

А.И.Лещенко, С.А.Воробей, А.П.Лохматов

### НЕЙТРАЛЬНЫЙ УГОЛ ПРИ ПРОКАТКЕ В НЕПРИВОДНЫХ ВАЛКАХ

Целью работы является разработка метода расчета величины нейтрального угла в очаге деформации двухвалковой неприводной рабочей клетки. С применением положений энергетической теории взаимодействия валков и прокатываемой полосы, получены выражения, позволяющие достаточно точно определять величину нейтрального угла при прокатке в неприводных валках с задним подпором или передним натяжением.

**неприводные валки, очаг деформации, метод расчета, нейтральный угол**

**Состояние вопроса.** Одной из основных величин, характеризующих физические и кинематические условия при прокатке, является нейтральный (критический) угол. Нейтральный угол определяет возможность осуществления процесса прокатки и влияет на расход энергии, расходуемой на процесс деформации металла, характеризуя мощность, затрачиваемую на преодоление сил трения на контакте полоса–валки. Наиболее распространенной формулой для определения величины нейтрального угла на неприводном валке (НВ) является [1]

$$\gamma = \frac{\alpha_0}{2} \left( 1 + \frac{f_u r_{iu}}{f_y R} \right), \quad (1)$$

где  $\alpha_0$  – угол контакта металла с валком,  $f_u$  – коэффициент трения в опорах НВ,  $f_y$  – коэффициент трения при установившемся процессе прокатки на контактной поверхности деформируемого металла и НВ,  $r_{iu}$  – радиус шейки НВ,  $R$  – радиус НВ.

Это выражение получено впервые М.С.Мутьевым из условия равновесия сил в очаге деформации для случая прокатки на стане дуо с одним неприводным валком. Согласно выражению (1), нейтральный угол на неприводном валке всегда больше половины угла контакта на величину, определяемую условиями трения в его опорах. Выражение (1) использовалось авторами работ [2,3] при исследовании процессов сортовой прокатки с применением неприводных рабочих клеток.

Анализ выражения (1) показывает, что при использовании в качестве валковых опор НВ подшипников качения ( $f_u = 0,003-0,005$ ) величина  $\gamma$  незначительно отличается от  $0,5\alpha_0$  ( $\gamma/\alpha_0 \approx 0,51 \div 0,52$ ). В то же время, экспериментальными исследованиями [4] установлено, что при деформации металла в НВ с опорами на подшипниках качения отношение  $\gamma/\alpha_0$  изменяется в пределах  $0,63 \dots 0,77$ .

Расхождение в значениях отношения  $\gamma/\alpha_0$ , определяемого по выражению (1) и полученных экспериментально можно объяснить тем, что выражение (1) не учитывает особенностей процесса деформации в НВ. В

отличие от деформационно-силовых условий, для которых получено выражение (1), при деформации в НВ мощность в очаг деформации подается посредством заднего подпора (прокатка-прессование) или переднего натяжения (прокатка-волочение) и расходуется на собственно формоизменение раската, на преодоление сил трения на контакте полоса-валки и на преодоление добавочных сил трения, возникающих в опорах валков.

**Целью настоящей работы** является разработка метода расчета величины нейтрального угла в очаге деформации двухвалковой неприводной рабочей клетки. Для этого воспользуемся энергетической теорией взаимодействия валков и прокатываемой полосы.

**Изложение основного материала.** Прокатка в НВ характеризуется проталкиванием либо проволакиванием раската через них. Активной составляющей баланса мощностей при этом процессе является мощность заднего подпора и (или) переднего натяжения. В общем виде уравнение энергетического баланса запишем как

$$N_0 + N_1 = N_\phi + N_{mp} + N_{uu} \quad (2)$$

$$\text{где } N_0 - \text{мощность заднего подпора [5], } N_0 = \sigma_0 F_1 V_1 \quad (3)$$

$$N_1 - \text{мощность переднего натяжения [5], } N_1 = \sigma_1 F_1 V_1 \quad (4)$$

$N_\phi$  – мощность формоизменения с учетом мощности среза в плоскости входа [5],

$$N_\phi = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_S F_1 V_1 \left[ \sqrt{1-k+k^2} \ln \lambda + \frac{m}{4} \alpha_0 h_{cp} \left( \frac{1+k}{h_1} \xi + \frac{2-k}{h_0} \right) \times \right. \\ \left. \times \sqrt{1 + \left( k \frac{b_{cp}}{h_{cp}} \right)^2} + \frac{\alpha_0}{4} \sqrt{1 + \left( k \frac{b_0}{h_0} \right)^2} \right] \quad (5)$$

$N_{uu}$  – мощность, расходуемая на преодоление сил трения в опорах НВ,

$$N_{uu} = \alpha_0 b_{cp} n_\sigma \sigma_S V_1 \frac{f_{uu} d_{uu}}{1+S} \quad (6)$$

Выражение для определения мощности, расходуемой на преодоление сил трения на контакте полоса-валки, получили, используя метод, приведенный в работе [6] для случая прокатки в приводных валках. Итоговое выражение, определяющее расход энергии на преодоление сил трения на контакте, имеет следующий вид:

$$N_{mp} = 2 f_\sigma \sigma_S F_1 V_1 \left\{ \sqrt{\frac{R}{h_1}} \left( 2 \arctg \sqrt{\frac{R}{h_1}} \gamma - \arctg \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} \right) + \right. \\ \left. + 0,09 \frac{b_0}{h_0} \frac{n}{1+n} \left[ \left( \frac{h_0}{h_1} \right)^{1+n} - 1 \right] \right\} \quad (7)$$

Приведем уравнение энергетического баланса в развернутом виде с использованием выражений (3–7):

$$\begin{aligned} \sigma_0 F_1 V_1 + \sigma_1 F_1 V_1 = & \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_S F_1 V_1 \left[ \sqrt{1-k+k^2} \ln \lambda + \frac{m}{4} \alpha_0 h_{cp} \left( \frac{1+k}{h_1} \xi + \frac{2-k}{h_0} \right) \sqrt{1 + \left( k \frac{b_{cp}}{h_{cp}} \right)^2} + \frac{\alpha_0}{4} \sqrt{1 + \left( k \frac{b_0}{h_0} \right)^2} \right] + \\ + 2 f_\sigma \sigma_S F_1 V_1 & \left\{ \sqrt{\frac{R}{h_1}} \left( 2 \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{R}{h_1}} \gamma - \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} \right) + 0,09 \frac{b_0}{h_0} \frac{n}{1+n} \left[ \left( \frac{h_0}{h_1} \right)^{1+n} - 1 \right] \right\} + \\ + \alpha_0 b_{cp} n_\sigma \sigma_S V_1 & \frac{f_{uu} d_{uu}}{1+S} \end{aligned} \quad (8)$$

В выражениях (3-8) приняты следующие условные обозначения:

$\sigma_0$  – напряжение заднего подпора;

$\sigma_1$  – напряжение переднего натяжения;

$\sigma_S$  – среднее значение напряжения текучести в очаге деформации;

$F_1$  – сечение раската на выходе из НВ;

$V_1$  – скорость раската на выходе из НВ;

$k$  – коэффициент распределения деформации, определяемый отношением скоростей линейной деформации в направлениях уширения и обжатия в очаге деформации;

$\lambda$  – коэффициент вытяжки в НВ;

$m$  – поправочный коэффициент, определяющий интенсивность скорости деформации сдвига,  $m=0,35$ ;

$\alpha_0$  – угол контакта металла с НВ;

$\xi$  – корректирующий коэффициент;

$f_\sigma$  – показатель сил трения;

$\gamma$  – нейтральный угол в очаге деформации;

$R$  – радиус НВ;

$n$  – коэффициент пропорциональности, определяемый отношением уширения полосы и ее обжатия;

$n_\sigma$  – коэффициент напряженного состояния;

$f_{uu}$  – коэффициент трения в опорах НВ;

$d_{uu}$  – диаметр шейки НВ;

$S$  – опережение;

$h_0, h_1, b_0, b_1$  – геометрические размеры раската перед и после НВ;

$h_{cp}, b_{cp}$  – средняя высота и ширина полосы в очаге деформации;

$\Delta h$  – абсолютное обжатие.

Зависимости для расчета коэффициентов  $k, \xi$  и  $n$  приведены в работе [5].

Решая уравнение (8) относительно  $\gamma$ , получим следующее выражение для расчета величины нейтрального угла при прокатке в НВ:

$$\gamma = \sqrt{\frac{h_1}{R}} \operatorname{tg} \frac{1}{2} \left[ \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} + \sqrt{\frac{h_1}{R}} \left( \frac{1}{2 f_\sigma} \left\{ \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{\sigma_S} - \frac{2}{\sqrt{3}} A_1 - \alpha_0 b_{cp} n_\sigma \frac{f_{uu} d_{uu}}{F_1 (1+i)} \right\} - A_2 \right) \right], \quad (9)$$

$$A_1 = \sqrt{1-k+k^2} \ln \lambda + \frac{m}{4} \alpha_0 h_{cp} \left( \frac{1+k}{h_1} \xi + \frac{2-k}{h_0} \right) \sqrt{1 + \left( k \frac{b_{cp}}{h_{cp}} \right)^2} + \frac{\alpha_0}{4} \sqrt{1 + \left( k \frac{b_0}{h_0} \right)^2}, \quad (10)$$

$$A_2 = 0,09 \frac{b_0}{h_0} \frac{n}{1+n} \left[ \left( \frac{h_0}{h_1} \right)^{1+n} - 1 \right]. \quad (11)$$

Анализ выражения (9) показывает, что при деформации раската в НВ нейтральный угол больше половины угла контакта на величину, определяемую соотношением напряжений подпора (натяжения) к среднему значению напряжения текучести в очаге деформации, работой, затрачиваемой на деформацию раската, а также на преодоление сил трения на контакте полоса–валки и сил трения в опорах не приводных валков. Наши расчеты показали, что если не учитывать расход энергии на преодоление сопротивления вращению в опорах неприводных валков, установленных в подшипниках качения, то это внесет погрешность в определение величины  $\gamma$  не более 2%. Следовательно, выражение (9) можно записать в виде:

$$\gamma = \sqrt{\frac{h_1}{R}} \operatorname{tg} \frac{1}{2} \left[ \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} + \sqrt{\frac{h_1}{R}} \left( \frac{1}{2 f_{\sigma}} \left\{ \frac{\sigma_0 + \sigma_0}{\sigma_S} - \frac{2}{\sqrt{3}} A_1 \right\} - A_2 \right) \right]. \quad (12)$$

С использованием выражения (12), были выполнены расчеты по определению нейтрального угла в НВ с использованием экспериментальных данных прокатки в комплексе приводная–неприводная рабочие клетки, выполненных в прокатной лаборатории Института черной металлургии НАН Украины (г. Днепропетровск) [2]. По итогам расчетов было установлено, что для условий горячей сортовой прокатки при деформации раската в НВ с гладкой бочкой отношение  $\gamma/\alpha_0$  изменяется в диапазоне 0,74...0,78 при изменении логарифмической степени деформации в НВ 0,03...0,25.

Диапазон изменения отношения  $\gamma/\alpha_0$  для условий горячей сортовой прокатки в НВ близок к значениям, приведенным в работе [4]. Однако условия экспериментальных прокаток [2] отличаются от условий проведения эксперимента, приведенного в работе [4], в частности не определялась величина опережения в НВ. Соответственно, отсутствие необходимых экспериментальных данных не позволяет оценить погрешность разработанного выражения для определения нейтрального угла при процессе горячей сортовой прокатки.

Поэтому нами были выполнены расчеты по определению нейтрального угла в НВ для условий холодной прокатки–волочения стальных образцов, приведенных в работе [7].

Для этого процесса деформации выражение (9) привели к виду

$$\gamma = \frac{\alpha_0}{2} + \frac{h_1}{R} \left\{ \frac{1}{4f_\sigma} \left[ \frac{\sigma_0}{\sigma_S} - A_1 - A_3 \right] \right\}, \quad (13)$$

где  $A_1$  определяется по выражению (10), а  $A_3$  определяется как

$$A_3 = \alpha_0 n_\sigma \frac{f_{\text{ш}} d_{\text{ш}}}{h_1 (1 + S)}. \quad (14)$$

Для оценки погрешности выражения (13) нами использован параметр  $\gamma/\alpha_0$ , который позволяет не только оценить точность расчета, но и определить возможность осуществимости процесса прокатки–волочения, при котором величина отношения  $\gamma/\alpha_0$  должна находиться в пределах  $0,5 < \gamma/\alpha_0 < 1$ . Результаты расчетов приведены в таблице.

Таблица. Погрешность расчета отношения  $\gamma/\alpha_0$  при прокатке-волочении стальных образцов

№ п/п	Параметры очага деформации			Значения отношения $\gamma/\alpha_0$		Погрешность расчета, %
	$h_0$	$h_1$	Логарифмическая степень дефор- мации	Эксперимент	Расчет	
1	2,01	1,80	0,110	0,647	0,570	-12,0
2	2,01	1,72	0,156	0,687	0,600	-12,6
3	2,01	1,64	0,203	0,580	0,605	4,3
4	2,02	1,6	0,233	0,558	0,520	-6,8
5	2,03	1,42	0,357	0,510	0,532	4,3
6	2,02	1,13	0,581	0,528	0,546	3,5
7	2,02	1,08	0,626	0,573	0,559	-2,4
8	2,05	1,02	0,698	0,541	0,558	3,2
9	2,01	0,99	0,708	0,595	0,593	-0,3

Из данных, приведенных в таблице, можно установить, что использование выражения (13) для расчета величины нейтрального угла в процессах прокатки–волочения позволяет достаточно точно определять эту величину. Погрешность расчета не превышает 13% при значениях логарифмического показателя высотной деформации в НВ до 0,16, а при значениях логарифмического показателя 0,20-0,71 не превышает 10%. При этом, во всем исследованном диапазоне расчетные значения отношения  $\gamma/\alpha_0$  находятся в пределах  $0,5 < \gamma/\alpha_0 < 1$ , что указывает на возможность осуществимости процесса прокатки–волочения в неприводных валках. Следовательно, выражение (13) можно использовать на стадии проектирования технологических процессов прокатки–волочения для определе-

ния фактических значений нейтрального угла и граничных условий осуществимости такого процесса деформации.

**Выводы.** С использованием положений энергетической теории взаимодействия валков и прокатываемой полосы, разработан метод расчета величины нейтрального угла при прокатке в неприводных валках с задним подпором или передним натяжением. Погрешность расчета величины нейтрального угла для процесса холодной прокатки-волочения не превышает 13% во всем исследованном диапазоне.

*Статья рекомендована к печати  
докт.техн.наук И.Ю.Приходько*

1. Мутьев М.С. О равновесии сил и крутящем моменте для стана дуо с верхним холостым валком / М.С.Мутьев // Прокатное производство. Научные труды. Выпуск XXVII. Металлургиздат, 1951. – С. 77-100.
2. Непрерывная прокатка сортовой стали с использованием неприводных рабочих клетей / А.П.Лохматов, С.М.Жучков, Л.В.Кулаков и др. – Киев: Наукова думка. – 1998. – 239с.
3. Фастыковский А.Р. Неприводные универсальные калибры – новое направление в производстве рельсов / А.Р.Фастыковский, В.Н.Перетяцько // Металлург – 2002. – №5. – С. 48-50.
4. Суворов И.К. Опережение при прокатке в неприводных валках / И.К.Суворов // Изв. вуз. Черная металлургия. – 1960. – №7. – С. 99-102.
5. Выдрин В. Н. Процесс непрерывной прокатки / В.Н.Выдрин, А.С.Федосиенко, В.И.Крайнов. – М.: Металлургия, 1970. – 456 с.
6. Выдрин В.Н. Динамика прокатных станов / В.Н.Выдрин – Свердловск: Металлургиздат, 1960. – 256 с.
7. Тарновский И.Я. Прокатка-волочение в неприводных валках / И.Я.Тарновский, В.И.Шилов // Расчет и конструирование заводского оборудования. Сб. статей. Вып. 64. Машгиз, 1958. – С. 111-127.

***О. І. Лещенко, С. О. Воробей, О. П. Лохматов***

**Нейтральний кут при прокатуванні у непривідних валках**

Метою роботи є розробка методу розрахунку величини нейтрального кута в осередку деформації двохвалкової непривідної робочої кліті. З використанням положень енергетичної теорії взаємодії валків та розкату отримано формули, що дозволяють достатньо точно визначати значення нейтрального кута при прокатуванні в непривідних валках з заднім підпором або переднім натягінням.