



The theoretical explanation of the rolling process of straps of a variable on length of thickness on mobile profiled mandrel is presented. It is shown that generally the deformation center is divided into zones of settling, shift and an advance. At a certain proportion between degree of deformation and diameter of rollers braking of the latter occurs and in the deformation center just one zone of shift takes place.

М. И. СИДОРЕНКО, ОАО «МАЗ», Л. А. ИСАЕВИЧ, БНТУ

УДК 621.771.63

ПРОКАТКА ПОЛОС ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ ДЛЯ МАЛОЛИСТОВЫХ РЕССОР

Процесс изготовления заготовок малолистовых рессор, состоящих из полос переменной по длине толщины, заключается в том, что исходную полосу вначале нагревают, затем укладывают на ребро перед неприводными валками и далее движением оправки перпендикулярно линии центров валков осуществляют огибание последней полосой с двух сторон, после чего производят ее обжатие в зазоре между валками [1]. При этом за счет переменного сечения оправки по длине формируются ветви полосы переменной по длине толщины. После этого изогнутую профилированную

полосу снимают с оправки и специальным разгибным устройством распрямляют до плоскостности одной из ее сторон. Схема устройства прокатки полос по данному способу показана на рис. 1. С целью интенсивного охлаждения оправки для повышения ее стойкости она выполнена составной [2] и обдувается сжатым воздухом. Для уменьшения уширения концевых участков полосы на хвостовом участке оправки выполнены продольные канавки [3].

Рассмотрим задачу двумерной прокатки полосы на подвижной оправке в неприводных валках

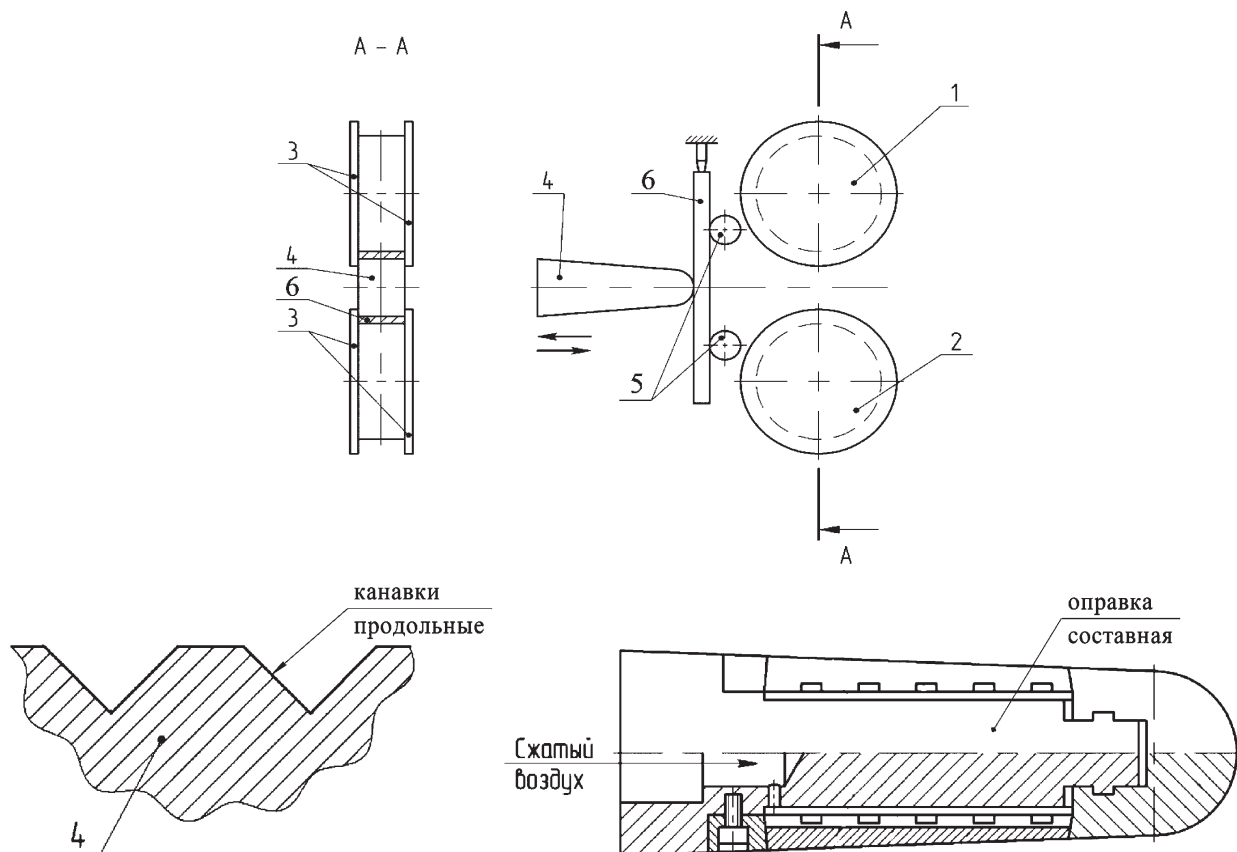


Рис. 1. Схема прокатки профиля на оправке: 1, 2 – валки; 3 – реборды; 4 – оправка; 5 – ролики; 6 – прокатываемая полоса

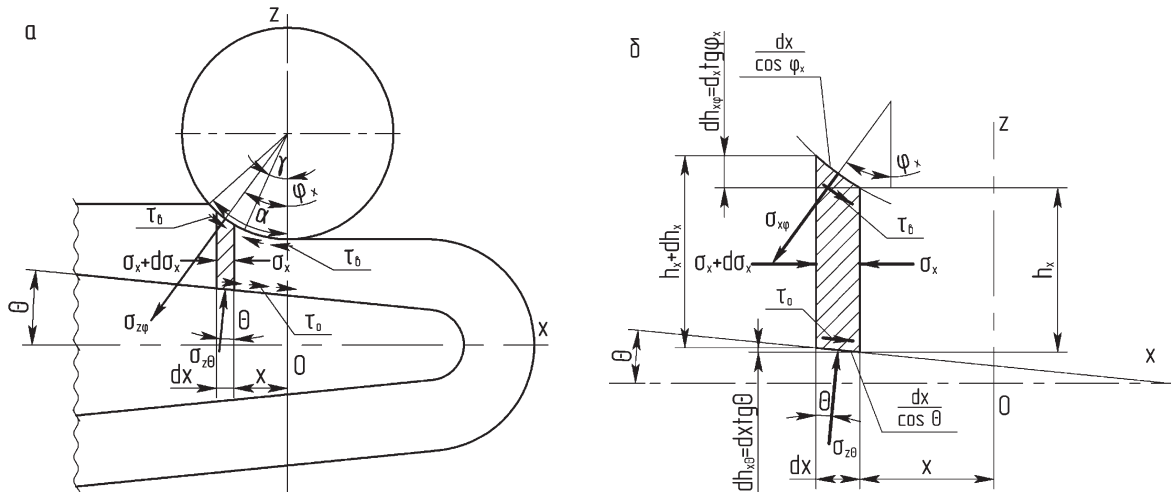


Рис. 2. Схема приложения сил в очаге деформации

(рис. 2). В анализе используем метод совместного решения приближенных дифференциальных уравнений равновесия и уравнения пластичности (метод плоских сечений). Уравнение равновесия сил на ось OX для зоны отставания запишем в виде

$$(\sigma_x + d\sigma_x)(h_x + dh_x) - \sigma_x h_x - \sigma_{z\varphi} \frac{dx}{\cos \varphi_x} \sin \varphi_x + \sigma_{z\Theta} \frac{dx}{\cos \Theta} \sin \Theta + \tau_b \frac{dx}{\cos \varphi_x} \cos \varphi_x + \tau_o \frac{dx}{\cos \Theta} \cos \Theta = 0.$$

Поскольку в зоне отставания при $\alpha > \theta$ величина $\varphi_x > \theta$, то, согласно рис. 2, можно принять, что $dh_x = dh_{x\varphi} - dh_{x\Theta}$. Тогда после преобразований дифференциального уравнения, пренебрегая бесконечно малыми величинами второго порядка, получаем

$$d\sigma_x h_x + \sigma_x dh_x - \sigma_z dh_x + \tau_b \frac{dx}{\text{tg } \varphi_x} + \tau_o \frac{dx}{\text{tg } \Theta} = 0. \quad (1)$$

Зададим условие трения по Амонтону [4] $\tau_b = \tau_o = f\sigma_z$, а значение $\text{tg } \varphi = \text{tg } \frac{\alpha + \gamma}{z}$. В связи с этим выражение (1) примет вид

$$d\sigma_x h_x - \sigma_x dh_x - \sigma_z dh_x + f\sigma_z dh_x \left(\frac{1}{\text{tg } \frac{\alpha + \gamma}{z}} + \frac{1}{\text{tg } \Theta} \right) = 0. \quad (2)$$

Введем обозначение

$$f \left(\frac{1}{\text{tg } \frac{\alpha + \gamma}{z}} + \frac{1}{\text{tg } \Theta} \right) = \delta_0.$$

Уравнение пластичности для нашего случая представим как

$$\sigma_z - \sigma_x = \beta\sigma_T. \quad (3)$$

Откуда $\sigma_x = \sigma_z - \beta\sigma_T$, а $d\sigma_x = d\sigma_z$. Тогда с учетом уравнения пластичности выражение (2) запишется в виде

$$d\sigma_z - (\sigma_z - \sigma_x) \frac{dh_x}{h_x} + \delta_0 \sigma_z \frac{dh_x}{h_x} = 0$$

или

$$d\sigma_z = (\beta\sigma_T - \delta_0 \sigma_z) \frac{dh_x}{h_x} = 0. \quad (4)$$

После интегрирования получим

$$\ln(\beta\sigma_T - \delta_0 \sigma_z) = -\delta_0 \ln h_x + C_0.$$

Отсюда

$$\beta\sigma_T - \delta_0 \sigma_z = +C_0 h_x^{-\delta_0}$$

или

$$\sigma_z = \frac{1}{\delta_0} (\beta\sigma_T - C_0 h_x^{-\delta_0}).$$

Постоянную интегрирования C_0 найдем из граничных условий, согласно которым при $h_x = h_0$ величина $\sigma_z = \beta\sigma_T$. Тогда $C_0 = \beta\sigma_T \left(1 - \frac{1}{\delta_0} \right) h_0^{\delta_0}$. Подставив значение постоянной интегрирования в предыдущее выражение, окончательно запишем для зоны отставания

$$\sigma_{zOT} = \frac{\beta\sigma_T}{\delta_0} \left[(\delta_0 - 1) \left(\frac{h_0}{h_x} \right)^{\delta_0} + 1 \right]. \quad (5)$$

Из рис. 2 видно, что в пределах угла γ касательные контактные напряжения на валке τ_b и оправке τ_o имеют разные направления и образуются так называемая зона сдвига. В силу этого дифференциальное уравнение (1) запишется в виде:

$$d\sigma_x h_x + \sigma_x dh_x - \sigma_z dh_x = 0.$$

С учетом уравнения пластичности (3) оно примет вид

$$d\sigma_z = \beta\sigma_T \frac{h_x}{h_x} = 0, \quad (6)$$

а после интегрирования

$$\sigma_z = \beta\sigma_T \ln h_x + C_1.$$

Постоянную интегрирования найдем из граничных условий, согласно которым при $h_x = h_1$ величина $\sigma_z = \beta\sigma_T$. Тогда $\beta\sigma_T = \beta\sigma_T \ln h_1 + C_1$. Отсюда $C_1 = \beta\sigma_T(1 - \ln h_1)$ и с учетом постоянной интегрирования последнее выражение для зоны сдвига запишем в виде

$$\sigma_{zC} = \beta\sigma_T \left(1 + \ln \frac{h_x}{h_1} \right). \quad (7)$$

Данная форма записи справедлива для случая предельного рассогласования окружной скорости вала и поступательной скорости перемещения оправки. Однако в этом случае процесс прокатки приобретает неустойчивый характер [1, 4, 5], в связи с чем для обеспечения стабильности данного процесса дополнительно требуется создание переднего натяжения, которое автоматически обеспечивается самой оправкой за счет огибания вокруг нее прокатываемой полосы. Тогда граничные условия в решении дифференциального уравнения (6) изменятся и станут таковыми, что при $h_x = h_1$, согласно условию пластичности, $\sigma_z = \beta\sigma_T - \sigma_{пер}$, где $\sigma_{пер}$ — напряжение переднего натяжения. В связи с этим постоянная интегрирования $C_1 = \beta\sigma_T(1 - \ln h_1) - \sigma_{пер}$, а нормальные контактные напряжения запишутся в виде

$$\sigma_{zC} = \beta\sigma_T \left(1 + \ln \frac{h_x}{h_1} \right) - \sigma_{пер}. \quad (8)$$

Для определения границы между зонами отставания и сдвига необходимо приравнять значения σ_z из выражений (5) и (8):

$$\frac{1}{\delta_0} \left[(\delta_0 - 1) \left(\frac{h_0}{h_x} \right)^{\delta_0} + 1 \right] = \left(1 + \ln \frac{h_x}{h_1} \right) - \frac{\sigma_{пер}}{\beta\sigma_T}.$$

Отсюда можно найти значение сечения $h_x = h_\gamma$, разделяющего эти зоны. Интегрируя выражения (5) и (8) в пределах изменения функций для каждой из зон, нетрудно определить средние значения нормальных контактных напряжений

$$\begin{aligned} \sigma_{срор} &= \frac{1}{h_0 - h_\gamma} \int_{h_\gamma}^{h_0} \frac{\beta\sigma_T}{\delta_0} \left[(\delta_0 - 1) \left(\frac{h_0}{h_x} \right)^{\delta_0} + 1 \right] dh_x = \\ &= \frac{\beta\sigma_T h_\gamma}{(h_0 - h_\gamma)\delta_0} \left[\left(\frac{h_0}{h_\gamma} \right)^{\delta_0} - 1 \right], \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{срC} &= \frac{1}{h_\gamma - h_1} \int_{h_1}^{h_\gamma} \left[\beta\sigma_T \left(1 + \ln \frac{h_x}{h_1} \right) - \sigma_{пер} \right] dh_x = \\ &= \frac{\beta\sigma_T h_\gamma}{(h_\gamma - h_1)} \left[h_\gamma \ln \frac{h_\gamma}{h_1} - \frac{\sigma_{пер}}{\beta\sigma_T} (h_\gamma - h_1) \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

Для определения среднего нормального контактного напряжения по всей длине очага деформации просуммируем уравнения (9) и (10):

$$\sigma_{ср} = \frac{\beta\sigma_T}{h_0 - h_1} \left\{ \frac{h_\gamma}{\delta_0} \left[\left(\frac{h_0}{h_\gamma} \right)^{\delta_0} - 1 \right] + h_\gamma \ln \frac{h_\gamma}{h_1} - \frac{\sigma_{пер}}{\beta\sigma_T} (h_\gamma - h_1) \right\}. \quad (11)$$

Анализируя процесс прокатки полос на профилированной оправке, нетрудно заметить, что при определенных углах наклона рабочего профиля оправки к направлению ее перемещения возможно появление зоны опережения одновременно на валах и оправке. В этом случае переднее натяжение отсутствует и полоса на выходе из очага деформации скользит относительно оправки в направлении ее перемещения. Тогда дифференциальное уравнение (2) в соответствии с [4] запишется в виде

$$d\sigma_x h_x - \sigma_x dh_x - \sigma_z dh_x + f\sigma_z dh_x \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \frac{\gamma}{2}} + \frac{1}{\operatorname{tg} \Theta} \right) = 0. \quad (12)$$

Обозначим $f \left(\frac{1}{\operatorname{tg} \frac{\gamma}{2}} + \frac{1}{\operatorname{tg} \Theta} \right) = \delta_1$. В связи с этим выражение (12) с учетом (3) примет вид

$$d\sigma_z = (\beta\sigma_T + \delta_1\sigma_z) \frac{dh_x}{h_x}. \quad (13)$$

После его интегрирования получим $\ln(\beta\sigma_T + \delta_1\sigma_z) = \delta_1 \ln h_x + C_1$. Отсюда $\beta\sigma_T + \delta_1\sigma_z = C_1 h_x^{\delta_1}$ или $\sigma_z = \frac{1}{\delta_1} (-\beta\sigma_T + C_1 h_x^{\delta_1})$.

Постоянную интегрирования найдем из граничных условий, согласно которым при $h_x = h_1$ величина $\sigma_z = \beta\sigma_T$. Тогда $C_1 = \beta\sigma_T(1 + \delta_1)h_1^{-\delta_1}$ и далее с учетом постоянной интегрирования предыдущее выражение примет вид

$$\sigma_{z0} = \frac{\beta\sigma_T}{\delta_1} \left[(\delta_1 + 1) \left(\frac{h_x}{h_1} \right)^{\delta_1} - 1 \right]. \quad (14)$$

С целью установления границы между зонами сдвига и опережения приравняем выражения (7) и (14):

$$1 + \ln \frac{h_x}{h_1} = \frac{1}{\delta_1} \left[(\delta_1 + 1) \left(\frac{h_x}{h_1} \right)^{\delta_1} - 1 \right].$$

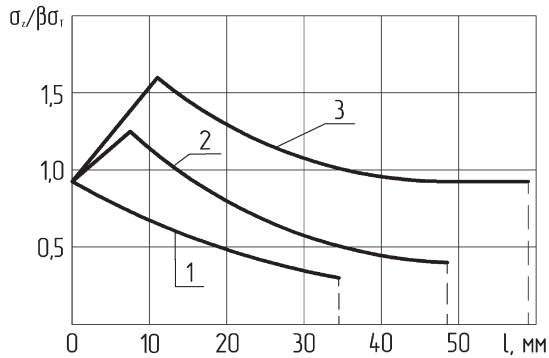


Рис. 3. Распределение нормальных контактных напряжений σ_x в очаге деформации при $f = 0,3$ и предельной степени деформации $\epsilon_{пр} = 0,545$ для случая прокатки в валках диаметром: 1 – $D_b = 100$ мм; 2 – 200; 3 – 300 мм

Отсюда найдем значение $h_x = h_{\gamma 1}$. Однако, учитывая, что протяженность зоны опережения по сравнению с зонами отставания и сдвига незначительна, ею вполне можно пренебречь. Кроме того, при известных параметрах прокатываемых полосовых заготовок для малолистовых рессор автомобилей такая ситуация практически не встречается.

На рис. 3 показано распределение нормальных контактных напряжений, по данным, рассчитанным с помощью выражений (5) и (7) для случая прокатки полос на оправке в валках разного диаметра при коэффициенте контактного трения $f = 0,3$ и предельной степени деформации $\epsilon_{пр} = 0,545$, которую определяли как $\frac{h_0 - h_1}{h_0}$. При этом длину очага деформации определяли из соотношения $l = \frac{\alpha D_b}{2}$, а значение $\alpha = \sqrt{2(h_0 - h_1) / D_b}$. Из рисунка видно, что с увеличением диаметра валков растет протяженность очага деформации и относительных значений нормальных контактных напряжений. С уменьшением диаметра валков резко снижается протяженность зоны отставания и при диаметре $D_b = 100$ мм она вовсе исчезает. Валки в это время останавливаются и прокатка переходит в режим волочения. Значение предельной степени деформации $\epsilon_{пр} = 0,545$ достигается при $h_0 = 22$ мм и $h_1 = 10$ мм. При этом для данного диаметра валков угол прокатки составляет $\alpha = 0,49$.

Известно [4, 5], что вращение холостого валка при прокатке возможно, когда соблюдается условие $\gamma = \alpha/2$. Это значит, что касательные контактные напряжения в зоне опережения играют активную роль по отношению к валку и с увеличением обжатия протяженность этой зоны возрастает до значения, при котором выполняется условие $\gamma = \alpha$. В этот момент наступает торможение валка.

Согласно [4, 5], при установившемся процессе прокатки в приводных валках $\alpha = 2\alpha_3$, где α_3 – угол

захвата заготовки, связанный соотношением $\alpha_3 \leq \arctg f$. При обжатии в неприводных валках, когда $\gamma \geq \alpha/2$, резерв потенциальных сил контактного трения, обеспечивающих вращение валкам, находится лишь в зоне отставания. Поэтому фактически условие вращения валков можно записать как $\alpha \leq \arctg f$. В нашем случае при максимальном обжатии на концах полосы $\epsilon_{пр} = 0,545$ валками диаметром 100 мм угол прокатки $\alpha = 0,49$, а коэффициент контактного трения $f = 0,3$. Поэтому указанное выше неравенство не выполняется, поскольку левая его часть α становится больше правой. Усилие, действующее на валки (усилие прокатки), определим по формуле

$$P_{пр} = \sigma_{ср} F_0 \quad (15)$$

Здесь $F = lB$, где l – длина проекции дуги прокатки на направление движения оправки; B – ширина полосы.

Подставив сюда значение $\sigma_{ср}$ из (11), получим

$$P_{пр} = \frac{\beta \sigma_T l B}{h_0 - h_1} \left\{ \frac{h_\gamma}{\delta_0} \left[\left(\frac{h_0}{h_\gamma} \right)^{\delta_0} - 1 \right] + h_\gamma \ln \frac{h_\gamma}{h_1} - \frac{\sigma_{пер}}{\beta \sigma_T} (h_\gamma - h_1) \right\} \quad (16)$$

На рис. 4 показано изменение усилия прокатки по мере нарастания обжатия в валках разного диаметра. Из рисунка видно, что при нарастании обжатия до некоторого момента усилие прокатки увеличивается сначала интенсивно, а затем медленно. Объясняется это тем, что при обжатии, близком к предельному, резко снижается протяженность зоны опережения и увеличивается зона сдвига.

При прокатке в валках $D_b = 100$ мм и малых обжатиях полосы валки имеют возможность вращения с наличием зоны отставания и кривые усилия интенсивно возрастают. По достижении степени деформации $\epsilon = 0,21$ происходит торможение валков и процесс прокатки переходит в волочение. В связи с этим в очаге деформации образуется

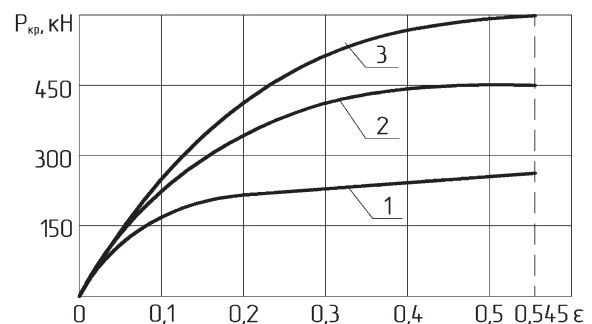


Рис. 4. Изменение значений усилия прокатки полосы шириной $B = 90$ мм из стали 60С2А (температура прокатки 980 °С; $\sigma_T = 100$ МПа; $f = 0,3$) в валках разного диаметра: 1 – $D_b = 100$ мм; 2 – 200; 3 – 300 мм

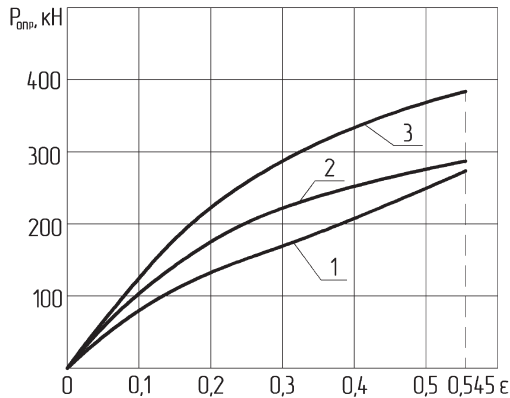


Рис. 5. Изменение толкающего оправку усилия в зависимости от степени деформации полосы $B = 90$ мм из стали 60С2А при горячей прокатке (температура прокатки $980\text{ }^\circ\text{C}$; $\sigma_T = 100$ МПа; $f = 0,3$) в валках разного диаметра: 1 – $D_{\text{в}} = 100$ мм; 2 – 200; 3 – 300 мм

лишь одна зона сдвига. Поэтому интенсивность нарастания усилия прокатки снижается.

В момент перехода прокатки в волочение при остановке валков возникает переднее натяжение полосы, чтобы компенсировать реактивные силы касательных контактных напряжений на бочке заторможенного валка. Величину усилия натяжения в одной ветви полосы можно определить из соотношения

$$P_{\text{пер}} = f\beta\sigma_T l B. \quad (17)$$

Отсюда нетрудно найти напряжение натяжения

$$\sigma_{\text{пер}} = \frac{f\beta\sigma_T l}{h_1}. \quad (18)$$

Толкающее усилие на оправке с учетом одновременной прокатки двух ветвей полосы определим по формуле

$$P_{\text{опр}} = 2[P_{\text{пр}}(\text{tg } \theta + f) + \sigma_{\text{пер}} B h_1]. \quad (19)$$

Решая (19) совместно с (18), окончательно запишем

$$P_{\text{опр}} = 2[P_{\text{пр}}(\text{tg } \theta + f) + f\beta\sigma_T l B]. \quad (20)$$

На рис. 5 показано изменение значений толкающего усилия на оправке при горячей прокатке полосы шириной $B = 90$ мм из стали 60С2А в зависимости от степени ее деформации. Данные рассчитаны с помощью выражения (20).

Из рисунка видно, что при прокатке в валках диаметром 200 мм и более толкающее усилие на оправке с ростом степени деформации монотонно увеличивается при падении интенсивности нарастания. Однако для случая прокатки в валках $D_{\text{в}} = 100$ мм по достижении степени деформации $\varepsilon = 0,21$ характер кривой резко изменяется, что можно объяснить остановкой валков при данной степени деформации и переходом процесса прокатки в режим волочения. Это, в свою очередь, приводит к возникновению переднего натяжения полосы.

Выводы

Анализ процесса прокатки полосы на подвижной оправке в неприводных валках показал, что до определенного соотношения между степенью деформации и диаметром валков в очаге деформации имеют место зоны отставания, сдвига и опережения. С увеличением этого соотношения выше некоторого значения в очаге деформации остается только одна зона сдвига. Усилие прокатки при этом существенно уменьшается.

Литература

1. Степаненко А. В. Прокатка полос переменного профиля / А. В. Степаненко, В. А. Король, Л. А. Смирнова. Гомель: ИММИ НАН Беларуси, 2001.
2. Устройство для изготовления заготовки изделия с переменным по длине профилем: Пат. № 14975 Респ. Беларусь; МПК В21Н8/00/ Л. А. Исаевич, В. А. Король, Л. М. Березнев, М. И. Сидоренко, Д. М. Иваницкий, Г. В. Костенко, А. Н. Сидоренко; заявитель БНТУ. №а20091118; заявл. 23.07.2009; опубл. // Афіцыйны бюл./ Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2011. № 1. С. 63.
3. Способ изготовления заготовки изделий с переменным по длине профилем и устройство для его осуществления: Пат. № 8843 Респ. Беларусь, МПК7 В21Н7/00/ Л. А. Исаевич, М. И. Сидоренко, А. Г. Герасимова, Л. М. Березнев, М. Н. Крупко; заявитель БНТУ. № а20030941; заявл. 14.10.2003; опубл. // Афіцыйны бюл./ Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2007. № 5. С. 89–90.
4. Целиков А. И. Теория продольной прокатки / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. М.: Металлургия, 1980.
5. Выдрин В. Н. Динамика прокатных станов. Свердловск: Металлургиздат, 1960.