

ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРА ИЗМЕНЕНИЯ МОМЕНТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОТ ФОРМЫ ПЕРЕДНЕЙ КРОМКИ ПОЛОСЫ

ИЧМ НАН Украины ОАО «Запорожсталь»

Представлены результаты теоретического исследования зависимости характера изменения момента технологического сопротивления от формы передней кромки полосы при захвате. Показаны особенности характера изменения момента технологического сопротивления от формы передней кромки полосы при захвате.

Постановка задачи и цель работы..

Максимальные динамические нагрузки в значительной степени определяются законом нарастания момента технологического сопротивления (максимальной величиной и продолжительностью действия увеличенного при захвате момента), зависящего от скорости процесса захвата [1]. Постепенное заполнение очага деформации металлом переднего фигурного (неровного) конца полосы позволит увеличить при обоснованном выборе формы фигурной кромки время полного захвата, уменьшить скорость нарастания момента и его максимальную величину, уменьшить влияние открытой в начальный момент захвата части зазора на динамические нагрузки привода и в итоге уменьшить величины динамических нагрузок. Целью данной статьи является теоретическое исследование зависимости характера изменения момента технологического сопротивления от формы передней кромки при захвате в чистовых клетях широкополосных станов.

Методика исследования.

Реальные рабочие клетки обладают податливостью, влияние которой на толщину проката в чистовых клетях широкополосных станов горячей прокатки настолько существенно, что её учитывают при установке начального раствора между рабочими вальками. Используя формулы [2], начальный угол встречи металла с валком α_0 :

$$\alpha_0 = \sqrt{\frac{\frac{P_{уст}}{C} + h_0 - h}{r}} , \quad (1)$$

где $P_{уст}$ – сила давления металла на валки при установившемся режим;

C – модуль жёсткости рабочей клетки;

h_0 – начальная толщина полосы;

h – толщина готовой полосы;

r – радиус вала.

В случае определения начального угла встречи металла с валком для принятой абсолютно жёсткой ($C \rightarrow \infty$) рабочей клетки $\alpha_{0-жс}$ формула (1) преобразуется в общеизвестную формулу (2):

$$\alpha_{0-жс} = \sqrt{\frac{h_0 - h}{r}}. \quad (2)$$

Угол поворота рабочего валка с момента контакта металла с валком до момента полного заполнения очага деформации для прямой передней кромки полосы и упругой рабочей клетки $\varphi_{2-зап}$ определим из условия равенства площади контакта металла с валком в момент окончания захвата (для прямой передней кромки – момент полного заполнения очага деформации) F и площади очага деформации $F_{од}$ с использованием формул [2] $F = F_{од}$, или

$$B r (\varphi_{2-зап} - \alpha_0 + \alpha_T) = B \sqrt{(h_0 - h) r}, \quad (3)$$

где B – ширина полосы;

α_T – текущее значения угла встречи металла с валком.

Для момента полного заполнения очага деформации в упругой клетки и начала установившегося процесса прокатки:

$$\alpha_T = \alpha_{уст} = \alpha_{0-ж}$$

После преобразований формулы (2) получаем:

$$\varphi_{2-зап} = \sqrt{\frac{\frac{P_{уст}}{C} + h_0 - h}{r}} = \sqrt{\alpha_{0-ж}^2 + \frac{P_{уст}}{C r}} \quad (4)$$

Для принятой абсолютно жёсткой рабочей клетки угол поворота рабочего валка с момента контакта металла с валком до момента полного заполнения очага деформации для прямой передней кромки $\varphi_{2-зап-ж}$ можно определить из (4) при условии, что $C \rightarrow \infty$:

$$\varphi_{2-зап-ж} = \alpha_{0-ж} \quad (5)$$

Анализ формул (4) и (5) показал, что $\varphi_{2-зап} > \varphi_{2-зап-ж}$. Разница между ними обусловлена конструкцией рабочей клетки и технологическими параметрами (маркой стали, температурой проката и др.).

Принимая среднее удельное давление p_{cp} при захвате постоянным, величина которого определяется из условий установившегося процесса прокатки, и направление по вертикали вектора полного давления, текущие значения результирующей силы давления металла на валки P и момента технологического сопротивления $M_{тс}$ в функции угла поворота рабочего валка φ_2 [2]:

$$P(\varphi_2) = p_{cp} F(\varphi_2); \quad (6)$$

$$M_{mc}(\varphi_2) = 2 P(\varphi_2) \eta(\varphi_2), \quad (7)$$

где $F(\varphi_2)$ – текущее значение площади контакта металла с валком, которая для прямой передней кромки определяется как произведение длины дуги контакта металла с валком на ширину полосы, а для трапециевидальной кромки – как площадь передней части полосы, вошедшей в очаг деформации;

$\eta(\varphi_2)$ – плечо результирующей силы давления металла на валки P (принятой приложенной к середине дуги захвата) относительно плоскости выхода металла из валков, которое можно определить по формуле:

$$\eta(\varphi_2) = \begin{cases} \frac{r}{2} \left(\alpha_0 - \frac{(\alpha_0 - \alpha_{ycm}) \varphi_2}{\varphi_{2-3АП}} \right), & \text{при } 0 \leq \varphi_2 \leq \varphi_{2-3АП}; \\ \frac{r \alpha_{ycm}}{2} & \text{при } \varphi_{2-3АП} \leq \varphi_2 \end{cases} \quad (8)$$

Результаты исследования.

На рис. 1 показан характер изменения зависимости $\eta(\varphi_2)$.

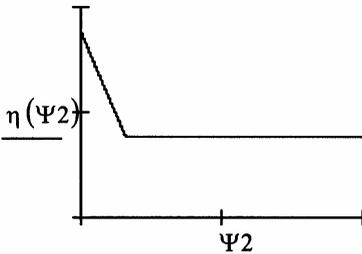


Рис.1. Характер зависимости плеча результирующей силы давления металла на валки относительно плоскости выхода из очага деформации η от φ_2 .

При входе полосы в валки (в диапазоне $0 < \varphi_2 < \varphi_{2-3ап}$) момент технологического сопротивления увеличен по сравнению с величиной установившемся режиме прокатки (рис.2) при установившемся режиме

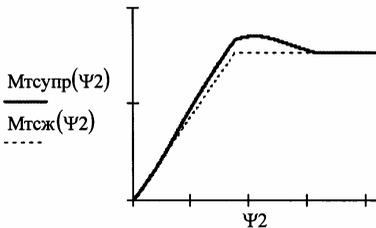


Рис.2. Характер изменения момента технологического сопротивления для упругой МТСУПР и жёсткой МТСЖ клеток от угла поворота валков φ_2 .

Такой характер изменения момента технологического сопротивления объясняет значительные динамические нагрузки приводов при захватах. Впервые это явление было обнаружено в 1965 г. при исследованиях уширительного стана 2800 холодной прокатки. Причины возникновения явления рассмотрены в [3]. Приведенное касается захвата полос с прямой передней кромкой.

Приведенное касается захвата полос с прямой передней кромкой. Значительный интерес для уменьшения динамических нагрузок привода при захвате представляет возможность влияния на характер изменения момента технологического сопротивления посредством постепенного, растянутого по времени, заполнения очага деформации металлом переднего конца полосы с фигурной передней кромкой (рис.3).

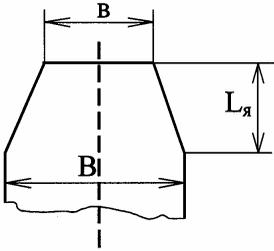


Рис.3. Трапецидальная форма передней кромки полосы. b и B – начальная и полная ширина полосы; $Lя$ – длина передней кромки (высота трапеции).

Рассмотрим формирование зависимости момента технологического сопротивления от угла поворота рабочего вала φ_2 для конца полосы с фигурной передней кромкой.

Угол поворота рабочего вала с момента контакта металла с валком до момента полного заполнения очага деформации для фигурной кромки длиной $Lя$ (рис. 3) и упругой рабочей клетки $\varphi_{2-зап-Lя}$ определим с использованием (4):

$$\varphi_{2-зап-Lя} = \sqrt{\alpha_{0-ж}^2 + \frac{P_{уст}}{C r} + \frac{Lя}{r}} \quad (9)$$

Заполнение очага деформации трапецидальной кромкой может происходить по двум вариантам в зависимости от значений $Lя$, r и абсолютного обжатия $\Delta h = h_0 - h$:

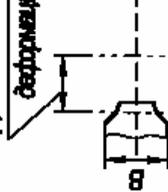
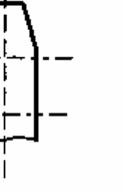
1. Длина фигурной передней кромки меньше или равна длине очага деформации, т.е. $Lя \leq \sqrt{r \Delta h}$.

2. Длина фигурной передней кромки больше длины очага деформации, т.е. $Lя > \sqrt{r \Delta h}$.

В каждом варианте можно условно выделить четыре последовательных этапа заполнения очага деформации и, используя в качестве основы формулу (6), предложить для каждого этапа зависимости $P(\varphi_2)$ (табл.1,2).

В приведенных формулах вытяжка конца полосы по длине очага деформации при захвате принята постоянной. Такое допущение требует отдельного рассмотрения в дальнейшем.

Таблица 1. Этапы заполнения очага деформации трапециевидальной кромкой при $L_a \leq \sqrt{r \Delta h}$

Этапы	Условия	Зависимости $P(\varphi_2)$
<p data-bbox="274 1220 336 1356">Для очага деформации</p> 	$0 \leq \varphi_2 \leq \frac{L_a}{r}$	$P(\varphi_2) = P_{\text{участ}} - P_{\text{ср}} \left[B \sqrt{r \Delta h} - \frac{2\sigma + \frac{B-\sigma}{L_a} r \varphi_2}{2} r \varphi_2 \right]$
	$\frac{L_a}{r} \leq \varphi_2 \leq \frac{\sqrt{r \Delta h}}{E r}$	$P(\varphi_2) = P_{\text{участ}} - P_{\text{ср}} \left[B \sqrt{r \Delta h} - \left[\frac{B+\sigma}{2} (r \varphi_2 - A(\varphi_2)) + B A(\varphi_2) \right] \right]$
	$\frac{\sqrt{r \Delta h}}{E r} \leq \varphi_2 \leq \frac{\sqrt{r \Delta h}}{E r} + \frac{L_a}{r}$	$P(\varphi_2) = P_{\text{участ}} - P_{\text{ср}} \left[B \sqrt{r \Delta h} - \frac{(B-\sigma) D(\varphi_2)}{B+\sigma + \frac{L_a E}{2}} - \left(\sqrt{r \Delta h} - A(\varphi_2) \right) - B A(\varphi_2) \right]$
	$\frac{\sqrt{r \Delta h}}{E r} + \frac{L_a}{r} \leq \varphi_2$	$P = P_{\text{участ}} \text{ где } A(\varphi_2) = r \left(\varphi_2 - \frac{L_a}{r} \right) \quad D(\varphi_2) = r \varphi_2 - \sqrt{r \Delta h} \quad E = \frac{h_0}{h_0 - \Delta h}$

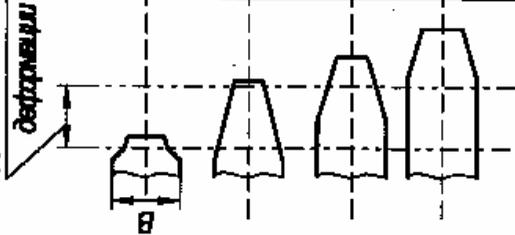
Этапы	Условия	Значимость $P(\varphi_2)$
<p data-bbox="263 1225 330 1396">Длина осяз деформации</p> 	$0 \leq \varphi_2 \leq \frac{\sqrt{r \Delta h}}{E r}$ $\frac{\sqrt{r \Delta h}}{E r} \leq \varphi_2 \leq \frac{L_0}{r}$ $\frac{L_0}{r} \leq \varphi_2 \leq \frac{L_0}{r} + \frac{\sqrt{r \Delta h}}{E r}$ $\frac{L_0}{r} + \frac{\sqrt{r \Delta h}}{E r} \leq \varphi_2$	$P(\varphi_2) = P_{\text{устан}} - P_{\varphi} \left[B \sqrt{r \Delta h} - \frac{(B-\theta) r \varphi_2}{2} \right]$ $P(\varphi_2) = P_{\text{устан}} - P_{\varphi} \left[B \sqrt{r \Delta h} - \frac{(B-\theta) D(\varphi_2)}{L_0 E} + \frac{(B-\theta) r \varphi_2}{2} \right]$ $P(\varphi_2) = P_{\text{устан}} - P_{\varphi} \left[B \sqrt{r \Delta h} - \frac{(B-\theta) D(\varphi_2)}{L_0 E} - \frac{(\sqrt{r \Delta h} - A(\varphi_2)) - B A(\varphi_2)}{2} \right]$ $P = P_{\text{устан}} \quad \text{так как} \quad A(\varphi_2) = r \left(\varphi_2 - \frac{L_0}{r} \right), \quad D(\varphi_2) = r \varphi_2 - \sqrt{r \Delta h}, \quad E = \frac{h_0}{h_0 - \Delta h}$

Таблица 2. Этапы заполнения очага деформации трапециевидальной кромкой при $L_0 > \sqrt{r \Delta h}$.

Для чистовой клетки №7 стана 1680 горячей прокатки (как для наиболее чувствительной к увеличенному при захвате моменту технологического сопротивления [4]) и одного из характерных режимов прокатки ($r = 300$ мм; модуль жёсткости $C = 4400$ кН/мм; $B = 1250$ мм; $h_0 = 8,12$ мм; $\Delta h = 2,29$ мм; $P_{уст} = 11800$ кН) были рассчитаны зависимости $M_{тс}(\varphi_2)$ от $L_я$ при $k = 0,5$ (рис. 4) и зависимости $M_{тс}(\varphi_2)$ от k при $L_я = 100$ мм (рис. 5). Реально зафиксированные на стане 1680 горячей прокатки при наиболее характерных режимах прокатки длины неровных передних кромок перед первой чистовой клетью (№ 5) достигают 80...180 мм, а при использовании в дальнейшем промежуточного перемоточного устройства "Coilbox" могут достигать 350 мм [5].

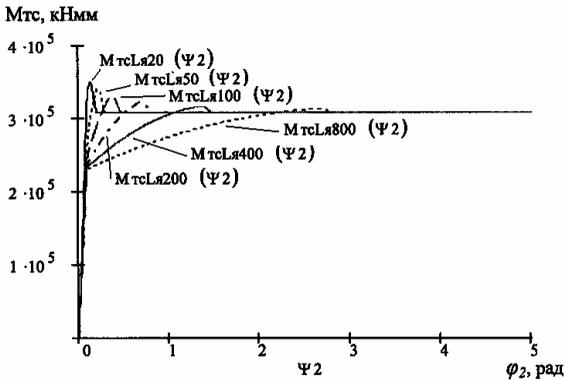


Рис. 4. Зависимости моментов технологического сопротивления при захватах МТС для фигурных кромок длиной $L_я = 20, 50, 100, 200, 400, 800$ мм и $k = 0,5$ от угла поворота валков φ_2

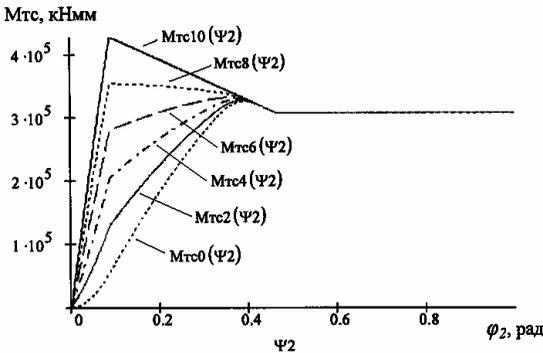


Рис. 5. Зависимости моментов технологического сопротивления при захватах МТС для фигурных кромок длиной $L_я = 100$ мм и $k = 1,0; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2$ и $1,0$ от угла поворота валков φ_2 .

Эффект уменьшения максимальных нагрузок при захвате полосы с небольшим «язычком» иллюстрируется сравнением токовых диаграмм, представленных на рис.6. При прокатке полосы с ровно обрезанной передней кромкой в диаграммах на рис.6 (слева) присутствует ощутимый пик увеличения силы тока во время захвата, в диаграммах на рис.6 (справа) при захвате полосы с необрезанным язычком такие пики отсутствуют.

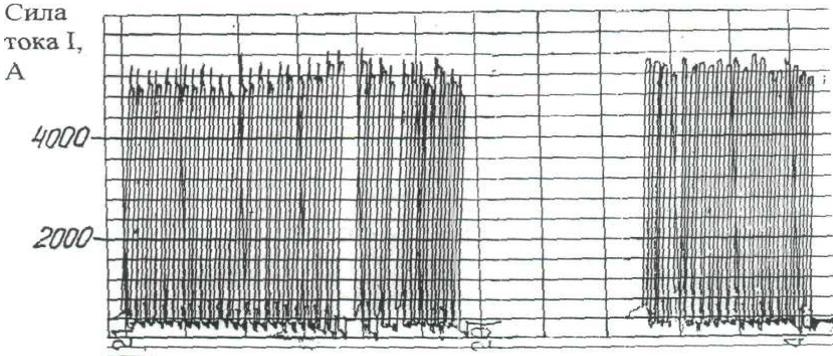


Рис. 6. Диаграммы нагрузок двигателя клетки № 5: слева - при захвате прямой передней кромки полосы; справа - при захвате необрезанного «языка».

Анализ зависимостей рис.4,5 показал:

- характер нарастания $M_{тс}$, обусловлен в начальном периоде заполнения очага деформации шириной передней кромки полосы ϵ ;
- увеличение длины фигурной кромки $Lя$ при неизменном $k = \epsilon/B$ приводит к уменьшению максимального значения момента технологического сопротивления $M_{тс}$ при захвате;
- для конкретных условий прокатки изменением $Lя$ можно добиться, чтобы величина момента технологического сопротивления при захвате не превышала существенно величину момента технологического сопротивления при установившемся режиме;
- график зависимости $M_{тс}(\varphi_2)$ при $k > 0$ имеет две характерные точки перегиба при захвате (рис.5), вызываемые: первая (по ходу заполнения очага деформации) – захватом начальной части передней кромки шириной ϵ , вторая – достижением максимальной величины момента при изменении его плеча вследствие податливости рабочей клетки;
- при $k = 0,8$ и $Lя = 100$ мм в первой характерной точке значение $M_{тс}$ превышает его значение во второй характерной точке, при $k \cong 0,7$ примерно одинаково, а при $k < 0,6$ максимальная величина момента технологического сопротивления при захвате практически не зависит от начальной ширины полосы ϵ ;
- наиболее плавно момент технологического сопротивления при захвате возрастает при $k = 0$, а его увеличение вызывает более резкое нагружение системы привода в начальный период заполнения очага деформации;
- изменение k не влияет на угол поворота вала до заполнения очага деформации, он зависит лишь от длины передней кромки $Lя$;
- при $Lя = const$ уменьшением k можно уменьшить максимальную величину момента технологического сопротивления $M_{тс}$ при захвате.

Влияние формы передней кромки полосы на динамические нагрузки приводов чистовых клетей стана 1680 горячей прокатки рассматривалось ранее в работах [6,7]. В статье [6] выполнена приближённая оценка величин коэффициентов динамичности K_d , которые возникают в безззорной линейной механической системе приводов чистовых клетей стана 1680 горячей прокатки по низшей частоте свободных колебаний системы и ориентировочно характеризуют изменение уровня динамических нагрузок в шпинделях. Предварительные расчёты показали, что формирование переднего фигурного конца полосы длиной 200...250 мм позволило бы существенно уменьшить (на 75-80 %) динамические нагрузки приводов при отсутствии зазоров в линиях передач. В работе [7] представлены результаты исследований на двухмассовой модели с упругой связью и зазором влияния формы передней кромки полосы и величины открытой части зазора на динамические нагрузки привода первой чистовой клетки (№ 5) стана 1680 горячей прокатки. Влияние формы передней кромки полосы рассматривалось упрощённо, через значения коэффициента увеличения момента технологического сопротивления $K_{ув}$.

В отличие от [6,7] в данной работе рассмотрено влияние формы неровной передней кромки полосы на характер изменения момента технологического сопротивления как функции угла поворота рабочих валков при отсутствии зазоров в линии передачи.

Выводы. Длина фигурной кромки $L_я$ и отношение начальной и полной ширины полосы k являются параметрами, существенно определяющими характер изменения момента технологического сопротивления $M_{тс}$ при захвате. Увеличение $L_я$ при неизменном k приводит к уменьшению максимума момента, возникающего при заполнении очага деформации. При $L_я = const$ увеличение k вызывает более резкое нагружение системы привода в начальный период захвата полосы, но не влияет на продолжительность заполнения очага деформации. Обоснованным сочетанием величин $L_я$ и k возможно уменьшить максимальное значение $M_{тс}$ при захвате.

Данное 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.

1. *Большаков В.И.* Технологические нагрузки листопркатных станов // Тр. ИЧМ. – 1969. – Т. 31. – С. 64 – 67.
2. *Большаков В.И.* Влияние податливости прокатной клетки на нагрузки привода // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* - 1999. - № 4. – С. 90 – 94.
3. *Большаков В.И.* Исследование нелинейных электромеханических систем приводов прокатных станов с упругими связями на электронных моделях: Автореф. Дис. ... канд. техн. наук. – Днепропетровск, 1966. – 18 с.
4. *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.
5. *Большаков В.И., Поздняков В.П.* Особенности изменения торцов полосы на стане горячей прокатки // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* - 2001. - № 3. – С. 65 – 70.
6. *Большаков В.И., Поздняков В.П.* Влияние формы передней кромки полосы на динамические нагрузки приводов широкополосных станов // *Металлургическая и горнорудная промышленность.* - 2000. - № 3. – С. 37 – 40.
7. *Большаков В.И., Поздняков В.П.* Зависимость динамических нагрузок привода прокатной клетки от формы передней кромки полосы // *Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии.* Сб. науч. тр. – 2003. – Вып. 6. – С. 371 – 380.

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