

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 004.9

doi: 10.30987/2658-6436-2025-3-64-72

ТЕХНОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИЕЙ СВАРОЧНЫХ РАБОТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЯГКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Елена Владимировна Заровчатская^{1✉}, Константин Васильевич Захарченков²,
Александр Георгиевич Подвесовский³

^{1,2} Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Беларусь

^{1,3} Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

¹ 2415719@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8785-6447>

² zaharchenkovkv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8185-3010>

³ apodv@tu-bryansk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1118-3266>

Аннотация. *Статья посвящена разработке технологии повышения эффективности процессов управления организацией сварочных работ на основе комплексного использования алгоритмов роевого интеллекта, эволюционного моделирования в сочетании с применением сверточных нейро-нечетких сетей (СННС). Актуальность задачи связана с отсутствием возможности постоянного контроля и анализа работы сварщиков, сложностью объективной оценки качества сварных швов, наличием большого количества курсов обучения сварщиков, из которых сложно выбрать соответствующие потребностям производства, необходимостью обработки большого количества данных для эффективного распределения сварочных работ между исполнителями. Разработана новая технология повышения эффективности управления организацией сварочными работами, основанная на применении комплексного использования алгоритмов роевого интеллекта при обучении сварщиков, эволюционного моделирования при распределении сварочных работ между исполнителями в сочетании с применением СННС для распознавания дефектов сварных швов. Предложенная информационная технология обеспечивает комплексную автоматизацию следующих этапов управления сварочными работами: формирование структуры и состава знаний, умений и навыков сварщиков, востребованных производством; формирование состава курсов, обеспечивающих эффективное обучение сварщиков востребованным производством работам с использованием алгоритмов роевого интеллекта; обучение сварщиков работам, востребованным производством, в минимальные сроки с использованием алгоритма муравьиной колонии и светлячков; рациональное распределение работ между сварщиками на основе эволюционного моделирования; контроль качества работ путем автоматического распознавания дефектов сварных швов с использованием СННС.*

Ключевые слова: повышение эффективности, управления сварочными работами, роевой интеллект, эволюционное моделирование, сверточные нейро-нечеткие сети

Для цитирования: Заровчатская Е.В., Захарченков К.В., Подвесовский А.Г. Технология повышения эффективности управления организацией сварочных работ с использованием мягких вычислений // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №3 (29). С. 64-72. doi: 10.30987/2658-6436-2025-3-64-72.

Original article

Open Access Article

TECHNOLOGY FOR ENHANCING THE EFFICIENCY OF MANAGING WELDING OPERATIONS USING SOFT COMPUTING

Elena V. Zarovchatckaya^{1✉}, Konstantin V. Zakharchenkov², Alexander G. Podvesovsky³

^{1,2} Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus

^{1,3} Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

¹ 2415719@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8785-6447>

² zaharchenkovkv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8185-3010>

³ apodv@tu-bryansk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1118-3266>

Abstract. *The article focuses on developing a technology for enhancing the efficiency of managing welding operations based on the comprehensive use of swarm intelligence algorithms, evolutionary modelling, and applying convolutional neuro-fuzzy networks (CNFN). The relevance of the objective is associated with the lack of continuous control and analysis of welders' work, the complexity of objectively assessing the quality of welds, the presence of a large number of welding training courses, from which it is difficult to select those that meet production needs, and the necessity of processing a large amount of data for the effective distribution of welding tasks among performers. The authors develop a new technology for enhancing the efficiency of managing welding operations, based on using swarm intelligence algorithms for training welders, evolutionary modelling for distributing welding tasks among performers, and applying CNFN for recognizing weld defects. The proposed information technology provides comprehensive automation of the following stages of managing welding operations: forming the structure and composition of welders' knowledge, skills, and abilities required by production; forming the composition of courses that ensure welders' effective training in works demanded by production using bee swarm algorithms; training welders in works demanded by production in the shortest possible time using ant colony and firefly algorithms; rational distribution of tasks among welders based on evolutionary modelling; quality control of work through automatic recognition of weld defects using CNFN.*

Keywords: efficiency enhancement, welding operation management, swarm intelligence, evolutionary modelling, convolutional neuro-fuzzy networks

For citation: Zarovchatskaya E.V., Zakharchenkov K.V., Podvesovsky A.G. Technology for Enhancing the Efficiency of Managing Welding Operations Using Soft Computing. Automation and modeling in design and management, 2025, no. 3 (29). pp. 64-72. doi: 10.30987/2658-6436-2025-3-64-72.

Введение

Проблематика создания методов, средств и технологий повышения эффективности процессов управления сварочными работами исследуется в ряде работ отечественных и зарубежных авторов: вопросам организации сварочных работ и повышению мотивации исполнителей посвящены работы [1 – 5], вопросы разработки и применения систем цифрового управления сварочными работами рассматриваются в работах [6 – 10]. Известны подходы к автоматизированному анализу дефектов сварных швов [11 – 16]. Актуальной задачей в настоящий момент остается разработка и применение информационных технологий, позволяющих обеспечить комплексную автоматизацию решения задач управления сварочными работами на всех этапах: от обучения сварщиков, до непосредственного выполнения сварочных работ.

Нарушение сварщиками технологических инструкций из-за недостаточно высокой квалификации, несоответствия квалификации используемым технологиям при выполнении сварочных работ на нефте- и газопроводах, теплотрассах и промышленных предприятиях машиностроения приводит к образованию недопустимых дефектов сварных швов. Разрушение сварных швов приводит к авариям на нефте- и газопроводах, теплотрассах, поломкам машин и механизмов в процессе эксплуатации, дорогостоящим и продолжительным ремонтам. Найти дефекты, которые привели к разрушению сварного шва, сварщиков, ответственных за нарушение технологий, по истечении некоторого периода времени при отсутствии автоматизации практически невозможно. Решением данной задачи является создание технологии автоматизированного контроля на всех этапах обучения и производства сварочных работ, обеспечивающей идентификацию сварщиков, автоматизированный контроль и анализ результатов обучения и работы каждого сварщика, объективную непредвзятую оценку качества сварных швов. Для решения задачи повышения эффективности сварочных работ перспективным является применение мягких вычислений в процессе управления обучением сварщиков и распределения работ между сварщиками.

Целью данной работы является разработка новой информационной технологии повышения эффективности процессов управления сварочными работами, обеспечивающей автоматизацию обучения сварщиков с использованием алгоритмов роевого интеллекта, автоматизацию распределения работ между сварщиками на основе эволюционного моделирования, автоматизацию рентгенографического контроля (РК) сварных швов на основе сверточных нейро-нечетких сетей (СННС).

Обзор существующих систем управления сварочными работами

Автоматизация, как чисто механическая составляющая сварочных процессов, так и интеллектуальная помощь в принятии решений при сварочных работах, становится критически важной в условиях дефицита квалифицированных рабочих.

В таких условиях автоматизация не только помогает компенсировать нехватку человеческих ресурсов, но и позволяет повысить общую эффективность производства за счет точного распределения задач и минимизации ошибок.

Современный рынок предлагает широкий спектр программных решений для автоматизации сварочных процессов, среди которых выделяются такие продукты, как *Decapower* и *Valk Welding*. Эти системы обеспечивают высокую степень автоматизации за счет использования передовых технологий, таких как мониторинг параметров сварки в реальном времени с использованием технологии интернета вещей. Это значительно упрощает работу операторов и снижает вероятность появления брака.

Также существуют системы предиктивной аналитики для мониторинга состояния сварочного оборудования и оптимизации потока задач между сварщиками. Среди лидеров этого направления – *Daihen Corporation* и *Fronius International GmbH*, чьи решения демонстрируют повышение производительности до 30 % при внедрении. Интернет вещей играет ключевую роль в оптимизации производственных процессов, предоставляя возможность сбора данных о состоянии оборудования и прогнозирования технического обслуживания. Компании, такие как *Illinois Tool Works, Inc.* и *The Lincoln Electric Company*, предлагают платформы для мониторинга параметров сварки, что помогает не только улучшить качество швов, но и повысить безопасность рабочих процессов. Такие технологии делают возможным мгновенное обнаружение отклонений и корректировку задач в режиме реального времени [17 – 19].

Вместе с тем, качество сварных соединений в первую очередь зависит от квалификации и опыта сварщика, а также их соответствия уровню сложности выполняемых работ. В этой связи актуальным направлением автоматизации управления сварочными работами становится комплексная обработка информации и поддержка принятия решений при организации обучения сварщиков и распределении сварочных работ между ними, с учетом результатов контроля качества сварных швов.

Задачи повышения эффективности управления организацией сварочных работ

Предлагаемая технология повышения эффективности управления организацией сварочных работ охватывает следующие этапы процесса управления: обучение сварщиков, распределение сварочных работ между ними, контроль качества сварных швов. Состав задач каждого этапа и связанные с ними задачи и методы принятия решений представлены в табл. 1.

Разработан программный комплекс, предназначенный для управления обучением сварщиков на основе алгоритмов роевого интеллекта и распределения сварочных работ между исполнителями, позволяющий автоматизировать решение задач, представленных в табл. 1.

Программный комплекс повышения эффективности процессов управления организацией сварочных работ

Разработанный программный комплекс управления сварочными работами включает следующие модули:

1) модуль автоматического распознавания дефектов сварных швов обеспечивает автоматизацию распознавания дефектов швов на рентгенографических снимках с использованием СННС. Результаты распознавания используются в других модулях для оценки качества сварных швов;

2) модуль повышения эффективности управления обучением сварщиков обеспечивает возможность оценки результатов обучения каждого сварщика руководителем сварочных работ по итогам ВИК, РК, УЗК, автоматически формировать протоколы с результатами контроля, ведомости аттестационных и конкурсных комиссий;

3) модуль повышения эффективности управления работой сварщиков решает задачу назначения исполнителей на сварочные работы с учетом информации о результатах ВИК, РК, УЗК предыдущих работ, уровня владения технологиями и опыта работы сварщиков;

Состав задач, обеспечивающих повышение эффективности процессов управления организацией сварочных работ

Composition of tasks that ensure increased efficiency of welding work management processes

№ цели (задачи)	Описание	Способы решения задач	Организационные действия	Результат
Цель 1	Повышение эффективности управления обучением сварщиков			
Задача 1.1	Предварительная оценка умений и навыков сварщиков	Выбор направлений и методов обучения каждого сварщика	1. Организация сварки контрольных образцов, позволяющих определить умения и навыки сварщика 2. Оценка результатов сварки контрольных образцов на основе визуально-измерительного контроля (ВИК), РК, ультразвукового контроля (УЗК)	Повышение эффективности управления определением направлений и методов обучения сварщиков
Задача 1.2	Выбор лучших и перспективных курсов обучения сварщиков	Выбор лучших и перспективных курсов на основе алгоритма роения пчел [20, 21]	1. Организация прохождения учебных курсов сварщиками, выступающими в роли пчел-разведчиков 2. Оценка результатов подготовки сварщиков, выступающих в роли пчел-разведчиков	Повышение качества обучения сварщиков за счет рационального выбора лучших и перспективных курсов
Задача 1.3	Формирование индивидуальных траекторий обучения сварщиков	Формирование индивидуальных траекторий обучения сварщиков на основе алгоритма колонии муравьев [20, 21]	1. Организация прохождения учебных курсов сварщиками, выступающими в роли муравьев 2. Оценка результатов подготовки сварщиков, выступающих в роли муравьев, по результатам прохождения каждого курса	Повышение качества обучения сварщиков за счет рационального выбора индивидуальных траекторий обучения
Задача 1.4	Формирование индивидуальных траекторий обучения сварщиков	Формирование индивидуальных траекторий обучения сварщиков выбранным видам работ на основе алгоритма светлячков [20, 21]	1. Организация прохождения учебных курсов сварщиками, обучающимися выбранным видам работ, на основе алгоритма светлячков 2. Оценка результатов подготовки сварщиков, следующих траекториям светлячков	Повышение качества обучения сварщиков выбранным видам работ за счет рационального выбора индивидуальных траекторий обучения
Цель 2	Повышение эффективности управления распределением сварочных работ между исполнителями			
Задача 2.1	Формирование состава сварочных работ	Синтез состава сварочных работ	1. Формирование перечня сварных швов на основании технологических карт 2. Оценка опыта работы сварщиков на основе количества дефектов сварных швов	Сокращение времени выполнения сварочных работ
Задача 2.2	Формирование рационального распределения сварщиков на работы	Оценка распределения сварочных работ между исполнителями лицом, принимающим решение, с учетом результатов расчета времени выполнения работ	3. Рациональное распределение сварочных работ между исполнителями на основе эволюционного моделирования [22].	
Цель 3	Повышение эффективности контроля качества сварочных работ			
Задача 3.1	Повышение качества сварочных работ	Оценка результатов контроля качества сварочных работ для поддержки принятия решений по составу учебных курсов, индивидуальным траекториям обучения сварщиков, рациональному распределению работ между сварщиками	Оценка качества сварочных работ на основе ВИК, РК, УЗК с автоматическим распознаванием дефектов сварных швов путем использования СННС [23]	Объективная непредвзятая оценка качества сварочных работ

4) модуль мягких вычислений реализует алгоритмы роевого интеллекта и эволюционного моделирования. Алгоритмы роевого интеллекта используются при обучении сварщиков. Алгоритмы эволюционного моделирования обеспечивают распределение сварочных работ между исполнителями. При этом используются результаты автоматического распознавания дефектов сварных швов на основе СННС.

Технология повышения эффективности процессов управления организацией сварочных работ

Этапы технологического совершенствования процессов управления организацией сварочных работ:

Этап 1. Оценка первоначальных знаний, умений и навыков сварщиков на основе результатов сварки контрольных образцов. Оценка осуществляется на основании ВИК, РК, УЗК. По результатам ВИК определяются наружные дефекты: дефекты формы шва, подрезы, прожоги, наплывы, кратеры, наружные трещины. Результаты РК автоматически распознаются с использованием СННС, определяются такие виды дефектов, как прожог, трещины, непровары, газовые поры и другие. По результатам УЗК определяются следующие виды внутренних дефектов: поры, шлаковые включения, трещины, непровары.

Этап 2. Комплексная обработка информации о результатах опыта работы сварщиков. Оценка качества выполнения различных видов работ и владения технологиями осуществляется на основании результатов обучения и выполнения предыдущих работ на основании протоколов ВИК, РК, УЗК. Для этого используется модуль повышения эффективности управления обучением сварщиков и модуль повышения эффективности управления работой сварщиков. Исходные данные для оценки качества выполнения сварщиком работ поступают в модули в процессе обучения и работы сварщиков.

Этап 3. Обучение сварщиков востребованным технологиям и сварочным работам. На данном этапе используется модуль повышения эффективности управления обучением сварщиков.

Шаг 3.1. Выбор лучших и перспективных курсов. Для определения лучших и перспективных курсов используется алгоритм роения пчел. Сварщики, выступающие в роли пчел-разведчиков, проходят курсы. По результатам прохождения курсов на основании результатов ВИК, РК, УЗК определяются лучшие и перспективные курсы.

Шаг 3.2. Формирование индивидуальных траекторий обучения сварщиков на основе алгоритма муравьиной колонии. Сварщики последовательно проходят курсы, обучаясь востребованным технологиям и видам работ. Наиболее успешные переходы между курсами постепенно становятся более заметными, и по ним перемещаются другие сварщики.

Шаг 3.3. Обучение сварщиков выбранным видам работ на основе алгоритма светлячков. Траектории подготовки наиболее успешных сварщиков, выполняющих роль светлячков, постепенно становятся более заметными. По ним перемещаются другие сварщики при обучении выбранным видам работ.

Этап 4. Предварительная обработка информации для формирования первоначального распределения работ между сварщиками в модуле повышения эффективности управления работой сварщиков.

Этап 4.1. Ранжирование претендентов на выполнение каждой работы по количеству и размерам дефектов сварных швов предыдущих работ.

Этап 4.2. Формирование распределения работ между сварщиками руководителем сварочных работ. Кандидаты на выполнение работ выбираются из числа сварщиков, имеющих опыт работы и не назначенных на другую работу.

Этап 5. Синтез рационального распределения работ между сварщиками на основе алгоритмов эволюционного моделирования [22] в модуле мягких вычислений [23].

Результатом этапа 5 является назначение сварщиков на каждую работу и длительность выполнения всех работ.

Разработанная технология представлена на рис. 1.

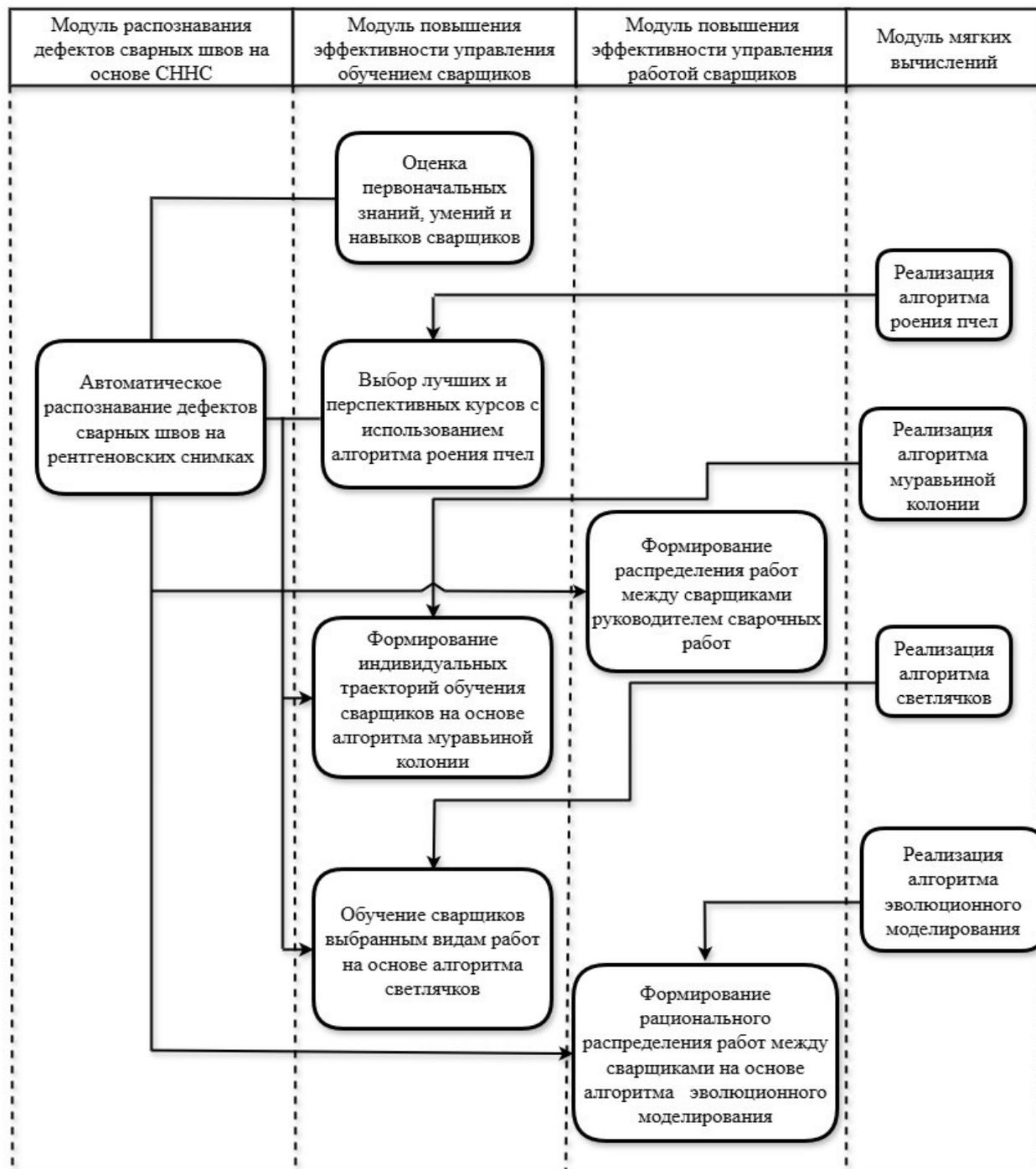


Рис. 1. Структурная схема технологии повышения эффективности процессов управления организацией сварочных работ на основе мягких вычислений

Fig. 1. Structural diagram of technology for improving the efficiency of welding management processes based on soft computing

Результаты

Апробация разработанной технологии проводилась в процессе обучения сварщиков и распределения сварочных работ между исполнителями в ОАО «БелГазСтрой» и ООО «ИН-ВЕСТАП-МАИНД». Все сварщики обучались и распределялись на работы по сварке труб различных диаметров.

Для апробации выбора лучших курсов обучения сварщиков было выбрано 60 курсов различных частных и государственных компаний, занимающихся обучением сварщиков. На выбранные курсы было направлено 30 сварщиков, выступающих в роли пчел-разведчиков. По результатам обучения на основании улучшения значений целевой функции было выбрано 20 лучших курсов.

На выбранные лучшие курсы были направлены 40 сварщиков, выступающих в роли муравьев. На первых двух итерациях переходы между курсами выбирались случайным образом, далее – в зависимости от количества феромона на переходе между курсами. Количество феромона на переходе рассчитывалось как разность значений целевой функции до и после прохождения обучения в соответствующем узле. Количество испаряющегося феромона на каждой дуге рассчитывалось как 10 % от общего количества феромона на дуге в течение одной итерации.

По результатам обучения строились траектории обучения сварщиков по переходам между курсами с максимальным количеством феромона. В соответствии с алгоритмом светлячков, для обучения выбранным видам работ и технологиям сварщики могли следовать траекториям обучения сварщиков, выступающих в роли светлячков.

По результатам апробации разработанной технологии в процессе обучения сварщиков было установлено сокращение количества дефектов на 21,5 %, а времени обучения на 23 %, что подтверждено теоретическими расчетами и актом внедрения.

Распределение сварочных работ между исполнителями выполнялось в зависимости от результатов обучения сварщиков на основе эволюционного моделирования. Для апробации было выбрано 20 сварочных работ и 40 лучших сварщиков.

В результате было экспериментально установлено сокращение количества дефектов сварных швов при применении разработанной технологии на 24 %. Актом о внедрении результатов НИР в ООО «ИНВЕСТАП-МАЙНД» подтверждено сокращение количества дефектов сварных швов на 20...30 %.

Заключение

В статье представлена новая технология повышения эффективности процессов управления организацией сварочных работ на основе мягких вычислений. Разработанная технология отличается применением комплексного подхода к обработке информации и принятию решений при организации обучения сварщиков и распределении сварочных работ между исполнителями, с применением моделей и алгоритмов мягких вычислений. Предложенная технология обеспечивает повышение эффективности за счет автоматизации следующих этапов подготовки и проведения сварочных работ: распознавание дефектов сварных швов на основе СННС, формирование протоколов и ведомостей в процессе обучения сварщиков, распределение сварочных работ между исполнителями, объективная непредвзятая оценка качества сварочных работ.

Список источников:

1. РД 95 10436-91 Технологическая подготовка и организация сварочного производства монтажных и строительных предприятий. Введен 14.05.91. – Группа Т53. – 34 с.
2. Dynamic work distribution in workflow management systems: How to balance quality and performance. / Kumar A., Van Der Aalst, W.M.P., Verbeek E.M.W. // Journal of Management Information Systems. – 2002. – 18(3). – pp. 157-193.
3. Osama A.E. Welding education in Europe: What direction is it taking? // Welding journal. – 1994. – Т. 73. – № 7. – С. 56-57.
4. Сас А.В., Грузинцев Б.П. Основы создания системы эффективной подготовки высококвалифицированных операторов ручной дуговой сварки // Сварочное производство. – 2013. – № 12. – С. 47-49.

References:

1. Technological Preparation and Organization of Welding Production at Mounting and Construction Enterprises. Regulative Document 95 10436-91. Group T53; 1991 May 14.
2. Kumar A., Van Der Aalst W.M.P., Verbeek E.M.W. Dynamic Work Distribution in Workflow Management Systems: How to Balance Quality and Performance. Journal of Management Information Systems. 2002;18(3):157-193.
3. Osama A.E. Welding Education in Europe: What Direction is It Taking? Welding Journal. 1994; 73(7):56-57.
4. Sas A.V., Gruzintsev B.P. Fundamentals of Creating an Effective System for Training Highly Qualified Manual Arc Welding Operators. Svarochnoe Proizvodstvo. 2013;(12):47-49.

5. Марьяна И.С., Файрушин А.М., Мардаганьев М.Р. Повышение эффективности системы мотивации персонала сварочного производства // Сварка и контроль: Сборник статей. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет. – 2022. – С. 125-128.
6. Информационные технологии при подготовке сварщиков и специалистов сварочного производства: современные тенденции / Б.Е. Патон и др. // Сварка и диагностика. – 2010. – № 1. – С. 10-15.
7. Краснопевцева И.В., Краснопевцев А.Ю. Применение информационных технологий в управлении производительностью труда рабочих промышленных предприятий // Вестник НГИЭИ. – 2020. – № 2(105). – С. 90-99.
8. Файрушин А.М., Марченко И.А., Хазиев В.С. Повышение эффективности входного контроля сварщиков при строительстве опасных производственных объектов // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. – 2020. – № 6. – С. 58-72.
9. Информационно-измерительная система для интерактивной визуализации процесса сварки плавлением / И.О. Ишигов и др. // Сварочное производство. – 2015. – № 3. – С. 55-58.
10. Болотов С.В., Захарченков К.В., Крутолевич С.К. Интеллектуальная аппаратно-программная поддержка и повышение эффективности сварочных процессов // Двадцать первая Национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием (КИИ-2023): Труды конференции. В 2-х томах, Смоленск, 16–20 октября 2023 года. – Смоленск: Принт-Экспресс. – 2023. – С. 162-172.
11. Transfer learning with CNN for classification of weld defect / Samuel Kumaresan and others // Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 95097-95108.
12. A vision-based method for lap weld defects monitoring of galvanized steel sheets using convolutional neural network / Guohong Ma and others // Journal of Manufacturing Processes. – 2021. – Vol. 64. – P. 130-139.
13. Using deep learning for defect classification on a small weld X-ray image dataset / Chiraz Ajmi and others // Journal of Nondestructive Evaluation. – 2020. – 39:68. – P. 1-13.
14. Automatic detection of welding defects using deep neural network / Wenhui Hou and others // Journal of Physics: Conf. Series 933. – 2017. – P. 1-11.
15. X-Ray weld defect recognition using deep learning technique / Distun Stephen and others // International Research Journal of Engineering and Technology. – 2021. – Vol. 8 Issue 06. – P. 818-823.
16. Automatic detection of weld defects in pressure vessel X-Ray image based on CNN XIAO Wenkai and others // Wuhan University Journal of Natural Sciences. – 2022. – Vol.27. – No.6. – P. 439-498.
17. Акименко Т.А., Кремповский П.Р. Обзор цифровых систем управления сварочным процессом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 12. – С. 447-449.
18. Баженова О.А., Городов А.В. Будущее за интеллектуальной сваркой // Инновационная техника и технология. – 2019. – № 7. – С. 25-31.
5. Maryina IS, Fayrushin AM, Mardaganiev MR. Enhancing the Efficiency of the Personnel Motivation System in Welding Production. In: Proceedings on Welding and Control; Ufa: Ufa State Oil and Technical University: 2022. p. 125-128.
6. Paton BE, et al. Information Technologies in Training Welders and Specialists in Welding Production: Modern Trends. Welding and Diagnostics. 2010; (1):10-15.
7. Krasnopevtseva I.V., Krasnopevtsev A.Yu. Application of Information Technologies in Productivity Management of Industrial Workers. Bulletin NGIEI. 2020;2(105):90-99.
8. Fayrushin A.M., Marchenko I.A., Khaziev V.S. Increasing the Efficiency of Input Inspection of Welders in the Construction of Hazardous Production Facilities. Oil and Gas Business [Internet]. 2020;(6):58-72.
9. Ishigov IO, et al. Information and Measurement System for Interactive Visualization of the Fusion Welding Process. Svarochnoe Proizvodstvo. 2015;(3):55-58.
10. Bolotov SV, Zakarchenko KV, Krutolevich SK. Intelligent Hardware and Software Support and Increasing the Efficiency of Welding Processes. In: Proceedings of the 21st National and International Conference on Artificial Intelligence (KII-2023); 2023 Oct 16-20; Smolensk. Smolensk: Print-Express: 2023. 2 vols. p. 162-172.
11. Kumaresan S, et al. Transfer Learning with CNN for Classification of Weld Defect. Access. 2021;9:95097-95108.
12. Ma G, et al. A Vision-Based Method for Lap Weld Defects Monitoring of Galvanized Steel Sheets Using Convolutional Neural Network. Journal of Manufacturing Processes. 2021;64:130-139.
13. Ajmi C, et al. Using Deep Learning for Defect Classification on a Small Weld X-Ray Image Dataset. Journal of Nondestructive Evaluation. 2020;39:1-13.
14. Hou W, et al. Automatic Detection of Welding Defects Using Deep Neural Network. Journal of Physics: Conf. Series. 2018; 933:1-11.
15. Stephen D, et al. X-Ray Weld Defect Recognition Using Deep Learning Technique. International Research Journal of Engineering and Technology. 2021;8(06):818-823.
16. Xiao W, et al. Automatic Detection of Weld Defects in Pressure Vessel X-Ray Image Based on CNN. Wuhan University Journal of Natural Sciences. 2022;27(6):489-498.
17. Akimenko T.A., Kremповsky P.R. Overview of Digital Welding Control Systems. Izvestiya Tula State University. Technical Sciences. 2024;(12):447-449.
18. Bazhenova O.A., Gorodov A.V. The Future for Intelligent Welding. Innovative Machinery and Technology. 2019;(7):25-31.

19. Фурманов С.М. Цифровое управление оборудованием и процессами при сварке // Белорусско-Российский университет. – 2022. – № 6. – С. 19-27.

20. Карпенко А.П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учеб. пособие. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017.

21. Заровчатская Е.В., Мисник А.Е., Аверченков О.Е. Комплексное повышение эффективности управления обучением сварщиков на основе алгоритмов роевого интеллекта и эволюционного моделирования // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2024. – Т. 32. – № 1(81). – С. 56-73.

22. Заровчатская Е.В., Захарченков К.В., Подвесовский А.Г. Алгоритм интеллектуальной поддержки принятия решений при управлении распределением сварочных работ между исполнителями // Эргодизайн. – 2025. – № 2 (28). – С. 117-125.

23. Капелько Э.А., Мисник А.Е. Обнаружение дефектов сварки на малых данных // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте (ИММВ-2024): Сборник научных трудов XII Международной научно-практической конференции. В 2-х томах, Коломна, 14–17 мая 2024 года. – Смоленск: Универсум, 2024. – С. 285-292.

Информация об авторах:

Заровчатская Елена Владимировна

аспирант, Брянский государственный технический университет; старший преподаватель кафедры «Программное обеспечение информационных технологий» Белорусско-Российского университета, Author-ID-РИНЦ 1044361, ORCID 0000-0002-8785-6447

Захарченков Константин Васильевич

кандидат технических наук, доцент кафедры «Программное обеспечение информационных технологий» Белорусско-Российского университета, Author-ID-РИНЦ 802712, ORCID 0000-0001-8185-3010

Подвесовский Александр Георгиевич

доцент, кандидат технических наук, профессор кафедры «Информатика и программное обеспечение» Брянского государственного технического университета, Scopus-Author ID: 56367146100, Research- ID-Web of Science: L-5247-2015, Author-ID-РИНЦ: 195986, ORCID 0000-0002-1118-3266

19. Furmanov S.M. Digital Control of Equipment and Processes in Welding. Belorussian-Russian University. 2022;(6):19-27.

20. Karpenko A.P. Modern Search Optimization Algorithms. Algorithms Inspired by Nature. Moscow: Bauman Moscow State Technical University; 2017.

21. Zarovchatckaya E.V., Misnik A.E., Averchenkov O.E. Method for Complex Increase of Welding Production Control Efficiency Based on Swarm Intelligence Algorithms and Evolutionary Modelling. Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series. 2024;321(81):56-73.

22. Zarovchatckaya E.V., Zakarchenkov K.V., Podvesovsky A.G. Algorithm for Intelligent Decision Support in Managing Welding Work Distribution Among Executors. Ergodesign. 2025;2(28):117-125.

23. Kapelko EA, Misnik AE. Welding Defect Detection on Small Datasets. In: Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference on Integrated Models and Soft Computing in Artificial Intelligence (IMMV-2024); 2024 May 14-17; Kolomna. Smolensk: Universum; 2024. 2 vols. p. 285-292.

Information about the authors:

Zarovchatckaya Elena Vladimirovna

Postgraduate student of Bryansk State Technical University; Senior Lecturer at the Department of Software Engineering of Information Technologies of Belarusian-Russian University, Author-ID-RSCI: 1044361, ORCID: 0000-0002-8785-6447

Zakarchenkov Konstantin Vasilievich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Software Engineering of Information Technologies of Belarusian-Russian University, Author-ID-RSCI: 802712, ORCID: 0000-0001-8185-3010

Podvesovsky Alexander Georgievich

Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Professor at the Department of Computer Science and Software of Bryansk State Technical University, Scopus-Author ID: 56367146100, Research- ID-Web of Science: L-5247-2015, Author-ID-RSCI: 195986, ORCID: 0000-0002-1118-3266

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 11.08.2025; одобрена после рецензирования 25.08.2025; принята к публикации 01.09.2025.

The article was submitted 11.08.2025; approved after reviewing 25.08.2025; accepted for publication 01.09.2025.

Рецензент – Медведев Д.М., кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Medvedev D.M., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.