

IMPROVING THE EFFICIENCY OF THE PARTICULARLY NARROW STRIPS PRODUCTION TECHNOLOGY ON THE BASIS OF NEW SOLUTIONS IN THE ROLLING THEORY*

E. Garber, Doctor of Technical sciences, Full Professor
I. Kozhevnikova, Candidate of Technical sciences, Associate Professor
Cherepovets State University, Russia

During the period between 2000 and 2012 scientists of the Cherepovets State University together with specialists representing ferrous metallurgy companies carried out a series of theoretical, experimental and industrial studies and development works aimed at improvement of the effectiveness of ultra light gage strips production on hot and cold rolling mills.

Keywords: rolling process, rolling mill technology, ultra light gage strips, rolling theory, hot rolling, cold rolling.

Conference participants

В развитии листопрокатного производства России в последние десятилетия проявились следующие характерные тенденции:

Рост требований к показателям качества тонких листов (механическим свойствам, точности размеров, плоскостности, чистоте поверхности), что связано с развитием автомобильной промышленности и ряда других отраслей машиностроения.

Необходимость экономии всех видов ресурсов, уменьшения себестоимости продукции, в том числе – за счет снижения расхода металла и затрат электроэнергии.

Под воздействием этих тенденций в сортаменте, технологии и оборудовании действующих широкополосных станов горячей и холодной прокатки произошли большие изменения. К их числу относится уменьшение освоенной толщины как горячекатаных, так и холоднокатаных полос.

На ряде широкополосных станов горячей прокатки освоили производство стальных полос толщиной до 0,8-1,2 мм, ранее относившихся к сортаменту широкополосных станов холодной прокатки, так как многие предприятия машиностроения и строительной индустрии перешли на использование более дешевых тонких горячекатаных полос после того, как

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ОСОБО ТОНКИХ ПОЛОС НА ОСНОВЕ НОВЫХ РЕШЕНИЙ В ТЕОРИИ ПРОКАТКИ

Гарбер Э.А., д-р техн. наук, проф.
Кожевникова И.А., канд. техн. наук, доцент
Череповецкий государственный университет, Россия

Ученые Череповецкого государственного университета совместно со специалистами предприятий черной металлургии выполнили в 2000-2012 г.г. ряд теоретических, экспериментальных, промышленных исследований и разработок, направленных на повышение эффективности производства тонких стальных полос на станах горячей и холодной прокатки.

Ключевые слова: процесс прокатки, технология прокатного производства, особо тонкие полосы, теория прокатки, горячая прокатка, холодная прокатка.

Участники конференции

увеличились их прочность, пластичность, и улучшилось качество поверхности.

На широкополосных станах холодной прокатки, предназначенных для производства холоднокатаных полос толщиной до 0,5 мм автомобильного и конструкционного сортамента, освоили прокатку полосой до 0,2-0,3 мм, не предусмотренных паспортными характеристиками этих станов, с жесткими допусками по разнотолщинности и плоскостности.

Указанные изменения сортамента привели к возникновению ряда проблем в эксплуатации действующих широкополосных станов горячей и холодной прокатки. Отметим наиболее существенные из этих проблем.

Чтобы выполнить возросшие требования к точности размеров и плоскостности полос, возникла необходимость модернизации систем управления технологическим процессом и увеличения точности расчета режимов прокатки на непрерывных станах (распределения между клетями обжатий, скоростей и натяжений, температурного режима, профилировок и режимов охлаждения валков и полос). Эти расчеты основывались на методах классической теории прокатки, разработанных в 40^х-70^х годах 20 века применительно к сортаменту и техно-

логии того периода. Необходимо было проверить их пригодность для изменившихся сортамента и технологии.

Уменьшение освоенной толщины полос привело к росту суммарных и частных обжатий на действующих широкополосных станах горячей и холодной прокатки, что вызвало увеличение сил прокатки и расхода энергии, при этом в ряде случаев нагрузка на узлы рабочих клетей и мощность двигателей главного привода повысились до значений, не предусмотренных паспортными характеристиками оборудования. Необходимо было проанализировать точность классических методов энергосилового расчета процессов прокатки, оценить их пригодность для изменившихся условий работы станов горячей и холодной прокатки. Это связано с тем, что при прокатке тонких полос в очагах деформации рабочих клетей, наряду с пластическими зонами, имеются упругие участки, причем с уменьшением толщины полосы протяженность упругих участков увеличивается. В большинстве классических методик энергосилового расчета предусмотрено определение длины упругих участков, однако при расчете контактных напряжений в упругих участках используется уравнение пластичности [1, 2, 3], то есть не учитывается тот факт, что это уравнение при-

* Статья выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (государственный контракт № 16.740.11.0032 от 01.09.2010 г.).

менимо только для пластической зоны очага деформации.

Данные о том, какую погрешность вносит в энергосиловую расчет допущение о применимости уравнений пластичности к упругим участкам очага деформации, в литературе по теории и технологии прокатки отсутствовали. Между тем при холодной прокатке наиболее тонких полос длина упругих участков, рассчитанная по известным формулам [1, 2, 3], достигает 50 % и более от общей длины очага деформации, поэтому данный вопрос в новых условиях приобрел большую актуальность.

Решать задачи повышения качества тонких полос и совершенствования технологии широкополосных станов горячей и холодной прокатки с использованием методик энергосилового расчета, дающих такие большие погрешности, было невозможно. Логика технического развития современного листопрокатного производства привела к необходимости анализа причин значительных погрешностей расчета по классическим методикам энергосиловых параметров широкополосных станов, особенно при прокатке наиболее тонких полос по технологическим режимам, не предусмотренным первоначальными проектами.

Для управления современной технологией листопрокатного производства и подготовки технологов, способных разрабатывать энергоэффективные технологические режимы производства тонких полос мирового уровня качества, необходимы новые модели и методы энергосилового расчета процессов горячей и холодной прокатки.

Начиная с 2001 года, нами выполнен комплекс теоретических, экспериментальных и промышленных исследований процессов горячей и холодной прокатки на широкополосных станах. Теоретические исследования велись в русле основных положений научной школы А.И. Целикова – путем разработки математических моделей взаимосвязанных технологических, конструктивных и энергосиловых параметров широкополосных станов, базирующихся на механике сплошной среды, теории упругости и пластичности.

В качестве основного инструмента для разработки моделей был выбран аналитический метод, примененный в свое время А.И. Целиковым при создании классической теории прокатки, а именно – составление и решение системы уравнений, характеризующих напряженно-деформируемое состояние и условия трения полосы в очаге деформации.

Наиболее существенные новые положения разработанных моделей в кратком изложении состоят в следующем:

Напряжения в очаге деформации рабочей клетки широкополосного стана определяют отдельно на каждом участке: упругого сжатия, пластической деформации, состоящем из двух зон: отставания и опережения, упругого восстановления части толщины полосы на выходе из очага деформации.

На упругих участках, вместо условия пластичности, для расчета напряженного состояния полосы используют уравнения упругости (соотношения между напряжениями и деформациями, основанные на законе Гука).

Достоверно определяются протяженности всех упругих и пластических участков, а также координата границы между зонами отставания и опережения (нейтрального сечения) и толщина полосы в нейтральном сечении.

Найдены адекватные алгоритмы и численные значения коэффициентов трения и напряжений трения, учитывающие специфику контактных условий горячей и холодной прокатки, и наличие (или отсутствие) зон прилипания в очагах деформации.

При расчете затрат энергии учтено, что валки совершают полезную работу только в зоне отставания, а в зоне опережения полоса возвращает валкам часть затраченной энергии.

При расчете момента и мощности двигателей главного привода рабочих клетей, не используется приближенный эмпирический коэффициент, выражающий отношение плеча усилия прокатки к длине очага деформации, и достоверно определяются затраты энергии на вращение холостого опорного валка, в том числе их основная часть – потери на трение качения.

Математические модели процес-

сов горячей и холодной прокатки, основанные на положениях 1-6, обеспечивают выполнение расчетов усилий и мощности прокатки со средней погрешностью 5-7 %, а максимальной, равной 10-14 % относительно фактических усилий и мощностей, стационарно регистрируемых в АСУ ТП, что в 3-4 раза меньше, чем при расчетах по другим методикам.

Подробное обоснование, алгоритмы и расчетные формулы разработанных моделей опубликованы в работах [4-9].

Применение новых теоретических положений и математических моделей процессов горячей и холодной прокатки позволило получить ряд практически значимых технических решений.

На основе новой методики энергосилового расчета процесса холодной прокатки впервые получены математические выражения для соотношений между силами, действующими на узел рабочих валков, исключая резонансные вибрации в рабочей клетке. При этом, в отличие от работ зарубежных специалистов, предлагающих для борьбы с вибрациями методы конструкторского характера (изменение динамических свойств клетки путем введения демпфирующих устройств или активных элементов) и организационно-технологические мероприятия (подача дополнительной смазки, снижение скорости прокатки), предложенная нами методика позволяет разрабатывать усовершенствованные режимы прокатки, исключая возможность возникновения явления резонанса в рабочих клетях. Внедрение указанных режимов на 5-клетевом стане «1700» ЧерМК ОАО «Северсталь» полностью исключило вибрационные процессы в рабочих клетях, за счет чего в 2 раза снизилась отсортировка холоднокатаных листов по дефекту «ребристость», полностью исключен дефект «полосы нагартовки» и увеличилась рабочая скорость стана с 10-12 м/с до 18-20 м/с.

На 4-клетевом и 5-клетевом станах холодной прокатки «1700» выполнен комплекс исследований влияния положения нейтральных сечений в рабочих клетях на чистоту поверхности холоднокатаных полос и на расход энергии.

В результате испытаний достоверно установлено, что сдвиг нейтрального сечения в рабочей клетке вперед по ходу прокатки уменьшает количество загрязнений на полосе, а сдвиг в противоположную сторону уменьшает расход энергии при прокатке. На основании этих результатов внедрена в производство новая технология, позволившая значительно улучшить чистоту поверхности и полос и снизить расход энергии на 4-8 %.

В результате исследований, проведенных на 5-клетевом и дрессировочном станах «1700» ПХП ЧерМК ОАО «Северсталь», установлены причины появления неплоскостности холоднокатаных полос, к ним относятся дефекты поперечного профиля подката, продольная разнотолщинность подката, неточности настройки стана холодной прокатки (или дрессировочного стана) и дополнительные факторы, производные от факторов, указанных выше.

Для выработки мероприятий, уменьшающих влияние на плоскостность холоднокатаных полос искажений поперечного профиля горячекатаного подката и улучшающих настройку стана холодной прокатки, разработана технологическая модель неплоскостности, связывающая нестабильные факторы технологии с показателями неплоскостности – высотой и шагом волны (короба).

Внедрение усовершенствованных технологических режимов в производство уменьшило отсортировку по неплоскостности холоднокатаных полос в 2 раза.

На 6-клетевом стане горячей прокатки «1700» были выполнены исследования влияния технологических параметров режима прокатки на точность горячекатаных полос. В результате установлено, что уменьшение обжатий в последних клетях чистовой группы непрерывного широкополосного стана горячей прокатки приводит к снижению колебаний толщины полосы, начиная с клетки № 4, в результате на выходе из 6-клетевого стана продольная разнотолщинность и разноширинность полосы уменьшаются в 1,7-2 раза, а расход энергии при прокатке сокращается на 3-8 %.

References:

1. Kononov Yu.V., Ostapenko A.L., Ponomarev V.I. Raschet parametrov listovoi prokatki. Spravochnik [Calculation of parameters of leaf rolling. Handbook]. – Moskva., Metallurgiya, 1986., 430 p.
2. Tselikov A.I., Grishkov A.I. Teoriya prokatki [The rolling theory]. – Moskva., Metallurgiya, 1970., 356 p.
3. Tselikov A.I., Nikitin G.S., Rokotyay S.E. Teoriya prodol'noi prokatki [Theory of lengthwise rolling]. – Moskva., Metallurgiya, 1980., 320 p.
4. Garber E.A., Shadrinova I.A. Energosiilovye parametry protsessy kholodnoi prokatki polos tolshchiny menee 0,5 mm [Power parameters of the process of cold rolling of strips less than 0.5 mm thick]. *Proizvodstvo prokata* [Rolled metal production]. – 2002; No. 3., pp. 13-18.
5. Garber E.A., Nikitin D.I. Raschet moshchnosti protsessy kholodnoi prokatki na osnove uprugoplasticheskoi modeli ochaga deformatsii [The power calculation of the cold rolling process on the basis of the elastic-plastic model of the deformation zone]. *Proizvodstvo prokata* [Rolled metal production]. – 2003, No. 5., pp. 12-17.
6. Garber E.A. Stany kholodnoi prokatki (teoriya, oborudovanie, tekhnologiya). [Cold rolling mills (theory, equipment, technology)] – Moskva; Institut «Chermetinformatsiya», Cherepovets., ChGU, 2004; 416 p.
7. Garber E.A., Kozhevnikova I.A., Tarasov P.A. Raschet usilii goryachei prokatki tonkikh polos s uchetom napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya v zone prilipaniya ochaga deformatsii [Calculation of efforts of hot rolling of thin strips taking into account the stress-strain state in the area of the deformation zone adhesion] *Proizvodstvo prokata*. [Rolled metal production] – 2007, No.4., pp. 7-15.
8. Garber E.A., Samarin S.N., Ermilov V.V. Opredelenie zatrat energii na trenie kacheniya v kletyakh «kvarto» [Determining the energy consumption of the rolling friction in the «quarto» stands] *Proizvodstvo prokata*. [Rolled metal production] – 2007; No. 2., pp. 25-32.
9. Garber E.A., Shalaevskii D.L., Kozhevnikova I.A., Traino A.I. Modelirovanie napryazhennogo sostoyaniya polosy pri kholodnoi prokatke

v ochage deformatsii s dvumya neutral'nymi secheniyami [Modeling of the stress state strip at cold rolling in the deformation zone with two neutral sections] *Metally*. – 2007., No. 4., pp. 41-53.

Литература:

1. Коновалов Ю.В., Остапенко А.Л., Пономарев В.И. Расчет параметров листовой прокатки. Справочник. – М.: Metallurgiya, 1986. – 430 с.
2. Целиков А.И., Гришков А.И. Теория прокатки. – М.: Metallurgiya, 1970. – 356 с.
3. Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.Е. Теория продольной прокатки. – М.: Metallurgiya, 1980. – 320 с.
4. Гарбер Э.А., Шадринова И.А. Энергосиловые параметры процесса холодной прокатки полос толщиной менее 0,5 мм // *Производство проката*. – 2002. – № 3. – С. 13-18.
5. Гарбер Э.А., Никитин Д.И. Расчет мощности процесса холодной прокатки на основе упругопластической модели очага деформации // *Производство проката*. – 2003. – № 5. – С.12-17.
6. Гарбер Э.А. Станы холодной прокатки (теория, оборудование, технология). – М.: Институт «Черметинформация», Череповец: ЧГУ, 2004. – 416 с.
7. Гарбер Э.А., Кожевникова И.А., Тарасов П.А. Расчет усилий горячей прокатки тонких полос с учетом напряженно-деформированного состояния в зоне прилипания очага деформации // *Производство проката*. – 2007. – № 4. – С. 7-15.
8. Гарбер Э.А., Самарин С.Н., Ермилов В.В. Определение затрат энергии на трение качения в клетях «кварто» // *Производство проката*. – 2007. – № 2. – С. 25-32.
9. Гарбер Э.А., Шалаевский Д.Л., Кожевникова И.А., Траино А.И. Моделирование напряженного состояния полосы при холодной прокатке в очаге деформации с двумя нейтральными сечениями // *Металлы*. – 2007. – № 4. – С. 41-53.

Information about authors:

1. Eduard Garber - Doctor of technical sciences, Full Professor, Cherepovets State University; address: Russia, Cherepovets city; e-mail: mamz2011@mail.ru

2. Irina Kozhevnikova - Candidate of Technical sciences, Associate Professor, Cherepovets State University; address: Russia, Cherepovets city; e-mail: mamz2011@mail.ru