

П. О. ПИСАРЕНКО

аспірант кафедри біотехнології, шкіри та хутра
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0009-0002-9552-6218

О. А. ОХМАТ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри біотехнології, шкіри та хутра
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0003-0927-8706

ВИКОРИСТАННЯ НАНОЧАСТОК СРІБЛА ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА НАТУРАЛЬНОЇ ШКІРИ З АНТИМІКРОБНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

У статті досліджено перспективи надання натуральній шкірі антимікробних властивостей з використанням сучасних нанотехнологій. Встановлено, що здатність натуральної шкіри адсорбувати вологу та поживні речовини створює сприятливе середовище для росту патогенних мікроорганізмів, що призводить до появи неприємного запаху, знебарвлення та зниження механічної міцності взуття. Особливу увагу приділено медичному аспекту: ризику розвитку інфекцій стопи, мікозів та діабетичних виразок, що зумовлює критичну потребу у створенні взуттєвих матеріалів із пролонгованою захисною дією.

Проаналізовано недоліки традиційних біоцидів, що застосовують при виробництві натуральної шкіри, зокрема їхню високу токсичність для довкілля та жорсткі обмеження з боку міжнародних екологічних директив в частині біобезпечності. Як ефективну альтернативу розглянуто використання біологічно безпечних агентів – наночастинок металів. Основний акцент у роботі зроблено на застосуванні наночастинок срібла (AgNPs) для надання антимікробних властивостей натуральній шкірі для взуття. На основі аналізу літературних джерел досліджена ефективність різних методів обробки наночастиками срібла шкіряних матеріалів з метою надання їм антимікробних властивостей. Оцінено вплив концентрації AgNPs на пружно-пластичні, хімічні та фізико-механічні властивості шкіри. Аргументовано, що додаткова обробка шкіри AgNPs дозволяє досягти високої активності проти широкого спектру бактерій та грибів без зміни просторової структури дерми. Результати роботи мають практичне значення для розробки технологій виробництва взуття спеціального призначення.

Ключові слова: шкіра, біоциди, антимікробні властивості, наночастки срібла, властивості шкіряних матеріалів.

P. O. PYSARENKO

Postgraduate Student at the Department of Biotechnology, Leather and Fur
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0009-0002-9552-6218

O. A. OKHMAT

PhD of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Biotechnology, Leather and Fur
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0000-0003-0927-8706

USE OF SILVER NANOPARTICLES IN THE PRODUCTION OF NATURAL LEATHER WITH ANTIMICROBIAL PROPERTIES

The article investigates the prospects for imparting antimicrobial properties to natural leather using advanced nanotechnologies. It is established that the ability of natural leather to adsorb moisture and nutrients creates a favorable environment for the growth of pathogenic microorganisms, resulting in unpleasant odor, discoloration, and reduced mechanical durability of footwear. Particular attention is given to the medical dimension, namely the risk of foot infections, mycoses, and diabetic ulcers, which underscores the critical need to develop footwear materials with prolonged protective action.

The drawbacks of conventional biocides used in natural leather production are analyzed, including their high environmental toxicity and the stringent restrictions imposed by international environmental directives regarding biosafety. As an effective alternative, the use of biologically safe agents such as metal nanoparticles is considered. The primary focus is on the application of silver nanoparticles (AgNPs) to confer antimicrobial properties on natural leather footwear. Based on a review of the literature, the effectiveness of various AgNP treatment methods for



© П. О. Писаренко, О. А. Охмат, 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

ISSN 2078-4481

leather materials is examined with the aim of imparting antimicrobial activity. The influence of AgNP concentration on the leather's viscoelastic, chemical, and physico-mechanical properties is assessed. It is argued that additional treatment of leather with AgNPs enables high activity against a broad spectrum of bacteria and fungi without altering the spatial structure of the dermis. The findings have practical significance for the development of manufacturing technologies for specialized-purpose footwear.

Key words: leather, biocides, antimicrobial properties, silver nanoparticles, properties of leather materials.

Постановка проблеми

Шкіряна промисловість – промисловий сектор, який відповідає за перероблення побічних продуктів – шкур тварин, отриманих після забою тварин з метою використання у харчовому секторі. Процес виробництва шкіряних матеріалів включає в себе ряд хімічних і механічних обробок, призначених для перетворення парних шкур у готові шкіри [1]. Останнім часом підвищилась увага до ринку натуральних шкіряних матеріалів в результаті зростання світового попиту на шкіряні вироби. Очікується, що світовий ринок шкіри зростатиме з річним темпом приросту (CAGR) у 6,2 % і досягне 708,7 млрд доларів США до 2030 року [2]. У світовій економіці шкіряна промисловість відіграє значну роль.

Найчастіше натуральну шкіру використовують для виготовлення взуття через її довговічність і високі гігієнічні властивості. Однак здатність шкіряних матеріалів поглинати та утримувати вологу та поживні речовини сприяє адсорбції та росту на них потенційно патогенних мікроорганізмів [3–6]. Шкіряні взуттєві вироби зазвичай не очищують після кожного використання, що призводить до накопичення та розмноження мікроорганізмів, і, відповідно, до появи неприємного запаху, знебарвлення виробу, зниження його механічної міцності тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Тісний контакт між шкірою стопи та поверхнею взуття або шкіряної підкладки у взутті, враховуючи процеси потовиділення та механічного тертя в процесі експлуатації взуття, а також намокання взуття без повного його висушування, може призвести до передачі патогенних мікроорганізмів та викликати не тільки дискомфорт у власника, а й серйозні інфекції стопи [7–9]. Інфекції стоп є серйозною медичною проблемою, особливо серед осіб із цукровим діабетом, захворюваннями периферичних артерій, мікозом стопи. Вказані інфекції часто призводять до грибкових інфекцій нігтів стопи, утворення на стопі людини діабетичних виразок і навіть до некротизації кінцівок [10–11, 13–14]. Необхідно зазначити, що захворюваність на діабет у всьому світі швидко зростає, і очікується, що вона збільшиться з приблизно 280 мільйонів дорослих сьогодні до понад 400 мільйонів дорослих до 2030 року. За прогнозами близько 15–25 % людей з діабетом страждатимуть на діабетичну виразку стопи [12].

Добре відомо, що взуття може бути фактором, який сприяє розвитку інфекцій стоп. Експлуатація взуття може спричинити травми шкіри стопи та забезпечує мікросередовище, що підходить для розмноження мікроорганізмів. До прикладу, використання ортопедичного взуття може спричинити розвиток гіпергідрозу, неприємного запаху ніг, а іноді й печіння при ходьбі. Це може призвести до ураження у підошовній зоні стопи та інфекції у роговому шарі бактеріями *Micrococcus* та *Corynebacterium*. Вказані бактерії сприяють серйозним травмам шкіри та кератолізу через вироблення протеїназ та сполук сірки [15]. У зв'язку з цим постає потреба не лише у терапевтичних, а й у профілактичних рішеннях, зокрема шляхом удосконалення шкіряних матеріалів для взуття з антимікробними властивостями.

У науковій літературі широко досліджуються антимікробні обробки шкіряних матеріалів з використанням різних агентів – біоцидів. Разом із тим традиційні біоциди, що застосовують у шкіряній промисловості, часто чинять токсичний вплив на людину та/або довкілля, а їх використання обмежується нормативними вимогами. У зв'язку з цим останніми роками спостерігається активний пошук альтернативних біологічно безпечних технологій, заснованих на використанні хітозану та його похідних, полімерних сполук із четвертинним амонієм, а також наночасток срібла, міді, оксиду цинку, магнію та титану. Перелічені речовини проявляють антибактеріальну та протигрибкову активність переважно через руйнування клітинних мембран мікроорганізмів. Особливу увагу привертають наночастки срібла (AgNPs), які демонструють високу ефективність проти широкого спектра бактерій і грибків. У ряді досліджень показано, що модифікація шкіри AgNPs значно покращує її антимікробні властивості, а також може забезпечувати додаткові функції, такі як УФ-захист та стабільність кольору. Водночас зростає інтерес до біологічних методів синтезу наночасток, які є менш токсичними та більш сталими.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження – обґрунтувати доцільність застосування наночасток срібла для обробки натуральної шкіри, проаналізувавши їхню ефективність проти патогенних мікроорганізмів, та дослідити вплив такої обробки на фізико-механічні й експлуатаційні характеристики взуттєвих матеріалів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для надання натуральній шкірі та виробам з неї антимікробних властивостей можуть застосовувати різноманітні біоциди та методи обробки ними. Але слід зауважити, що сама технологія виробництва шкіри передбачає

використання низки хімічних матеріалів різної природи, які можуть надавати шкіряним матеріалам певного рівня антимікробних властивостей. До цих матеріалів відносять сульфіді, дубильні сполуки хрому, синтетичні дубителі, катіонні поверхнево-активні речовини, синтетичні барвники тощо. Але використання вказаних матеріалів обумовлене необхідністю створення у шкіряних матеріалів комплексу властивостей, обумовлених нормативною документацією. Для створення ж необхідного рівня антимікробних властивостей шкіряних матеріалів та виробів з них мають застосовуватись біоциди.

Біоциди, застосовувані в шкіряній промисловості, відносять до [16, 17]:

– протигрибкових засобів на основі бета-нафтолу, бензотіазолу та похідних сульфонів. Засоби використовують для обробки дубленого напівфабрикату та/або готової шкіри;

– антибактеріальних засобів на основі органічних сполук сірки. Засоби використовують для обробки парних шкур.

Недоліком вказаних біоцидів є певна токсичність для людини та навколишнього середовища, а їх використання обмежене діючими директивами.

В останні роки нанотехнології стали передовою галуззю в антимікробних дослідженнях, пропонуючи інноваційні рішення для даних проблем. Нові розробки в галузі наноматеріалів залучили вчених до створення матеріалів із антимікробними властивостями [18]. Наприклад, наночастки оксиду магнію (MgO NPs) є перспективною альтернативою традиційним біоцидам завдяки високій антибактеріальній активності, нетоксичності, біосумісності, великому співвідношенню площі поверхні до об'єму, здатності блокувати УФ-випромінювання та фотокаталітичній активності [19–21]. Окрім цього MgO NPs мають високий рівень інгібування проти численних грампозитивних і грамнегативних мікроорганізмів [22]. Але слід зауважити, що найбільший інтерес все ж таки викликають у технологів-шкіряників наночастки срібла. Зацікавленість у використанні AgNPs обумовлюється також і можливістю використання методу біосинтезу наночасток, що дозволяє спростити технології їх виробництва та зробити їх екологічно безпечними. Останнє не призведе до збільшення навантаження на навколишнє середовище шкіряного виробництва.

Так, дослідниками було синтезовано нанокомпозити Ag-сополімеру шляхом біовідновлення Ag^+ до Ag^0 з використанням водних екстрактів кореня *Nardostachys jatamansi* [23]. Готова шкіра після обробки вказаними нанокомпозитами виявила протигрибкові властивості проти багатьох патогенів, включаючи *T. mentagrophyte*, *A. flavus*, *A. niger*, *C. albicans*, *A. terreus*, *Fusarium sp*, *Alternaria solani*, *Rhizopus sp* та *A. fumigatus*. При обробці шкіряних матеріалів AgNPs, синтезованими за умови використання екстракту листя *Piper betle L.*, досягнуто не тільки високих антимікробних властивостей проти *E. coli* та *S. aureus*, але й протигрибкової ефективності проти *C. albicans* та *A. niger* [24].

Слід зауважити, що властивості, які AgNPs можуть надати шкіряним матеріалам, не обмежуються лише антимікробними. Наприклад, одночасне нанесення AgNPs та цитрату натрію на поверхню шкіри не тільки сприяло підвищенню її антимікробних властивостей проти п'яти патогенних штамів, але створило на шкіряному матеріалі певний рівень захисту від УФ-випромінювання та високу світлостійкість [8].

Варто однак зазначити, що однією з основних проблем при використанні AgNPs у шкіряній промисловості є їхня стабілізація на поверхні шкіри, оскільки AgNPs можуть втратити свою антимікробну активність з часом. Отже, постає питання стабілізації наночасток. Один із прикладів такої стабілізації передбачає обробку шкіряного матеріалу, отриманого з крупної сировини великої рогатої худоби, нанокомпозитом SiO_2-Ag [25], що дозволяє знизити активність *S. aureus* на 99 % через 24 години після обробки.

Слід також зауважити, що дослідники відмічають незмінність структури, а також комплексу хімічних, фізичних, механічних та гігієнічних властивостей шкіряних матеріалів після їх обробки AgNPs. Тобто, як показано в дослідженні [24], процес антимікробної обробки AgNPs не призвів до зміни структури дерми шкіри, а зв'язування з активними групами відбулось за рахунок фізичних зв'язків. Для оцінки кількості срібла, що містила оброблена AgNPs натуральна шкіра після обробки, був проведений аналіз AAS, який показав загальний вміст срібла у шкірі на рівні 380 мг/кг.

Ґрунтовні дослідження проведені щодо визначення вмісту срібла у шкірі, на поверхню якої методом розпилювання нанесено AgNPs різної концентрації. Результати ICP-AES показали, що вміст срібла в шкірі не пропорційний концентрації використовуваних AgNPs (табл. 1) [26].

Результати дослідження також виявили зменшення м'якості шкіри при збільшенні концентрації AgNPs (табл. 2). Дослідники також зауважували про відсутність рівномірного розподілу AgNPs на поверхні шкіри та їх рівномірної дифузії у структуру дерми.

Обробка готової шкіри AgNPs також може призвести до зміни кольору та зменшенню його яскравості. Аналіз мікрофотографій поверхні шкіри показує наявність в ній наночасток, слабо прикріплених до її поверхні [27, 28]. Дослідження також показують, що обробка AgNPs не впливає на основні фізико-механічні властивості шкіряних матеріалів.

Таблиця 1

Залежність вмісту срібла у шкірі від концентрації AgNPs, використаних для оброблення матеріалу методом розпилювання

Концентрація AgNPs, %	Концентрація розчину AgNPs, використаного для обробки, мг/мл	Вміст срібла у шкірі, мг/см ²
0	0	0,006
0,0025	0,0015	1,260
0,005	0,003	2,810
0,05	0,03	2,840
0,25	0,15	2,300

Таблиця 2

Залежність м'якості шкіри від концентрації AgNPs, використаних для оброблення матеріалу методом розпилювання

Концентрація AgNPs, %	М'якість, одиниці текстурометра
0	4,05
0,0025	4,00
0,005	3,90
0,05	3,60
0,25	3,20

Концентрація використовуваних для обробки шкіри розчинів AgNPs впливає і на рівень її антимікробних властивостей, але збільшення цього рівня не завжди залежить від підвищення концентрації AgNPs. Окрім цього, обробка шкіри AgNPs показує більш високу ефективність проти грамнегативних, ніж проти грампозитивних бактерій [29, 30]. Шляхом обробки шкіряного напівфабрикату у розчині, що містить AgNPs, можна досягти підвищення антимікробних властивостей шкіри проти бактерій (*E. coli* та *S. aureus*) та грибків (*C. albicans* та *A. niger*). AgNPs при цьому швидко дифундують у дерму шкіряного напівфабрикату, рівномірно розподіляються між структурними елементами і, відповідно, надають вищих антимікробних властивостей матеріалу ніж AgNPs, розпилені у тій же концентрації на такий же шкіряний матеріал.

Висновки

Натуральна шкіра є сприятливим середовищем для розмноження мікроорганізмів, що потребує обов'язкової антимікробної обробки, особливо для взуття людей з груп ризику (наприклад, хворих на цукровий діабет).

Відмова або обмеження використання традиційних біоцидних засобів спонукає до пошуку альтернативних матеріалів для антимікробної обробки шкіряних матеріалів. Використання AgNPs є перспективною альтернативою завдяки їхній біосумісності, низькій токсичності, високій ефективності проти широкого спектра бактерій та грибків.

Використання AgNPs у технології виробництва шкіри не потребує переоснащення шкіряного виробництва, а створення антимікробних властивостей можливе при нанесенні AgNPs на шкіряні матеріали методом розпилювання або при обробці в робочому розчині. Слід однак зауважити, що метод обробки шкіряного напівфабрикату в розчині є ефективнішим за розпилення, оскільки забезпечує глибшу дифузію та рівномірний розподіл AgNPs у структурі дерми.

Антимікробна обробка AgNPs не призводить до суттєвих змін фізико-механічних властивостей та структури дерми, проте високі концентрації наночастинок можуть впливати на колір і м'якість готової шкіри.

Список використаної літератури

- Maina P., Ollengo M. A., Nthiga E. W. Trends in Leather Processing: A Review. *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2019. Vol. 9, no. 12. P. 9626.
- Akter M., Tajuddin Sikder M., Mostafizur Rahman M., Atique Ullah A., Fatima Binte Hossain K., Banik S., Hosokawa T., Saito T., Kurasaki M. A Systematic Review on Silver Nanoparticles-Induced Cytotoxicity. *Physicochemical Properties and Perspectives*. *J. Adv. Res.* 2018. Vol. 9. P. 1–16.
- Liu G., Haiqi G., Li K., Xiang J., Lan T., Zhang Z. Fabrication of silver nanoparticle sponge leather with durable antibacterial property. *J. Colloid Interface Sci.* 2018. Vol. 514. P. 338–348.
- Lkhagvajav N., Koizhaiganova M., Yasa I., Celik E., Sari O. Characterization and antimicrobial performance of nano silver coatings on leather materials. *Braz. J. Microbiol.* 2015. Vol. 46. P. 41–48.
- Sportelli M.C., Picca R.A., Paladini F., Mangone A., Giannossa L.C., Di Franco C., Gallo A.L., Valentini A., Sannino A., Pollini M. Spectroscopic characterization and nanosafety of Ag-modified antibacterial leather and leatherette. *Nanomaterials*. 2017. Vol. 7. 203.

6. Abou Elmaaty T., Sayed-Ahmed K., Mohamed Ali R., El-Khodary K., Abdeldayem S.A. Simultaneous sonochemical coloration and antibacterial functionalization of leather with selenium nanoparticles (SeNPs). *Polymers*. 2022. Vol. 14. 74.
7. Velmurugan P., Lee S.-M., Cho M., Park J.-H., Seo S.-K., Myung H., Bang K.-S., Oh B.-T. Antibacterial activity of silver nanoparticle-coated fabric and leather against odor and skin infection causing bacteria. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2014. Vol. 98. P. 8179–8189.
8. Elsayed H., Hasanin M., Rehan M. Enhancement of multifunctional properties of leather surface decorated with silver nanoparticles (Ag NPs). *J. Mol. Struct.* 2021. Vol. 1234, 130.
9. Xiang J., Ma L., Su H., Xiong J., Li K., Xia Q., Liu G. Layer-by-layer assembly of antibacterial composite coating for leather with cross-link enhanced durability against laundry and abrasion. *Appl. Surf. Sci.* 2018. Vol. 458. P. 978–987.
10. Adams Jr C. A., Deitch E. A. Diabetic foot infections. In *Surgical Treatment: Evidence-Based and Problem-Oriented. Zuckschwerdt*. 2001. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK6985/>
11. Uckay I., Gariani K., Pataky Z., Lipsky B. A. Diabetic foot infections: state-of-the-art. *Diabetes, Obesity and Metabolism*. 2014. Vol.16, no. 4, P. 305-316;
12. Shaw J. E., Sicree R. A., Zimmet P. Z. Global estimates of the prevalence of diabetes for 2010 and 2030. *Diabetes research and clinical practice*. 2010. Vol. 87, no. 1, P. 4-14;
13. Chatzistergos P. E., Naemi R., Chockalingam N. A method for subject-specific modelling and optimisation of the cushioning properties of insole materials used in diabetic footwear. *Medical engineering and physics*. 2015. Vol. 37, no. 6. P. 531-538.
14. Boyko E. J., Ahroni J. H., Stensel V., Forsberg R. C., Davignon D. R., Smith D. G. A prospective study of risk factors for diabetic foot ulcer. The Seattle Diabetic Foot Study. *Diabetes care*. 1999. Vol. 22, no. 7. P. 1036-1042.
15. Fernandez-Crehuet P., Ruiz-Villaverde R. Pitted keratolysis: an infective cause of foot odour. *CMAJ*. 2015. Vol. 187, no. 7. P. 519-519.
16. Alexander K.T.W. Preservation Using Bioicide Ice. *XXII Congress IULTCS 1*. 1993. 122 p.
17. Heidemann E. Preservation and Beamhouse. *XXII Congress IULTCS 2*. 1993. 570 p.
18. X. Su, R. Wang, X. Li, S. Araby, H.-C. Kuan, M. Naeem, J. Ma. A comparative study of polymer nanocomposites containing multi-walled carbon nanotubes and graphene nanoplatelets. *Nano Materials Science*. 2022. Vol. 4, no. 3. P. 185–204.
19. R.T. De Silva, M.G.P.G. Mantilaka, S.P. Ratnayake, G.A.J. Amaratunga, K.M.N. de Silva. Nano-MgO reinforced chitosan nanocomposites for high performance packaging applications with improved mechanical, thermal and barrier properties. *Carbohydr. Polym.* 2017. Vol. 157. P. 739–747.
20. M. Amina, N.M. Al Musayeib, G.A. Al-Hamoud, A. Al-Dbass, A. El-Ansary, M.A. Ali. Prospective of biosynthesized *L.sativum* oil/PEG/Ag-MgO bionanocomposite film for its antibacterial and anticancer potential. *Saudi J. Biol. Sci.* 2021. Vol. 28, no. 10, P. 5971–5985.
21. X. Zhu, D. Wu, W. Wang, F. Tan, P.K. Wong, X. Wang, X. Qiu, X. Qiao, Highly effective antibacterial activity and synergistic effect of Ag-MgO nanocomposite against *Escherichia coli*. *J. Alloys Compd.* 2016. Vol. 684, P. 282–290;
22. Y. Ding, W. Yu, J. Zhang, W. Liu, F. Zhu, Y. Ye, Q. Zheng, Enhanced antibacterial properties of poly(butylene succinate-co-terephthalate)/AgMgO nanocomposite films for food packaging. *Polym. Test.* 2023. Vol. 128. 1082;.
23. Priya S., Murali A., Preeth D. R., Dharanibalaji K. C., Jeyajothi G. Green Synthesis of Silver Nanoparticle-Embedded Poly(Methyl Methacrylate-Co-Methacrylic Acid) Copolymer for Fungal-Free Leathers. *Polym. Bull.* 2022. Vol. 79. P. 4607–4626.
24. Nguyen N. T., Vu T. H., Bui V. H. Antibacterial and Antifungal Fabrication of Natural Lining Leather Using Bio-Synthesized Silver Nanoparticles from Piper Betle L. Leaf Extract. *Polymers*. 2023. Vol. 15, no.12, P. 2634.
25. Marques G. N., Reis R. Y. N., Ribeiro L. K., Simoes L. G. P., Minozzi D. T., Andres J., Assis M., Mascaro L. H., Longo E. Antiviral Leather: A Functional Coating Based on SiO₂-AgNPs to Eliminate Pathogens. *J. Environ. Chem. Eng.* 2023. Vol. 11, no. 5. 110919.
26. Maldonado-Vega M., Guzman D., Camarena-Pozos D. A., Castellanos-Arevalo A. P., Salinas Ramirez A., Garibo D., Garcia-Garcia M. R., Pestryakov A., Bogdanchikova N. Application of silver nanoparticles to reduce bacterial growth on leather for footwear manufacturing. *Journal of Applied Research and Technology*. 2021. Vol. 19. P. 41–48.
27. Nguyen N. T., Vo T. L. H. Fabrication of Silver Nanoparticles Using Cordyline fruticosa L. Leave Extract Endowing Silk Fibroin Modified Viscose Fabric with Durable Antibacterial Property. *Polymers*. 2022. Vol. 14. P. 2409.
28. Shaheen T.I., Abd El Aty A. A. *In situ* green myco-synthesis of silver nanoparticles onto cotton fabrics for broad spectrum antimicrobial activity. *Int. J. Biol. Macromol.* 2018. Vol. 118. P. 2121–2130.
29. Vu T.H., Bui V.H., Nguyen N.T. Antibacterial Properties of Silver Nanoparticles Synthesized Using Piper betle L. Leaf Extract. *Mater. Sci. Forum*. 2021. Vol. 1020. P. 236–242.
30. Zhang X., Wang W., Yu D. Synthesis of waterborne polyurethane–silver nanoparticle antibacterial coating for synthetic leather. *J. Coat. Technol. Res.* 2018. Vol. 15. P. 415–423.

References

1. Maina, P., Ollengo, M. A., & Nthiga, E. W. (2019). Trends in leather processing: A review. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 9(12), 9626. DOI:10.29322/IJSRP.9.12.2019.p9626;
2. Akter, M., Sikder, M. T., Rahman, M. M., Ullah, A. A., Hossain, K. F. B., Banik, S., Hosokawa, T., Saito, T., & Kurasaki, M. (2018). A systematic review on silver nanoparticles-induced cytotoxicity: Physicochemical properties and perspectives. *Journal of Advanced Research*, 9, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2017.10.008>;
3. Liu, G., Guo, H., Li, K., Xiang, J., Lan, T., & Zhang, Z. (2018). Fabrication of silver nanoparticle sponge leather with durable antibacterial property. *Journal of Colloid and Interface Science*, 514, 338–348. DOI: 10.1016/j.jcis.2017.09.049;
4. Lkhagvajav, N., Koizhaiganova, M., Yasa, I., Celik, E., & Sari, O. (2015). Characterization and antimicrobial performance of nano silver coatings on leather materials. *Brazilian Journal of Microbiology*, 46, 41–48. DOI:10.1590/S1517-838220130446;
5. Sportelli, M. C., Picca, R. A., Paladini, F., Mangone, A., Giannossa, L. C., Di Franco, C., Gallo, A. L., Valentini, A., Sannino, A., & Pollini, M. (2017). Spectroscopic characterization and nanosafety of Ag-modified antibacterial leather and leatherette. *Nanomaterials*, 7, 203. DOI: 10.3390/nano7080203;
6. Abou Elmaaty, T., Sayed-Ahmed, K., Mohamed Ali, R., El-Khodary, K., & Abdeldayem, S. A. (2022). Simultaneous sonochemical coloration and antibacterial functionalization of leather with selenium nanoparticles (SeNPs). *Polymers*, 14, 74. DOI:10.3390/polym14010074;
7. Velmurugan, P., Lee, S.-M., Cho, M., Park, J.-H., Seo, S.-K., Myung, H., Bang, K.-S., & Oh, B.-T. (2014). Antibacterial activity of silver nanoparticle-coated fabric and leather against odor and skin infection causing bacteria. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98, 8179–8189. DOI: 10.1007/s00253-014-5945-7;
8. Elsayed, H., Hasanin, M., & Rehan, M. (2021). Enhancement of multifunctional properties of leather surface decorated with silver nanoparticles (Ag NPs). *Journal of Molecular Structure*, 1234, 130. DOI:10.1016/j.molstruc.2021.130130;
9. Xiang, J., Ma, L., Su, H., Xiong, J., Li, K., Xia, Q., & Liu, G. (2018). Layer-by-layer assembly of antibacterial composite coating for leather with cross-link enhanced durability against laundry and abrasion. *Applied Surface Science*, 458, 978–987. DOI:10.1016/j.apsusc.2018.07.165;
10. Adams, C. A., Jr., & Deitch, E. A. (2001). Diabetic foot infections. In *Surgical Treatment: Evidence-Based and Problem-Oriented*. Zuckschwerdt. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK6985/>
11. Uckay, I., Gariani, K., Pataky, Z., & Lipsky, B. A. (2014). Diabetic foot infections: State-of-the-art. *Diabetes, Obesity and Metabolism*, 16(4), 305–316. DOI: 10.1111/dom.12190;
12. Shaw, J. E., Sicree, R. A., & Zimmet, P. Z. (2010). Global estimates of the prevalence of diabetes for 2010 and 2030. *Diabetes Research and Clinical Practice*, 87(1), 4–14. DOI: 10.1016/j.diabres.2009.10.007;
13. Chatzistergos, P. E., Naemi, R., & Chockalingam, N. (2015). A method for subject-specific modelling and optimisation of the cushioning properties of insole materials used in diabetic footwear. *Medical Engineering & Physics*, 37(6), 531–538. DOI: 10.1016/j.medengphy.2015.03.009;
14. Boyko, E. J., Ahroni, J. H., Stensel, V., Forsberg, R. C., Davignon, D. R., & Smith, D. G. (1999). A prospective study of risk factors for diabetic foot ulcer: The Seattle Diabetic Foot Study. *Diabetes Care*, 22(7), 1036–1042. DOI: 10.2337/diacare.22.7.1036;
15. Fernandez-Crehuet, P., & Ruiz-Villaverde, R. (2015). Pitted keratolysis: An infective cause of foot odour. *CMAJ*, 187(7), 519. DOI: 10.1503/cmaj.140809;
16. Alexander, K. T. W. (1993). Preservation using bioicide ice. In *Proceedings of the XXII Congress of IULTCS* (p. 122).
17. Heidemann, E. (1993). Preservation and beamhouse. In *Proceedings of the XXII Congress of IULTCS* (p. 570).
18. Su, X., Wang, R., Li, X., Araby, S., Kuan, H.-C., Naeem, M., & Ma, J. (2022). A comparative study of polymer nanocomposites containing multi-walled carbon nanotubes and graphene nanoplatelets. *Nano Materials Science*, 4(3), 185–204. DOI:10.1016/j.nanoms.2021.08.003;
19. De Silva, R. T., Mantilaka, M. G. P. G., Ratnayake, S. P., Amaratunga, G. A. J., & De Silva, K. M. N. (2017). Nano-MgO reinforced chitosan nanocomposites for high performance packaging applications with improved mechanical, thermal and barrier properties. *Carbohydrate Polymers*, 157, 739–747. DOI:10.1016/j.carbpol.2016.10.038;
20. Amina, M., Al Musayeb, N. M., Al-Hamoud, G. A., Al-Dbass, A., El-Ansary, A., & Ali, M. A. (2021). Prospective of biosynthesized *L. sativum* oil/PEG/Ag-MgO bionanocomposite film for its antibacterial and anticancer potential. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(10), 5971–5985. DOI: 10.1016/j.sjbs.2021.06.052;
21. Zhu, X., Wu, D., Wang, W., Tan, F., Wong, P. K., Wang, X., Qiu, X., & Qiao, X. (2016). Highly effective antibacterial activity and synergistic effect of Ag-MgO nanocomposite against *Escherichia coli*. *Journal of Alloys and Compounds*, 684, 282–290. DOI:10.1016/j.jallcom.2016.05.179;
22. Ding, Y., Yu, W., Zhang, J., Liu, W., Zhu, F., Ye, Y., & Zheng, Q. (2023). Enhanced antibacterial properties of poly(butylene succinate-co-terephthalate)/Ag@MgO nanocomposite films for food packaging. *Polymer Testing*, 128, 1082. DOI:10.1016/j.fpsl.2022.101004;

23. Priya, S., Murali, A., Preeth, D. R., Dharanibalaji, K. C., & Jeyajothi, G. (2022). Green synthesis of silver nanoparticle-embedded poly(methyl methacrylate-co-methacrylic acid) copolymer for fungal-free leathers. *Polymer Bulletin*, 79, 4607–4626. DOI:10.1007/s00289-021-03714-w;
24. Nguyen, N. T., Vu, T. H., & Bui, V. H. (2023). Antibacterial and antifungal fabrication of natural lining leather using bio-synthesized silver nanoparticles from *Piper betle* L. leaf extract. *Polymers*, 15(12), 2634. DOI:10.3390/polym15122634;
25. Marques, G. N., Reis, R. Y. N., Ribeiro, L. K., Simoes, L. G. P., Minozzi, D. T., Andres, J., Assis, M., Mascaro, L. H., & Longo, E. (2023). Antiviral leather: A functional coating based on SiO₂-AgNPs to eliminate pathogens. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(5), 110919. DOI:10.1016/j.jece.2023.110919;
26. Maldonado-Vega, M., Guzman, D., Camarena-Pozos, D. A., Castellanos-Arevalo, A. P., Salinas Ramirez, A., Garibo, D., Garcia-Garcia, M. R., Pestryakov, A., & Bogdanchikova, N. (2021). Application of silver nanoparticles to reduce bacterial growth on leather for footwear manufacturing. *Journal of Applied Research and Technology*, 19, 41–48. DOI:10.22201/icat.24486736e.2021.19.1.1491;
27. Nguyen, N. T., & Vo, T. L. H. (2022). Fabrication of silver nanoparticles using *Cordyline fruticosa* L. leaf extract endowing silk fibroin modified viscose fabric with durable antibacterial property. *Polymers*, 14, 2409. DOI:10.3390/polym14122409;
28. Shaheen, T. I., & Abd El Aty, A. A. (2018). In situ green myco-synthesis of silver nanoparticles onto cotton fabrics for broad spectrum antimicrobial activity. *International Journal of Biological Macromolecules*, 118, 2121–2130. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2018.07.062;
29. Vu, T. H., Bui, V. H., & Nguyen, N. T. (2021). Antibacterial properties of silver nanoparticles synthesized using *Piper betle* L. leaf extract. *Materials Science Forum*, 1020, 236–242. DOI:10.4028/www.scientific.net/MSF.1020.236;
30. Zhang, X., Wang, W., & Yu, D. (2018). Synthesis of waterborne polyurethane–silver nanoparticle antibacterial coating for synthetic leather. *Journal of Coatings Technology and Research*, 15, 415–423. DOI:10.1007/s11998-017-9997-3.

Дата першого надходження статті до видання: 13.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 07.05.2026