

УДК 621.771.014-415

Гарбер Э. А.  
Шалаевский Д. Л.**ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКИ И ДРЕССИРОВКИ ПРИ НАЛИЧИИ В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ТОЛЬКО ЗОНЫ ОПЕРЕЖЕНИЯ**

Обзор известных публикаций [1, 2] показал, что один из возможных способов уменьшения энергопотребления при холодной прокатке и дрессировке – увеличение длины зоны опережения в очаге. Оптимальным с этой точки зрения является очаг деформации, всю протяженность которого занимает зона опережения. Процесс прокатки в этом случае осуществляется в заторможенных рабочих валках, за счет силы переднего натяжения.

В большинстве публикаций по этому вопросу детально не рассматривался расчет энергосиловых параметров при прокатке в очаге деформации, полностью состоящем из зоны опережения, т. е. не имеющем зоны отставания и нейтрального сечения.

Некоторые аспекты энергосилового расчета процесса прокатки в холостых валках рассмотрены в работах [3, 4], где этот процесс назван «прокаткой – волочением». Среднее удельное давление в очаге деформации при реализации данного процесса автор работы [3] предложил вычислять с помощью выражения:

$$p_{cp} = \sigma_T \frac{0,5 \frac{h}{h_{cp}}}{2\gamma/\alpha - 1}, \quad (1)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести полосы;  $h$  – толщина полосы на выходе из клетки;  $h_{cp}$  – средняя толщина металла в очаге деформации;  $\gamma$  – нейтральный угол;  $\alpha$  – угол захвата.

Использование формулы (1) может приводить к значительным погрешностям при расчете силы прокатки и мощности двигателей рабочей клетки, т.к. она выведена из условия, что металл деформируется пластически по всей длине очага деформации. Между тем, в работах [1, 2] показано большое влияние на энергосиловые параметры упругих участков очага деформации, протяженность которых при прокатке тонких полос достигает 50 % и более от общей длины очага деформации.

Целью работы являлась оценка реальной возможности ведения процесса холодной прокатки с очагом деформации, состоящим только из зоны опережения. Для анализа энергосиловых параметров в очаге деформации такого структурного типа использовали упругопластическую модель напряженно-деформированного состояния полосы, изложенную и обоснованную в работах [1, 2].

Расчетная схема для этой модели показана на рис. 1.

Ее отличие от традиционных расчетных схем состоит в том, что средняя по толщине скорость движения полосы  $v_x$  по всей длине очага деформации больше окружной скорости вращения валков  $v_e$  (см. графики «б»). В таком очаге касательные напряжения  $\tau_x$ , действующие на полосу со стороны валка, направлены против хода полосы, т. е. валки «тормозят» полосу, получая от нее энергию для вращения. Электродвигатели главного привода клетки работают в генераторном режиме. Очевидно, что сила переднего натяжения в таком очаге должна быть больше, чем при прокатке в приводных валках.

Технологические регламенты большинства непрерывных станов холодной прокатки ограничивают величину удельных межклетевых натяжений значениями  $(0,2 - 0,3)\sigma_{0,2i}$  (где  $\sigma_{0,2i}$  – условный предел текучести полосы на выходе  $i$ -ой клетки), что связано с вероятностью обрывов полосы из-за нестабильности параметров технологического процесса. Система автоматического регулирования толщины и натяжений (САРТиН), воздействуя на исполнительные механизмы нажимных устройств и скорости двигателей рабочих клеток, поддерживает заданную толщину, изменяя при этом натяжения полосы.

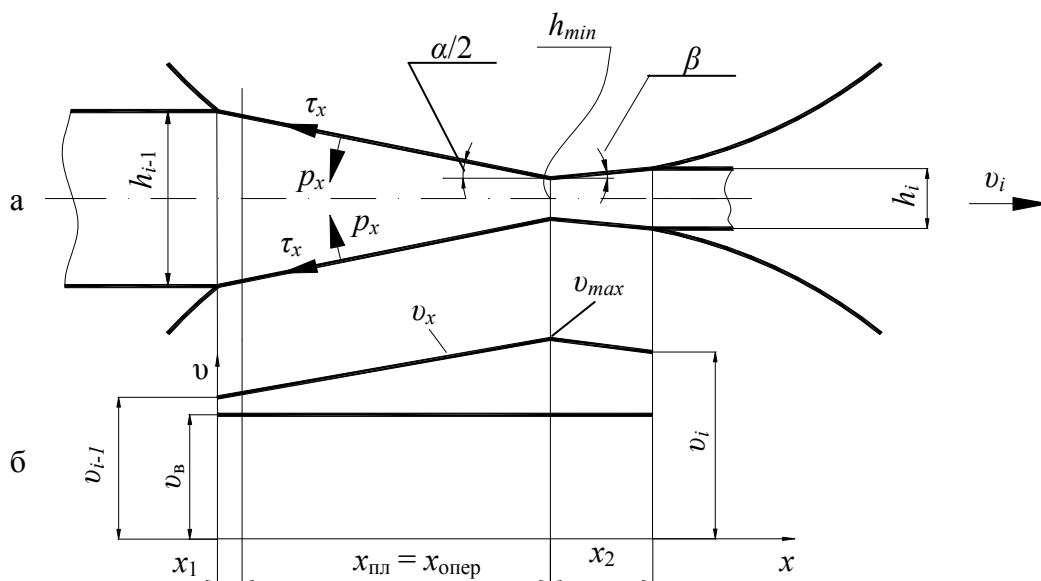


Рис. 1. Расчетная схема очага деформации, состоящего только из зоны опережения (а) и графики изменения скорости полосы и валков по его длине (б):

$h_{i-1}$ ,  $h_i$  – толщина полосы на входе и выходе из валков ( $i$  – номер прохода или рабочей клетки);  $\alpha$  – угол захвата;  $h_{min}$  – наименьшая толщина полосы в очаге;  $\beta$  – угол между плоскостью контакта полосы с валком и осью прокатки на втором упругом участке;  $p_x$  и  $\tau_x$  – нормальное и касательное напряжения, действующие на полосу;  $v_{i-1}$  и  $v_i$  – скорость движения полосы на входе и выходе из валков;  $v_x$  – переменная по длине очага скорость движения полосы;  $v_{max}$  – наибольшая скорость движения полосы;  $v_B$  – окружная скорость валков;  $x_1$  – длина первого упругого участка;  $x_{пл}$  – длина пластического участка;  $x_2$  – длина второго упругого участка

В то же время на одноклетевых станах, в том числе дрессировочных, колебания натяжений и вероятность обрывов значительно меньше, поэтому максимально допустимая величина удельного натяжения на таких станах может быть большей:  $(0,3-0,4)\sigma_{0,2}$ .

Учитывая изложенное, в качестве объектов для моделирования и исследования энергосиловых параметров мы выбрали непрерывный 5-тиклетевой и дрессировочный станы 1700.

Сущность алгоритма моделирования состояла в следующем.

На первом этапе сформировали базу исходных данных, включающую параметры исходного режима прокатки, принятого по существующей технологии, конструктивные параметры клетки, механические характеристики материала прокатываемой полосы. Далее с помощью упругопластической модели энергосиловых параметров [1, 2], включающей алгоритм идентификации структурного типа очага деформации, определили количество нейтральных сечений и толщину полосы в нейтральном сечении  $h_{ni}$  каждой клетки.

Как и ожидалось, при регламентных значениях режимов обжатий и натяжений ни в одной клетке не было очага деформации, в котором отсутствовала зона отставания.

Чтобы создать такой очаг, начиная с первой клетки, с шагом  $0,01 \cdot \sigma_{0,2i}$ , не меняя обжатие, увеличивали переднее удельное натяжение  $\sigma_i$ , пересчитывали значение  $h_{ni}$  и применяли следующий критерий идентификации:

$$\frac{h_{ni}}{h_{i-1}} \geq 1. \quad (2)$$

Если неравенство (2) не выполнялось, это означало, что  $h_{ni} < h_{i-1}$ , т. е. в очаге деформации имеется нейтральное сечение. С ростом переднего натяжения величина  $h_{ni}$  увеличивалась, постепенно приближаясь к значению толщины полосы на входе в валки  $h_{i-1}$ . При этом длина зоны отставания уменьшалась за счет увеличения длины зоны опережения.

После того, как при очередном увеличении  $\sigma_i$  критерий идентификации (2) выполнялся, величина  $h_{ni}$  становилась равной толщине полосы на входе  $h_{i-1}$ , т. е. зона отставания исчезала и очаг деформации переходил в требуемый структурный тип – полностью состоял из зоны опережения.

Далее фиксировали окончательную величину переднего удельного натяжения, затем выполняли расчет контактных напряжений и энергосиловых параметров в очаге деформации, состоящем только из зоны опережения.

В связи с изменением направления касательных напряжений в той части длины очага деформации, где ранее была зона отставания, потребовалось скорректировать расчетные формулы контактных напряжений и удельных работ прокатки, что было выполнено по методике [1, 2]. Полученные новые формулы приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Формулы для расчета контактных напряжений в очаге деформации, состоящем только из зоны опережения

№ участка $j$	Название участка	Расчетная формула $p_j$ , МПа
1	Участок упругого сжатия полосы на входе в очаг деформации	$p_1 = L \left[ -\frac{1,15E_{II}}{\delta_{i-1}}(D-1) - \frac{2,3E_{II}}{(1-\delta_{i-1})} \ln D + \frac{1}{1-\delta_{i-1}} (D^{1-\delta_{i-1}} - 1) \left( \frac{2,3E_{II}}{(1-\delta_{i-1})} + \frac{1,15E_{II}}{\delta_{i-1}} - \sigma_{i-1} \right) \right]$
2	Пластический участок	$p_2 = \frac{h_i}{h_{i-1} - \Delta h_{1упр} - h_i / D} \left\{ \frac{(N_i + K) D^{\delta_{i-1}}}{(\delta_{i-1} + 1)} \left[ \left( \frac{h_{i-1} - \Delta h_{1упр}}{h_i} \right)^{\delta_{i-1} + 1} - \left( \frac{1}{D} \right)^{\delta_{i-1} + 1} \right] - K \left( \frac{h_{i-1} - \Delta h_{1упр}}{h_i} - \frac{1}{D} \right) \right\}$
3	Второй упругий участок	$p_3 = L \left[ A_i(D-1) - B_i \ln D + \frac{C_i}{\delta_i + 1} (D^{\delta_i + 1} - 1) \right]$

Примечание:  $A_i = \frac{1,15E_{II}}{\delta_i}$ ;  $B_i = \frac{2,3E_{II}}{\delta_i + 1}$ ;  $C_i = (B_i - A_i - \sigma_i)$ ;  $E_n$  – модуль упругости

материала полосы;  $\delta_i = \mu_i / \text{tg}\beta$ ;  $\text{tg}\beta$  – тангенс угла между плоскостью контакта полосы и валков на участке выхода металла из клетки и горизонтальной плоскостью;  $\sigma_i$  – переднее удельное натяжение полосы;  $\mu_i$  – среднее значение коэффициента трения в очаге деформации  $i$ -ой клетки;  $\delta_{i-1} = \mu / (\text{tg}\alpha/2)$ ;  $\sigma_{i-1}$  – заднее удельное натяжение;  $L = \frac{E_{II} - \sigma_{\phi i}}{\sigma_{\phi i}}$ ;  $N_i = A_i - \frac{B_i}{D} + C_i D^{\delta_i}$ ;

$K = \frac{1,15\sigma_{\phi i}}{\delta_{i-1}}$ ;  $D = \frac{E_{II}}{E_{II} - \sigma_{\phi i}}$ ;  $\sigma_{\phi i}$  – среднее значение сопротивления деформации материала полосы;  $\Delta h_{1упр}$  – величина деформации полосы на первом упругом участке;  $i$  – номер клетки.

Остальные энергосиловые параметры рассчитывали по тем же формулам, что и для традиционных структурных типов очага деформации:

– среднее удельное давление:

$$p_{срi} = \frac{1}{l_{ci}} \sum_{j=1}^3 p_j x_j, \quad (3)$$

где  $l_{ci}$  – длина очага деформации;

$p_j$  – средние значения нормальных контактных напряжений по участкам ( $j = 1, 2, 3$ , см. табл. 1);

$x_j$  – длина соответствующих участков очага деформации (см. рис. 1);

– касательные контактные напряжения по участкам:

$$\tau_j = \mu_i p_j, \quad (4)$$

– удельная работа прокатки в  $i$ -ой клетки:

$$a_{при} = \sum_{j=1}^3 a_j, \quad (5)$$

где ( $a_j$  – см. в табл. 2);

– усилие  $P_{при}$  и мощность прокатки  $N_{при}$ :

$$P_{при} = p_{срi} \cdot l_{ci} \cdot b, \quad (6)$$

где  $b$  – ширина полосы;

$$N_{при} = a_{при} \cdot v_i \cdot h_i \cdot b. \quad (7)$$

Поскольку все значения  $a_j$  в очаге, состоящем из зоны опережения, отрицательные, величины  $a_{при}$  и  $N_{при}$ , рассчитанные по формулам (5) и (7), также являются отрицательными. Поэтому  $N_{при}$  – это мощность, которая генерируется в двигателе рабочей клетки, за счет работы по осуществлению процесса прокатки, совершаемой силой переднего натяжения полосы.

Таблица 2

Расчетные формулы удельных работ прокатки  $a_j$  на каждом участке очага деформации, состоящего только из зоны опережения

Номер участка $j$	Название участка	Расчетная формула $a_j$ , МДж/м <sup>3</sup>
1	Участок упругого сжатия полосы на входе в очаг деформации	$a_1 = -\tau_1 \left( \frac{1}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \ln \frac{h_{i-1}}{h_{i-1} - \Delta h_{1\text{упр}}}$
2	Пластический участок	$a_2 = -\tau_2 \left( \frac{1}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} + \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right) \ln \frac{h_{i-1} - \Delta h_{1\text{упр}}}{h_{\min}}$
3	Второй упругий участок	$a_3 = -\tau_3 \left( \operatorname{tg} \beta + \frac{1}{\operatorname{tg} \beta} \right) \ln \frac{h_i}{h_{\min}}$

Результаты апробации изложенной методики на 5-тиклетевом стане 1700 при холодной прокатке полосы из стали 08Ю с шириной 1250 мм с исходной толщины 1,8 мм на конечную толщину 0,5 мм приведены в табл. 3–7: в табл. 3 – параметры исходного режима прокатки, а в последующих таблицах – удельные натяжения и энергосиловые параметры режимов, при которых в одной из клеток (начиная с первой) путем увеличения силы переднего натяжения создан очаг деформации, состоящий только из зоны опережения (толщины и частные обжатия по клетям во всех таблицах такие же, как и в табл. 3).

Таблица 3

Параметры исходного режима прокатки полос на стане 1700

$i$ (№ клетки)	$v_i$ , м/с	$\varepsilon_i$ , %	$h_{i-1}$ , мм	$h_i$ , мм	$\sigma_{i-1}$ , МПа	$\sigma_i$ , МПа	$P_i$ , МН	$N_{двi}$ , МВт	$N_{\Sigma}$ , МВт
1	4,23	26,6	1,80	1,32	59,2	132,38	8,27	0,56	6,24
2	6,13	28,0	1,32	0,95	132,38	147,06	8,41	1,42	
3	8,28	27,3	0,95	0,69	147,06	169,29	8,61	1,46	
4	11,22	24,6	0,69	0,52	169,29	174,74	8,11	1,52	
5	11,85	3,8	0,52	0,50	174,74	33,08	8,52	1,28	

Таблица 4

Параметры режима прокатки с очагом деформации в первой клетке, состоящим из зоны опережения

$i$ (№ клетки)	$\sigma_{i-1}$ , МПа	$\sigma_i$ , МПа	$P_i$ , МН	$\sigma_{0,2i}$ , МПа	$\frac{\sigma_i}{\sigma_{0,2i}}$	$N_{об}$ , МВт	$N_{\Sigma}$ , МВт	Экономия суммарной мощности, %
1	59,2	368,24	3,99	429,90	0,85	0	5,69	9,1
2	368,2	147,06	3,45	553,09	0,26	1,43		
3	147,06	169,29	8,61	613,95	0,27	1,46		
4	169,29	174,74	8,11	649,50	0,26	1,52		
5	174,74	33,08	8,52	664,16	0,04	1,28		

Таблица 5

Параметры режима прокатки с очагом деформации во второй клетке, состоящим из зоны опережения

$i$ (№ клетки)	$\sigma_{i-1}$ , МПа	$\sigma_i$ , МПа	$P_i$ , МН	$\sigma_{0,2i}$ , МПа	$\frac{\sigma_i}{\sigma_{0,2i}}$	$N_{об}$ , МВт	$N_{\Sigma}$ , МВт	Экономия суммарной мощности, %
1	59,2	132,38	8,27	429,90	0,30	0,56	5,06	19,0
2	132,38	437,38	4,73	553,09	0,79	0		
3	437,38	169,29	3,00	613,95	0,27	1,8		
4	169,29	174,74	8,11	649,50	0,26	1,52		
5	174,74	33,08	8,52	664,16	0,04	1,28		

Таблица 6

Параметры режима прокатки с очагом деформации в третьей клетке, состоящим из зоны опережения

$I$ (№ клетки)	$\sigma_{i-1}$ , МПа	$\sigma_i$ , МПа	$P_i$ , МН	$\sigma_{0,2i}$ , МПа	$\frac{\sigma_i}{\sigma_{0,2i}}$	$N_{об}$ , МВт	$N_{\Sigma}$ , МВт	Экономия суммарной мощности, %
1	59,2	132,38	8,27	429,90	0,30	0,56	5,36	14,0
2	132,38	147,06	4,73	553,09	0,26	1,42		
3	147,06	499,94	3,00	613,95	0,81	0		
4	499,94	174,74	8,11	649,50	0,26	2,1		
5	174,74	33,08	8,52	664,16	0,04	1,28		

Таблица 7

Параметры режима прокатки с очагом деформации в четвертой клетке, состоящим из зоны опережения

$i$ (№ клетки)	$\sigma_{i-1}$ , МПа	$\sigma_i$ , МПа	$P_i$ , МН	$\sigma_{0,2i}$ , МПа	$\frac{\sigma_i}{\sigma_{0,2i}}$	$N_{об}$ , МВт	$N_{\Sigma}$ , МВт	Экономия суммарной мощности, %
1	59,2	132,38	8,27	429,90	0,30	0,56	5,94	5,0
2	132,38	147,06	8,41	553,09	0,26	1,42		
3	147,06	169,29	8,61	613,95	0,27	1,46		
4	169,29	512,61	3,51	649,50	0,78	0		
5	512,61	33,08	1,78	664,16	0,04	2,5		

Анализ данных, представленных в таблицах, позволяет сделать следующие выводы:

1. Возникновение очага, состоящего только из зоны опережения, в принципе возможно, однако, для этого требуется недопустимо большие значения удельных натяжений:  $(0,78-0,85) \cdot \sigma_{0,2i}$ , существенно увеличивающие вероятность обрывов полосы.

2. При возникновении в одной из клеток непрерывного стана очага деформации, состоящего только из зоны опережения, суммарная мощность двигателей главного привода стана уменьшается на 5–19 % по сравнению с режимом прокатки, предусмотренным технологической инструкцией.

Режим дрессировки, выбранный для исследования, представлен в табл. 8.

Таблица 8

Параметры исходного режима дрессировки полосы из стали 08Ю  
толщиной 0,7 мм и шириной 780 мм

$b$ , мм	$h_0$ , мм	$h_1$ , мм	$\varepsilon_i$ , %	$\sigma_0$ , МПа	$\sigma_1$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\frac{\sigma_1}{\sigma_{0,2}}$	$v_{др}$ , м/с	$P$ , МН	$N_{об}$ , кВт	$N_{мот}$ , кВт
780	0,7	0,693	1	38,5	44,4	295,1	0,15	24	1,3	240	58,77

Примечание:  $v_{др}$  – скорость дрессировки;  $N_{мот}$  – требуемая мощность двигателя моталки.

Параметры режима дрессировки с передним натяжением, увеличенным до появления зоны опережения на всей протяженности очага деформации, представлены в табл. 9.

Таблица 9

Параметры режима дрессировки полосы толщиной 0,7 мм и шириной 780 мм, марка стали 08Ю с очагом деформации, состоящим только из зоны опережения

$b$ , мм	$h_0$ , мм	$h_1$ , мм	$\varepsilon_{i_s}$ , %	$\sigma_0$ , МПа	$\sigma_1$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\frac{\sigma_1}{\sigma_{0,2}}$	$v_{др}$ , м/с	$P$ , МН	$N_{дв}$ , кВт	$N_{мот}$ , кВт
780	0,7	0,693	1	38,5	103,6	295,1	0,35	24	1,1	0	137,14

Величина переднего удельного натяжения для режима, указанного в табл. 9, составила 35 % от предела текучести, что существенно меньше, чем при прокатке на непрерывном стане и вполне приемлемо для реализации. Снижение энергопотребления в дрессировочной клети с учетом мощности, дополнительно затраченной двигателем моталки, составило 161 кВт или 54 %.

### ВЫВОДЫ

Изложенные результаты моделирования и исследования режимов холодной прокатки и дрессировки стальных полос показали, что в рабочих клетях этих станов путем увеличения сил передних натяжений может быть создан очаг деформации, состоящий только из зоны опережения. Поэтому в комплексном алгоритме энергосилового расчета этих станов такой очаг деформации должен рассматриваться, наряду с другими структурными типами очагов деформации.

В рабочих клетях непрерывного стана для создания очага деформации, состоящего только из зоны опережения, требуется увеличить переднее удельное натяжение до недопустимо больших значений: 78–85 % от условного предела текучести полосы. Поэтому, несмотря на значительную экономию энергии, на непрерывных станах применять режимы прокатки с очагами деформации данного структурного типа нецелесообразно.

На одноклетевых (например, реверсивных) станах со стабильной технологией (при отсутствии колебаний натяжений) применение режимов прокатки с очагами, состоящими только из зоны опережения, в принципе возможно.

На дрессировочных одноклетевых станах применение таких очагов деформации не только возможно, но и целесообразно по следующим причинам:

- удельные натяжения полосы не превышают 35 % от условного предела текучести полосы, что вполне приемлемо;
- экономия энергии составляет более 50 %, что весьма существенно;
- рабочую клеть можно проектировать без главного привода, что значительно сократит капитальные и эксплуатационные затраты.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гарбер Э. А. *Производство проката: справочное издание. Том 1. Книга 1. Производство холоднокатаных полос и листов (сортамент, теория, технология, оборудование)* / Э. А. Гарбер. – М. : Теплотехник, 2007. – 368 с.
2. *Методика и алгоритмы энергосилового расчета процесса холодной прокатки с учетом количества нейтральных сечений в очаге деформации* / Э. А. Гарбер, Д. Л. Шалаевский, И. А. Кожеевникова, А. И. Трайно // *Металлы*. – 2008. – № 4. – С. 3–20.
3. Николаев В. А. *Контактные напряжения в процессе прокатки – волочения* / В. А. Николаев, А. А. Васильев // *Теория и практика металлургии*. – 2010. – № 3–4. – С. 63–66.
4. Николаев В. А. *Теория и практика процессов прокатки* / В. А. Николаев. – Запорожье : ЗГИА, 2002. – 232 с.

Гарбер Э. А. – д-р техн. наук, проф. ЧГУ;

Шалаевский Д. Л. – канд. техн. наук, доц. ЧГУ.

ЧГУ – Череповецкий государственный университет, г. Череповец, Россия.

E-mail: mamz2011@mail.ru

Статья поступила в редакцию 26.12.2011 г.