

УДК 528.013, 621.771.07

DOI 10.24412/2413-7383-2024-3-20-28

В. С. Солод

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Институт проблем искусственного интеллекта», г. Донецк,
283048, г. Донецк, ул. Артема, 118 б

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ СОРТОПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

V. S. Solod

Federal State Budgetary Scientific Institution «Institute of Artificial Intelligence Problems»,
283048, Donetsk, Artema str, 118-b

PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODEL FOR THE DEVELOPMENT OF AN EXPERT SYSTEM FOR SECTION ROLLING PRODUCTION

Основанный на оригинальных математических моделях формоизменения металла, сопротивления деформации, температурных изменений в процессе деформации, нагрева и охлаждения проката, программный комплекс позволяет использовать разработанные ранее варианты технологии при новых технологических разработках, что значительно сокращает время на проектирование. Кроме того, на этой модели может базироваться экспертная система оптимизации технологии сортовой прокатки с использованием искусственного интеллекта.

Ключевые слова: модель сортового стана, программный комплекс, технология прокатки, оптимизация, экспертная система.

Based on original mathematical models of metal forming, flow stress, temperature distribution during hot deformation, heating and cooling of rolled products, the software package allows using previously developed technology options in new technological developments, which significantly reduces design time. In addition, this model can be used as the basis for an expert system for optimizing section rolling technology based on artificial intelligence.

Key words: model of a section mill, software package, rolling technology, expert system.

Конечной целью данной работы является использование разработанной физико-математической модели для построения экспертных систем сортопрокатного производства на основе искусственного интеллекта (ИИ).

Применение искусственного интеллекта в металлургии имеет уникальную специфику. Особое распространение в данной отрасли получили две конкретные технологии:

- цифровые двойники (цифровые советчики, экспертные системы);
- машинное зрение.

Цифровой двойник – это своеобразный виртуальный объект, повторяющий принцип действия оборудования.

Внедрение искусственного интеллекта в металлургии сталкивается с необходимостью значительных начальных инвестиций, сопротивлением изменениям в корпоративной культуре и вопросами безопасности данных [1].

Для сокращения начальных затрат, в частности, при разработке и обучении нейронных сетей, моделирующих прокатку, применяют физико-математические модели, например – метод конечных элементов.

Так, в работе [2] представлена экспертная система, которая автоматически выбирает и проектирует последовательности прокатки для производства квадратного и круглого профилей. Стратегия проектирования направлена на сокращение общего количества проходов с учетом ряда ограничений процесса, например, доступной мощности и крутящего момента привода прокатной клетки, заполнения калибров и т. д.

Метод выполняется в два этапа: сначала генетический алгоритм используется для выбора правильной последовательности прокатки, позволяющей получить желаемый готовый продукт; затем используется инструмент проектирования калибров и оптимизации прокатки. Искусственная нейронная сеть (ИНС) используется для прогнозирования основных геометрических характеристик прокатываемого полуфабриката и технологических требований.

ИНС обучена с помощью нелинейной модели конечных элементов. Предложенная методология была применена к некоторым промышленным случаям, чтобы показать обоснованность предлагаемого подхода с точки зрения сокращения количества промышленных опытов и надежности поиска [2].

Опыт последних десяти лет показал, что развитие сортопрокатного производства в России от массового крупнотоннажного (50-120 т/час) стремится к построению мало и микротоннажных прокатных станов (2-10 т/час) широкого сортамента, как по профилеразмерам, так и по маркам сталей и сплавов.

Исчезли крупные НИИ, производители оборудования для таких станов стремятся использовать минимальный штат проектировщиков. В этих условиях значительно возрастает роль систем автоматизированного проектирования технологии, позволяющих одному человеку в короткие сроки оперативно вырабатывать оптимальные проектные решения, основанные на достоверных математических моделях сортовой прокатки.

Работа над моделью сортопрокатного стана началась в конце 80-х на базе кафедры ОМД ДПИ, продолжалась в ООО НПО «Доникс» и продолжается в настоящее время в ФГБНУ «ИПИИ».

Параметры технологии в соответствии со схемой модели сортовой прокатки, показанной на рис. 1, определяются с учетом расположения оборудования стана, калибровки валков, исходных параметров прокатки.

При этом определяются энергосиловые параметры прокатки (сила, момент и мощность прокатки, момент и мощность на валу двигателя, удельные энергозатраты), параметры формоизменения (обжатие, уширение, форма и площадь раската, коэффициент вытяжки), температурный режим прокатки металла. скоростной режим (скорости металла, валков, двигателей), график прокатки, производительность стана.



Рисунок 1 – Структурная схема математической модели сортовой прокатки

Программа содержит модули для генерации расположения и параметров оборудования стана, ввода исходных данных, проектирования калибровки, расчета и вывода параметров технологии в виде таблиц, графиков и чертежей, готовых к использованию.

Модуль конструктора прокатных станов различной конфигурации с линейным, непрерывным и комбинированным расположением прокатных клетей дополнен следующими элементами вспомогательного оборудования: рольганги, шлеперные столы, обводные аппараты, ножницы (пилы), устройства подогрева (охлаждения) проката в межклетьевых промежутках, реечные холодильники.

Модель прокатного стана включает схему расположения прокатных клетей стана (рис. 2), характеристики клетей и электропривода, размеры используемых прокатных валков, тип используемых подшипников, допустимые параметры.

Модуль конструктора прокатного стана обеспечивает ввод и обработку необходимых данных по параметрам и расположению оборудования. В окне программы отображается разрабатываемая схема стана и таблица параметров оборудования.

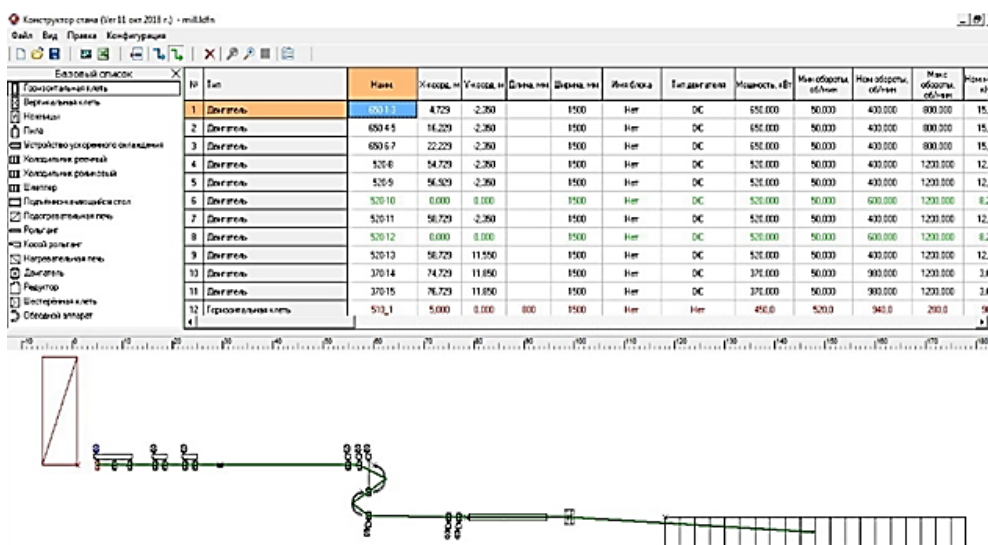


Рисунок 2 – Интерфейс окна конструктора прокатного стана

Модуль ввода исходных данных, интерфейс которого показан на рис. 3, позволяет задать характеристики исходного материала: выбрать марку прокатываемой стали (сплава) из внутренней базы данных, температуру нагрева заготовки, обеспечивает ввод информации о расстоянии от нагревательного устройства и скорости подачи заготовки к стану, а также формирует набор данных для вывода промежуточных результатов расчета в таблицу на экран.

Модуль проектирования калибров, интерфейс которого показан на рис. 4, дает возможность выбрать тип и ввести размеры калибра.

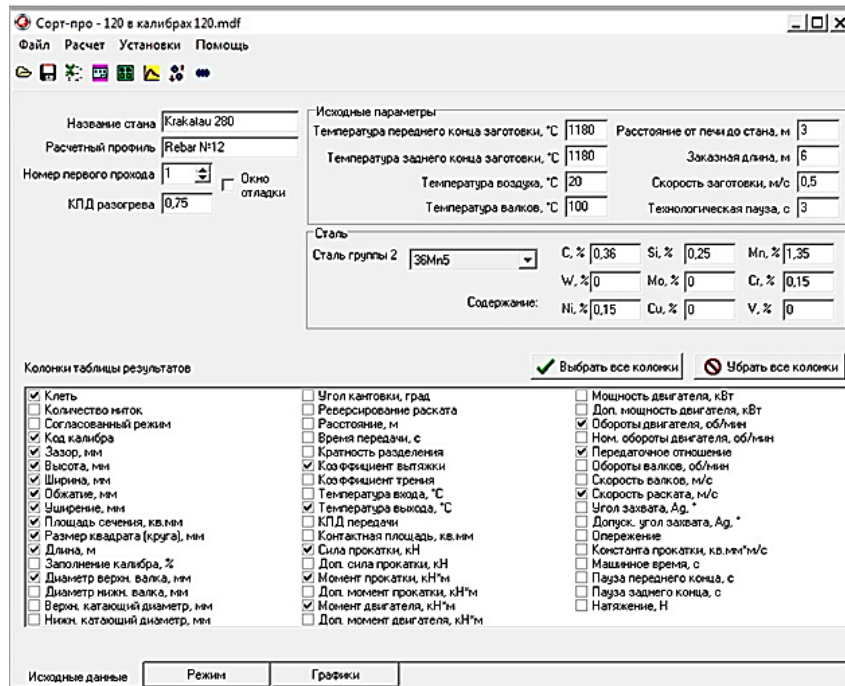


Рисунок 3 – Интерфейс модуля начальных параметров

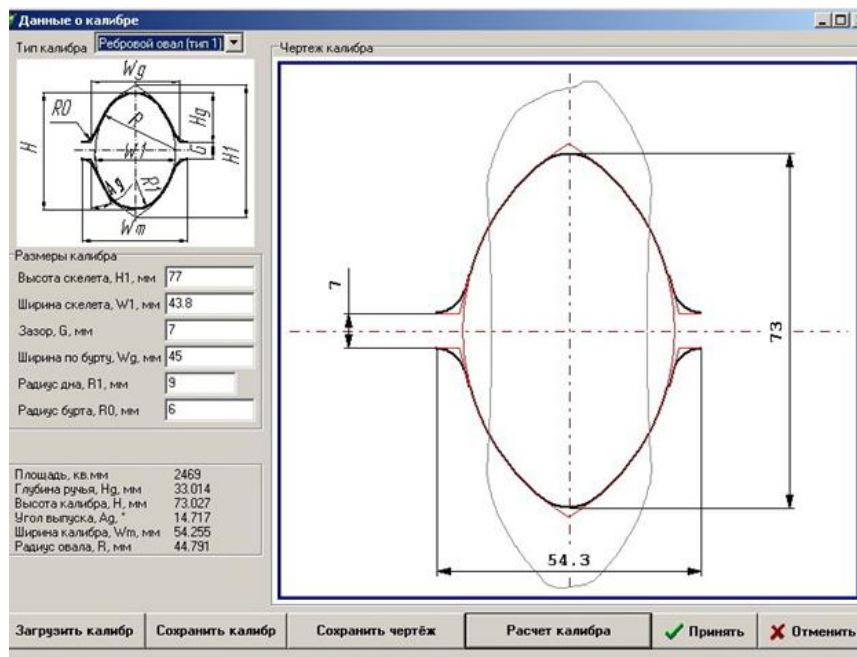


Рисунок 4 – Интерфейс модуля проектирования калибра

Модель сортового калибра представляет совокупность прямолинейных участков и дуг окружностей, описывающих контур ручьев калибра. В конструкторе калибра, реализован алгоритм обмена информацией между программой и файлами чертежей формата «*.dxf».

Таким образом, обеспечивается возможность как проектирования типовых вытяжных калибров из программной среды (гладкие валки, ящичный овал, однорадиусный овал, плоский овал, ребровой овал, круг, ромб, квадрат, арматурный), так и путем считывания информации из файлов, заранее построенных в САD-программах, чертежей сортовых калибров другой, в том числе и асимметричной формы.

Модель раската представляет совокупность сопряженных прямолинейных отрезков малой длины, определяется формой калибра, его заполнением, а также формой свободной от обжатия поверхности раската. (в зоне зазора).

Интерфейс модуля проектирования режима прокатки (рис. 5) включает выбор рабочей клетки из модели стана, задание угла кантовки подката, рабочего диаметра и материала валков, скоростных параметров прокатки и особенностей схемы прокатки, форму и положение подката, задать режим обжатия путем изменения зазора валков в интерактивном режиме.

Для выполнения расчетов, модуль проектирования режима прокатки обеспечивает ввод по каждому проходу данных, показанных на рис. 5.

На базе формулы А.П. Чекмарева [3] разработан алгоритм расчета уширения в вытяжных калибрах простой формы с погрешностью не более 10-20%. Также предусмотрена возможность корректировки ширины раската пользователем.

Определяемые в расчетном модуле параметры формоизменения включают форму и площадь проекции поверхности контакта металла с валками. Для получения этих данных разработана модель очага деформации, включающая алгоритм трансформирования свободного контура раската в очаге деформации [4], [5].

Алгоритм трансформирования раската в очаге деформации включает представление контура раската в виде массива точек и пошагового перемещения каждой точки по очагу деформации в соответствии с набором правил, задающих величину и направление ее перемещения в зависимости от места ее расположения в очаге деформации и условий деформирования.

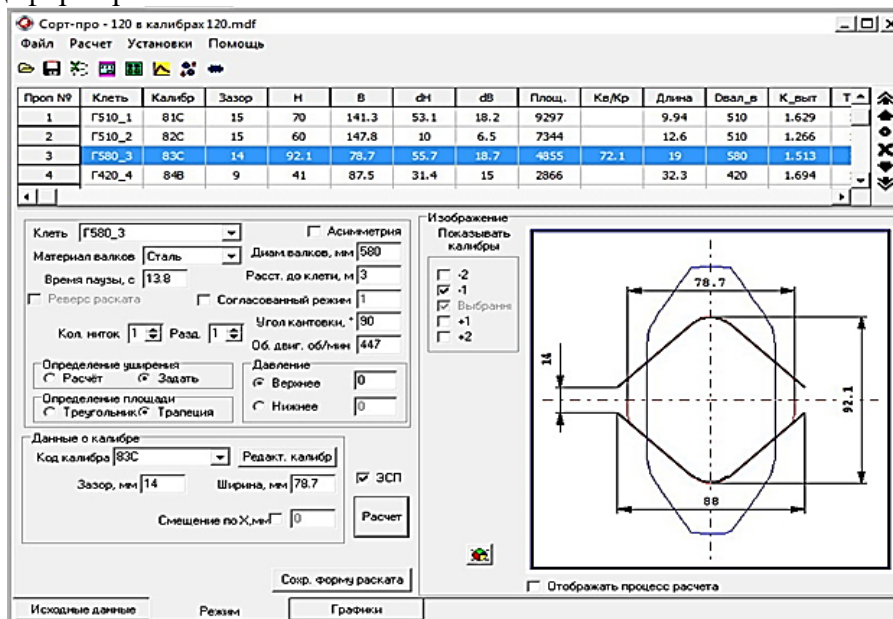


Рисунок 5 – Интерфейс модуля проектирования режима прокатки

Правила перемещения точек контура раската определяют распределение уширения по длине очага деформации и высоте полосы, а также регламентируют прилипание или скольжение точек, контактирующих с калибром по его поверхности.

После определения ширины и формы раската в графическом окне программы отображаются наложенные форма калибра и подката, а также контур заполнения калибра металлом (рис. 4).

Блок расчета энергосиловых и кинематических параметров прокатки включает в себя процедуры расчета для каждого прохода параметров, включающих геометрические характеристики раската, коэффициенты деформации, среднемассовую температуру и температуру поверхности раската, силовые и энергетические, скоростные параметры раската и главного привода.

При расчете сил и моментов прокатки использована оригинальная феноменологическая математическая модель мгновенного сопротивления деформации сталей и сплавов (сопротивления течению) [6], позволяющая определять сопротивление деформации в любом сечении очага деформации в зависимости от химического состава стали, температуры, скорости деформации и накопленной деформации.

Сила прокатки определяется численным интегрированием вертикального давления по длине и ширине очага деформации

Момент прокатки с учетом зон опережения и отставания определяется численным интегрированием силы прокатки по длине очага деформации при использовании закона трения Амонтона-Кулона.

Температурный режим прокатки определяется с применением численного решения дифференциального уравнения теплопередачи по методу прогонки для вычисления распределения температуры по сечению цилиндрического или плоского бесконечного стержня [7].

Необходимые для расчета зависимости теплофизических коэффициентов, в частности – плотности металла, коэффициента температуропроводности, удельной теплоемкости, теплосодержания, коэффициента теплоотдачи стали от температуры охлаждения получены статистической обработкой литературных табличных данных с высокой степенью точности на всем интервале температур прокатки и охлаждения.

Проверки точности определения параметров прокатки на базе прямых измерений токов якоря двигателей, проведенных на проволочном стане 150 ЗАО «ММЗ», системы визуализации параметров прокатки на стане 250 ISTIL(UK), и MES* системы стана 390 ЗАО «ММЗ» показали удовлетворительную сходимость расчетных и экспериментальных данных.

Модуль вывода результатов позволяет отобразить график прокатки, проекцию контактной площади, чертеж контура калибра и подката в момент захвата металла валками, углов захвата, оборотов двигателей, сил прокатки, моментов прокатки и крутящих моментов приведенных к валу двигателя, потребляемой мощности двигателя, графики изменения по пропускам температуры металла на переднем и заднем концах раската, диаметров валков, чертеж калибровки валков.

Результаты расчетов сохраняются в виде файлов базы данных схемы прокатного стана, калибровки и режима прокатки в специальном формате, таблиц и графиков в формате Microsoft Excel и графиков и чертежей в формате «*.dxf».

Построение чертежа монтажа калибров на валках и расчет валков на прочность выполняются выбором калибров из рассчитанного режима прокатки либо добавлением калибров из файлов базы данных других режимов.

Программный комплекс позволяет создавать универсальные базы данных по расположению и параметрам оборудования прокатных станов, калибровок, режимов прокатки.

Модульное построение программы обеспечивает использование разработанных ранее технологических элементов (схемы станов, калибры) и вариантов технологии при ведении новых технологических разработок, что значительно сокращает время на проектирование.

Оперативная цифровая и графическая информация дает возможность разработчику технологии определить перегрузки оборудования стана, оценить захватывающую способность калибров, устойчивость раската в валках, удельные энергозатраты.

С помощью описанного выше программного комплекса в разные годы выполнены работы по разработке калибровки валков и технологии прокатки на прокатных станах Донецка, Макеевки, Кривого Рога, Индонезии, разработке ряда технико-коммерческих предложений по запросам металлургических предприятий России.

Заключение

Использование разработанной физико-математической модели сортопрокатного стана может быть полезным проектировщикам прокатных станов, технологам прокатных цехов, калибровщикам и для использования в учебных заведениях для подготовки специалистов по сортовой прокатке.

Кроме того, на этой модели может базироваться экспертная система контроля и оптимизации технологии сортовой прокатки с использованием элементов ИИ.

Список литературы

1. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://studwork.ru/spravochnik/metallurgiya/primenenie-iskusstvennogo-intellekta-v-metallurgii>
2. Ламбиазе, Ф. Оптимизация последовательностей прокатки форм с помощью интегрированных методов искусственного интеллекта *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology Published: 19 January 2013, Volume 68, pages 443–452, (2013).*
3. Чекмарев, А.П. *Учебное пособие для вузов. Теория продольной прокатки / Чекмарев А.П., Нефедов А.А., Николаев В.А. Изд-во «Металлургия», 1965.*
4. Солод, В.С. Универсальная математическая модель формоизменения металла в вытяжных калибрах/ Солод В.С., Кулагин Р.Ю., Бейгельзимер Я.Е. *Сталь*. 2006. №8. С.16–18.
5. Солод, В.С. Применение универсальной математической модели формоизменения свободного контура для определения формы и площади контакта в вытяжных калибрах/ Солод В.С., Кулагин Р.Ю., Бенецкий А.Г. *Металл и литье Украины*. 2006. №7–8. С.49–51.
6. Солод, В.С. Математическое моделирование сопротивления деформации при горячей прокатке углеродистых сталей // Солод В.С., Бейгельзимер Я.Е., Кулагин Р.Ю. *Металл и литье Украины*. 2006. № 7–8. С. 52–56.
7. Математическое моделирование процесса комбинированного охлаждения сортового проката/ В.С. Солод, Д.Н. Новиков, М.Н. Тытюк, С.И. Гинкул, М.А. Ларченко. *Металл и литье Украины*. 2007, № 8. с. 28-30.

References

1. <https://studwork.ru/spravochnik/metallurgiya/primenenie-iskusstvennogo-intellekta-v-metallurgii>
2. F.Lambiasi Optimization of rolling sequences by integrated methods of artificial intelligent techniques/ *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology Published: 19 January 2013, Volume 68, pages 443–452, (2013).*
3. Chekmarev A.P., Nefedov A.A., Nikolaev V.A. Textbook for universities. Theory of longitudinal rolling. Publishing house "Metallurgy", 1965.

4. Solod V.S., Kulagin R.Yu., Beygelzimer Ya.E. Universal mathematical model of metal shaping in drawing passes//*Stal.*–20 06.–№8.–P.16–18.
5. Solod V.S., Kulagin R.Yu., Benetskiy A.G. Application of a universal mathematical model of free contour shaping for determining the shape and contact area in drawing passes // *Metal and Casting of Ukraine.*–2006.–№7–8.–P.49–51.
6. Solod V.S., Beygelzimer Ya.E., Kulagin R.Yu. Mathematical modeling of flow stress during hot rolling of carbon steels // *Metal and Casting of Ukraine.*–2006.–№7–8.–P.52–56.
7. Mathematical modeling of the process of combined cooling of rolled products/V.S. Solod, D.N. Novikov, M.N. Tytyuk, S.I. Ginkul, M.A. Larchenko // *Metal and Casting of Ukraine.* 2007, №8.- p. 28-30.

RESUME

V.S. Solod

Physical and Mathematical Model for the Development of an Expert System for Section Rolling Production

The use of artificial intelligence in metallurgy has unique specifics. Two specific technologies have become especially widespread in this industry, including digital twins (digital advisors, expert systems).

To reduce initial costs, in particular, when developing and training neural networks that simulate rolling, physical and mathematical models are used, for example, the finite element method.

The modern development of section rolling production in Russia from mass large-tonnage (50-120 tons / hour) tends to build small and micro-tonnage rolling mills (2-10 tons / hour) of a wide range, both in profile sizes and in steel and alloy grades.

Due to the disappearance of large research institutes, manufacturers of equipment for such mills tend to use a minimum staff of designers. In these conditions, the role of automated design systems for technology increases significantly, allowing one person to develop optimal design solutions based on reliable mathematical models of section rolling in a short time. The presented physical and mathematical model of the section rolling mill satisfies these conditions. The expansion of the application of the described model is associated with modern computer technologies.

Considering the modular design of the presented physical and mathematical model of the section rolling mill, as well as the completeness of the parameters for describing the design and technology, it can be used to create an expert system for monitoring and optimizing section rolling technology using artificial intelligent techniques.

РЕЗЮМЕ

В.С. Солод

Физико-математическая модель для разработки экспертной системы сортопрокатного производства

Применение искусственного интеллекта в металлургии имеет уникальную специфику. Особое распространение в данной отрасли получили две конкретные технологии, в том числе - цифровые двойники (цифровые советчики, экспертные системы).

Для сокращения начальных затрат, в частности, при разработке и обучении нейронных сетей, моделирующих прокатку, применяют физико-математические модели, например – метод конечных элементов.

Современное развитие сортопрокатного производства в России от массового крупнотоннажного (50-120 т/час) стремится к построению мало и микротоннажных

прокатных станов (2-10 т/час) широкого сортамента, как по профилиразмерам, так и по маркам сталей и сплавов.

В связи с исчезновением крупных НИИ, производители оборудования для таких станов стремятся использовать минимальный штат проектировщиков. В этих условиях значительно возрастает роль систем автоматизированного проектирования технологии, позволяющих одному человеку в короткие сроки оперативно выработать оптимальные проектные решения, основанные на достоверных математических моделях сортовой прокатки.

Представленная физико-математическая модель сортопрокатного стана удовлетворяет этим условиям. Расширение применения описанной модели связано с современными компьютерными технологиями.

Учитывая модульное исполнение представленной физико-математической модели сортопрокатного стана, а также полноту параметров для описания конструкции и технологии, она может быть использована для создания экспертной системы по контролю и оптимизации технологии сортовой прокатки с использованием искусственного интеллекта.

Солод Владимир Сергеевич – научный сотрудник Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Институт проблем искусственного интеллекта». *Область научных интересов:* Применение искусственного интеллекта для моделирования технологии сортовой прокатки; *e-mail:* solod. vs @gmail.com, *адрес:* 283048, г. Донецк, ул. Артема, д. 118 б, *телефон* +7(949) 459 02-42.

Статья поступила в редакцию 09.09.2024.