

**ИЗМЕНЕНИЕ ПЛЕЧА РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕЙ СИЛЫ ДАВЛЕНИЯ  
МЕТАЛЛА НА ВАЛКИ ПРИ ЗАХВАТЕ НЕРОВНОЙ КРОМКИ ПОЛОСЫ***ИЧМ НАН Украины, ОАО «Запорожсталь»*

Представлены результаты теоретического исследования влияния формы передней кромки полосы на изменение плеча результирующей силы давления металла на валки при захвате. Приведены формулы для определения плеча результирующей и силы давления металла на валки при заполнении очага деформации передним концом полосы трапецидальной формы.

**Современное состояние вопроса.**

Значительные динамические нагрузки при захвате в приводах клетей широкополосных станов горячей прокатки являются фактором, ограничивающим возможности расширения сортамента, увеличения производства и требующим существенных эксплуатационных затрат. Несмотря на значительную изученность этого фактора и наличие эффективных решений по уменьшению его воздействия, проблема уменьшения величин динамических нагрузок при захвате остаётся актуальной.

Основной причиной возникновения значительных динамических нагрузок при захвате полосы является особый (увеличенный при захвате) характер нарастания момента технологического сопротивления. Это явление было впервые обнаружено при экспериментальном и теоретическом исследовании стана 2800 ОАО «Запорожсталь» [1]. Увеличение момента технологического сопротивления объясняется тем, что перед захватом просвет между валками меньше толщины готовой полосы на величину, равную деформации рабочей клетки под действием усилия прокатки. Уменьшенный зазор между валками приводит к увеличению плеча результирующей силы давления металла на валки  $\eta$  относительно плоскости расположения осей валков и к увеличению момента при захвате. Кроме того, по мере заполнения очага деформации затрачивается значительная работа на растяжение подъём масс станины и установленного на ней оборудования. Эти причины приводят к усиленному обжатию переднего конца полосы и существенному увеличению момента технологического сопротивления.

При обнаружении этого явления было высказано предположение, что оно «... по-видимому, наблюдается и на других станах, в том числе и на станах горячей прокатки листов» [1]. Последующие экспериментальные исследования подтвердили это предположение, а приведенные в работе [2] результаты моделирования показывают, что в чистовых клетях станов 1680 и 1700 горячей прокатки коэффициент увеличения момента технологического сопротивления  $K_{ув}$  (отношение максимального момента технологического сопротивления к номинальному) по клетям существенно

возрастает. Увеличение соотношения жёсткости полосы и жёсткости чистовой клетки является основным фактором, который оказывает существенное влияние на  $K_{ув}$  и характер изменения момента технологического сопротивления [3].

В последних клетях коэффициент  $K_{ув}$  имеет наибольшие значения, но это не приводит к пропорциональному увеличению  $K_{д}$ . Известно [1,3], что большие значения  $K_{ув}$  не всегда вызывают существенное увеличение динамических нагрузок. В то же время в группе чистовых клеток имеются две–три промежуточные клетки, в которых увеличенный при захвате момент технологического сопротивления в наибольшей степени влияет на динамические нагрузки привода. Сочетание достаточно больших давления и скорости прокатки а также неблагоприятное соотношение периода свободных колебаний низшей частоты и продолжительности действия увеличенного момента сопротивления, способствуют тому, что эти клетки более восприимчивы к увеличенному моменту сопротивления даже при сравнительно небольшом значении  $K_{ув}$ . Теоретическим исследованием [2] установлено, что для стана 1680 горячей прокатки наиболее чувствительной к влиянию увеличенного при захвате момента технологического сопротивления на динамические нагрузки привода является третья клеть чистовой группы (№ 7).

#### **Постановка задачи.**

Многофакторная зависимость формирования закона изменения момента сил сопротивления не позволяет сформулировать общую закономерность для всех случаев. Характер формирования момента технологического сопротивления во время захвата определяется соотношением жесткостей клетки и листа [3], величиной деформации клетки и скоростью прокатки [1]. В первых исследованиях [4] влияния увеличенного при захвате момента технологического сопротивления на величину динамических нагрузок показано, что реакция системы привода существенно зависит от совпадения во времени первого максимума колебаний момента (первого полупериода колебаний) и зоны наибольших значений момента технологического сопротивления при захвате. Именно в этот момент возникают наибольшие динамические нагрузки привода. Этот важный фактор необходимо изучать и оценивать при исследованиях. В той же работе показано, что при увеличении скорости прокатки влияние указанного фактора может уменьшаться. Влияние увеличенного при захвате момента технологического сопротивления на динамическую составляющую сил упругости в приводе прокатной клетки может достигать 500% [5] и во многом зависит от степени открытия зазоров, их максимальной величины и формы переднего конца полосы [6–9]. Динамические нагрузки привода в значительной степени определяются скоростью соударения масс в момент замыкания зазора.

### Изложение основных материалов исследования.

Принимая среднее удельное давление  $p_{cp}$  при захвате постоянным, величина которого определяется из условий установившегося процесса прокатки, и направление вектора полного давления вертикальным, получим текущие значения результирующей силы давления металла на валки  $P$  и момента технологического сопротивления  $M_{tc}$  в функции угла поворота рабочего валка  $\varphi_2$  [3]:

$$P(\varphi_2) = p_{cp} F(\varphi_2) \quad (1)$$

$$M_{tc}(\varphi_2) = 2 P(\varphi_2) \eta(\varphi_2) \quad (2)$$

где  $F(\varphi_2)$  – текущее значение площади контакта металла с валком;

$\eta(\varphi_2)$  – плечо результирующей силы давления металла на валки  $P$ .

Из формулы (2) видно, что  $\eta(\varphi_2)$  является параметром, определяющим характер изменения и величину  $M_{tc}(\varphi_2)$  при захвате. При установившемся процессе прокатки и для постоянного среднего удельного давления  $p_{cp}$  в очаге деформации величина  $\eta$  принимается равной половине длины очага деформации.

При захвате прямой кромки полосы величина  $\eta(\varphi_2)$  определяется положением середины дуги контакта металла с валком относительно плоскости расположения осей валков. Причём начальная величина  $\eta$  определяется точкой начала контакта металла с валком и зависит от радиуса валка  $r$ , абсолютного обжатия  $\Delta h$  при установившемся процессе прокатки и податливости клетки, учитываемой для чистовых клетей стана горячей прокатки полосы при установлении начального зазора между валками. По мере заполнения очага деформации величина  $\eta(\varphi_2)$  уменьшается до начала установившегося процесса прокатки вследствие приближения середины дуги контакта металла с валком к плоскости осей валков и увеличения расстояния между ними (рис.1).

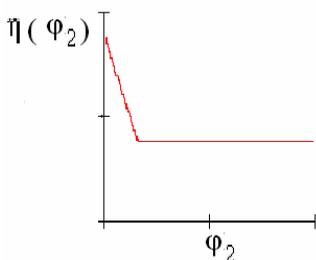


Рис.1. Характер зависимости плеча  $\eta$  результирующей силы давления металла на валки относительно плоскости расположения осей валков от угла поворота рабочего валка  $\varphi_2$ .

При захвате неровной в плане передней кромки, например трапецидальной (рис.2), расположение плеча результирующей силы давления металла на валки определяется уже не серединой дуги контакта металла с валком, а расположением равнодействующей давления на площади контакта. Величина  $\eta(\varphi_2)$  по мере заполнения очага деформации будет уменьшаться и достигнет наимень-

шего значения (при установившемся процессе прокатки) позже, чем при захвате прямой передней кромки. Следовательно, формирование внешней нагрузки на валки зависит от функции  $\eta(\varphi_2)$ , определяемой формой переднего конца полосы.

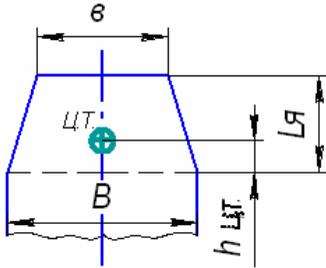


Рис.2. Трапецидальная форма передней кромки полосы:  $в$  и  $В$  – начальная и полная ширина полосы;  $L_я$  – длина передней кромки (высота трапеции);  $h_{ЦТ}$  – расстояние до центра тяжести.

В настоящее время влияние формы переднего неровного конца полосы на изменение плеча результирующей силы давления металла на валки изучено недостаточно [8]. Целью настоящей работы является исследование особенностей изменения плеча равнодействующей силы давления металла на валки при захвате неровной передней кромки и оценка необходимости учёта особенностей формирования внешней нагрузки для чистовой клетки широкополосного стана горячей прокатки.

Исследование проводилось для чистовой клетки № 7 стана 1680 горячей прокатки (как для наиболее чувствительной к влиянию увеличенного при захвате момента технологического сопротивления на динамические нагрузки привода [2]) при одном из характерных для данного стана режиме прокатки (модуль жёсткости рабочей клетки  $C = 4400$  кН/мм; радиус рабочих валков  $r = 300$  мм; полная ширина полосы  $B = 1250$  мм; начальная толщина полосы  $h_0 = 8,12$  мм; абсолютное обжатие  $\Delta h = 2,29$  мм;  $P_{уст} = 11800$  кН). Для упрощения расчётов форма переднего конца полосы была принята трапецидальной (рис.2).

Реально зафиксированные на стане 1680 горячей прокатки длины неровных передних концов перед первой чистовой клетью (№ 5) достигают 80...180 мм [5]. Учитывая исходную толщину полосы перед чистовой группой клетей для данного режима  $h_n = 21,5$  мм и  $h_0 = 8,12$  мм, длина переднего конца полосы перед клетью № 7 при расчётах принята  $L_я = 350$  мм.

Ниже приведены формулы для определения плеча  $\eta(\varphi_2)$  результирующей силы давления металла на валки  $P(\varphi_2)$  при заполнении очага деформации прямой и трапецидальной кромками переднего конца полосы. Приняты следующие обозначения:  $\alpha_{ож}$  – угол захвата для жёсткой клетки;  $\alpha_0$  – начальный угол захвата для упругой клетки;  $\varphi_{2зап}$  – угол поворота рабочего валка до момента начала выхода металла из очага деформации;  $\lambda$  – вытяжка металла в очаге деформации;  $k$  – отношение начальной ширины полосы  $в$  к полной ширине  $B$  (в расчётах принято  $k = 0,2$ ).

Прямая кромка. Характерные моменты заполнения очага деформации приведены на рис.3.

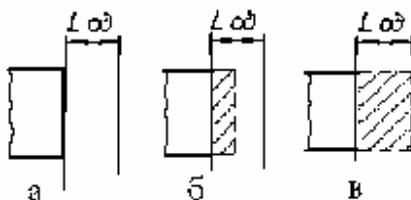


Рис.3. Этапы захвата полосы: а – контакт металла с валком; б – заполнение очага деформации; в – конец заполнения очага деформации и начало выхода из него проката.

Для клетки, принятой абсолютно жесткой, при диапазоне  $\varphi_2$  :

$$0 \leq \varphi_2 \leq \alpha_{0ж} ,$$

$$\eta(\varphi_2) = r \times \left( \alpha_{0ж} - \frac{\varphi_2}{2} \right) ,$$

$$P(\varphi_2) = p_{cp} \times B \times r \times \varphi_2 .$$

С учетом податливости клетки при диапазоне  $\varphi_2$  :  $0 \leq \varphi_2 \leq \varphi_{2зан}$  :

$$\eta(\varphi_2) = r \times \left[ \alpha_0 - \left( \alpha_0 - \frac{\alpha_{0ж}}{2} \right) \times \frac{\varphi_2}{\varphi_{2зан}} \right]$$

$$P(\varphi_2) = p_{cp} \times B \times r \times \varphi_2 \times \frac{\alpha_{0ж}}{\varphi_{2зан}}$$

С учетом податливости клетки и вытяжки металла при диапазоне  $\varphi_2$ :

$$0 \leq \varphi_2 \leq \frac{\varphi_{2зан}}{\lambda}$$

$$\eta(\varphi_2) = r \times \left[ \alpha_0 - \left( \alpha_0 - \frac{\alpha_{0ж}}{2} \right) \times \frac{\lambda \times \varphi_2}{\varphi_{2зан}} \right]$$

$$P(\varphi_2) = p_{cp} \times B \times r \times \varphi_2 \times \lambda \times \frac{\alpha_{0ж}}{\varphi_{2зан}}$$

Тrapeцеидальная кромка. Первый этап заполнения очага деформации. Характерные моменты заполнения очага деформации приведены на рис.4.

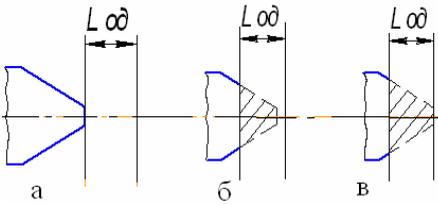


Рис.4. Этапы захвата полосы: а – контакт металла с валком; б – заполнение очага деформации; в – начало выхода металла из очага деформации.

Для клетки, принятой абсолютно жесткой, при диапазоне  $\varphi_2$ :  
 $0 \leq \varphi_2 \leq \alpha_{0жс}$

$$\eta(\varphi_2) = r \times \left[ \alpha_{0жс} - \frac{\varphi_2}{3} \times \frac{0,5 \times B l(\varphi_2) + k \times B}{0,5 \times [B l(\varphi_2) + k \times B]} \right]$$

$$P(\varphi_2) = p_{cp} \times B \times G(\varphi_2) \times r \times \varphi_2$$

С учетом податливости клетки при диапазоне  $\varphi_2$ :  $0 \leq \varphi_2 \leq \varphi_{2зан}$

$$\eta(\varphi_2) = r \times \left[ \alpha_0 - \frac{\varphi_2}{3} \times \frac{0,5 \times B l(\varphi_2) + k \times B}{0,5 \times [B l(\varphi_2) + k \times B]} \right]$$

$$P(\varphi_2) = p_{cp} \times \frac{B l(\varphi_2) + k \times B}{2} \times r \times \varphi_2 \times K_{\Delta}$$

С учетом податливости клетки и вытяжки металла при диапазоне  $\varphi_2$ :  
 $0 \leq \varphi_2 \leq \frac{\varphi_{2зан}}{\lambda}$

$$\eta(\varphi_2) = r \times \left[ \alpha_0 - \frac{\varphi_2 \times \lambda}{3} \times \frac{0,5 \times B l(\varphi_2) + k \times B}{0,5 \times [B l(\varphi_2) + k \times B]} \right]$$

$$P(\varphi_2) = p_{cp} \times \frac{B l(\varphi_2) + k \times B}{2} \times r \times \varphi_2 \times K_{\Delta}$$

Трапецидальная кромка. Второй этап заполнения очага деформации.  
 Характерные моменты заполнения очага деформации приведены на рис.5.

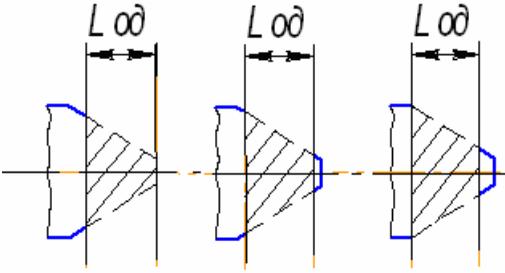


Рис.5. Этапы захвата полосы: а – начало выхода металла из очага деформации средней частью переднего конца; б – заполнение очага деформации; в – начало входа в очаг деформации полной ширины полосы.

Для клетки, принятой абсолютно жесткой, при диапазоне  $\varphi_2$ :

$$\alpha_{0\text{вс}} \leq \varphi_2 \leq \frac{L_{\text{я}}}{r}$$

$$\eta(\varphi_2) = r \times \left[ \alpha_{0\text{вс}} - \frac{1}{3} \times \sqrt{\frac{\Delta h}{r}} \times \frac{0,5 \times B1(\varphi_2) + B2(\varphi_2)}{0,5 \times [B1(\varphi_2) + B2(\varphi_2)]} \right]$$

$$P(\varphi_2) = p_{cp} \times B \times \frac{J(\varphi_2) + G(\varphi_2)}{2} \times \sqrt{r \times \Delta h}$$

С учетом податливости клетки при диапазоне  $\varphi_2$ :

$$\varphi_{2\text{зан}} \leq \varphi_2 \leq \frac{L_{\text{я}}}{r}$$

$$\eta(\varphi_2) = r \times \left[ \alpha_0 - \frac{\varphi_{2\text{зан}}}{3} \times \frac{0,5 \times B1(\varphi_2) + B3(\varphi_2)}{0,5 \times [B1(\varphi_2) + B3(\varphi_2)]} \right]$$

$$P(\varphi_2) = p_{cp} \times \frac{B1(\varphi_2) + B3(\varphi_2)}{2} \times r \times \varphi_2 \times K_N$$

С учетом податливости клетки и вытяжки металла при диапазоне  $\varphi_2$ :

$$\varphi_{2\text{зан}} \leq \varphi_2 \leq \frac{L_{\text{я}}}{r}$$

$$\eta(\varphi_2) = r \times \left[ \alpha_0 - \frac{\varphi_{2\text{зан}}}{3} \times \frac{0,5 \times B1(\varphi_2) + B3(\varphi_2)}{0,5 \times [B1(\varphi_2) + B3(\varphi_2)]} \right]$$

$$P(\varphi_2) = p_{cp} \times \frac{B1(\varphi_2) + B3(\varphi_2)}{2} \times r \times \varphi_2 \times K_{\Delta}$$

Трапецидальная кромка. Третий этап заполнения очага деформации.  
Характерные моменты заполнения очага деформации приведены на рис.6.

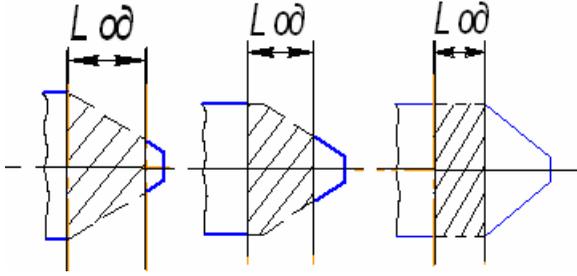


Рис.6. Этапы захвата полосы: а – начало входа в очаг деформации полной ширины полосы; б – заполнение очага деформации полной ширины полосы; в – начало выхода из очага деформации полной ширины полосы.

Для клетки, принятой абсолютно жесткой, при диапазоне  $\varphi_2$ :

$$\frac{L_{\text{я}}}{r} \leq \varphi_2 \leq \alpha_{\text{выс}} + \frac{L_{\text{я}}}{r}$$

$$\eta(\varphi_2) = r \times \left[ \alpha_{\text{ржс}} - \left( \alpha_{\text{ржс}} - \frac{\alpha_{\text{выс}}}{2} \right) \times \frac{\varphi_2 - \frac{L_{\text{я}}}{r}}{\alpha_{\text{выс}}} \right]$$

$$P(\varphi_2) = p_{\text{ср}} \times B \times \left\{ K(\varphi_2) + \frac{1 + J(\varphi_2)}{2} \times \left[ \sqrt{r \times \Delta h} - K(\varphi_2) \right] \right\}$$

С учетом податливости клетки при диапазоне  $\varphi_2$ :  $\frac{L_{\text{я}}}{r} \leq \varphi_2 \leq \varphi_{2\text{зан}} + \frac{L_{\text{я}}}{r}$

$$\eta(\varphi_2) = r \times \left[ \alpha_{\text{рн}}(\varphi_2) - \left( \alpha_{\text{рн}}(\varphi_2) - \frac{\alpha_{\text{выс}}}{2} \right) \times \frac{\varphi_2 - \frac{L_{\text{я}}}{r}}{\varphi_{2\text{зан}}} \right]$$

$$P(\varphi_2) = p_{\text{ср}} \times \frac{B1(\varphi_2) + B3(\varphi_2)}{2} \times r \times \varphi_2 \times K_{\Delta}$$

С учетом податливости клетки и вытяжки металла при диапазоне  $\varphi_2$ :

$$\frac{L_{\text{я}}}{r} \leq \varphi_2 \leq \frac{\varphi_{2\text{зан}}}{\lambda} + \frac{L_{\text{я}}}{r}$$

$$\eta(\varphi_2) = r \times \left[ \alpha_{\text{рнд}}(\varphi_2) - \left( \alpha_{\text{рнд}}(\varphi_2) - \frac{\alpha_{\text{выс}}}{2} \right) \times \frac{\varphi_2 - \frac{L_{\text{я}}}{r}}{\frac{\varphi_{2\text{зан}}}{\lambda}} \right]$$

$$P(\varphi_2) = p_{\text{ср}} \times \frac{B1(\varphi_2) + B4(\varphi_2)}{2} \times r \times \varphi_2 \times K_{\Delta}$$

Расчеты выполнены с использованием следующих зависимостей:

$$\begin{aligned}
 B1(\varphi_2) &= \begin{cases} k \times B + (B - k \times B) \frac{\varphi_2}{\frac{L_{\text{я}}}{r}} & \text{при } 0 \leq \varphi_2 \leq \frac{L_{\text{я}}}{r} \\ B & \text{при } \frac{L_{\text{я}}}{r} \leq \varphi_2 \end{cases} \\
 B2(\varphi_2) &= \begin{cases} k \times B + (B - k \times B) \frac{\varphi_2 - \alpha_{0\text{жс}}}{\frac{L_{\text{я}}}{r}} & \text{при } \alpha_{0\text{жс}} \leq \varphi_2 \leq \varphi_{2\text{занжс}L_{\text{я}}} \\ B & \text{при } \varphi_{2\text{занжс}L_{\text{я}}} \leq \varphi_2 \end{cases} \\
 B3(\varphi_2) &= \begin{cases} k \times B + (B - k \times B) \frac{\varphi_2 - \alpha_0}{\frac{L_{\text{я}}}{r}} & \text{при } \alpha_0 \leq \varphi_2 \leq \varphi_{2\text{зан}L_{\text{я}}} \\ B & \text{при } \varphi_{2\text{зан}L_{\text{я}}} \leq \varphi_2 \end{cases} \\
 B33(\varphi_2) &= \begin{cases} k \times B + (B - k \times B) \frac{\varphi_2 - \varphi_{2\text{зан}}}{\frac{L_{\text{я}}}{r}} & \text{при } \varphi_{2\text{зан}} \leq \varphi_2 \leq \varphi_{2\text{зан}L_{\text{я}}} + \frac{L_{\text{я}}}{r} \\ B & \text{при } \varphi_{2\text{зан}L_{\text{я}}} + \frac{L_{\text{я}}}{r} \leq \varphi_2 \end{cases} \\
 B4(\varphi_2) &= \begin{cases} k \times B + (B - k \times B) \frac{\varphi_2 - \frac{\varphi_{2\text{зан}}}{\lambda}}{\frac{L_{\text{я}}}{r}} & \text{при } \frac{\varphi_{2\text{зан}}}{\lambda} \leq \varphi_2 \leq \frac{\varphi_{2\text{зан}L_{\text{я}}}}{\lambda} + \frac{L_{\text{я}}}{r} \\ B & \text{при } \frac{\varphi_{2\text{зан}L_{\text{я}}}}{\lambda} + \frac{L_{\text{я}}}{r} \leq \varphi_2 \end{cases}
 \end{aligned}$$

$$\alpha_{\text{pn}}(\varphi_2) = \alpha_0 - \frac{\varphi_{2\text{зан}}}{3} \times \frac{0,5 \times B1(\varphi_2) + B3(\varphi_2)}{0,5 \times [B1(\varphi_2) + B3(\varphi_2)]}$$

$$K_{\Delta} = \frac{\alpha_{0\text{жс}}}{\frac{\varphi_{2\text{зан}}}{\lambda} + \frac{L_{\text{я}}}{r}}$$

$$\alpha_{\text{пнв}}(\varphi_2) = \alpha_0 - \frac{\varphi_{2\text{зан}}}{3} \times \frac{0,5 \times B1(\varphi_2) + B5(\varphi_2)}{0,5 \times [B1(\varphi_2) + B5(\varphi_2)]}$$

$$K_{\Delta L} = \frac{\alpha_{0\text{жс}}}{\frac{\varphi_{23\text{ан}}}{\lambda} + \frac{L_{\text{я}}}{r}}$$

$$\alpha_{\text{пнв}}(\varphi_2) = \alpha_0 - \frac{\varphi_{23\text{ан}}}{3} \times \frac{0,5 \times B1(\varphi_2) + B5(\varphi_2)}{0,5 \times [B1(\varphi_2) + B5(\varphi_2)]}$$

$$G(\varphi_2) = k + \frac{1-k}{2} \times \frac{\varphi_2}{\frac{L_{\text{я}}}{r}}$$

$$\alpha_{\text{ржс}} = \alpha_{0\text{жс}} - \frac{1}{3} \times \sqrt{\frac{\Delta h}{r}} \times \frac{0,5 \times B1\left(\frac{L_{\text{я}}}{r}\right) + B2\left(\frac{L_{\text{я}}}{r}\right)}{0,5 \times \left[ B1\left(\frac{L_{\text{я}}}{r}\right) + B2\left(\frac{L_{\text{я}}}{r}\right) \right]}$$

$$J(\varphi_2) = k + \frac{1-k}{2} \times \frac{\varphi_2 - \alpha_{0\text{жс}}}{\frac{L_{\text{я}}}{r}}$$

$$K(\varphi_2) = r \times \left( \varphi_2 - \frac{L_{\text{я}}}{r} \right)$$

где:  $B1(\varphi_2)$  – текущая ширина трапецидальной кромки при входе в

очаг деформации;

текущая ширина трапецидальной кромки при выходе из очага деформации:

- для клетки, принятой абсолютно жёсткой –  $B2(\varphi_2)$  ,
- с учётом податливости клетки –  $B3(\varphi_2)$  ,
- с учётом податливости клетки и вытяжки металла –  $B4(\varphi_2)$  ;

центральный угол, определяющий положение результирующей силы давления металла на валки в очаге деформации:

- для клетки, принятой абсолютно жёсткой –  $\alpha_{\text{ржс}}$  ,
- с учётом податливости клетки –  $\alpha_{\text{пн}}(\varphi_2)$  ,

• с учётом податливости клетки и вытяжки металла –  $\alpha_{прв}(\Phi_2)$  ;

$K_{\Delta L}$  – коэффициент, учитывающий изменение длины дуги контакта

вследствие изменения узла захвата с учётом податливости клетки и вытяжки металла;

$G(\Phi_2)$  – отношение начальной ширины полосы  $\epsilon$  к ширине полосы

при входе в очаг деформации;

$J(\Phi_2)$  – отношение ширины полосы при выходе из очага деформации

к ширине полосы при входе в очаг деформации;

$K(\Phi_2)$  – длина участка полной ширины полосы  $B$ , находящегося в

очаге деформации.

Расположение равнодействующей сил давления на части трапецидальной передней кромки, находящейся в очаге деформации длиной  $L_{од}$ , определялось с использованием формулы [9] (рис.2):

$$h_{ц.м} = \frac{L_{я}}{3} \times \frac{0,5 B + \epsilon}{0,5 (B + \epsilon)} . \quad (3)$$

С целью упрощения расчётов для третьего этапа заполнения очага деформации трапецидальной кромкой принято допущение о линейном характере изменения зависимости плеча равнодействующей силы давления металла на валки от угла поворота рабочих валков при захвате. В приведенных в таблице формулах вытяжка неровного конца полосы по длине очага деформации на основании исследований [10] принята постоянной. Результаты расчётов показаны на рис.7–9. Для упрощения принято, что очаг деформации заканчивается на линии пересечения полосы с плоскостью расположения осей валков.

Математическое описание растянутого процесса захвата передней фигурной кроки полосы позволяет воспроизводить на модели близкий к реальному момент технологического сопротивления при захвате и прокатке фигурного переднего конца полосы, позволяет поэтапно рассматривать захват и прокатку переднего конца, оценивать влияние особенностей протекания каждого этапа в линейной и нелинейной системе привода клетки.

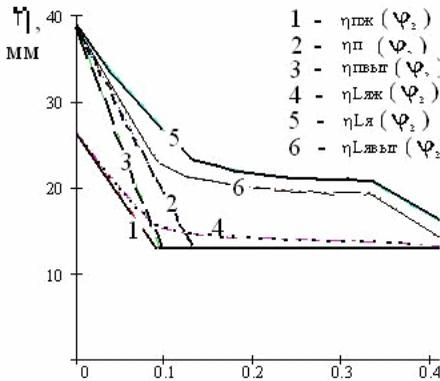


Рис.7. Плечо результирующей силы давления металла на валки при заполнении очага деформации прямой ( $\eta_{пж}$  – жёсткой,  $\eta_{п}$  – податливой,  $\eta_{пвыт}$  – податливой с учётом вытяжки) и трапецидальной ( $\eta_{Лж}$  – жёсткой,  $\eta_{Ля}$  – податливой,  $\eta_{Лявыт}$  – податливой с учётом вытяжки) кромками переднего конца полосы.

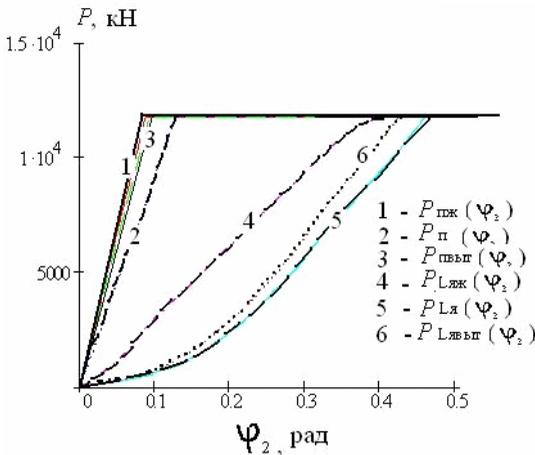


Рис.8. Результирующая сила давления металла на валки при заполнении очага деформации прямой ( $P_{пж}(\varphi_2)$  – жёсткой,  $P_{п}(\varphi_2)$  – податливой,  $P_{пвыт}(\varphi_2)$  – податливой с учётом вытяжки) и трапецидальной ( $P_{Лж}(\varphi_2)$  – жёсткой,  $P_{Ля}(\varphi_2)$  – податливой,  $P_{Лявыт}(\varphi_2)$  – податливой с учётом вытяжки) кромками переднего конца полосы.

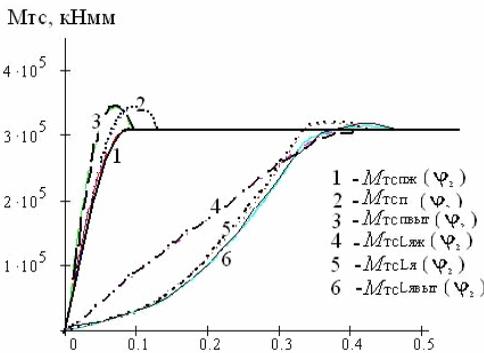


Рис.9. Момент технологического сопротивления  $M_{тс}(\varphi_2)$  при заполнении очага деформации прямой ( $M_{тспж}(\varphi_2)$  – жёсткой,  $M_{тсп}(\varphi_2)$  – податливой,  $M_{тспвыт}(\varphi_2)$  – податливой с учётом вытяжки) и трапецидальной ( $M_{тсЛж}(\varphi_2)$  – жёсткой,  $M_{тсЛя}(\varphi_2)$  – податливой,  $M_{тсЛявыт}(\varphi_2)$  – податливой с учётом вытяжки) кромками переднего конца полосы.

Анализ результатов расчётов показал:

- при захвате фигурной передней кромки полосы плечо результирующей силы давления металла на валки до прихода в очаг деформации полной ширины полосы увеличивается несколько больше, чем при захвате прямой кромки, а по мере прокатки трапецевидной части переднего конца полосы постепенно уменьшается до входа в очаг деформации полной ширины полосы;
- величина плеча результирующей силы давления металла на валки как функции угла поворота рабочих валков, зависит от формы передней кромки полосы;
- податливость рабочей клетки приводит к увеличению не только начальной величины плеча результирующей силы давления металла на валки, но и к большей его величине во время заполнения очага деформации до полной ширины полосы;
- при малых длинах передних неровных концов и относительно больших обжатиях, например при прокатке слэбов в черновой группе клетей, плечо результирующей силы давления металла на валки можно принимать с достаточной для практических расчётов точностью расположенным посередине дуги контакта металла с валком.

### **Выводы.**

1. Математическое описание момента технологического сопротивления при захвате и прокатке фигурного переднего конца полосы позволяет воспроизводить внешний момент и оценивать его влияние при различных параметрах фигурной кромки на величину нагрузок привода.
2. При воспроизведении внешней нагрузки привода чистой клетки стана горячей прокатки во время захвата неровной передней кромки необходимо учитывать податливость рабочей клетки, изменение плеча результирующей силы давления металла на валки, определяемое формой передней кромки, и вытяжку металла в очаге деформации.
3. Представленное теоретическое исследование проводилось в предположении, что зазор в системе привода в момент контакта металла с валком отсутствует. Фактическая величина степени открытия зазоров в момент начала захвата существенно влияет на характер и продолжительность изменения внешней нагрузки и начальные условия нагружения системы привода. Для системы привода, имеющей раскрытый зазор в момент контакта металла с валком, необходимы исследования, позволяющие обоснованно выбрать для конкретного стана форму фигурной кромки для уменьшения скорости нарастания момента и его максимальной величины, уменьшить влияние открытой в начальный момент захвата части зазора на динамические нагрузки привода и в итоге уменьшить величины динамических нагрузок.
4. Целью дальнейших исследований является разработка рациональных параметров исходной неровной передней кромки полосы перед чис-

товой группой клетей непрерывного стана горячей прокатки полос с целью существенного уменьшения динамических нагрузок приводов чистовых клетей при захвате.

1. *Большаков В.И.* Технологические нагрузки листопрокатных станов // Тр. ИЧМ. Т. 31.– М.: Металлургия. 1969. – С. 64 – 67.
2. *Веренёв В.В., Большаков В.И., Подобедов Н.И.* Влияние особенностей изменения момента технологического сопротивления на динамику главных приводных линий чистовых клетей // Защита металлургических машин от поломок. Межвуз. темат. сб. науч. тр. – Мариуполь, 1998. – Вып. 3. – С. 35 – 39.
3. *Большаков В.И.* Влияние податливости прокатной клетки на нагрузки привода // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1999. – № 4. – С. 90 – 94.
4. *Большаков В.И.* Исследование нелинейных электромеханических систем приводов прокатных станов с упругими связями на электронных моделях. // Автореферат дисс. канд.техн.наук, Дн–ск, ИЧМ, 1966. – 18 с.
5. *Кожевников С.Н.* Динамика нестационарных процессов в машинах. К.: Наук. думка, 1986. – 288 с.
6. *Большаков В.И., Поздняков В.П.* Особенности изменения торцов полосы на стане горячей прокатки // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2001. – № 3. – С. 65 – 70.
7. *Сафьян М.М., Большаков В.И., Васильев Я.Д.* Влияние формы переднего конца полосы на величину динамических нагрузок в линии передачи стана. // Динамика металлургических машин. Тр. ИЧМ, т. XXXI, М.: Металлургия. 1969. – С.105–110.
8. *Скичко П.Я., Веренев В.В.* Влияние формы переднего края полосы на момент прокатки и динамические нагрузки. // Металлургическое машиноведение и ремонт оборудования. Тем. сб. № 2. М.: Металлургия. 1974. – С.63–65.
9. *Большаков В.И., Поздняков В.П.* Зависимость динамических нагрузок привода прокатной клетки от формы передней кромки полосы. // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. Сб. научн.тр. ИЧМ. Вып.6. Дн–ск, 2003. – С.371–380.
10. *Справочник по элементарной математике, механике и физике.* Изд. 12–е. Мн., Наука и техника, 1973, 216 с.
11. *Большаков В.И., Поздняков В.П.* Формирование передних концов полос в чистовых клетях стана горячей прокатки // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2004 г. – №1. – С. 96–100.

*Статья рекомендована к печати к.т.н. В.В.Вереневым*