

УДК 621.771.23

Настоящая С. С.  
Пушкаренко А. О.**АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ОБЖАТИЙ ПРИ ПРОКАТКЕ В НЕПРЕРЫВНОЙ ГРУППЕ ЧИСТОВЫХ РАБОЧИХ КЛЕТЕЙ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СТАНОВ**

Автоматизированное проектирование и совершенствование технологических режимов чистовых рабочих клеток является одним из важнейших факторов, обеспечивающих повышение технико-экономических показателей процесса промышленного производства на широкополосных станах горячей прокатки [1; 2]. Наряду с технологическими режимами обжатий полученные в этом случае результаты могут быть использованы в качестве исходных данных при реконструкции действующего и проектировании нового оборудования.

Многогранность требований, предъявляемых к технологическим режимам работы чистовых рабочих клеток широкополосных станов горячей прокатки, делает необходимым разработку систем их автоматизированного проектирования различного уровня композиционной сложности, при котором на первом уровне решаются задачи по обеспечению максимальной производительности, а на втором и последующих уровнях – по повышению конкурентоспособности готового металлопроката.

Целью работы является разработка программного обеспечения по автоматизированному проектированию технологических режимов обжатий первого уровня в чистовой группе рабочих клеток широкополосных станов, проведена на основе [3] инженерных и численных математических моделей и с учетом возможностей конкретного механического оборудования. Последнее, в частности, нашло свое отображение в системе принятых ограничений по допустимым значениям величины силы  $[P_j]$ , момента  $[M_j]$  и мощности  $[N_j]$  процесса горячей прокатки, а также величины угла захвата  $[\alpha_{3j}]$ :

$$P_j \leq [P_j]; M_j \leq [M_j]; N_j \leq [N_j]; \alpha_{3j} \leq [\alpha_{3j}], \quad (1)$$

где  $j$  – порядковый номер прохода, соответствующий порядковому номеру чистовой рабочей клетки широкополосного стана горячей прокатки.

В качестве критерия оптимальности проектируемого технологического режима обжатий было использовано условие максимально возможной загрузки механического оборудования всех чистовых рабочих клеток, соответствующее достижению максимума общей вытяжки

$\lambda_{\Sigma} = \prod_{j=1}^n h_{0j}/h_{1j}$  при известном значении конечной толщины  $[h_{1n}]$ :

$$\lambda_{\Sigma \max} = \lambda_{\Sigma} \left( \overrightarrow{h_{01}}, B, R_j, f_{cj}, \overrightarrow{T_{0j}}, \overrightarrow{T_{1j}}, \overrightarrow{t_j}, 2K_{cj}, \overrightarrow{V_{1j}}, \overrightarrow{h_{1j}}, [h_{1n}], n \right), \quad (2)$$

где  $n$  – общее количество чистовых рабочих клеток широкополосного стана горячей прокатки.

В соответствии с рекомендациями работ [2; 4; 5] программное обеспечение решения поставленной задачи (2) было выполнено на основе метода целенаправленного перебора вариантов с переменным шагом, аналитическое описание которого имеет вид:

$$\Delta h_{j(t+1)} = \Delta h_{jt} + A_{\Delta h} \text{sign} \{ [x_j] - x_{jt} \}, \quad (3)$$

где  $t$  – порядковый номер очередного цикла итерационной процедуры решения, при этом в качестве начальных условий было принято  $\Delta h_{jt}|_{t=1} = 0, 1h_{0j}$ ;

$A_{\Delta h}$  – шаг изменения величины абсолютного обжатия  $\Delta h_j$  в данной  $j$ -ой рабочей клетки, величина которого принята переменной в зависимости от степени приближения к искомому результату;

$[x_j]$  – заданные значения параметров, связанные с одним из принятых согласно (1)

ограничений;

$sign\{[x_j] - x_{jt}\}$  – функция знака, численно соответствующая:

$$sign\{[x_j] - x_{jt}\} = \begin{cases} 1 \text{ при } [x_j] > x_{jt}; \\ 0 \text{ при } [x_j] \approx x_{jt}; \\ -1 \text{ при } [x_j] < x_{jt}. \end{cases}$$

Учитывая логику функциональных связей между величиной абсолютного обжатия и энергосиловыми параметрами процесса горячей прокатки относительно тонких полос, решение оптимизационной задачи по условию обеспечения максимальной загрузки механического оборудования, можно представить в виде последовательных шаговых приращений величины абсолютного обжатия:

$$\Delta h_{j(t+1)} = \Delta h_{jt} + 0,1, (\text{мм}) \quad (4)$$

в случае одновременного выполнения всех условий (1).

В случае же невыполнения хотя бы одного из ограничений векторную направленность изменения величины абсолютного обжатия принимали противоположной при одновременной коррекции количественной оценки самого приращения

$$\Delta h_{j(t+1)} = \Delta h_{jt} - 0,01, (\text{мм}). \quad (5)$$

Исходя из известного заданного значения конечной толщины  $[h_{In}]$ , решения (4) и (5) использовали в качестве подпрограммы к дополнительному аналогичному (3) внешнему  $k$ -му циклу итерационной процедуры по определению исходной толщины подката  $h_{0I} = h_{0j}|_{j=1}$ , то есть толщины полосы на входе в чистовую группу рабочих клеток широкополосных станов горячей прокатки

$$h_{0(k+1)} = h_{0Ik} + A_{h_0} sign\{[h_{In}] - h_{Ink}\}, \quad (6)$$

где  $k$  – порядковый номер очередного цикла внешней итерационной процедуры решения, для которого для первого ( $k=1$ ) начального цикла было принято  $h_{0Ik}|_{k=1} = [h_{In}] \times 1,2^n$ .

В качестве условий связи при переходе от расчета ( $j-1$ ) к расчету  $j$ -ой чистовой рабочей клетки использовали очевидные геометрические, кинематические и силовые соотношения вида:

$$h_{0j} = h_{I(j-1)}; V_{0j} = V_{I(j-1)}; T_{0j} = T_{I(j-1)}. \quad (7)$$

По аналогии с рассмотренной выше была решена задача и по автоматизированному проектированию технологических режимов обжатий, исходя из условия обеспечения заданного значения силы прокатки  $[P_j]$  в каждой из рабочих клеток, определяемого упруго-деформированным состоянием и профилировкой рабочих и опорных валков, а также степенью их износа и неравномерностью температурных деформаций:

$$\Delta h_{j(t+1)} = \Delta h_{jt} + A_h sign\{[P_j] - P_{jt}\} \quad (8)$$

Решение (8), будучи дополненным внешним контуром  $k$ -ой итерационной процедуры (6) и расчетом требуемого значения силы прокатки  $[P_j]$  было положено в основу автоматизированного проектирования технологических режимов обжатий с использованием критерия обеспечения требуемой формы активной образующей рабочих валков и, как следствие, обеспечение требуемых показателей степени плоскостности получаемых горячекатаных полос.

Переходя к решению более сложных задач автоматизированного проектирования, какими, в частности, являются задачи по расчету распределений обжатий, обеспечивающих требуемые показатели точности результирующих геометрических характеристик горячекатаных полос необходимо отметить, что наиболее целесообразным в этом случае является использование метода случайного поиска. Применительно к непрерывной группе чистовых рабочих клеток, количество  $n$  которых задавалось, схема данного решения включает в себя определение с учетом исходной  $h_0$  и конечной  $h_{In}$  толщины общей вытяжки  $\lambda_{In} = h_0 / h_{In}$ , а также расчет опорных значений вытяжки в каждом из проходов  $\bar{\lambda}_j = \sqrt[n]{\lambda_{In}}$ . После этого назначали диапазон возможного изменения показателей вытяжки  $\delta\lambda_j = a_\lambda(\bar{\lambda}_j - 1)$  и с учетом генерируемых псевдослучайных равномерно распределенных в диапазоне от нуля до единицы чисел  $C_j$  разыгрывали показатели вытяжки во всех проходах за исключением последнего:

$$\lambda_j = \bar{\lambda}_j + \delta\lambda_j(c_j - 0,5), \quad (9)$$

где для последнего прохода  $\lambda_n = \lambda_{In} / \prod_{j=1}^{n-1} \lambda_j$ .

В случае  $\lambda_n \leq 1,0$  разыгранный вариант распределения обжатий отбрасывали и процедуру разыгрывания  $\lambda_j$  повторяли. В случае же  $\lambda_n > 1,0$  на основе математических моделей показателей качества производили расчет критериальных показателей продольной  $\delta h_{Int}$  и поперечной  $\delta P_{jt} / [P_j]$  разнотолщинности, повторяя данную процедуру разыгрывания  $\lambda_{jt}$  и последующего расчета  $\delta h_{Int}$ ,  $\delta P_{jt} / [P_j]$  заданное количество раз  $[t]$ . По мере накопления массива данных показателей производили автоматизированный выбор технологического режима, обеспечивающего минимальное значение обобщенного показателя продольной и поперечной разнотолщинности, представленного в виде:

$$Y_{hl} = \mu_{hl} \delta h_{Ij}|_{j=n} + \mu_{hIn} \delta P_{jt}|_{j=n} / [P_{jt}]|_{j=n}, \quad (10)$$

где  $\mu_{hl}$ ,  $\mu_{hIn}$  – весовые коэффициенты, характеризующие степень влияния показателей, соответственно, продольной и поперечной разнотолщинности получаемых горячекатаных полос.

В качестве лингвистического обеспечения программных средств по автоматизированному проектированию технологических режимов обжатия использовали алгоритмический язык программирования C++, а в качестве примера результатов численной реализации разработанных программных средств на рис. 1 представлены расчетные распределения абсолютных обжатий конечных толщин и сил прокатки, полученные, исходя из критериев  $P_j = [P_j] = const$ . Данные расчеты были выполнены применительно к чистовой группе рабочих клеток широкополосного стана 1700 ПАО МарМК им. Ильича. Анализ полученных в этом случае результатов показал, что установка дополнительной седьмой рабочей клетки при температурах конца прокатки не ниже  $t_k = 830-860$  °С позволит снизить конечную толщину получаемых горячекатаных полосы до 1,0–1,2 мм без изменения исходной толщины на входе в чистовую группу и без превышения допустимых значений силы прокатки. В случае же неравномерного износа валковых узлов и несоответствия сил прокатки  $[P_j] \neq const$  результаты могут быть откорректированы с учетом более детального учета упруго-деформированного состояния, износа и неравномерности температурных деформаций основных элементов валковых узлов соответствующих рабочих клеток.

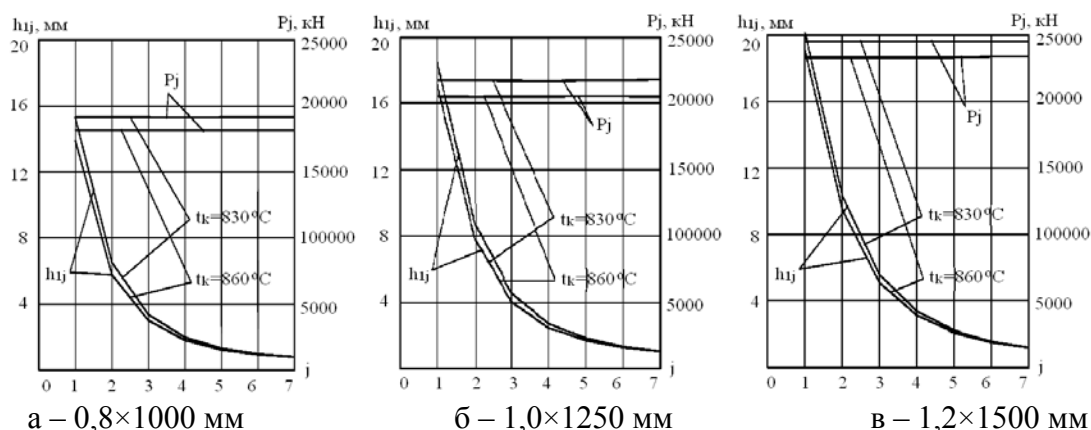


Рис. 1. Результаты автоматизированного проектирования технологических режимов обжатий при горячей прокатке полос различного типоразмера из стали 45 в непрерывной группе чистовых рабочих клеток ШСП 1700 ПАО МарМК им. Ильича

### ВЫВОДЫ

На основе результатов обобщенного анализа условий реализации процесса горячей прокатки в чистовых рабочих клетях широкополосных станов сформулированы рекомендации, направленные на повышение точности получаемого металлопроката. Показано, что использование систем автоматического регулирования толщины обуславливает повышение вероятности нарушения степени плоскостности, что, в свою очередь, может быть компенсировано за счет стабилизации исходных технологических параметров, а также за счет рационального размещения элементов данных систем, как минимум, в трех последних чистовых рабочих клетях.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коновалов Ю. В. *Справочник прокатчика. Справочное издание в 2-х книгах. Книга 1. Производство горячекатаных листов и полос* / Ю. В. Коновалов. – М. : Теплотехник, 2008. – 640 с.
2. Скороходов А. Н. *Оптимизация прокатного производства* / А. Н. Скороходов, П. И. Полухин, Б. М. Илюкович. – М. : Metallurgiya. – 1982. – 432 с.
3. Развитие инженерных методов расчета энергосиловых параметров процесса горячей симметричной прокатки относительно тонких полос / А. В. Сатонин, В. А. Переходченко, С. С. Настоящая, И. А. Матвеев // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 4 (29). – С. 57–63.*
4. Сатонин О. В. *Розвиток методів розрахунку, удосконалення технологічних режимів і конструктивних параметрів механічного устаткування листопрокатного виробництва : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.03.05* / Сатонін Олександр Володимирович. – Краматорськ, 2001. – 35 с.
5. Калиткин Н. Н. *Численные методы* / Н. Н. Калиткин. – М. : Наука, 1978. – 512 с.

### REFERENCES

1. Konvalov Yu. V. *Spravochnik prokatchika. Spravochnoe izdanie v 2-h knigah. Kniga 1. Proizvodstvo goryachekatanykh listov i polos* / Yu. V. Konvalov. – M. : Teplotehnik, 2008. – 640 s.
2. Skorohodov A. N. *Optimizatsiya prokatnogo proizvodstva* / A. N. Skorohodov, P. I. Poluhin, B. M. Ilyukovich. – M. : Metallurgiya. – 1982. – 432 s.
3. *Razvitie inzhenernykh metodov rascheta energosilovykh parametrov protsessy goryachey simmetrichnoy prokatki otnositelno tonkiy polos* / A. V. Satonin, V. A. Perehodchenko, S. S. Nastoyashchaya, I. A. Matveev // *Obrabotka materialov davleniem : sb. nauch. tr. – Kramatorsk : DGMA, 2011. – № 4 (29). – S. 57–63.*
4. Satonin O. V. *Rozvitok metodiv rozrahunku, udoskonalennya tehnolopchnih rezhimiv i konstruktivnih parametriv mehanichnogo ustatkuvannya listoprokatnogo virobnitstva : avtoref. dis. ... d-ra tehn. nauk : 05.03.05* / Satonin Oлександр Volodimirovich. – Kramatorsk, 2001. – 35 s.
5. Kalitkin N. N. *Chislennyye metody* / N. N. Kalitkin. – M. : Nauka, 1978. – 512 s.

Настоящая С. С. – канд. техн. наук, ассистент каф. АММ ДГМА

Пушкаренко А. О. – студент каф. АММ ДГМА

ДГМА – Донбасская государственная машиностроительная академия, г. Краматорск.

E-mail: [amm@dgma.donetsk.ua](mailto:amm@dgma.donetsk.ua)

Статья поступила в редакцию 28.08.2014 г.