

Оригинальная статья / Original article
УДК 504.05
DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-25



Экологически ориентированная технология улучшения эксплуатационных свойств обувных низкосортных натуральных кож с использованием плазменной обработки

Татьяна В. Жуковская, Лилия Р. Ханнанова-Фахрутдинова, Гузель И. Гарипова, Лейсан Р. Фатхуллина
Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия

Контактное лицо

Татьяна В. Жуковская, кандидат технических наук, доцент, кафедра конструирования одежды и обуви, Казанский национальный исследовательский технологический университет; 420015 Россия, г. Казань, ул. К. Маркса, 68.
Тел. +78432314196
Email zhukovskayatv@corp.knrtu.ru
ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4006-6691>

Формат цитирования

Жуковская Т.В., Ханнанова-Фахрутдинова Л.Р., Гарипова Г.И., Фатхуллина Л.Р. Экологически ориентированная технология улучшения эксплуатационных свойств обувных низкосортных натуральных кож с использованием плазменной обработки // Юг России: экология, развитие. 2025. Т.20, N 4. С. 270-277. DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-25

Получена 3 сентября 2025 г.
Прошла рецензирование 14 октября 2025 г.
Принята 25 октября 2025 г.

Резюме

Цель: устойчивое развитие кожевенно-обувной отрасли требует внедрения ресурсосберегающих, экологически безопасных методов модификации кожи, позволяющих повысить её качественные характеристики без применения агрессивных химикатов, снижающих гигиенические и биосовместимые свойства материала. Одной из перспективных технологических альтернатив в данном контексте выступает применение неравновесной низкотемпературной плазмы (ННТП).

В работе показано, что данная технология позволяет устранить распространённые дефекты натуральных обувных кож – отдушистость и отмин – без ухудшения гигиенических свойств и с существенным повышением прочностных и эстетических характеристик заготовки верха обуви.

Представлены экспериментальные данные, подтверждающие эффективность обработки, а также обсуждаются экологические и ресурсные аспекты повторного использования кожевенного сырья. Сделан вывод о высокой технологической и экологической целесообразности внедрения ННТП на предприятиях обувной промышленности.

В условиях дефицита кожевенного сырья и роста требований к экологической ответственности производства, предложенный способ позволяет повысить степень использования низкосортных материалов, снизить процент брака и отходов, а также реализовать принципы устойчивого развития и экономики замкнутого цикла. Плазменная модификация не требует применения токсичных реагентов, не нарушает гигиенические характеристики кожи и обеспечивает стабильность полученного результата при промышленном тиражировании.

Ключевые слова

Экологическая эффективность, переработка сырья, натуральная кожа, дефект, заготовка верха обуви, низкотемпературная неравновесная плазма, обработка.

Environmentally oriented technology for improving the performance properties of low-grade natural leather for footwear using plasma modification

Tatiana V. Zhukovskaya, Liliya R. Khannanova-Fakhrutdinova, Guzel I. Garipova and Leysan R. Fatkhullina

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

Principal contact

Tatiana V. Zhukovskaya, PhD, Associate Professor,
Department of Clothing and Footwear Design,
Kazan National Research Technological University;
68 K. Marks St, Kazan, Russia 420015.

Tel. +78432314196

Email zhukovskayatv@corp.knrtu.ru

ORCID <https://orcid.org/0000-0002-4006-6691>

How to cite this article

Zhukovskaya T.V., Khannanova-Fakhrutdinova L.R.,
Garipova G.I., Fatkhullina L.R. Environmentally
oriented technology for improving the performance
properties of low-grade natural leather for
footwear using plasma modification. *South of
Russia: ecology, development*. 2025; 20(4):270-277.
(In Russ.) DOI: 10.18470/1992-1098-2025-4-25

Received 3 September 2025

Revised 14 October 2025

Accepted 25 October 2025

Abstract

The objective was to research the sustainable development of the leather and footwear industry which requires the introduction of resource-saving, environmentally friendly methods of leather modification, allowing the improvement of its quality characteristics without the use of aggressive chemicals that reduce the hygienic and biocompatible properties of the material. One of the promising technological alternatives in this context is the use of nonequilibrium low-temperature plasma (NLTP).

Examination of this technology which allows the elimination of common defects of natural shoe leather - odour and indents - without deterioration of hygienic properties and with a significant increase in the strength and aesthetic characteristics of the shoe upper blank.

Experimental data confirming the effectiveness of the treatment are presented, and environmental and resource aspects of the reuse of raw leather are discussed. A conclusion is made about the high technological and environmental feasibility of introducing NLTP at footwear industry enterprises.

In the conditions of shortage of leather raw materials and growing requirements for environmental responsibility in production, the method proposed allows increase in the degree of use of low-grade materials, reduction in the percentage of defects and waste and implementation of the principles of sustainable development and closed-loop economy. Plasma modification does not require use of toxic reagents, does not violate the hygienic characteristics of leather and ensures the stability of the obtained result during industrial replication.

Key Words

Eco-efficiency, raw material processing, genuine leather, defect, shoe upper preparation, low-temperature nonequilibrium plasma, processing.

ВВЕДЕНИЕ

Экологичность производственно-технологических процессов кожевенно-обувной промышленности в современных условиях неразрывно связана с рациональным использованием ресурсов, минимизацией отходов и внедрением экологически чистых методов обработки сырья [1]. При этом одной из наиболее острых проблем остаётся значительный удельный вес технологических потерь [2], связанных с переработкой кож низкого качества, особенно при производстве заготовок верха обуви [3]. До 26 % площади кож хромового дубления может уходить в отходы в процессе раскроя [4], причём на долю дефектов отдушистости и отмина приходится до 8 % от общего объёма утрат [5–6]. Такие цифры свидетельствуют не только о существенных экономических убытках, но и об экологической нагрузке, обусловленной необходимостью утилизации отходов биологического происхождения, обладающих остаточной токсичностью и склонностью к биodeградации с образованием соединений аммония и сульфидов.

Современное развитие кожевенно-обувной промышленности характеризуется растущими требованиями к эстетическим и эксплуатационным свойствам изделий на фоне интенсивного потребления и сезонности спроса. Несмотря на появление новых синтетических материалов, натуральная кожа по-прежнему остаётся предпочтительным материалом для изготовления заготовки верха обуви благодаря своей воздухопроницаемости, пластичности и высокому уровню комфорта в носке. Однако в условиях дефицита высококачественного сырья и необходимости удешевления производственного цикла всё чаще в оборот вовлекается низкосортное кожевенное сырьё, отличающееся наличием таких лицевых дефектов, как отдушистость и отмин.

Изготовление обуви из кожи с дефектами, такими как отдушистость, неизбежно ведёт к быстрому разрушению её структуры при эксплуатации, потере товарного вида и, как следствие, возврату продукции. Массовый характер таких возвратов обусловлен не только физическим износом, но и психологическим восприятием ухудшения внешнего облика изделия, особенно в контексте современных потребительских ожиданий, где эстетическая составляющая приобретает равное значение с эксплуатационными характеристиками. Таким образом, дефектные изделия, поступившие на рынок, также формируют обратный поток отходов, увеличивая углеродный след и производственную нагрузку на логистику и сортировочные центры.

В условиях растущих требований к экологической отчётности предприятий и дефицита высококачественного кожевенного сырья становится актуальным поиск технологий, позволяющих вовлекать в производство низкосортные материалы без ухудшения качества конечного продукта [6]. Повышение сортности и площади выхода годного материала за счёт устранения или маскировки лицевых дефектов не только снижает производственные издержки [7], но и способствует снижению общего объёма отходов, направляемых на утилизацию. Это особенно важно с учётом того, что отходы кожевенного и обувного производства, содержащие остатки хрома, жиров и поверхностно-активных веществ, оказывают неблагоприятное влияние на почвенные и водные экосистемы при нарушении регламентов захоронения.

Устойчивое развитие отрасли требует внедрения ресурсосберегающих, экологически безопасных методов модификации кожи, позволяющих повысить её качественные характеристики без применения агрессивных химикатов, снижающих гигиенические и биосовместимые свойства материала. Одной из перспективных технологических альтернатив в данном контексте выступает применение низкотемпературной низкоэнергетической плазмы (ННТП), позволяющей производить объёмную модификацию структур кожи, повышая их прочность, эластичность, формоустойчивость и адгезионные свойства.

В отличие от химических методов, ННТП воздействует на материал на уровне надмолекулярных структур без разрушения его внутренней организации, что делает эту технологию особенно актуальной для обработки сложных волокнистых и пористых биополимерных материалов. В работах последних лет доказано, что применение ННТП позволяет не только улучшить механические свойства кожевенных материалов [8–10], но и существенно сократить проявление дефектов отдушистости и отмина [10; 11], сохраняя при этом гигиенические и эстетические параметры изделия.

Таким образом, целью настоящего исследования является разработка экологически ориентированной технологии повышения эксплуатационных свойств заготовки верха обуви из низкосортной натуральной кожи путём последовательной плазменной модификации в условиях высокочастотного индукционного и емкостного разрядов. Обоснование выбранной технологии, её физико-химические основы, результаты лабораторных и натурных испытаний, а также анализ эксплуатационных показателей образцов до и после модификации представлены в последующих разделах статьи.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Применение низкотемпературной низкоэнергетической плазмы при обработке кожевенных материалов базируется на механизмах направленного физико-химического воздействия на макромолекулярную структуру коллагеновых волокон, в том числе и на сопутствующие компоненты лицевого покрытия [12]. В условиях вакуумной плазменной среды при пониженном давлении и заданных энергетических режимах происходит ионизация плазмообразующего газа — аргона или смеси аргона с пропан-бутаном, в результате чего формируются низкоэнергетические ионы, обладающие достаточной кинетической энергией для воздействия на поверхностные и подповерхностные слои кожевенного материала.

Особенность воздействия ННТП заключается в локальном нагреве поверхностного покрытия, особенно в зонах с выраженным отмином или отдушистостью, что позволяет материалу, уже содержащему декоративно-защитную плёнку, частично заплавлять микротрещины, щели и каверны, образовавшиеся в процессе дубления, сушки или хранения. В результате такого контролируемого термодинамического воздействия покрытие распределяется более равномерно и заполняет дефектные участки, стабилизируя лицевой слой кожи без необходимости нанесения дополнительных химических компонентов.

Экспериментально подтверждено, что при обработке в условиях высокочастотного индукционного (ВЧИ) разряда с параметрами $W_p = 2,2$ кВт, $\tau = 3$ мин, $G_{ар} = 0,04$ г/с, $P = 26,6$ Па происходит формирование плазменного потока с высокой плотностью заряженных

частиц, что способствует активации молекулярных связей в зоне дефекта и частичному испарению. Это особенно важно для устранения дефекта отдушистости, связанного с избыточным содержанием летучих фракций поверхностного покрытия. Полученные данные

свидетельствуют о существенном снижении интенсивности дефекта уже после первой стадии обработки, о чём свидетельствуют материалы, представленные на рисунках 1 и 2.

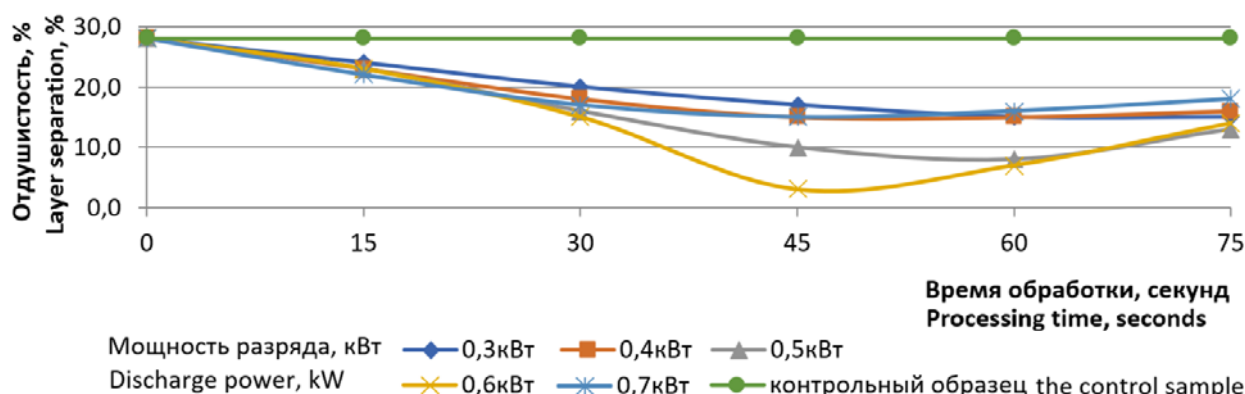


Рисунок 1. Зависимость проявления отдушистости при модификации заготовки верха обуви в ННТП индукционного разряда от продолжительности плазменной обработки и мощности разряда ($G=0,04$ г/с, $P_k=60$ Па)
Figure 1. Dependence of the manifestation of layer separation modification of the shoe upper blank in the NNTP induction discharge on the duration of plasma treatment and discharge power ($G=0.04$ g/s, $P_k=60$ Pa)

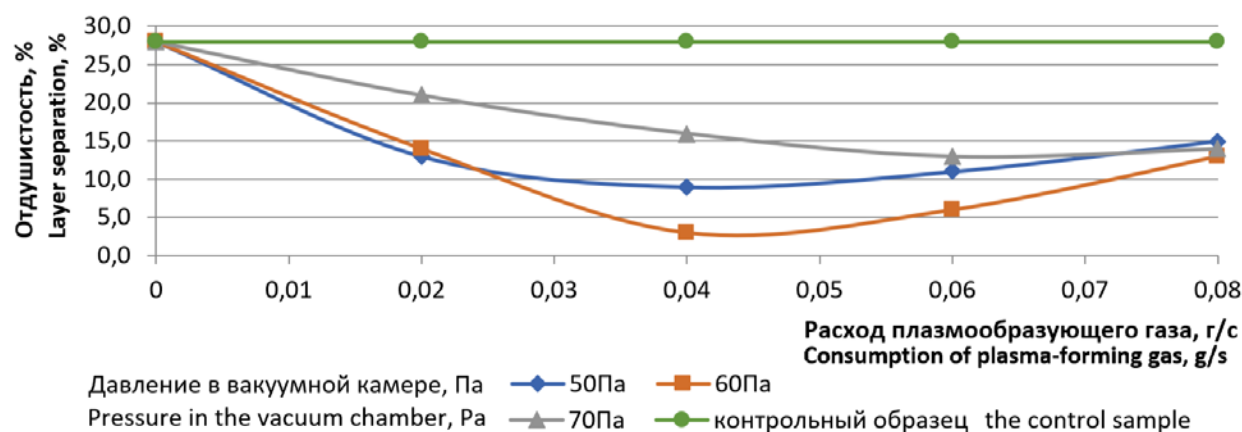


Рисунок 2. Зависимость проявления отдушистости при модификации заготовки верха обуви в ННТП индукционного разряда от расхода плазмообразующего газа и давления в вакуумной камере ($W_p=0,6$ кВт, $\tau=45$ с)
Figure 2. Dependence of the manifestation of layer separation modification of the shoe upper blank in the NNTP induction discharge on plasma-forming gas flow rate and pressure in the vacuum chamber ($W_p=0.6$ kW, $\tau=45$ s)

На следующем этапе применялся режим высокочастотного емкостного (ВЧЕ) разряда, обеспечивающий более глубокое проникновение воздействия в пористую структуру кожи. В данном случае плазменное воздействие сопровождалось частичной субдеструкцией нежелательных включений и улучшением межволоконного сцепления в поверхностной зоне, что подтверждается результатами тестов на устойчивость к многократному изгибу и мокрому трению, представленными в таблице 1. Одновременно с этим происходило увеличение поверхностной энергии материала, что положительно влияло на адгезию клеевых соединений и стойкость декоративных покрытий.

Сопоставление контрольных и модифицированных образцов показало также статистически достоверное повышение гигиенических, что обусловлено не только разволокнением, но и формированием на поверхности кожи кислородсодержащих функциональных групп (карбоксильных, гидроксильных), характер которых подтверждён данными ИК-спектроскопии. Наряду с этим, наблюдается усреднение и перераспределение объема пор, что дополнительно усиливает сцепление между

слоями обувного заготовочного материала и стабилизирует его форму при эксплуатации (рис. 3).

Таким образом, применение ННТП в условиях строго контролируемого плазменного воздействия обеспечивает комплексное улучшение характеристик низкосортной натуральной кожи, устраняя выраженные лицевые дефекты, восстанавливая её однородность и улучшая её технологическую совместимость с другими конструкционными компонентами обуви. На основании полученных результатов можно утверждать, что описанные процессы не нарушают целостность структуры коллагена и не требуют использования дополнительных реагентов, что подчёркивает экологическую обоснованность предлагаемого подхода.

С позиции циклической экономики и зелёных технологий, важнейшей задачей становится поиск способов глубокой регенерации структур кожного материала на микро- и наноуровне, позволяющих использовать его повторно с сохранением или улучшением исходных параметров. Применение ННТП позволяет значительно расширить спектр пригодности кож с дефектами, ранее списываемых в брак. Так, согласно

результатам, полученным в ходе проведённого эксперимента, после двукратной плазменной обработки образцы с дефектом отдушистости демонстрируют снижение степени выраженности данного дефекта более

чем на 25 % (см. рис. 1 и 2), а по итогам опытной носки – более чем в три раза по сравнению с контрольными полупарами (см. рис. 3).

Таблица 1. Влияние двукратной обработки ННТП на физико-механические характеристики заготовки верха обуви (ВЧИ: G=0,04г/с, P=60Па, Wp=0,6кВт, τ=45с.; ВЧЕ: GAr=0,04г/с, P=26,6Па, Wp=0,2кВт, τ=500с)
Table 1. Effect of double processing of NNTP on the physico-mechanical characteristics of the shoe top blank (HH: G=0.04g/s, P=60Pa, Wp=0.6kW, τ=45с; HH: GAr=0.04g/s, P=26.6Pa, Wp=0.2kW, τ=500с)

Наименование показателя Naming of the indicator	Контрольный образец Control sample	Опытный образец Prototype
Предел прочности при растяжении, МПа Tensile strength, MPa	19,1	31
Напряжение при появлении трещин лицевого слоя, МПа Stress at the appearance of cracks in front layer, MPa	11,7	15,9
Удлинение при напряжении 10МПа, % Elongation at 10MPa voltage, %	30	39,7
Относительное удлинение при разрыве, % Elongation at break, %	35	54
Адгезия покрытия к коже, Н/м Adhesion of the coating to the skin, N/a	440	690
Устойчивость покрытия на коже к многократному изгибу, баллы Resistance of the coating on the skin to repeated bending, points	2,7	4
Устойчивость покрытия на коже к мокрому трению, циклы Resistance of the coating on the skin to wet friction, cycles	82	98
Прочность термосклеивания, Н/м Thermal bonding strength, N/m	211	318
Прочность при расслаивании клеевого соединения, Н/см Delamination strength of adhesive joint, N/cm	59	66
Жесткость, сН Stiffness, cN	54	74
Упругость, % Elasticity, %	64	61
Гигроскопичность, % Hygroscopicity, %	19,6	19,6
Влагоотдача, % Moisture loss, %	9,4	9,8
Водопроницаемость в динамических условиях, мин. Water permeability in dynamic conditions, min.	>120	>120



Рисунок 3. Влияние двукратной ННТП обработки на устойчивость верха обуви в период опытной эксплуатации: а – контрольный образец; б – опытный образец

Figure 3. Effect of double NNTP treatment on the stability of the shoe upper during the trial operation: a – control sample; b – trial sample

Повышение прочности, эластичности, устойчивости к внешним воздействиям и формоустойчивости,

зафиксированное в результате обработки, позволяет рассматривать ННТП как технологию не только улучшения

потребительских характеристик изделия, но и инструмент экологической трансформации кожевенно-обувного производства. Таблица 1 подтверждает рост значений ключевых механических и технологических показателей, таких как предел прочности, адгезия покрытия, прочность склеивания и устойчивость к изгибу, что напрямую влияет на снижение процентного содержания брака и удлинение срока службы изделий.

Следовательно, исследуемая технология может рассматриваться как составная часть более широкой стратегии ресурсосбережения в отрасли, направленной на уменьшение отходов, снижение нагрузки на экосистему и повышение эффективности использования биологических материалов, ранее считавшихся непригодными для обувного производства. Именно в этом контексте решающее значение приобретает дальнейшее изучение механизмов плазменной модификации структур кожи, их взаимодействие с внешними покрытиями и клеящими слоями, а также возможности масштабирования данных процессов в условиях действующего промышленного оборудования.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Обоснование применения низкотемпературной плазменной обработки в качестве средства повышения потребительской ценности кожевенного материала требует не только рассмотрения физико-химических механизмов, но и подтверждения эксплуатационной результативности на уровне целевого изделия – обуви. Проведённые испытания показали, что воздействие ННТП на дефектные участки лицевого слоя обеспечивает комплексное улучшение свойств кожи, ранее считавшейся низкосортной, и позволяет использовать её в производстве обуви среднего и высокого ценового сегмента без видимого ухудшения качества.

Одним из ключевых показателей технологической состоятельности метода стало снижение выраженности дефекта отдушистости: уже после первой обработки в режиме ВЧИ- и ВЧЕ-разрядов интенсивность запаха снижалась более чем на 25 %, а после повторной обработки — до уровней, неотличимых от образцов из кожи высшего сорта, что подтверждено по результатам экспертной органолептической оценки (см. рис. 1–2). Это стало возможным благодаря испарению остаточных летучих компонентов замасливателя и герметизации поверхностных каверн, в которых накапливались ароматические соединения.

На фоне устранения эстетических дефектов также зафиксированы значительные улучшения по ряду эксплуатационных характеристик. Так, прочность на растяжение модифицированной кожи возросла в среднем на 22 % по сравнению с контрольными образцами, а предел прочности на изгиб увеличился на 26 %, что особенно важно при формировании и длительном ношении обуви в условиях высоких деформационных нагрузок (табл. 1). В дополнение к этому повысилась устойчивость к многократному сухому изгибу, что свидетельствует о восстановлении эластичности и стабилизации структуры лицевого слоя.

Увеличение капиллярной активности и удельной поверхности, ранее зафиксированное на микроскопическом уровне, обусловило значительный рост адгезии к клеящим слоям: прочность на отрыв соединений увеличилась на 35–40 % (см. рис. 3). Такой эффект особенно актуален для обеспечения надёжности и долговечности соединения заготовки верха с нижними

деталью обуви. Кроме того, важно подчеркнуть, что обработка ННТП не вызвала закупорки пор и не ухудшила гигиенических свойств материала, в отличие от традиционных методов химической маскировки дефектов, применение которых нередко сопровождается снижением воздухо- и паропроницаемости.

Сравнение полученных результатов с характеристиками немодифицированной кожи, а также с кожей, подвергнутыми традиционной корректирующей финишной отделке, демонстрирует преимущество плазменной технологии не только в плане повышения эксплуатационных показателей, но и в аспекте экологической безопасности. Отсутствие дополнительных химикатов, возможность локального воздействия, а также точное воспроизведение режимов обработки обеспечивают воспроизводимость процесса и технологическую гибкость.

Таким образом, проведённый комплекс испытаний доказывает, что применение ННТП позволяет существенно повысить форму устойчивости, надёжность и срок службы обуви, произведённой из ранее бракованного сырья. Учитывая высокую долю кож с дефектами, поступающих в производство, данная технология способна стать экономически и экологически целесообразной альтернативой традиционным корректирующим методам, расширяя доступ к сырьевым ресурсам и снижая общий уровень производственных отходов.

Современная практика экологического нормирования в лёгкой промышленности предполагает переход от анализа отдельных стадий производства к оценке полного жизненного цикла (LCA – Life Cycle Assessment) сырья, полуфабрикатов и готовых изделий. В этой связи обращение с низкосортной кожей, имеющей выраженные лицевые дефекты, приобретает особую значимость, так как затрагивает не только этап переработки, но и стадии распределения, потребления и утилизации.

Наиболее распространёнными сценариями обращения с кожевенным браком остаются физическая утилизация в виде захоронения на промышленных свалках либо вторичная переработка с использованием агрессивных химических реагентов для маскировки дефектов. Первый путь, несмотря на простоту, сопряжён с высоким экологическим риском: деградация белково-волоконных структур кожи на полигонах сопровождается выделением аммиака, сульфидов и формальдегида, что способствует загрязнению почвы и подземных вод. Согласно данным отраслевых отчётов [13], средняя масса неиспользованной дефектной кожи, образующейся на кожевенном предприятии в течение одного производственного цикла, может достигать 3,5–4 тонн, из которых не менее половины отправляется на захоронение.

Альтернативный подход, предполагающий повторную финишную отделку с применением полиуретановых и акрилатных композиций, повышает коммерческую ценность материала, но ухудшает его паропроницаемость и биоразлагаемость. Кроме того, химическая дообработка снижает гигиеническую безопасность обуви и влечёт за собой увеличение углеродного следа, связанного с синтезом и транспортировкой компонентов финишной отделки. В этом контексте предложенная технология плазменной модификации позволяет значительно смягчить негативное воздействие на окружающую среду.

Сравнительный анализ трёх сценариев обращения с кожей с дефектами – захоронение, химическая

корректировка и плазменная регенерация – показывает, что ННТП-обработка обеспечивает наиболее благоприятный экологический профиль. Благодаря отсутствию агрессивных веществ, низкому уровню остаточного загрязнения, повторному использованию исходного сырья и повышению эксплуатационного ресурса изделий, снижается общий объём отходов и замедляется темп потребления природных ресурсов. Учитывая, что срок службы обуви из плазменно-модифицированной кожи увеличивается в среднем на 30–40 % по сравнению с изделием из исходного низкосортного материала, можно говорить о снижении частоты покупок, объёма текстильных и кожаных отходов и логистических издержек.

На уровне жизненного цикла предложенная технология трансформирует отход в полноценный ресурс, создавая условия для реализации принципов экономики замкнутого цикла (Circular Economy). Она позволяет минимизировать воздействие на окружающую среду без ущерба для качества продукции и экономических показателей предприятия. В условиях растущего дефицита высококачественного сырья и ужесточающихся требований к углеродной отчётности такие решения становятся не только желательными, но и необходимыми для устойчивого развития кожевенно-обувной отрасли.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённое исследование показало, что устранение дефектов лицевой поверхности низкосортной натуральной кожи с использованием низкотемпературной низкоэнергетической плазменной модификации (ННТП) позволяет существенно улучшить не только эстетические, но и эксплуатационные характеристики обуви. Установлено, что при двукратной обработке комплексного материала заготовки верха обуви в условиях ВЧИ и ВЧЕ разрядов наблюдаются значительные изменения физико-механических свойств, включая повышение предела прочности при растяжении, адгезии, устойчивости к многократному изгибу и снижению проявления таких дефектов, как отдушистость и отмин. Визуальный анализ опытных образцов в процессе носки подтвердил устойчивость модифицированной поверхности к образованию морщин, трещин и потёртостей, что особенно важно для повышения потребительской удовлетворённости и эстетического восприятия обуви.

В условиях дефицита кожевенного сырья и роста требований к экологической ответственности производства, предложенный способ позволяет повысить степень использования низкосортных материалов, снизить процент брака и отходов, а также реализовать принципы устойчивого развития и экономики замкнутого цикла. Плазменная модификация не требует применения токсичных реагентов, не нарушает гигиенические характеристики кожи и обеспечивает стабильность полученного результата при промышленном тиражировании.

Результаты исследования подтверждают перспективность применения ННТП для повышения качества обуви из натуральной кожи и расширения сферы использования ранее трудно применимого кожевенного сырья. В дальнейшем предполагается разработка детализированной модели управления режимами плазменной обработки в зависимости от характеристик исходного материала и требований к готовой обуви, а также проведение ресурсно-экономической оценки внедрения технологии на предприятиях обувной отрасли.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Богомолова И.П., Кривенко Е.И., Попов В.Н. Роль и особенности ресурсосберегающих процессов в современных условиях хозяйствования национальной экономики и реализации государственных стратегических инициатив // Экономика и управление: проблемы, решения. 2020. Т. 2. N 11. С. 4–15.
2. Navarro D., Wu J., Lin W., Fullana-i-Palmer P., Puig R. Life cycle assessment and leather production // Journal of Leather Science and Engineering. 2020. V. 2. P. 1–13.
3. Joseph K., Nithya N. Material flows in the life cycle of leather // Journal of Cleaner Production. 2009. V. 17. N 7. P. 676–682.
4. Sundar V.J., Raghavarao J., Muralidharan C., Mandal A.B. Recovery and utilization of chromium-tanned proteinous wastes of leather making: a review // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2011. V. 41. N 22. P. 2048–2075.
5. Thanikaivelan P., Rao J.R., Nair B.U., Ramasami T. Recent trends in leather making: processes, problems, and pathways // Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 2005. V. 35. N 1. P. 37–79.
6. Кулевцов Г.Н., Вознесенский Э.Ф., Абдуллин И.Ш. Сокращение структурных дефектов в производстве кожи при использовании плазменной технологии // Вестник Казанского технологического университета. 2010. N 11. С. 571–572.
7. Чурсин В.И. Технологические и экологические аспекты кожевенного производства // сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Современные задачи инженерных наук», Москва, 11–12 октября, 2017. С. 25–29.
8. Абдуллин И.Ш., Кулевцов Г.Н., Жуковская Т.В. Улучшение механических характеристик натуральных обувных кож в результате воздействия неравновесной низкотемпературной плазмы // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. N 20. С. 70–71.
9. Кулевцов Г.Н., Жуковская Т.В. Получение нового кожевенного материала и исследование его технологических свойств для получения качественной обуви // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. N 8. С. 176–178.
10. Тихонова Н.В. Абдуллин И.Ш., Махоткина Л.Ю., Жуковская Т.В. Разработка технологии производства обуви с верхом из низкосортной натуральной кожи с использованием ВЧ-плазмы пониженного давления // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. N 5. С. 67–68.
11. Тихонова Н.В., Жуковская Т.В., Абдуллин И.Ш., Махоткина Л.Ю. Применение неравновесной низкотемпературной плазмы для повышения качества комплексного обувного материала на основе низкосортной натуральной кожи // Вестник Казанского технологического университета. 2011. N 22. С. 28–30.
12. Абдуллин И.Ш., Мухаметшин А.М., Красина И.В. Применение плазменного метода модификации свойств высокомолекулярных материалов в производстве натуральных кож // Вестник Казанского технологического университета. 2004. N 1. С. 383–387.
13. Rivel B., Moreira M.T., Bornhardt C., Méndez R., Feijoo G. Life cycle assessment as a tool for the environmental improvement of the tannery industry in developing countries // Environmental science & technology. 2004. V. 38. N 6. P. 1901–1909.

REFERENCES

1. Bogomolova I.P., Krivenko E.I., Popov V.N. The role and features of resource-saving processes in the modern conditions of managing the national economy and implementing state strategic initiatives. *Ekonomika i upravlenie: problemy, resheniya* [Economy and Management: Problems, Solutions]. 2020, vol. 2, no. 11, pp. 4–15. (In Russian)
2. Navarro D., Wu J., Lin W., Fullana-i-Palmer P., Puig R. Life cycle assessment and leather production. *Journal of Leather Science and Engineering*, 2020, vol. 2, pp. 1–13.
3. Joseph K., Nithya N. Material flows in the life cycle of leather. *Journal of Cleaner Production*, 2009, vol. 17, no. 7, pp. 676–682.
4. Sundar V.J., Raghavarao J., Muralidharan C., Mandal A.B. Recovery and utilization of chromium-tanned proteinous wastes of leather making: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2011, vol. 41, no. 22, pp. 2048–2075.
5. Thanikaivelan P., Rao J.R., Nair B.U., Ramasami T. Recent trends in leather making: processes, problems, and pathways. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2005, vol. 35, no. 1, pp. 37–79.
6. Kulevtsov G.N., Voznesensky E.F., Abdullin I.Sh. Reduction of structural defects in leather production using plasma technology. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University]. 2010, no. 11, pp. 571–572. (In Russian)
7. Chursin V. I. Tekhnologicheskie i ekologicheskie aspekty kozhevennogo proizvodstva [Technological and environmental aspects of leather production]. *Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo simpoziuma «Sovremennye zadachi inzhenernykh nauk»*,

Moskva, 11–12 oktyabrya, 2017 [Collection of scientific papers of the International Scientific and Technical Symposium “Modern Problems of Engineering Sciences”, Moscow, October 11–12, 2017]. Moscow, 2017, pp. 25–29. (In Russian)

8. Abdullin I.Sh., Kulevtsov G.N., Zhukovskaya T.V. Improvement of mechanical characteristics of natural shoe leather as a result of exposure to nonequilibrium low-temperature plasma *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University]. 2014, vol. 17, no. 20, pp. 70–71. (In Russian)

9. Kulevtsov G.N., Zhukovskaya T.V. Obtaining a new leather material and studying its technological properties for producing high-quality footwear. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University]. 2015, vol. 18, no. 8, pp. 176–178. (In Russian)

10. Tikhonova N.V., Abdullin I.Sh., Makhotkina L.Yu., Zhukovskaya T.V. Development of a technology for producing footwear with an upper made of low-grade genuine leather using low-pressure RF plasma. *Vestnik*

Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of the Kazan Technological University]. 2013, vol. 16, no. 5, pp. 67–68. (In Russian)

11. Tikhonova N.V., Zhukovskaya T.V., Abdullin I.Sh., Makhotkina L.Yu. Application of nonequilibrium low-temperature plasma to improve the quality of complex shoe material based on low-grade natural leather. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University]. 2011, no. 22, pp. 28–30. (In Russian)

12. Abdullin I.Sh., Mukhametshin A.M., Krasina I.V. Application of the plasma method for modifying the properties of high-molecular materials in the production of natural leather. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan Technological University]. 2004, no. 1, pp. 383–387. (In Russian)

13. Rivela B., Moreira M.T., Bornhardt C., Méndez R., Feijoo G. Life cycle assessment as a tool for the environmental improvement of the tannery industry in developing countries. *Environmental science & technology*, 2004, vol. 38, no. 6, pp. 1901–1909.

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА

Татьяна В. Жуковская собрала данные, проанализировала результаты экспериментов и подготовила рукопись. Лилия Р. Ханнанова-Фахрутдинова разработала научную концепцию и корректировала рукопись до подачи в редакцию. Гузель И. Гарипова и Лейсан Р. Фатхуллина провели экспериментальные исследования и описали их. Все авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут ответственность при обнаружении плагиата, самоплагиата или других неэтических проблем.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Tatiana V. Zhukovskaya collected data, analysed the experimental result and prepared the manuscript. Liliya R. Khannanova-Fakhrutdinova developed the scientific concept and corrected the manuscript before submission to the Editor. Guzel I. Garipova and Leysan R. Fatkhullina conducted the experimental studies and described them. All authors have equally participated in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism, self-plagiarism and other ethical transgressions.

NO CONFLICT OF INTEREST DECLARATION

The authors declare no conflict of interest.

ORCID

Татьяна В. Жуковская / Tatiana V. Zhukovskaya <https://orcid.org/0000-0002-4006-6691>

Лилия Р. Ханнанова-Фахрутдинова / Liliya R. Khannanova-Fakhrutdinova <https://orcid.org/0000-0003-3478-7369>

Гузель И. Гарипова / Guzel I. Garipova <https://orcid.org/0000-0002-8432-2044>

Лейсан Р. Фатхуллина / Leysan R. Fatkhullina <https://orcid.org/0000-0002-5861-6487>