

НОВЫЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ХОЛОДНОКАТАНЫХ ЛИСТОВ, ЭКОНОМИЮ ЭНЕРГИИ И УВЕЛИЧЕНИЕ СКОРОСТИ НЕПРЕРЫВНЫХ СТАНОВ

NOVEL METHODS FOR COLD ROLLING PROCESS MODELING, PROVIDING COLD ROLLED STRIP QUALITY IMPROVEMENT, ENERGY SAVINGS AND CONTINUOUS MILL ROLLING SPEED INCREASE

Проф. докт. Гарбер Э.¹, канд. доц. Кожевникова И.², канд., с.н.с. Трайно А.³,
инж. Кузнецов В.⁴, инж. Павлов С.⁵
Череповецкий государственный университет^{1,2}, Институт металлургии и материаловедения РАН³,
ОАО «Северсталь»^{4,5}, Россия

Abstract: Authors have developed a complex of the novel mathematical models: an innovative elastic & plastic model of deformation zone which ensures reliable localization of a neutral cross-section; an innovative model of energy-power parameters which ensures calculation of cold rolling force and power with an error not exceeding 5 to 7%; radically new formulae for the forward coefficients; mathematical expressions of force and momenta relationship within a four-high roll stand which exclude any roll vibration and slipping. The implementation of the above models made it possible to establish new patterns of relationship and use them for improvement of cold rolling practice at continuous mills.

KEYWORDS: COLD-ROLLING MILL, DEFORMATION ZONE, NEUTRAL CROSS-SECTION, ENERGY-POWER PARAMETERS.

1. Введение

В развитии мирового листопрокатного производства в последние десятилетия 20 века и начале 21 века наблюдаются изменения, вызванные тем, что в технологии и оборудовании станов холодной прокатки произошли усовершенствования, изменившие структуру очагов деформации в рабочих клетях и характер распределения контактных напряжений по дуге захвата металла валками. Так например, применение новых смазочно-охлаждающих жидкостей привело к тому, что на станах для производства конструкционного и автомобильного холоднокатаного листа коэффициенты трения между полосой и валками уменьшились в 2-3 раза (с 0,07-0,12 до 0,02-0,07), приблизившись к коэффициентам трения при прокатке жести на пальмовом масле.

В сочетании с уменьшением толщины полосы это повлияло на весь комплекс энергосиловых параметров процесса прокатки, привело к возрастанию протяженности упругих участков очага деформации, в которых не действует условие пластичности. При прокатке полос толщиной 0,2-0,5 мм длина упругих участков достигла 50-70% общей длины очага деформации [1].

Структура пластических зон очагов деформации также изменилась: при уменьшении коэффициентов трения до 0,02-0,03 длина зоны отставания увеличилась до 80-95% от общей длины пластической зоны.

В классических моделях процесса холодной прокатки отсутствует математический аппарат, позволяющий учесть указанные изменения при расчете контактных напряжений, усилий и мощности прокатки. Поэтому в новых условиях использование этих моделей в автоматизированных системах управления станами (АСУТП) стало приводить к погрешностям расчета энергосиловых параметров, достигающим 20-50% и более. Это не позволяет получать холоднокатаные листы высокого качества, экономить энергию и вести процесс с высокими скоростями прокатки.

Чтобы преодолеть эти трудности, многие производители прокатного оборудования закладывают в программное обеспечение АСУТП, вместо физических моделей, статистические, регрессионные модели, что не всегда приводит к положительным результатам.

В связи с изложенным авторами выполнен в 2000-2006 г.г. комплекс работ по созданию современных физических моделей процессов холодной прокатки, основанных на законах упругости и пластичности и учитывающих упомянутые выше изменения в технологии.

Созданные модели были апробированы в промышленных условиях, обеспечили высокую точность расчета энергосиловых параметров станов и использованы для повышения эффективности производства и качества холоднокатаных листов.

Ниже изложены наиболее существенные результаты этих работ. Некоторые из них докладывались на Международных конференциях в Японии, США и России, а часть новых результатов излагается в этом докладе впервые.

2. Новые положения теории холодной прокатки.

2.1. Установлено, что для эффективного управления процессом прокатки необходимо достоверно определять положения нейтральных сечений в очагах деформации рабочих клетей. Для этого нами решена задача контактного взаимодействия полосы и валков на основе упруго-пластической модели очага деформации. Это решение со всеми математическими выражениями опубликовано в монографии [1]. Его основные положения в кратком изложении состоят в следующем.

Контур очага деформации с учетом упругого сплющивания аппроксимирован двумя прямыми отрезками: одним – от входного сечения до вертикальной осевой плоскости валков (он соответствует углу захвата α и, следовательно, наклонен к оси прокатки на угол $\alpha/2$), вторым – на участке упругого восстановления части толщины полосы (он наклонен к оси прокатки в противоположном направлении на угол β).

Очаг деформации i -й рабочей клетки разбит на j участков:

- упругого сжатия полосы длиной $x_{1\text{упр.}}$ ($j=1$)
- пластической деформации длиной $x_{\text{пл.}}$, состоящей из двух зон: отставания $x_{\text{пл.отст.}}$ ($j=2$) и опережения длиной $x_{\text{пл.опер.}}$ ($j=3$)
- упругого восстановления части толщины полосы на выходе из очага деформации длиной x_2 ($j=4$).

Таблица 1

Получены формулы для вычисления углов α , β и протяженностей каждого из участков.

Расчет контактных напряжений выполнен для каждого участка отдельно путем решения системы трех уравнений:

- дифференциального уравнения равновесия полосы;
- уравнения упругости на упругих участках, уравнения пластичности в зонах отставания и опережения;
- закона трения в виде: $\tau_x = \mu \rho_x$, $\tau_j = \mu \rho_j$,

где τ_x , ρ_x – касательные и нормальные контактные напряжения, переменные по координате «х», направленной вдоль оси прокатки;

τ_j , ρ_j – средние значения напряжений τ_x и ρ_x на каждом участке с номером «j»;

μ – коэффициент трения в очаге деформации.

Для определения μ использовали достоверные эмпирические выражения, учитывающие шероховатость валков, свойства смазки, скорость прокатки и уровень контактных давлений.

В результате получены в конечном виде формулы для расчета величин ρ_x , ρ_j , τ_x , τ_j в функции предела текучести полосы, обжатий, натяжений, скоростей, коэффициента трения, упругих характеристик полосы и углов α , β , характеризующих очаг деформации. Интегрированием выражений ρ_j получено выражение их среднего значения для всего очага деформации (ρ_{cp}) и – после умножения на площадь контакта – расчетные формулы усилия прокатки (все формулы приведены в [1]).

2.2. Используя изложенную выше модель контактных напряжений, разработали новую модель для расчета работы и мощности прокатки. В этой модели удельные работы прокатки « a_j » вычисляют сначала на каждом из «j» участков очага деформации, отдельно вдоль оси прокатки и перпендикулярно этой оси, учитывая энергию, затрачиваемую как нормальными, так и касательными силами. При этом имеют в виду, что касательные силы, возникающие от действия на полосу напряжений τ_j , в зоне отставания направлены по ходу движения полосы, а в зоне опережения – в противоположную сторону.

Полученные расчетные формулы величин « a_j » приведены в таблице 1.

В этой таблице обозначены:

h_0 и h_1 – толщина полосы на входе в валки и выходе из них, $h_{1\text{ упр}}$ – толщина полосы в конце первого упругого участка, h_n – толщина полосы в нейтральном сечении, $h_{2\text{ упр}}$ – толщина полосы в начале второго упругого участка.

Как видно из таблицы, в зоне опережения (участки $j=3, j=4, a$) работа прокатки отрицательная, следовательно в этой зоне валки не совершают работу; напротив, полоса возвращает валкам часть энергии, полученной в зоне отставания.

2.3. Проверку достоверности изложенных методик выполнили путем сопоставления расчетных и измеренных усилий и мощностей прокатки на действующих непрерывных станах, оснащенных АСУТП и стационарными средствами измерения всех основных параметров (технологических и энергосиловых). Была собрана база данных, содержащая информацию о 101 режиме прокатки полос из сталей различных марок и профиларазмеров, на 5-ти клетевом стане «1700» и 52 режимах прокатки аналогичных полос на 4-х клетевом стане «1700». Статистические ряды расхождений измеренных и расчетных усилий и мощностей содержали каждый более 700 членов (количество режимов, умноженное на число клетей). В результате оказалось, что средние погрешности расчета усилий и мощностей составили 5,3% и 7,2%, а максимальные 12,2% и 14,1%, что в 5-7 раз меньше, чем при расчете по известным (классическим) методикам.

Удельные работы прокатки на участках
очага деформации (a_j)

j	Расчетная формула a_j
1	$+ \tau_1 \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha / 2} + \operatorname{tg} \alpha / 2 \right) \ln \frac{h_0}{h_{1\text{ упр}}}$
2	$+ \tau_2 \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha / 2} + \operatorname{tg} \alpha / 2 \right) \ln \frac{h_{1\text{ упр}}}{h_n}$
3	$- \tau_3 \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha / 2} + \operatorname{tg} \alpha / 2 \right) \ln \frac{h_n}{h_{2\text{ упр}}}$
2-3*)	$+ \tau_{2-3} \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \alpha / 2} + \operatorname{tg} \alpha / 2 \right) \ln \frac{h_{1\text{ упр}}}{h_{2\text{ упр}}}$ ($\tau_{2-3} = \mu \rho_{2-3}^*$)
4,a	при наличии зоны опережения: $- \tau_4 \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \beta} + \operatorname{tg} \beta \right) \ln \frac{h_1}{h_{2\text{ упр}}}$
4,b*)	при отсутствии зоны опережения: $+ \tau_4 \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \beta} + \operatorname{tg} \beta \right) \ln \frac{h_1}{h_{2\text{ упр}}}$
*) Для очага, состоящего только из зоны отставания	

2.4. Анализ процессов холодной прокатки с помощью разработанных методик выявил ряд неизвестных ранее закономерностей:

а) Установлено, что в зоне отставания очаг деформации самоочищается от механических и жировых загрязнений, а в зоне опережения эта самоочистка затруднена.

б) Установлено, что при изменении соотношения длин зон отставания и опережения в пользу зоны отставания расход энергии на прокатку возрастает, если это соотношение изменить в пользу зоны опережения, расход энергии уменьшается.

с) Установлено, что воздействовать на это соотношение можно перераспределением частных обжатий и натяжений полосы между клетями непрерывного стана. При этом можно получить такой очаг деформации, в котором нейтральное сечение и зона опережения отсутствуют, а контактные напряжения по длине очага остаются почти постоянными.

д) Установлено, что зоны прилипания в очагах деформации современных станов холодной прокатки отсутствуют, независимо от марки стали, режима обжатий и натяжений.

Следовательно, сглаживания «пиков» (максимальных значений) контактных напряжений, возникающих вблизи нейтрального сечения, при холодной прокатке не происходит.

На рис. 1 показан в качестве примера график изменения нормального контактного напряжения p_x по длине очага деформации в пятой клетке пятиклетевого стана «1700» при прокатке полосы толщиной 0,3 мм.

Из графика видно, что максимальное значение p_x в зоне нейтрального сечения равно: $p_{x\text{max}} = 1850$ МПа, в то время как среднее сопротивление пластической деформации полосы в этой клетке: $\sigma_\Phi = 770$ МПа, т. е. максимальные контактные напряжения превысили предел текучести полосы более чем в два раза, что чревато опасностью появления на поверхностях полосы и валков дефектов (рисок, надрывов, порезов), которые могут привести к обрывам полосы в межклетевых промежутках и к внеплановым перевалкам.

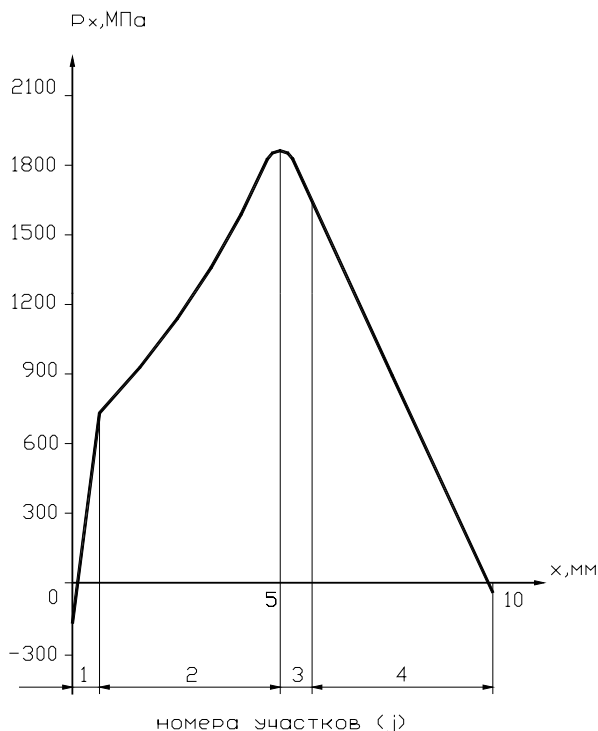


Рис. 1. Изменение p_x по длине очага деформации в 5-й клетке пятиклеточного стана «1700» при прокатке полосы толщиной 0,3 мм

Расчеты показывают, что в сортаменте непрерывных станов есть марки стали и толщины полос, при прокатке которых максимальные контактные напряжения достигают еще больших величин: 2400-2500 МПа. Уменьшить их можно путем перераспределения обжатий и натяжений полосы между клетями. С этой точки зрения представляет интерес график $p_x(x)$ в третьей клетке того же стана при прокатке полосы толщиной 1,5 мм, показанный на рис. 2, очаг деформации которой состоит только из зоны отставания, а нейтральное сечение отсутствует.

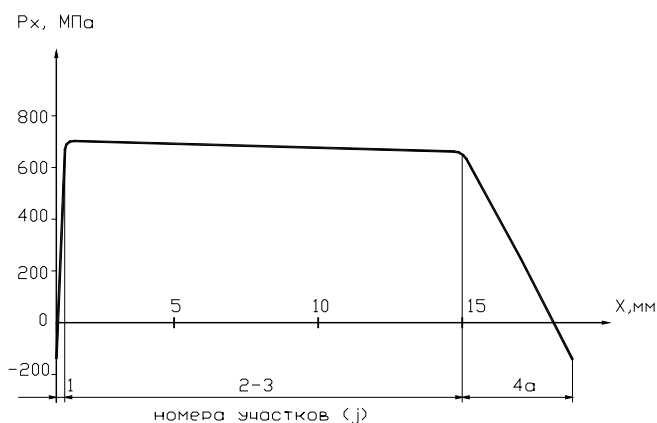


Рис. 2. Изменение p_x по длине очага деформации в 3-й клетке пятиклеточного стана «1700» при прокатке полосы толщиной 1,5 мм

Кривая $p_x(x)$ на этом графике имеет принципиально иной характер, чем на рисунке 1: на всей длине пластического участка очага деформации контактные напряжения практически остаются постоянными, что существенно снижает вероятность повреждения поверхности полосы и валков.

Таким образом, режимы прокатки, при которых весь очаг деформации представляет собой зону отставания, с точки зрения опасности контактных напряжений, являются

существенно более благоприятными, по сравнению с режимами, при которых в очаге деформации имеются нейтральное сечение и зона опережения.

2.5. Изменения в сортаменте и режимах прокатки, о которых упомянуто в вводной части этого доклада, наряду с положительными моментами, вызвали и некоторые негативные последствия. Одно из них, известное специалистам во многих странах – возникновение пробуксовок валков и вибраций в рабочих клетях (особенно при прокатке полос толщиной менее 0,3-0,4 мм). Для определения причин этих явлений выполнен анализ направлений сил и моментов, действующих между рабочими и опорными валками. При этом учитывали силы трения первого рода (скольжения и покоя) и второго рода (качения), возникающие между валками, трение и зазоры в подшипниках валков, между подушками и опорными плоскостями станин, ускорения и замедления стана, колебания усилия прокатки и натяжений полосы.

В результате разработаны новые модели энергосиловых параметров клетки кварто, с помощью которых установлены следующие закономерности:

а) Пробуксовка валков происходит, если нарушается соотношение: $\operatorname{tg} \beta < f_n$,

где β – угол наклона усилия, действующего между рабочим и опорным валками, к плоскости, соединяющей оси этих валков (в модели предусмотрено его вычисление);

f_n – коэффициент трения покоя в контакте между этими валками (для определения его величины впервые получено регрессионное уравнение, учитывающее шероховатость и твердость валков, смазывающие свойства эмульсии, скорость вращения валков и другие факторы).

б) Причина вибраций, внезапно возникающих в той или иной рабочей клетке – неустойчивое равновесие рабочих валков в горизонтальном направлении. При изменениях скорости прокатки, колебаниях усилия прокатки и натяжений полосы изменяется соотношение сил, действующих на валки и их подшипники. При неблагоприятном соотношении этих сил валки могут оказаться в неустойчивом положении и начать смещение вперед или назад в пределах зазоров между их подушками и опорными плоскостями станин. Эти смещения сопровождаются ударами подушек по внутренним плоскостям станин, в которых возбуждаются резонансные колебания.

Многие специалисты для изучения процессов вибрации представляли модель рабочей клетки в виде колебательной системы.

Мы в своей работе пошли по другому пути: стремились найти такое сочетание технологических и силовых параметров, чтобы гарантированно исключить возможность вибраций в рабочей клетке.

Вместо того, чтобы моделировать вибрации, мы смоделировали условие, их исключающее:

$$P(1-K_p)(1-\delta)\operatorname{tg}(\beta+\gamma)-0,5[T_0(1+K_T)-T_1(1-K_T)]\Delta F_{\text{гор}}>0; \quad (1)$$

где P – усилие прокатки; δ – погрешность его расчета; K_p – коэффициент его неустойчивости (уровень колебаний); γ – угол между вертикальной и осевой плоскостями рабочих и опорных валков; T_0 , T_1 – силы заднего и переднего натяжений полосы; K_T – коэффициент их неустойчивости; $\Delta F_{\text{гор}}$ – максимально возможное колебание горизонтальной силы, действующей на рабочий валок. В модели предусмотрено достоверное определение всех величин, входящих в выражение (1).

2.6. Установлено, что одна из причин колебаний натяжения полосы между клетями непрерывного стана – неточная настройка его скоростного режима. Задача этой настройки состоит в том, чтобы по заданной в каждой клетке скорости полосы $\mathcal{Q}_i$ (где i – номер клетки) возможно точнее определить окружную скорость бочки валков $\mathcal{Q}_{\text{вб}}$. Для этого используют значение коэффициента опережения S_i :

$$g_{gi} = \frac{g_i}{S_i + 1}.$$

Однако известные методы определения S_i , не учитывающие упругих участков очага деформации, на современных станах дают большие погрешности.

Используя упруго-пластическую модель очага деформации, мы получили новые, более точные формулы:

а) для очага, имеющего нейтральное сечение:

$$S_i = \frac{h_n}{h_i \left[1 + \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right) \right]^{0,5}} - 1, \quad (2)$$

где h_n – толщина полосы в нейтральном сечении; α – угол контакта полосы и вала;

б) для очага, состоящего только из зоны отставания:

$$S_i = -\frac{\sigma_{\phi i}}{E_{II}}, \quad (3)$$

где $\sigma_{\phi i}$ – предел текучести полосы (среднее значение в i -й клетки); E_{II} – модуль упругости ее материала.

Знак минус в выражении (6) означает, что из такого очага деформации полоса выходит со скоростью, меньшей, чем скорость валков. Такой результат не мог быть получен по известным методикам, в нашей работе он получен впервые.

2.7. Для уточнения затрат энергии на трение качения между валками выполнен комплекс промышленных и лабораторных исследований коэффициента трения качения^{*)}. В результате получено достоверное регрессионное уравнение, позволяющее рассчитать этот коэффициент в функции значимых факторов реальных процессов холодной прокатки и дрессировки. Установлено, что доля затрат энергии на трение качения от суммарной энергии, потребляемой двигателями стана, может достигать при холодной прокатке 30-60%, при дрессировке 60-80%, причем с увеличением скорости прокатки коэффициент трения качения растёт.

2.8. Освоение высоких скоростей прокатки потребовало анализа возможности систем охлаждения стана отводить увеличивающееся количество теплоты. Для этого разработана усовершенствованная модель теплового режима непрерывного стана холодной прокатки, основанная на уравнениях теплового баланса полосы и валков.

Модель позволила с высокой точностью рассчитывать температуру полосы, изменяющуюся от клетки к клетке, температуру и тепловой профиль валков – в функции режимов прокатки и интенсивности охлаждения, при этом в отличие от ранее использовавшихся моделей, в этой модели отдельно определяются температуры верхних и нижних валков [1]. Точности тепловой модели способствует и то, что выделение тепла в ней рассчитывается в функции работы прокатки, определяемой по модели п. 2.2.

3. Применение новых положений теории для совершенствования технологии холодной прокатки.

3.1. Разработаны и внедрены на непрерывных станах алгоритмы настройки режимов прокатки, обеспечивающие такое распределение между клетями частных обжатий и натяжений полосы, которое увеличивает длину зон опережения

в наиболее энергоемких промежуточных клетях и уменьшает длину этих зон в последних (чистовых) клетях.

Это позволило сэкономить 4-8% электроэнергии и уменьшить на 30-50% загрязненность поверхности холоднокатаных полос.

3.2. На 4-й клетки 5-ти клетевых стана «1700», склонной к вибрациям, которые опасно возрастали при прокатке полос толщиной менее 0,4 мм со скоростями 10-12 м/с, изменили параметры технологического режима таким образом, чтобы выполнялось неравенство (1). Это позволило исключить вибрации и увеличить рабочие скорости до 18-20 м/с. В результате условие (1) включено в алгоритм АСУТП этого стана.

3.3. Проведены испытания на 5-ти клетевом стане «1700» усовершенствованных режимов настройки скоростей валков рабочих клеток на основе уточненных значений коэффициентов опережения, рассчитанных по формулам (2), (3). В результате колебания межклетевых натяжений уменьшились на 20-30%, что способствовало росту средних скоростей прокатки.

3.4. Разработаны уточненные методы расчета установочной мощности двигателей рабочих клеток, с учетом затрат энергии на трение качения, с применением всех изложенных выше новых методов энергосилового расчета стана. Это дает возможность уменьшить капитальные затраты за счет устранения неоправданных запасов мощности при проектировании главных приводов непрерывных и дрессировочных станов.

3.5. На основе модели теплового режима (п.2.8) внесены усовершенствования в конструкцию системы охлаждения валков, в результате разница температур верхних и нижних валков уменьшилась с 6-8⁰С до 1-2⁰С, а общий уровень их температур не превысил 60-70⁰С при росте скорости прокатки до 20-25 м/с.

Заключение.

Изложены новые методы моделирования процессов холодной прокатки, которые целесообразно использовать при разработке систем управления станами. Это позволит увеличить скорости, улучшить качество холоднокатаных листов и экономить энергию при их производстве.

Ограниченный объем доклада не позволил подробно изложить все теоретические и практические аспекты выполненных нами исследований. При наличии заинтересованности представителей металлургических и машиностроительных кампаний авторы готовы предоставить им интересующие их подробности.

Некоторые из них рассмотрены в публикациях [1, 2, 3]. Все компьютерные программы изложенных моделей имеются в Череповецком государственном университете.

Литература.

1. Гарбер Э.А. Станы холодной прокатки (теория, оборудование, технология). М. ОАО «Черметинформация»-Череповец: ЧГУ, 2004. 416 с.
2. Garber E.A., Shadrinova, Traino A.I., Yusupov V.S. Analysis of a Deformation Zone and the Refined Calculation of the Forces for Cold Rolling of Strips Thinner than 0.5 mm in a Continuous Mill// Russian Metallurgy. – Vol. 2002. – No. 4. P. 340-345.
3. Garber E.A., Nikitin D.I., Shadrinova I.A., Traino A.I. Calculation of the Cold-Rolling Power with Allowance for the Variable Work of Friction along a Deformation Zone. Russian Metallurgy - Vol. 2003. - No. 4. P. 340-346.

^{*)} С участием В.В.Ермилова и С.Н.Самарина