

УДК 65.012.122:658.562:65.011.46

МЕТОДИКА РАСЧЕТА РЕЖИМОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ ПОЛОС НА МНОГОКЛЕТЕВОМ СТАНЕ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ СНИЖЕНИЕ СЕБЕСТОИМОСТИ ПРОДУКЦИИ ЛИСТОПРОКАТНОГО ЦЕХА. СООБЩЕНИЕ 1

Божков А.И.¹, к.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов давлением» (bozhkov_51@mail.ru)

Ковалев Д.А.², начальник управления развития технологий

Потапов В.С.², инженер

Шульгин Р.И.², специалист отдела продаж

¹ Липецкий государственный технический университет
(398600, Россия, Липецк, ул. Московская, 30)

² ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат»
(398040, Россия, Липецк, пл. Металлургов, 2)

Аннотация. Представлена методика расчета режимов холодной прокатки полос на многоклетевом (реверсивном) стане, которые могут обеспечить минимальный расход электроэнергии при максимальной стабилизации процесса на высоких скоростях и получение заданного качества холоднокатаных полос (минимум вероятности образования дефектов поверхности, соответствие допусков по толщине и плоскостности требованиям используемых стандартов). Задача решена с помощью метода условной оптимизации. В качестве критерия оптимизации предложено использовать суммарный расход энергии, затрачиваемой на процесс прокатки, в качестве условий – технологические и конструкционные ограничения на параметры прокатки и устойчивость полос в отношении обрывов и образования дефектов поверхности. Решение о разработке данной инновационной методики обусловлено тем, что большое число существующих подходов к расчету и проектированию режимов прокатки имеют видимые достоинства и недостатки. Во многих случаях разработчики стремятся учесть одновременно несколько требований, обеспечивающих устойчивость процесса прокатки, качество проката, условия эксплуатации оборудования, снижение расхода энергии, металла, вспомогательных материалов и заданную (максимальную) производительность стана. Однако некоторые из этих требований могут быть противоречивыми и наилучшим будет тот режим, который с высокой степенью вероятности гарантирует выполнение в определенной пропорции всего комплекса требований. Таковой является представленная методика расчета. Расчет режимов холодной прокатки сводился к выбору и распределению обжатий по клетям (проходам – на реверсивном стане) и выбору натяжений полосы в межклетевых промежутках, на размотывателе и моталке, а также в задании клина скоростей в конкретной системе ограничений, накладываемых на входные и выходные переменные процесса в функции принятого критерия оптимальности. Как было отмечено ранее, задача решена с помощью метода условной оптимизации, т. е. с заданием критерия оптимизации.

Ключевые слова: холодная прокатка, режим прокатки, работа (энергия) прокатки, расход электроэнергии, параметры прокатки, толщина, плоскостность, обрывы полос, дефекты, поверхность, регулирование, устойчивость, оптимизация, алгоритм, методика.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-7-511-516

Целью работы является построение методики расчета режимов холодной прокатки полос на многоклетевом стане, обеспечивающих снижение себестоимости продукции листопрокатного цеха металлургического комбината.

Существует большое число подходов к расчету и проектированию режимов прокатки [1 – 6], имеющих видимые достоинства и недостатки. Во многих случаях разработчики стремятся учесть одновременно несколько требований, обеспечивающих устойчивость процесса прокатки, качество проката, условия эксплуатации оборудования, снижение расхода энергии, металла, вспомогательных материалов и заданную (максимальную) производительность стана. При этом некоторые из этих требований могут быть противоречивыми и наилучшим будет тот режим, который с высокой степенью

вероятности гарантирует выполнение в определенной пропорции всего комплекса требований.

Расчет режимов холодной прокатки заключается в выборе и распределении обжатий по клетям (проходам – на реверсивном стане), выборе натяжений полосы в межклетевых промежутках, на размотывателе и моталке, а также в задании клина скоростей в конкретной системе ограничений, накладываемых на входные и выходные переменные процесса в функции принятого критерия оптимальности [7, 8].

Опыт эксплуатации современных станов холодной прокатки показывает, что при наличии автоматизированных систем проектирования режимов, оператор все-таки больше надеется на собственный опыт и знания. Связано это прежде всего с тем, что результаты расчетов не дают нужных практических результатов.

Для персонала стана приоритетными являются задачи выполнения производственного плана, получения проката с заданными геометрическими показателями и отсутствие превышения установленных норм соответствующих статей затрат и расходов калькуляции продукции [9, 10].

В данной работе авторы предлагают методику расчета режимов прокатки, которые максимально приближены к решению перечисленных практических задач.

Решение основной поставленной задачи, снижение себестоимости продукции, связано с необходимостью тщательного анализа статей калькуляции применительно к стану и оценки его производительности.

Из всех статей калькуляции с режимом прокатки можно связать расход электроэнергии, измеряемый по нагрузке на двигатели прокатного стана и зависящий от мощности, расходуемой на реализацию процесса, которая, в свою очередь, определяется размерами полосы, средним давлением, обжатием и скоростью.

Расход металла, вспомогательных материалов и других энергоресурсов (пар, сжатый воздух, вода и пр.) зависит в основном от работы систем автоматизации (в частности, САПР) и организации работы прокатного отделения в целом [11, 12].

При прокатке конкретного типоразмера необходимо определить такой режим, который обеспечит минимум суммарного удельного расхода электроэнергии при максимальной скорости прокатки, максимальной стабилизации процесса (минимум обрывов, простоев и пр.) и получении заданного качества прокатанных полос (отсутствие дефектов поверхности, соответствие толщины и плоскостности требованиям регламента) [13, 14].

При такой постановке задачи расчет режимов можно свести к решению многокритериальной оптимизационной задачи или к решению задачи условной оптимизации.

Практическая методика поиска и выбора оптимальных режимов прокатки из массива реализаций при многих критериях приведена и подробно рассмотрена в работе [15].

Основным недостатком методики является невозможность определения режима для типоразмеров, которые ранее не прокатывались на стане или прокатывались редко (имеют недостаточную степень повторяемости).

В работе [16] представлен подход к расчету режима прокатки с использованием обобщенного критерия оптимизации, в качестве которого выбран единый функционал с различными весовыми коэффициентами, называемыми экспертами.

К недостаткам такого подхода можно отнести наличие функциональной связи между отдельными критериями (требованиями к процессу) и субъективность в определении весовых коэффициентов, что может привести к погрешности при расчетах. Кроме того, в работе [15] приведены только общие виды моделей, что при

отсутствии информации об их структуре и параметрах, алгоритмов вычислений, а также примеров расчета вызывает непреодолимые трудности в использовании методики для расчетов режимов прокатки на практике (на действующих станах).

В основу предлагаемой методики решения поставленной задачи положены известные формулы и понятия теории прокатки [16].

Величины, определяющие режим прокатки, представляются вектором входных переменных (факторов):

- распределением частных обжатий по клетям многоклетевого стана (проходам – для реверсивного) ε_i ($i = 1, \dots, I$, где I – число клетей);

- удельными натяжениями на размотывателе, в межклетевых промежутках и на моталке σ_i ($i = 0, 1, \dots, I$);

- клином скоростей V_i ($i = 1, \dots, I$).

Величины, характеризующие эффективность процесса, представляются вектором выходных переменных (откликов). К ним можно отнести:

- суммарный расход электроэнергии W_{Σ} ;

- производительность стана Π ;

- точность проката h_i (h_i – толщина полосы на выходе стана);

- плоскостность прокатанных полос $\sigma(y)_{\text{ост}}$ ($\sigma(y)_{\text{ост}}$ – распределение остаточных напряжений по ширине прокатанных полос, y – координата по ширине, $y = 0, \dots, B$ – ширина полосы);

- относительную частоту образования дефектов поверхности валков и полос n_d и др.

Решение поставленной задачи сведем к решению задачи условной оптимизации. В качестве критерия оптимизации (минимизации) предложено использовать суммарный расход энергии, затрачиваемой на процесс прокатки A_{Σ} . Для удобства вычислений коэффициент вытяжки λ заменен на относительное обжатие ε_i :

$$A_i = P_{\text{ср}i} Q_i \ln \left(\frac{1}{1 - \varepsilon_i} \right). \quad (1)$$

Следовательно, критерий оптимизации можно представить в следующем виде:

$$A_{\Sigma} = \sum_{i=1}^I P_{\text{ср}i} Q_i \ln \left(\frac{1}{1 - \varepsilon_i} \right) \Rightarrow \min, \quad (2)$$

где $i = 1 \dots I$, I – число клетей; $P_{\text{ср}i}$ – среднее давление прокатки, МПа; ε_i – относительное обжатие, доля; Q_i – объем металла, м^3 .

В формуле (1) объем полосы на выходе i -й клетки

$$Q_i = h_i B l, \quad (3)$$

где h_i – толщина полосы в i -й клетки, м; B – ширина полосы, м; l – длина полосы, м.

Допускаем, что уширение при прокатке тонких полос отсутствует, поэтому их ширина постоянна и не

зависит от номера клетки. Это допущение согласуется с законом наименьшего сопротивления при пластической деформации, когда длина очага деформации (l_d) несоизмеримо меньше ширины полосы (B) ($l_d \ll B$).

Относительное обжатие в i -й клетки выбирается из заданного диапазона [16]:

$$\varepsilon_{\min} \leq \varepsilon_i \leq \varepsilon_{\max}, \quad (4)$$

где ε_{\min} , ε_{\max} – минимально и максимально допустимые значения относительного обжатия в i -й клетки, доля (выбирается из нормативно-технической документации (НТД) или рассчитывается из конструкционных и технологических ограничений). Выполнение условия (4) позволяет обеспечить необходимые температурные и деформационные условия в очаге деформации, а также требуемые условия эксплуатации оборудования (выполнение требований к прочности валков и клетки в целом). Средние удельные натяжения полосы на разматывателе, на моталке и в межклетевых промежутках, необходимые для расчета среднего давления в уравнениях (1) и (2), выбираются из следующих диапазонов:

$$\sigma_{i\min} \leq \sigma_i \leq \sigma_{i\max}, \quad (5)$$

где σ_{\min} , σ_{\max} – минимально и максимально допустимые значения среднего удельного натяжения, МПа.

Для межклетевых промежутков:

$\sigma_{i\min} = c\sigma_{i-1}$, $c = 1,2 - 2,0$; σ_{i-1} – среднее удельное натяжение в предыдущем $i - 1$ промежутке, МПа [1];

$\sigma_{i\max} = c'\sigma_{0,2i}$, $c' = 0,2 - 0,4$; $\sigma_{0,2i}$ – условный предел текучести материала полосы в i -ом промежутке, МПа [16, 17].

Для разматывателя и моталки минимальное и максимальное значение среднего удельного натяжения задается, как правило, в соответствии с требованиями НТД, исходя из мощности натяжных устройств.

Выполнение условия (5) обеспечит снижение среднего давления, продольную устойчивость полосы, т. е. снизит вероятность образования дефектов поверхности полосы («риски», «штрихи», «пробуксовки» и др.) и валков («навары», «выкрошка» и др.), а также обрывов полосы.

Остальные требования можно и целесообразно включить в систему ограничений применительно к определяемым режимам прокатки для различных станков и типоразмеров полос.

Не будем подробно останавливаться на конструкционных и технологических ограничениях, которые подробно рассмотрены и проанализированы в работах [1, 4], и обоснуем возможность использования остальных перечисленных выше откликов (помимо суммарного расхода электроэнергии) в виде ограничений.

Обеспечение заданной (максимальной) производительности для конкретных размеров и марки полосы

равносильно реализации заданной (повышенной) скорости прокатки при отсутствии внеплановых простоев, возникающих при аварийных ситуациях (в частности, при обрывах полосы). Ограничением скорости является мощность двигателей, которая включена в комплекс конструкционных и технологических ограничений. При расчете полученное значение скорости прокатки в каждой клетке не должно приводить к превышению допустимого значения мощности двигателя:

$$N_i \leq N_{\text{доп}}, \quad (6)$$

где N_i – мощность прокатки в i -й клетки, кВт; $N_{\text{доп}}$ – максимально допустимое значение мощности прокатки, кВт.

Помимо ограничения по скорости прокатки, существуют следующие ограничения.

- По максимальному усилию прокатки:

$$P_i \leq P_{\text{доп}}, \quad (7)$$

где P_i – усилие прокатки в i -й клетки, Н; $P_{\text{доп}}$ – максимально допустимое значение усилия прокатки, Н.

- По максимальному моменту прокатки:

$$M_i \leq M_{\text{доп}}, \quad (8)$$

где M_i – момент прокатки в i -й клетки, кНм; $M_{\text{доп}}$ – максимально допустимое значение момента прокатки, кНм.

• Дополнительное условие устойчивости полосы в отношении обрывов можно представить в виде неравенства

$$\sigma(y)_{\max i} < \frac{\sigma_{\text{нр}i}^*}{K_i}, \quad (9)$$

где $\sigma(y)_{\max i}$ – максимальное удельное натяжение на кромке полосы, прокатываемой в i -й клетки; K_i – коэффициент концентрации напряжений на краю полосы; $\sigma_{\text{нр}i}^*$ – предел прочности материала полосы на разрыв с учетом наклепа металла в i -й клетки.

Коэффициент K определяется для каждого материала и зависит от наличия концентраторов напряжений на кромках (трещин, неметаллических включений и других дефектов). Величина коэффициента определяется в зависимости от величины коэффициента интенсивности напряжений, величины дефекта и приложенного напряжения. Критические значения коэффициента концентрации напряжений для сталей в наклепанном состоянии, при наличии дефектов на кромках, могут достигать порядка 1,8 – 2,0 [17].

Рассчитывать значения удельных напряжений на кромках в различных межклетевых промежутках можно по методике, представленной в работах [1, 11, 14].

Необходимые для обеспечения заданных эпюр удельных натяжений в полосе в различных межклетевых

вых промежутках многоклетвеного стана уставки гидроизгиба и перекося рабочих валков, а также дифференцированного расхода смазочно-охлаждающей жидкости можно рассчитать по формулам, представленным в работе [17]. В данной работе приведены также требования к относительной частоте образования дефектов поверхности валков и полосы. Требования к точности и плоскостности полос выполняются с помощью замкнутых систем автоматического регулирования толщины (САРТ) и плоскостности (САПП), которые функционируют автономно в режиме реального времени (on-line) и реализуют, как правило, либо регулирование по отклонению, либо комбинированный способ регулирования.

В данном случае режим прокатки должен быть благоприятным для работы систем и исключать их выход на предельные режимы. В формуле (2) для расчета среднего по длине очага деформации давления можно использовать любые известные методики, в которых присутствует натяжение. На практике хорошо зарекомендовали себя методики А.И. Целикова, Стоуна, С.Л. Коцаря и др. Алгоритм решения задачи определения режима холодной прокатки полосы заданного типоразмера на многоклетвеном стане приведен ниже.

1. Задание типоразмера полосы (начальная и конечная толщина – h_0, h_l , мм; ширина – B , мм; марка стали).

2. Расчет суммарного обжатия: $\varepsilon_{\Sigma} = \frac{h_0 - h_l}{h_0}$, где h_0, h_l – начальная и конечная толщина полосы, мм.

3. Задание диапазонов изменения относительных обжатий в каждой клетке стана (уравнение (4)).

4. Задание диапазонов изменения средних удельных натяжений на разматывателе, моталке и в межклетвевых промежутках (уравнение (5)).

5. Задание числа поддиапазонов n_i в диапазонах изменения относительных обжатий (см. п. 3).

6. Расчет шага $\Delta\varepsilon_i$ изменения относительного обжатия в i -й клетке прокатного стана:

$$\Delta\varepsilon_i \frac{\Delta\varepsilon_i}{n_i}, \Delta\varepsilon_i = \varepsilon_{i\max} - \varepsilon_{i\min}. \quad (10)$$

7. Определение границ поддиапазонов изменения относительного обжатия ε_i для каждой клетки стана.

8. Задание числа поддиапазонов m_i в диапазонах изменения средних удельных натяжений на i -м участке полосы, расположенном на разматывателе, в межклетвевых промежутках и на моталке (см. п. 4).

9. Расчет шага $\Delta\sigma_j$ изменения среднего удельного натяжения на j -м участке полосы:

$$\Delta\sigma_j \frac{\Delta\sigma_j}{m_j}, \Delta\sigma_j = \sigma_{j\max} - \sigma_{j\min}. \quad (11)$$

10. Определение границ поддиапазонов изменения средних удельных натяжений σ_j на j -м участке полосы,

расположенном на разматывателе, в межклетвевых промежутках и на моталке.

11. Расчет числа возможных альтернативных вариантов сочетаний поддиапазонов относительных обжатий и средних удельных натяжений:

$$W = \prod_{i=1}^I n_i \prod_{j=0}^J m_j, \quad (12)$$

где Π – знак произведения.

12. Расчет соответствия распределения относительных обжатий по клеткам суммарному относительному обжатию (см. п. 2):

$$(1 - \varepsilon_{\Sigma}) = \prod_{i=1}^I (1 - \varepsilon_i). \quad (13)$$

13. Исключение из общего числа возможных вариантов W вариантов W' , не соответствующих условию (13):

$$W^* = W - W', \quad (14)$$

где W^* – число реализуемых вариантов сочетаний поддиапазонов относительных обжатий ε_i и средних удельных натяжений σ_j . При этом $W^* \ll W$.

14. Задание скорости прокатки в соответствии с условием:

$$V_i \leq V_{\max}, \quad (15)$$

где V_i, V_{\max} – скорость за последней клетью и максимальная (проектная) скорость прокатки.

15. Расчет скорости полосы на выходе i -й клетки:

$$V_i = V_l \frac{h_l}{h_i}, \quad (16)$$

где h_i, h_l – толщина полосы за i -й клетью и на выходе стана; $h_i = h_{i-1}(1 - \varepsilon_i)$, h_{i-1} – толщина полосы на входе в i -ю клетью.

16. Расчет среднего по длине очага деформации давления прокатки $P_{cp_i}^*$ в каждой клетке стана для каждого варианта W^* (для расчета можно использовать, например, методики Стоуна или А.И. Целикова, которые подробно рассмотрены в работах [17 – 19]).

17. Расчет энергосиловых параметров прокатки P_i^*, M_i^*, N_i^* .

18. Проверка условий (6) – (8).

19. Исключение из массива рассчитанных значений $P_{cp_i}^*$ тех, для которых условия (6) – (8) не выполняются:

$$P_{cp_i}^{**} = P_{cp_i}^* - \bar{P}_{cp_i}, \quad (17)$$

где $P_{cp_i}^{**}, \bar{P}_{cp_i}$ – массив значений средних давлений прокатки, для которых соответственно выполняются и не выполняются условия (6) – (8).

20. Расчет объема металла Q_i по уравнению (3).

21. Расчет $\ln\left(\frac{1}{1-\varepsilon_i}\right)$ для каждой клетки стана.

22. Расчет суммарного расхода энергии A_{Σ}^{**} по уравнению (2) для каждого реализуемого варианта.

23. Сравнение рассчитанных величин A_{Σ}^{**} и выбор минимального значения (см. уравнение (2)).

24. Выбор режима прокатки ε_i , σ_i , V_i при $A_{\Sigma}^{**} = \min$.

25. Расчет эпюр удельных натяжений $\sigma_i(y)$ (y – координата по ширине полосы) в межклетевых промежутках при рассчитанном режиме прокатки [17, 20].

26. Задание эпюр удельных натяжений $\bar{\sigma}_i(y)$, обеспечивающих устойчивый стабильный процесс прокатки.

27. Расчет уставок средств регулирования плоскостности полос в каждой клетке стана (гидроизгиб, перекок рабочих валков и дифференцированная подача смазочно-охлаждающей жидкости), обеспечивающих получение заданной эпюры удельных натяжений $\bar{\sigma}_i(y)$ [20].

Расчет заканчивается.

Выводы. Алгоритм расчета приведенной методики основан на уравнениях из методик расчета режимов холодной прокатки, разработанных А.И. Целиковым, Стоуном, С.Л. Коцарем, на практике доказавших свою состоятельность и точность полученных результатов.

Преимущества представленной методики по сравнению с перечисленными аналогами:

– основным критерием выбора оптимального режима прокатки является удельный минимальный расход энергии;

– методика расчета учитывает комплекс конструктивных и технологических ограничений, обеспечивающий стабильность процесса прокатки и получение конечной продукции необходимого качества.

Предполагается, что использование данной методики для расчета режимов холодной прокатки вследствие указанных преимуществ позволит повысить эффективность производства за счет увеличения производительности стана, а также снизить суммарный удельный расход энергии и себестоимость производимой продукции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Божков А.И. Автоматизация управления качеством тонколистового проката: Учеб. пособие. – В 3-х книгах. Кн. 2: Автоматизация управления технологией прокатки полос. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2015. – 78 с.
2. Настич В.П., Божков А.И., Дегтев С.С. и др. Автоматизированная система анализа и выбора технологии холодной прокатки

на многоклетевом стане // Производство проката. 2011. № 2. С. 22 – 23.

3. Jelali M. Performance assessment of control systems in rolling mills-application to strip thickness and flatness control // Journal of Process Control. 2007. No. 17. P. 805 – 816.
4. Benporad A., Bernardini D., Cuzzola F.A. etc. Optimization-based automatic flatness control in cold tandem rolling // Journal of Process Control. 2010. No. 20. P. 396 – 407.
5. Василев Я.Д. Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки. – М.: Металлургия, 1995. – 368 с.
6. Божков А.И., Настич И.В., Чеглов А.Е., Епифанцев А.А. Принятие решений в многокритериальных задачах управления качеством тонколистового проката // Теория и практика производства проката: Сб. науч. тр. – Липецк: ЛГТУ, 2001. С. 377 – 393.
7. Wang D.C., Liu H.M. A model coupling method for shape prediction // Journal of Iron and Steel International. 2012. No. 19 (2). P. 22 – 27.
8. Takami K.M., Mahmoudi J., Dahlquist E. Adaptive control of cold rolling system in electrical strips production system with online-offline predictors // Springer International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2010. Vol. 50. No. 9. P. 917 – 930.
9. Ginzburg V.B. Flat-rolled steel processes: Advanced technologies. CRC Press, 2009. – 372 p.
10. Kawalek A. Teoria i technologia asymetrycznego procesu walcowania wyrobów płaskich // Seria: Monografie. No. 54. Częstochowa, 2016. – 224 p.
11. Целиков А.И., Гришков А.И. Теория прокатки. – М.: Металлургия, 1970. – 359 с.
12. Groover Mikell P. Fundamentals of Modern Manufacturing. John Wiley & Sons, Hoboken, 2007. – 1025 p.
13. Nameed Waleed I., Mohamad Khearia A. Strip thickness control of cold rolling mill with roll // Engineering. 2014. No. 6. P. 27 – 33.
14. Abdelkhalak S., Montmitonnet P., Legrand N. etc. Coupled approach for flatness prediction in cold rolling of thin strip // International Journal of Mechanical Science. 2011. Vol. 53. P. 661 – 675.
15. Божков А.И., Еремин Г.Н., Дегтев С.С., Ковалев Д.А. Научное обоснование и создание систем автоматизации управления качеством продукции листопрокатных цехов предприятий черной металлургии. Сообщение 12. Подсистема анализа технико-экономических показателей работы листопрокатного цеха // Производство проката. 2016. № 10. С. 39 – 43.
16. Грудев А.П. Теория прокатки. – М.: Металлургия, 1988. – 240 с.
17. Божков А.И., Настич В.П. Плоскостность тонколистового проката. – М.: Интермет инжиниринг, 1998. – 264 с.
18. Финкель В.М. Физика разрушения. Рост трещин в твердых телах. – М.: Металлургия, 1970. – 376 с.
19. Слепян Л.И., Троянкина Л.В. Теория трещин. Основные представления и результаты. – Л.: Судостроение, 1976. – 44 с.
20. Rumyantsev M.I. Some approaches to improve the resource efficiency of production of flat rolled steel // CIS Iron and Steel Review. 2016. No. 12. P. 32 – 36.

Поступила в редакцию 21 мая 2018 г.

После доработки 25 апреля 2019 г.

Принята к публикации 25 апреля 2019 г.

METHOD FOR CALCULATION THE MODES OF STRIPS COLD ROLLING ON MULTIPLE-STAND ROLLING MILL ENSURING COST REDUCTION OF SHEET ROLLING SHOP PRODUCTION. REPORT 1

A.I. Bozhkov¹, D.A. Kovalev², V.S. Potapov², R.I. Shul'gin²

¹Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

²JSC “Novolipetsk Metallurgical Plant”, Lipetsk, Russia

Abstract. A method for calculating the modes of strips cold rolling on multiple-stand (reversing) rolling mill is considered providing minimum power consumption with maximum process stabilization at high speeds and obtaining the given quality of cold-rolled strips (minimum probability of surface defects, compliance with thickness tolerances and flatness requirements of the used standards). The problem is solved using the conditional optimization method. As an optimization criterion, it is proposed to use the total energy expenditure spent on the rolling process, as conditions – technological and structural limitations on the rolling parameters and conditions of strips stability to breaks and surface defects formation. The decision to develop this innovative method is due to the fact that a large number of existing approaches to calculation and design of rolling modes have visible advantages and disadvantages. In many cases, the researchers are trying to take into account several requirements that ensure stability of rolling process, its quality, the equipment operating conditions, reduction of energy consumption, metal, auxiliary materials and the specified (maximum) mill productivity. However, some of these requirements can be contradictory and the best one will be the mode that with a high degree of probability guarantees the fulfillment, in a certain proportion, of the entire set of requirements. Therefore, such calculation method is the presented in this article. Calculation of the cold rolling regimes was limited to selection and distribution of the crimping along the cages (passages in the reversing mill). Also, the strip strains are selected in the intercellular spaces, on the decoiler and coiler, and in setting the speed wedge in a particular system of constraints imposed on the input and output process variables as a function of the adopted optimality criterion. As it was noted earlier, the problem was solved with the help of the conditional optimization method with specification of the optimization criterion.

Keywords: cold rolling, rolling mode, rolling energy, power consumption, rolling parameters, thickness, flatness, strip breaks, surface defects, regulation, stability, optimization, algorithm, method.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-7-511-516

REFERENCES

- Bozhkov A.I. *Avtomatizatsiya upravleniya kachestvom tonkolistovogo prokata: uchebn. posobie v 3-kh knigakh. Kn. 2: Avtomatizatsiya upravleniya tekhnologii prokatki polos* [Automation of quality management of sheet metal: Manuals in 3 books. Book 2: Automation of practice management of strips rolling]. Lipetsk: Lipetskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2015, 78 p. (In Russ.).
- Nastich V.P., Bozhkov A.I., Degtev S.S. etc. Automated system for analysis and selection of cold rolling technology on a multiple-stand mill. *Proizvodstvo prokata*. 2011, no. 2, pp. 22–23. (In Russ.).
- Jelali M. Performance assessment of control systems in rolling mills-application to strip thickness and flatness control. *Journal of Process Control*. 2007, no.17, pp. 805–816.
- Benporad A., Bernardini D., Cuzzola F.A. etc. Optimization-based automatic flatness control in cold tandem rolling. *Journal of Process Control*. 2010, no. 20, pp. 396–407.
- Vasilev Ya.D. *Inzhenernye modeli i algoritmy rascheta parametrov kholodnoi prokatki* [Engineering models and algorithms for calculating the parameters of cold rolling]. Moscow: Metallurgiya, 1995, 368 p. (In Russ.).
- Bozhkov A.I., Nastich I.V., Cheglov A.E., Epifantsev A.A. Decision-making in multicriteria quality control tasks for thin-sheet metal. In: *Teoriya i praktika proizvodstva prokata: sb.tr.* [Theory and practice of rolled metal production: Coll. of sci. papers]. Lipetsk, LGTU, 2001, pp. 377–393. (In Russ.).
- Wang D.C., Liu H.M. A model coupling method for shape prediction. *Journal of Iron and Steel International*. 2012, no. 19(2), pp. 22–27.
- Takami K.M., Mahmoudi J., Dahlquist E. Adaptive control of cold rolling system in electrical strips production system with online-off-line predictors. *Springer International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010, vol. 50, no. 9, pp. 917–930.
- Ginzburg V.B. *Flat-rolled steel processes: Advanced technologies*. CRC Press, 2009, 372 p.
- Kawalek A. *Teoria i technologia asymetrycznego procesu walcowania wyrobów płaskich*. Seria: Monografie, no. 54. Częstochowa, 2016, 224 p. (In Czech).
- Tselikov A.I., Grishkov A.I. *Teoriya prokatki* [Theory of rolling]. Moscow: Metallurgiya, 1970, 359 p. (In Russ.).
- Groover Mikell P. *Fundamentals of Modern Manufacturing*. John Wiley & Sons, Hoboken, 2007, 1025 p.
- Hameed Waleed I., Mohamad Khearia A. Strip thickness control of cold rolling mill with roll. *Engineering*. 2014, no. 6, pp. 27–33.
- Abdelkhalak S., Montmitonnet P., Legrand N. etc. Coupled approach for flatness prediction in cold rolling of thin strip. *International Journal of Mechanical Science*. 2011, vol. 53, pp. 661–675.
- Bozhkov A.I., Eremin G.N., Degtev S.S., Kovalev D.A. Scientific substantiation and creation of automation systems for quality management of sheet rolling plants of ferrous metallurgy enterprises. Message 12. Subsystem for analysis of technical and economic performance of sheet rolling plant. *Proizvodstvo prokata*. 2016, no. 10, pp. 39–43. (In Russ.).
- Grudev A.P. *Teoriya prokatki* [Theory of rolling]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 240 p. (In Russ.).
- Bozhkov A.I. *Ploskostnost' tonkolistovogo prokata* [Flatness of sheet metal]. Moscow: Internet inzhiniring, 1998, 264 p. (In Russ.).
- Finkel' V.M. *Fizika razrusheniya. Rost treshchin v tverdykh telakh* [Physics of destruction. Growth of cracks in solids]. Moscow: Metallurgiya, 1970, 376 p. (In Russ.).
- Slepyan L.I., Troyankina L.V. *Teoriya treshchin. Osnovnye predstavleniya i rezul'taty* [The theory of cracks. Basic concepts and results]. St. Petersburg: Sudostroenie, 1976, 44 p. (In Russ.).
- Rumyantsev M.I. Some approaches to improve the resource efficiency of production of flat rolled steel. *CIS Iron and Steel Review*. 2016, no.12, pp. 32–36.

Information about the authors:

A.I. Bozhkov, Cand. Sci. (Eng.), Professor of the Chair “Metal Forming” (bozhkov_51@mail.ru)

D.A. Kovalev, Head of the Department of Technology Development

V.S. Potapov, Engineer

R.I. Shul'gin, Sales Office Assistant

Received May 21, 2018

Revised April 25, 2019

Accepted April 25, 2019