

PACS numbers: 61.05.cp, 61.25.hp, 81.40.Jj, 82.35.Np, 87.19.xb, 87.53.-j, 87.85.Rs

Структура, механічні та бактерицидні властивості гідрогелевих композитів ПВС–ПЕГ–TiO₂, зшитих електронним опроміненням

І. О. Ситник^{1,2}, В. Л. Демченко², В. Б. Долгошей¹, М. В. Юрженко^{2,3},
В. Б. Неймаш⁴, Г. Є. Монастирський¹, Н. П. Рибальченко⁵

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Берестейський проспект, 37,
03056 Київ, Україна

²Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича, 11,
03150 Київ, Україна

³Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України,
Харківське шосе, 48,
02160 Київ, Україна

⁴Інститут фізики НАН України,
просп. Науки, 46,
03028 Київ, Україна

⁵Інститут мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України,
вул. Академіка Заболотного, 154,
03143 Київ, Україна

В роботі описано процес синтезу гідрогелевих матеріалів на основі полівінілового спирту (ПВС) і поліетиленгліколю (ПЕГ), наповнених частинками діоксиду Титану в концентраціях 1%, 0,1% і 0,01% мас. Розподіл за розмірами частинок діоксиду Титану було одержано методом динамічного розсіювання світла. Для одержання даних про структуру одержаних матеріалів до і після опромінення електронами використовувалася ширококутова рентгенографія, за результатами якої було виявлено можливий взаємочин між частинками діоксиду Титану та полімерною матрицею. Випробування на розрив показали пониження міцності на розрив і деформацію щодо розриву гідрогелю зі зростанням концентрації діоксиду Титану. Гідрогелі ПВС–ПЕГ–TiO₂ не проявили антимікробної дії до референтних штамів *Staphylococcus aureus* і *Escherichia coli*.

The paper describes the synthesis process of hydrogel materials based on polyvinyl alcohol (PVA) and polyethylene glycol (PEG) filled with tita-

tanium-dioxide particles in concentrations of 1%, 0.1%, and 0.01% mass. The size distribution of titanium dioxide particles is obtained by the method of dynamic light scattering. To obtain data on the structure of the obtained materials before and after electron irradiation, wide-angle radiography is used, the results of which reveal a possible interplay between the titanium-dioxide particles and the polymer matrix. Tensile tests show a decrease in the tensile strength and strain to break of the hydrogel with increasing titanium-dioxide concentration. PVA-PEG-TiO₂ hydrogels do not show antimicrobial activity against reference strains of *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*.

Ключові слова: гідрогель, ПВС-ПЕГ, TiO₂, електронне опромінення, механічна міцність, бактерицидна активність.

Key words: hydrogel, PVA-PEG, TiO₂, electron irradiation, mechanical strength, bactericidal activity.

(Отримано 18 квітня 2024 р.)

1. ВСТУП

Полімерні композитні матеріали здатні задовольняти більшість сучасних вимог до матеріалів, які мали б комплекс необхідних функціональних властивостей [1].

Наповнення полімерів дисперсними наповнювачами дає змогу одержувати матеріали з певними функціональними характеристиками [2, 3].

Гідрогелі — це об'ємні гідрофільні полімерні мережі, здатні вбирати велику кількість води чи то біологічних рідин, що робить їх особливо корисними в медицині та фармацевтиці. Їхня схожість з живими тканинами краща будь-якого іншого виду синтетичних біоматеріалів, що пояснюється їхнім високим вбиранням води та м'якою консистенцією, близькою до консистенції природніх тканин, тим самим забезпечуючи їхню високу біосумісність [4].

Використання гідрогелів для створення пов'язок є сучасною альтернативою традиційним марлевим пов'язкам для лікування ран [5]. Ефективні пов'язки мають бути нетоксичними, підтримувати вологість у місці рани, захищати рану від подальших пошкоджень і сприяти загоєнню. Гідрогелі можуть містити до 96% води, чим підтримують вологе середовище, ідеальне для загоєння рани, можуть вбирати певну кількість ранового ексудату й особливо ефективні для зневоднених або некротичних ран [6]. Листові гідрогелі легко видалити, не пошкоджуючи ложе рани завдяки вологій поверхні між раною та пов'язкою; вони охолоджують рану та сприяють полегшенню болю [7].

Потребу в гідрогелях для медичних застосувань зумовлено їхніми властивостями, такими як гідрофільність і біосумісність. Вони є дуже затребуваними для лікування ран; тому важливо розробити методики найбільш ефективного виробництва гідрогелів медичного призначення з урахуванням доступності сировини та лікувальних властивостей матеріалу.

У цій роботі для синтезу гідрогелю використовується полімерний композит ПВС–ПЕГ із включеннями частинок TiO₂ з метою надання антибактеріальних властивостей одержаним гідрогелевим матеріалам. ПВС є синтетичним полімером, який використовується з початку 1930-х років у широкому діапазоні промислових, медичних і харчових застосувань. Різні властивості, такі як в'язкість, температура топлення, показник заломлення, змінюються залежно від молекулярної маси та відсотка гідролізу [8]. ПВС часто використовується у поєднанні з іншими полімерами [9]. Поліетиленгліколь (ПЕГ) розчиняється у воді, етанолі, ацетонітрилі, бензолі та дихлорметані, є універсальним простим поліфіром, який широко використовується в різних галузях, включаючи медицину [10].

Зшивання гідратованої полімерної системи ПВС–ПЕГ і результатів механічних властивостей досягнуто за допомогою йонізуючого випромінювання, яке спричиняє радіолізу води й утворення вільних радикалів, таких як радикали OH, H[•] і гідратовані електрони: $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{OH}^\bullet, \text{H}^\bullet, e_{aq}^-, \text{H}^+, \text{H}_2\text{O}_2, \text{H}_2$ [11–14].

Гідроксильні радикали, поміж інших реакційноздатних форм, відіграють найважливішу роль, відриваючи Гідроген від полімерних ланцюгів з утворенням макрорадикалів, сприяючи перехресному зшиванню макромолекул полімеру [11, 12].

Наночастинки TiO₂ є одними з найбільш вивчених для антимікробних застосувань завдяки їхній бактерицидній активності та безпеці [15]. Крім цього, діоксид Титану вирізняється високою хемічною стабільністю, супергідрофільністю, біосумісністю та відносно дешевому виробництву [16].

Також TiO₂ служить фотокаталізатором і напівпровідником із забороненою зоною у 3,2 еВ, який є як у аморфній (нефотоактивній), так і у трьох природніх кристалічних формах: анатазі, рутилі та брукіті, причому анатаз є більш фотоактивним і, отже, ліпшим для фотокаталітичних застосувань [16].

Отже, діоксид Титану є перспективним наповнювачем для гідрогелевих композитних матеріалів завдяки його фотокаталітичним і антибактеріальним властивостям. Високий попит на гідрогелеві перев'язувальні матеріали вимагає подальших досліджень таких матеріалів і методів виробництва їх.

Метою даної роботи є дослідження особливостей структурної організації, механічних і бактерицидних властивостей гідрогеле-

вих композитів ПВС–ПЕГ–TiO₂, зшитих електронним опроміненням.

2. СИНТЕЗА

Процедура синтези включає розчинення 4,8 г полівінілового спирту (ПВС 17-99) у 28,6 мл води та 0,6 г поліетиленгліколю (ПЕГ-6000) у 3,95 мл води за температур у 95°C і 20°C відповідно з подальшим перемішуванням. До розчину ПВС додавали розчин ПЕГ і змішували впродовж 10 хвилин, утворюючи однорідну суміш обох компонентів.

Далі діоксид Титану (Sigma-Aldrich) з середнім діаметром частинок у 265 нм додавали в різних пропорціях (1%, 0,1% і 0,01% мас.) до суміші ПВС–ПЕГ разом з 2 мл води. Магнетним перемішуванням було досягнуто однорідність розчину ПВС–ПЕГ–TiO₂.

Сформовані таким чином гелі поміщалися у зір-пакети та зберігалися за температур у 4°C впродовж 4 днів. Охолоджені гелі було опромінено електронами з енергією у 4 MeV із дозою опромінення у 33 кГр.

3. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Метод динамічного розсіювання світла

Для одержання графіка розподілу частинок діоксиду Титану за розмірами застосовано метод динамічного розсіювання світла (DLS) з використанням аналізатора частинок LiteSizer 500. У цьому методі використовується явище хаотичного теплового руху частинок у рідині, де швидкість руху частинок обернено пропорційна їхнім розмірам. Розсіяння світла на зразку детектується й фіксується багато разів. Порівнюючи записи в різні моменти часу можна визначити швидкість руху частинок. Одержана інформація уможливорює одержати розподіл частинок за розмірами та середнє значення розміру.

Для визначення розмірів частинок TiO₂ 0,1 г діоксиду Титану додали до 1,5 мл води, результативну суміш заливали в одноразову кювету, яку поміщали в прилад LiteSizer 500. Температура проведення досліджень складала 25°C.

3.2. Метод ширококутової рентгенографії

Дослідження кристалічної структури TiO₂ й структурної організації зразків на основі полівінілового спирту проводилися методом ширококутової рентгенографії на дифрактометрі XRD-7000

виробництва Shimadzu. Його рентгенооптична схема використовує метод Дебая–Шеррера на проходження первинного пучка електронів через досліджуваний зразок із застосуванням CuK_α -випромінювання ($\lambda = 1.54 \text{ \AA}$) і графітового монохроматора.

Відносний рівень кристалічності аморфно-кристалічного полімеру визначався за формулою

$$X_{\text{кр}} = \frac{Q_{\text{кр}}}{Q_{\text{кр}} + Q_{\text{ам}}} \cdot 100;$$

тут $Q_{\text{кр}}$, $Q_{\text{ам}}$ — площа графіку під дифракційними максимумами для кристалічної й аморфної структури полімеру відповідно, $Q_{\text{кр}} + Q_{\text{ам}}$ — площа всього графіку аморфно-кристалічної структури в інтервалі кутів розсіяння ($2\Theta_1$ – $2\Theta_2$).

Дослідження було проведено методом автоматичного покрокового сканування в режимі з $U = 30 \text{ кВ}$, $I = 30 \text{ мА}$ у інтервалі кутів розсіяння (2Θ) від 3 до 50 градусів і часом експозиції у 5 с. Температура проведення досліджень складала $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$.

3.3. Випробування на механічну міцність

Міряння міцності та видовження до розриву зразків з концентраціями у 1%, 0,1% і 0,01% мас. TiO_2 проводили на розривній машині Shimadzu AGS-X 10kN Tensile Tester. Розміри прямокутних зразків складали $50 \times 8,5 \times 5,8 \text{ мм}$, швидкість розтягу — 5 мм/хв. Для поліпшення зчеплення зразків з тиглями між зразком і поверхнями тиглів поміщали тонкий шар паперу, призначений для вбирання надлишкової вологи.

3.4. Антимікробна активність зразків щодо референтних штамів

Оцінка бактерицидної активності зразків проводили щодо референтних штамів умовно-патогенних мікроорганізмів, — грам-позитивних *Staphylococcus aureus* ATCC 25923 і грам-негативних *Escherichia coli* ATCC 25922, — методом дифузії в агар на твердому поживному середовищі Luria–Bertani (LB). Поживне середовище LB у чашках Петрі засівали $0,100 \pm 0,001 \text{ мл}$ інокулята тест-культур мікроорганізмів *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* з розрахунку $2,5 \pm 0,1 \cdot 10^5 \text{ КУО/мл}$. Зразки, наповнені TiO_2 , які мали форму дисків діаметром $d = 10 \pm 0,5 \text{ мм}$ поміщали на поверхню поживного середовища, засіяного тест-мікроорганізмами. Чашки зі зразками інкубували 24 год. за температури $T = 37,0 \pm 0,1^\circ\text{C}$. Антимікробну активність оцінювали за наявністю чіткої зони затримки росту навколо диска полімерного зразка. Зразок без напо-

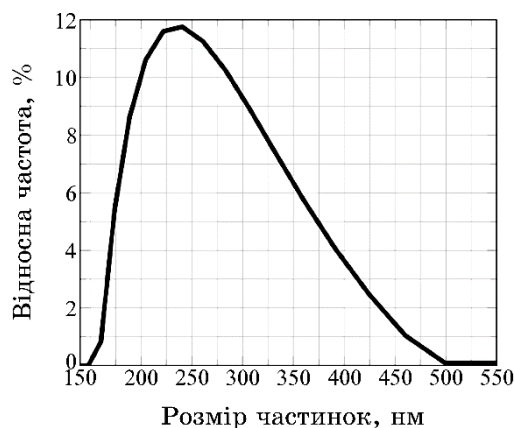


Рис. 1. Залежність відносної частоти частинок TiO_2 від їхнього діаметра.¹

внювача був використаний як контрольний. Експеримент був повторений тричі.

4. ОБГОВОРЕННЯ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

4.1. Розмір частинок

Застосовуючи метод динамічного розсіювання світла (DLS) було проведено аналізу розміру та розподілу частинок. На рисунку 1 представлено залежність відносної частоти розподілу частинок TiO_2 за кількістю від їхнього діаметра.

Середній діаметр частинок TiO_2 склав 265 нм. Частинки мали розміри в діапазоні від 150 нм до 540 нм, а індекс полідисперсності, який є мірою неоднорідності вибірки за розмірами, складає 9%.

4.2. Ширококутова рентгенографія

Дослідження структури одержаних зразків показали, що чистий полівініловий спирт має напівкристалічну структуру. Це демонструють дифракційні піки із $2\theta_m \cong 11,2^\circ, 19,5^\circ, 23,0^\circ, 40,8^\circ$, що відповідають кристалографічним площинам з Міллеровими індексами (100), (101), (200), (201), як показано на рис. 2.

Під час аналізу ширококутових рентгенівських дифрактограм досліджуваних зразків було встановлено, що додавання поліетиленгліколю з молекулярною масою 6000 до складу полівінілового спирту не змінює його структурних особливостей (рис. 3), зокрема кутове положення та співвідношення інтенсивностей основних

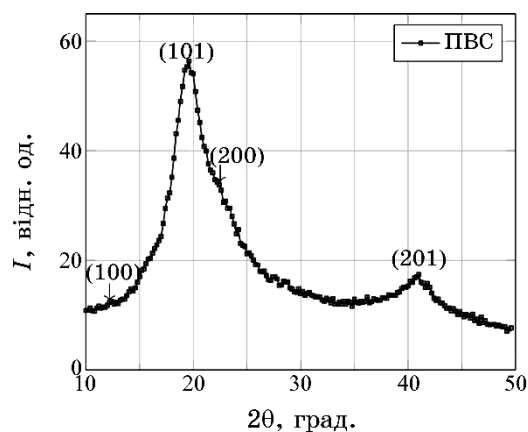


Рис. 2. Ширококутова рентгенограма полівінілового спирту.²

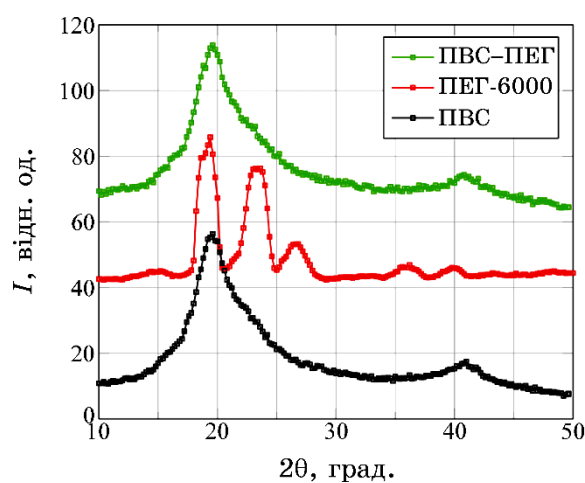


Рис. 3. Ширококутові рентгенівські дифрактограми полівінілового спирту, поліетиленгліколю 6000 та композиту полівініловий спирт-поліетиленгліколь 6000.³

дифракційних піків залишаються незмінними. Це також підтверджується майже ідентичним рівнем кристалічності ПВС та його суміші з поліетиленгліколем 6000. Кристалічність полівінілового спирту та його суміші з поліетиленгліколем 6000 становить приблизно 46% і 47% відповідно. Варто зазначити, що кристалічність самого поліетиленгліколю 6000 дорівнює близько 88%.

Аналіза ширококутових рентгенівських дифрактограм вихідного зразка ПВС-ПЕГ-6000 і зразка, що був опромінений електронами (див. рис. 4), виявила, що опромінення зразка з дозою у

33 кГр приводить до більш вираженого дифракційного піку із $2\theta_m \cong 23,0^\circ$, що відповідає кристалографічним площинам (101).

Крім цього, опромінення зразка ПВС-ПЕГ-6000 швидкими електронами спричиняє збільшення ступеня його кристалічності з 47% до 53%.

Дослідження вихідного порошку TiO_2 методом ширококутової рентгенографії виявили кристалічну структуру анатазу з харак-

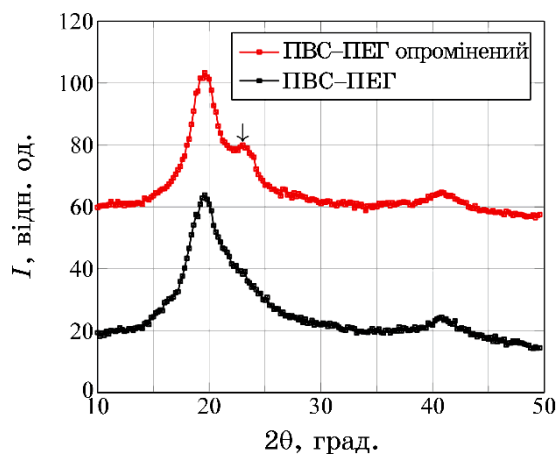


Рис. 4. Ширококутові рентгенівські дифрактограми вихідного зразка полівініловий спирт-поліетиленгліколь 6000 і опроміненого електронами з дозою у 33 кГр.⁴

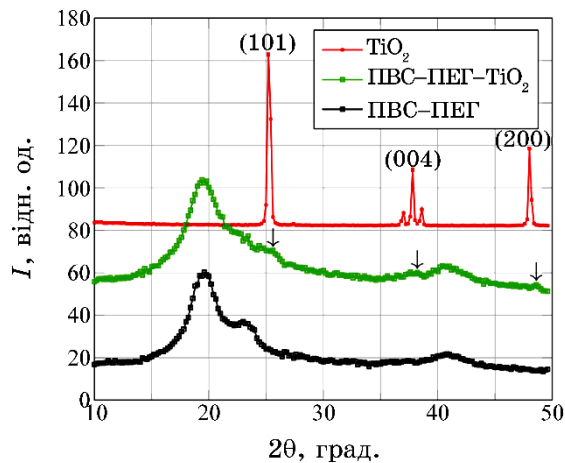


Рис. 5. Ширококутові рентгенівські дифрактограми порошку TiO_2 та зразків опромінених електронами (33 кГр) ПВС-ПЕГ і ПВС-ПЕГ-1% мас. TiO_2 .⁵

терними піками (101), (004) і (200), які спостерігаються на дифрактограмі (рис. 5).

Дифрактограма зразка ПВС–ПЕГ, що містить 1% мас. TiO₂, також показала піки, що відповідають TiO₂. Однак ці піки продемонстрували невеликий зсув кутового положення порівняно з вихідним порошком TiO₂ (на рис. 5 вказано стрілкою). Це свідчить про можливий взаємочин між полімерною матрицею ПВС–ПЕГ і частинками TiO₂.

4.3. Випробування на розрив

Аналіза механічних характеристик гідрогелю дає змогу оцінити міцність матеріалу на розрив та виміряти його подовження до розриву.

На рисунку 6 представлено залежність між напруженням і відносною деформацією для зразків полівінілового спирту з поліетиленгліколем (ПВС–ПЕГ), опромінених електронами, що містять різні концентрації діоксиду Титану.

Результати експерименту дали змогу встановити показники міцності на розрив і максимальне подовження до розриву. Ці значення було внесено в табл.

Результати дослідження свідчать про пониження як міцності на розрив, так і максимального подовження зі збільшенням концентрації TiO₂.

Найбільш ймовірно, що частинки TiO₂ слугують дефектами у полімерній матриці, негативно впливаючи на механічні властивості, аналогічно до порожнин.

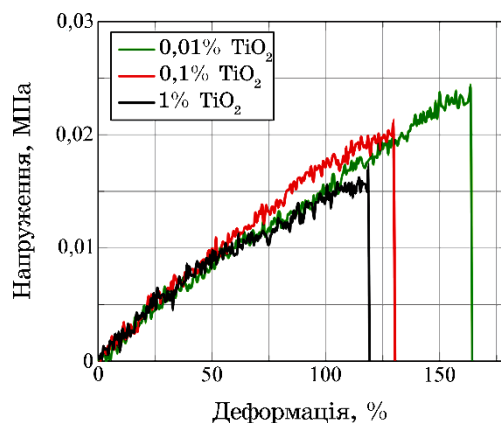


Рис. 6. Криві напруження–деформації для зразків з різними концентраціями TiO₂.⁶

ТАБЛИЦЯ. Значення деформації та механічного напруження для зразків гідрогелю з концентраціями у 0,01%, 0,1%, 1% мас. TiO_2 , опроміненого електронами з дозою у 33 кГр.⁷

0,01% TiO_2	0,1% TiO_2	1% TiO_2
$\cong 164\%$	$\cong 131\%$	$\cong 120\%$
$23,2 \pm 0,5$ кПа	$20,2 \pm 0,4$ кПа	$16,2 \pm 0,5$ кПа

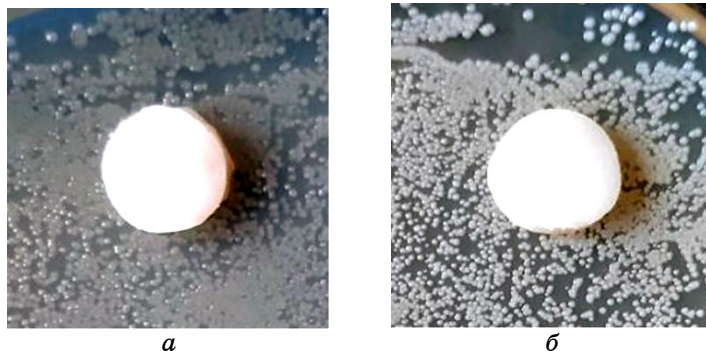


Рис. 7. Дослідження бактерицидної дії зразків із вмістом 1% мас. TiO_2 : а — *Escherichia coli*, б — *Staphylococcus aureus*.⁸

4.4. Бактерицидна дія

Було проведено перевірку антибактеріальних властивостей гідрогелевих композитів ПВС–ПЕГ, що були наповнені частинками оксиду Титану з середнім розміром у 265 нм.

На рисунку 7 зображено гідрогелеві зразки із вмістом 1% мас. TiO_2 , розташовані в чашках Петрі, що були засіяні тестовими культурами *Escherichia coli* і *Staphylococcus aureus*.

Відсутність областей без явного росту бактерій вказує на відсутність антимікробної активності зразків. Це може свідчити про те, що розмір використаних частинок TiO_2 є занадто великим, щоб ефективно пригнічувати ріст мікроорганізмів.

5. ВИСНОВКИ

В результаті проведених досліджень визначено середній діаметр частинок TiO_2 гідрогелевих зразків, який становить 265 нм.

Структурні дослідження зразків показали, що з додаванням діоксиду Титану до полімерної матриці ПВС–ПЕГ спостерігається незначне зміщення кутового положення дифракційних максимумів, які відповідають кристалічній структурі TiO_2 . Це може свід-

чити про взаємочин діоксиду Титану з полімерною матрицею ПВС–ПЕГ.

Дослідження механічних властивостей гідрогелевих матеріалів показали, що зі зростанням концентрації TiO₂ у полімерній матриці відбувається зменшення значень міцності на розрив і видовження до розриву зразків.

Дослідження антибактеріальних властивостей зразка ПВС–ПЕГ–1% мас. TiO₂ показали відсутність бактерицидної дії, що, ймовірно, пов'язане з великим розміром частинок.

ФІНАНСУВАННЯ

Роботу виконано за фінансової підтримки гранту Національного фонду досліджень України «Розробка біополімерних нанокомпонентних матеріалів для стимуляції регенерації живих тканин та загоєння ран» (ідентифікатор заявки 2023.05/0009).

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА–REFERENCES

1. P. D. Stukhlyak, M. M. Mytnyk, and V. O. Orlov, *Materials Science*, **37**, No. 1: 80 (2001); <https://doi.org/10.1023/A:1012338422984>
2. V. Demchenko, N. Rybalchenko, S. Zahorodnia, K. Naumenko, S. Riabov, S. Kobylinskyi, A. Vashchuk, Ye. Mamunya, M. Iurzhenko, O. Demchenko, G. Adamus, and M. Kowalczyk, *ACS Applied Bio Materials*, **5**: 2576 (2022); <https://doi.org/10.1021/acsabm.2c00034>
3. V. Demchenko, Ye. Mamunya, S. Kobylinskyi, S. Riabov, K. Naumenko, S. Zahorodnia, O. Povnitsa, N. Rybalchenko, M. Iurzhenko, G. Adamus, and M. Kowalczyk, *Molecules*, **27**: 3769 (2022); <https://doi.org/10.3390/molecules27123769>
4. N. A. Peppas, P. Bures, W. Leobandung, and H. Ichikawa, *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, **50**, No. 1: 27 (2000); [https://doi.org/10.1016/S0939-6411\(00\)00090-4](https://doi.org/10.1016/S0939-6411(00)00090-4)
5. Vanessa Jones and Joseph E. Grey, *BMJ*, **332**, No. 7544: 777 (2006); <https://doi.org/10.1136/bmj.332.7544.777>
6. Patrick S. Murphy and Gregory R. D. Evans, *Plastic Surgery International*, **2012**: 190436 (2012); <https://doi.org/10.1155/2012/190436>
7. Ted S. Stashak, Ellis Farstvedt, and Ashlee Othic, *Clinical Techniques in Equine Practice*, **3**, No. 2: 148 (2004); <https://doi.org/10.1053/j.ctep.2004.08.006>
8. C. C. DeMerlis and D. R. Schoneker, *Food and Chemical Toxicology*, **41**, No. 3: 319 (2003); [https://doi.org/10.1016/S0278-6915\(02\)00258-2](https://doi.org/10.1016/S0278-6915(02)00258-2)
9. P. D. Stukhlyak and K. M. Moroz, *Materials Science*, **46**, No. 4: 455 (2011); <https://doi.org/10.1007/s11003-011-9312-x>
10. Payam Zarrintaj, Mohammad Reza Saeb, Seyed Hassan Jafari, and Masoud Mozafari, *Compatibilization of Polymer Blends. Micro and Nano Scale Phase Morphologies, Interphase Characterization and Properties* (Elsevier: 2020), Ch. 18, p. 511–537; <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816006-0.00018-9>

11. H. D. Kupianskyi, I. V. Olkhovyk, and V. B. Neimash, *XV Vseukrainska Naukovo-Praktychna Konferentsiya Studentiv, Aspirantiv ta Molodykh Vchenykh 'Teoretychni i Prykladni Problemy Fizyky, Matematyky ta Informatyky'* (Kyiv: VPI VPK 'POLITEKHNKA': 2017), p. 35–38;
<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/20459>
12. J. M. Rosiak, and P. Ulański, *Radiation Physics and Chemistry*, **55**, No. 2: 139 (1999); [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(98\)00319-3](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(98)00319-3)
13. P. Ulański, I. Janik, and J. M. Rosiak, *Radiation Physics and Chemistry*, **52**, No. 1: 289 (1998); [https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(98\)00155-8](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(98)00155-8)
14. V. B. Neimash, H. D. Kupianskyi, I. V. Olkhovyk, V. Yu. Povarchuk, and I. S. Roguts'kyi, *Ukrainian Journal of Physics*, **62**, No. 5: 402 (2018);
<https://doi.org/10.15407/ujpe62.05.0402>
15. T. Verdier, M. Coutand, A. Bertron, and C. Roques, *Coatings*, **4**, No. 3: 670 (2014); <https://doi.org/10.3390/coatings4030670>
16. Sarah Glass, Betsy Trinklein, Bernd Abel, and Agnes Schulze, *Frontiers in Chemistry*, **6**: Article 340 (2018);
<https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00340>

¹National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute',
37, Beresteyskyi Ave., 37,
UA-03056 Kyiv, Ukraine

²E. O. Paton Institute of Electric Welding, N.A.S. of Ukraine,
11, Kazimir Malevich Str.,
UA-03150 Kyiv, Ukraine

³Institute of Chemistry of High Molecular Compounds, N.A.S. of Ukraine,
48 Kharkivske Shose,
UA-02160 Kyiv, Ukraine

⁴Institute of Physics, N.A.S. of Ukraine,
46, Nauky Ave.,
UA-03028 Kyiv, Ukraine

⁵D. K. Zabolotny Institute of Microbiology and Virology, N.A.S. of Ukraine,
154, Academician Zabolotny Str.,
UA-03143 Kyiv, Ukraine

¹ Fig. 1. Dependence of the relative frequency of TiO₂ particles on their diameter.

² Fig. 2. Wide-angle x-ray diffraction pattern of polyvinyl alcohol.

³ Fig. 3. Wide-angle x-ray diffraction patterns of polyvinyl alcohol, polyethylene glycol 6000 and the polyvinyl alcohol–polyethylene glycol 6000 composite.

⁴ Fig. 4. Wide-angle x-ray diffraction patterns of the original sample polyvinyl alcohol–polyethylene glycol 6000 and irradiated with electrons with a dose of 33 kGy.

⁵ Fig. 5. Wide-angle x-ray diffraction patterns of TiO₂ powder and electron-irradiated (33 kGy) samples of PVA–PEG and PVA–PEG–1 wt.% TiO₂.

⁶ Fig. 6. Stress–strain curves for samples with different TiO₂ concentrations.

⁷ TABLE. Values of strain and mechanical stress for hydrogel samples with concentrations of 0.01%, 0.1%, 1% wt. TiO₂ irradiated with electrons with a dose of 33 kGy.

⁸ Fig. 7. Study of the bactericidal action of samples containing 1% wt. TiO₂: *a*—*Escherichia coli*, *b*—*Staphylococcus aureus*.