованого періоду, а зростаюча увага до сталого розвитку та нових технологій створить більше можливостей для інновацій в цій сфері у найближчі роки [3].

Водонепроникні дихаючі покриття для текстильних виробів на основі поліетрафторетилену використовуються в різних видах одягу для активного відпочинку і спорту, включаючи трекінгові черевики, кросівки, спортивні куртки, робоче взуття, кепки, рукавички, рюкзаки, робочий одяг. Крім того, ці вироби використовуються в галузі спеціального одягу, такого як одяг для військових чи пожежників. Військовий водонепроникний захисний одяг, відомий як всепогодний одяг, виготовляється за найвищими стандартами.

Загальновідомо, що кількість жертв від хвороб становить стільки ж, скільки й від дій противника. Одяг солдата має бути максимально універсальним, оскільки він може не змінюватися в польових умовах тривалий час, а під час певних операцій погода може значно змінюватися [4].

Водонепроникні дихаючі поліефірні тканини з покриттям на основі поліуретану використовуються у виробництві верхнього одягу для активного відпочинку та робочого одягу для захисту від холоду та негоди для людей, які працюють в екстремальних умовах (бурові платформи, морські перевезення). Водонепроникні дихаючі текстильні матеріали використовуються для розробки взуття для активного відпочинку та спортивного взуття, такого як кросівки для бігу та походів, оскільки вони допомагають зберігати сухість та контролювати потовиділення.

Паропроникність визначається як здатність тканини пропускати піт, який випаровується з людського тіла, назовні [5]. Водонепроникність зазвичай стосується здатності тканини протистояти намоканню [6]. Текстильні покриття можуть підвищити водонепроникність, але часто за рахунок паропроникності (повітропроникності) [7]. Ідеальне текстильне покриття має досягти балансу між цими двома властивостями, забезпечуючи ефективну водонепроникність без шкоди для повітро(паро)проникності.

Як відомо, шкірний покрив людини безпосередньо контактує із зовнішнім середовищем, виконуючи такі функції, як захист, дихання, секреція та сприйняття зовнішніх подразників [8]. Шкіра дозволяє вологій парі ефективно поширюватися зсередини у зовнішню атмосферу, одночасно захищаючи організм людини від проникнення рідкої води, такої як дощ та сніг. Ці особливі «дихаючі» властивості мають велике значення для комфорту організму людини. Шкіра має здатність певною мірою регулювати температуру тіла [9], але в екстремальних умовах, таких як висока температура та екстремальний холод, комфорт та безпека людського тіла не можуть бути гарантовані. Тому і розробляються водонепроникні дихаючі матеріали для забезпечення нормального функціонування шкіри.

Аналіз досліджень та публікацій

Згідно результатів досліджень [10-11] щодо водонепроникних, водовідштовхувальних та повітропроникних характеристик покритих та просочених тканин для спортивного та захисного одягу, матеріали, що використовуються для захисного одягу, можна класифікувати на три основні типи (таблиця 1):

Таблиця 1

Класифікація покритих/просочених матеріалів, що використовуються для захисного одягу

Перший тип	Другий тип	Третій тип
ткані матеріали високої щільності, оброблені силіконовими або фторвуглецевими репелентами [11], наприклад Ventile®	мікропористі покриття та мембрани на основі поліуретанової хімії, наприклад Gore-Tex® або Aquatex®	гідрофільні непористі мембрани та плівки [12], наприклад покриття Sympatex®

Наприклад, Sympatex® матеріал являє собою модифікований тип поліестеру, який містить поліефірні групи, що надають мембрані гідрофільних властивостей та здатності до набухання [12]. Гідрофільні непористі мембрани переміщують водяну пару шляхом хімічної дифузії. За певного градієнта температури та вологості молекули води адсорбуються на стороні з високою вологістю та переносяться на сторону з низькою вологістю через гідрофільні групи на полімерних ланцюгах для десорбції (Рис. 1). Дифузія водяної пари здійснюється шляхом водневих зв'язків гідрофільних функціональних груп [13], тоді як гідрофільні сегменти, наприклад, оксиди етиленові або бічні групи ($-\text{OH}$, $-\text{COOH}$ та $-\text{NH}_2$) [14] відповідають за перенесення водяної пари.

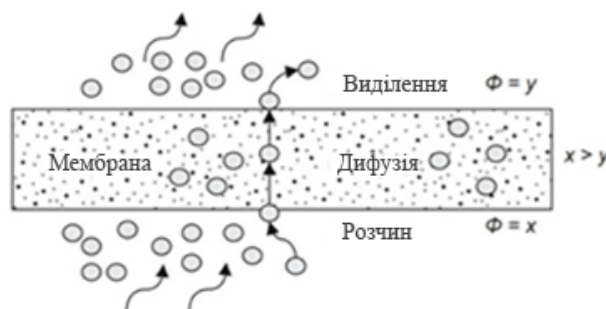


Рис 1. Схематична діаграма молекулярного транспорту води в гідрофільній непористій мембрані [15]

Напрямок та швидкість передачі водяної пари залежать від різниці між парціальним тиском водяної пари з двох боків мембрани. Парціальний тиск всередині, що створюється в середовищі між шкірою та вологою, яка утворюється в результаті випаровування поту, вищий, ніж в навколишньому середовищі, тому водяна пара проходить назовні. Однак, для досягнення хорошої проникності водяної пари тканина повинна бути близько до шкіри та в безпосередньому контакті з потом, що значно знижує комфорт та обмежує застосування гідрофільних непористих мембран [16]. Водночас, після тривалого контакту з водою мембрани можуть бути повністю інфільтровані, що може спричинити серйозну деформацію, яка вплине на водонепроникність мембран, а також на зовнішній вигляд одягу.

Покритті тканини – це по суті інженерні композитні матеріали, що виготовляються шляхом поєднання текстильної основи та полімерного покриття, нанесеного на її поверхню [16]. У процесі формування покриття використовуються полімерні матеріали, які можна легко перетворити на смолу або пасту [17]. Полімерне покриття надає тканині нових властивостей. Полімерний матеріал також можна поєднувати з тканиною, спочатку готуючи мембрану з полімеру, а потім наносячи її на тканину в окремому процесі. Створити достатньо міцне покриття відносно просто; завдання полягає в тому, щоб зберегти початкові властивості тканини та створити гнучке покриття з необхідним зовнішнім виглядом, зручністю та довговічністю. Експлуатаційні характеристики та зручність покриття значною мірою залежать від обраного текстильного компонента. М'якість, хороша оброблюваність та збереження високої проникності для водяної пари, а також хороша адгезія, стійкість до зносу та догляду, є характерними ознаками хорошого покриття.

Формулювання цілей статті

Метою статті є огляд водонепроникних дихаючих покриттів для текстилю різних типів, їх характеристик та особливостей отримання, для створення гнучкого комфортного покриття з необхідними технічними характеристиками і зовнішнім виглядом для спеціального одягу за умов збереження початкових властивостей тканини.

Виклад основного матеріалу

Різні типи матеріалів та методи нанесення покриття передбачені для різних типів одягу. Полімерна мембрана може бути прикріплена безпосередньо до зовнішньої тканини, наприклад. Вона може бути прикріплена до легкої підкладки, здебільшого до основи в'язаного або нетканого матеріалу (і розміщена вільно між зовнішньою тканиною та підкладкою), або нанесена безпосередньо на підкладкову тканину. У тришаровому покритті підкладка та зовнішня тканина прикріплені до обох боків полімерної мембрани. В одязі мембрана в будь-якому випадку повинна утворювати другий шар ззовні, розміщений безпосередньо під зовнішньою тканиною. Тип покриття, який слід вибрати, залежить від передбачуваної сфери використання одягу. Наразі в одязі переважно використовуються конструкції зі вставками, які виготовлені з текстильних матеріалів з покриттям. Вони пропонують дизайнеру максимальну свободу, оскільки вони невидимі, і майже не створюють проблем у плануванні виробництва. Прикладом такого підкладкового покриття є «SYMPATEx Micro Liner» [12].

Дихаючі покриття на тканинах є або мікропористими з сотнями відкритих мікропор, через які проходить пара «механічно», або твердими монолітними плівками, де дифузія пари відбувається молекулярно через гідрофільні водневі групи на полімерному ланцюзі, або іноді комбінацією цих двох. Ці тонкі тверді непористі полімерні плівки це по суті мембрани, сконструйовані таким чином, що вони мають дуже високий опір проникненню рідкої води, але дозволяють проходити водяній парі. Оскільки швидкість пропускання водяної пари через твердий полімер обернено пропорційна його товщині, тонкі полімерні покриття гідрофільного типу з гарними фізичними властивостями при низькій масі нанесення є кращими для паропроникного водонепроникного текстилю.

На жаль, більшість високогідрофільних полімерів абсолютно непридатні для використання в якості постійних покриттів для тканин. Ряд гідрофільних матеріалів занадто чутливі до рідкої води і, якщо їх використовувати як водонепроникні покриття, вони або повністю розчиняться, або настільки сильно набухнуть під дощем, що зазнають серйозних пошкоджень від згинання або стирання. Інші полімери з помірним або високим ступенем кристалічності, є занадто жорсткими та негнучкими. Додавання пластифікаторів пом'якшує ці матеріали, хоча добавки можуть мігрувати або вимиватися з покриття тканини під час використання. Найбільш широко використовуються поліуретани, політетрафторетилен, поліакрилати. Серед них поліуретани є найпопулярнішим полімером завдяки міцності, гнучкості плівки та можливості адаптувати властивості плівки до потреб кінцевого споживача.

Прикладом такого покриття є аліфатична поліуретанова дисперсія RUCO-COAT ECC [19], яка за інформацією виробника, забезпечує отримання дихаючого поліуретанового покриття з високою паропроникністю (тобто пропускає пари вологи із середини) і водостійкими властивостями (не пропускає вологу ззовні). Спосіб нанесення у вигляді пасти: суспензія наноситься на підложку і розподіляється по поверхні ракульним методом (ракля – пластина з рівним краєм, забезпечує рівномірне розподілення матеріалу). Це покриття так само наноситься у кілька шарів. Спочатку робиться попереднє просочування, а потім

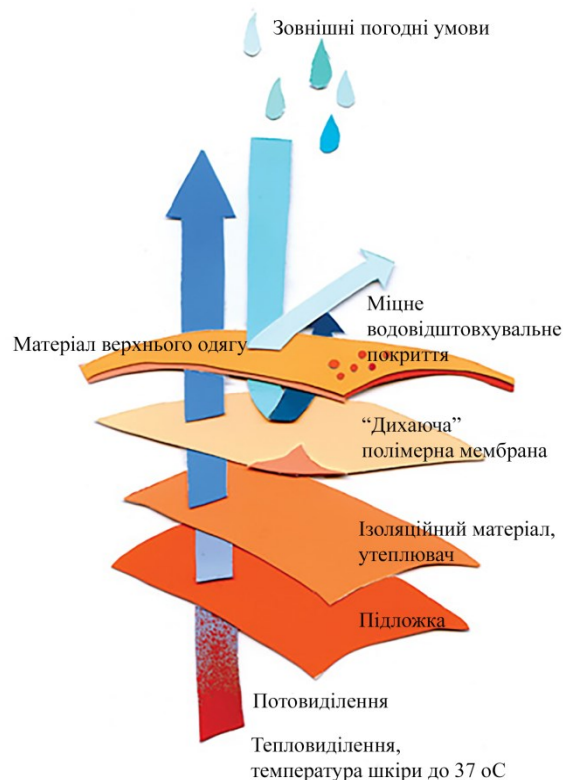


Рис. 2. Конструкція типового водонепроникного дихаючого матеріалу [18]

наноситься основне покриття. Комплекс властивостей формується завдяки послідовному нанесенню кількох шарів покриття.

Мікропористі покриття також мають структуру подібну до мікропористих мембран. У випадку мікропористої мембрани отвори набагато менші (2–3 мкм), ніж найменші краплі дощу (100 мкм) [20], але набагато більше за молекулу водяної пари (40×10^{-6} мкм). Для створення взаємопов'язаної структури пор у покриттях може бути використана низка різноманітних методів. Зокрема для нанесення спіненого покриття, суміш поліуретану та естерів поліуретану/поліакрилової кислоти диспергується у воді, а потім спінюється. Потім піна стабілізується за допомогою спеціальних добавок і наноситься на один бік тканини. Покриту тканину сушать для утворення мікропористого покриття. Нарешті, тканину каландрують під низьким тиском для стиснення покриттів. Оскільки комірки піни відносно великі, для покращення водонепроникних властивостей наноситься водовідштовхувальне покриття з фторвуглецевого (FC) полімеру.

Прикладом такого покриття є мікропористе поліуретанове покриття TUBICOAT MP-D (CHT Group, Німеччина), за інформацією виробників синтетична дисперсія на основі поліуретану. Основний шар покриття спінюється, а після наступного сушіння і пресування дає повітропроникне (дихаюче) покриття. Водостійкі властивості покриття отримує після наступної гідрофобізації смолами фторкарбону [21]. У випадку мікропористого пінного покриття TUBICOAT MP-D передача водяної пари відбувається більше «механічним» шляхом через пори, ніж «хімічним» адсорбційним шляхом через гідрофільні водневі групи на полімерному ланцюзі, як у випадку плівкового покриття RUCO-COAT ECC. Оскільки швидкість проникнення водяної пари через тверду непористу полімерну плівку обернено пропорційна її товщині, тонкі полімерні покриття з хорошими фізичними властивостями при низькій масі нанесення є кращими для створення дихаючих водонепроникних покриттів гідрофільного типу. «Дихаючі» текстильні матеріали з мікропористим покриттям зазвичай мають шар гідрофільного поліуретану, або ж вони можуть бути піддані водовідштовхувальній обробці (фторвуглецями або силіконами), щоб запобігти забрудненню пор та зберегти стабільні характеристики.

Гідрофільні тверді полімерні непористі плівкові покриття мають певні переваги над мікропористими матеріалами. Зокрема для мікропористих покриттів потрібен точний контроль над операцією нанесення покриття для створення постійної, однорідної структури пор, бажано менше 3 мкм для оптимального балансу паропроникності та водонепроникності. З іншого боку, гідрофільні полімерні плівки і покриття можна наносити за допомогою звичайного обладнання для нанесення покриттів на основі розчинників.

У випадку мікропористих паропроникних тканин, забруднення тканини різними матеріалами, включаючи тверді частинки бруду, залишки пестицидів, засоби від комах, лосьйон для засмаги чи захисний крем, сіль та залишки мийного засобу, а також поверхнево-активні речовини, що використовуються для чищення, блокують пори та змінюють поверхневі властивості тканини, значно впливаючи на водонепроникність та паропроникність. Крім того, мікропори можуть збільшуватися, коли одяг розтягується в ліктях та колінах, що впливає на водонепроникні характеристики. З іншого боку, гідрофільна тверда полімерна плівка та покриття не втрачають своїх властивостей під час чищення одягу. Перевага гідрофільних поліуретанових плівкових непористих покриттів над мікропористими поліуретановими плівками полягає в тому, що перші мають високу адгезію до текстильної основи, високий блиск, стійкість до води та розчинників, високі паропроникні властивості, а також є менш дорогими та мають переваги з точки зору подальшого догляду (хімчистки) та довговічності.

Ще одним дієвим способом формування твердих непористих полімерних покриттів для текстильних матеріалів є застосування сумішей полімерних дисперсій різних типів. Зокрема, авторами [22] повідомляється про розробку повітропроникної тканини з хорошою міцністю, що має легке покриття із силіконових каучуків та деяких їхніх сумішей з акриловими та поліуретановими дисперсіями. Стійкі до стирання текстильні матеріали є бажаними для використання в одязі, особливо для захисного або робочого одягу, а також для кількох технічних текстильних виробів [23]. Наприклад, хімічні методи обробки текстильних матеріалів включають, апретування нейлонової тканини поліакриловою кислотою та трихлорметилсиланом, що призводить до створення стійких до стирання супергідрофобних текстильних поверхонь [24]. ПВА є часто використовуваним апретуючим агентом, який також підвищує стійкість до стирання бавовняних тканин [25]. Використання золь-гелевого покриття дозволяє одночасно підвищити стійкість до стирання та водовідштовхувальні властивості шовкових тканин [26].

Автори [27] полімеризували поліуретан розпилюванням на бавовняній тканині, що призвело до утворення тонкого полімерного шару, достатнього для подвоєння зносостійкості порівняно з вихідною бавовняною тканиною, водночас мало впливаючи на паропроникність та механічні властивості. Було виявлено, що покриття з ПУ та полівінілхлориду (ПВХ) витримують певну кількість циклів стирання, доки не втратять свої гідрофобні властивості [28]. Особливо ПУ тестується для таких застосувань, оскільки відомо, що він демонструє чудову стійкість до стирання [29]. 3-гліцидоксипропілтриетоксисилан (GPTES) був використаний для створення наногібридних органічно-неорганічних покриттів на бавовняних тканинах, які не впливали на зносостійкість оброблених текстильних матеріалів [30]. Було досліджено вплив різних полімерних покриттів (ABS, PMMA та PA) на стійкість до стирання, стійкість до водяної пари та гідрофобність бавовняних та поліефірних тканин матеріалів [23]. Ці результати підкреслюють можливість створення високостійких до стирання текстильних матеріалів, які, тим не менш, можуть зберігати бажану проникність до водяної пари, що дозволяє їх застосування в захисному чи робочому одязі для різноманітного технічного текстилю.

«Дихаючі» полімерні гібридні покриття для текстилю на основі поліуретану та поліакриламідю досягають «повітропроникності» шляхом формування гідрофільних областей у щільній плівці для поглинання-дифузії-десорбції водяної пари. Гібридні покриття також можуть поєднувати властивості різних полімерів та включати зшиваючі агенти, модифікатори, такі як поліефіри, або нановолокнисті структури для підвищення продуктивності, довговічності та екологічності. Окрім згаданих вище методів безпосереднього приготування водовідштовхувальних матеріалів шляхом обробки гідрофільними або гідрофобними полімерами, поверхневу гідрофобність нановолокон можна покращити шляхом введення речовин з низькою поверхневою енергією [31, 32], тим самим отримуючи кращі водонепроникні та повітропроникні властивості. Мова йде про фторовані полімери та гідрофобні наночастинки, зокрема переважно кремнійорганічні [33] або частинки діоксиду кремнію [34].

Однак, під час формування плівки може виникати проблема несумісності між різними типами полімерів, зокрема акриловими та поліуретановими [35]. Це може призводити до нерівномірного розподілу полімерів, що негативно впливає на властивості плівки. На противагу цьому, гібридні полімерні дисперсії пропонують рішення цієї проблеми. У цих системах акрилові та поліуретанові полімерні ланцюги взаємодіють на молекулярному рівні, утворюючи єдину структуру, а не просто механічну суміш [36]. Це дозволяє досягти кращого поєднання властивостей, таких як міцність, еластичність і хімічна стійкість, що робить їх перспективними для використання у текстильній промисловості для спеціальних потреб [37].

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

В результаті теоретичних досліджень водонепроникних дихаючих покриттів для текстилю різних типів, їх характеристик та особливостей отримання, для створення гнучкого комфортного покриття з необхідними технічними і зовнішнім виглядом для спеціального одягу за умов збереження початкових властивостей тканини можна зробити висновок про те, що дихаючі покриття на тканинах є або мікропористими через які проходить пара «механічно», або твердими непористими плівками, де дифузія пари відбувається молекулярно через гідрофільні водневі групи на полімерному ланцюзі, або іноді комбінацією цих двох.

Більшість високогідрофільних полімерів абсолютно непридатні для використання у складі покриттів для тканин. Ряд гідрофільних матеріалів занадто чутливі до рідкої води, інші полімери з помірним або високим ступенем кристалічності, є занадто жорсткими та негнучкими. Найбільш широко використовуються поліуретани, політетрафторетилен, поліакрилати. Серед них поліуретани є найпопулярнішим полімером завдяки міцності, гнучкості плівки та можливості адаптувати властивості плівки до потреб кінцевого споживача.

Перевага гідрофільних поліуретанових плівкових непористих покриттів над мікропористими поліуретановими плівками полягає в тому, що перші мають високу адгезію до текстильної основи, високий блиск, стійкість до води та розчинників, високі паропроникні властивості, а також є менш дорогими та мають переваги з точки зору подальшого догляду (хімчистки) та довговічності. Однак безумовною перевагою мікропористих покриттів є здатність забезпечити постійний комфорт носіння. М'якість текстильних пінопокриттів не тільки покращує комфорт тканини, але й полегшує її обробку та формування. Крім того, пінопокриття мають певні вогнезахисні властивості, що дуже важливо у випадку спеціального одягу.

Ще одним дієвим способом формування твердих непористих полімерних покриттів для текстильних матеріалів є застосування сумішей полімерних дисперсій різних типів. «Дихаючі» полімерні гібридні покриття для текстилю на основі поліуретану можуть поєднувати властивості різних полімерів та включати зшиваючі агенти, модифікатори, зокрема фторовані полімери або гідрофобні наночастинки, переважно кремнійорганічні. Однак, під час формування плівки може виникати проблема несумісності між різними типами полімерів, зокрема акриловими та поліуретановими, що негативно впливає на властивості плівки. На противагу цьому, гібридні полімерні дисперсії пропонують рішення цієї проблеми. У цих системах акрилові та поліуретанові полімерні ланцюги взаємодіють на молекулярному рівні, утворюючи єдину структуру, а не просто механічну суміш. Це дозволяє досягти кращого поєднання властивостей, таких як міцність, еластичність і хімічна стійкість, що робить їх перспективними для використання у текстильній промисловості для спеціальних потреб.

Література

1. Fan J. Engineering Apparel Fabrics and Garments / J. Fan, L. Hunter. – Manchester, UK : The Textile Institute ; Cambridge, UK : Woodhead Publishing Ltd., 2009. – P. 283–308.
2. Zhou W. Overview of protective clothing / W. Zhou, N. Reddy, Y. Yang // Textiles for protection / ed. by R. A. Scott. – Cambridge and Boca Raton: Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 2005. – P. 3–30.
3. Waterproof Breathable Textiles Market Trends [Electronic resource] // Mordor Intelligence. – Mode of access: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/waterproof-breathable-textiles-market> (date of access: 25.08.2025).
4. Shanley L. A. Military protective clothing: Implications for clothing and textiles curriculum and research / L. A. Shanley, B. L. Slaten, P. S. Shanley // Clothing and Textiles Research Journal. – 1993. – Vol. 11, no. 3. – P. 55–59. DOI: <https://doi.org/10.1177/0887302X9301100308>.
5. Jassal M. Waterproof breathable polymeric coatings based on polyurethane / M. Jassal, A. Khungar, P. Bajaj, T. J. M. Sinha // Journal of Industrial Textiles. – 2004. – Vol. 33, no. 4. – P. 269–280. DOI: <https://doi.org/10.1177/1528083704045179>.

6. Ozcan G. Performance evaluation of water repellent finishes on woven fabric properties / G. Ozcan // *Textile Research Journal*. – 2007. – Vol. 77, no 4. – P. 265–270. DOI: <https://doi.org/10.1177/0040517507080619>.
7. Kim H.-A. Water Repellency/Proof/Vapor Permeability Characteristics of Coated and Laminated Breathable Fabrics for Outdoor Clothing / H.-A. Kim // *Coatings*. – 2022. – Vol. 12, no. 1. – P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings12010012>.
8. Filingeri D, Havenith G. Human skin wetness perception: psychophysical and neurophysiological bases / D. Filingeri, G. Havenith // *Temperature (Austin)*. – 2015. – Vol. 2, no. 1. – P. 86–104. DOI: <https://doi.org/10.1080/23328940.2015.1008878>.
9. Textiles and human skin, microclimate, cutaneous reactions: An overview / W. Zhong, M. M. Xing, N. Pan, H. I. Maibach // *Cutaneous and Ocular Toxicology*. – 2006. – Vol. 25, no. 1. – P. 23–39. DOI: <https://doi.org/10.1080/15569520500536600>.
10. Scott R. A. Textiles for Protection / R. A. Scott. – Manchester, UK : The Textile Institute ; Cambridge, UK : Woodhead Publishing Ltd., 2005. – 601p.
11. Scott R. A. Coated and Laminated Fabrics / R. A. Scott // *Chemistry of the Textile Industry* / ed. by C. M. Carr. – London, UK : Blackie Academic, 1995. – P. 234–243.
12. Drinkmann M. Structure & processing of Sympatex laminates / M. Drinkmann // *Journal of Coated Fabrics*. – 1992. – Vol. 21. – P. 199–211. DOI: <https://doi.org/10.1177/152808379202100306>.
13. Manshahia M. Moisture management of high active sportswear / M. Manshahia, A. Das // *Fibers and Polymers*. – 2014. – Vol. 15. – P. 1221–1229. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12221-014-1221-9>.
14. Scalable Synthesis of Amphiphilic Copolymers for CO₂- and Water-Selective Membranes: Effect of Copolymer Composition and Chain Length / F. H. Akhtar, M. Kumar, H. Vovusha, R. Shevate, L. F. Villalobos, U. Schwingenschlögl, K.-V. Peinemann // *Macromolecules*. – 2019. – Vol. 52. – P. 6213–6226. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.9b00528>.
15. Chang Y. Review of Waterproof Breathable Membranes: Preparation, Performance and Applications in the Textile Field / Y. Chang, F. Liu // *Materials (Basel)*. – 2023. – Vol. 16, no 15. – P. 5339. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16155339>.
16. Mukhopadhyay A. A Review on designing the waterproof breathable fabrics Part I: Fundamental principles and designing aspects of breathable fabrics / A. Mukhopadhyay, V. K. Midha // *Journal of Industrial Textiles*. – 2008. – Vol. 37. – P. 225–262. DOI: <https://doi.org/10.1177/1528083707082164>.
17. Mayer W. High-tech Textiles: Contribution made by Finishing, in an Example of Functional Sports and Leisurewear / W. Mayer, U. Mohr, M. Schrierer // *International Textile Bulletin*. – 1989. – Vol. 35, no. 2. – P. 16–32. DOI : <http://dx.doi.org/10.53709/CHE.2021.v02i04.032>.
18. Mukhopadhyay A., Midha V.K. Waterproof breathable fabrics // *Handbook of Technical Textiles (Second Edition) Vol. 2: Technical Textile Applications*. – 2016. – P. 27-55. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/B978-1-78242-465-9.00002-1>
19. Ruco-Coat ECC New // Rudolf Group. – Mode of access: https://rudolf.com/uploads/securearea/ECC-NEW_E.pdf (date of access: 25.08.2025). – Title from screen.
20. Mukhopadhyay A. A review on designing the waterproof breathable fabrics Part II: Construction and suitability of breathable fabrics for different uses / A. Mukhopadhyay, V. K. Midha // *Journal of Industrial Textiles*. – 2008. – Vol. 38. – P. 17–41. DOI: <https://doi.org/10.1177/1528083707082166>.
21. Product – CHT Group – special chemicals [Electronic resource] // Die CHT Gruppe. – Mode of access: https://solutions.cht.com/cht/web.nsf/id/pa_en_productdetail.html?Open&pid=PDE-RSCR-9LGHEB-EN (date of access: 25.08.2025). – Title from screen.
22. Vethandamoorthy D. Development of Silicone Based Water-Resistant, Chemical Resistant, Moisture Absorbent and Non-Ignitable Fabric / D. Vethandamoorthy, D.E.N. Mandawala, W. R. Bandara // *International Journal of Scientific and Engineering Research*. – 2019. – Vol. 10, no. 5. – P. 346–363.
23. Improved abrasion resistance of textile fabrics due to polymer coatings / M. Wortmann, N. Frese, L. Hes, A. Götzhäuser, E. Moritzer, A. Ehrmann // *Journal of Industrial Textiles*. – 2018. – Vol. 49, no. 5. – P. 572–583. DOI: <https://doi.org/10.1177/1528083718792655>.
24. Li G. Q. Design of abrasion resistant super-antiwetting nylon surfaces / G. Q. Li, H. J. Lee, S. Michielsen // *New Journal of Chemistry*. – 2017. – Vol. 41. – P. 13593–13599. DOI: <https://doi.org/10.1039/C7NJ02807E>.
25. Recycling of warp size materials and comparison of yarn mechanical properties sized with recycled materials and virgin materials / M. Maqsood, M. I. Khan, K. Shaker, et al. // *The Journal of The Textile Institute*. – 2016. – Vol. 108, no. 1. – P. 84–88. DOI: <https://doi.org/10.1080/00405000.2016.1153875>.
26. Silk fabrics modification by sol-gel method / L. de Ferri, A. Lorenzi, E. Carcano, L. Draghi // *Textile Research Journal*. – 2018. – Vol. 88, no 1. – P. 99–107. DOI: <https://doi.org/10.1177/0040517516676061>.
27. Wear-resistant cotton fabrics modified by PU coatings prepared via mist polymerization / W. C. Fan, Y. H. Zhu, G. H. Xi, et al. // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2016. – Vol. 133, no. 7. – P. 43024. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.43024>.
28. Saceviciene V. The influence of mechanical effects on coated textile hydrophobic properties / V. Saceviciene, M. Juciene, L. Sveikauskaite // *Industria Textila*. – 2016. – Vol. 67, no. 6. – P. 380–386.

29. Jayakumar R. Metal-containing polyurethanes, poly(urethane-urea)s and poly(urethane-ether)s: A review / R. Jayakumar, S. Nanjundan, M. Prabakaran // *Reactive and Functional Polymers*. – 2006. – Vol. 66, no. 3. – P. 299–314. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2004.12.008>.
30. Sol–gel 3–glycidoxypolytriethoxysilane finishing on different fabrics: The role of precursor concentration and catalyst on the textile performances and cytotoxic activity / M. R. Plutino, C. Colleoni, I. Donelli, et al. // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2017. – Vol. 506. – P. 504–517. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.07.048>.
31. Covalent Fluorination Strategies for the Surface Modification of Polydienes / K. De Bruycker, M. Delahaye, P. Cools, J. Winne, F. E. Du Prez // *Macromolecular Rapid Communications*. – 2017. – Vol. 38, no. 11. – 1700122. DOI: <https://doi.org/10.1002/marc.201700122>.
32. Multilevel porous structured polyvinylidene fluoride/polyurethane fibrous membranes for ultrahigh waterproof and breathable application / H. M. Cui, Y. Y. Li, X. L. Zhao, X. Yin, J. Y. Yu, B. Ding // *Composites Communications*. – 2017. – Vol. 6. – P. 63–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coco.2017.10.002>.
33. Engineering Hydrophobic Organosilica Nanoparticle–Doped Nanofibers for Enhanced and Fouling Resistant Membrane Distillation / M. A. Hammami, J. G. Croissant, L. Francis, S. K. Alsaiani, D. H. Anjum, N. Ghaffour, N. M. Khashab // *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2017. – Vol. 9, no. 2. – P. 1737–1745. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.6b11167>.
34. Jin S. Preparation of breathable and superhydrophobic polyurethane electrospun webs with silica nanoparticles / S. Jin, Y. Park, C. H. Park // *Textile Research Journal*. – 2016. – Vol. 86, no. 17. – P. 1816–1827. DOI: <https://doi.org/10.1177/0040517515617417>.
35. Fung W. Products from Coated and Laminated Fabrics / W. Fung // *Coated and Laminated Textiles*. – Cambridge : The Textile Institute, Woodhead Publishing Ltd., 2002. – P. 149–249. DOI: <https://doi.org/10.1533/9781855737518.149>.
36. Hegedus C. R. Aqueous acrylic–polyurethane hybrid dispersions and their use in industrial coatings / C. R. Hegedus, K. A. Kloiber // *Journal of Coatings Technology*. – 1986. – Vol. 68, no. 860. – P. 39–48.
37. Acrylic–Urethane Hybrid Polymers: Materials with High Potential in Leather Finishing / L. Krings, M. Jimenez, M. Oliveras, J. M. Pont Pi // *Journal of the American Leather Chemists Association*. – 2010. – Vol. 105, no. 12. – P. 388–394.

References

1. Fan J. *Engineering Apparel Fabrics and Garments* / J. Fan, L. Hunter. – Manchester, UK : The Textile Institute ; Cambridge, UK : Woodhead Publishing Ltd., 2009. – P. 283–308.
2. Zhou W. Overview of protective clothing / W. Zhou, N. Reddy, Y. Yang // *Textiles for protection* / ed. by R. A. Scott. – Cambridge and Boca Raton: Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 2005. – P. 3–30.
3. Waterproof Breathable Textiles Market Trends [Electronic resource] // Mordor Intelligence. – Mode of access: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/waterproof-breathable-textiles-market> (date of access: 25.08.2025).
4. Shanley L. A. Military protective clothing: Implications for clothing and textiles curriculum and research / L. A. Shanley, B. L. Slaten, P. S. Shanley // *Clothing and Textiles Research Journal*. – 1993. – Vol. 11, no. 3. – P. 55–59. DOI: <https://doi.org/10.1177/0887302X9301100308>.
5. Jassal M. Waterproof breathable polymeric coatings based on polyurethane / M. Jassal, A. Khungar, P. Bajaj, T. J. M. Sinha // *Journal of Industrial Textiles*. – 2004. – Vol. 33, no. 4. – P. 269–280. DOI: <https://doi.org/10.1177/1528083704045179>.
6. Ozcan G. Performance evaluation of water repellent finishes on woven fabric properties / G. Ozcan // *Textile Research Journal*. – 2007. – Vol. 77, no. 4. – P. 265–270. DOI: <https://doi.org/10.1177/0040517507080619>.
7. Kim H.-A. Water Repellency/Proof/Vapor Permeability Characteristics of Coated and Laminated Breathable Fabrics for Outdoor Clothing / H.-A. Kim // *Coatings*. – 2022. – Vol. 12, no. 1. – 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/coatings12010012>.
8. Filingeri D, Havenith G. Human skin wetness perception: psychophysical and neurophysiological bases / D. Filingeri, G. Havenith // *Temperature (Austin)*. – 2015. – Vol. 2, no. 1. – P. 86–104. DOI: <https://doi.org/10.1080/23328940.2015.1008878>.
9. Textiles and human skin, microclimate, cutaneous reactions: An overview / W. Zhong, M. M. Xing, N. Pan, H. I. Maibach // *Cutaneous and Ocular Toxicology*. – 2006. – Vol. 25, no. 1. – P. 23–39. DOI: <https://doi.org/10.1080/15569520500536600>.
10. Scott R. A. *Textiles for Protection* / R. A. Scott. – Manchester, UK : The Textile Institute ; Cambridge, UK : Woodhead Publishing Ltd., 2005. – 601p.
11. Scott R. A. *Coated and Laminated Fabrics* / R. A. Scott // *Chemistry of the Textile Industry* / ed. by C. M. Carr. – London, UK : Blackie Academic, 1995. – P. 234–243.
12. Drinkmann M. Structure & processing of Sympatex laminates / M. Drinkmann // *Journal of Coated Fabrics*. – 1992. – Vol. 21. – P. 199–211. DOI: <https://doi.org/10.1177/152808379202100306>.
13. Manshahia M. Moisture management of high active sportswear / M. Manshahia, A. Das // *Fibers and Polymers*. – 2014. – Vol. 15. – P. 1221–1229. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12221-014-1221-9>.
14. Scalable Synthesis of Amphiphilic Copolymers for CO₂- and Water-Selective Membranes: Effect of Copolymer Composition and Chain Length / F. H. Akhtar, M. Kumar, H. Vovusha, R. Shevate, L. F. Villalobos, U. Schwingenschlög, K.-V. Peinemann // *Macromolecules*. – 2019. – Vol. 52. – P. 6213–6226. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.9b00528>.
15. Chang Y. Review of Waterproof Breathable Membranes: Preparation, Performance and Applications in the Textile Field / Y. Chang, F. Liu // *Materials (Basel)*. – 2023. – Vol. 16, no. 15. – 5339. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16155339>.
16. Mukhopadhyay A. A Review on designing the waterproof breathable fabrics Part I: Fundamental principles and designing aspects of breathable fabrics / A. Mukhopadhyay, V. K. Midha // *Journal of Industrial Textiles*. – 2008. – Vol. 37. – P. 225–262. DOI: <https://doi.org/10.1177/1528083707082164>.
17. Mayer W. High-tech Textiles: Contribution made by Finishing, in an Example of Functional Sports and Leisurewear / W. Mayer, U. Mohr, M. Schrierer // *International Textile Bulletin*. – 1989. – Vol. 35, no. 2. – P. 16–32. DOI: <http://dx.doi.org/10.53709/CHE.2021.v02i04.032>.
18. Mukhopadhyay A., Midha V.K. *Waterproof breathable fabrics* // *Handbook of Technical Textiles (Second Edition)* Vol. 2: Technical Textile Applications. – 2016. – P. 27–55. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-1-78242-465-9.00002-1>.
19. Ruco-Coat ECC New // Rudolf Group. – Mode of access: https://rudolf.com/uploads/securearea/ECC-NEW_E.pdf (date of access: 25.08.2025). – Title from screen.

20. Mukhopadhyay A. A review on designing the waterproof breathable fabrics Part II: Construction and suitability of breathable fabrics for different uses / A. Mukhopadhyay, V. K. Midha // *Journal of Industrial Textiles*. – 2008. – Vol. 38. – P. 17–41. DOI: <https://doi.org/10.1177/1528083707082166>.
21. Product – CHT Group – special chemicals [Electronic resource] // Die CHT Gruppe. – Mode of access: https://solutions.cht.com/cht/web.nsf/id/pa_en_productdetail.html?Open&pid=PDE-RSCR-9LGHEB-EN (date of access: 25.08.2025). – Title from screen.
22. Vethandamoorthy D. Development of Silicone Based Water-Resistant, Chemical Resistant, Moisture Absorbent and Non-Ignitable Fabric / D. Vethandamoorthy, D.E.N. Mandawala, W. R. Bandara // *International Journal of Scientific and Engineering Research*. – 2019. – Vol. 10, no. 5. – P. 346–363.
23. Improved abrasion resistance of textile fabrics due to polymer coatings / M. Wortmann, N. Frese, L. Hes, A. Götzhäuser, E. Moritzer, A. Ehrmann // *Journal of Industrial Textiles*. – 2018. – Vol. 49, no. 5. – P. 572–583. DOI: <https://doi.org/10.1177/1528083718792655>.
24. Li G. Q. Design of abrasion resistant super-antiwetting nylon surfaces / G. Q. Li, H. J. Lee, S. Michiels // *New Journal of Chemistry*. – 2017. – Vol. 41. – P. 13593–13599. DOI: <https://doi.org/10.1039/C7NJ02807E>.
25. Recycling of warp size materials and comparison of yarn mechanical properties sized with recycled materials and virgin materials / M. Maqsood, M. I. Khan, K. Shaker, et al. // *The Journal of The Textile Institute*. – 2016. – Vol. 108, no. 1. – P. 84–88. DOI: <https://doi.org/10.1080/00405000.2016.1153875>.
26. Silk fabrics modification by sol-gel method / L. de Ferri, A. Lorenzi, E. Carcano, L. Draghi // *Textile Research Journal*. – 2018. – Vol. 88, no 1. – P. 99–107. DOI: <https://doi.org/10.1177/0040517516676061>.
27. Wear-resistant cotton fabrics modified by PU coatings prepared via mist polymerization / W. C. Fan, Y. H. Zhu, G. H. Xi, et al. // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2016. – Vol. 133, no. 7. – P. 43024. DOI: <https://doi.org/10.1002/app.43024>.
28. Saceviciene V. The influence of mechanical effects on coated textile hydrophobic properties / V. Saceviciene, M. Juciene, L. Sveikauskaite // *Industria Textila*. – 2016. – Vol. 67, no. 6. – P. 380–386.
29. Jayakumar R. Metal-containing polyurethanes, poly(urethane-urea)s and poly(urethane-ether)s: A review / R. Jayakumar, S. Nanjundan, M. Prabakaran // *Reactive and Functional Polymers*. – 2006. – Vol. 66, no. 3. – P. 299–314. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2004.12.008>.
30. Sol-gel 3-glycidoxypropyltriethoxysilane finishing on different fabrics: The role of precursor concentration and catalyst on the textile performances and cytotoxic activity / M. R. Plutino, C. Colleoni, I. Donelli, et al. // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2017. – Vol. 506. – P. 504–517. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.07.048>.
31. Covalent Fluorination Strategies for the Surface Modification of Polydienes / K. De Bruycker, M. Delahaye., P. Cools, J. Winne, F. E. Du Prez // *Macromolecular Rapid Communications*. – 2017. – Vol. 38, no. 11. – 1700122. DOI: <https://doi.org/10.1002/marc.201700122>.
32. Multilevel porous structured polyvinylidene fluoride/polyurethane fibrous membranes for ultrahigh waterproof and breathable application / H. M. Cui, Y. Y. Li, X. L. Zhao, X. Yin, J. Y. Yu, B. Ding // *Composites Communications*. – 2017. – Vol. 6. – P. 63–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coco.2017.10.002>.
33. Engineering Hydrophobic Organosilica Nanoparticle-Doped Nanofibers for Enhanced and Fouling Resistant Membrane Distillation / M. A. Hammami, J. G. Croissant, L. Francis, S. K. Alsaifi, D. H. Anjum, N. Ghaffour, N. M. Khashab // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2017. – Vol. 9, no. 2. – P. 1737–1745. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.6b11167>.
34. Jin S. Preparation of breathable and superhydrophobic polyurethane electrospun webs with silica nanoparticles / S. Jin, Y. Park, C. H. Park // *Textile Research Journal*. – 2016. – Vol. 86, no. 17. – P. 1816–1827. DOI: <https://doi.org/10.1177/0040517515617417>.
35. Fung W. Products from Coated and Laminated Fabrics / W. Fung // *Coated and Laminated Textiles*. – Cambridge : The Textile Institute, Woodhead Publishing Ltd., 2002. – P. 149–249. DOI: <https://doi.org/10.1533/9781855737518.149>.
36. Hegedus C. R. Aqueous acrylic-polyurethane hybrid dispersions and their use in industrial coatings / C. R. Hegedus, K. A. Kloiber // *Journal of Coatings Technology*. – 1986. – Vol. 68, no. 860. – P. 39–48.
37. Acrylic-Urethane Hybrid Polymers: Materials with High Potential in Leather Finishing / L. Krings, M. Jimenez, M. Oliveras, J. M. Pont Pi // *Journal of the American Leather Chemists Association*. – 2010. – Vol. 105, no. 12. – P. 388–394.