



МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по научно-
организационной деятельности

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279
ОКПО 02068574

Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург 197254
тел.: +7(812)297 2095, факс: +7(812)552-6080
office@spbstu.ru

Санкт-Петербургского политехниче-
ского университета Петра Великого
доктор технических наук, доцент



№ _____
на № _____ от _____

Клочков Ю.С.

_____ февраля 2022 г.

ОТЗЫВ

**ведущей организации на диссертацию Кожевникова Александра Вячесла-
вовича по теме «Теоретическое обоснование и совершенствование процес-
сов тонколистовой прокатки в условиях нестационарного динамического
нагружения», представленную на соискание ученой степени доктора тех-
нических наук по специальности 2.6.4 (05.16.05) – Обработка металлов
давлением**

Актуальность темы диссертации. По мнению автора работы А.В. Кожевникова прокатное производство развивается в двух основных направлениях – повышения производительности прокатного оборудования за счет увеличения скоростей прокатки и проектирования технологии производства новых марок сталей в соответствии с требованиями потребителей. По большому счету можно выделить еще ряд направлений развития, в том числе популярное сегодня в мировой практике создание цифровых двойников промышленных технологий термомеханической обработки, которые позволяют решить целый комплекс технологических оптимизационных задач. Однако при холодной листовой прокатке на непрерывных станах, которой посвящена основная часть диссертационной работы, проблемы формирования структуры и механических свойств не столь существенны, и решаются в большинстве случаев последующей термической обработкой холоднокатаного металла. В теории и технологиях холодной прокатки существуют специфические проблемы, на решение части которых

направлены исследования в диссертационной работе А.В. Кожевникова. К первой из них следует отнести проблемы управления непрерывной прокаткой в условиях нестационарных, меняющихся во времени, параметров процесса, таких как натяжение, опережение, энергосиловые параметры, на динамическое изменение которых должна оперативно реагировать система автоматического управления станом.

Можно считать, что генеральной линией диссертации является анализ вибраций клеток непрерывного стана, выяснения их причин, реакции оборудования и системы управления на ликвидацию вибраций. Однако, в ряде случаев вибрации, которые можно считать нормальным явлением при динамических режимах работы оборудования, и которые можно снизить за счет систем управления станом, перерастают в резонансные колебания, что, как правило, наблюдается в наиболее нагруженных клетях при прокатке тонкого листа в определенном диапазоне скоростей прокатки.

Вибрации, возникающие в очаге деформации, приводящие к резонансным колебаниям элементов прокатной клетки (как показано в работе А.В. Кожевникова, резонируют станины клеток), и наблюдаемые при скоростях прокатки 15-18 м/с, не позволяют достичь максимальных проектных скоростей прокатки, что ограничивает производительность станов. Следует отметить, что резонансные колебания наблюдаются на многих, если не на всех, высокоскоростных непрерывных станах холодной прокатки, работающих с натяжением полосы. Понятно, что разработка мероприятий по выявлению причин возникающих вибраций и резонансных колебаний, а также разработка мер борьбы с подобными вибрациями, является **чрезвычайно важной и актуальной проблемой**.

Проблема возникновения резонансных колебаний прокатных клеток очень интересна, если не сказать загадочна, не только в практическом, но и в чисто научном плане, поскольку причина возникновения вибраций является чисто прокатной и связана с динамикой изменения геометрических и кинетических параметров очага деформации, на которые дополнительно влияют вероятностные свойства прокатываемой полосы – изменения предела текучести и разнотолщинность полосы. Следует заметить, что исследования, предпринятые в докторской диссертации, являются продолжением и развитием работ, начатых в кандидатской диссертации, защищенной в 2004 году.

Исследователи, изучающие возникновение резонансных колебаний прокатных клеток, выделяют несколько возможных причин возникновения

этого негативного явления, в том числе – деградацию органического компонента смазочно-охлаждающей жидкости (эмульсола) под действием высоких напряжений в очаге деформации, вплоть до явления разрыва жидкости с резким изменением коэффициента трения. Заметим, что смазочные жидкости, как и другие среды, имеют свои значения предельных нагрузок.

Другие исследователи связывают это явление с динамическим изменением характера напряженно-деформированного состояния полосы, в которой могут возникать продольные колебания. В конечном итоге их причиной считают непостоянство сил трения, которое провоцирует попеременный захват полосы валками и его срыв (проскальзывание).

Интересно, что резонансные колебания элементов прокатной клетки отражаются на качестве поверхности проката – возникают поперечные полосы («ребристость», «полосчатость» поверхности), проходящие через всю ширину проката. Постороннему наблюдателю может показаться забавным, что данный дефект поверхности, который виден на прокате, может проявлять себя и после нанесения лакокрасочного покрытия, например, на кузов автомобиля. Возможно, это свидетельствует о том, что при анализе причин появления резонансных вибраций следует рассматривать систему «валковый узел – смазочная жидкость – деформируемый металл».

Структура и содержание работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, изложенных на 346 страницах машинописного текста, содержит 164 рисунка, 24 таблицы и приложения, библиографический список из 300 наименований, справку об экономическом эффекте разработок.

Во введении отражена актуальность, поставлена цель и сформулированы задачи исследования, обозначены положения научной новизны, теоретической и практической значимости диссертационной работы.

В Главе 1 внимательно рассмотрены и тщательно проанализированы методики, достоинства и недостатки выполненных ранее работ. В результате анализа был выбран и обоснован собственный путь решения проблемы, сформулированы основные идеи, цели и задачи работы, реализация которых приводит к развитию теоретических основ холодной непрерывной прокатки в условиях нестационарного динамического нагружения и повышению эффективности листопрокатного производства.

В Главе 2 «Развитие теории процесса тонколистовой прокатки» рассмотрены структуры модели упругопластического деформирования при

нестационарном динамическом нагружении, физико-математической модели холодной прокатки, электромеханической системы прокатного стана, модели расчета основных параметров очага деформации, модель опережения, выявлены причины колебаний опережения. В результате выполненных исследований установлено, что в главном приводе клетки стана возможно возникновение автоколебаний, обусловленных рядом причин и взаимосвязанных с искривлением нейтрального сечения, а, следовательно, и коэффициента плеча, определяющего момент прокатки, и так далее по линии привода. При возникновении колебаний разность скоростей верхнего и нижнего валков может достигать 0,15-0,2 м/с, что может вызывать колебания скорости перемещения полосы с различной частотой, проскальзывание одного из валков и кратковременную пробуксовку. Изменения коэффициента трения, скорости прокатки, положения нейтрального сечения, приводят к колебаниям компонент тензора напряжений, на изменение которых случайным образом могут влиять изменения механических свойств полосы по ходу прокатки и ее разнотолщинность.

В главе 3 «Исследования факторов и выявление причин возникновения вибраций в рабочих клетях станов холодной прокатки» определены собственные частоты колебаний элементов прокатной клетки и показано, что резонансные колебания с частотой ~120 Гц при тонколистовой прокатке возникают в станинах. Раскрыт механизм резонансных частот колебаний в очаге деформации наиболее нагруженной клетки стана, обусловленной колебаниями привода и несоблюдением постоянства натяжения полосы, которое во времени чередуется с прокаткой с «подпором». Дополнительным фактором возникновения проскальзывания валков и вибраций является невыполнение условия устойчивой прокатки за счет снижения коэффициента трения в очаге деформации из-за уменьшения шероховатости валков во время межперевалочной кампании.

Показано, что существует технологическая возможность проектирования режимов прокатки, исключающих вероятность возникновения резонансных колебаний клетки. Возможно, имеются пути изменения конструкции станин, собственные частоты которых отличаются от возникающих при прокатке вибраций. Разработанная в работе конечно-элементная модель прокатки с учетом дополнительных наложенных на очаг деформации колебаний различной частоты позволяет выполнять расчеты профиля полосы, вызванного изменением энергосиловых параметров при резонансных вибрациях.

Оценочные расчеты показывают изменения толщины прокатываемой полосы на доли микрометра, которые автор связывает с появлением «ребристости».

Разработан метод идентификации опасной резонансной фазы колебаний, основанный на статистическом анализе распределения разности переднего и заднего натяжения. Этот метод позволяет прогнозировать появление резонансных колебаний за 5-10 секунд до их появления, что позволяет обеспечить корректировку режимов прокатки. Разработан метод активного демпфирования колебаний и схема управления демпфированием на принципе активного гашения противофазным сигналом.

В Главе 4 «Разработка методологии проектирования технологических режимов процесса прокатки» предложены алгоритмы проектирования технологических режимов прокатки с учетом изменения во времени технологических параметров и свойств проката. Практическая реализация методологии, алгоритмов и программного обеспечения позволила спроектировать режимы прокатки со снижением энергопотребления на 5-8%.

В Главе 5 «Разработка и внедрение решений для совершенствования технологий прокатного производства» описана промышленная реализация решений, исключающих возникновение резонансных вибраций в рабочих клетках непрерывного стана холодной прокатки, освоение энергоэффективных режимов работы непрерывных станов холодной и горячей прокатки. Впрочем, для последнего случая - при производстве горячекатаного листа, не подлежащего последующей холодной прокатке, энергоэффективные режимы должны быть согласованы с режимами, обеспечивающими необходимое структурное состояние аустенита перед началом ускоренного контролируемого охлаждения.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 54 статьи, в том числе 29 в журналах, рекомендованных ВАК, 8 в зарубежных журналах, входящих в международные базы данных *Web of Science* и *Scopus*, 17 публикаций в сборниках трудов всероссийских и международных конференций; получено 4 патента на изобретения Российской Федерации, 1 патент на полезную модель и 4 свидетельства на регистрацию программ для ЭВМ; опубликована 1 монография.

Научная новизна, обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Положения о научной новизне сформулированы в разделе диссертации «Введение» и в автореферате. Можно констатировать, что основными положениями научной новизны являются:

1. Комплексная динамическая модель процесса холодной прокатки, включающая математическое описание элементов линии привода и валкового узла, очага деформации с описанием опережения и условий прокатки полосы с натяжением, построенная интегрирующая знания в области теории прокатки и теории электропривода. С использованием модели установлено, что в линии привода рабочей клетки прокатного стана постоянно действуют крутильные колебания с частотой, кратной 12,5 Гц, оказывающие влияние на валковый узел и характер изменения параметров очага деформации. Выявлено, что рассогласование окружных скоростей вращения рабочих валков, составляющее 0,15–0,3 м/с, приводит к отклонению нейтрального сечения от вертикали, характерной для стационарного процесса, в сторону выхода из очага деформации и возникновению проскальзывания верхнего валка относительно полосы и, соответственно, вибрациям.
2. Раскрыт механизм возникновения негативных вибрационных эффектов, ограничивающих проектную максимальную скорость прокатки на 25–50 %, заключающийся в несоблюдении для рабочей клетки условий прокатки полосы с натяжением и чередованием во времени натяжения и подпора. Выявлено, что повышение уровня колебаний скоростей рабочих валков и относительных обжатию более, чем на 10–15 %, межклетевых натяжений более, чем на 20 % является причиной нарушения условий прокатки полосы с натяжением и ввода рабочей клетки в режим вибраций. При увеличении скорости прокатки частота вибраций может достичь частоты собственных колебаний станин, что приводит к возникновению резонансных колебаний этих важнейших элементов рабочих клеток стана.
3. Разработана и реализована численная модель холодной прокатки, сопровождающейся вибрациями рабочих валков, позволяющая рассчитывать изменение продольных напряжений в поверхностном слое металла, силу прокатки, продольную разнотолщинность полосы и прогнозировать профиль поверхности полосы после прокатки. Установлено, что вибрации рабочих валков не оказывают существенного влияния на продольную разнотолщинность полосы, но приводят к появлению поверхностного дефекта «ребристость» с чередующимися светлыми и темными полосами.
4. Методы идентификации опасной резонансной фазы, которые позволяют достоверно установить момент ее наступления и обеспечивают время, необходимое для корректировки технологических параметров.

5. Методология и оригинальный алгоритм проектирования энергоэффективной технологии холодной прокатки тонких стальных полос, позволяющие разрабатывать технологические режимы со сниженной на 5–8 % удельной энергоемкостью, по сравнению с базовыми.

Практическая значимость.

1. Разработан метод электромагнитного демпфирования нагрузочных и крутильных колебаний в линии главного привода, основанный на принципе активного гашения путем наложения сигналов с противоположным знаком.

2. Разработан способ идентификации вибраций в рабочих клетях станов холодной прокатки в режиме «*online*», в основе которого лежит статистическая оценка выборок межклетевых натяжений полосы и токовых нагрузок в линии привода.

3. Разработаны практические рекомендации по корректировке технологических режимов для обеспечения эффективного воздействия на геометрию очага деформации и качество поверхности холоднокатаного проката, для исключения вероятности возникновения резонансных вибраций и повышения энергоэффективности процесса.

4. Разработаны программы для ЭВМ, позволяющие определять и оценивать изменения энергосиловых параметров холодной прокатки, параметров очага деформации в условиях динамического протекания процесса с учетом разнотолщинности прокатываемого металла, крутильных колебаний в электромеханической системе привода и колебаний технологических параметров.

5. Экономический эффект от внедрения результатов работы может составить более 200 млн руб., что подтверждено соответствующей справкой от 29.05.2019 г. (приложение 1 к тексту диссертации).

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации определяется использованием автором известных, подтвердивших свою состоятельность законов, закономерностей и гипотез теории обработки металлов давлением, описанных в ранее опубликованных работах, результатами собственного математического и физического моделирования исследуемых процессов прессования труб.

Достоверность результатов исследований, приведенных в диссертации Кожевникова А.В., базируется на применении основополагающих принципов теории обработки металлов давлением и механики сплошных сред, соблюдения принципов проведения экспериментальных исследований, методов обработки

эмпирических данных, корректного использования комплекса лабораторного оборудования, статистической обработкой экспериментальных результатов.

Недостатки работы и замечания. При общей положительной оценке работы можно высказать несколько замечаний, которые, тем не менее, не меняют сути и основных достижений диссертационной работы А.В. Кожевникова.

1. Ощущается необходимость более четкой формулировки причинно-следственной связи влияния факторов на возникновение частотного спектра вибрационных колебаний, вызывающих резонанс станин прокатной клетки.

2. Как известно, резонанс возникает в том случае, если частота вынужденных колебаний (в данном случае – возникающих в очаге деформации) совпадает с частотой собственных колебаний (в данном случае – станин), которая составляет ~120 Гц. Однако, несмотря на выполненный анализ причин возникновения вибраций в очаге деформации, не показано, что их частоты равны или приближаются к частоте собственных колебаний станин.

3. Автор утверждает, что причиной формирования «ребристости» холоднокатаного листа в режиме резонансных колебаний является различие толщины прокатанной полосы всего $\pm 0,15$ мкм, что находится в пределах шероховатости проката и прокатных валков. Очевидно, что такая характеристика «ребристости» явно недостаточна, поскольку этот дефект можно наблюдать как визуально на холоднокатаном металле, сохраняется он после отжига и, как указано в диссертации, его можно наблюдать после нанесения лакокрасочного покрытия на автолист. Недостаточно полная характеристика ребристости в работе, видимо, обусловлена тем, что конечно-элементная модель, принятая в работе для исследования влияния вибраций на возникновение дефектов поверхности, не учитывает влияние всех тех факторов, которые были выявлены в этой же работе на более ранних стадиях – чередование натяжения и «подпора», нарушение условия устойчивой прокатки, проскальзывание. Учитывается только биение рабочего валка 0,4 мм с фиксированной частотой, принимается закон сухого трения по Кулону. Влияние скорости прокатки на результатах расчетов не прослеживается. Влияния изменений коэффициента трения, искривления нейтрального сечения, как причин изменения коэффициента плеча и момента прокатки в модели не учитывается.

4. Поскольку ребристость полосы является, на наш взгляд, более сложным явлением, чем просто образование незначительной волнистости с амплитудой не более 0,15 мкм, для исследования этого явления имело смысл применить бо-

лее сложные модели или экспериментальные методы исследования, включая детальное исследование поверхности с использованием физических методов.

Высказанные замечания можно рассматривать как предложение для дальнейших, более детальных, исследований интереснейшего процесса возникновения резонанса при непрерывной холодной прокатке. Возможно, что выполненные А.В. Кожевниковым исследования послужат импульсом для конструкторских разработок клетей прокатных станов, которые позволят уйти от резонансных частот за счет повышения частоты собственных колебаний станин.

Кроме высказанных, существует ряд более мелких замечаний, которые не принижают важности результатов исследований и экспериментов, полученных в работе.

Диссертационная работа А.В. Кожевникова **«Теоретическое обоснование и совершенствование процессов тонколистовой прокатки в условиях нестационарного динамического нагружения»**, соответствует паспорту специальности 2.6.4 (05.16.05) – Обработка металлов давлением.

Содержание автореферата соответствует содержанию текста диссертации.

Значимость результатов для науки и производства. Значимость результатов, полученных в работе А.В. Кожевникова не вызывает сомнений, поскольку в ней решен ряд серьезных теоретических и экспериментальных задач, необходимых для научного обоснования и развития новых технологий и конструирования элементов оборудования, для реализации и оптимизации сложного технологического процесса – непрерывной холодной прокатки. Важно, что разработки доведены до промышленного внедрения на крупнейшем промышленном предприятии страны (ПАО «Северсталь») на различных прокатных агрегатах, что свидетельствует о вкладе в развитие страны.

Заключение о соответствии работы требованиям ВАК.

Диссертация Кожевникова Александра Вячеславовича **«Теоретическое обоснование и совершенствование процессов тонколистовой прокатки в условиях нестационарного динамического нагружения»**, является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения и изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны. Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, выполненную на актуальную тему, отвечает требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степе-

ней», а ее автор, Кожевников Александр Вячеславович, заслуживает присуждения ему степени доктора технических наук по специальности 2.6.4 (05.16.05) – Обработка металлов давлением.

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден и одобрен на заседании научного семинара Научно-образовательного центра «Исследование и моделирование материалов» Института металлургии, машиностроения и транспорта СПбПУ Петра Великого 9 февраля 2022 г., протокол №3.

Директор Научно-образовательного центра «Исследование и моделирование материалов» доцент, кандидат технических наук по специальности 05.16.06 «Порошковая металлургия и композиционные материалы»



Ганин Сергей Владимирович

E-mail: s.v.ganin@gmail.com

М.т. +7 921 3185011

Профессор НОЦ «Исследование и моделирование материалов» профессор, доктор технических наук по специальностям 05.16.05 – обработка металлов давлением; 05.03.05 – Процессы и машины обработки давлением

Золотов Александр Максимович



E-mail: prf_zam@mail.ru

М.т. +7 921 9274009

Адрес: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29.