ХИМИЯ ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И ПОЛИМЕРЫ

Статья поступила в редакцию: 08.10.2026
Статья принята к публикации: 22.10.2026
Статья опубликована: 07.11.2026

УДК 675.026:539.26:620.18

DOI: 10.32743/UniChem.2026.149.11.23604

Влияние коллагенсодержащей огнезащитной композиции на морфологию и рентгенодифракционные характеристики натуральной кожи

Исламова Дилфуза Азим кизи
ассистент кафедры точных и естественных наук
Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: dilfuza.fayzullayeva@mail.ru
Хакимова Мукаддас Шамурадовна
PhD, доц.
кафедры точных и естественных наук Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: muna_1984@mail.ru
Кодиров ШахобиддинУрал угли
ассистент кафедры натуральных волокон и технологии обработки тканей
Джизакский политехнический институт
Республика Узбекистан, г. Джизак
E-mail: qodirovshaxobiddin223@gmail.com
Рафиков Адхам Салимович
д-р хим. наук, проф.
кафедры точных и естественных наук, Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: asrafikov@mail.ru
Мирзаев Нодир Бахадирович
DSc, проф.
кафедры кожевенного и обувного производства Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: nbmirzaev@mail.ru

Библиографическое описание: Влияние коллагенсодержащей огнезащитной композиции на морфологию и рентгенодифракционные характеристики натуральной кожи // Universum: химия и биология : электрон. научн. журн. Исламова Д.А. кизи [и др.]. 2026. 11(149). URL: https://7universum.com/ru/nature/archive/item/23604

Effect of a collagen-based flame-retardant formulation on the morphology and X-ray diffraction characteristics of natural leather

Islamova Dilfuza Azim qizi
Assistant
Department of Exact and Natural Sciences Tashkent Institute of Textile and Light Industry
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Khakimova Muqaddas Shamuradovna
PhD, Associate Professor
Department of Exact and Natural Sciences Tashkent Institute of Textile and Light Industry
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Qodirov Shahobiddin Ural o‘g‘li
Assistant
Department of Natural Fibers and Textile Processing Technology Jizzakh Polytechnic Institute
Republic of Uzbekistan, Jizzakh
Rafikov Adham Salimovich
doctor of Chemical Sciences, Professor
Department of Exact and Natural Sciences Tashkent Institute of Textile and Light Industry
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Mirzaev Nodir Bakhadirovich
DSc, Professor
Department of Leather and Footwear Production Tashkent Institute of Textile and Light Industry
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

В работе исследовано влияние огнезащитной обработки на морфологические и структурные свойства спилка и натуральной кожи. Для оценки изменений поверхности и структурного состояния коллагеновой матрицы применены методы сканирующей электронной микроскопии (SEM-EDX) и рентгенодифракционного анализа (XRD). СЭМ-исследование показало, что исходная кожа отличается выраженной волокнистой структурой, сформированной пучками коллагеновых волокон. После огнезащитной обработки с помощью композиции на основе коллагена с добавлением карбамида, полиакриламида и борной кислоты обнаруживаются изменения морфологии поверхности, связанные с формированием защитного слоя и воздействием компонентов огнезащитной композиции на коллагеновую матрицу. Согласно данным XRD, как необработанные, так и обработанные образцы сохраняют преимущественно низкую степень структурной упорядоченности с характерным широким диффузным максимумом в области $2\theta \approx 21–23°$. При этом после обработки отмечаются снижение интенсивности и некоторое уширение основного дифракционного максимума. При этом новых выраженных пиков не выявлено. Полученные результаты свидетельствуют о том, что огнезащитная обработка оказывает влияние на морфологическое состояние поверхности и степень упорядоченности коллагеновой матрицы, не вызывая существенного разрушения её исходной структуры.

Abstract

This study investigates the effect of flame-retardant treatment on the morphological and structural properties of split leather and natural leather. Scanning electron microscopy (SEM-EDX) and X-ray diffraction (XRD) were employed to evaluate changes in the surface morphology and structural state of the collagen matrix. SEM analysis showed that untreated leather exhibits a

pronounced fibrous structure formed by bundles of collagen fibers. After flame-retardant treatment, changes in surface morphology were observed, associated with the formation of a protective layer and the interaction of the flame-retardant components with the collagen matrix. According to the XRD results, both untreated and treated samples retain a predominantly low degree of structural order, with a characteristic diffuse maximum in the 2θ range of approximately 21–23°. After treatment, a decrease in the intensity and a slight broadening of the main diffraction maximum were observed, while no new distinct peaks were detected. These results indicate that flame-retardant treatment primarily affects the surface morphology and the degree of structural ordering of the collagen matrix without causing significant disruption of its original structure.

Ключевые слова: натуральная кожа, кожевенный спилок, коллагенсодержащая композиция, огнезащитная обработка, сканирующая электронная микроскопия, рентгенодифракционный анализ.

Keywords: natural leather, leather split, collagen-containing composition, flame-retardant treatment, scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD).

1 Введение

Натуральная кожа представляет собой многоуровневую волокнистую структуру, основным компонентом которой является коллаген. Пространственная организация коллагеновых фибрилл и волокон определяет механические, термические и эксплуатационные свойства кожи [1, 2]. Для повышения огнестойкости натуральной кожи применяются фосфор-, азотсодержащие, минеральные и органо-неорганические огнезащитные системы [3, 4, 5]. Одним из ранних подходов было использование фосфорсодержащих соединений, в частности, Пироватекс CP [6, 7, 8]. Для улучшения огнестойкости кожи в процессе дубления были добавлены фосфорный антипирен (PFR), азотно-фосфорный вспучивающийся антипирен (NPIFR) и азотно-фосфорный антипирен (NPFR). При этом максимальное значение предельного кислородного индекса увеличивалось с 29,3 до 31,4 % [9].

Помимо фосфор- и азотсодержащих антипиренов, для повышения огнестойкости кожи также применяли минеральные добавки, в частности натриевый монтмориллонит [10]. СЭМ-анализ показал распределение частиц монтмориллонита в межволоконном пространстве коллагеновой матрицы. Минеральная фаза способствует образованию физического барьера, ограничивающего перенос тепла и продуктов термического разложения [10]. Другим перспективным направлением является создание нанокомпозитных огнезащитных систем на основе вспучивающейся антипирена (IFR) [11]. Также исследовано вспучивающиеся композиции на основе меламина и полифосфатов, вводимые непосредственно в процесс производства кожи. Обработка позволила снизить пиковую скорость тепловыделения на 14 % и общее дымообразование примерно на 20 % по сравнению с необработанной кожей [12]. Современные обзоры показывают, что огнезащитные системы для кожи можно условно разделить на органические, неорганические и органо-неорганические [13,14,15]. Особый интерес представляют гибридные композиты, поскольку сочетание нескольких механизмов позволяет одновременно повысить огнестойкость и сохранить эксплуатационные свойства кожевенного материала [16, 17]. При действии огня борная кислота образует достаточно

прочную оксидную пленку, препятствующей горению и распространению огня, карбамид разлагается с образованием газообразного азота, который создает барьер для кислорода воздуха [18, 19]. Ранее нами была получена огнезащитная композиция на основе коллагенсодержащего раствора, включающего борную кислоту, карбамид и полиакриламид и опубликованы результаты оценки огнестойкости обработанных материалов [20]. Однако характер изменений морфологии поверхности и структурной упорядоченности коллагеновой матрицы кожи после такой обработки требует отдельного изучения. Предполагалось, что коллагеновый гидролизат благодаря функциональным группам будет взаимодействовать с волокнами кожи и спилка, распределяясь на их поверхности и частично заполняя межволоконные пространства. В результате поверхность должна стать более однородной, а границы отдельных волокон и промежутки между ними быть менее выраженными. Цель работы – установить влияние обработки коллагенсодержащей композицией на морфологию поверхности и рентгенодифракционные характеристики кожевенного спилка и натуральной кожи посредством сравнительного SEM-EDX и XRD-анализа исходных и модифицированных образцов.

2 Материалы и методы

В качестве экспериментальных образцов использованы два вида натуральных кож, в соответствии с требованиями стандартов ГОСТ 939 – 2021 «Кожа для верха обуви» и ГОСТ 12.4.032 – 95 «Обувь специальная с кожаным верхом для защиты от действия повышенных температур»:

1 – образец. Двухсторонняя бахтармяная спилка толщиной 1.7 мм, полуфабрикат хромового дубления без обработки реагентами, полученная из шкуры крупного рогатого скота в кожевенном предприятии г. Джизак.

2 – образец. Готовая гладкая кожа хромового дубления толщиной 1.8 мм, лицевая поверхность прошла полную обработку наполняющими, жирующими и красящими реагентами.

Для приготовления огнезащитной композиции получали гидролизат коллагена и 1 %-ный раствор полиакриламида. Для приготовления гидролизата коллагена использованы кожевенные отходы, полученные на стадиях первичной обработки шкур, до применения дубильных веществ. Кожаные отходы измельчали до 10 – 15 мм в длину. 30 г измельчённых отходов заливали 50 мл 2 %-ного раствора NaOH и выдерживали 12 ч для набухания. После набухания проводили термообработку при 50 °C в течение 5 часов до образования однородного раствора. Полученный раствор фильтровали через сито с размером ячеек 0,05 мм и нейтрализовали концентрированной уксусной кислотой до pH 6,5 ± 0,2. Для приготовления раствора полиакриламида 1 г полимера растворяли в 99 мл дистиллированной воды при перемешивании со скоростью 300 об/мин в течение 3 ч. Огнезащитную композицию готовили смешением 40 мл гидролизата коллагена, 40 мл раствора полиакриламида, 5 г борной кислоты и 10 г мочевины. Объём смеси доводили дистиллированной водой до 200 мл и перемешивали до получения однородного состава, который использовали для обработки кожевенного материала. Для проведения огнезащитной обработки из каждого образца вырезали полосы размером 20 × 8 см и погружали в подготовленную композицию на 6 часов, периодически переворачивая для обеспечения

равномерной пропитки. Затем образцы подвергали термической обработке в сушильном шкафу при температуре 160 °C в течение 3 минут. Прирост массы после пропитки композицией и последующей термообработки определяли на трёх независимых образцах каждого материала. Он составлял приблизительно 15 % для спилка и 18 % для готовой кожи относительно исходной массы.

Химические реагенты были приобретены у предприятий АО «Navoiyazot» в Республике Узбекистан, “Rouyangmoer” в Китае, «Besiktas/Istanbul» и PulcraChemical в Турции.

Сканирующая электронная микроскопия (SEM)

Морфологию поверхности и элементный состав исходных и обработанных образцов исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (SEM) на приборе ZeissEvo 15 (Германия), оснащённом системой энергодисперсионного рентгеноспектрального анализа Bruker EDS.

Рентгеновская дифракция (XRD)

Исследования методом рентгеновской дифракции (XRD) проводили на дифрактометре XRD Miniflex 600 (Rigaku, Япония) с использованием монохроматического излучения CuKα, выделенного никелевым фильтром, с длиной волны λ = 1,5418 Å, при напряжении 40 кВ и силе тока 15 мА. Образцы исследовали в порошкообразном состоянии. Дифракционный спектр регистрировали в диапазоне 2θ = 2–70°. Обработку экспериментальных дифракционных данных, деконволюцию пиков, их описание с использованием индексов Миллера, определение формы пиков и выделение аморфной составляющей проводили с помощью программного обеспечения SmartLab Studio II. Для уточнения структуры методом Ритвельда использовали функцию псевдо-Войта (pseudo-Voigt). Эксперимент проводили в режиме отражения Брэгга–Брентано (Bragg–Brentano) с использованием фиксированных щелей с углом 1,25°.

3 Результаты и обсуждение

3.1 SEM

Литературные данные свидетельствуют, что огнезащитная обработка может изменять морфологию коллагеновых волокон, межволоконное пространство и структурную организацию натуральной кожи. Однако комплексное сопоставление СЭМ и рентгенографических характеристик необработанной и огнезащитно-модифицированной кожи изучено недостаточно. Поэтому совместное применение СЭМ и рентгенографического анализа является перспективным для оценки структурных изменений кожи и установления взаимосвязи между её морфологией и огнезащитными свойствами. На рисунке 1 представлены СЭМ-изображения поверхности исследуемых образцов спилок необработанной и обработанной с огнезащитной обработкой.

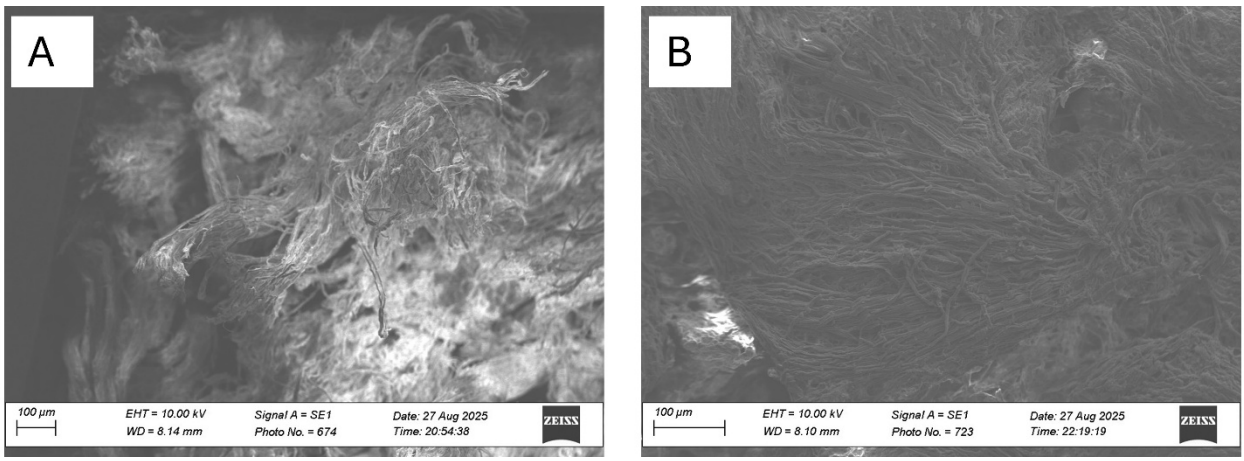


Рисунок 1. СЭМ-изображения лицевой поверхности исследуемых образцов спилок без (А) и с (В) огнезащитной обработкой

СЭМ-анализ показал существенное изменение морфологии спилка после огнезащитной обработки. По рисунку 1 видно, что как в исходном образце, так и в модифицированном образце сохраняется волокнистая структура коллагена. Необработанный образец характеризуется выраженной фибриллярной структурой с хорошо различимыми пучками коллагеновых волокон и межволоконными пространствами. После нанесения огнезащитной композиции структура поверхности становится более однородной и уплотненной, при этом отдельные коллагеновые волокна и межволоконные промежутки выражены менее отчетливо. Вероятно, это связано с равномерным распределением и закреплением компонентов огнезащитной композиции между коллагеновыми волокнами и формированием защитного покрытия на поверхности спилки. Выявленные морфологические изменения указывают на взаимодействие компонентов композиции со структурой коллагеновой матрицы. На рисунке 2 представлены СЭМ-изображения поверхности исследуемых образцов натуральной кожи необработанной и обработанной огнезащитной композицией.

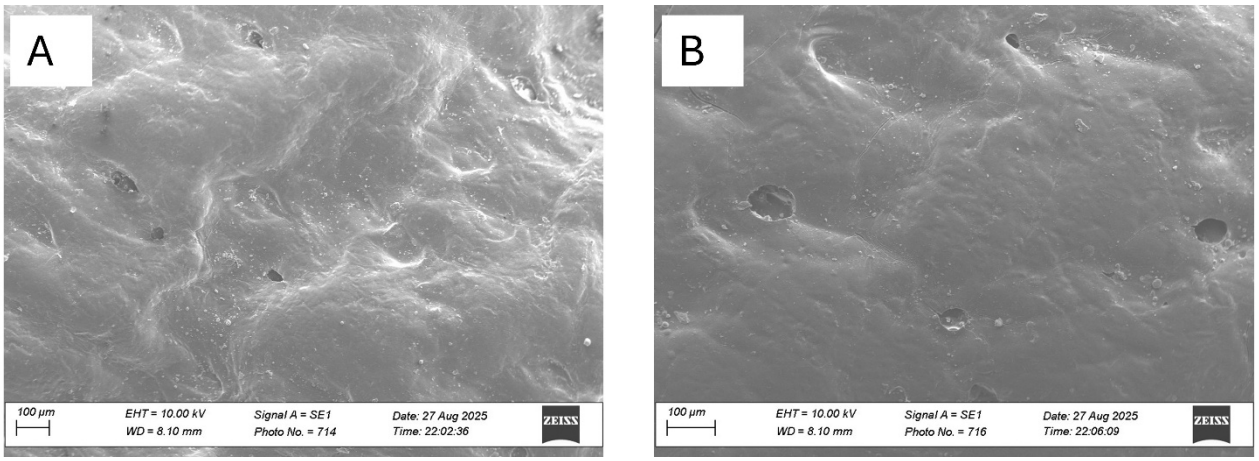


Рисунок 2. СЭМ-изображения лицевой поверхности исследуемых образцов кожи без (А) и с (В) огнезащитной обработкой

Согласно результатам, СЭМ-исследования, необработанная натуральная кожа характеризуется выраженной волокнистой морфологией, сформированной переплетающимися пучками коллагеновых волокон, с наличием отдельных пор и межволоконных пространств. После обработки огнезащитной композицией общая структура коллагеновой матрицы сохраняется, однако морфология поверхности становится

более однородной и уплотненной. Межволоконные пространства и отдельные поверхностные углубления выражены менее отчетливо, что может быть связано с распределением компонентов огнезащитной композиции в межволоконном пространстве и на поверхности коллагеновых волокон. При этом признаков существенного разрушения или деформации волокнистого каркаса не выявлено.

3.2 Рентгенодифракционный анализ

Для оценки структурных изменений коллагеновой матрицы натуральной кожи до и после огнезащитной обработки был проведён рентгенодифракционный анализ (XRD). Сравнение дифрактограмм образцов необработанного и обработанного с огнезащитным композитом позволяет оценить влияние компонентов огнезащитной композиции на структурное состояние коллагеновой матрицы. Дифрактограммы спилка до и после обработки коллагенсодержащей композицией приведены на рисунке 3.

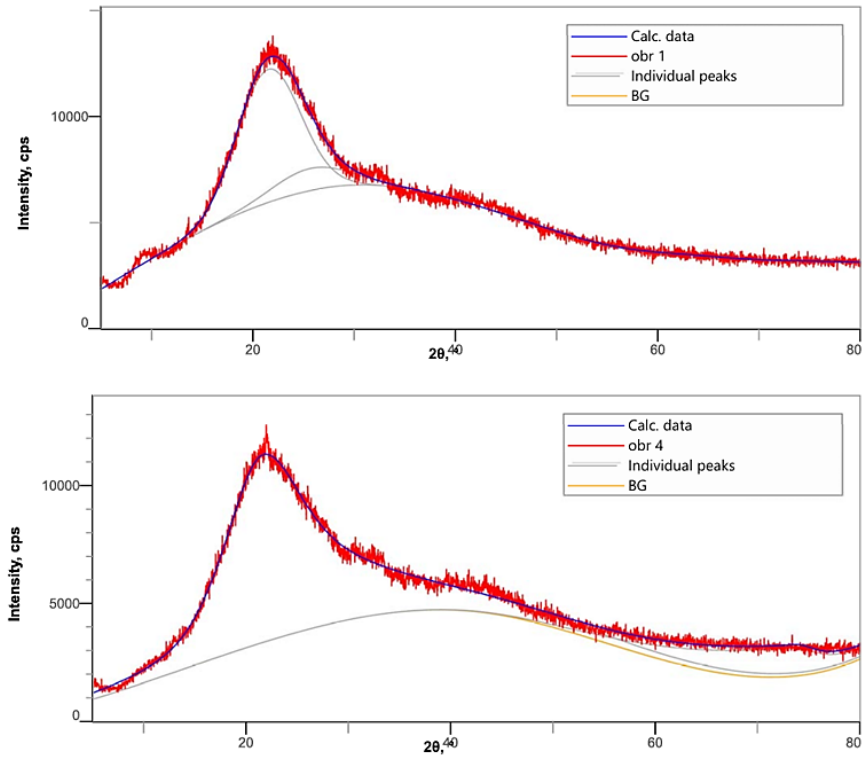


Рисунок 3. Рентгенодифракционный анализ лицевой поверхности исследуемых образцов спилка без (А) и с (В) огнезащитной обработкой

Рентгенодифракционный анализ показал, что исследуемые образцы натуральной кожи характеризуются преимущественно низкоупорядоченной структурой. На дифрактограммах необработанного и обработанного образцов наблюдается широкий диффузный максимум в области 2θ ≈ 21–23°, характерный для коллагеновой матрицы кожи. После огнезащитной обработки положение основного дифракционного максимума существенно не изменяется, однако наблюдается снижение его интенсивности и некоторое расширение дифракционного профиля. При этом новых выраженных кристаллических рефлексов в обработанном образце не выявлено. Полученные результаты свидетельствуют о том, что огнезащитная обработка не приводит к образованию новой высококристаллической фазы, но вызывает изменение локального структурного порядка коллагеновой матрицы, вероятно, вследствие

взаимодействия компонентов огнезащитной композиции с коллагеновыми волокнами. На рисунке 4 представлен рентгенодифракционный анализ поверхности исследуемых образцов натуральной кожи необработанной и обработанной с огнезащитной обработкой.

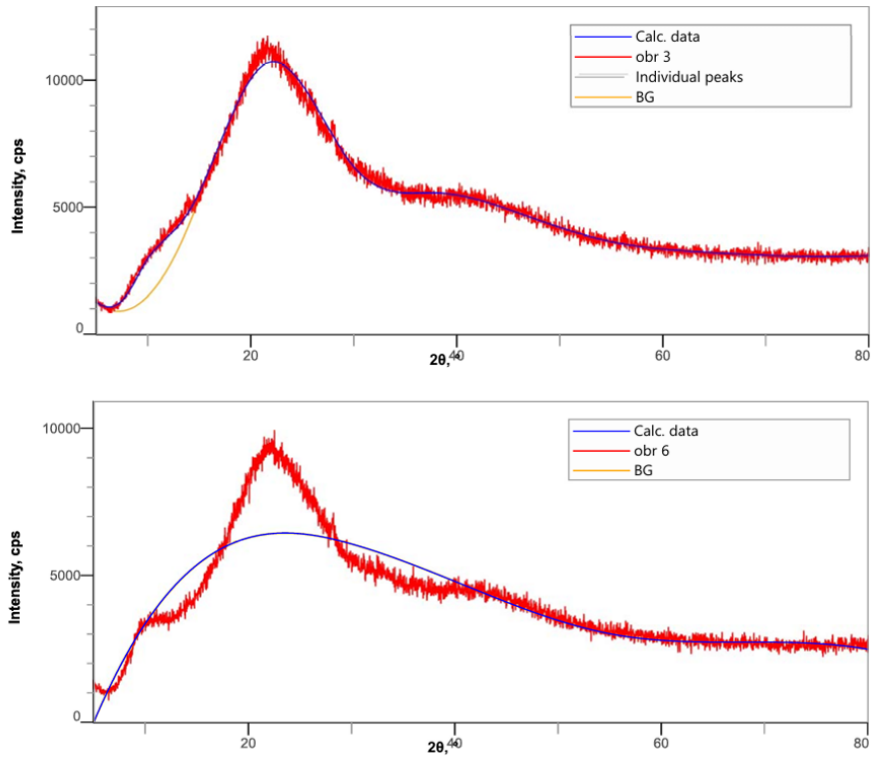


Рисунок 4. Рентгенодифракционный анализ лицевой поверхности исследуемых образцов натуральной кожи без (А) и с (В) огнезащитной обработкой

Рентгеноструктурный анализ показал, что необработанная натуральная кожа характеризуется широким диффузным максимумом в области 2θ ≈ 21–23°, что свидетельствует о преимущественно аморфном состоянии коллагеновой матрицы. После обработки положение основного диффузионного максимума практически сохраняется, однако изменяются его интенсивность и форма. Это указывает на изменение структурной упорядоченности коллагеновых волокон под воздействием огнезащитной композиции. Отсутствие новых выраженных узких дифракционных максимумов свидетельствует о сохранении преимущественно аморфной структуры кожи и отсутствии существенного формирования новых кристаллических фаз. Таким образом, обработка изменяет структурное состояние коллагеновой матрицы, не вызывая её существенной кристаллизации или разрушения.

Заключение

Установлено, что после огнезащитной обработки поверхностьспилка и натуральной кожи становится более однородной и уплотнённой, при этом исходная волокнистая структура коллагена сохраняется. По данным XRD, после обработки положение основного диффузного максимума в области 2θ ≈ 21–23° существенно не изменяется, однако снижаются его интенсивность и степень структурной упорядоченности. Таким образом, огнезащитная обработка модифицирует поверхностное и структурное состояние коллагеновой матрицы без её существенного разрушения.

Список литературы

1. Zhang Y., Buchanan J.K., Holmes G., Mansel B.W., Prabakar S. Collagen structure changes during chrome tanning in propylene carbonate // Journal of Leather Science and Engineering. – 2019. – T. 1. – DOI: 10.1186/s42825-019-0011-y.
2. Buchanan J.K., Zhang Y., Holmes G., Covington A.D., Prabakar S. Role of X-ray Scattering Techniques in Understanding the Collagen Structure of Leather // ChemistrySelect. – 2019. – T. 4, № 48. – P. 14091–14102. – DOI: 10.1002/slct.201902908.
3. Wang L., Lyu B., Gao D., Ren J., Wang Y., Ma J. Organic-inorganic hybrid leather fatliquoring agent with fluidity: Enhanced flame retardancy and physical-mechanical properties for leather collagen fibers // International Journal of Biological Macromolecules. – 2025. – T. 308. – DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.142380.
4. van der Veen I., de Boer J. Phosphorus flame retardants: Properties, production, environmental occurrence, toxicity and analysis // Chemosphere. – 2012. – T. 88, № 10. – P. 1119–1153. – DOI: 10.1016/j.chemosphere.2012.03.067.
5. Dogan M., Dogan S.D., Savas L.A., Ozcelik G., Tayfun U. Flame retardant effect of boron compounds in polymeric materials // Composites Part B: Engineering. – 2021. – T. 222. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109088.
6. Mohamed O.A., Abdel-Mohdy F.A. Preparation of flame-retardant leather pretreated with Pyrovatex CP // Journal of Applied Polymer Science. – 2043. – T. 99, № 5. – P. 2039–2043. – DOI: 10.1002/app.22409.
7. Xu W., Li J., Liu F., Jiang Y., Li Z., Li L. Study on the thermal decomposition kinetics and flammability performance of a flame-retardant leather // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2017. – T. 128, № 2. – P. 1107–1116. – DOI: 10.1007/s10973-016-5974-9.
8. Elsayed H., Abd-El-All A.S., El-Masry H.M., Masoud R.A., Mohamed O.A. Novel Waterborne P–N Polyurethane and Its Application in Leather Finishing for Flame-Retardant and Antimicrobial Properties // Fibers and Polymers. – 2026. – T. 27, № 1. – P. 37–67. – DOI: 10.1007/s12221-025-01221-7.
9. Duan B., Wang Q., Wang X., Li Y., Zhang M., Diao S. Flame retardance of leather with flame retardant added in retanning process // Results in Physics. – 2019. – T. 15. – DOI: 10.1016/j.rinp.2019.102717.
10. Sanchez-Olivares G., Sanchez-Solis A., Calderas F., Medina-Torres L., Manero O., Di Blasio A., Alongi J. Sodium montmorillonite effect on the morphology, thermal, flame retardant and mechanical properties of semi-finished leather // Applied Clay Science. – 2014. – T. 102. – P. 254–260. – DOI: 10.1016/j.clay.2014.10.007.
11. Jiang Y., Li J., Li B., Liu H., Li Z., Li L. Study on a novel multifunctional nanocomposite as flame retardant of leather // Polymer Degradation and Stability. – 2015. – T. 115. – P. 110–116. – DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2015.02.018.
12. Sanchez Olivares G., Battig A., Goller S.M., Rockel D., Ramírez González V., Schartel B. Imparting Fire Retardancy and Smoke Suppression to Leather during Tanning Processes // ACS Omega. – 2022. – T. 7, № 48. – P. 44156–44169. – DOI: 10.1021/acsomega.2c05633.

13. An W., Ma J., Xu Q., Zhang H. Nanoarchitectonics of flame retardant leather: Current status and future perspectives // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2023. – T. 165. – DOI: 10.1016/j.compositesa.2022.107327.
14. Lu S., Feng Y., Zhang P., Hong W., Chen Y., Fan H., Yu D., Chen X. Preparation of Flame-Retardant Polyurethane and Its Applications in the Leather Industry // Polymers. – 2021. – T. 13, № 11. – DOI: 10.3390/polym13111730.
15. Kanemoto S.O., Gouthaman S., Venkatesh M., Cheumani Yona A.M., Ndikontar M.K., Suguna Lakshmi M. Thermal stability of phosphorus-based epoxy/clay composites and its effect on flame-retardation properties of leather // Iranian Polymer Journal. – 2022. – T. 31, № 12. – P. 1583–1594. – DOI: 10.1007/s13726-022-01100-5.
16. Bai Z., Wang X., Zheng M., Yue O., Xie L., Zha S., Dong S., Li T., Song Y., Huang M., Liu X. Leather for flexible multifunctional bio-based materials: a review // Journal of Leather Science and Engineering. – 2022. – T. 4. – DOI: 10.1186/s42825-022-00091-6.
17. Wang Y., Zheng M., Liu X., Yue O., Wang X., Jiang H. Advanced collagen nanofibers-based functional bio-composites for high-value utilization of leather: A review // Journal of Science: Advanced Materials and Devices. – 2021. – T. 6, № 2. – P. 153–166. – DOI: 10.1016/j.jsamd.2021.02.001.
18. Uddin K.M. A., Ago M., Rojas O.J. Hybrid films of chitosan, cellulose nanofibrils and boric acid: Flame retardancy, optical and thermo-mechanical properties // Carbohydrate Polymers. – 2017. – T. 177. – P. 13–21. – DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.08.116.
19. Nam S., Condon B.D., White R.H., Zhao Q., Yao F., Cintrón M.S. Effect of urea additive on the thermal decomposition kinetics of flame retardant greige cotton nonwoven fabric // Polymer Degradation and Stability. – 2012. – T. 97, № 5. – P. 738–746. – DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2012.02.008.
20. Хакимова М.Ш., Рафиков А.С., Исламова Д.А., Кадыров Ш.У., Мирзаев Н.Б. Огнезащитная обработка кожаных материалов азот и бор содержащей композицией. Международная научно-техническая конференция «Инновации в текстиле, одежде, обуви (ICTAI-2025)». Витебск, 18–19 ноября 2025 г.– С. 209–215.

References

1. Zhang Y., Buchanan J.K., Holmes G., Mansel B.W., Prabakar S. Collagen structure changes during chrome tanning in propylene carbonate // Journal of Leather Science and Engineering. – 2019. – Vol. 1. – DOI: 10.1186/s42825-019-0011-y.
2. Buchanan J.K., Zhang Y., Holmes G., Covington A.D., Prabakar S. Role of X-ray Scattering Techniques in Understanding the Collagen Structure of Leather // ChemistrySelect. – 2019. – Vol. 4, No. 48. – P. 14091–14102. – DOI: 10.1002/slct.201902908.
3. Wang L., Lyu B., Gao D., Ren J., Wang Y., Ma J. Organic-inorganic hybrid leather fatliquoring agent with fluidity: Enhanced flame retardancy and physical-mechanical properties for leather collagen fibers // International Journal of Biological Macromolecules. – 2025. – Vol. 308. – Art. 142380. – DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2025.142380.

4. van der Veen I., de Boer J. Phosphorus flame retardants: Properties, production, environmental occurrence, toxicity and analysis // Chemosphere. – 2012. – Vol. 88, No. 10. – P. 1119–1153. – DOI: 10.1016/j.chemosphere.2012.03.067.
5. Dogan M., Dogan S.D., Savas L.A., Ozcelik G., Tayfun U. Flame retardant effect of boron compounds in polymeric materials // Composites Part B: Engineering. – 2021. – Vol. 222. – Art. 109088. – DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.109088.
6. Mohamed O.A., Abdel-Mohdy F.A. Preparation of flame-retardant leather pretreated with Pyrovatex CP // Journal of Applied Polymer Science. – 2043. – Vol. 99, No. 5. – P. 2039–2043. – DOI: 10.1002/app.22409.
7. Xu W., Li J., Liu F., Jiang Y., Li Z., Li L. Study on the thermal decomposition kinetics and flammability performance of a flame-retardant leather // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2017. – Vol. 128, No. 2. – P. 1107–1116. – DOI: 10.1007/s10973-016-5974-9.
8. Elsayed H., Abd-El-All A.S., El-Masry H.M., Masoud R.A., Mohamed O.A. Novel Waterborne P–N Polyurethane and Its Application in Leather Finishing for Flame-Retardant and Antimicrobial Properties // Fibers and Polymers. – 2026. – Vol. 27, No. 1. – P. 37–67. – DOI: 10.1007/s12221-025-01221-7.
9. Duan B., Wang Q., Wang X., Li Y., Zhang M., Diao S. Flame retardance of leather with flame retardant added in retanning process // Results in Physics. – 2019. – Vol. 15. – Art. 102717. – DOI: 10.1016/j.rinp.2019.102717.
10. Sanchez-Olivares G., Sanchez-Solis A., Calderas F., Medina-Torres L., Manero O., Di Blasio A., Alongi J. Sodium montmorillonite effect on the morphology, thermal, flame retardant and mechanical properties of semi-finished leather // Applied Clay Science. – 2014. – Vol. 102. – P. 254–260. – DOI: 10.1016/j.clay.2014.10.007.
11. Jiang Y., Li J., Li B., Liu H., Li Z., Li L. Study on a novel multifunctional nanocomposite as flame retardant of leather // Polymer Degradation and Stability. – 2015. – Vol. 115. – P. 110–116. – DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2015.02.018.
12. Sanchez Olivares G., Battig A., Goller S.M., Rockel D., Ramírez González V., Schartel B. Imparting Fire Retardancy and Smoke Suppression to Leather during Tanning Processes // ACS Omega. – 2022. – Vol. 7, No. 48. – P. 44156–44169. – DOI: 10.1021/acsomega.2c05633.
13. An W., Ma J., Xu Q., Zhang H. Nanoarchitectonics of flame retardant leather: Current status and future perspectives // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2023. – Vol. 165. – Art. 107327. – DOI: 10.1016/j.compositesa.2022.107327.
14. Lu S., Feng Y., Zhang P., Hong W., Chen Y., Fan H., Yu D., Chen X. Preparation of Flame-Retardant Polyurethane and Its Applications in the Leather Industry // Polymers. – 2021. – Vol. 13, No. 11. – Art. 1730. – DOI: 10.3390/polym13111730.
15. Kanemoto S.O., Gouthaman S., Venkatesh M., Cheumani Yona A.M., Ndikontar M.K., Suguna Lakshmi M. Thermal stability of phosphorus-based epoxy/clay composites and its effect on flame-retardation properties of leather // Iranian Polymer Journal. – 2022. – Vol. 31, No. 12. – P. 1583–1594. – DOI: 10.1007/s13726-022-01100-5.

16. Bai Z., Wang X., Zheng M., Yue O., Xie L., Zha S., Dong S., Li T., Song Y., Huang M., Liu X. Leather for flexible multifunctional bio-based materials: a review // Journal of Leather Science and Engineering. – 2022. – Vol. 4. – DOI: 10.1186/s42825-022-00091-6.
17. Wang Y., Zheng M., Liu X., Yue O., Wang X., Jiang H. Advanced collagen nanofibers-based functional bio-composites for high-value utilization of leather: A review // Journal of Science: Advanced Materials and Devices. – 2021. – Vol. 6, No. 2. – P. 153–166. – DOI: 10.1016/j.jsamd.2021.02.001.
18. Uddin K.M. A., Ago M., Rojas O.J. Hybrid films of chitosan, cellulose nanofibrils and boric acid: Flame retardancy, optical and thermo-mechanical properties // Carbohydrate Polymers. – 2017. – Vol. 177. – P. 13–21. – DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.08.116.
19. Nam S., Condon B.D., White R.H., Zhao Q., Yao F., Cintrón M.S. Effect of urea additive on the thermal decomposition kinetics of flame retardant greige cotton nonwoven fabric // Polymer Degradation and Stability. – 2012. – Vol. 97, No. 5. – P. 738–746. – DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2012.02.008.
20. Khakimova M.Sh., Rafikov A.S., Islamova D.A., Kadyrov Sh.U., Mirzaev N.B. [Fire-retardant treatment of leather materials with a nitrogen- and boron-containing composition // International Scientific and Technical Conference “Innovations in Textile, Clothing, Footwear (ICTAI. – 2025. – P. 209–215. (In Russ.).