

УДК 621.771.01

Максименко О. П.  
Романюк Р. Я.**РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ НАТЯЖЕНИЙ  
НА ЖЕСТИКАТАЛЬНЫХ СТАНАХ КОМБИНАТА «ЗАПОРОЖСТАЛЬ»**

Как известно из литературы [1], при холодной прокатке на непрерывных станах рекомендуется, в зависимости от характеристик полосы и качества подрезанных кромок, применять удельные натяжения между клетями, которые составляют 0,15–0,5 от напряжения текучести прокатываемого металла. При этом очевидно, что с увеличением заднего натяжения полосы устойчивость процесса снизится.

Для теоретической оценки продольной устойчивости процесса прокатки в теории используется величина угла нейтрального сечения или опережения [2], и при равенстве их нулю наступают предельные условия прокатки. Вместе с тем, как свидетельствуют экспериментальные данные, потеря равновесия металла в валках с последующей пробуксовкой может наступать при наличии опережения [3] и, наоборот, возможны случаи устойчивой деформации при однозонном скольжении металла в валках [3–5].

В работах [6, 7] предложен новый метод, который позволяет более достоверно определить устойчивость процесса прокатки. С помощью него теоретически подтверждены и обоснованы результаты опытов, полученные в вышеуказанных работах.

Целью настоящей работы является теоретический анализ влияния натяжения на устойчивость процесса прокатки и энергосиловые параметры деформации.

Для теоретического расчета энергосиловых параметров используем методику, приведенную в работах [8]. По полученным данным, строим теоретические эпюры распределения контактных напряжений при заданных параметрах прокатки. Для этого используем дифференциальное уравнение равновесия Т. Кармана. В качестве модели распределения напряжений трения используем выражение, приведенное в [7], которое позволяет плавно перейти от максимальных значений напряжений трения к минимальным.

Полученные эпюры распределения нормальных контактных напряжений и напряжений трения удовлетворяют условиям:

1. Среднее нормальное контактное напряжений, определяемое из эпюр, приблизительно равняется  $p_{cp}$ , которое рассчитано по вышеупомянутой методике.

2. Средний коэффициент трения, определяемый из эпюр  $f_y = \frac{t_{cp}}{p_{cp}}$ , равен коэффициенту трения в очаге деформации, определенный по эмпирическим формулам. В частности, коэффициент трения в контактной зоне рассчитываем по формуле А. П. Грудева [2].

По данным эпюрам оцениваем продольную устойчивость процесса прокатки по методике, приведенной в [6, 7].

Исследование проведем для непрерывных жестикатальных станов № 1 и № 2 комбината «Запорожсталь» при производстве жести № 20 и № 22 из стали 08кп. Краткая техническая характеристика клетей станов № 1 и № 2 комбината «Запорожсталь» приведена в табл. 1. Сначала теоретически проанализируем влияние переднего и заднего натяжений на энергосиловые параметры и устойчивость процесса при прокатке жести  $0,2 \times 350$  мм на непрерывном стане № 1 по существующему режиму обжатий. В табл. 2–4 приведены результаты расчета энергосиловых параметров для различных вариантов натяжений полосы между клетями. Натяжения на моталке и разматывателе остаются без изменения. Начальную границу текучести (после отжига) раската принимаем  $\sigma_{T0} = 260$  МПа.

Таблица 1

Краткая техническая характеристика клетей станов № 1 и № 2 комбината «Запорожсталь»

| Параметр  | Стан № 1           | Стан № 2           |
|---|--------------------|--------------------|
| Диаметры валков, мм:<br>рабочий<br>опорный            | 200–210<br>480–520 | 238–250<br>565–605 |
| Скорость прокатки, м/с                                | 5                  | 4,3                |
| Шероховатость поверхности бочки рабочих валков, класс | 7–8                | 7–8                |
| Ширина прокатываемых полос, мм                        | 310–360            | 450–530            |

Таблица 2

Результаты теоретических расчетов энергосиловых параметров и силы  $Q_{cp}$   
при производстве жести  $0,2 \times 350$  мм ( $q_1 = 0,2\beta\sigma_{Tcp}$ )

| № клетки | $h_0$ , мм | $h_1$ , мм | $q_0$ , МПа | $q_1$ , МПа | $f_{cp}$ | $\beta\sigma_T$ , МПа | $P$ , МН | $M_{np}$ , кН·м | $V$ , м/с | $Q_{cp}$ , кН |
|----------|------------|------------|-------------|-------------|----------|-----------------------|----------|-----------------|-----------|---------------|
| 1        | 0,7        | 0,45       | 10          | 125         | 0,071    | 698,4                 | 1,53     | 4,28            | 2,2       | 15,4          |
| 2        | 0,45       | 0,3        | 125         | 155         | 0,065    | 797,3                 | 1,57     | 5,63            | 3,3       | 9,7           |
| 3        | 0,3        | 0,23       | 155         | 165         | 0,057    | 837                   | 1,26     | 3,26            | 4,3       | 7,2           |
| 4        | 0,23       | 0,2        | 165         | 15          | 0,05     | 853,1                 | 1,05     | 4,67            | 5         | 6,7           |
| $\Sigma$ |            |            |             |             |          |                       |          | 17,84           |           |               |

Таблица 3

Результаты теоретических расчетов энергосиловых параметров и силы  $Q_{cp}$   
при производстве жести  $0,2 \times 350$  мм ( $q_1 = 0,3\beta\sigma_{Tcp}$ )

| № клетки | $h_0$ , мм | $h_1$ , мм | $q_0$ , МПа | $q_1$ , МПа | $f_{cp}$ | $\beta\sigma_T$ , МПа | $P$ , МН | $M_{np}$ , кН·м | $V$ , м/с | $Q_{cp}$ , кН |
|----------|------------|------------|-------------|-------------|----------|-----------------------|----------|-----------------|-----------|---------------|
| 1        | 0,7        | 0,45       | 10          | 185         | 0,072    | 698,4                 | 1,49     | 2,84            | 2,2       | 13,6          |
| 2        | 0,45       | 0,3        | 185         | 230         | 0,065    | 797,3                 | 1,32     | 5,11            | 3,3       | 3,6           |
| 3        | 0,3        | 0,23       | 230         | 250         | 0,057    | 837                   | 1,04     | 2,98            | 4,3       | 2,3           |
| 4        | 0,23       | 0,2        | 250         | 15          | 0,05     | 853,1                 | 0,96     | 6,4             | 5         | 3,4           |
| $\Sigma$ |            |            |             |             |          |                       |          | 17,33           |           |               |

Таблица 4

Результаты теоретических расчетов энергосиловых параметров и силы  $Q_{cp}$   
при производстве жести  $0,2 \times 350$  мм ( $q_1 = 0,4\beta\sigma_{Tcp}$ )

| № клетки | $h_0$ , мм | $h_1$ , мм | $q_0$ , МПа | $q_1$ , МПа | $f_{cp}$ | $\beta\sigma_T$ , МПа | $P$ , МН | $M_{np}$ , кН·м | $V$ , м/с | $Q_{cp}$ , кН |
|----------|------------|------------|-------------|-------------|----------|-----------------------|----------|-----------------|-----------|---------------|
| 1        | 0,7        | 0,45       | 10          | 250         | 0,072    | 698,4                 | 1,38     | 1,27            | 2,2       | 12,4          |
| 2        | 0,45       | 0,3        | 250         | 305         | 0,065    | 797,3                 | 1,09     | 4,73            | 3,3       | -1,6          |
| 3        | 0,3        | 0,23       | 305         | 330         | 0,057    | 837                   | 0,82     | 2,71            | 4,3       | -1,7          |
| 4        | 0,23       | 0,2        | 330         | 15          | 0,05     | 853,1                 | 0,73     | 6,5             | 5         | -1,7          |
| $\Sigma$ |            |            |             |             |          |                       |          | 15,21           |           |               |

Как видно из приведенных таблиц, с увеличением переднего и заднего натяжений между клетями стана сила прокатки и суммарный момент уменьшаются, а устойчивость процесса ухудшается. При  $q_1 = 0,4\beta\sigma_{Tcp}$  (табл. 4), в 2–4 клетях устойчивый процесс прокат-

ки является невозможным, поскольку  $Q_{cp} < 0$ , поэтому при производстве жести № 20 на непрерывном стане № 1 комбината «Запорожсталь» наиболее рациональными (устойчивыми с меньшими энергозатратами) являются режимы деформации при переднем натяжении по клетям, кроме последней,  $q_1 = 0,3\beta\sigma_{Tcp}$  (табл. 3), которые могут использоваться в производстве. Снижение силы и момента прокатки, по сравнению с режимами натяжений при  $q_1 = 0,2\beta\sigma_{Tcp}$  (табл. 2), будут составлять соответственно 11 % и 2,9 %.

Аналогичные теоретические расчеты выполнены и при производстве жести  $0,22 \times 500$  мм на непрерывном стане № 2. Натяжения на моталке и разматывателе остаются снова без изменения, а начальную границу текучести (после отжига) раската принимаем  $\sigma_{T0} = 260$  МПа. Результаты теоретических исследований приведены в табл. 5–7.

Таблица 5  
Результаты теоретических расчетов энергосиловых параметров и силы  $Q_{cp}$   
при производстве жести  $0,22 \times 500$  мм ( $q_1 = 0,2\beta\sigma_{Tcp}$ )

| № клетки | $h_0$ , мм | $h_1$ , мм | $q_0$ , МПа | $q_1$ , МПа | $f_{cp}$ | $\beta\sigma_T$ , МПа | $P$ , МН | $M_{np}$ , кН·м | $V$ , м/с | $Q_{cp}$ , кН |
|----------|------------|------------|-------------|-------------|----------|-----------------------|----------|-----------------|-----------|---------------|
| 1        | 0,7        | 0,45       | 10          | 125         | 0,072    | 698,4                 | 2,8      | 8,54            | 2,1       | 29            |
| 2        | 0,45       | 0,32       | 125         | 155         | 0,064    | 785,5                 | 2,48     | 8,95            | 2,9       | 17,2          |
| 3        | 0,32       | 0,25       | 155         | 165         | 0,057    | 826,1                 | 2,17     | 6,2             | 3,8       | 13,8          |
| 4        | 0,25       | 0,22       | 165         | 15          | 0,05     | 842,6                 | 1,8      | 9,69            | 4,3       | 12,5          |
| $\Sigma$ |            |            |             |             |          |                       |          | 33,38           |           |               |

Таблица 6  
Результаты теоретических расчетов энергосиловых параметров и силы  $Q_{cp}$   
при производстве жести  $0,22 \times 500$  мм ( $q_1 = 0,3\beta\sigma_{Tcp}$ )

| № клетки | $h_0$ , мм | $h_1$ , мм | $q_0$ , МПа | $q_1$ , МПа | $f_{cp}$ | $\beta\sigma_T$ , МПа | $P$ , МН | $M_{np}$ , кН·м | $V$ , м/с | $Q_{cp}$ , кН |
|----------|------------|------------|-------------|-------------|----------|-----------------------|----------|-----------------|-----------|---------------|
| 1        | 0,7        | 0,45       | 10          | 185         | 0,071    | 698,4                 | 2,61     | 5,71            | 2,1       | 25,6          |
| 2        | 0,45       | 0,32       | 185         | 230         | 0,064    | 785,5                 | 2,08     | 8,02            | 2,9       | 8             |
| 3        | 0,32       | 0,25       | 230         | 250         | 0,057    | 826,1                 | 1,75     | 5,53            | 3,8       | 5,4           |
| 4        | 0,25       | 0,22       | 250         | 15          | 0,05     | 842,6                 | 1,53     | 12,24           | 4,3       | 6             |
| $\Sigma$ |            |            |             |             |          |                       |          | 31,5            |           |               |

Таблица 7  
Результаты теоретических расчетов энергосиловых параметров и силы  $Q_{cp}$   
при производстве жести  $0,22 \times 500$  мм ( $q_1 = 0,4\beta\sigma_{Tcp}$ )

| № клетки | $h_0$ , мм | $h_1$ , мм | $q_0$ , МПа | $q_1$ , МПа | $f_{cp}$ | $\beta\sigma_T$ , МПа | $P$ , МН | $M_{np}$ , кН·м | $V$ , м/с | $Q_{cp}$ , кН |
|----------|------------|------------|-------------|-------------|----------|-----------------------|----------|-----------------|-----------|---------------|
| 1        | 0,7        | 0,45       | 10          | 250         | 0,072    | 698,4                 | 2,41     | 2,78            | 2,1       | 22,7          |
| 2        | 0,45       | 0,32       | 250         | 305         | 0,064    | 785,5                 | 1,7      | 7,28            | 2,9       | 0,1           |
| 3        | 0,32       | 0,25       | 305         | 330         | 0,057    | 826,1                 | 1,38     | 5,04            | 3,8       | -1,2          |
| 4        | 0,25       | 0,22       | 330         | 15          | 0,05     | 842,6                 | 1,26     | 13,77           | 4,3       | -0,9          |
| $\Sigma$ |            |            |             |             |          |                       |          | 28,87           |           |               |

Как следует из таблиц, наиболее выгодным, с точки зрения уменьшения энергозатрат, является режим деформации при переднем натяжении по клетям, кроме последней,  $q_1 = 0,4\beta\sigma_{Tcr}$  (табл. 7). Однако в этом случае средняя результирующая горизонтальных контактных сил в 3 и 4 клетях является отрицательной, т. е. процесс деформации не является устойчивым, а во второй клетке  $Q_{cp} \approx 0$ , т. е. процесс протекает в предельных условиях. Для увеличения захватывающей способности валков необходимо увеличить коэффициент трения, но это приведет к увеличению энергозатрат. Поэтому для производства жести № 22 на непрерывном стане № 2 с целью ведения процесса при меньших энергозатратах и, при этом, обеспечении устойчивости прокатки по клетям можно рекомендовать режим деформации при условии переднего натяжения  $q_1 = 0,3\beta\sigma_{Tcr}$  (табл. 6). По сравнению со случаем, когда  $q_1 = 0,2\sigma_{Tcr}$  (табл. 5), можно достичь уменьшения силы прокатки по клетям на 13,8 % и момента – на 5,5 %.

Как показывают практические данные, подобную величину натяжения ( $q_1 = 0,3\beta\sigma_{Tcr}$ ) можно применять при прокатке тонких и особо тонких листов только при условии высокой культуры производства, т. е. качественного обрезания и фрезерования кромок, своевременной замены ножей и т. д.

### ВЫВОДЫ

Таким образом, в ходе проведенного теоретического исследования показано, что при увеличении переднего натяжения по клетям непрерывного стана (а, соответственно, и увеличении заднего натяжения последующей клетки) сила и момент прокатки уменьшаются, но и устойчивость прокатки при этом снижается. Используя методику оценки продольной устойчивости процесса прокатки, разработаны рациональные режимы натяжений при производстве жести на непрерывных станах № 1 и № 2 комбината «Запорожсталь».

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василев Я. Д. Производство полосовой и листовой стали / Я. Д. Василев, М. М. Сафьян. – К. : Вища школа, 1975. – 192 с.
2. Грудев А. П. Теория прокатки: учебник для вузов / А. П. Грудев. – М. : Металлургия, 1988. – 240 с.
3. Грудев А. П. Захватывающая способность прокатных валков / А. П. Грудев. – М. : СП Интермет Инжиниринг, 1998. – 283 с.
4. Николаев В. А. Технологические параметры прокатки с вязкими смазками / В. А. Николаев // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1995. – № 4. – С. 29–32.
5. Павлов И. М. К вопросу об отрицательном опережении при прокатке / И. М. Павлов, В. К. Белосевич // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1961. – № 10. – С. 46–49.
6. Максименко О. П. Исследование средней результирующей горизонтальных сил в очаге деформации при прокатке / О. П. Максименко, Р. Я. Романюк // Изв. вуз. Чёрная металлургия. – 2009. – № 10. – С. 22–24.
7. Максименко О. П. Уточнение режима натяжений при прокатке на стане 1700 / О. П. Максименко, Р. Я. Романюк // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 3 (28). – С. 148–152.
8. Василев Я. Д. Теория позовжньої прокатки / Я. Д. Василев, О. А. Мінаєв. – Донецьк : УНІТЕХ, 2009. – 488 с.

Максименко О. П. – д-р техн. наук, проф. ДГТУ;

Романюк Р. Я. – ст. преп. ДГТУ.

ДГТУ – Днепродзержинский государственный технический университет,  
г. Днепродзержинск.

E-mail: r22roma@mail.ru

Статья поступила в редакцию 09.02.2012 г.