

Проблемы искусственного интеллекта. 2026. N 1 (40). С.137–149  
*Problems of Artificial Intelligence*. 2026;1(40):137–149.

Системный анализ, управление и обработка информации, статистика  
Научная статья

УДК 681.518.25/621.771.09

doi: 10.24412/2413-7383-2026-1-40-137-149

О. А. Бутов, В. С. Солод, А. А. Никитина  
Федеральное государственное бюджетное научное учреждение  
«Институт проблем искусственного интеллекта», г. Донецк,  
283048, г. Донецк, ул. Артема, 118 б

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ТЕРМОУПРОЧНЕНИЕМ АРМАТУРЫ НА БАЗЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА

O. A. Butov, V. S. Solod, A. A. Nikitina  
Federal State Budgetary Scientific Institution «Institute of Artificial Intelligence Problems»  
283048, Donetsk, Artema str, 118-b

## INTELLIGENT CONTROL SYSTEM FOR THERMAL HARDENING OF REINFORCEMENT BASED ON A DIGITAL TWIN

Целью работы является оценка возможности создания цифрового двойника (ЦД) для управления и контроля процесса термоупрочнения арматурных профилей на основе новых оригинальных физико-математических моделей ускоренного охлаждения. На основании обзора литературы определены цели создания, состав и особенности ЦД. Описаны этапы создания ЦД процесса ускоренного охлаждения арматурных профилей. Разработана структура ЦД и программа мониторинга реального процесса прокатки - охлаждения с использованием модели оптимизации режимов термоупрочнения и эмуляции работы прокатного стана.

**Ключевые слова:** ускоренное охлаждение, арматурный профиль, цифровой двойник, алгоритм, программа оптимизация, предел текучести.

The aim of this study is to evaluate the feasibility of creating a digital twin (DT) for managing and monitoring the thermal hardening process of reinforcing bars based on new, original physical and mathematical models of accelerated cooling. Based on a review of publications, the objectives of the DT development, composition, and features are determined. The stages of creating a DT for the accelerated cooling process of reinforcing sections are described. The DT structure and a program for monitoring the actual rolling-cooling process are developed using a model for optimizing thermal hardening modes and emulating rolling mill operation.

**Keywords:** accelerated cooling, reinforcement profile, digital twin, algorithm, optimization program, yield strength.

## Введение

В программных документах по развитию России до 2030 г. отмечено: «Технологическое развитие Российской Федерации в среднесрочной перспективе будет находиться под воздействием с одной стороны ряда внешних и внутренних угроз технологического отставания и деградации российской экономики, с другой – открывающихся новых возможностей ускорения ее инновационно ориентированного роста». Ключевым ответом на происходящие системные изменения является применение сквозных технологий, в том числе искусственного интеллекта [1].

Одной из прикладных информационных технологий которой пророчат широкие перспективы развития являются «Цифровые двойники». Цифровые двойники представляют собой одну из самых перспективных технологий современности, способную значительно улучшить процессы управления в различных отраслях [2]. В России впервые в мире принят новый национальный стандарт - ГОСТ Р 57700.37–2021 «Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения» [3]. В разделе «Область применения» указано, что этот стандарт распространяется только на изделия машиностроения. Стандарты на цифровые двойники (ЦД) процессов или технологий отсутствуют.

Согласно автору работы [4] **цифровой двойник** (digital twin) – это цифровая (виртуальная) модель любых объектов, систем, процессов или людей. Она точно воспроизводит действия оригинала и синхронизирована с ним. Это современная концепция информационных технологий, которая становится все более значимой в промышленности и привлекает внимание многих отраслей. Технология может стать отличным инструментом для компаний, позволяющим повысить свою конкурентоспособность, производительность и эффективность.

**Цель создания цифрового двойника** – получить возможность моделировать в разных условиях эксплуатацию оригинала, ошибки и сценарии поведения. Цифровые двойники позволяют создавать виртуальные модели производственных процессов, что способствует улучшению контроля качества, сокращению времени на разработку новых продуктов и снижению затрат на эксплуатацию оборудования [5].

Известно об использовании цифровых двойников в транспортной и логистической сферах [6], в энергетическом секторе [7]. В строительном секторе цифровые двойники служат для моделирования зданий и инфраструктурных объектов [8]. К решениям по использованию ЦД в металлургии относится работа [9], в которой описана методика системного инжиниринга для разработки цифровых двойников для оценки технического состояния производственного оборудования цеха холодной прокатки. Эта методика основана на разработках НТИ СПбПУ. В сообщении [10] анонсирована аналитическая модель непрерывной прокатки стали как цифровой «двойник» прокатного стана, обеспечивающий регулирование по возмущению, разработанный в ЮУрГУ. На ЕВРАЗ НТМК запущен цифровой двойник нагревательных печей, который использует гибридную физико-математическую модель и исторические данные, что позволяет автоматически подбирать оптимальные режимы нагрева и темп выдачи, учитывая простои и сортамент [11].

Наиболее близким по назначению к рассматриваемому в данной работе производственным процессом является ЦД процесса охлаждения катанки на проволочном стане, основанный на визуализации технологического процесса охлаждения.

Основной функцией цифрового двойника является визуализация изменения состояния катанки в частности:

- визуализация температуры катанки на всей линии охлаждения;
- визуализация работы системы охлаждения катанки;
- визуализация состояния крышек линии охлаждения;
- визуализация поступления/сброса катанки с линии охлаждения;
- визуализация помещения стана 170 [12].

Согласно классификации ЦД по функционалу, приведенной в работе [13], она относится к «Визуализационным цифровым двойникам».

**Актуальность данной работы** подтверждается тем, что в известной нам литературе отсутствует информация о разработке ЦД процесса термоупрочнения арматурных профилей в потоке прокатного стана.

Отчасти это связано с отсутствием надежных физико-математических моделей процесса ускоренного охлаждения, с другой стороны задача контроля процесса решается с помощью АСУТП, например описанных в работах [14], [15]. Задача, решаемая применением таких систем, заключается в обеспечении получения механических свойств арматуры в пределах, оговоренных стандартами. Однако, эти системы не решают проблему оптимизации затрат энергоресурсов при ускоренном охлаждении арматуры в термоустановке. В работе [16] описана концепция построения автоматизированной системы управления процессом упрочнения арматурных профилей на базе синтеза математических моделей комбинированного охлаждения, структурообразования и механических свойств. Эта концепция легла в основу разработки ЦД, описываемой в данной публикации.

Существует множество определений цифровых двойников и их типов, в частности – M.Grieves и J.Vickers [17] дают такое определение цифрового двойника: «Цифровой двойник представляет собой набор виртуальных информационных конструкций, которые полностью описывают потенциальный или фактический физически производимый продукт...».

**В основе цифрового двойника** изделия всегда есть два элемента:

**Физический объект** – реальное изделие, установка или целое производство.

**Виртуальная модель** – его цифровая копия, созданная с помощью программ для трехмерного проектирования или моделирования.

Между собой они связаны потоком данных. Обычно указывают, что обязательно связь должна быть двухсторонняя, но иногда формализуют только обратную (данные из реальности в модель). На физическом объекте устанавливают датчики промышленного интернета вещей (IIoT), которые непрерывно фиксируют его состояние и передают информацию в виртуальную модель для обработки. Таким образом, ключевым отличием цифрового двойника от систем мониторинга, сбора и обработки данных заключается в наличии двусторонней обратной связи между виртуальным компонентом системы и реальным объектом [18].

В чем плюсы использования цифровых двойников и минусы машинного обучения? К каким задачам применить ту или другую технологию искусственного интеллекта? Эксперт по разработке цифровых двойников, оптимизации производства и внедрения цифровых технологий в том числе в металлургической отрасли М. Гусев в тексте лекции «Цифровые двойники: новая концепция индустрии 4.0» указывает, что «...машинное обучение следует использовать там, где имеется большое количество информации: на этих данных можно построить статистические модели, и мы можем прогнозировать события, которые в исторических периодах происходили. И почти невозможно предсказать события, которые не были размечены в исторических данных».

Здесь как раз может помочь физико-математическая модель (цифровой двойник): с её помощью можно смоделировать критические неисправности, которые не повторялись ранее, которые мы не наблюдали в исторических данных, и когда у нас мало информации об объекте» [19].

Это утверждение нашло подтверждение в нашей работе [20] применительно к процессу термоупрочнения арматурных профилей. Результаты моделирования процесса ускоренного охлаждения арматурного проката в термоустановке стана 390 с помощью простой ИНС на основе перцептрона показали, что приемлемое по точности решение получить не удастся. В то же время разработанная ранее физико-математическая модель [21] способна с достаточной точностью в реальном времени предсказывать результат процесса при наличии исходных данных, достаточных для моделирования.

**Целью данной работы** является оценка возможности использования разработанных ранее математических моделей и алгоритмов оптимизации в программных средствах мониторинга реального процесса термоупрочнения арматуры в режиме реального времени.

В соответствии с литературными данными можно выделить следующие этапы создания двойника:

- исследование объекта;
- моделирование цифровой копии объекта;
- воплощение модели;
- тестирование основных процессов работы на цифровом двойнике;
- запуск и наладка.

Рассмотрим содержание этих этапов в случае создания ЦД процесса ускоренного охлаждения.

## Исследование объекта

Этот этап имеет место только если физический объект не изучен. В нашем случае за более чем 30 лет эксплуатации технологии ускоренного охлаждения имеется множество публикаций по этой теме, в заводской практике проведено большое количество исследований, установлены факторы процесса, разработаны и используются АСУТП, позволяющие получать механические свойства в пределах оговоренных стандартами. В работе [21] более подробно описано существующее положение с автоматизированными системами закалки.

В соответствии с рисунком 1 представлена схема расположения оборудования прокатного стана 390 и места расположения датчиков ПоТ. Здесь:  $T_{наг}$ ,  $T_{пр}$ ,  $T_{со}$  – датчики температуры металла (нагрева, прокатки и самоотпуска соответственно),  $V_{пр}$  – тахометр оборотов двигателя чистой клетки для определения скорости прокатки,  $T_{ви}$  – расходомеры воды охлаждения по  $i$  секциям установки.

Факторами процесса ускоренного охлаждения (УУО), влияющими на механические свойства, являются размер профиля  $N_{\phi}$  (площадь поперечного сечения всех  $N$  ниток –  $F_{сеч}$ ), температура начала охлаждения  $T_{пр}$  (конца прокатки) и скорость прокатки профиля  $V_{пр}$ . Также немаловажную роль играет химический состав стали, подверженной термообработке. И наконец, степень охлаждения определяется требуемым классом прочности арматуры.

Для разработки интеллектуальной системы управления необходимы исходные данные, которые, в силу отсутствия доступа к заводским данным, можно получить используя программу-эмулятор прокатного стана. Поскольку в нашем распоряжении имелся полный набор характеристик оборудования стана 390, калибровок валков и

режимов обжаты при прокатке пускового сортамента арматурных профилей, а также программа для моделирования технологии прокатки [22], появилась возможность разработки такой программы-эмулятора (ПЭ).

В процессе освоения прокатного стана 390 с использованием MES-системы получены данные о температурных, скоростных и нагрузочных параметрах при прокатке некоторых арматурных профилей пускового сортамента. Эти данные использованы для проверки адекватности моделирования технологии прокатки существующей программой SORTPRO [22] при прокатке профилей №№12, 14 и 18.

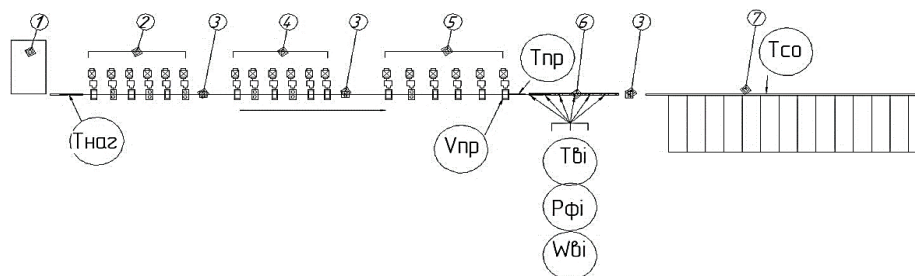


Рисунок 1 – Схема расположения оборудования и положения датчиков на стане 390:  
1 – нагревательная печь, 2 – черновая группа прокатных клетей, 3 – летучие ножницы, 4 – промежуточная группа прокатных клетей, 5 – чистовая группа прокатных клетей, 6 – установка ускоренного охлаждения (УУО), 7 – реечный холодильник

В соответствии с рисунком 2 показаны результаты проверки адекватности модели SORTPRO по данным MES-системы. Очевидно, что значения нагрузок и температур близки к контрольным, что позволяет применить программу SORTPRO для разработки ПЭ прокатного стана. При этом необходимо учитывать также изменение температурного профиля по длине проката. Основной задачей ПЭ является постоянная передача значений температуры конца прокатки при заданных № профиля, температуре нагрева заготовки, скорости прокатки, химическому составу (далее химсостав) стали по трем элементам С, Мn, Si.

Для упрощения и ускорения расчетов ЦД с помощью программы SORTPRO произведен расчет набора данных из 108 опытов, фрагмент показан в таблице 2.

В результате статистической обработки получена следующая зависимость для расчета температуры начала охлаждения арматурного проката для использования в программе-эмуляторе стана 390 (коэффициент детерминации модели  $R^2 = 0.974$ ):

$$T_{пр} = 1007 + 113(0.2X_1 + 0.275X_2 + 0.938X_3 + 0.062X_1X_2 + 0.896X_1X_3 - 0.198)$$

где  $X_1 = \frac{F_{сеч} - 308}{496}$ ,  $X_2 = \frac{T_{наг} - 1080}{70}$ ,  $X_3 = \frac{V_{пр} - 4.8}{10}$ ,  $F_{сеч} = 0.25N\pi N_0^2$ ,  $N$  – количество ниток проката на выходе из последней клетки стана.

## Моделирование цифровой копии объекта

Для построения модели цифровой копии используются разработанная ранее физико-математическая модель и алгоритм оптимизации, описанные в работах [21], [23], позволяющие рассчитать настройки УУО, длительность и режим охлаждения при различных содержаниях упрочняющих легирующих добавок в стали С, Мn, Si. Для оценки степени влияния химсостава на расход охлаждающей воды произведен расчет режимов упрочнения при переменных расходах воды и количестве включенных секций термоустановки.

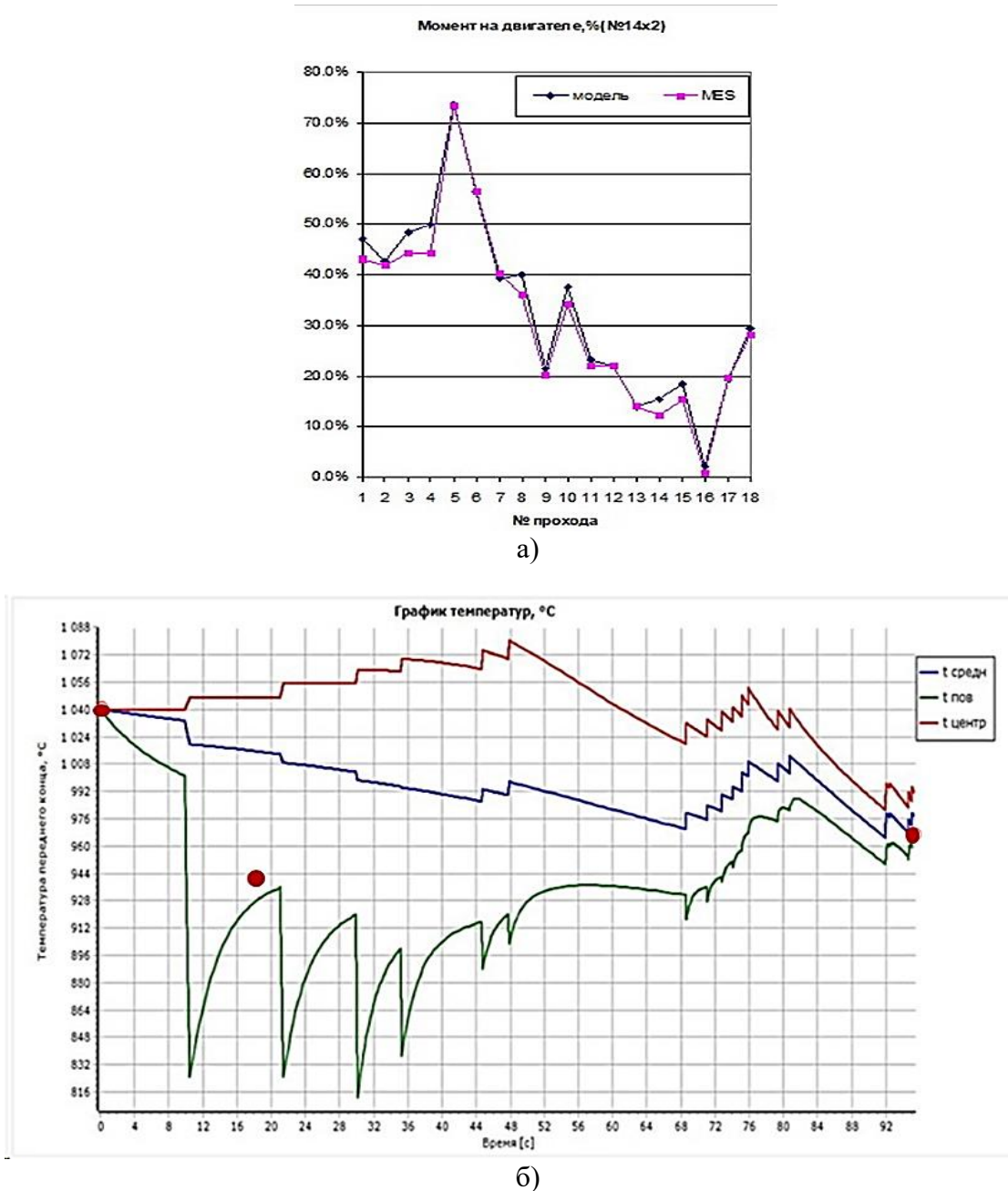


Рисунок 2 – Результаты проверки адекватности модели SORTPRO при прокатке арматуры №14 в 2 нитки: а – график нагрузок двигателей главного привода; б – график температурного режима (• – обозначены значения температур поверхности, зафиксированные MES-системой)

Установлено, что в зависимости от комбинации содержания упрочняющих элементов в стали, расход воды охлаждения может изменяться в очень широких пределах. Например, при значении  $\sigma_{0.2}$  550 Мпа расход воды может изменяться в пределах 340-460 м<sup>3</sup>/ч при изменении  $S_{экв}$  в пределах 0,26...0,32. Поэтому оптимизация режима охлаждения является актуальной.

## Воплощение модели

Структура ЦД представлена в соответствии с рисунком 3. На этом этапе представленную архитектуру цифрового двойника реализовали в среде Embarcadero. Разработана программа эмулятора ЦД процесса термоупрочнения арматурных профилей в потоке стана 390. Вид интерфейса монитора оператора показан в соответствии с рисунком 5.

Сценарий работы ЦД в соответствии со структурной схемой, показанной в соответствии с рисунком 3, следующий:

- в соответствии с программой прокатки, содержащей информацию о номере плавки заготовки, наименовании и химсоставе марки стали (С, Мn, Si), № профиля, количестве ниток проката, классе прочности арматуры А оператор загружает из базы данных (БД) файл-шаблон с параметрами секций охлаждения УУО для соответствующего размера профиля, включающими рекомендованные температуру нагрева  $T_{наг}$  и скорость прокатки  $V_{пр}$ ;
- далее, он уточняет химсостав стали и передает данные в систему организации и управления производством (MES);
- перед прокаткой MES передает в модель ЦД полученные данные, которые используются для расчета настроек оптимального режима.

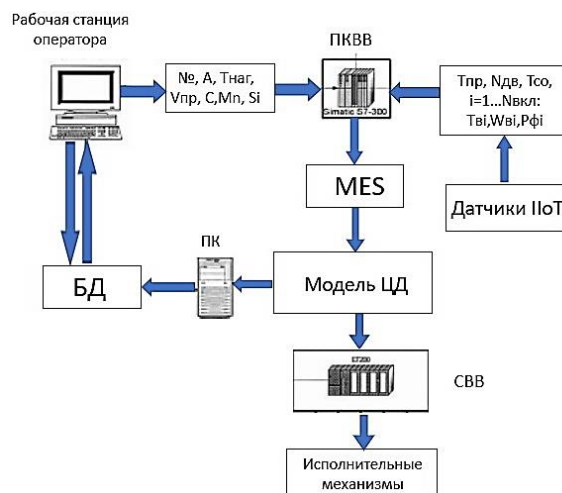


Рисунок 3 – Структура цифрового двойника процесса термоупрочнения:

СВВ – система ввода-вывода; ПК – промышленный компьютер;

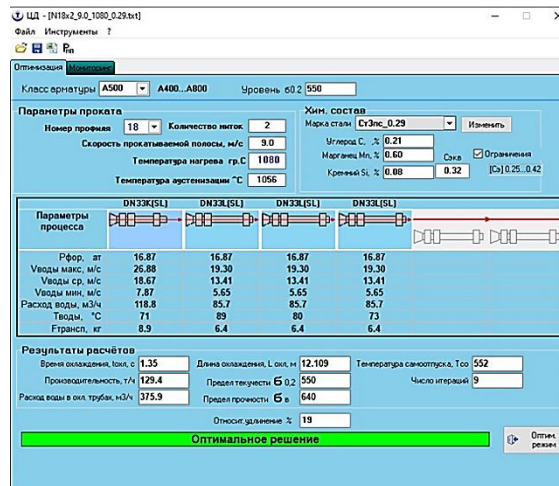
ПКВВ – программируемый контроллер ввода вывода

В соответствии с рисунком 4 а кнопкой «Оптим.режим» оператор запускает расчет. В результате расчета определяются следующие параметры: температура прокатки, количество и типоразмер введенных в поток секций охлаждения, уставки давления воды на форсунках включенных секций, теоретическая скорость, расход и температура горячей воды, прогнозные значения механических свойств арматуры и значения других существенных параметров процесса, показанные на вкладке «Оптимизация» (в соответствии с 4 а). Уставки давления воды охлаждения через СВВ передаются на исполнительные механизмы регуляторов давления.

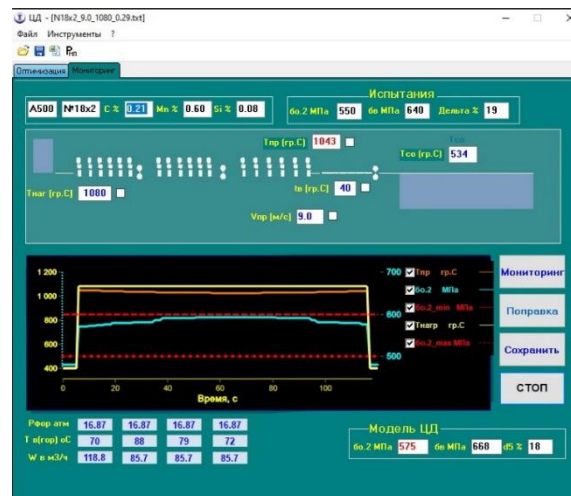
В начале прокатки оператор переключается в режим мониторинга (см. вкладку «Мониторинг») в соответствии с 4 б. При срабатывании датчика наличия металла в чистой прокатной клети, информация с датчиков IoT через контроллер ПКВВ передается в MES и далее – в модель ЦД.

Через определенный интервал в реальном времени модель производит прогнозные расчеты механических свойств и отображает их в динамике в числовом и графическом виде. Кроме этого, на экране отображаются текущие значения давления, расхода и температуры горячей воды по включенным секциям УУО.

Таким образом, оператор может контролировать уровень механических свойств (условного предела текучести  $\sigma_{0.2}$ , предела прочности  $\sigma_b$  и относительного удлинения  $\delta_5$  в диапазоне допустимых ГОСТом значений (пунктирные линии на графике и цифровые значения в группе «Модель ЦД» в соответствии с 4 б). В случае сбоя в подаче воды или засорения труб на установке оператор видит это на мониторе.



а)



б)

Рисунок 4 – Вид интерфейса оператора: а – окно расчета оптимального режима; б – окно мониторинга физического объекта

Для повышения точности прогноза в модели ЦД предусмотрено внесение поправки по результатам механических испытаний (группа «Испытания» + кнопка «Поправка» представлено в соответствии с 4 б).

Значения исходных данных и средние значения настроек и механических свойств по нажатию кнопки «Сохранить» (в соответствии с рисунком 4б) сохраняются в базе данных (БД) для построения уточненных математических моделей прогноза температуры прокатки с помощью ИИ (в структуре ЦД не показано).

## Тестирование основных процессов работы на цифровом двойнике

Этот этап производят на реальном объекте при работе модели ЦД в режиме советчика. Целью этого этапа является проверка способности модели ЦД работать в реальном времени и уточняют её настройки. Для этого необходимо проведение экспериментов на физическом объекте, оснащённом указанным выше набором датчиков, в процессе которых технические аналитики собирают большой массив данных, чтобы уточнить алгоритмы для любых возможных условий и ситуаций.

Как показывают наши опытные прогонки модели ЦД поиск оптимального режима для 6 включенных секций длится до 10с, а один расчет параметров процесса в режиме мониторинга длится 0,2 с на бытовом компьютере с процессором AMD Ryzen 3 4300U с частотой 2,70 GHz.

## Запуск и наладка

Производятся на реальном объекте в случае успешного выполнения предшествующих этапов.

Решение о внедрении цифрового двойника сводится к двум вопросам: есть ли возможности улучшить процесс и окупятся ли вложения.

Когда все операции легко контролируются вручную или через базовые ИТ-системы, а потенциальная оптимизация минимальна, ЦД, очевидно, не нужен. Оцифровать производство, оснастить его датчиками и связать в единую аналитическую систему – это дорогостоящий проект. Частично цена может снижаться при наличии систем АСУТП или мониторинга, сбора и обработки данных. ЦД подходит для массовых производств, к которым, кстати, относится производство термоупрочненной арматуры на металлургических заводах, где результат может быть ощутимым за счет снижения потерь, сокращения времени на освоение новых продуктов, экономии энергоресурсов.

Еще одним фактором, сдерживающим внедрение ЦД является культура компании. Когда руководство или сотрудники не доверяют цифровым решениям, технология не отличается высокой степенью воспроизводимости, а процессы требуют постоянных ручных корректировок, внедрение может быть бесполезным.

## Заключение

Разработана концепция цифрового двойника для управления и контроля процесса термоупрочнения арматурных профилей в потоке прокатного стана.

Предложена структура цифрового двойника, определен набор регистрируемых на реальном объекте параметров, достаточный для моделирования показателей качества и затрат ресурсов, обеспечивающих эти показатели.

Описаны этапы разработки и создания цифрового двойника с использованием новых оригинальных математических моделей авторов процесса ускоренного охлаждения арматурных профилей.

Разработана программа лабораторного эмулятора ЦД процесса термоупрочнения арматурных профилей в потоке стана 390 и определен сценарий работы оператора. Лабораторные испытания показали возможность использования разработанных программ для мониторинга физического объекта в реальном времени.

Результаты работы могут использоваться как базовые при разработке реальных проектов цифровизации технологии сортовой прокатки на металлургических заводах.

## Список литературы

- 1 Концепция технологического развития на период до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 мая 2023 г. № 1315-р. [Электронный ресурс] URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202305250050> (дата обращения: 27.09.2025).
- 2 Абрамов В. И. Цифровые двойники: характеристики, типология, практики развития / В. И. Абрамов, В. В. Гордеев, А. Д. Столяров // Вопросы инновационной экономики. 2024. Т. 14, № 3. С. 691-716. DOI 10.18334/vines.14.3.121484
- 3 ГОСТ Р 57700.37— 2021. Компьютерные модели и моделирование Цифровые двойники изделий. Общие положения: Москва : Стандартинформ, 2021. — 10 с.
- 4 Сосфенов Д. А. Цифровой двойник: история возникновения и перспективы развития / Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2023. № 4. С. 35–43, <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-4-35>.
- 5 D’Amico R.D., Addepalli S., Erkoyuncu J.A. Industrial Insights on Digital Twins in Manufacturing: Application Landscape, Current Practices, and Future Needs // Big Data Cogn. Comput. 2023. p. 126.
- 6 Абрамов В. И., Абрамов О. В., Поливанов К. В., Семенов К. Ю. Особенности создания цифровых двойников управления логистикой предприятий // Новое в экономической кибернетике. 2024. № 2. с. 52-61
- 7 Heluany J.B., Gkioulos V. A review on digital twins for power generation and distribution // International Journal of Information Security. 2023. № 2. p. 1171 – 1195.
- 8 Deng T., Zhang K., Shen Z-J.M. A systematic review of a digital twin city: a new pattern of urban governance toward smart cities // J Manage Sci Eng. 2021. p. 125–134.
- 9 Комаров, А. В. Разработка системы цифровых двойников производственного оборудования цеха холодной прокатки с целью оценки его технического состояния с помощью методического инструментария системного инжиниринга / А. В. Комаров, А. А. Косов. Текст : непосредственный // Молодой ученый. 2024. № 47 (546). С. 29-35. URL: <https://moluch.ru/archive/546/119584>.
- 10 В ЮУрГУ создали аналитическую цифровую модель непрерывной прокатки .... [Электронный ресурс] URL: <https://dzen.ru/a/Zissii1BiETcKWLj> (дата обращения: 29.09.2025).
- 11 На ЕВРАЗ НТМК запущен цифровой двойник нагревательных печей/ [Электронный ресурс] URL:<https://www.metalinfo.ru/ru/news/176357> (дата обращения: 12.10.2025)
- 12 Курзаева Л.В., Корнев Р., Сладников Н.А., Майоров П.Е., Скляров А.О. Разработка цифровых двойников для металлургического производства (на примере мелкосортно-проволочного стана) // Современные наукоемкие технологии. 2023. № 12-2. С. 226-231;
- 13 URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=39886> (дата обращения: 28.09.2025). DOI: <https://doi.org/10.17513/snt.39886>
- 14 Абрамов, В. И. Цифровые двойники: характеристики, типология, практики развития / В. И. Абрамов, В. В. Гордеев, А. Д. Столяров // Вопросы инновационной экономики. 2024. Т. 14, № 3. С. 691-716. – DOI 10.18334/vines.14.3.121484
- 15 Эйсмонт К.Ю. Автоматизированная система управления устройством термоупрочнения арматуры стана 350 / К.Ю. Эйсмонт и др. // Сталь. 2007. № 6. С. 40 – 42.
- 16 Липунов Ю.И. Разработка и ввод в эксплуатацию участка термоупрочнения арматуры в потоке литейно-прокатного комплекса стана 280/ Ю. И. Липунов, К. Ю. Эйсмонт, К. А. Мягков и др. //“Сталь”. 2010. № 3. С.86-90. ISSN 0038—920X
- 17 Солод В.С., Пашинский В.В. Синтез технологии термоупрочнения и автоматизированной системы управления установкой термоупрочнения арматурных профилей с помощью математической модели структурообразования / Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2009. № 11 (1319). С. 61-65.
- 18 Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Kahlen, J., Flumerfelt, S., Alves, A. (eds) Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Springer, Cham. 2017. P.85–113 – [https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4)
- 19 itGuevara Digital Twin. Часть 1. Цифровой двойник vs цифровой самозванец. [Электронный ресурс] URL:<https://habr.com/ru/articles/877454>
- 20 Цифровые двойники: как digital-копии помогают решать задачи бизнеса [Электронный ресурс] URL: <https://rb.ru/columns/cifrovye-dvojniki> (дата обращения: 28.09.2025).
- 21 Солод В.С. Оценка возможностей использования нейросетевых моделей для оптимизации технологии охлаждения арматурной стали / В.С. Солод, В.М. Зуев, С.Б.Иванова //Проблемы искусственного интеллекта 2025 № 3 (38). С. 65-77.

- 22 Солод В.С. Физико-математическая модель для разработки экспертной системы ускоренного охлаждения арматурного проката / В.С.Солод// Проблемы искусственного интеллекта 2025 № 2 (37). С. 44-58. DOI 10.34757/2413-7383.2025-2-37-44-58.
- 23 Солод В.С. Физико-математическая модель для разработки экспертной системы сортопрокатного производства/ Проблемы искусственного интеллекта 2024 № 3 (34). С. 20-28.
- 24 Солод В.С. Алгоритм и программа оптимизации режима ускоренного охлаждения арматурных профилей в термоустановке конструкции «Thermex»// Проблемы искусственного интеллекта 2024 № 4 (39). С. 4-15.

## References

- 1 Concept of Technological Development through 2030. Approved by Decree of the Government of the Russian Federation dated May 20, 2023, No. 1315-r. [Electronic resource] URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202305250050> (accessed: September 27, 2025).
- 2 Abramov, V. I. Digital Twins: Characteristics, Typology, and Development Practices / V. I. Abramov, V. V. Gordeev, A. D. Stolyarov // Issues of Innovative Economics. - 2024. - Vol. 14, No. 3. - pp. 691-716. - DOI 10.18334/vinec.14.3.121484
- 3 GOST R 57700.37— 2021. Computer Models and Modeling. Digital Twins of Products. General Provisions: — Moscow: Standartinform, 2021. — 10 p.
- 4 Sosfenov D. A. Digital Twin: History of Origin and Development Prospects / Intelligence. Innovations. Investments. – 2023. – No. 4. – P. 35–43, <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-4-35>.
- 5 D’Amico R. D., Addepalli S., Erkoyuncu J. A. Industrial Insights on Digital Twins in Manufacturing: Application Landscape, Current Practices, and Future Needs // Big Data Cogn. Comput. – 2023. – p. 126.
- 6 Abramov V. I., Abramov O. V., Polivanov K. V., Semenov K. Yu. Features of Creating Digital Twins of Enterprise Logistics Management // New in Economic Cybernetics. – 2024. – No. 2. – pp. 52-61
- 7 Heluany J. B., Gkioulos V. A review on digital twins for power generation and distribution // International Journal of Information Security. – 2023. – No. 2. – pp. 1171 – 1195.
- 8 Deng T., Zhang K., Shen Z-J. M. A systematic review of a digital twin city: a new pattern of urban governance toward smart cities // J Manage Sci Eng. – 2021. – pp. 125–134.
- 9 Komarov, A. V. Development of a system of digital twins of production equipment of a cold rolling shop in order to assess its technical condition using the methodological tools of systems engineering/ A. V. Komarov, A. A. Kosov. - Text: direct // Young scientist. - 2024. - No. 47 (546). - Pp. 29-35. - URL: <https://moluch.ru/archive/546/119584>.
- 10 At SUSU, an analytical digital model of continuous rolling was created .... [Electronic resource] URL: <https://dzen.ru/a/Zissii1BiETcKWLj> (date of access: 09.29.2025).
- 11 A digital twin of heating furnaces has been launched at EVRAZ NTMK/ [Electronic resource] URL: <https://www.metalinfo.ru/ru/news/176357> (accessed: 12.10.2025)
- 12 Kurzaeva L.V., Kornev R., Slastnikov N.A., Mayorov P.E., Sklyarov A.O. Development of digital twins for metallurgical production (using the example of a small-section wire rod mill) // Modern science-intensive technologies. 2023. No. 12-2. pp. 226-231; URL: <https://top-technologies.ru/ru/article/view?id=39886> (accessed: 28.09.2025). DOI: <https://doi.org/10.17513/snt.39886>
- 13 Abramov, V. I. Digital twins: characteristics, typology, development practices / V. I. Abramov, V. V. Gordeev, A. D. Stolyarov // Issues of innovation economics. - 2024. - Vol. 14, No. 3. - Pp. 691-716. - DOI 10.18334/vinec.14.3.121484
- 14 Eysmond K. Yu. Automated control system for the rebar heat hardening device of mill 350 / K. Yu. Eysmond et al. // Steel. 2007. No. 6. Pp. 40 - 42.
- 15 Lipunov Yu. I. Development and Commissioning of a Rebar Thermal Strengthening Section in the Flow of the Casting and Rolling Complex of Mill 280 / Yu. I. Lipunov, K. Yu. Eysmond, K. A. Myagkov, et al. // “Stal”. 2010. No. 3. pp. 86-90. ISSN 0038-920X
- 16 Solod V.S., Pashinsky V.V. Synthesis of Thermal Strengthening Technology and an Automated Control System for a Rebar Thermal Strengthening Unit Using a Mathematical Model of Structure Formation / Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information. 2009. No. 11 (1319). pp. 61-65.
- 17 Grieves M., Vickers J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: Kahlen, J., Flumerfelt, S., Alves, A. (eds) Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems. Springer, Cham. 2017. – P.85–113 – [https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4)
- 18 itGuevara Digital Twin. Part 1. Digital Twin vs. Digital Intruder. [Electronic resource] URL: <https://habr.com/ru/articles/877454>

- 19 Digital Twins: How Digital Copies Help Solve Business Problems [Electronic resource] URL: <https://rb.ru/columns/cifrovye-dvojniki> (date of access: 09/28/2025).
- 20 Solod V.S. Evaluation of the Possibilities of Using Neural Network Models to Optimize Reinforcing Steel Cooling Technology / V.S. Solod, V.M. Zuev, S.B. Ivanova // Problems of Artificial Intelligence 2025, No. 3 (38). Pp. 65-77.
- 21 Solod V.S. Physical and Mathematical Model for Developing an Expert System for Accelerated Cooling of Reinforcing Bars / V.S. Solod // Problems of Artificial Intelligence 2025, No. 2 (37). Pp. 44-58. DOI 10.34757/2413-7383.2025-2-37-44-58.
- 22 Solod V.S. Physical and mathematical model for the development of an expert system for rolling production/Problems of artificial intelligence 2024 № 3 (34). Pp. 20-28.
- 23 Solod V.S. Algorithm and Program for Optimizing the Accelerated Cooling Mode of Reinforcing Profiles in a «Thermex» Thermal Unit // Problems of Artificial Intelligence 2024, No. 4 (39). Pp. 4-15.

## RESUME

*V.S. Solod, O.A. Butov, A.A. Nikitina*

*Development of the concept of a digital twin of the process of thermal reinforcement of reinforcing profiles in the rolling mill flow*

"Digital twins (DT)" are one of the applied information technologies that are predicted to have broad development prospects. There is no information in the known literature on the development of digital counterparts of the process of thermal reinforcement of reinforcing profiles in the rolling mill flow. The task of process control is solved with the help of automated control systems, but these systems do not solve the problem of optimizing energy costs with accelerated cooling of valves in a thermal installation.

Mathematical modeling, algorithmization and programming method, statistical modeling of simulation results.

Based on a mathematical model of accelerated cooling of reinforcing profiles in the rolling mill stream, an algorithm and a program for optimizing the hardening regime, the DT structure, a program for a laboratory emulator of the DT process of thermal reinforcement of reinforcing profiles in the mill 390 stream, and the operator's operating procedure were developed. The factors contributing to and constraining the introduction of DT into production are indicated.

Laboratory tests have shown the possibility of using the developed programs to monitor a physical object in real time. The results of the work can be used as a basis for the development of real digitalization projects for long-range rolling technology in metallurgical plants.

## РЕЗЮМЕ

*В.С. Солод, О.А. Бутов, А.А. Никитина*

*Разработка концепции цифрового двойника процесса термоупрочнения арматурных профилей в потоке прокатного стана*

Одной из прикладных информационных технологий которой пророчат широкие перспективы развития являются «Цифровые двойники». В известной литературе отсутствует информация о разработке цифровых двойников процесса термоупрочнения арматурных профилей в потоке прокатного стана. Задача контроля процесса решается с помощью АСУТП, но эти системы не решают проблему оптимизации затрат энергоресурсов при ускоренном охлаждении арматуры в термоустановке.

Математическое моделирование, метод алгоритмизации и программирования, статистическое моделирование.

На основе математической модели ускоренного охлаждения арматурных профилей в потоке прокатного стана, алгоритма и программы оптимизации режима упрочнения разработаны структура ЦД, программа лабораторного эмулятора ЦД процесса термоупрочнения арматурных профилей в потоке стана 390 и определен

порядок работы оператора. Указаны факторы, способствующие и сдерживающие внедрение ЦД в производство.

Лабораторные испытания показали возможность использования разработанных программ для мониторинга физического объекта в реальном времени. Результаты работы могут использоваться как базовые при разработке реальных проектов цифровизации технологии сортовой прокатки на металлургических заводах

**Бутов Олег Анатольевич** – младший научный сотрудник, ведущий инженер, Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Институт проблем искусственного интеллекта». *Область научных интересов:* механика и мехатроника, технология производства, искусственный интеллект, интеллектуальные робототехнические системы. E-mail: [boa.ipai@mail.ru](mailto:boa.ipai@mail.ru), адрес: 283048, г. Донецк, ул. Артема, д. 118 б, телефон +7(949) 331- 28-63.

**Солод Владимир Сергеевич** – к.т.н., научный сотрудник отдела интеллектуальных робототехнических систем Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Институт проблем искусственного интеллекта». *Область научных интересов:* компьютерное моделирование технологии прокатного производства, эл. почта <mailto:vs.solod@mail.ru>, адрес: 283048, г. Донецк, ул. Артема, д. 118 б, Россия, телефон +7(949) 459- 02 -42.

**Никитина Анжела Анатольевна** – младший научный сотрудник Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Институт проблем искусственного интеллекта». *Область научных интересов:* компьютерные информационные технологии, эл. почта [pastuhova.anjela@gmail.com](mailto:pastuhova.anjela@gmail.com), адрес: 283048, г. Донецк, ул. Артема, д. 118 б, телефон +7949 332 78 09.

**Oleg Anatolyevich Butov** – junior researcher, a leading engineer at the Federal State Budgetary Scientific Institution Institute of Artificial Intelligence Problems. Research interests: mechanics and mechatronics, production technology, artificial intelligence, intelligent robotic systems. E-mail: [boa.ipai@mail.ru](mailto:boa.ipai@mail.ru), address: 283048, Donetsk, Artyom str., 118 b, phone +7(949) 331- 28-63.

**Vladimir Sergeevich Solod** – PhD, research associate, Department of Intelligent Robotic Systems, Federal State Budgetary Scientific Institution “Institute of Artificial Intelligence Problems”. Research interests: computer modeling of rolling production technology. Email: [vs.solod@mail.ru](mailto:vs.solod@mail.ru), address: 283048, Donetsk, Artema St., 118b, Russia, phone: +7(949) 459-02-42.

**Nikitina Angela Anatolyevna** – Leading Engineer for Scientific and Technical Information, Federal State Budgetary Scientific Institution “Institute of Artificial Intelligence Problems”. Research area: computer information technologies, e-mail [pastuhova.anjela@gmail.com](mailto:pastuhova.anjela@gmail.com), address: 283048, Donetsk, Artem str., 118 b, phone +7949 332 78 09.

Статья поступила в редакцию 17.02.2026