

УДК 621.771.01

Тарасов А. Ф.
Спаская А. М.
Присяжный А. Г.

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ ОБЖАТИЙ НА СТАНАХ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ

Производство холоднокатанных листов и полос имеет ряд преимуществ по сравнению с производством горячекатанной металлопродукции, в частности оно позволяет производить листы и полосы толщиной до 0,8–1 мм и менее, вплоть до нескольких микрон. Полученные листы и полосы опережают горячекатанные по следующим показателям качества: точности размеров, отделке поверхности, физико-механическим свойствам. Эти факторы приводят к тому, что холодная прокатка листов и полос получила широкое распространение, как в черной, так и в цветной металлургии. В настоящее время доля холоднокатанных листов и полос в общем объеме тонколистового проката составляет около 50 %.

Однако помимо достоинств холодная прокатка листов и полос имеет следующие недостатки: процесс холодной прокатки более энергоемкий по сравнению с процессами горячей прокатки, при холодной деформации металл упрочняется, из-за чего нуждается в отжиге для восстановления пластических свойств. В совокупности эти факторы приводят к выводу, что при всех преимуществах процесса холодной прокатки необходима модернизация существующего производства с целью повышения рентабельности производства и улучшения качества готовой продукции. В связи с тем, что многие украинские станы уже реконструированы под автоматизированное управление процессом, создание автоматизированного комплекса проектирования технологических режимов обжатия при холодной прокатке является актуальной задачей. Разработанный режим должен позволять равномерно распределять по рабочим клетям стана нагрузки, определяемые энергосиловыми параметрами процесса прокатки. По данной проблеме существуют следующие публикации [1, 2], в них затронуты вопросы полистовой прокатки.

Целью работы является создание автоматизированного комплекса проектирования технологических режимов обжатий при холодной прокатке.

Задача оптимизации технологических режимов процессов листопркатного производства является многопараметрической и характеризуется наличием критериев с высокой степенью относительности и многомерности. Однако решение задачи оптимизации технологических режимов процессов в листопркатном производстве в целом ряде случаев может быть сведено к однокритериальному и однопараметрическому решению:

- расчеты технологических режимов обжатий по критерию максимума производительности;
- расчеты технологических режимов обжатий по критерию заданной величины силы прокатки в каждом из проходов;
- определение допустимых вариаций исходных технологических параметров;
- расчеты технологических режимов обжатия, исходя из условия сохранения целостности металлической полосы, определение напряжений заднего натяжения определения номинального, то есть настроечного значения конечной толщины [3].

При расчете режима обжатий в непрерывной группе станов холодной прокатки определяют:

- распределение обжатий по рабочим клетям стана;
- опережение;
- скоростной режим прокатки с учетом опережения;

- усилие прокатки;
- моменты на валу электродвигателя;
- мощность электродвигателя.

Одно из основных условий расчетов режима обжатий на непрерывных станах – соблюдение равенства секундных объемов металла в рабочих клетях [3].

При выборе обжатия по клетям используются две схемы [4]. Первая схема применяется при прокатке относительно толстых полос и предполагает, что относительные обжатия уменьшаются от первой к последней клетке. Уменьшение обжатия в последней клетке обеспечивает получение полос с минимальной неплоскостностью и разнотолщинностью. Вторая схема используется при проектировании технологических режимов прокатки тонких полос для современных четырех- и пятиклетевых станов и предполагает, что обжатия увеличиваются от первой к последней клетке.

Однако данные схемы менее эффективны по сравнению с методом автоматизированного проектирования, что будет продемонстрировано далее.

Система автоматизированного проектирования технологических режимов содержит непосредственно саму модель оптимизации и численную модель расчета силы прокатки, которая подразумевает следующие допущения:

- деформация ленты является двухмерной, при этом пластическое течение металла подчиняется гипотезе плоских сечений;
- распределения нормальных осевых напряжений по высоте каждого отдельного поперечного сечения очага деформации являются постоянными, в то время как изменения толщины, а также нормальных и касательных, контактных напряжений по длине каждого отдельного выделенного i -го элементарного объема носят линейный характер;
- протяженность зоны упругого сплющивания прокатываемой ленты на входе в очаг деформации не превышает одного шага его разбиения;
- аналитическое описание текущих значений касательных контактных напряжений на рабочих валках подчиняются закону Амонтона-Кулона.

Текущие значения коэффициентов внешнего трения являются величинами переменными по длине зоны пластического формоизменения, законы их распределений являются известными и могут быть представлены в зависимости от геометрической координаты.

Кроме рекуррентного решения численная модель расчета силы прокатки включает в себя ряд процедур, а именно:

- расчет геометрических и силовых параметров для зоны упругого восстановления полосы на выходе из очага деформации, обеспечивающий определение расчетных значений напряжений переднего натяжения;
- численное интегрирование полученных локальных характеристик напряженного состояния металла, имеющее своей целью определение силы и моментов процесса прокатки;
- организацию итерационной процедуры по определению протяженностей зон опережения на рабочих валках, обеспечивающих соответствие расчетных и заданных значений напряжений переднего натяжения;
- организацию итерационного решения по учету упругого сплющивания рабочих валков и прокатываемой ленты [5].

В основу оптимизационных расчетов положен метод динамического программирования. Этот метод обеспечивает надлежащую точность результатов и достаточно быструю сходимость. В условиях того, что численные методы, с помощью которых выполняются расчеты силовых параметров в очаге деформации, включают в себя ряд выражений, содержащих операции, накладывающие ограничения на входные параметры (извлечения корня), метод данный метод приобретает большую актуальность из-за своей относительной предсказуемости, что компенсирует большие затраты времени на вычисления.

В системе на первом этапе расчетов находится 4 чистовых клетки прокатного стана 1700 ПАО «ММК им. Ильича». На выходе из последней четвертой чистовой клетки полоса

должна приобрести заданную конечную толщину, тем временем сила прокатки не должна превысить допустимую силу прокатки, момент и мощность прокатки так же не должны превысить допустимые значения, которые определяются параметрами стана.

Задача оптимизации технологических режимов в представленном случае сведена к задаче оптимизации режима обжатий. То есть учет сохранения металлом достаточного запаса пластичности в рамках представленной задачи рассмотрен не будет, что является недостатком расчетной системы, который в дальнейшем развитии планируется устранить.

Входными данными оптимизационной модели являются:

- начальная и конечная толщины;
- ширина полосы;
- радиусы рабочих валков;
- коэффициент внешнего трения;
- скорость прокатки;
- марка стали.

Эти параметры являются неизменными в пределах одного вычисления.

Задача сведена к нахождению режима обжатий, при котором их распределение определяется исходя из комплексного критерия, рассчитываемого по формуле:

$$Y_i = \frac{P}{[P]} + \frac{M}{[M]} + \frac{N}{[N]}, \quad (2)$$

где Y_i – критерий, включающий в себя комплекс параметров;

P – сила прокатки в конкретном проходе;

$[P]$ – максимально допустимая сила прокатки в конкретном проходе;

M – момент прокатки в конкретном проходе;

$[M]$ – максимально допустимый момент прокатки в конкретном проходе;

N – мощность прокатки в конкретном проходе;

$[N]$ – максимально допустимая мощность прокатки в конкретном проходе.

Сила, момент и мощность прокатки рассчитывается по численной одномерной методике. Критерий Y для всего процесса рассчитывается по формуле:

$$Y = K_1 \times Y_1 + K_2 \times Y_2 + K_3 \times Y_3 + K_4 \times Y_4 \geq \min. \quad (3)$$

Задача решалась методом динамического программирования, при этом вершины графа – толщина полосы, веса ребер – значения показателя Y_i , K_i – весовой коэффициент параметра оптимизации.

Рассматриваемый стан имеет следующие параметры, интересующие нас в рамках решаемой задачи[6]:

- максимальная скорость прокатки – 25 м/с;
- стан – непрерывный;
- диаметр бочки рабочих валков – 500 мм;
- длина бочки рабочего валка – 1700 мм.

Параметры прокатываемой полосы:

- сталь 08кп;
- ширина – 1000 мм.

Схема графа приведена на рис. 1, где h_n – начальная толщина полосы, h_k – конечная толщина полосы, h_1, h_2, h_3 – толщина в конце каждого из проходов; Y_1, Y_2, Y_3 – веса ребер графа, рассчитанные по формуле (2).

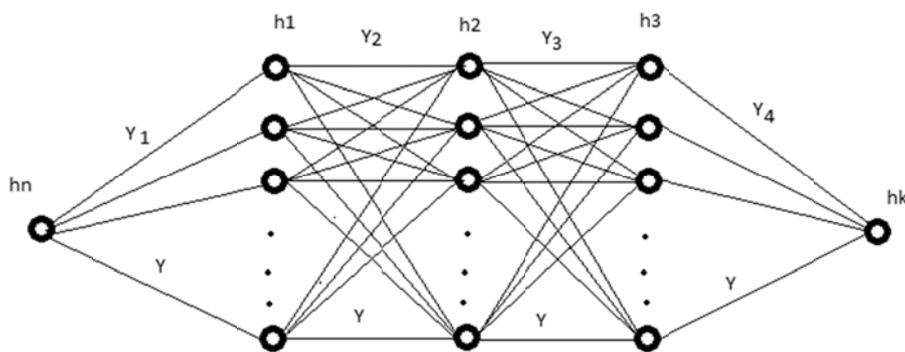


Рис. 1. Схема графа для решения задачи оптимизации

На рис. 2 показаны графики силы прокатки на миллиметр ширины, а на рис. 3 – графики изменения толщины полосы при различных технологических режимах работы непрерывного стана холодной прокатки (НСХП) 1700 ПАО «ММК им. Ильича».

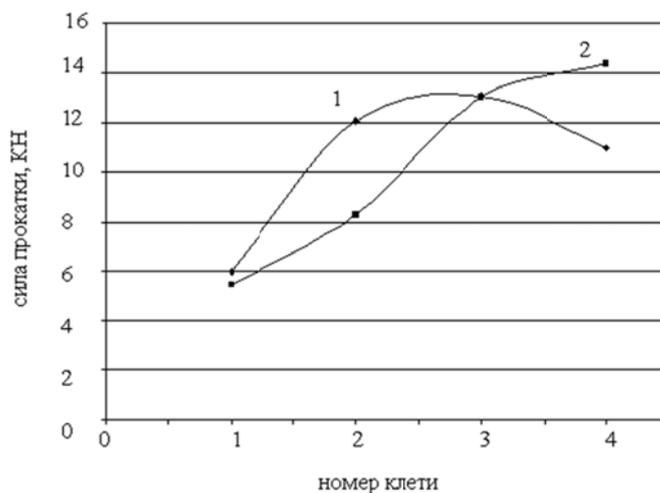


Рис. 2. Распределение силы прокатки по клетям НСХП 1700 ПАО «ММК им. Ильича»: 1 – существующий технологический режим; 2 – предложенный технологический режим

Реально применяемый режим на стане 1700 ПАО «ММК им. Ильича» и спроектированный с помощью автоматической системы приведен в табл. 1.

Таблица 1

Технологические режимы на стане 1700 ПАО «ММК им. Ильича»

Клеть	H_i , мм	H_{i+1} , мм	P/b , КН/мм
Реально существующий технологический режим [6]			
1	2,50	1,95	5,97
2	1,95	1,30	12,08
3	1,30	0,95	13,1
4	0,95	0,80	11
Спроектированный технологический режим			
1	2,50	2	5,43
2	2	1,6	8,28
3	1,6	1,1	13,03
4	1,1	0,8	14,4

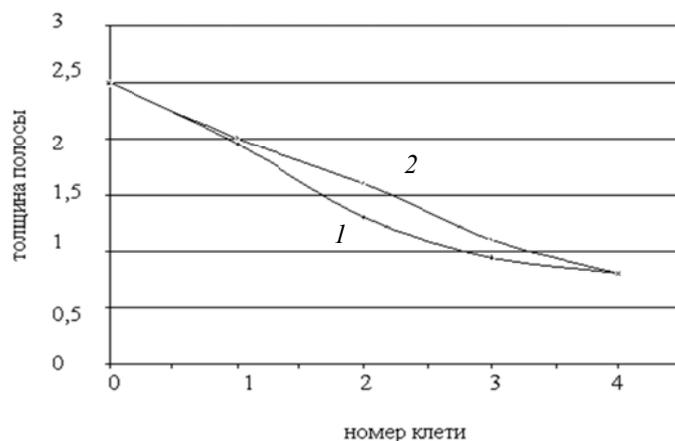


Рис. 3. Распределение толщины полосы по клетям НСХП 1700 ПАО «ММК им. Ильича»: 1 – существующий технологический режим; 2 – предложенный технологический режим

ВЫВОДЫ

Была создана математическая модель оптимизационной процедуры, которая использовалась в системе автоматизированного проектирования режима обжатий, что дало возможность получать оптимальные режимы обжатий при холодной прокатке. Данная система учитывает наклеп металла, как и уже реально существующий способ проектирования режимов обжатий.

В данной системе не учитываются условия сохранения металлом запаса пластичности, что является ее недостатком, который планируется устранить в последующих работах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сатонин А. В. Анализ влияния и автоматизированное проектирование технологий и оборудования процесса холодной листовой прокатки / А. В. Сатонин, М. В. Федоринов, М. Е. Кокотько // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ-Слов'янськ : ДДМА. – 2003. – С. 187–191.
2. Автоматизированное проектирование технологических режимов обжатий при холодной листовой прокатке / М. Е. Кокотько, Д. Н. Руденко, М. В. Федоринов, Д. А. Штукин, А. А. Иванов // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – С. 500–503.
3. Корн Г. Справочник по математике (Для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1978. – 831 с.
4. Коновалов Ю. В. Справочник прокатчика. Книга 2. / Ю. В. Коновалов. – М. : Теплотехник, 2008. – 608 с.
5. Сатонин А. В. Математическое моделирование напряжений, деформаций и основных показателей качества при прокатке относительно широких листов и полос : монография / В. А. Федоринов, А. В. Сатонин, Э. П. Грибков. – Краматорск, 2010. – 244 с.
6. Прокатные станы. Справочник в 3-х томах. Т. 3. Листопрокатные станы и профилегибочные агрегаты / В. Г. Антипин, С. В. Тимофеев, Д. К. Нестеров и др. – М. : Металлургия, 1992. – 496 с.

Тарасов А. Ф. – д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой КИТ ДГМА;

Спаская А. М. – аспирант ДГМА;

Присяжный А. Г. – аспирант ПГТУ.

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

ПГТУ – Приазовский государственный технический университет, г. Мариуполь.

E-mail: ann_spaskaya@mail.ru

Статья поступила в редакцию 08.12.2011 г.