

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 2

**Божков А.И.<sup>1</sup>**, к.т.н., профессор кафедры «Обработка металлов давлением» (bozhkov\_51@mail.ru)

**Ковалев Д.А.<sup>2</sup>**, начальник управления развития технологий

**Потапов В.С.<sup>2</sup>**, инженер

**Шульгин Р.И.<sup>2</sup>**, специалист отдела продаж

<sup>1</sup>Липецкий государственный технический университет

(398600, Россия, Липецк, ул. Московская, 30)

<sup>2</sup>ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат»

(398040, Россия, Липецк, пл. Металлургов, 2)

**Аннотация.** Представлены результаты практического использования методики расчета режимов прокатки применительно к четырехклетевому стану 1400 холодной прокатки. При прокатке выбранных типоразмеров ставилась задача определения конкретного режима прокатки, 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). Это достигалось включением вышеуказанных требований в систему ограничений применительно к определяемым режимам прокатки для выбранных типоразмеров полос. К примеру, 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. Полученные примеры, приведенные в статье, показали, что использование методики приводит к выполнению всех заданных требований, что, в свою очередь, обеспечивает снижение себестоимости продукции и повышение производительности стана. Расчет режимов холодной прокатки сводился к выбору и распределению обжатий по клетям (проходам – на реверсивном стане) и выбору удельных 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. Поставленная задача решалась с помощью метода условной оптимизации, через задание критерия оптимизации. В качестве критерия оптимизации использовался 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 валков («навары», «выкрошка» и др.), а также обрывов полосы.

**Ключевые слова:** стан 1400, эксперимент, проверка, себестоимость, продукция, холоднокатаная полоса, производительность, обжатие, натяжение, расход электроэнергии, скорость прокатки, режим прокатки.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-9-667-673

В первом сообщении приведено формализованное описание предлагаемой методики и алгоритм расчета оптимальных режимов прокатки на холодном стане. Адекватность предлагаемой методики рассмотрим на конкретном примере, выполненном в соответствии с алгоритмом решения задачи определения режима холодной прокатки полос заданного типоразмера на многоклетевом (реверсивном) стане [1, 2].

Пример расчета приведен для непрерывного четырехклетевого стана 1400 холодной прокатки. Расчетными профилями выбраны: типоразмер № 1 – 08Ю ( $h_0 = 2$  мм,  $h_k = 0,45$  мм,  $B = 1270$  мм), скорость прокатки принята равной 12,5 м/с; типоразмер № 2 – ЭИС 3 группы легирования ( $h_0 = 2,2$  мм,  $h_k = 0,5$  мм,  $B = 1000$  мм), скорость прокатки принята равной 11,5 м/с.

### Пример № 1 (типоразмер № 1)

1. Суммарное обжатие:

$$\varepsilon_{\Sigma} = \frac{h_0 - h_k}{h_0} \cdot 100 \% = \frac{2 - 0,45}{2} \cdot 100 \% = 77,5 \%$$

2. Диапазоны изменения относительных обжатий [3]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{1 \min} &= 25 \% ; \varepsilon_{1 \max} = 38 \% ; \varepsilon_{2 \min} = 34 \% ; \\ \varepsilon_{2 \max} &= 39 \% ; \varepsilon_{3 \min} = 27 \% ; \varepsilon_{3 \max} = 38 \% ; \\ \varepsilon_{4 \min} &= 16 \% ; \varepsilon_{4 \max} = 30 \% . \end{aligned}$$

3. Диапазоны изменения средних удельных натяжений по участкам [3]:

$$\begin{aligned} \sigma_{0 \min} &= 35 \text{ МПа}; \sigma_{0 \max} = 45 \text{ МПа}; \sigma_{1 \min} = 127,3 \text{ МПа}; \\ \sigma_{1 \max} &= 165,5 \text{ МПа}; \sigma_{2 \min} = 148,7 \text{ МПа}; \\ \sigma_{2 \max} &= 185,6 \text{ МПа}; \sigma_{3 \min} = 160 \text{ МПа}; \sigma_{3 \max} = 216 \text{ МПа}; \\ \sigma_{4 \min} &= 60 \text{ МПа}; \sigma_{4 \max} = 85 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

4. Число поддиапазонов  $n_i$  в диапазонах изменения относительных обжатий  $n_i = 10$  [4, 5].

5. Шаг  $\Delta_{\varepsilon_i}$  изменения относительного обжатия в  $i$ -й клетки стана 1400:

$$\begin{aligned} \Delta_{\varepsilon_1} &= 1,3; \Delta_{\varepsilon_1} = 13; \Delta_{\varepsilon_2} = 0,5; \Delta_{\varepsilon_2} = 5; \\ \Delta_{\varepsilon_3} &= 1,1; \Delta_{\varepsilon_3} = 11; \Delta_{\varepsilon_4} = 1,4; \Delta_{\varepsilon_4} = 14. \end{aligned}$$

6. Границы поддиапазонов изменения относительного обжатия  $\varepsilon_i$  для каждой клетки стана представлены в табл. 1.

7. Число поддиапазонов в диапазонах изменения средних удельных натяжений на  $i$ -м участке полосы, расположенном в промежутках и на моталке:  $m_i = 10$  [4, 5].

8. Шаг  $\Delta_{\sigma_j}$  изменения среднего удельного натяжения на  $j$ -м участке полосы:

$$\begin{aligned} \Delta_{\sigma_1} &= 1,0; \Delta_{\sigma_1} = 10; \Delta_{\sigma_2} = 3,82; \Delta_{\sigma_2} = 38,2; \\ \Delta_{\sigma_3} &= 3,69; \Delta_{\sigma_3} = 36,9; \Delta_{\sigma_4} = 5,6; \Delta_{\sigma_4} = 56; \\ \Delta_{\sigma_5} &= 2,5; \Delta_{\sigma_5} = 25. \end{aligned}$$

9. Границы поддиапазонов изменения средних удельных натяжений  $\sigma_j$  на  $j$ -м участке полосы, расположенном в промежутках и на моталке представлены в табл. 2.

10. Число возможных альтернативных вариантов сочетаний поддиапазонов относительных обжатий и средних удельных натяжений [6]:

$$W = \prod_{i=1}^I n_i \prod_{j=0}^J m_j = (10^4)(10^5) = 10\,077\,696.$$

11. Соответствие распределения относительных обжатий по клетям суммарному относительному обжатию [7, 8]:

$$\begin{aligned} (1 - 0,775) &= (1 - 0,350)(1 - 0,350)(1 - 0,335) \times \\ &\times (1 - 0,200)0,225 = 0,225. \end{aligned}$$

12. Исключение из общего числа возможных вариантов  $W$  вариантов  $W'$ , не соответствующих условию:

$$W^* = W - W' = 10\,077\,696 - 9\,859\,898 = 217\,798.$$

13. Задание скорости прокатки в соответствии с условием, где для стана 1400  $V_{\max} = 13,5$  м/с [9, 10]:

$$V_i = 13,5 \text{ м/с} = V_{\max} = 13,5 \text{ м/с}.$$

14. Скорость полосы на выходе  $i$ -й клетки:

$$\begin{aligned} V_1 &= 4,67 \text{ м/с}; V_2 = 6,68 \text{ м/с}; \\ V_3 &= 10,3 \text{ м/с}; V_4 = 13,5 \text{ м/с}. \end{aligned}$$

15. Расчет среднего по длине очага деформации давления прокатки  $P_{\text{ср}i}^*$  в каждой клетке стана для итогового принятого варианта режима прокатки [10, 11]:

Таблица 1

**Границы поддиапазонов изменения относительного обжатия**

Table 1. Boundaries of the sub-ranges of changes in percent reduction

| $i$ | $\varepsilon_{1i}, \%$ | $\varepsilon_{2i}, \%$ | $\varepsilon_{3i}, \%$ | $\varepsilon_{4i}, \%$ |
|-----|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| min | 25,0                   | 34,0                   | 27,0                   | 16,0                   |
| 1   | 26,3                   | 34,5                   | 28,1                   | 17,4                   |
| 2   | 27,6                   | 35,0                   | 29,2                   | 18,8                   |
| 3   | 28,9                   | 35,5                   | 30,3                   | 20,2                   |
| 4   | 30,2                   | 36,0                   | 31,4                   | 21,6                   |
| 5   | 31,5                   | 36,5                   | 32,5                   | 23,0                   |
| 6   | 32,8                   | 37,0                   | 33,6                   | 24,4                   |
| 7   | 34,1                   | 37,5                   | 34,7                   | 25,8                   |
| 8   | 35,4                   | 38,0                   | 35,8                   | 27,2                   |
| 9   | 36,7                   | 38,5                   | 36,9                   | 28,6                   |
| max | 38,0                   | 39,0                   | 38,0                   | 30,0                   |

Таблица 2

**Границы поддиапазонов изменения средних удельных натяжений**

Table 2. Boundaries of the sub-ranges of changes in mean specific tensions

| $i$ | $\sigma_{1i}, \text{ МПа}$ | $\sigma_{2i}, \text{ МПа}$ | $\sigma_{3i}, \text{ МПа}$ | $\sigma_{4i}, \text{ МПа}$ | $\sigma_{5i}, \text{ МПа}$ |
|-----|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| min | 35                         | 127,30                     | 148,70                     | 160,0                      | 60,0                       |
| 1   | 36                         | 131,12                     | 152,39                     | 165,6                      | 62,5                       |
| 2   | 37                         | 134,94                     | 156,08                     | 171,2                      | 65,0                       |
| 3   | 38                         | 138,76                     | 159,77                     | 176,8                      | 67,5                       |
| 4   | 39                         | 142,58                     | 163,46                     | 182,4                      | 70,0                       |
| 5   | 40                         | 146,40                     | 167,15                     | 188,0                      | 72,5                       |
| 6   | 41                         | 150,22                     | 170,84                     | 193,6                      | 75,0                       |
| 7   | 42                         | 154,04                     | 174,53                     | 199,2                      | 77,5                       |
| 8   | 43                         | 157,86                     | 178,22                     | 204,8                      | 80,0                       |
| 9   | 44                         | 161,68                     | 181,91                     | 210,4                      | 82,5                       |
| max | 45                         | 165,50                     | 185,60                     | 216,0                      | 85,0                       |

$$P_{cp1}^* = 421,76 \text{ МПа}; P_{cp2}^* = 625,8 \text{ МПа};$$

$$P_{cp3}^* = 658,6 \text{ МПа}; P_{cp4}^* = 665 \text{ МПа}.$$

16. Рассчитанные энергосиловые параметры прокатки  $P_i^*$ ,  $M_i^*$ ,  $N_i^*$  приведены в табл. 3.

По результатам проверки данных табл. 3 отметим, что полученные результаты не превышают заданных условиями допустимых значений, определяемых технологическими возможностями агрегата [10, 11].

17. Из массива рассчитанных значений  $P_{срi}^*$  исключены значения, не удовлетворяющие заданным условиям: – ограничение по мощности прокатки

$$N_i \leq N_{доп},$$

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

– ограничение по максимальному усилию прокатки

$$P_i \leq P_{доп},$$

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

– ограничение по максимальному моменту прокатки

$$M_i \leq M_{доп},$$

где  $M_i$  – момент прокатки в  $i$ -й клетки, кН·м;  $M_{доп}$  – максимально допустимое значение момента прокатки, кН·м.

18. Объем металла  $Q_i$  для данного типоразмера составил:

$$Q_1 = h_1 B l_1 = 1,3 \cdot 1,27 \cdot 1,97 = 3,25 \text{ м}^3;$$

$$Q_2 = h_2 B l_2 = 0,91 \cdot 1,27 \cdot 2,81 = 3,25 \text{ м}^3;$$

$$Q_3 = h_3 B l_3 = 0,59 \cdot 1,27 \cdot 4,33 = 3,25 \text{ м}^3;$$

$$Q_4 = h_4 B l_4 = 0,45 \cdot 1,27 \cdot 5,68 = 3,25 \text{ м}^3.$$

Таблица 3

**Рассчитанные энергосиловые параметры прокатки**

Table 3. Calculated energy-power parameters of rolling

| $i$ | $P_i$ , МН | $P_{доп i}$ , МН | $M_{дв i}$ , кН·м | $M_{доп i}$ , кН·м | $N_{дв i}$ , кВт | $N_{доп i}$ , кВт |
|-----|------------|------------------|-------------------|--------------------|------------------|-------------------|
| 1   | 7,6        | 25               | 23,7              | 136,7              | 861,9            | 4978              |
| 2   | 8,1        | 25               | 40,9              | 93,4               | 2178,5           | 4978              |
| 3   | 8,7        | 25               | 48,8              | 83,9               | 2899,5           | 4978              |
| 4   | 6,2        | 25               | 51,7              | 80,9               | 3178,9           | 4978              |

Примечание:  $i$  – номер клетки;  $P_{доп}$ ,  $M_{доп}$ ,  $N_{доп}$  – допустимые значения энергосиловых параметров прокатки.

19. Расчет  $\ln\left(\frac{1}{1-\varepsilon_i}\right)$  для каждой клетки стана [12]:

$$\text{клеть № 1: } \ln\left(\frac{1}{1-0,35}\right) = 0,43;$$

$$\text{клеть № 2: } \ln\left(\frac{1}{1-0,3}\right) = 0,36;$$

$$\text{клеть № 3: } \ln\left(\frac{1}{1-0,35}\right) = 0,43;$$

$$\text{клеть № 4: } \ln\left(\frac{1}{1-0,2}\right) = 0,23.$$

20. Произведен расчет суммарного расхода энергии  $A_{\Sigma}^{**}$  для каждого реализуемого варианта, проведено сравнение рассчитанных величин и выбран режим прокатки, соответствующий минимальному расходу энергии. Результаты приведены в табл. 4.

21. Расчет эпюр удельных натяжений в каждом межклетевом промежутке для выбранного режима прокатки [13, 14]. Четвертая клетка оснащена системой автоматического регулирования плоскостности, работающей в автономном режиме, поэтому эпюру на выходе получают в зависимости от заданной в системе. Расчет произведен при установленных станочных профилировках рабочих валков и при усиллии гидроизгиба, равном 0.

$$C_{21} = 55,7 \text{ МПа}; C_{22} = 60,7 \text{ МПа}; C_{23} = 69,7 \text{ МПа},$$

где  $C_2$  – коэффициент параболической аппроксимации эпюры удельных натяжений с помощью второго полинома Лежандра [13, 14].

22. Задаем эпюру удельных натяжений, обеспечивающую стабильный процесс прокатки [13, 14].

$$C_{21} = 50 \text{ МПа}; C_{22} = -30 \text{ МПа}; C_{23} = -20 \text{ МПа}.$$

Таблица 4

**Общие результаты расчета суммарного расхода энергии**

Table 4. Overall results of the calculation of total energy consumption

| $i$ | $h_i$ , мм | $\varepsilon_i$ , % | $\sigma_i$ , МПа | $V_i$ , м/с | $B$ , мм | $\varepsilon_{сум}$ , % | $A_{\Sigma min}$ , МДж |
|-----|------------|---------------------|------------------|-------------|----------|-------------------------|------------------------|
| 0   | 2,00       | –                   | 39               | –           | 1270     | 77,5                    | 110,46                 |
| 1   | 1,30       | 35,0                | 164              | 4,67        |          |                         |                        |
| 2   | 0,91       | 33,5                | 184              | 6,68        |          |                         |                        |
| 3   | 0,59       | 35,0                | 216              | 10,3        |          |                         |                        |
| 4   | 0,45       | 20,0                | 84               | 13,5        |          |                         |                        |

За первой клетью увеличиваем удельное натяжение на кромках полос для обеспечения устойчивости полосы по линии прокатного стана (уменьшение вероятности поперечного смещения). Во втором и третьем промежутке стана удельные натяжения на кромках уменьшаем, тем самым снижаем вероятность обрывов полос из-за возможных концентраторов напряжений на кромках [13, 14].

23. Для получения заданных эпюр рассчитываем необходимое усилие гидроизгиба рабочих валков [13, 14]. Они соответственно равны

$$F_{r1} = 4 \% ; F_{r2} = 40 \% ; F_{r3} = 40 \% ,$$

где  $F_r$  – гидроизгиб рабочих валков, % от максимально допустимого значения (–100 % – максимально допустимый противоизгиб; +100 % – максимально допустимый дополнительный изгиб).

Таблица 5

**Общие результаты расчета суммарного расхода энергии**

Table 5. Overall results of the calculation of total energy consumption

| $i$ | $h_i$ , мм | $\varepsilon_i$ , % | $\sigma_i$ , МПа | $V_i$ , м/с | $B$ , мм | $\varepsilon_{\text{сум}}$ , % | $A_{\text{сум}}$ , МДж |
|-----|------------|---------------------|------------------|-------------|----------|--------------------------------|------------------------|
| 0   | 2,20       | –                   | 43               | –           | 1000     | 77,3                           | 193,3                  |
| 1   | 1,45       | 34                  | 189              | 4,7         |          |                                |                        |
| 2   | 0,97       | 33                  | 206              | 7,0         |          |                                |                        |
| 3   | 0,65       | 33                  | 226              | 10,4        |          |                                |                        |
| 4   | 0,50       | 23                  | 94               | 13,5        |          |                                |                        |

Таблица 6

**Режимы обжатий на стане 1400 для типоразмера № 1**

Table 6. Crimping modes on the mill 1400 for typical size no. 1

| Показатель                | Номер клетки |       |       |       |
|---------------------------|--------------|-------|-------|-------|
|                           | 1            | 2     | 3     | 4     |
| Относительное обжатие, %: |              |       |       |       |
| режим 1                   | 33,60        | 32,30 | 33,00 | 18,54 |
| режим 2                   | 35,00        | 33,50 | 35,00 | 20,00 |
| $\delta$ , %              | 4            | 4     | 6     | 8     |

Примечание: режим 1 – режим, выбранный из базы данных системы слежений за металлом (ССМ) для данного типоразмера при измеренном минимальном суммарном расходе электроэнергии; режим 2 – режим, рассчитанный по предлагаемой методике;  $\delta$  – относительная погрешность значений режима 1 относительно режима 2 по клетям, %.

**Пример № 2 (типоразмер № 2)**

Все расчеты произведены по алгоритму, аналогичному алгоритму, использованному для расчета примера № 1. Результаты расчета приведены в табл. 5.

В табл. 6 – 9 и на рис. 1 – 4 представлены относительные обжатия по клетям и удельные натяжения по участкам стана 1400, полученные в результате расчета по аналитической методике для выбранных типоразмеров и замеренные значения из базы данных измерений режимов прокатки при фиксированном минимальном суммарном расходе электроэнергии.

Фактический расход электроэнергии ( $R_{\text{эл}}$ , кВт·ч/т) регистрировали с помощью приборов учета, установленных в каждой клетке стана 1400 [15].

Приведенные примеры подтвердили эффективность предлагаемой методики расчета режимов холодной прокатки. При реализации предлагаемого способа снижение суммарного удельного расхода электроэнергии

Таблица 7

**Рассчитанный режим натяжений на стане 1400 для типоразмера № 1**

Table 7. Calculated tension mode on the mill 1400 for typical size no. 1

| Показатель              | Участок       |         |         |         |         |
|-------------------------|---------------|---------|---------|---------|---------|
|                         | разматыватель | (1 – 2) | (2 – 3) | (3 – 4) | моталка |
| Удельное натяжение, МПа |               |         |         |         |         |
| режим 1                 | 40,0          | 153,7   | 181,3   | 216,0   | 81,3    |
| режим 2                 | 39,0          | 164,0   | 184,0   | 216,0   | 84,0    |
| $\delta$ , %            | 3             | 7       | 1       | 0       | 3       |

Примечание:  $\delta$  – относительная погрешность значений режима 1 относительно режима 2 по участкам, %.

Таблица 8

**Режимы обжатий на стане 1400 для типоразмера № 2**

Table 8. Crimping modes on mill 1400 for typical size no. 2

| Показатель                | Номер клетки |      |      |      |
|---------------------------|--------------|------|------|------|
|                           | 1            | 2    | 3    | 4    |
| Относительное обжатие, %: |              |      |      |      |
| режим 1                   | 32,2         | 33,0 | 32,4 | 23,9 |
| режим 2                   | 34,0         | 33,0 | 33,0 | 23,0 |
| $\delta$ , %              | 6            | 0    | 2    | 4    |

Примечание:  $\delta$  – относительная погрешность значений режима 1 относительно режима 2 по клетям, %.

Таблица 9

**Рассчитанный режим натяжений на стане 1400 для типоразмера № 2**

*Table 9. Calculated tension mode on the mill 1400 for typical size no. 2*

| Показатель                         | Участок       |         |         |         |         |
|------------------------------------|---------------|---------|---------|---------|---------|
|                                    | разматыватель | (1 – 2) | (2 – 3) | (3 – 4) | моталка |
| Удельное натяжение, МПа<br>режим 1 | 42,8          | 180,6   | 193,9   | 220,6   | 95,3    |
| режим 2                            | 43,0          | 189,0   | 206,0   | 226,0   | 94,0    |
| δ, %                               | 0             | 5       | 6       | 2       | 1       |

Примечание: δ – относительная погрешность значений режима 1 относительно режима 2 по участкам, %.

для выбранных типоразмеров, по сравнению со средним суммарным удельным расходом электроэнергии, составило порядка 14 % (для типоразмера № 1) и 21 % (для типоразмера № 2). Повышение скорости, по сравнению со средней скоростью для выбранных типораз-

меров полос, составило порядка 15 % (для типоразмера № 1) и 18 % (для типоразмера № 3). Результаты для выбранных типоразмеров получены посредством сравнения рассчитанных по предложенной аналитической методике режимов с аналогичными режимами из базы данных измерений ССМ [16]. Доля влияния непрерывного четырехклетевого стана 1400 на формирование себестоимости единицы (тонны) *i*-го вида продукции можно рассчитать по следующей формуле

$$C_{ij} = C_i^{\text{пер}} \left[ C_i^{\text{эн}} \sum_{k=1}^K (C_j^k C_{ij}^k) + C_i^{\text{вс.м}} C_{ij}^{\text{вс.м}} + C_i^{\text{от.м}} C_{ij}^{\text{от.м}} \right] C_i, \quad (18)$$

где  $C_i$  – общая себестоимость заданной единицы *i*-го вида продукции (калькуляция),  $i = 1 \dots I$  – количество видов продукции цеха;  $C_{ij}$  – доля (весовой коэффициент) в калькуляции *i*-го вида продукции *j*-го технологического агрегата цеха,  $j = 1 \dots J$  – количество агрегатов цеха;  $C_i^{\text{пер}}$  – весовой коэффициент технологического передела (листопрокатного цеха),  $C_i^{\text{пер}} = 0,3$  [17];  $C_i^{\text{эн}}$  – весовой коэффициент энергозатрат в калькуляции,  $C_i^{\text{эн}} \approx 0,28$  [17];  $C_j^k$  – весовой коэффициент отдельного вида энергозатрат,  $k = 1 \dots K$  – количество выбранных для анализа видов энергозатрат [17];  $C_{ij}^k$  – весовой коэффициент доли *j*-го агрегата в формировании *k*-го вида

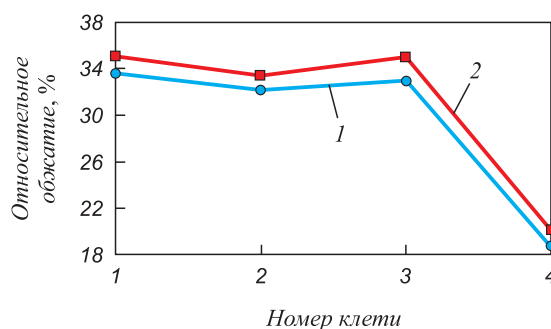


Рис. 1. Режимы обжатий на стане 1400 для типоразмера № 1: 1 – режим 1; 2 – режим 2

Fig. 1. Crimping modes on the mill 1400 for typical size no. 1: 1 – mode 1; 2 – mode 2

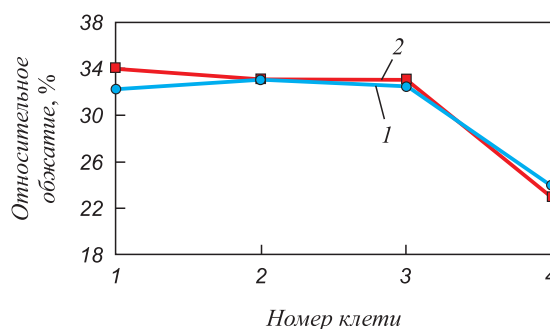


Рис. 3. Режимы обжатий на стане 1400 для типоразмера № 2: 1 – режим 1; 2 – режим 2

Fig. 3. Crimping modes on mill 1400 for typical size no. 2: 1 – mode 1; 2 – mode 2

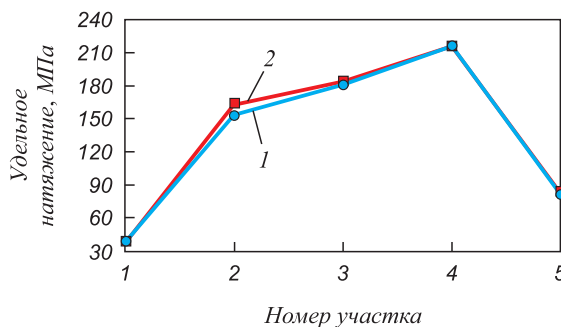


Рис. 2. Режимы натяжений на стане 1400 для типоразмера № 1: 1 – режим 1; 2 – режим 2

Fig. 2. Tension modes on the mill 1400 for typical size no. 1: 1 – mode 1; 2 – mode 2

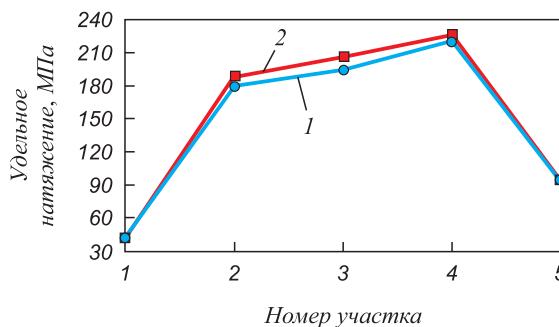


Рис. 4. Режимы натяжений на стане 1400 для типоразмера № 2: 1 – режим 1; 2 – режим 2

Fig. 4. Tension modes on the mill 1400 for typical size no. 2: 1 – mode 1; 2 – mode 2



энергозатрат в калькуляции  $i$ -го вида продукции;  $C_i^{bc.m}$  – весовой коэффициент статьи расходов вспомогательных материалов в формировании калькуляции  $i$ -го вида продукции;  $C_{ij}^{bc.m}$  – весовой коэффициент влияния  $j$ -го агрегата на формирование статьи расходов вспомогательных материалов калькуляции  $i$ -го вида продукции;  $C_i^{ot.m}$  – весовой коэффициент статьи отходы металла калькуляции  $i$ -го вида продукции;  $C_{ij}^{ot.m}$  – весовой коэффициент влияния  $j$ -го технологического агрегата на формирование статьи отходы металла калькуляции  $i$ -го вида продукции листопркатного цеха [18 – 20].

Доля влияния стана 1400 на формирование себестоимости единицы  $i$ -го вида продукции (в качестве вида энергозатрат выбрана статья расхода электроэнергии) составила:

$$C_{i4} = 0,3 \cdot [0,28 \cdot (0,66 \cdot 0,202)] = 0,0112.$$

В результате выявлено снижение себестоимости продукции примерно на 0,16 % на тонну (для типоразмера № 1) и примерно на 0,24 % на тонну (для типоразмера № 2).

**Выводы.** Экспериментальная проверка методики показала ее эффективность и возможность использования на станах холодной прокатки. При этом обеспечивается снижение себестоимости продукции и повышение производительности стана.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
2. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1988. – 239 с.
3. 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.
4. Божков А.И., Настич И.В., Чеглов А.Е., Елифанцев 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.
5. Василев Я.Д. Инженерные модели и алгоритмы расчета параметров холодной прокатки. – М.: Металлургия, 1995. – 368 с.
6. Поудиновский В. В. Потенциальная оптимальность в многокритериальной оптимизации // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2014. Т. 54. № 3. С. 415 – 424.
7. Гарбер Э.А., Кожевникова И.А. Теория прокатки: Учебник для студентов вузов. – Череповец: ЧГУ; М.: Теплотехник, 2013. – 305 с.
8. Ehrgott M., Gandibleux X. Approximative solution methods for multiobjective combinatorial optimization // Top. 2004. Vol. 12. No. 1. P. 1 – 89.
9. Грудев А.П. Теория прокатки. – М.: Металлургия, 1988. – 240 с.
10. Коновалов Ю.В. Справочник прокатчика. Книга 2: Производство холоднокатаных листов и полос. – М.: Теплотехника, 2010. – 608 с.
11. Waleed I. Hameed, Khearia A. Mohamad. Strip thickness control of cold rolling mill with roll // Engineering. 2014. No. 6. P. 27 – 33.
12. Ginzburg V.B. Flat-rolled steel processes: Advanced technologies. – Boca Raton: CRC Press, 2009. – 372 p.
13. Божков А.И., Настич И.В. Плоскостность тонколистового проката. – М.: Интерметинжиниринг, 1998. – 264 с.
14. Abdelkhalik S., Montmitonnet P., Legrand N. etc. Coupled approach for flatness prediction in cold rolling of thin strip // International Journal of Mechanical Science. 2011. No. 53. P. 661 – 675.
15. 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.
16. Groover Mikell P. Fundamental of Modern Manufacturing. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2007. – 1025 p.
17. Божков А.И., Еремин Г.Н., Дегтев С.С., Ковалев Д.А. Научное обоснование и создание систем автоматизации управления качеством продукции листопркатных цехов предприятий черной металлургии. Сообщение 12. Подсистема анализа технико-экономических показателей работы листопркатного цеха // Производство проката. 2016. № 10. С. 39 – 43.
18. 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.
19. Gad J. Analiza i ocena sytuacji finansowej przedsiębiorstwa // Ekonomia finanse prawo gospodarcze. Podręcznik dla sędziów i prokuratorów. – Łódź – Lublin: Uniwersytet Łódzki Wydział Zarządzania, 2015. P. 69 – 77.
20. Zakrzewska-Bielawska A. The strategic dilemmas of innovative enterprises: proposals for high-technology sectors // R&D Management. 2012. Vol. 42. No. 5. P. 514 – 514.

Поступила в редакцию 21 мая 2018 г.  
После доработки 19 мая 2019 г.  
Принята к публикации 28 июля 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 2. AN EXAMPLE OF THE METHOD PRACTICAL USE ON FOUR-STAND ROLLING MILL 1400

*A.I. Bozhkov<sup>1</sup>, D.A. Kovalev<sup>2</sup>, V.S. Potapov<sup>2</sup>, R.I. Shul'gin<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

<sup>2</sup>JSC “Novolipetsk Metallurgical Plant”, Lipetsk, Russia

**Abstract.** The second part of the paper describes the method practical use on four-stand rolling mill 1400. When rolling the chosen typical sizes, the task was to determine the specific rolling mode, which will ensure

a minimum of the total specific energy consumption at the maximum rolling speed, maximum process stabilization (minimum breaks, idle times, etc.) and obtaining the specified quality of the rolled strips (no surface defects, meeting the thickness and flatness requirements). It was achieved by including the above requirements in the constraint system with respect to the determined rolling modes for the selected strip sizes. For example, ensuring a given (maximum) performance for a specific size and brand of a strip is equivalent to realizing a gi-

ven (increased) rolling speed in the absence of unscheduled downtime occurring in emergency situations (in particular, in strip breaks). The speed limit depends on the power of engines, which is included in the complex of structural and technological limitations. The obtained examples, given in the article, have shown that the use of the method leads to fulfillment of all the specified requirements, which, in turn, ensures a reduction in production cost and an increase in the mill's productivity. The calculation of the cold rolling modes was reduced to selection and distribution of the crimping along the stands (passages – in the reversible mill) and to a choice of specific strip tension in the interstand spaces, on decoiler and coiler, and in setting the wedge of speeds in a particular system of constraints imposed on the input and output process variables as a function of the adopted optimality criterion. The task was solved using the conditional optimization method, through the specification of the optimization criterion. As such criterion, the total energy consumption of the rolling process was used, as requirements – technological and design constraints on the rolling parameters and conditions for strip stability to breaks and to formation of rolls surface defects (“brews”, “chippings”, etc.), as well as to strip breaks.

**Keywords:** mill 1400, experiment, check, cost, production, cold-rolled strip, productivity, reduction, tension, electricity consumption, rolling speed, rolling mode.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2019-9-667-673

#### REFERENCES

1. Spiridonov A.A. *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh protsessov* [Planning an experiment at research of technological processes]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1981, 184 p. (In Russ.).
2. L'vovskii E.N. *Statisticheskie metody postroyeniya empiricheskikh formul: Ucheb. posobie dlya vtuzov* [Statistical methods for constructing empirical formulas]. Moscow: Vyssh. shk., 1988, pp. 23–25. (In Russ.).
3. 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.
4. 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.).
5. 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.).
6. Podinovskii V.V. Potential optimality in multicriteria optimization. *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki*. 2014, vol. 54, no. 3, pp. 415–424. (In Russ.).
7. Garber E.A., Kozhevnikova I.A. *Teoriya prokatki: Ucheb. dlya studentov vuzov* [Theory of rolling: Textbook for universities]. Cherepovets: ChGU; Moscow: Teplotekhnika, 2013, 305 p. (In Russ.).
8. Ehrgott M., Gandibleux X. Approximative solution methods for multiobjective combinatorial optimization. *Top*. 2004, vol. 12, no. 1, pp. 1–89.
9. Grudev A.P. *Teoriya prokatki* [Theory of rolling]. Moscow: Metallurgiya, 1988, 240 p. (In Russ.).
10. Kononov Yu.V. *Spravochnik prokatchika. Kniga 2: Proizvodstvo kholodnokatanykh listov i polos* [Handbook of roller. Book 2: Production of cold-rolled sheets and strips]. Moscow: Teplotekhnika, 2010, 608 p. (In Russ.).
11. Waleed I. Hameed, Khearia A. Mohamad. Strip thickness control of cold rolling mill with roll. *Engineering*. 2014, no. 6, pp. 27–33.
12. Ginzburg V.B. *Flat-rolled steel processes: Advanced technologies*. Boca Raton: CRC Press, 2009, 372 p.
13. Bozhkov A.I., Nastich I.V. *Ploskostnost' tonkolistovogo prokata* [Flatness of sheet metal]. Moscow: Intermet inzhiniring, 1998, 264 p. (In Russ.).
14. Abdelkhalek S., Montmitonnet P., Legrand N. etc. Coupled approach for flatness prediction in cold rolling of thin strip. *International Journal of Mechanical Science*. 2011, no. 53, pp. 661–675.
15. 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, pp. 917–930.
16. Groover Mikell P. *Fundamental of Modern Manufacturing*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007, 1025 p.
17. 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.).
18. 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.
19. Gad J. Analiza i ocena sytuacji finansowej przedsiębiorstwa. In: *Ekonomia finansie prawo gospodarce. Podręcznik dla sędziów i prokuratorów*. Łódź – Lublin: Uniwersytet Łódzki Wydział Zarządzania, 2015, pp. 69–77. (In Polish).
20. Zakrzewska-Bielawska A. The strategic dilemmas of innovative enterprises: proposals for high-technology sectors. *R&D Management*. 2012, vol. 42, no. 5, pp. 514–514.

#### 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 May 19, 2019

Accepted July 28, 2019