

ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

УДК 685.34.01

DOI 10.55421/3034-4689_2026_29_3_159

С. Ш. Керимова, И. Р. Татарчук, Е. В. Литвин,
Н. В. Тихонова

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ОБУВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Ключевые слова: обувная промышленность; конструкторско-технологическая подготовка производства; 3D-сканирование; компьютерное зрение; распознавание дефектов; раскрой; оптимизация.

Цифровая трансформация обувной промышленности повышает требования к скорости разработки моделей, точности конструкторских данных и управлению материальными потерями на раскройных операциях. При этом классические системы автоматизированного проектирования в значительной степени упрощают построение конструкции и деталей, а также выпуск документации, но ограниченно поддерживают гибкое проектирование, анализ производственных данных и контроль качества. В работе предложена методика внедрения модулей искусственного интеллекта в процесс конструкторско-технологической подготовки производства обуви: от обработки 3D-данных колодки или стопы и построения конструкции деталей до технологий компьютерного зрения для оценки качества материалов и совершенствования алгоритмов раскроя с учетом дефектов материалов и их технологических ограничений. Описаны источники данных, правила их унификации и подготовки, архитектура решения, показатели эффективности, а также принципы верификации и протоколирования данных для воспроизводимости результатов. Методика предназначена для поэтапного расширения существующих на предприятии систем автоматизированного проектирования, без их замены. Внедрение методики на опытном производстве показало увеличение коэффициента использования материала на 4,4 % и сокращение времени подготовки данных для раскроя на 14,3 %.

S. Sh. Kerimova, I. R. Tatarchuk, E. V. Litvin,
N. V. Tikhonova

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES FOR THE AUTOMATION OF DESIGN AND TECHNOLOGICAL PRE-PRODUCTION IN THE FOOTWEAR INDUSTRY

Keywords: footwear industry; design and technological pre-production; 3D scanning; computer vision; defect detection; nesting; optimization.

The digital transformation of the footwear industry is increasing the demands on the speed of model development, the accuracy of design data, and the management of material waste in cutting operations. However, classical computer-aided design (CAD) systems largely automate the construction of patterns and components, as well as the output of documentation, but they offer limited support for flexible design, production data analysis, and quality control. This paper proposes a methodology for integrating artificial intelligence modules into the design and technological pre-production process for footwear: ranging from the processing of 3D last or foot data and the construction of component patterns, to computer vision technologies for assessing material quality and improving nesting algorithms while accounting for material defects and their technological constraints. The paper describes the data sources, the rules for their unification and preparation, the solution architecture, performance indicators, as well as the principles of data verification and logging to ensure the reproducibility of results. The methodology is intended for the gradual enhancement of existing enterprise CAD systems, without replacing them. The implementation of this methodology in a pilot production run demonstrated an increase in the material utilization rate by 4.4% and a reduction in data preparation time for cutting by 14.3%.

Введение

Современная лёгкая промышленность переходит от локальной автоматизации отдельных операций к построению сквозных цифровых контуров, где конструкторские решения, технологические ограничения, качество материалов и фактические данные производства связаны единым набором моделей и регламентов. В обувной отрасли ключевыми «узкими местами» остаются: (1) перевод формы колодки и верха обуви в корректные плоские детали с учетом деформаций пакета материалов; (2) вариативность качества натуральных материалов и необходимость учитывать дефекты при их раскрое; (3) высокая доля ручного

труда; (4) слабая формализация накопленного производственного опыта в виде баз знаний для их всестороннего анализа.

Исследования по 3D-сканированию стопы и методам оценки ее сложной формы подтверждают практическую значимость перехода к объективным 3D-данным, но также указывают на важность корректной методологии измерений и сопоставимости данных [1–3]. Работы по кастомизации колодок с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР или CAD) показывают, что автоматизированная параметризация и локальная деформация базовой колодки позволяют поддерживать индивидуализацию при со-

хранении производственных стандартов [4, 5]. Параллельно развивается контур цифрового прототипирования как инструмент снижения итераций экспериментального производства [6].

Цель данного исследования – разработать методику внедрения модулей на основе технологий искусственного интеллекта (ИИ) в конструкторско-технологическую подготовку производства (КТПП) обуви, обеспечивающую автоматизацию рутинных операций, повышение точности конструкторских данных, снижение материальных потерь и формирование воспроизводимой среды принятия решений на основе данных.

В работе под разверткой понимается перевод поверхности колодки или детали обуви в плоский вид с учетом деформаций материала и требований технологичности. Слабо криволинейным участком считается зона поверхности с минимальной кривизной, допускающая раскрой без деления на сегменты. Аппроксимация контура трактуется как построение математической кривой по дискретным точкам для точного описания формы детали, при этом в практике проектирования используются NURBS-кривые (Non-uniform rational B-spline) и сплайны как универсальный инструмент задания контуров лекал. Коэффициент использования материала интерпретируется как отношение суммарной площади деталей к площади раскраиваемого материала, выраженное в процентах. Протоколирование определяется как систематическая запись параметров и результатов всех этапов работы, обеспечивающая повторяемость расчетов и аудит качества.

Материалы и методы исследования

Современное проектирование обуви опирается на комплекс цифровых средств, которые охватывают всю конструкторско-технологическую подготовку производства. На уровне базовой инженерной автоматизации предприятия используют специализированные САПР-решения: отечественные и зарубежные САПР для построения и отработки цифровых конструкций, а также модули для формирования технологической документации, подготовки раскроя и передачи данных на оборудование. В современной практике встречаются системы двухмерного проектирования лекал, платформы, объединяющие 2D и 3D-моделирование с визуализацией изделия, а также интегрированные решения, в которых трехмерная модель используется как основа для автоматического получения 2D-разверток, градации по размерам и формирования производственных документов. Функционально такие комплексы обеспечивают построение деталей верха обуви, и передачу на автоматизированные раскройные комплексы. Вместе с тем традиционные САПР в обувной промышленности, как правило, решают ограниченный круг задач моделирования и выпуска документации и не обеспечивают интеллектуальной оптимизации и анализа производственных данных; недостаточной остается также их гибкость к изменяющимся параметрам изделия и учету физико-механических свойств материалов при принятии конструкторских решений.

Следующим важным компонентом цифрового контура выступают системы трехмерного сканирования и измерения, которые применяются для точного моделирования колодок и получения индивидуальных параметров стопы [1–3]. Используются как стационарные решения промышленного класса, так и портативные устройства для индивидуального изготовления ортопедической обуви, при этом программные средства анализа 3D-моделей обеспечивают извлечение антропометрических признаков, сопоставление с эталонными колодками и подготовку данных для параметризации конструкций.

Значимую роль в автоматизации КТПП играют модули компьютерного зрения, ориентированные на повышение объективности контроля качества материалов и их раскроя [11–14]. Такие модули применяются для автоматического выявления дефектов поверхности по фотоизображениям, сегментации материала по зонам качества и формирования входных данных для раскладки с учетом расположения пороков. Практически целесообразно обучать систему на фотографиях материалов, предварительно размеченных специалистами входного контроля: это повышает точность распознавания и позволяет адаптировать модели к особенностям конкретного предприятия, оборудования и номенклатуры материалов.

Особое место занимают алгоритмы оптимизации раскроя, которые автоматизируют раскладки деталей на материале с учетом технологических и качественных ограничений и формируют данные для передачи на раскройные комплексы [7–10]. В расчетах учитываются ориентация деталей по направлению анизотропии материала, парность и симметрия деталей, минимальные технологические зазоры, а также зоны дефектов. Для решения задачи применяются методы дискретной оптимизации и эвристические подходы, включая генетические алгоритмы и процедуры локального улучшения, поскольку задача раскладки относится к вычислительно сложным.

Завершающим элементом интеллектуального контура выступают модули предиктивного анализа и дообучения, которые обеспечивают накопление и использование производственного опыта предприятия на основе данных из САПР, систем управления производством и корпоративных баз данных. Такие модули позволяют отслеживать изменения цифровых конструкций, сопоставлять результаты испытаний опытных партий с параметрами моделей и на этой основе уточнять правила оптимизации конструкции. Принципиально важно, что интеллектуальная автоматизация не предполагает замены существующей нормативно-технической базы: напротив, она должна интегрироваться с технологическими картами, маршрутными листами, картами раскроя, спецификациями деталей, общепринятыми стандартами и внутренними регламентами. В результате создаются предпосылки для формирования единого цифрового контура управления качеством, в котором конструкторские решения, технологические ограничения и результаты производственного контроля связаны общими данными и протоколами.

Разрабатываемая методика ориентирована на автоматизацию получения разверток деталей верха

обуви на основе цифровой 3D-модели колодки с учетом геометрических параметров и конструктивных особенностей изделия, на оптимизацию схем раскроя с учетом дефектов и направления анизотропии структуры материала, а также на параметрическую корректировку конструкций в соответствии с индивидуальными антропометрическими параметрами стопы. Дополнительно методика предусматривает контроль технологичности конструкции на ранних этапах разработки, когда ошибки и несоответствия еще не приводят к затратам на итерациях опытного производства.

Рассмотрим пример исследовательской платформы мультимодального ИИ, способной обрабатывать текстовые, графические и визуальные данные и интегрироваться с CAD/CAM-системами. При этом методологически существенными остаются не брендовые особенности среды, а наличие инструментов машинного обучения, поддержки мультимодальных данных и интерфейсов интеграции.

Оценка эффективности внедряемой методики опирается на несколько групп показателей. Во-первых, анализируется геометрическая точность лекал и контуров деталей, формируемых для раскроя, через среднюю абсолютную погрешность по контрольным точкам, а также через показатели расхождения контуров по критическим участкам. Во-вторых, оценивается коэффициент использования материала как интегральная характеристика рациональности раскладки и снижения отходов. В-третьих, технологичность конструкции рассматривается как соответствие требованиям по припускам, минимальным радиусам сопряжений, допустимым зонам швов и другим ограничениям, закрепленным в технологических картах и нормативной документации. Наконец, сравнивается длительность проектного цикла, включающего разработку цифровых конструкций, формирование лекал, подготовку карт раскроя и выпуск технологической документации, что позволяет количественно оценить эффект автоматизации по времени.

Реализация автоматизации предполагает строгий учет условий проектирования, с учетом анизотропных свойств материала, минимальных зазоров между деталями при раскладке, а также факторов, связанных с производственной оснасткой, оборудованием и маршрутами. Эти ограничения рассматриваются как часть единого контура верификации, поскольку именно формализованное задание технологических условий обеспечивает устойчивость проектных решений при переходе от цифровой модели к физическому производству и снижает вероятность ошибок на последующих этапах.

Эффективность автоматизации КТПП определяется качеством исходных данных и степенью их унификации. В качестве входной информации используются трехмерные модели колодок в распространенных форматах, полученные путем лазерного или фотограмметрического сканирования либо из цифровых каталогов предприятия, а также комплекты деталей и конструкций существующих моделей обуви в обменных форматах. Для задач компьютерного зрения привлекаются фотографии натуральных и синтетических материалов, на которых дефекты размечены специалистами отдела технического контроля

(ОТК) на входе. Дополнительно используются журналы качества и отчеты о производстве, включающие сведения о фактическом расходе материалов, времени выполнения операций, количестве доработок и доле брака. Существенную роль играют технологические карты и маршрутные листы, где фиксируются нормы припусков, правила ориентации деталей, запретные зоны для швов и минимально допустимые радиусы; в методике также учитываются положения стандартов и технических условий, регламентирующие параметры конструкции и качества изделий.

Для обеспечения корректной работы алгоритмов данные приводятся к единому формату. На уровне 3D-информации выполняются унификация единиц измерения и систем координат, очистка моделей от артефактов и исправление ошибок сетки с последующим выравниванием ориентации. Для изображений материалов проводится согласование схем разметки дефектов и запретных зон, а также контроль качества разметки. Отдельное внимание уделяется сопоставлению архивных лекал и актуальных 3D-моделей колодок, поскольку в имеющихся на предприятии данных нередко присутствуют несогласованности, способные ухудшать качество обучения и точность последующей автоматизации.

При недостаточном объеме данных применяется контролируемое расширение набора. Для изображений используется вариативность освещенности и шумов, что повышает устойчивость распознавания; для 3D-данных допускается генерация вариаций формы колодок в пределах производственной рациональности, однако такие операции выполняются только при строгом соблюдении технологических правил.

Обсуждение результатов

Предлагаемое решение представляет собой модульную систему, интегрирующую методы компьютерного зрения, геометрического моделирования и оптимизации для автоматизации проектирования обуви. Ядро системы составляют последовательные модули, каждый из которых решает специфическую задачу технологической цепочки.

Исходным этапом является модуль сегментации конструктивных зон изделия, предназначенный для автоматического выделения панелей и зон верха обуви (союзки, берцев и др.) на основе 3D-геометрии или изображений модели. Его реализация базируется на современных сегментационных моделях, таких как U-Net-подобные архитектуры для семантической сегментации или подходы типа Mask R-CNN в случае необходимости экземплярной сегментации [15, 16]. Для промышленного применения критически важны устойчивость моделей к зашумленным данным и способность формировать интерпретируемые маски.

Далее в процесс включается модуль распознавания дефектов материала и построения карты качества. Его задача – автоматическое выявление, классификация дефектов кожи или текстильных материалов и формирование итоговой карты допустимых и недопустимых для раскроя зон. Применяемый подход варьируется в зависимости от доступности данных: при наличии репрезентативной размеченной выборки ис-

пользуется контролируемая сегментация, а в условиях недостатка примеров дефектов – методы обнаружения аномалий (anomaly detection) [14]. В качестве общепризнанного эталона для валидации подобных подходов широко используется набор данных MVTec AD [14].

Следующий модуль автоматизирует нанесение конструктивных и технологических линий, расчёт припусков, насечек и контрольных меток. Основу реализации составляют детерминированные правила (rule-based системы), извлеченные из технологических карт, и параметрические зависимости, дополненные автоматизированными проверками (минимальные радиусы, расстояния, запретные зоны). Искусственный интеллект здесь играет роль рекомендательной системы, выявляя потенциально проблемные участки на основе статистики прошлых корректировок и формируя подсказки для конструктора.

Модуль развертки 3D-поверхностей в 2D-детали отвечает за преобразование трехмерных поверхностей деталей верха в плоские детали с учётом допустимых деформаций и механических свойств материалов. Принцип работы основан на комбинации геометрических методов развертки с компенсацией деформаций, которая осуществляется с помощью эмпирических коэффициентов усадки и растяжения, привязанных к ориентации и толщине пакета материалов. Результатом работы модуля является 2D-детали, контуры которых дополнены атрибутами технологических ограничений, такими как припуски, линии швов и контрольные точки.

Центральным элементом системы, непосредственно влияющим на экономическую эффективность, является модуль оптимизации раскладки, цель которого - минимизация отходов материала при строгом соблюдении технологических ограничений. Математическая природа данной задачи относится к классу нерегулярного раскроя (упаковки сложных контуров), и ее практические решения опираются на эвристические и метаэвристические алгоритмы [7–10]. При работе с кожевенными материалами задача усложняется необходимостью учета зон дефектов и неоднородности качества, что требует многокритериальной оптимизации для максимизации выхода годных деталей с ограничениями по долевого направлению, парности и зазорам. Исследования в области автоматизации раскладки для обувной промышленности показывают, что гибридные подходы способны значительно ускорить расчёт и повышать эффективность использования материала по сравнению с ручными методами при условии корректной формализации всех производственных ограничений [8].

Завершающим звеном, обеспечивающим переход к индивидуальному производству, выступает модуль персонализации лекал. Его назначение – адаптация базовой модели обуви под уникальные параметры стопы конкретного человека. Методология заключается в сопоставлении набора признаков стопы, полученных из 3D-скана, с параметрами базовой колодки с последующей контролируемой деформацией (глобальная градация и локальные корректировки) [4, 5]. Формируемый протокол изменений направляется на

утверждение конструктору. Практические исследования подтверждают применимость автоматического извлечения размерных признаков стопы и САД-кастомизации колодки для поддержки задач производства индивидуальной обуви [5].

Алгоритм функционирования системы предполагает поэтапную обработку входных данных. На первом этапе выполняется идентификация ключевых точек и конструктивных зон модели, что создает основу для построения панелей и линий членения. Далее система автоматически формирует конструктивные и технологические линии на цифровых лекалах, включая линии разреза, сгиба, соединений, припуски и контрольные метки. После этого выполняется развертка поверхностей деталей верха обуви в плоские лекала с учетом компенсации деформаций и анизотропии пакета материалов. Следующим шагом является оптимизация раскладки деталей на материале с учетом анизотропии, дефектов, парности и ограничений технологической оснастки; по результатам формируется карта раскроя и отчет о коэффициенте использования материала. Завершается процесс выпуском комплектов цифровых лекал в обменных форматах, формированием карты раскроя и ведомостей для передачи в производство.

Несмотря на автоматизацию, завершающая проверка ОТК является обязательной, при этом оценивают геометрию критических зон, плавность контуров, корректность припусков и сопряжений и при необходимости выполняют локальные корректировки с последующим обновлением связанной документации. Для обеспечения воспроизводимости и аудита качества все этапы обработки сопровождаются протоколированием: фиксируются версии модулей, параметры расчетов, идентификаторы исходных данных, дата, время и ответственный исполнитель. Такой подход обеспечивает возможность повторного расчета при изменении исходных условий, поддерживает регрессионные проверки при обновлениях и формирует надежную базу для валидации и улучшения алгоритмов.

Для объективной оценки эффективности и точности системы проектирования реализована комплексная процедура контроля качества и валидации, охватывающая ключевые технологические этапы.

Геометрическая точность лекал является фундаментальным критерием, оценка которого выполняется в САД-среде путем сопоставления сгенерированных лекал с эталонными образцами, утвержденными моделями и протоколами замеров. Количественная оценка проводится по ряду метрик: средняя абсолютная ошибка (MAE) (табл.1) или среднее абсолютное процентное отклонение (САП) по контрольным точкам и длинам; среднеквадратическая ошибка (RMSE) или стандартное отклонение (СКО) для сегментов контура; а также доля расхождений, превышающих установленные производственные допуски.

Ключевым экономическим показателем является качество раскроя и использование материала. Он оценивается через коэффициент использования материала (КИМ) (табл.2), строгость соблюдения доле-

вого направления и ориентации деталей, а также соответствие минимальным технологическим зазорам. Особое внимание уделяется контролю доли деталей, при раскладке попавших в дефектные зоны материала, значение которой должно стремиться к нулю. Методически задача оптимизации раскроя относится к классу нерегулярной упаковки сложных контуров, где высокое качество решений обеспечивается корректным геометрическим представлением и применением специализированных эвристических алгоритмов [7–10].

Точность распознавания дефектов материала определяется стандартными для задач компьютерного зрения метриками. Для задач классификации и

детекции дефектов используются параметры precision (точность), recall (полнота) (табл. 3) и их сводная мера F1-score. Для оценки качества сегментации дефектных областей применяются метрики Intersection over Union (IoU) и Dice coefficient. Важным аспектом валидации является проверка устойчивости моделей к доменному сдвигу (domain shift), то есть к изменениям в партиях материала или условиях съемки. Согласно публикациям, глубокие сверточные нейронные сети демонстрируют высокую применимость для распознавания дефектов кожи при условии наличия релевантной размеченной обучающей выборки и четких регламентов качества [15–17].

Таблица 1 - Сравнение метрик качества развертки MAE (средняя абсолютная ошибка) для предложенного метода и эталонного (ручного или существующего CAD)

Table 1 - Comparison of MAE (Mean Absolute Error) unfolding quality metrics between the proposed method and the reference method (manual/CAD-based)

Объект исследования	MAE раскройных систем фирмы Эмма (Италия)	MAE раскройных систем фирмы Атом (Италия)	MAE предлагаемой системы ИИ
Выросток для верха обуви	16	9	2
Кожа яловая подкладочная	11	15	4
Кожа верха обуви нубук	13	6	2
Шевро для верха	19	7	3
Кожа хромовая гладкая (яловка для верха обуви)	19	11	6

Таблица 2 - Сравнение КИМ и времени расчета одной раскладки для алгоритма раскладки ИИ и САПР раскройной системы АТОМ на наборе из числа реальных заказов

Table 2 - Comparison of material utilization and computation time per nesting layout between the AI-based algorithm and the ATOM CAD nesting system on a set of real production orders

Заказы	Показатели раскладки для ИИ		Показатели для раскройных систем фирмы АТОМ (Италия)	
	КИМ	Время расчета (сек)	КИМ	Время расчета (сек)
250 пар полуботинок мужских конструкции верха типа «Конверт»	70	13	64	15
1000 пар детских чешек	72	10	68	11
300 пар полусапог женских с конструкцией типа «Челси»	69	18	67	18
100 пар сапог женских типа «3/4»	65	21	60	27
500 пар полуботинок мужских с настроенной союзкой	68	15	61	17

Таблица 3 - Результаты работы модуля распознавания дефектов (Recall) на тестовой выборке

Table 3 - Performance of the Defect Detection Module on the Test Set (Recall)

Объект исследования	Результаты работы модуля распознавания дефектов (Recall)
Выросток для верха обуви	Не обнаружены дефекты тиснения плитой
Кожа яловая подкладочная	Не обнаружены дефекты выраженной разнооттеночности по коже
Кожа верха обуви нубук	6% свищей не идентифицированы
Шевро для верха	Дефект отмина не обнаружен
Кожа хромовая гладкая (яловка для верха обуви)	Все дефекты обнаружены

Заключительным и наиболее значимым этапом являются испытания на опытных производственных партиях. В ходе апробации оцениваются интегральные производственные показатели: качество посадки заготовки верха на колодку, количество требуемых

корректировок на этапе сборки и доля конструктивного брака, выявленного при примерке и окончательном осмотре. Для обеспечения возможности анализа все полученные результаты строго связываются с конкретными версиями конструкции и параметрами

расчета через систему протоколирования, создающую полный цифровой след каждого проекта.

Эффективность внедрения методики автоматизации проектирования обуви определяется не только качеством алгоритмов, но и корректной организацией взаимодействия специалистов. Конструктор формирует и утверждает исходные данные, подтверждает ключевые линии и контролирует точность лекал в критических зонах, тогда как технолог обеспечивает соответствие проектных решений производственному маршруту, оборудованию и действующим регламентам. ОТК отвечает за подтверждение качества материалов, проверку карт раскроя и оценку опытных партий, фиксируя результаты в протоколах. Сопровождение наборов данных, правил разметки и метрик качества относится к зоне ответственности специалиста по данным и инженера машинного обучения, а количественная оценка эффекта автоматизации по времени цикла и расходу материалов поддерживается нормировщиком. Такое распределение функций обеспечивает прозрачность принятия решений и позволяет сохранить обязательный контроль на ключевых этапах, что принципиально важно для соответствия изделий стандартам и устойчивости качества.

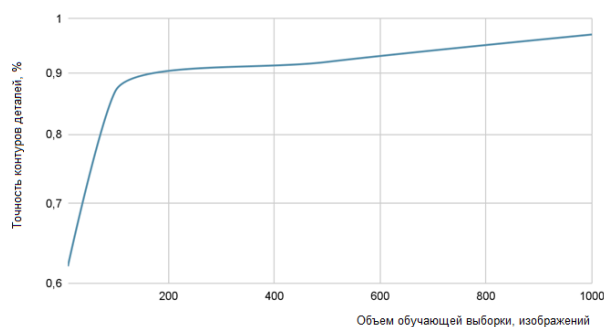


Рис. 1 – Зависимость точности контуров от объема обучающих данных (learning curve) для одного из ML-модулей

Fig. 1 – Contour accuracy as a function of training data volume (learning curve) for one of the ML modules

Воспроизводимость результатов достигается за счет версионирования данных и алгоритмов, протоколирования операций и регрессионного тестирования при обновлении модулей. Корректировки, вносимые конструктором и технологом, рассматриваются как ценный источник обратной связи и могут использоваться для дообучения моделей, повышая точность решений при накоплении производственного опыта (рис. 1). При этом политика безопасности данных предусматривает разграничение доступа и недопущение публикации коммерчески чувствительных сведений, включая внутренние технологические карты с конкретными допусками и параметрами, а также частные настройки эвристик оптимизации. Отдельно учитывается защита персональных данных клиентов, в том числе 3D-сканов стоп [18], которые должны обрабатываться в рамках действующего законодательства и внутренних регламентов предприятия.

Заключение

Предложенная методика интеграции ИИ-модулей в КТПП обуви обеспечивает переход от локальной автоматизации к сквозному цифровому контуру проектирования, раскроя и контроля качества. Подход ориентирован на практическое внедрение: сохраняется роль экспертного утверждения, формализуются технологические ограничения, вводятся протоколирование и регрессионные проверки, обеспечивающие воспроизводимость и управляемость развития системы. Использование 3D-данных и САД-кастомизации поддерживает индивидуализацию, а компьютерное зрение и алгоритмы укладываемости позволяют учитывать вариативность качества материалов и снижать потери при раскрое. Дальнейшая работа направлена на расширение корпоративных данных, стандартизацию разметки дефектов и накопление производственных критериев качества для устойчивого дообучения моделей. Внедрение предложенной системы позволило повысить КИМ в среднем на 4,4 %, снизить время проектного цикла на 14,3 %, а точность разметки дефектов достигла 98% по метрике Recall.

Литература

1. Telfer S., Woodburn J. *Journal of foot and ankle research*, 3(1). 19, (2010). DOI: 10.1186/1757-1146-3-19.
2. Farhan M., Wang J.Z., Bray P., Burns J., Cheng T.L. *Journal of Foot and Ankle Research*, 14(1), 2 (2021). DOI: 10.1186/s13047-020-00442-8.
3. Allan J.J., Munteanu S.E., Bonanno D.R., Buldt A.K., Chopin S., Bullas A., Menz H.B. *Journal of Foot and Ankle Research*, 16(1), 24 (2023). DOI: 10.15221/23.25.
4. Luximon A., Luximon Y. *Computers in Industry*, 60(8), 621-628(2009). DOI: 10.1016/j.compind.2009.05.015.
5. Xiong S., Zhao J., Jiang Z., Dong M. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46(1), 11-19 (2010). DOI: 10.1007/s00170-009-2087-7.
6. Jimeno-Morenilla A., Sánchez-Romero J. L., Salas-Pérez, F. *Computers in Industry*, 64(9), 1371-1382 (2013). DOI: 10.1016/j.compind.2013.06.008.
7. Crispin A., Clay P., Taylor G., Bayes T., Reedman D. *Applied Intelligence*, 23(1), 9-20 (2005).
8. Aguilar-Tortosa E., Duta-Costache E.A., Vera-Brazal E., Sánchez-Romero J.L., Gómez-Hernández J.F., Jimeno-Morenilla A., Maciá-Lillo A. *Applied Sciences*, 15(1), 320 (2024). DOI:10.3390/app15010320.
9. Bennell J.A., Oliveira J.F. *European journal of operational research*, 184(2), 397-415 (2008). DOI:10.1016/j.ejor.2006.11.038.
10. Baldacci R., Boschetti M. A., Ganovelli M., Maniezzo V. *Discrete Applied Mathematics*, 163, 17-33 (2014). DOI:10.1016/j.dam.2012.03.026.
11. Chen Z., Deng J., Zhu Q., Wang H., Chen Y. *Electronics*, 11(15), 2383 (2022). DOI:10.3390/electronics11152383.
12. Banduka N., Tomić K., Živadinović J., Mladineo M. *Processes*, 12(12), 2892 (2024). DOI: 10.3390/pr12122892.
13. Aslam M., Khan T.M., Naqvi S.S., Holmes G. *Journal of the American Leather Chemists Association*, 117(4), 77-80 (2022).
14. Bergmann P., Batzner K., Fauser M., Sattlegger D., Steger C. *International Journal of Computer Vision*, 129(4), 1038-1059 (2021). DOI: 10.1007/s11263-020-01400-4.
15. Wang H., Cao P., Yang J., Zaiane O. *Health information science and systems*, 11(1), 10 (2023). DOI: 10.1007/s13755-022-00209-4.

16. Hassan E., El-Rashidy N. *Nile Journal of Communication and Computer Science*, **3**(1), 17-27 (2022).
17. Liu Q., Dong Y., Li X. *Neurocomputing*, **535**, 53-63 (2023). DOI:10.1016/j.neucom.2023.03.006.
18. Kostyleva V.V., Konovalova O.B. *Industry 4.0*, **5**(2), 72-75 (2020).

References

1. Telfer S., Woodburn J. *Journal of foot and ankle research*, **3**(1), 19, (2010). DOI: 10.1186/1757-1146-3-19.
2. Farhan M., Wang J.Z., Bray P., Burns J., Cheng T.L. *Journal of Foot and Ankle Research*, **14**(1), 2 (2021). DOI: 10.1186/s13047-020-00442-8.
3. Allan J.J., Munteanu S.E., Bonanno D.R., Buldt A.K., Choppin S., Bullas A., Menz H.B. *Journal of Foot and Ankle Research*, **16**(1), 24 (2023). DOI: 10.15221/23.25.
4. Luximon A., Luximon Y. *Computers in Industry*, **60**(8), 621-628(2009). DOI: 10.1016/j.compind.2009.05.015.
5. Xiong S., Zhao J., Jiang Z., Dong M. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **46**(1), 11-19 (2010). DOI: 10.1007/s00170-009-2087-7.
6. Jimeno-Morenilla A., Sánchez-Romero J. L., Salas-Pérez, F. *Computers in Industry*, **64**(9), 1371-1382 (2013). DOI: 10.1016/j.compind.2013.06.008.
7. Crispin A., Clay P., Taylor G., Bayes T., Reedman D. *Applied Intelligence*, **23**(1), 9-20 (2005).
8. Aguilar-Tortosa E., Duta-Costache E.A., Vera-Brazal E., Sánchez-Romero J.L., Gómez-Hernández J.F., Jimeno-Morenilla A., Maciá-Lillo A. *Applied Sciences*, **15**(1), 320 (2024). DOI:10.3390/app15010320.
9. Bennell J.A., Oliveira J.F. *European journal of operational research*, **184**(2), 397-415 (2008). DOI:10.1016/j.ejor.2006.11.038.
10. Baldacci R., Boschetti M. A., Ganovelli M., Maniezzo V. *Discrete Applied Mathematics*, **163**, 17-33 (2014). DOI:10.1016/j.dam.2012.03.026.
11. Chen Z., Deng J., Zhu Q., Wang H., Chen Y. *Electronics*, **11**(15), 2383 (2022). DOI:10.3390/electronics11152383.
12. Banduka N., Tomić K., Živadinović J., Mladineo M. *Processes*, **12**(12), 2892 (2024). DOI: 10.3390/pr12122892.
13. Aslam M., Khan T.M., Naqvi S.S., Holmes G. *Journal of the American Leather Chemists Association*, **117**(4), 77-80 (2022).
14. Bergmann P., Batzner K., Fauser M., Sattlegger D., Steger C. *International Journal of Computer Vision*, **129**(4), 1038-1059 (2021). DOI: 10.1007/s11263-020-01400-4.
15. Wang H., Cao P., Yang J., Zaiane O. *Health information science and systems*, **11**(1), 10 (2023). DOI: 10.1007/s13755-022-00209-4.
16. Hassan E., El-Rashidy N. *Nile Journal of Communication and Computer Science*, **3**(1), 17-27 (2022).
17. Liu Q., Dong Y., Li X. *Neurocomputing*, **535**, 53-63 (2023). DOI:10.1016/j.neucom.2023.03.006.
18. Kostyleva V.V., Konovalova O.B. *Industry 4.0*, **5**(2), 72-75 (2020).

© **С. Ш. Керимова** – Инженер конструктор, специалист в области искусственного интеллекта, музыкальный продюсер seo clan54 (при поддержке MTC Music), ex co-founder/gen.prod. RockFam/Rocket Records, ex PR Dir. ZHARA Music & ZHARA FM, Москва, Россия; **И. Р. Татарчук** – доктор технических наук, доцент, академик Российской инженерной академии, лауреат премии правительства России в области науки и техники, заместитель генерального директора по управлению производственным комплексом ЗАО МОФ "Парижская коммуна", Москва, Россия, I_Tatarchuk@parcom.ru. ORCID: 0000-0002-1959-7367; **Е. В. Литвин** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Художественного моделирования, конструирования и технологии изделий из кожи, Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), Москва, Россия, litvin-ev@rguk.ru. ORCID: 0000-0002-8383-8284; **Н. В. Тихонова** – доктор технических наук, доцент, зав. кафедрой «Конструирование одежды и обуви», Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия, TikhonovaNV@corp.knrtu.ru. ORCID: 0000-0002-2241-869X.

© **S. Sh. Kerimova** – Engineer designer, specialist in the field of artificial intelligence, music producer seo clan54 (supported by MTS Music), ex co-founder/gen.prod. RockFam/Rocket Records, ex PR Dir. ZHARA Music & ZHARA FM, Mscow, Russia; **I. R. Tatarchuk** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Associate Professor, Academician of the Russian Academy of Engineering, Winner of the Russian Government Prize in Science and Technology, Deputy General Director for Production Complex Management at ZAO MOF "Parizhskaya Kommuna", Moscow, Russia, I_Tatarchuk@parcom.ru. ORCID: 0000-0002-1959-7367; **E. V. Litvin** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, Docent of the Department of Modeling, Design and Technology of Leather Goods, Kosygin State University of Russia (Technology. Design. Art), Moscow, Russia, litvin-ev@rguk.ru. ORCID: 0000-0002-8383-8284; **N. V. Tikhonova** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Associate Professor, Head of the Department of Clothing and Footwear Design, Kazan National Research Technical University, Kazan, Russia, TikhonovaNV@corp.knrtu.ru. ORCID: 0000-0002-2241-869X.

Дата поступления рукописи в редакцию – 14.02.26.

Дата принятия рукописи в печать – 02.03.26.