



РАЗДЕЛ III ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ В МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 621.771.01

Гарбер Э. А.
Кожевникова И. А.
Тимофеева М. А.
Шалаевский Д. Л.
Поспелов И. Д.
Ягудин И. В.

НОВЫЕ РЕШЕНИЯ В ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИИ ТОНКОЛИСТОВОЙ ПРОКАТКИ*

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

- повышение уровня 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 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 полос толщиной 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 теории прокатки, разработанных в 40–70-х годах 20 века применительно к сортаменту и технологии того периода. Необходимо было проверить их пригодность для изменившихся сортамента и технологии.

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

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, 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 известных методик энергосилового расчета предусмотрено определение длины упругих участков, однако при расчете контактных напряжений в упругих участках используется уравнение пластичности [1–3], то есть не учитывается тот факт, что это уравнение применимо только для пластической зоны очага деформации.

Данные о том, какую погрешность вносит в энергосиловой расчет допущение о применимости уравнений пластичности к упругим участкам очага деформации, в литературе по теории и технологии прокатки отсутствовали. Между тем при горячей прокатке наиболее тонких полос длина упругих участков достигает 18–21 %, а при холодной прокатке – 50 % и более от общей длины очага деформации, поэтому данный вопрос в новых условиях приобрел большую актуальность.

Нуждались в анализе и уточнении методики учета напряжений контактного трения в очагах деформации. В большинстве известных методов энергосилового расчета станов горячей прокатки не учитывалось то обстоятельство, что преобладающую часть длины очагов деформации в рабочих клетях этих станов занимает зона прилипания, в которой контактные напряжения, сила и мощность прокатки зависят не от коэффициента трения, а от сопротивления чистому сдвигу материала полосы.

На станах холодной прокатки, где зоны прилипания отсутствуют, практически все наиболее распространенные формулы, используемые в энергосиловых расчетах, не учитывали значительное влияние на величину коэффициентов трения предела текучести полосы и его наклепа вследствие обжатия.

Недостатки, связанные с неточным учетом факторов контактного трения, еще больше увеличивали погрешности энергосилового расчета тонколистовых станов.

В сумме из-за всех указанных причин погрешности энергосиловых расчетов процессов горячей и холодной прокатки наиболее тонких полос достигали 30–40 % и более. Мы убедились в этом, обработав сотни данных о параметрах прокатки, полученных из АСУТП действующих широкополосных станов.

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 общепринятым методикам энергосиловых параметров широкополосных станов, особенно при прокатке наиболее тонких полос, не предусмотренных 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.

Целью исследования является разработка и оценка новых технических решений в теории и технологии процессов горячей и холодной тонколистовой прокатки.

Начиная с 2000 года, ученые Череповецкого государственного университета совместно со специалистами предприятий выполнили 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 аналитических методах механики сплошной среды, теорий упругости и пластичности. В развитие этих научных положений для решения ряда задач теории и технологии прокатки мы применили численные методы, в частности метод конечных элементов.

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 определяют протяженности всех упругих и пластических участков, а также координату границы между зонами отставания и опережения (нейтрального сечения) и толщину полосы в нейтральном сечении;

- найдены статистически достоверные алгоритмы и численные значения коэффициентов трения и напряжений трения в очагах деформации, учитывающие специфику контактных условий горячей и холодной прокатки, наличие (или отсутствие) зон прилипания в очагах деформации, а также наклеп полосы при холодной прокатке;

- при расчете затрат энергии доказано, что валки совершают полезную работу только в зоне отставания и только касательными силами, а в зоне опережения полоса возвращает валкам часть затраченной энергии;

- при расчете момента и мощности двигателей главного привода рабочих клеток 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, основанные на рассмотренных выше положениях, обеспечили 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 методам.

Кроме того, для повышения точности размеров тонких полос до уровня мировых стандартов, улучшения качества их поверхности, экономии энергозатрат и других производственных расходов, в методику расчета технологических режимов прокатки внесены следующие новые решения:

- научно обоснованное разделение допусков на продольную и поперечную разнотолщинность, позволяющие выдержать в жестком поле допуска колебания толщины по всей площади полосы;

- математическая модель продольной разнотолщинности горячекатаных полос, вычисляемой в функции значимых факторов технологии широкополосного стана;

- алгоритмы оптимизации распределения обжатий между клетями непрерывного стана и корректировки межклетевых натяжений по критериям: «минимум разнотолщинности», «минимум расхода энергии», «минимум загрязнений поверхности полосы»;

- математическая модель шлифовочной профилировки валков, обеспечивающая – в сочетании с упругими деформациями и тепловой профилировкой – минимальные отклонения от плоскостности и требуемую поперечную разнотолщинность полосы*.

Подробные описания всех упомянутых выше разработок рассмотрены и опубликованы в работах [4–15] и других.

* с участием инж. Н. Л. Болобановой.

Применение новых теоретических положений и математических моделей процессов горячей и холодной прокатки позволило получить ряд практически значимых технических результатов. Наиболее существенные из них указаны ниже.

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. Внедрение этой разработки на 5-клетевом стане «1700» ЧерМК ОАО «Северсталь» исключило вибрационные процессы в рабочих клетках, за счет чего в 2 раза снизилась отсортировка холоднокатаных листов по дефекту «ребристость», исключен дефект «полосы нагартовки» и увеличена 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 клетках 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 2–4 %.

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 и 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» и 12-клетевом стане горячей прокатки «2000» выполнены исследования влияния технологических параметров режима прокатки на колебания толщины и ширины горячекатаных полос. В результате установлено, что уменьшение обжатий в последних клетках чистовой группы широкополосного стана приводит к снижению колебаний толщины и ширины полосы, в результате на выходе из стана продольная разнотолщинность и разноширинность полосы уменьшаются в 1,7–2 раза, расход энергии при прокатке сокращается на 3–5 %, а разнотолщинность подката для станов холодной прокатки снижается до диапазона ± 2 % по всей площади полосы.

ВЫВОДЫ

Дальнейшее развитие технологий и оборудования листопрокатного производства неразрывно связано с повышением степени научной обоснованности принимаемых в каждом конкретном случае технических решений, осуществляемых на основе совершенствования математических моделей по автоматизированному расчету и проектированию процессов горячей и холодной тонколистовой прокатки. Намечены основные пути данного совершенствования, показано, что реализация предложенных теоретических разработок позволяет расширить сортамент и повысить основные показатели качества получаемого металлопроката при одновременном обеспечении весьма существенной экономии материальных ресурсов.

В частности, внедрение результатов исследования на непрерывных широкополосных станах холодной прокатки «1700» ЧерМК ОАО «Северсталь» позволило снизить в 2 раза отсортировку холоднокатаных листов по дефекту «ребристость» и увеличить скорость прокатки с 10...12 м/с до 18...20 м/с. Улучшена в этом случае чистота поверхности, повышены

точность геометрических характеристик и показателей плоскостности холоднокатаных полос, на 2–4 % снижен удельный расход энергии. Применительно к широкополосным станам горячей прокатки продольная разнотолщинность и разноширинность уменьшена в 1,7...2 раза, а расход энергии сокращена на 3–5 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коновалов Ю. В. *Расчет параметров листовой прокатки : справочник* / Ю. В. Коновалов, А. Л. Остапенко, В. И. Пономарев. – М. : *Металлургия*, 1986. – 430 с.
2. Целиков А. И. *Теория прокатки* / А. И. Целиков, А. И. Гришков. – М. : *Металлургия*, 1970. – 356 с.
3. Целиков А. И. *Теория продольной прокатки* / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. – М. : *Металлургия*, 1980. – 320 с.
4. Гарбер Э. А. Энергосиловые параметры процесса холодной прокатки полос толщиной менее 0,5 мм / Э. А. Гарбер, И. А. Шадрунова // *Производство проката.* – 2002. – № 3. – С. 13–18.
5. Гарбер Э. А. Расчет мощности процесса холодной прокатки на основе упругопластической модели очага деформации / Э. А. Гарбер, Д. И. Никитин // *Производство проката.* – 2003. – № 5. – С. 12–17.
6. Гарбер Э. А. *Станы холодной прокатки (теория, оборудование, технология)* / Э. А. Гарбер. – М. : *Институт «Черметинформация», Череповец : ЧГУ*, 2004. – 416 с.
7. Гарбер Э. А. Расчет усилий горячей прокатки тонких полос с учетом напряженно-деформированного состояния в зоне прилипания очага деформации / Э. А. Гарбер, И. А. Кожевникова, П. А. Тарасов // *Производство проката.* – 2007. – № 4. – С. 7–15.
8. Гарбер Э. А. Определение затрат энергии на трение качения в клетях «кварто» / Э. А. Гарбер, С. Н. Самарин, В. В. Ермилов // *Производство проката.* – 2007. – № 2. – С. 25–32.
9. Моделирование напряженного состояния полосы при холодной прокатке в очаге деформации с двумя нейтральными сечениями / Э. А. Гарбер, Д. Л. Шалаевский, И. А. Кожевникова, А. И. Трайно // *Металлы.* – 2007. – № 4. – С. 41–53.
10. Ермилов В. В. Закономерности процессов трения в рабочих клетях станов холодной прокатки : монография / В. В. Ермилов, Э. А. Гарбер, И. В. Ягудин. – Череповец : ГОУ ВПО ЧГУ, 2011. – 178 с.
11. Кузнецов В. В. *Производство холоднокатаной листовой стали с повышенной прочностью и коррозионной стойкостью для автомобильной промышленности : монография* / В. В. Кузнецов, Э. А. Гарбер. – Череповец : ЧГУ, 2011. – 115 с.
12. Кожевников И. А. *Производство проката. Том 1. Книга 2. Развитие теории тонколистовой прокатки для повышения эффективности работы широкополосных станов* / И. А. Кожевников, Э. А. Гарбер. – М. : *Теплотехник*, 2010. – 252 с.
13. Гарбер Э. А. Уточненный расчет мощности двигателей главного привода широкополосных станов горячей прокатки / Э. А. Гарбер, И. А. Кожевникова, П. А. Тарасов // *Производство проката.* – 2007. – № 10. – С. 5–12.
14. Устранение вибраций в рабочих клетях станов холодной прокатки путем коррекции их энергосиловых параметров / Э. А. Гарбер, В. П. Наумченко, А. В. Кожевников, С. И. Павлов // *Сталь* – 2003. – № 9. – С. 79–82.
15. Исследование, моделирование и устранение вибраций в рабочих клетях станов холодной прокатки / Э. А. Гарбер, А. В. Кожевников, В. П. Наумченко, И. А. Шадрунова, С. И. Павлов // *Производство проката.* – 2004. – № 6. – С. 34–41.

Гарбер Э. А. – д-р техн. наук, проф. ЧГУ;

Кожевникова И. А. – канд. техн. наук, доц. ЧГУ;

Тимофеева М. А. – канд. техн. наук, доц. ЧГУ;

Шалаевский Д. Л. – канд. техн. наук, доц. ЧГУ;

Поспелов И. Д. – аспирант ЧГУ;

Ягудин И. В. – аспирант ЧГУ.

ЧГУ – Череповецкий государственный университет, г. Череповец, Россия.

E-mail: mamz2011@mail.ru

Статья поступила в редакцию 03.02.2012 г.