

## ОТЗЫВ

официального оппонента Шаталова Романа Львовича на диссертационную работу Митрофанова Артема Викторовича «Повышение энергоэффективности процесса непрерывной горячей прокатки на основе моделирования многократной деформации», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.4. Обработка металлов давлением

### **Актуальность работы**

Развитие технологии производства горячекатаных полос высокого качества, усовершенствование режимов прокатки, снижение расходов на передел являются приоритетными направлениями развития металлургии. Наиболее экономически целесообразным направлением ее решения является оптимизация параметров технологического процесса на действующих прокатных агрегатах с использованием математического и компьютерного моделирования, что позволяет обойтись без капиталоемкой модернизации или замены оборудования.

Поэтому разработка деформационных режимов и алгоритмов оптимизации горячей прокатки стальных полос в чистовой группе широкополосных станов, обеспечивающих снижение энергопотребление, является актуальной темой диссертационного исследования.

### **Структура и основное содержание диссертационной работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, содержащего 81 источник, а также приложений. Общий объем работы составляет 118 страниц, включая 26 рисунков и 39 таблиц.

Во *введении* обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также положения, выносимые на защиту.

В *первой главе* выполнен критический обзор отечественных и зарубежных исследований, посвященных энергосиловым расчетам и снижению энергопотребления в процессе непрерывной горячей прокатки полос. На основании анализа промышленных данных действующего НШСП 2000 ПАО «Северсталь», показана принципиальная достижимость снижения энергопотребления на 3–4 % путем целенаправленного перераспределения обжатий между клетями чистовой группы стана.

Во *второй главе* приведены результаты исследования по расхождению между мощностью прокатки и мощностью, требуемой для привода рабочего вала в 4х-валковой клетки. Выявлены дополнительные расходы энергии на

вращение холостого опорного вала, включая связанные с этим потери. С целью количественной оценки указанного вклада с использованием программного комплекса вычислены крутящие моменты, необходимые для приведения во вращение рабочих валков в клетях двух типов валковых систем. Проведено моделирование процесса прокатки полос из углеродистой стали обычного качества для клетки, эквивалентной чистовой группе ШПСГП 2000, отдельно для 4х-валковой и 2х-валковой систем. В целях верификации результатов численного моделирования выполнены опытные прокатки свинцовых полос в клетях лабораторного стана.

В *третьей главе* приведены результаты исследования и количественной оценки потенциальных резервов снижения энергопотребления двигателями главных приводов чистовой группы клетей ШПСГП 2000. Установлено, что наибольший эффект (порядка 10–15 %) может быть достигнут при оптимизации режимов прокатки полос толщиной 1,2–6,0 мм. Показано, что физическая обоснованность перераспределения обжатий для снижения энергетических затрат при производстве горячекатаной полосы обусловлена механизмами процессов деформационного упрочнения в валках и разупрочнения, протекающего в паузах между клетями за счет возврата и рекристаллизации.

В *четвёртой главе* разработан алгоритм оптимизации режимов горячей прокатки, нацеленный на минимизацию энергетических затрат при ведении процесса. Расчетные эксперименты, выполненные с его использованием, показывают, что для отдельных групп сортамента максимальный эффект снижения потребляемой мощности достигается при увеличении частных обжатий не только в первой, но также во второй, третьей и предпоследних клетях непрерывной группы ШПСГП 2000.

В *пятой главе* на примере действующего широкополосного стана горячей прокатки (стан 2000 ПАО «Северсталь») представлены результаты усовершенствования технологических режимов горячей прокатки полос, реализованные на основе полученных в данной работе положений и разработок.

В *заключении* сформулированы основные выводы по результатам диссертационной работы.

В *приложениях* приведены документы подтверждающие результаты внедрения разработок на металлургическом комбинате и университете.

### **Обоснованность и достоверность полученных результатов и выводов**

Достоверность полученных научных результатов обеспечена корректным применением математического аппарата, включая метод

конечных элементов (МКЭ) и статистические методы; дополнительно их обоснованность подтверждается согласованностью с данными производства. По итогам апробации разработанных режимов горячей прокатки, выполненной с использованием системы мониторинга потребления электроэнергии главными приводами клетей ШПСГП 2000, установлено, что фактическое снижение энергопотребления при прокатке опытных партий практически совпадает с предварительным прогнозом, полученным на основе модели.

### **Научная новизна исследования**

На мой взгляд, научная новизна диссертационной работы заключается:

1. Раскрыт и количественно формализован механизм влияния чередующихся процессов деформационного упрочнения в валках и разупрочнения металла в промежутках между клетями на энергетические затраты при непрерывной горячей прокатке стальных полос;
2. Выявлены и количественно описаны дополнительные затраты энергии в 4х-валковой системе, обусловленные вращением опорных валков.
3. Разработан алгоритм расчета режимов горячей прокатки стальных полос, для минимизации энергетических затрат при ведении процесса.

### **Практическая значимость диссертационной работы**

1. Разработанный алгоритм и программа расчета оптимизации деформационных режимов прокатки в чистой группе клетей для снижения энергопотребления внедрены в АСУ стана 2000 ПАО «Северсталь».
2. Материалы исследования используются при изучении студентами ряда дисциплин по направлению подготовки «Металлургия» в Череповецком государственном университете.

### **Публикации по теме диссертации и апробация работы**

Результаты работы опубликованы в 3 научных статьях в журналах, рекомендованных ВАК Российской Федерации для публикаций основных научных результатов диссертаций, получено 3 патента РФ и 1 международный патент. Результаты диссертации были представлены и получили положительную оценку на международных конференциях «Научно-технический прогресс в черной металлургии»; на конференции «Череповецкие научные чтения»; на конференции «Современные требования и металлургические аспекты повышения коррозионной стойкости и других служебных свойств углеродистых и низколегированных сталей».

Автореферат диссертации и публикации достаточно полно отражают содержание диссертационной работы.

## **Оформление диссертации**

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.11-2011. Текст работы структурирован, изложен ясным научным языком, содержит необходимый иллюстративный и табличный материал.

## **Замечания по содержанию работы**

1. Во второй главе отмечено, что уровень затрат энергии в 4х-валковой системе на треть выше, чем в 2х-валковой. Однако не показано, какая часть энергии 4х-валковой системы расходуется на деформацию металла, а какая идет на вращение опорного вала.

2. В четвертой главе приведена регрессионная зависимость влияния параметров прокатки на суммарную мощность двигателей главного привода при прокатке полос из стали 08пс толщиной 2,3 мм. Для уточнения влияния температуры полосы на входе в чистовую группу клетей на показатели прокатки необходимо расширить температурный диапазон и рассматриваемый сортамент.

3. Приведены практические примеры оптимизации режимов горячей прокатки, которые показали возможность экономии энергии до 10 %, при этом в третьей главе определен уровень максимально возможной экономии до 15 %. Видимо, существуют дополнительные резервы для дальнейшей оптимизации текущих технологических решений, что не исследовано.

4. Величина сопротивления деформации зависит и от конкретного химического состава стали, что не учитывается при расчете и оценки энергосиловых показателей горячей прокатки полос.

5. Не исследовано влияние разработанных деформационных режимов прокатки на формирование внутренних напряжений в листовом прокате и плоскостность горячекатаных полос.

6. В тексте диссертации имеются опечатки и не корректные термины.

Сделанные замечания не снижают научной и практической ценности полученных результатов и не меняют общей положительной оценки диссертационной работы.

## **Заключение по диссертационной работе**

Диссертационная работа «Повышение энергоэффективности процесса непрерывной горячей прокатки на основе моделирования многократной деформации», является самостоятельной, законченной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему, имеющей научную новизну и практическую значимость. В работе на основании выполненных автором исследований разработаны и изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, направленные на

повышение эффективности листопрокатного производства, и имеющие существенное значения для развития экономики страны.

Выносимые на защиту результаты получены при определяющем вкладе самого автора и соответствуют п. 1 «Исследование и расчёт деформационных, скоростных, силовых, температурных и других параметров разнообразных процессов обработки металлов, сплавов и композитов давлением», п. 4. «Оптимизация способов, процессов и технологий обработки металлов давлением для производства металлопродукции с целью повышения характеристик качества продукции» паспорта научной специальности 2.6.4. Обработка металлов давлением.

Диссертация в целом отвечает требованиям «Положения о присуждении учёных степеней» (утверждённого постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 с дополнениями), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор, Митрофанов Артем Викторович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.4. Обработка металлов давлением.

Даю согласие на обработку своих персональных данных, с использованием или без использования средств автоматизации, в целях обеспечения соблюдения требований законодательства Российской Федерации, и включения их в аттестационное дело соискателя.

Официальный оппонент:

Профессор кафедры «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет», доктор технических наук (05.16.05. - обработка металлов давлением), профессор

Шаталов Роман Львович

30.03.2026г

**Контактные данные:**

Адрес: 107023, Москва, ул. Большая Семёновская

тел.: +7 (905) 535-68-37.

E- mail: [r.l.shatalov@mospolytech.ru](mailto:r.l.shatalov@mospolytech.ru); [mmomd@mospolytech.ru](mailto:mmomd@mospolytech.ru)

ПОДПИСЬ Шатамова Р.Л. заверяю

СПЕЦИАЛИСТ  
КАДРОВОМ  
ДЕЛОПРОИЗВОД  
ПОГОРЕЛОВА А. В.