

Плаван В.П., Резанова Н.М., Ляшок І.О.,
Саблій Л.А., Резанова В.Г., Савченко Б.М.

ОЧИЩЕННЯ РІДКИХ ТА ГАЗОВИХ СЕРЕДОВИЩ З ВИКОРИСТАННЯМ ТОНКОВОЛОКНИСТИХ ФІЛЬТРУВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Використання фільтрувальних та адсорбційних матеріалів виявляється ефективним підходом до вирішення поширеної проблеми забруднення рідких чи газових середовищ. В статті досліджувались фільтрувальні матеріали і пучки мікрОВОЛОКОН, одержані переробкою розплавів сумішей поліпропілен/співполіамід складу 30/70 мас. % та модифікованих нанонаповнених композицій. Як нанодобавки вибрали пірогенний кремнезем марки А-300, кремнезем марки МАС-200М, а також кремнезем з нанесеними на його поверхню наночастинками діоксиду титану та кремнію $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$. Добавки вводили в кількості 1,0 мас.%. Переробкою вихідної та нанонаповнених сумішей були одержані зразки фільтрувальних матеріалів з товщиною фільтрувального шару (200 ± 20) мкм з однорідною структурою. Встановлено, що додавання твердих мінеральних нанодобавок не змінює характер процесу структуроутворення мікрОВОЛОКОН поліпропілену. Виконані мікроскопічні дослідження показали, що переважаючим типом структури для всіх композицій є мікрофібрили. Модифіковані фільтрувальні матеріали затримують механічні домішки розміром 0,5 мкм і вище з ефективністю 100 %. При цьому зростає також прецизійність фільтрації. Значне покращення одного із основних показників фільтрів обумовлене підвищенням однорідності структури фільтрувального шару за рахунок зменшення середнього діаметра мікрОВОЛОКОН майже у 2 рази та підвищення їх однорідності розподілу за діаметрами.

Показано, що використання як нанонаповнювачів вихідного та модифікованих кремнеземів дає можливість покращити прецизійність і ефективність фільтрувальних матеріалів. При цьому одночасно зростає їх продуктивність у $2,6 \div 3,0$ рази, що обумовлено зменшенням гідравлічного опору фільтрувального шару. Таким чином, тонковолокнисті нанонаповнені поліпропіленові ФМ можуть використовуватися для очищення питної води, повітря та рідких і газових технологічних середовищ різних галузей промисловості.

Ключові слова: Фільтрувальні матеріали, мікрОВОЛОКНА, поліпропілен, мінеральні нанодобавки, кремнезем, затримувальна здатність, ефективність очищення.

Постановка проблеми. Важливим питанням сьогодення є захист людини і навколишнього середовища від шкідливого впливу токсичних викидів в атмосферне повітря і водойми. Очищення питної води, повітря та технологічних газових і рідких середовищ від механічних домішок і високодисперсних аерозолів мікронних і субмікронних розмірів з використанням тонковолокнистих фільтрувальних матеріалів (ФМ) є одним із найбільш ефективних, простих та економічно доцільних методів [1].

Новий звіт Всесвітньої організації здоров'я показує, що у 2023 році забруднення повітря стало причиною 7,9 мільйона смертей та втрати 232 здорових років життя у всьому світі. Звіт про стан світового повітря за 2025 рік вперше містить дані про деменцію. У 2023 році деменція, пов'язана із забрудненням повітря, призвела до понад 600 000 смертей та майже 12 мільйонів втрачених здорових років життя [2]. Після глобальної пандемії занепокоєння громадськості екологічними проблемами зросло ще більше.

Використання фільтрувальних та адсорбційних матеріалів виявляється ефективним підходом до вирішення поширеної проблеми забруднення. Ці матеріали можуть справлятися

з широким спектром забруднювачів навколишнього середовища та ефективно зменшувати кількість захворювань, спричинених забрудненням, оскільки вони природно мають здатність затримувати частинки, менші за номінальний розмір пор. Тому розробка стійких, високоефективних фільтраційних та адсорбційних матеріалів, що підтримують захист навколишнього середовища, стала важливим напрямком досліджень [3-4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Існує ряд способів виробництва нетканих фільтрувальних полотен, основною структурною одиницею яких є волокна з діаметрами мікро- і нанорозмірів, а саме: аеродинамічне розпилення розплаву струменем стиснутого повітря [5,6], електроформування із розчину або розплаву полімеру [7,8] та переробка розплавів сумішей термодинамічно несумісних полімерів у композити з мікро- і нанофібрилярною структурою [9]. За умови одержання нетканих матеріалів (НМ) аеродинамічним способом діаметр волокон коливається від 1,0 до 20,0 мкм, а при електроформуванні мінімальний розмір окремих філаментів складає від 10 нм. В нетканих матеріалах, одержаних методом роздуву або електроформуванням, волокна однорідні за діаметрами, проте через їх хаотичне (за законом випадку) розташування в шарі існує ймовірність утворення певної кількості пор з діаметрами, більшими за номінальні.

Наприклад, автори роботи [10] розробили ефективний повітряний фільтр на основі поліакрилонітрилу (ПАН), використовуючи метод роздуву. В результаті встановлення отриманого волокнистого фільтрувального матеріалу в якості віконного екрану досягнуто видалення 90,6% твердих частинок. Автори роботи [11] підготували багатошаровий фільтр SiO_2 /ПАН за допомогою електроформування. При цьому було виявлено, що наночастинки SiO_2 збільшують площу поверхні нановолокон ПАН та їх мезопористу структуру. Багатошаровий фільтр продемонстрував вищий рівень фільтрації, порівняно з одношаровим фільтром.

Метод отримання тонковолокнистих матеріалів переробкою розплавів сумішей полімерів (формування *in situ* мікро- або нанофібрил одного компоненту в матриці іншого) на сьогодні реалізований для багатьох пар полімерів шляхом екструзії, роздуву, одноосного розтягу та 3D формування. Структура композиційної плівки, що виходить із формувального отвору, являє собою суцільну фазу дисперсійного середовища, наповненого тонкими струменями (фібрилами/мікроволокнами). Після екстракції полімеру-матриці розчинником, інертним по відношенню до компоненту дисперсної фази, залишаються неткані полотна із мікроволокон. Одержані тонковолокнисті ФМ характеризуються впорядкованою локалізацією мікроволокон з діаметрами від десятих долей до декількох мікрометрів, які орієнтовані в напрямку екструзії. Метод 3D формування дозволяє регулювати ефективність мікрофібрилярних ФМ шляхом формування багатошарової композиційної плівки, в якій шари розташовані під різними кутами [12-13]. За умови формування мікроволокон одного полімеру в матриці іншого їх розмірні характеристики визначаються, перш за все, реологічними властивостями компонентів суміші, ступенем їх сумісності на межі поділу фаз, а також типом технологічного обладнання і параметрами переробки.

Одним із найбільш ефективних методів регулювання мікроструктури полімерних композитів є додавання в суміш третього компоненту, що проявляє компатибілізуючу дію (зменшує поверхневий натяг). Включення наночастинок також забезпечує ефективну компатибілізуючу дію через локалізацію на поверхні поділу фаз та контроль морфології [14].

Дослідження останніх років свідчать, що ефективними компатибілізаторами є речовини в наностані [15]. При цьому введення наночастинок в структуру мікроволокон дозволяє поєднати унікальні властивості надтонких волокон і речовин в наностані та створити якісно нові матеріали з прогнозованими характеристиками [16].

Мета дослідження. Метою наукового дослідження є підвищення ефективності очищення водних і газових середовищ шляхом модифікації властивостей тонковолокнистих

фільтрувальних матеріалів, одержаних переробкою розплавів сумішей поліпропілен/співполіамід, через введення в їх структуру нанорозмірних добавок різної хімічної природи.

Основний матеріал дослідження. В статті досліджувались фільтрувальні матеріали і пучки мікрОВОЛОКОН, одержані переробкою розплавів сумішей поліпропілен/співполіамід (ПП/СПА) складу 30/70 мас. % та модифікованих нанонаповнених композицій. Для дослідження були використані промислові зразки полімерів: волокноутворюючий компонент – ізотактичний поліпропілен марки 21060, матричний полімер – співполіамід (співполімер капролактаму і гексаметиленадіпінату у співвідношенні 50:50) марки ПА-6/66. Як нанодобавки вибрали пірогенний кремнезем марки А-300 з питомою поверхнею ($S_{\text{пт}}$) 342 м²/г, кремнезем марки МАС-200М (модифікований аеросил А-300 зі щепленими до поверхні диметильними групами) з $S_{\text{пт}}$ 224 м²/г, а також кремнезем з нанесеними на його поверхню наночастинками діоксиду кремнію TiO₂/SiO₂ (вміст модифікуючої речовини 4,3 мкг/м²), $S_{\text{пт}}$ 62 м²/г. Добавки вводили в кількості 1,0 мас. %.

Для забезпечення максимальної концентрації нанодобавки в структурі мікрофібрил її попередньо диспергували в розплаві ПП за допомогою комбінованого черв'ячно-дискового екструдера. Гранули ПП/нанодобавка змішували з матричним полімером (СПА) на тому ж екструдері. Структурування в стренгах, одержаних після змішування інгредієнтів, оцінювали за допомогою електронного та оптичного мікроскопів шляхом підрахунку кількості всіх типів структур ПП та визначення їх розмірів. Розраховували середній діаметр мікрОВОЛОКОН (d), дисперсію розподіду (δ^2) та масову долю всіх типів структур (мікрОВОЛОКНА, частинки, плівки), які утворює поліпропілен в матриці. Експериментальні дані обробляли методами математичної статистики.

Композиційну плівку (напівфабрикат для одержання ФМ) формували на черв'ячному екструдері через плоско-щільну головку. Фільтрувальні неткані матеріали отримували після екстракції матричного полімеру із композиційної плівки водним розчином етилового спирту. Одержані зразки ФМ мали фільтрувальний шар з однорідною структурою товщиною 200±20 мкм (Рис. 1).

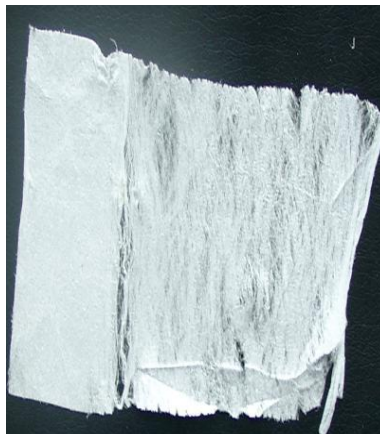


Рисунок 1 – Мікрофотографія зразка фільтрувального матеріалу

Затримувальну здатність ФМ оцінювали за ефективністю очищення атмосферного повітря від механічних домішок за допомогою лічильника аерозольних частинок АЗ-5 в діапазоні їх розмірів 0,3÷1,0 мкм. Ефективність фільтрації розраховували як відношення кількості затриманих частинок відповідного діаметру до їх кількості у повітрі. Проникність ФМ оцінювали на лабораторному стенді з використанням дистильованої води за тиску 0,5·10⁵ Па. Питому продуктивність оцінювали як об'єм фільтрату, що проходить через фільтрувальний шар за одиницю часу з одиниці його робочої поверхні. Гігроскопічні властивості ПП мікрОВОЛОКОН визначали ваговим способом відповідно до ISO 20158:2018

«Textiles — Determination of water absorption time and water absorption capacity of textile fabrics», а їх питому поверхню визначали відповідно до ISO 9277:2022 «Визначення питомої площі поверхні дисперсних та пористих матеріалів методом газової адсорбції».

Результати та їх обговорення

Фільтрувальні матеріали повинні мати високу затримувальну здатність (ефективність), невеликий гідравлічний опір (проникність матеріалу), стійкість до хімічної дії речовин, що розділяються, достатню міцність, теплостійкість за температури фільтрації, невисоку ціна, зручність у використанні (простота закріплення і швидкість заміни). Основними показниками, що характеризують ФМ, є ефективність, продуктивність та прецизійність фільтрації. Вони визначаються розмірами пор і формою елементів, з яких виготовлені ФМ, а також структурою матеріалу. Середній діаметр пор фільтрувальних шарів тим нижчий, чим менші розміри структурних елементів, а їх форма тим однорідніша, чим більш геометрично одноманітною і правильною є форма структур, що утворюють ФМ [1].

За умови переробки сумішей полімерів на екструзійному обладнанні компонент дисперсної фази деформується і руйнується з утворенням частинок різних розмірів та форми (сферичні, еліпсоїдальні, циліндричні, стрічкоподібні) або їх поєднання [17]. Для формування *in situ* мікрОВОЛОКОН одного полімеру в матриці іншого рідкі краплі дисперсної фази повинні деформуватися і зливатися у струмені в напрямку течії та зберігати сталу форму до моменту затвердіння. Візуальне дослідження залишків ПП після екстракції СПА із екструдатів свідчить, що при змішуванні компонентів на черв'ячно-дисковому екструдері має місце формування ПП мікрОВОЛОКОН в матриці СПА. Додавання твердих мінеральних нанодобавок не змінює характер процесу структуроутворення мікрОВОЛОКОН поліпропілену.

Виконані мікроскопічні дослідження показали, що переважаючим типом структури для всіх композицій є мікрофібрили [17]. При цьому має місце формування інших типів структур (частинки, плівки) (табл. 1).

Таблиця 1 – Вплив хімічної природи нанодобавок на мікроструктуру екструдатів суміші ПП/СПА

Назва добавки	Типи структур					
	мікрофібрили			частинки		плівки, мас. %
	$\bar{d}$, мкм	мас. %	δ^2	$\bar{d}$, мкм	мас. %	
без добавки	4,0	56,75	1,4	2,5	0,05	43,2
кремнезем	2,0	91,04	0,3	2,0	0,01	8,95
метилкремнезем	2,3	92,59	0,5	1,2	0,02	7,40
оксид титану/кремнезем	1,8	95,10	0,4	2,4	1,09	3,81

Як видно із Таблиці 1, введення всіх досліджених наноповнювачів сприяє вдосконаленню мікрофібрилярної морфології, що проявляється у різкому збільшенні масової долі мікрОВОЛОКОН, зменшенні $\sim$ у 2 рази їх середнього діаметра та підвищенні однорідності розподілу. Як і слід було очікувати, модифікуюча дія наночастинок залежить від хімічної природи їх поверхні. Найбільший ефект досягнуто при використанні наночастинок $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ – середній діаметр ПП мікрофібрил є мінімальним, а їх масова доля – максимальною. Відомо, що найбільший вплив на процеси структуроутворення в розплавах сумішей полімерів забезпечує переважне розміщення наночастинок на межі поділу фаз за рахунок зменшення величини поверхневого натягу [9,18]. Оксиди в суміші є більш полярними, порівняно з вихідним кремнеземом і метилкремнеземом, через те, що поверхня оксидів металів є завжди полярною завдяки присутності аніонного кисню, а також за рахунок утворення на поверхні наночастинок кремнезему додаткових функціональних

груп Ti–OH та Si–O–Ti. Погане змочування наночастинок біфункціональної добавки розплавом неполярного поліпропілену сприяє їх виштовхуванню із розплаву ПП на межу поділу фаз компонентів та локалізацію в ній.

Аналіз результатів оцінки затримувальної здатності ФМ при очищенні атмосферного повітря від механічних частинок розміром $0,3 \div 1,0$ мкм свідчить, що введення нанодобавок в структуру поліпропіленових мікрОВОЛОКОН сприяє підвищенню їх ефективності (табл.2).

Таблиця 2 – Вплив хімічної природи нанодобавок на ефективність очищення атмосферного повітря (за тиску $0,5 \cdot 10^5$ Па)

Назва добавки	Ефективність, % (за частинками розміром, мкм)					
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0
без добавок	78,6	83,5	85,9	87,8	91,9	99,4
кремезем	99,9	100	100	100	100	100
метилкремнезем	99,5	99,9	100	100	100	100
оксид титану/ кремнезем	99,9	100	100	100	100	100

Фільтрування, як правило, є гідродинамічним процесом, який визначається різницею тисків по обидва боки фільтрувальної перегородки і опором рідині при її протіканні через пори і шар осаду, що утворився. При мікрофільтрації важливу роль відіграють фізико-хімічні явища, такі як адсорбція, коагуляція, пептизація осаду, наявність сольватної оболонки на твердих частинках тощо. Для механічних суспензій з великими частинками посилюється відносний вплив гідродинамічних факторів. За розміру домішок ≤ 1 мкм фізико-хімічні фактори стають визначальними, і саме вони обумовлюють те, що пори можуть затримувати частинки навіть у 5 разів менші за її діаметр [1].

Модифіковані фільтрувальні матеріали затримують механічні домішки розміром 0,5 мкм і вище з ефективністю 100 %. При цьому зростає також прецизійність фільтрації. Значне покращення одного із основних показників фільтрів обумовлене підвищенням однорідності структури фільтрувального шару за рахунок зменшення середнього діаметра мікрОВОЛОКОН майже у 2 рази та підвищення їх однорідності розподілу за діаметрами. Крім того, процес фільтрації для досліджуваних частинок відбувається в основному за рахунок ряду фізико-хімічних явищ (ефекту доторкання, адсорбції, броунівської дифузії), а так званий ефект “сита” не відіграє суттєвої ролі. Завдяки цьому модифіковані ФМ затримують частинки більші за розмірами, ніж розмір пор. Вирішальний вплив процесу адсорбції підтверджується різким зростанням питомої поверхні мікрОВОЛОКОН з $84 \text{ м}^2/\text{г}$ для вихідних і до $190 \div 244 \text{ м}^2/\text{г}$ для нанонаповнених (табл.3).

Таблиця 3 – Вплив хімічної природи нанодобавок на величину питомої поверхні та гігроскопічність поліпропіленових мікрОВОЛОКОН

Назва добавки	Питома поверхня, $\text{м}^2/\text{г}$	Гігроскопічність, %
без добавок	84	0,17
кремезем	244	0,35
метилкремнезем	220	0,29
оксид титану/кремнезем	190	0,48

Продуктивність будь-якого фільтрувального матеріалу є другою важливою характеристикою. Проникність ФМ визначається перепадом тиску по обидва боки фільтрувальної перегородки та опором матеріалу по відношенню до середовища, що фільтрується. В ході дослідження виявлено різке зростання продуктивності ФМ по

дистильованій воді для модифікованих нанодобавками зразків (табл.4). Кращі властивості проявляють матеріали, модифіковані сумішшю діоксидів титану і кремнію. Зокрема продуктивність фільтрувальних матеріалів модифікованих нанодобавкою оксид титану/кремнезем в 3 рази вища, ніж не модифікованих.

Таблиця 4 – Вплив хімічної природи нанодобавок на продуктивність фільтрувальних матеріалів

Назва добавки	Продуктивність, $\text{дм}^3/\text{м}^2 \cdot \text{год.}$	Тиск, Па
без добавок	4050	$0,5 \cdot 10^5$
кремнезем	10650	
метилкремнезем	12190	
оксид титану/кремнезем	12230	

Це неочікуваний результат, оскільки підвищення прецизійності і ефективності фільтрів любого класу, як правило, супроводжується зменшенням їх проникності. Збільшення продуктивності обумовлене зниженням гідравлічного опору фільтрувального шару за рахунок кращої гідрофільності наноповерхні мікріволокон (табл.3). Наночастинки TiO_2 надають матеріалам здатність до самоочищення (подібно листкам рослин, крилам комах), що також може сприяти підвищенню продуктивності ФМ, модифікованих сумішшю оксидів.

Важливою перевагою розробленого методу одержання тонковолокнистого фільтрувального матеріалу шляхом переробки розплаву термодинамічно несумісної суміші полімерів є можливість збільшення робочої поверхні фільтру та виготовлення його у вигляді картриджу необхідного діаметру і довжини. При цьому слід підкреслити, що на відміну від інших методів, в даному випадку гофрується композиційна плівка (напівфабрикат), а не готовий фільтрувальний матеріал, що унеможливорює механічне пошкодження і забруднення фільтрувального шару та погіршення його властивостей. Розроблені картриджні фільтри витримують 20-разову стерилізацію гострою парою або розчинами водно-спиртовими та перекису водню, а також регенеруються зворотнім потоком на 80 %.

Введення наночастинок в структуру синтетичних волокон надає їм унікальні властивості, притаманні речовинам в наностані. Нанорозмірний діоксид титану проявляє антимікробні та фотокаталітичні властивості [19], які підсилюються під дією ультрафіолетового опромінення. Змішаний оксид, в якому наночастинки діоксиду титану нанесені на кремнезем, поєднує фотокаталітичну активність TiO_2 та сорбційні властивості SiO_2 [20]. Волокна, наповнені цією біфункціональною добавкою, можуть бути одночасно високоефективними сорбентами і фотокаталізаторами, поглинати із води широкий спектр іонів металів, руйнувати органічні сполуки, концентрувати і сепарувати радіонукліди, очищувати стічні води від багатьох фармацевтичних препаратів тощо. Подальші дослідження будуть направлені на відпрацювання технологічних параметрів процесу фільтрування для різних середовищ і типів забруднень.

ВИСНОВКИ

Модифіковані фільтрувальні матеріали затримують механічні домішки розміром 0,5 мкм і вище з ефективністю 100 %. При цьому зростає також прецизійність фільтрації. Значне покращення одного із основних показників фільтрів обумовлене підвищенням однорідності структури фільтрувального шару за рахунок зменшення середнього діаметра мікріволокон майже у 2 рази та підвищення їх однорідності розподілу за діаметрами.

Важливою перевагою розробленого методу одержання тонковолокнистого фільтрувального матеріалу шляхом переробки розплаву термодинамічно несумісної суміші полімерів є можливість збільшення робочої поверхні фільтру та виготовлення його у вигляді картриджу необхідного діаметру і довжини.

Показано, що використання як нанонаповнювачів вихідного та модифікованих кремнеземів дає можливість покращити прецизійність і ефективність фільтрувальних матеріалів. При цьому одночасно зростає їх продуктивність у 2,6÷3,0 рази, що обумовлено зменшенням гідравлічного опору фільтрувального шару.

Таким чином, тонковолокнисті нанонаповнені поліпропіленові ФМ є прецизійними матеріалами глибинної дії і можуть використовуватися для очищення питної води, повітря та рідких і газових технологічних середовищ різних галузей промисловості.

Список використаних джерел

1. *Sutherland K. Filters and Filtration: Handbook / Ken Sutherland.* – 5th ed. – Oxford: Elsevier, 2008. – 536 p.
2. Institute for Health Metrics and Evaluation. – Режим доступу: <https://www.healthdata.org/news-events/newsroom/news-releases/new-report-shows-nearly-9-10-global-air-pollution-deaths-are> (дата звернення: 5.12.2025).
3. Sustainable pollution treatment system through Fiber filter materials / *Tianyu Luo, Junze Zhang, Jiaqi Wang, Hanzi Shi, Yan Hong, Run Zhao* // *Sustainable Materials and Technologies.* – 2024. – Vol. 42, no. 4. – e01168. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e01168>
4. *Chikao Kanaoka.* Fine Particle Filtration Technology Using Fiber as Dust Collection Medium / *Chikao Kanaoka* // *KONA Powder and Particle Journal.* – 2019. – Vol. 36, no.1. – P. 88-113 <https://doi.org/10.14356/kona.2019006>
5. *Yesil Y.* Structure and mechanical properties of polyethylene melt blown nonwovens / *Y. Yesil, G.S. Bhat* // *Int. J. Sci. Tech.* – 2016. – V.28, no.6. – P. 780-793. DOI: 10.1108/IJCST-09-2015-0099
6. Mechanically robust and recyclable cross-linked fibers from melt blown anthracene-functionalized commodity polymers / *K. Jin, D. Banerji, F.S. Bates, C.J. Ellison* // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* – 2019. – Vol. 11, no. 13. – P. 12863-12870. DOI: 10.1021/acsami.9b00209
7. Electrospinning versus fiber production methods: from specifics to technological convergence / *C.J. Luo, S.D. Stoyanov, E. Stride, E. Pelan, M. Edirisinghe* // *Chem. Soc. Rev.* – 2012. – Vol. 41, no.13. – P. 4708-4735. DOI: 10.1039/c2cs35083a
8. *Li H.* Needleless melt-electrospinning of biodegradable poly(lactic acid) ultrafine fibers for removal of oil from water / *H. Li, Y. Li, W. Wang* // *Polymer.* – 2017. – Vol.9, no. 2. – P. 3-12. <https://doi.org/10.3390/polym9020003>
9. Micro and nano fibrillar composites (MFCs and NFCs) from polymer blends / *ed. by S. Thomas, R. K. Mishra, N. Kalarikka.* – Cambridge: Woodhead Publishing, 2017. – 372 p. DOI: 10.1016/C2016-0-01649-2
10. Synthesis and filtration properties of polyimide nanofiber membrane/carbon woven fabric sandwiched hot gas filters for removal of PM 2.5 particles / *Q. Wang, Y. Bai, J. Xie, Q. Jiang, Y. Qiu* // *Powder Technol.* – 2016. – Vol. 292, no. 6. – P. 54-63. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.01.008>
11. Multilevel structured polyacrylonitrile/silica nanofibrous membranes for high-performance air filtration / *N. Wang, Y. Si, N. Wang, G. Sun, M. El-Newehy, S. S. Al-Deyab, B. Ding* // *Separation and Purification Technology.* – 2014. – Vol. 126, no. 6. – P. 44-51. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.02.017>

12. Production of high-performance multi-layer fine-fibrous filter materials by application of material extrusion-based additive manufacturing / *V.A. Beloshenko, V.P. Plavan, N.M. Rezanova, B.M. Savchenko, I. Vozniak* // *Int. J. Adv. Manuf. Techn.* – 2019. – Vol. 101. – P. 2681-2688. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-3152-x>
13. Production of Filter Material from Polypropylene/Copolyamide Blend by Material Extrusion-Based Additive Manufacturing: Role of Production Conditions and ZrO₂ Nanoparticles / *V. Beloshenko, V. Chishko, V. Plavan, N. Rezanova, B. Savchenko, N. Sova, I. Vozniak* // *3D Printing and Additive Manufacturing*. – 2021. – Vol. 8, no. 4. – P. 253–262. DOI: 10.1089/3dp.2020.0195
14. *Fredi G.* Compatibilization of biopolymer blends: A review / *Giulia Fredi, Andrea Dorigato* // *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*. – 2024. – Vol. 7, no. 4. – P. 373-404 <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2023.11.002>
15. Formation of microfibrillar structure of polypropylene/copolyamide blends in the presence of nanoparticles of metal oxides / *N.M. Rezanova, Yu.O. Budash, V.P. Plavan, V.I. Bessarabov* // *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii*. – 2021. – № 1. – P. 71-78. DOI: 10.32434/0321-4095-2021-134-1-71-78
16. Nanoparticle Synthesis and Their Integration into Polymer-Based Fibers for Biomedical Applications / *J.M. Domingues, C.S. Miranda, N.C. Homem, H.P. Felgueiras, J.C. Antunes* // *Biomedicines*. – 2023. – Vol. 11, no. 7, 1862. <https://doi.org/10.3390/biomedicines11071862>
17. Структурування у компатіблізованих нанонаповнених розтопах поліпропілен/пластифікований полівініловий спирт / *Н.М. Резанова, В.П. Плаван, Л.С. Дзюбенко, О.О. Сап'яненко, П.П. Горбик, А.В. Коришун* // *Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології*. – 2018. – Т. 16, № 1. – С. 55-70.
18. *Polymer Blends: Formulation and Performance* / ed. by *Paul D.R., Bucknall C.B.* – New York: John Wiley & Sons, Inc. – 2000. – Vol.1. – 618 p. ISBN 10: 0471352799 / ISBN 13: 9780471352792
19. *Покотило О. А.* Фотокаталітична антибактеріальна активність наночастинок діоксиду титану (TiO₂) / *О. А. Покотило* // *Медична хімія*. – 2014. – Т. 16, № 4. – С. 92. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Med_chim_2014_16_4_29
20. Effect of silver Content and Morphology on the catalic Activity of Silver-grafted Titanium Oxide Nanostructure / *M.A. Kanjwal, Barakat N.M., Shceikh F.A., Balk W., Khil M.S., Kim H.Y.* // *Fibers and Polym.* 2010. Vol. 11, № 5. P. 700-709. <https://doi.org/10.1007/s12221-010-0700-x>

Plavan V.P., Rezanova N. M., Liashok I.O., Sablii L.A., Rezanova V.G., Savchenko B.M.

PURIFICATION OF LIQUID AND GASEOUS MEDIA USING FINE FIBRE FILTERING MATERIALS

The use of filtering and adsorption materials is an effective approach to solving the widespread problem of contamination of liquid or gaseous media. The article investigated filtering materials and bundles of microfibers obtained by melt processing the polypropylene/copolyamide mixtures of 30/70 wt. % and modified nanofilled compositions. Pyrogenic silica of the A-300 brand, silica of the MAS-200M brand, as well as silica with titanium dioxide and silicon TiO₂/SiO₂ nanoparticles deposited on its surface were chosen as nanoadditives. The additives were introduced in an amount of 1.0 wt.%. The samples of filtering materials with a filter layer thickness of (200±20) μm with a homogeneous structure were obtained by processing the initial and nanofilled mixtures. It was found that the addition of solid mineral nanoadditives does not change the nature of the process of structure

formation of polypropylene microfibers. The performed microscopic studies showed that the predominant type of structure for all compositions is microfibrils. Modified filter materials retain mechanical impurities of 0.5 microns and above with an efficiency of 100%. At the same time, the precision of filtration also increases. A significant improvement in one of the main indicators of filters is due to an increase in the uniformity of the structure of the filter layer due to a decrease in the average diameter of microfibers by almost 2 times and an increase in their uniformity of distribution by diameters. It is shown that the use of the original and modified silicas as nanofillers makes it possible to improve the precision and efficiency of filter materials. At the same time, their productivity increases by 2.6÷3.0 times, which is due to a decrease in the hydraulic resistance of the filter layer. Thus, fine-fiber nanofilled polypropylene filtering materials can be used to purify drinking water, air, and liquid and gaseous process media in various industries.

Keywords: Filter materials, microfibers, polypropylene, mineral nanoadditives, phase boundary, surface phenomena, retention capacity, purification efficiency.

Стаття надійшла 9.12.2025 р.

УДК 669.15-194:620.92

doi.org/10.31498/2522-9990302025347274

Нестеров О.В., Рубан В.Т., Капустян О.Є.

АЛЬТЕРНАТИВНІ ШЛЯХИ ПІДТРИМАННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ОБ'ЄКТІВ ЕНЕРГЕТИКИ В УМОВАХ ВЕЛИКОМАСШТАБНОЇ АГРЕСІЇ

Дослідження присвячено пошуку альтернативних напрямів заміни високолегованих сталей спеціального призначення шляхом розробки економнолегованих сталей, структура та властивості яких забезпечили б виготовлення та тривалу експлуатацію широкого діапазону виробів для застосування в енергетичному обладнанні. Досліджувались структура, механічні та експлуатаційні властивості економнолегованих жаростійких сталей 03X8CЮ, 03X8CЮВМБ, у порівнянні з раніше розробленою сталлю 08X8CЮТч. Визначалась можливість отримання додаткових технологічних та експлуатаційних якостей, таких як покращена здатність до штампування та витягування, жароміцність завдяки використанню вольфраму та молібдену як додаткових легувальних елементів. Підтверджено оптимальне співвідношення механічних властивостей та достатній рівень жаростійкості виробів в агресивних середовищах при підвищених температурах і корозійній стійкості в атмосферних умовах, а застосування додаткового легування надає можливість поширити функціональне призначення цих сталей. Теоретично обґрунтовано усунення титану зі складу дослідної сталі з метою поліпшення стану поверхні листового матеріалу при збереженні феритної структури. Необхідний рівень феритизації цього матеріалу пов'язаний із впливом низького вмісту вуглецю разом зі збалансованим (за кількістю) вмістом хрому, алюмінію і кремнію як ефективних феритоутворювачів, а також вольфраму та молібдену, які позитивно впливають на рівень жароміцності. Напрацьовано результати наукових досліджень щодо застосування економнолегованих сталей, хімічний склад яких не потребує використання гостро дефіцитних та коштовних легувальних елементів, а отриманий сортамент гарячекатаних та холоднокатаних сталей дозволяє замінити високолеговані сталі спеціального призначення при виготовленні виробів енергетичного обладнання, зокрема облицювальних елементів топочних камер, труб та інших елементів, де застосовуються формозмінювальні операції і зварювання.

Ключові слова: Енергетичне обладнання, економнолеговані сталі, легувальні елементи, феритна структура, жаростійкість, жароміцність.