

РАЗДЕЛ III ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ДАВЛЕНИЕМ В МЕТАЛЛУРГИИ

УДК 679.7.022.13

**Божков А. И.
Ивлиев С. Н.
Дегтев С. С.
Таскин А. А.**

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОКАТКИ ТРУДНОДЕФОРМИРУЕМЫХ МАРОК СТАЛЕЙ

К труднодеформируемым маркам стали относятся электротехнические анизотропные (ЭАС) и изотропные (ЭИС) марки стали, легированные кремнием от 2,0 % и выше, с пределом текучести в ненаклепанном состоянии более 350 МПа. Кремний оказывает сильное влияние на физико-механические и электромагнитные свойства стали. Труднодеформируемые стали обладают повышенной хрупкостью и твердостью, а также пониженной пластичностью, поэтому при прокатке возникает ряд трудностей. Несмотря на то, что доля производства такого металла составляет около 20 % от общего производства цеха, трудоемкость его очень высока, и в процессе прокатки наблюдается высокий уровень контактных напряжений в очаге деформации, что, в свою очередь, приводит к росту температуры, разложению эмульсии в очаге деформации и, в конечном итоге, к образованию дефектов валков и полос и обрывам. В связи с этим возникает необходимость в разработке специальных режимов прокатки труднодеформируемых сталей, что подтверждает актуальность данной проблемы.

Проблеме разработки и оптимизации технологических режимов холодной прокатки посвящен ряд работ [1–8], в которых приведены различные методы и алгоритмы совершенствования режимов холодной прокатки, а также расчета энергосиловых параметров. Однако, существующие подходы к разработке режимов холодной прокатки [1–8] при всех своих достоинствах имеют ряд существенных недостатков, связанных в первую очередь с тем, что процессы, протекающие на стане, рассматриваются как детерминированные, что не соответствует реальности, и описываются соответствующими зависимостями с принятием зачастую необоснованных упрощений, допущений и ограничений. Еще одним недостатком является то, что при разработке технологии прокатки не учитывается влияние состояния рабочих валков на стабильность процесса прокатки.

Как показывает практика, на большинстве отечественных производств выбор технологии холодной прокатки осуществляется исходя из опыта технологического персонала, а затем оптимизируется экспериментально по результатам прокатки каждого типоразмера из всего сортамента.

В настоящее время в условиях Производства динамной стали (ПДС) ОАО «НЛМК» на непрерывном 4-клетевом стане холодной прокатки 1400 применяются режимы, полученные исходя из опыта технологического персонала (см. рис. 1, б). Использование данных режимов при прокатке нелегированных изотропных сталей и сталей 1-й, 2-й групп легирования дает неплохие результаты как с точки зрения качества готовой продукции, так и с точки зрения энергосиловых параметров процесса прокатки. Однако, при прокатке труднодеформируемых сталей, к которым относятся высококремнистая изотропная сталь 3-й, 4-й группы легирования и анизотропная сталь, наблюдается большое количество обрывов и дефектов поверхности рабочих валков и полос, что в значительной степени снижает производительность стана и увеличивает время простоя и расход валков.

Целью работы является совершенствование технологии холодной прокатки труднодеформируемых сталей с помощью разработанной методики многокритериальной оптимизации в функции заданных критериев. Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач, связанных с формированием массива исходных данных, проведением обработки и анализа полученной технологической информации, разработкой технологического режима, исходя из заданных критериев оптимизации, проверкой технологических ограничений.

Совершенствование технологии холодной прокатки осуществляется на основе комбинирования существующих методов с анализом фактических реализаций технологических режимов и результатов прокатки каждого типоразмера и выбора из множества альтернативных наилучшего варианта в функции заданного вектора локальных критериев.

В качестве локальных критериев для разработки новых режимов холодной прокатки на многоклетьевом стане могут выступать:

- качество готовой продукции: улучшение качества поверхности (снижение вероятности образования дефектов «риски», «штрихи» и др.), точности геометрических размеров и плоскостности полос;
- обеспечение максимальной (либо заданной) производительности стана за счет стабилизации процесса на повышенных скоростях (снижение вероятности обрывов, поперечного смещения полос – выбросов, повышение продольной устойчивости);
- снижение износа оборудования стана с помощью рациональной загрузки клетей;
- снижения времени незапланированных простоев, снижения расхода металла и материала валков.

С целью получения новых режимов прокатки и оптимизации существующих разработана методика, включающая в себя следующий комплекс операций:

- сбор и формирование массивов исходных данных о технологии прокатки по клетям (режимы прокатки и энергосиловые параметры; состояние валков: диаметры, станочные профилировки, наработка; величины перекося и гидроизгиба рабочих валков; состав, общий расход и расход по зонам распределительных коллекторов смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ): температурный режим и т. п.) для различных (заданных) групп типоразмеров полос, анализ фактических реализаций режимов и результатов прокатки определенных групп (классов) типоразмеров из всего сортамента, адаптация эмпирических моделей прогноза энергосиловых параметров прокатки и коэффициента трения и др.;
- выбор на основе массива исходных данных характерных кластеров режимов холодной прокатки для каждой группы типоразмеров прокатываемых полос из условия минимизации дисперсии внутри каждого кластера и максимизации дисперсии между кластерами (кластерный анализ методом k -средних [9]), т. е. из полученной совокупности кластеров режимов прокатки осуществляется выбор наилучшего кластера из условия максимальной стабильности процесса прокатки и минимальной вероятности образования поверхностных дефектов полосы и валков;
- внутри наилучшего кластера производится выбор оптимального режима прокатки в функции заданных локальных критериев при определенных технологических ограничениях и заданных характеристиках оборудования для каждого типоразмера (распределение по клетям толщин, усилий забоя валков перед входом полосы в клетки, начальные и рабочие положения гидронажимных устройств (ГНУ), межклетевые натяжения, натяжения на разматывателе и моталке, максимальная скорость и клин скоростей) с помощью методики решения многокритериальных оптимизационных задач. В ее основе положены методы теории вероятностей, математической, статистики и классификации альтернативных вариантов, которые достаточно подробно рассмотрены в работах [3, 4, 5];
- расчет энергосиловых параметров по математическим моделям с учетом прочностных свойств металла, и их сравнение с допустимыми значениями [1]. По результатам анализа принимается решение о выборе режима прокатки.

Ниже приведен пример разработки технологии холодной прокатки полос электротехнической изотропной стали 3-й группы легирования с содержанием кремния 2,0–2,3 %

(типоразмер 2,2 → 0,5 × 900 мм) на 4-клетьевом стане 1400, исходя из следующих критериев оптимизации: максимальная производительность стана холодной прокатки, минимальный расход энергии и минимальная вероятность образования дефектов поверхности валков и полос.

1. Формирование исходной базы данных.

Для формирования базы данных используем информацию о горячекатаных рулонах с подобным уровнем механических свойств и геометрических параметров и данные о режимах прокатки только для установившегося процесса, при незначительном отклонении значений установок СРП от среднего значения.

2. Поиск наилучшего режима прокатки.

В качестве технологических параметров обработки металла на стане холодной прокатки используем режим обжатий ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$) и режим натяжений ($\sigma_P, \sigma_{1-2}, \sigma_{2-3}, \sigma_{3-4}, \sigma_M$), а в качестве критериев оптимизации выбираем скорость прокатки, удельный расход энергии и минимум дефектов валков и полос. Определяем границы поддиапазонов с помощью кластерного анализа данных.

Кластерный анализ проводим для режима обжатий ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$), режим натяжений ($\sigma_P, \sigma_{1-2}, \sigma_{2-3}, \sigma_{3-4}, \sigma_M$) в анализе не участвует, ввиду недостаточной степени изменчивости. В результате кластерного анализа данных выявляем кластеры режимов обжатий (табл. 1).

Таблица 1

Кластеры режимов обжатий изотропной стали

№ кластера	$\varepsilon_1, \%$	$\varepsilon_2, \%$	$\varepsilon_3, \%$	$\varepsilon_4, \%$
1	25,23–35,09	21,08–24,67	24,67–41,08	25,81–34,87
2	29,09–40,27	19,48–34,78	32,09–42,83	18,96–27,25
3	29,59–37,77	30,41–43,59	19,05–33,47	19,29–30,19

Выбираем наилучший кластер режима прокатки с точки зрения минимального образования основных видов дефектов валков. Результаты расчета приведены ниже:

Кластер	№ 1	№ 2	№ 3
p_i	0,03547	0,02984	0,03214

где p_i – показатель дефектности определяли по формуле (1):

$$p_i = v_i^{def} \cdot \frac{1}{v_i^{реж}} \cdot \frac{j_{def}}{J}, \quad (1)$$

где p_i – показатель дефектности i -го вида режима прокатки;

v_i^{def} – относительная частота образования дефектов по i -му режиму прокатки;

$v_i^{реж}$ – относительная частота реализации i -го вида режима прокатки;

j_{def} – количество рассматриваемых видов дефектов;

J – общее количество видов дефектов.

Относительную частоту образования дефектов определяем по формуле (2):

$$v_i^{def} = \frac{\sum_{k=1}^j n_{ik}}{\sum_{k=1}^j N_k}, \quad (2)$$

где n_{ik} – количество образования k -го вида дефекта в i -м режиме прокатки;

N_k – количество образования k -го вида дефекта во всем объеме данных.

Относительную частоту реализации режима прокатки определяем по формуле (3):

$$v_i^{реж} = \frac{m_i}{M}, \quad (3)$$

где m_i – количество реализаций i -го вида режима прокатки;

M – количество реализаций всех режимов прокатки.

Наилучшим кластером режима прокатки является тот, для которого значение показателя дефектности минимально, в данном случае это кластер № 2.

В соответствии с методикой многокритериальной оптимизации [5] производим разбиение критериев оптимизации на поддиапазоны (см. табл. 2).

Осуществляем кодирование поддиапазонов критериев оптимизации. Приоритетными кодировками являются 4 и 1, что соответствует максимальной скорости прокатки и минимальному расходу энергии.

Таблица 2

Поддиапазоны критериев оптимизации

Критерий оптимизации	№ поддиапазона			
	1	2	3	4
V , м/мин	282 – 655	656 – 706	707 – 760	761 – 825
W , кВт·ч/т	59,7 – 64,1	64,2 – 71,0	–	–

Поддиапазоны изменения технологических факторов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Поддиапазоны изменения технологических факторов

Технологические факторы	№ поддиапазона		
	1	2	3
ε_1 , %	29,09 – 31,85	31,86 – 33,18	33,19 – 40,27
ε_2 , %	19,48 – 30,73	30,74 – 31,83	31,84 – 34,78
ε_3 , %	32,09 – 34,02	34,03 – 35,23	35,24 – 42,83
ε_4 , %	18,96 – 24,09	24,10 – 25,26	25,27 – 27,25
σ_P , МПа	32 – 42	43 – 45	46 – 53
σ_{1-2} , МПа	155 – 283	284 – 315	316 – 355
σ_{2-3} , МПа	140 – 185	186 – 200	201 – 241
σ_{3-4} , МПа	162 – 218	219 – 236	237 – 276
σ_M , МПа	68 – 93	94 – 102	103 – 134

По результатам работы алгоритма многокритериальной оптимизации [5] находим технологическую ситуацию, обеспечивающую попадание критериев оптимизации в заданный диапазон значений. Данной ситуации в нашем случае соответствует кодировка 312221232.

В итоге получаем режим холодной прокатки ЭИС 3-й группы легирования типоразмера 2,2 → 0,5 × 900 мм (табл. 4, рис. 1).

Таблица 4

Режимы прокатки ЭИС 3-й группы легирования типоразмера 2,2 → 0,5 × 900 мм

Технологические факторы	Разработанный режим	Существующий режим
ε_1 , %	32,66	29,55
ε_2 , %	31,19	34,19
ε_3 , %	34,78	34,31
ε_4 , %	24,47	26,87
σ_P , МПа	43	45
σ_{1-2} , МПа	299	183
σ_{2-3} , МПа	192	196
σ_{3-4} , МПа	225	216
σ_M , МПа	97	100
V , м/мин	694	650
W , кВт·ч/т	64	68

3. Проверка технологических ограничений.

Производим расчет энергосиловых параметров прокатки по существующим моделям очага деформации Целикова, Коцаря, Стоуна, Луговского, Кармана [1, 10] и сравнение их с допустимыми значениями для стана холодной прокатки 1400 ПДС. Результаты расчета показали, что энергосиловые параметры процесса прокатки находятся в диапазоне допустимых значений.

Существующий режим предусматривает большие обжатия в последних клетях стана с меньшим уровнем межклетевых натяжений, наряду с ростом энергосиловых параметров прокатки возрастает вероятность обрыва полосы, а рост нагрузки на двигатель делает невозможным увеличение скорости прокатки. Разработанный режим имеет меньшую загрузку последних клеток, но более высокий уровень межклетевых натяжений, что позволяет снизить уровень энергосиловых параметров и увеличить скорость прокатки.

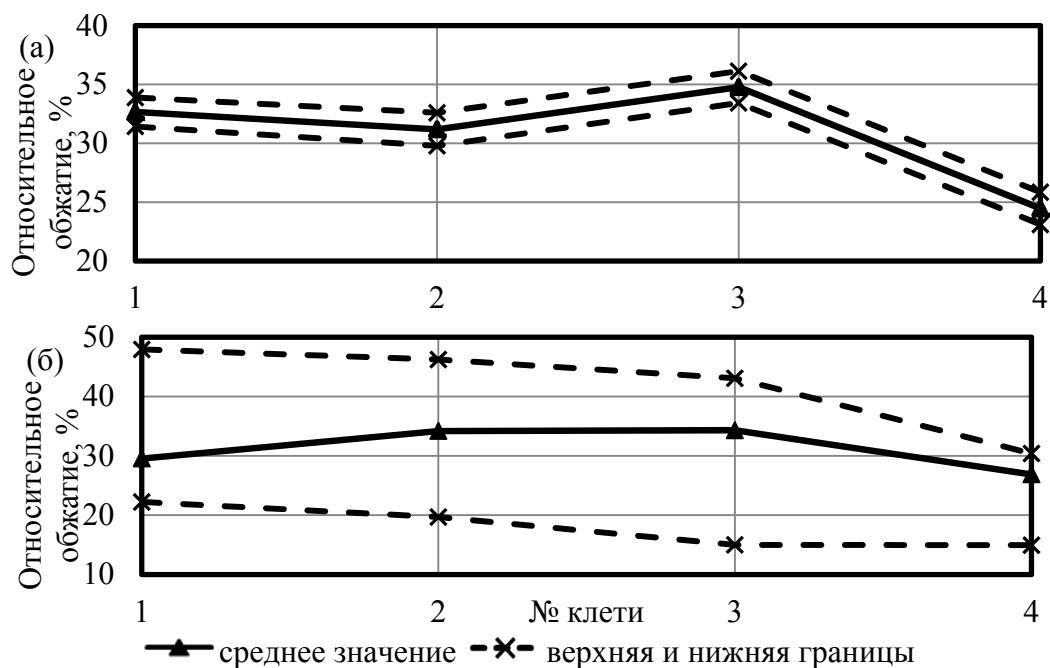


Рис. 1. Разработанный (а) и существующий (б) режимы обжатий ЭИС 3-й группы легирования

Разработанный на основе методики многокритериальной оптимизации режим холодной прокатки обеспечивает попадание выбранных критериев оптимизации в заданный поддиапазон. Однако, для снижения времени незапланированного простоя и рационального расходования активного слоя рабочих валков необходимо учитывать маршрут движения валков по клетям.

С целью стабилизации процесса прокатки необходимо осуществлять эксплуатацию рабочих валков необходимо осуществлять в соответствии с маршрутом движения валков по клетям (табл. 5) в зависимости от степени изношенности рабочего (закаленного) слоя валка и предела текучести обрабатываемого металла. В случае прокатки труднодеформируемых сталей, предел текучести которых в ненаклепанном состоянии превышает 350 МПа, допускается максимальная степень износа 85 %. Это обусловлено высоким уровнем контактных напряжений в очаге деформации, возможным наличием усталостных дефектов материала валка, а также тем, что по мере увеличения степени износа твердость закаленного слоя снижается.

Таблица 5

Маршрут перестановки валков четырехклетевого стана

№ клетки	Допустимая степень износа для клетки № 4	Допустимая степень износа для клетки № 3	Допустимая степень износа для клетки № 2	Допустимая степень износа для клетки № 1
Предел текучести до 350 МПа	0 – 30 %	46 – 75 %	76 – 100 %	31 – 45 %
350 – 500 МПа	0 – 20 %	36 – 55 %	56 – 85 %	21 – 35 %
более 500 МПа	0 – 15 %	29 – 40 %	41 – 65 %	16 – 28 %

Для проверки разработанной технологии были проведены экспериментальные исследования. Тридцать полос ЭИС 3-й группы легирования (типоразмер 2,2 → 0,5 × 900 мм) были обработаны на 4-клетьевом стане холодной прокатки 1400: 15 – по существующему и 15 – по разработанному режимам.

Результаты показали, что технология прокатки, определенная с помощью предложенной методики обеспечивает снижение расхода удельной энергии на прокатку на 6 % и повышение производительности стана холодной прокатки за счет увеличения скорости прокатки на 6 % по сравнению с существующим режимом прокатки.

ВЫВОДЫ

Разработана методика многокритериальной оптимизации технологии холодной прокатки. С помощью методики разработана и опробована в промышленных условиях ПДС технология холодной прокатки ЭИС 3-й группы легирования. Результаты проверки подтвердили эффективность предложенной технологии холодной прокатки на 4-клетевом стане 1400 ПДС ОАО «НЛМК». Практическое использование предложенной методики многокритериальной оптимизации для разработки и совершенствования технологии холодной прокатки на многоклетьевом стане позволяет повысить производительность многоклетьевого стана, улучшить качество готовой продукции, снизить время незапланированных простоев, расход энергии и металла и других ресурсов, а также уменьшить износ оборудования. Подобного рода решения могут найти практическое применение на многоклетьевых станах холодной прокатки при производстве тонколистового проката.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Автоматизированное проектирование и реализация технологии холодной прокатки электротехнической стали* / А. П. Долматов, В. Н. Скороходов, В. П. Настич, А. Е. Чеглов. – М. : Наука и технологии, 2000. – 448 с.
2. *Василев Я. Д. Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки* / Я. Д. Василев. – М. : Металлургия, 1995. – 368 с.
3. *Настич В. П. Управление качеством тонколистового проката* / В. П. Настич, В. Н. Скороходов, А. И. Божков. – М. : Интермет Инжиниринг, 2001. – 296 с.
4. *Блюмин С. Л. Практическая методика решения некоторых задач классификации и снижения размерности* / С. Л. Блюмин, А. И. Божков // *Заводская лаборатория*. – 1994. – № 3. – С. 49–55.
5. *Настич В. П. Управление качеством холоднокатаных полос* / В. П. Настич, А. И. Божков. – М. : Интермет Инжиниринг, 2006. – 216 с.
6. *Автоматизированная система анализа и выбора технологии холодной прокатки на многоклетьевом стане* / В. П. Настич, А. И. Божков, С. С. Дегтев, А. А. Таскин, А. А. Александров // *Производство проката*. – 2011. – № 2. – С. 19–26.
7. *Снижение расхода энергии и металла на основе анализа и выбора оптимальных режимов холодной прокатки на многоклетьевом стане* / А. И. Божков, С. Н. Ивлиев, С. С. Дегтев, А. А. Таскин, А. А. Александров // *Сборник трудов конференции «Павловские чтения 2010»*. – 2010. – С. 171–177.
8. *Моделирование энергосиловых параметров процесса холодной прокатки сталей IF с учетом упругопластических деформаций и низкого содержания углерода* / В. А. Иводитов [и др.] // *Металлы*. – 2005. – № 6. – С. 71–77.
9. *Прикладная статистика* / С. А. Айвазян, В. М. Бухштабер, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин. – М. : Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
10. *Коновалов Ю. В. Расчет параметров листовой прокатки : справочник* / Ю. В. Коновалов, А. Л. Остапенко, В. И. Пономарев. – М. : Металлургия, 1986. – 430 с.

Божков А. И. – канд. техн. наук, проф. ЛГТУ;

Ивлиев С. Н. – нач. произв. ОАО «НЛМК»;

Дегтев С. С. – канд. техн. наук, нач. бюро ОАО «НЛМК»;

Таскин А. А. – магистр, инженер ОАО «НЛМК».

ЛГТУ – Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия.

ОАО «НЛМК» – ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат», г. Липецк, Россия.

E-mail: degtev_ss@nlmk.ru; nelson.earl@gmail.com

Статья поступила в редакцию 02.02.2012 г.