

Далее находим интенсивность сдвиговых скоростей деформаций для несжимаемых сред [4]:

$$N = 2\sqrt{\xi_{11}^2 + \xi_{12}^2 + \xi_{23}^2 + \xi_{13}^2}. \quad (9)$$

Интенсивность сдвиговых скоростей деформаций для идеальной жесткопластичной среды $T = t_r = \text{const}$ [4] позволяет оценить деформационный разогрев металла [4, 5]. Температура деформационного разогрева

$$\theta = \theta_0 + \frac{\Lambda \tau_r}{c \rho J_m}, \quad (10)$$

где θ_0 – начальная температура металла; c – удельная теплоемкость; ρ – плотность; J_m – механический эквивалент тепла; Λ – степень деформации сдвига [6]:

$$\Lambda = \int_t H dt = 2 \ln \left(\operatorname{tg} \frac{\pi h_0}{4H} \operatorname{ctg} \frac{\pi h_1}{4H} \right); \quad (11)$$

H – масштабный фактор, определяемый геометрическими параметрами прокатки:

$$R = \frac{H c_2}{\pi c_1} \sin^2 \frac{\pi r}{2H} \left(1 + \frac{c_2^2}{c_1^2} \operatorname{ctg}^2 \frac{\pi r}{2H} \right)^{\frac{3}{2}}; \quad (12)$$

$$r = \frac{h_0 h_1}{h_0 + h_1}; \quad c_1 = \frac{\lambda - 1}{2}; \quad c_2 = \frac{\lambda + 1}{2}; \quad \lambda = \frac{h_0}{h_1}.$$

УДК 621.771

Л.С. Кохан, А.В. Алдунин

Московский государственный открытый университет им. В.С. Черномырдина

МИНИМИЗАЦИЯ УШИРЕНИЯ ПРИ ПРОКАТКЕ ТОНКОПОЛОСОВОГО МЕТАЛЛА

При прокатке тонких полос из различных сплавов уширение сопровождается значительными напряжениями растяжения на их боковых кромках [1]. Излишнее уширение приводит к появлению трещин в кромках и даже обрыву прокатываемых полос. Для узких полос, предназначенных для изготовления шинопроводов и гнутых профилей, потери металла при обрезке дефектных кромок достигают 5 – 10 %.

На сегодня имеются отдельные представления о зависимости уширения прокатываемых полос от относительного обжатия ε и отношения начальной ширины b_0 к длине дуги деформации l [2], отношения b_0 к начальной критической ширине $b_{0к}$, а также от величины заднего натяжения [1, 3].

Из теоретических исследований также известно, что суммарное уширение в геометрическом очаге деформации определяется соотношением протяженности зон отставания $l_{от}$ и опережения $l_{оп}$ (рис. 1). Обычно при

Полученную новую математическую модель можно использовать для оценки условий раскатки, соответствующих сверхпластическому состоянию деформируемого металла так, как это было сделано для процесса листовой прокатки в работе [7].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кайбышев О.А., Утяшев Ф.З. Сверхпластичность, измельчение микроструктуры и обработка труднодеформируемых сплавов. – М.: Наука, 2002. – 438 с.
2. Кучеряев Б.В., Зиновьев А.В., Крахт В.Б. и др. // Производство проката 2001. № 7. С. 6 – 9.
3. Целиков А.И. // Металлургия. 1939. № 6. С. 61 – 76.
4. Кучеряев Б.В. Механика сплошных сред. Теоретические основы обработки давлением композитных металлов с задачами и решениями, примерами и упражнениями: Учеб. для вузов. – М.: МИСИС, 2006. – 604 с.
5. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600с.
6. Кучеряев Б.В., Потапов И.Н. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1974. № 4. С. 78 – 81.
7. Кучеряев Б.В., Смирнов О.М., Тинигин Н.И. Математическое моделирование процесса прокатки сплава ЖС6-КП в состоянии сверхпластичности. Сб. «Теория и технология обработки металлов давлением» № 102. – М.: Металлургия, 1977. С. 44 – 48.

© 2012 г. Б.В. Кучеряев, П.Ю. Соколов,
Н.А. Ночовная, В.В. Кучеряев
Поступила 10 февраля 2012 г.

симметричном режиме натяжения величина уширения в зоне отставания больше, чем в зоне опережения [4].

Существенное влияние на деформационные и силовые параметры в очаге деформации при прокатке полос данного размерного сортамента оказывает положение нейтрального сечения, зависящее, прежде всего, от относительного обжатия, радиуса рабочих валков, коэффициента контактного трения, режима натяжения и коэффициента упрочнения обрабатываемого металла.

В данной работе в процессе теоретических исследований определяли коэффициент нейтрального сечения очага деформации [5]:

$$Z = \frac{h_0}{h_n} = \left[\frac{\sqrt{k^2 + \frac{(\xi_0 \cdot \delta - k)(\xi_1 \cdot \delta + k)}{(1 - \varepsilon)^\delta}} - k}{\delta \cdot \xi_0 - k} \right]^{1/8}, \quad (1)$$

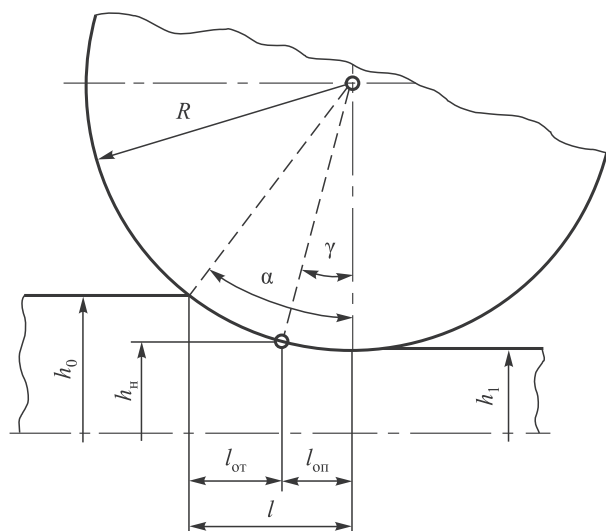


Рис. 1. Схема геометрического очага деформации

где h_0 , h_n – толщина полосы исходная и в нейтральном сечении; $\varepsilon = \frac{h_0 - h_1}{h_0}$ – относительное обжатие;

h_1 – толщина полосы после прокатки; $\delta = \frac{2f}{\alpha}$ – параметр прокатки; f – коэффициент контактного трения;

$\alpha = \sqrt{\frac{h_0 \varepsilon}{R}}$ – угол захвата; R – радиус рабочих валков;

$\xi_0 = 1 - \frac{\sigma_0}{\sigma_T}$, $\xi_1 = 1 - \frac{\sigma_1}{\sigma_T}$ – коэффициенты заднего и переднего натяжений полосы; σ_0 , σ_1 – заднее и переднее напряжения натяжения полосы; σ_T – предел текучести материала полосы;

$k = \frac{1 + (1 + \varepsilon)}{2}$ – коэффициент деформационного упрочнения обрабатываемого металла.

Тогда толщина полосы $h_n = h_0/Z$ и $h_1 = h_0(1 - \varepsilon)$.

Для зоны отстаивания относительная деформация

$\varepsilon_{от} = \frac{h_0 - h_n}{h_0}$ и относительное уширение

$$\varepsilon_{b,от} = \left[\sqrt{(1 + a_1)^2 + \frac{4\varepsilon_{от}a_1}{1 - \varepsilon_{от}}} - (1 + a_1) \right] 0,5, \quad (2)$$

где $a_1 = (1 - \varepsilon_{от}) \frac{h_0}{b_0}$.

И тогда абсолютное уширение в зоне отстаивания $\Delta b_{от} = \varepsilon_{b,от} b_0$.

В зоне опережения $\varepsilon_{оп} = \frac{h_n - h_1}{h_n}$ и относительная деформация уширения

$$\varepsilon_{b,оп} = \left[\sqrt{(1 + a_2)^2 + \frac{4\varepsilon_{оп}a_2}{1 - \varepsilon_2}} - (1 + a_2) \right] 0,5, \quad (3)$$

где $a_2 = (1 - \varepsilon_{оп}) \frac{h_n}{b_0 + \Delta b_1}$.

Абсолютное уширение в зоне опережения $\Delta b_{оп} = \varepsilon_{b,оп} (b_0 + \Delta b_1)$.

Общее уширение $\Delta b = \Delta b_{от} + \Delta b_{оп}$, откуда результирующее относительное уширение $\varepsilon_b = \Delta b / b_0$.

Известно, что относительное уширение широких полос ничтожно мало.

По данной методике были выполнены расчеты и проведены исследования уширения при холодной прокатке узких полос для исходных данных: начальная толщина полос $h_0 = 1 - 5$ мм; ширина полос $b_0 = 20 - 500$ мм; радиус рабочих валков $R = 150$ мм; относительное обжатие $\varepsilon = 0,25$; коэффициент контактного трения $f = 0,2$; коэффициенты натяжения $\xi_0 = \xi_1 = 0,9$.

Анализ результатов расчета показал, что при изменении толщины h_0 с 5 до 1 мм для полос шириной $b_0 = 20$ мм относительное уширение ε_b уменьшается с 5,10 до 1,19 %, а для $b_0 = 500$ мм ε_b изменяется от 0,25 до 0,05 %.

По расчетным данным получена графическая зависимость относительного уширения ε_b от начальных размеров полос h_0 и b_0 (рис. 2).

Подобные расчеты были выполнены с варьированием диаметра рабочих валков D . При этом длина зоны опережения (см. рис. 1)

$$l_{оп} = R \sin \gamma, \quad (4)$$

где $\gamma = \arccos \left(1 - \frac{h_n - h_1}{D} \right)$.

Тогда протяженность зоны отстаивания будет $l_{от} = l - l_{оп}$, где $l = \sqrt{h_0 \varepsilon R}$ – длина дуги деформации без учета упругой деформации валков.

По результатам расчетов (табл. 1) установлено, что с уменьшением диаметра валков от 600 до 100 мм при одном и том же относительном обжатии $\varepsilon = 0,25$ величина коэффициента нейтрального сечения Z увеличивается

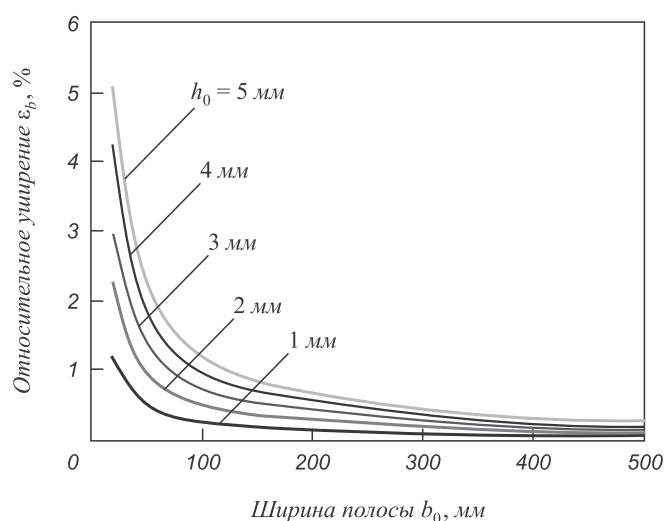


Рис. 2. Зависимость относительного уширения ε_b при холодной прокатке полос с относительным обжатием $\varepsilon = 0,25$ от их толщины h_0 и ширины b_0 ($R = 150$ мм, $f = 0,2$, $\xi_0 = \xi_1 = 0,9$)

Таблица 1

Зависимость уширения полосы ($h_0 = 4$ мм, $b_0 = 40$ мм) при холодной прокатке ($\varepsilon = 0,25$, $f = 0,2$) от диаметра рабочих валков с симметричным натяжением ($\xi_0 = \xi_1 = 0,9$)

Диаметр валков D , мм	Z	l , мм	$l_{оп}$, мм	$l_{оп}/l$	b_0/l	Δb , мм	$\Delta b_{оп}$, мм	$\Delta b_{оп}/\Delta b$
600	1,1740	17,32	11,34	0,6547	2,309	0,9156	0,3760	0,4107
400	1,1804	14,14	8,72	0,6167	2,828	0,9154	0,3590	0,3922
300	1,1860	12,25	7,41	0,6049	3,266	0,9153	0,3444	0,3763
200	1,1956	10,00	,81	0,5810	4,000	0,9152	0,3194	0,3490
100	1,2186	7,07	3,74	0,5290	5,657	0,9144	0,2612	0,2857

от 1,1740 до 1,2186 (на 3,8 %) и относительная длина зоны опережения $l_{оп}/l$ уменьшается от 0,6547 до 0,5290 (на 19,2 %), что способствует увеличению уширения. При этом отмечается уменьшение отношения $\Delta b_{оп}/\Delta b$ с 0,4107 до 0,2857. Увеличение же значения параметра b_0/l , ответственного за соотношение деформации удлинения и уширения, с 2,309 до 5,657 (на 145,0 %) способствует уменьшению уширения. Воздействие параметра b_0/l является преобладающим и в итоге с уменьшением D от 600 до 100 мм уширение несколько уменьшается (с 0,916 до 0,914 мм).

Были проведены также аналогичные теоретические исследования влияния режима натяжения прокатываемой полосы на ее уширение и среднее относительное нормальное напряжение в очаге деформации. Рассматривали режимы прокатки с вариантами заднего, симметричного и переднего натяжений.

Предельную величину коэффициента заднего натяжения прокатываемой полосы при отсутствии переднего натяжения, когда $\xi_1 = 1,0$, $h_n = h_1$ и зона опережения отсутствует, определяли по уравнению [6]

$$\xi_{0np} = \left(1 - \frac{k}{\delta}\right)(1 - \varepsilon)^\delta + \frac{k}{\delta}. \quad (5)$$

Предельное значение коэффициента переднего натяжения, когда $\xi_1 = 1,0$, $h_n = h_0$ и зона отставания отсутствует, определяли по формуле [5]

$$\xi_{1np} = \frac{(\xi_0 \delta + k)[1 - \varepsilon(1 - \varepsilon)^\delta] - k}{\delta}. \quad (6)$$

Для всех вариантов вычисляли также среднее относительное нормальное напряжение в очаге деформации [5]:

$$\bar{\sigma}_{cp} = \left(\xi_0 - \frac{k}{\delta}\right) \frac{(Z^{\delta-1} - 1)}{\varepsilon(\delta - 1)} + \frac{\left(\xi_1 + \frac{k}{\delta}\right) \left\{ \frac{1 - \varepsilon}{[Z(1 - \varepsilon)]^{\delta+1}} - 1 \right\}}{\varepsilon(1 - \varepsilon)(\delta + 1)} + \frac{k}{\delta \varepsilon} \left(2 - \frac{2}{Z} - \varepsilon\right). \quad (7)$$

В табл. 2 приведены полученные результаты для условий холодной прокатки: толщина полосы $h_0 = 3$ мм, ширина $b_0 = 40$ мм, относительное обжатие $\varepsilon = 0,25$, радиус валков $R = 150$ мм, коэффициент контактного трения $f = 0,2$, длина дуги деформации $l = 10,61$ мм.

При изменении режима натяжения полосы от несимметричного предельно заднего ($\xi_{0,пр} = 0,35625$, $\xi_1 = 1,0$) на симметричное ($\xi_0 = 0,9$, $\xi_1 = 0,9$) и затем до предельно несимметричного переднего ($\xi_0 = 1,0$, $\xi_{1,пр} = 0,03664$) коэффициент нейтрального сечения Z уменьшается от 1,3333 (когда $h_n = h_1$), до 1 (когда $h_n = h_0$). При этом относительная длина зоны опережения $l_{оп}/l$ очага деформации изменяется от 0 до 1.

Максимальное абсолютное уширение $\Delta b_{max} = 0,70132$ мм получается при переднем натяжении с коэффициентами $\xi_0 = 1,0$ и $\xi_1 = 0,7$, причем $l_{оп}/l \approx 0,7$ и $\Delta b_{оп} \approx \Delta b_{от}$. Минимальное уширение $\Delta b_{min} = 0,69851$ мм достигается как при предельном коэффициенте заднего $\xi_{0,пр} = 0,35625$, так и переднего $\xi_{1,пр} = 0,03664$ натяжения. В интервале режимов с задним натяжением зависимость среднего относительного нормального напряжения $\bar{\sigma}_{cp}$ от ξ_1/ξ_0 имеет локальный максимум $\bar{\sigma}_{cp} = 3,9563$ при $\xi_1/\xi_0 = 1,1111$. В этом интервале за счет натяжения среднее относительное нормальное напряжение понижается до минимального уровня 3,2864 (на 16,9 %) и усредненное в интервале значение $\bar{\sigma}_{cp}$ составляет 3,6904. В области режимов с передним натяжением также имеется локальный максимум $\bar{\sigma}_{cp} = 3,8491$ при $\xi_1/\xi_0 = 0,8$ и за счет натяжения достигается минимальное значение $\bar{\sigma}_{cp} = 1,7455$ (понижение на 54,7 %), в данной области его усредненная величина равна 2,9577.

Итак, прокатка с передним натяжением при отсутствии зоны отставания позволяет не только минимизировать уширение, но и значительно снижать среднее относительное нормальное напряжение в очаге деформации.

В табл. 3 для сравнения приведены результаты расчета величины абсолютного уширения Δb полосы ($h_0 = 3$ мм, $b_0 = 40$ мм) для $\varepsilon = 0,10 - 0,25$ при холодной прокатке с симметричным и предельным передним натяжением (при отсутствии зоны отставания).

Таблица 2

Влияние режима натяжения на параметры процесса холодной прокатки полосы
($h_0 = 3$ мм, $b_0 = 40$ мм, $R = 150$ мм, $\varepsilon = 0,25$, $f = 0,2$, $l = 10,61$ мм)

Режим натяжения	ξ_1/ξ_0	Z	$l_{оп}$, мм	$l_{оп}/l$	$\Delta b_{оп}$, мм	Δb , мм	$\Delta b_{оп}/\Delta b$	$\bar{\sigma}_{ср}$
С задним натяжением								
$\xi_{0.пр} = 0,35625$, $\xi_1 = 1,0$	2,8070	1,3333	0	0	0	0,69851	0	3,2864
$\xi_0 = 0,5$, $\xi_1 = 1,0$	2,0000	1,2714	4,50	0,4241	0,1036	0,69992	0,1480	3,5586
$\xi_0 = 0,7$, $\xi_1 = 1,0$	1,4286	1,2225	5,63	0,5306	0,1924	0,70075	0,2746	3,7963
$\xi_0 = 0,8$, $\xi_1 = 1,0$	1,2500	1,2051	6,11	0,5759	0,2257	0,70096	0,3220	3,8546
$\xi_0 = 0,9$, $\xi_1 = 1,0$	1,1111	1,1904	6,33	0,5966	0,2544	0,70111	0,3629	3,9563
С симметричным натяжением								
$\xi_0 = 0,9$, $\xi_1 = 0,9$	1,0	1,1804	6,54	0,6164	0,1744	0,70119	0,3913	3,6621
С передним натяжением								
$\xi_0 = 1,0$, $\xi_1 = 0,9$	0,9	1,1679	6,84	0,6447	0,2998	0,70126	0,4275	3,7163
$\xi_0 = 1,0$, $\xi_1 = 0,8$	0,8	1,1571	7,16	0,6748	0,3221	0,70130	0,4593	3,8491
$\xi_0 = 1,0$, $\xi_1 = 0,7$	0,7	1,1453	7,55	0,7116	0,3470	0,70132	0,4948	3,0900
$\xi_0 = 1,0$, $\xi_1 = 0,6$	0,6	1,1322	7,67	0,7229	0,3753	0,70131	0,5351	2,8094
$\xi_0 = 1,0$, $\xi_1 = 0,5$	0,5	1,1174	8,07	0,7606	0,4079	0,70125	0,5817	2,5358
$\xi_0 = 1,0$, $\xi_{1.пр} = 0,03664$	0,0366	1,0000	10,61	1,0000	0,6985	0,69851	1,0000	1,7455

Таблица 3

Уширение Δb при прокатке полосы
($h_0 = 5$ мм, $b_0 = 40$ мм, $R = 150$ мм, $f = 0,2$), мм

Относительное обжатие ε			
0,10	0,15	0,20	0,25
С симметричным натяжением ($\xi_0 = \xi_1 = 0,9$)			
0,4460	0,6702	0,8952	1,1208
С предельным передним натяжением ($h_n = h_0$)			
0,4450	0,6679	0,8910	1,1145

Из приведенных результатов видно, что при увеличении относительного обжатия ε от 0,10 до 0,25 влияние предельного переднего натяжения на уширение становится достаточно ощутимым: при $\varepsilon = 0,10$ величина Δb уменьшается с 0,446 до 0,445 мм, а при $\varepsilon = 0,25$ – с 1,121 до 1,114 мм.

С использованием формулы (6) были рассчитаны необходимые предельные величины коэффициента переднего натяжения $\xi_{1.пр}$ полос толщиной $h_0 = 1 - 5$ мм из условия отсутствия зоны отставания при прокатке с относительными обжатиями $\varepsilon = 0,10 - 0,25$. При этом рассматривали варианты с полным отсутствием ($\xi_0 = 1,0$) и наличием небольшого ($\xi_0 = 0,9$) заднего напряжения.

Как показали результаты расчетов (табл. 4), при прокатке полосы толщиной $h_0 = 5$ мм без заднего натяжения с увеличением ε от 0,10 до 0,25 необходимая вели-

чина $\xi_{1.пр}$ уменьшается с 0,4034 до 0,0995. Прокатка с $\xi_{1.пр} = 1,0$ полосы толщиной $h_0 = 2$ мм возможна лишь с обжатиями $\varepsilon \leq 0,2$, для чего необходимо значение $\xi_{1.пр} \geq 0,0608$, а полосы толщиной $h_0 = 1$ мм – лишь с обжатиями $\varepsilon \leq 0,15$ при $\xi_{1.пр} \geq 0,0538$. В случае создания небольшого заднего натяжения ($\xi_0 = 0,9$) для поддержания условия отсутствия зоны отставания при $h_0 = 1 - 5$ мм и $\varepsilon = 0,10 - 0,25$ необходимо уменьшение $\xi_{1.пр}$ на 12 – 54 %. Однако прокатка с $\xi_{1.пр} < 0,05$, когда точность задания величины напряжения ограничена и напряжение распределено неравномерно по ширине прокатываемой полосы, создает риск утяжки металла.

Предлагается следующий критерий оптимальности процесса прокатки тонких узких полос, позволяющий минимизировать уширение при одновременном снижении среднего относительного нормального напряжения:

$$K_{опт} = \Delta b \bar{\sigma}_{ср} = \min. \quad (8)$$

С использованием значений Δb и $\bar{\sigma}_{ср}$ (см. табл. 2) по результатам расчетов была получена графическая зависимость произведения $\Delta b \bar{\sigma}_{ср}$ от отношения $l_{оп}/l$ (рис. 3).

Из рис. 3 видно, что для рассмотренной задачи холодной прокатки полосы с натяжением оптимальное значение критерия оптимальности $K_{опт} = \Delta b \bar{\sigma}_{ср} = 1,22$ соответствует режиму с предельным передним натяжением, когда зона отставания отсутствует.

Выводы. Проведенные исследования показали, что единственным способом минимизации уширения и силовых параметров при холодной прокатке тонкополо-

Таблица 4

Необходимая предельная величина коэффициента переднего натяжения $\xi_{l,пр}$ при холодной прокатке полос из условия отсутствия зоны отставания ($R = 150$ мм, $f = 0,2$)

$\varepsilon = 0,10$		$\varepsilon = 0,15$		$\varepsilon = 0,20$		$\varepsilon = 0,25$	
$\xi_0 = 1,0$	$\xi_0 = 0,9$	$\xi_0 = 1,0$	$\xi_0 = 0,9$	$\xi_0 = 1,0$	$\xi_0 = 0,9$	$\xi_0 = 1,0$	$\xi_0 = 0,9$
$h_0 = 1$ мм							
0,1419	0,1199	0,0539	0,0411	–	–	–	–
$h_0 = 2$ мм							
0,2497	0,2182	0,1416	0,1183	0,0608	0,0430	–	–
$h_0 = 3$ мм							
0,3181	0,2791	0,2029	0,1724	0,1123	0,0879	0,0366	0,0170
$h_0 = 4$ мм							
0,3665	0,3215	0,2486	0,2128	0,1529	0,1234	0,0708	0,0463
$h_0 = 5$ мм							
0,4034	0,3552	0,2845	0,2446	0,1859	0,1524	0,0995	0,0712

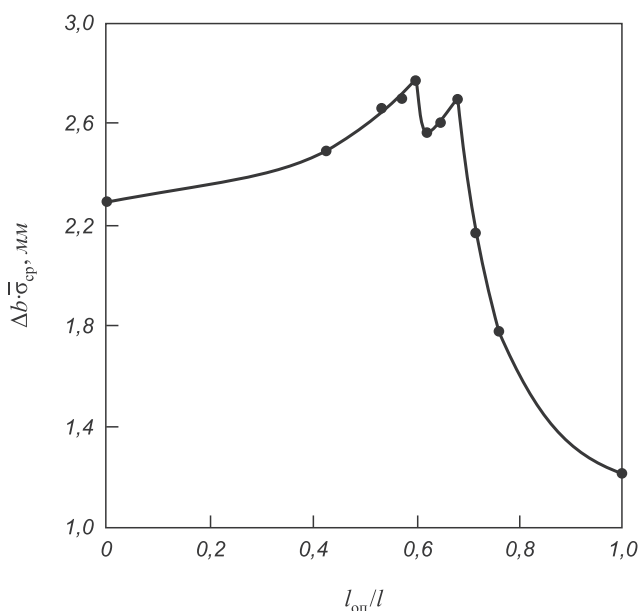


Рис. 3. Иллюстрация к определению значения критерия оптимальности процесса холодной прокатки тонкой полосы

сового металла является воздействием предельным передним натяжением на очаг деформации при отсутствии зоны отставания.

Предложенный критерий оптимальности процесса прокатки тонких полос позволяет минимизировать уширение при одновременном снижении среднего относительного нормального напряжения в очаге деформации.

При выборе режима прокатки следует обеспечивать величину предельного значения коэффициента переднего натяжения $\xi_{l,пр} > 0,05$ для обеспечения гарантии отсутствия утяжки прокатываемой полосы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теория прокатки: Справочник / Целиков А.И., Томленов А.Д., Зюзин В.И. и др. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.
2. Целиков А.И., Гришков А.И. Теория прокатки. – М.: Металлургия, 1970. – 358 с.
3. Полухин В.П. Математическое моделирование и расчет на ЭВМ листовых прокатных станов. – М.: Металлургия, 1972. – 512 с.
4. Лукашкин Н.Д., Кохан Л.С. Обработка металлов давлением. – М.: МГВМИ, 2006. – 424 с.
5. Листовая прокатка металлов и заготовок из металлических порошков / Л.С. Кохан, И.Г. Роберов, А.В. Алдунин, К.А. Гостев – М.: МГВМИ, 2008. – 224 с.
6. Шаталов Р.Л., Кохан Л.С., Карпов С.А. // Производство проката. 2007. № 6. С. 10 – 15.

© 2012 г. Л.С. Кохан, А.В. Алдунин
Поступила 6 апреля 2012 г.