

**Николаев В. А., Васильев А. А.**

Запорожская государственная инженерная академия, Запорожье

## СИЛОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ В ХОЛОСТЫХ ВАЛКАХ СПЛАВОВ

Приведены результаты лабораторных исследований процесса прокатки-волочения полос. Опытами установлено, что при прокатке-волочении полос усилие деформации металла и средние нормальные контактные напряжения на 21-36 % меньше, чем при прокатке в приводных валках, и близки к средним величинам напряжения течения металла. Предложена теоретическая модель расчета коэффициента напряженного состояния  $p_{cp}/\sigma_T$  при прокатке-волочении в неприводных валках, которая достоверно отражает напряженное состояние в очаге деформации.

**Ключевые слова:** прокатка, напряженное состояние, прокатка-волочение, приводные валки, полоса, холостые валки, обжатие, клеть дуо, керновые отметки, тензометрические месдозы

Холодную прокатку полос выполняют, как правило, в приводных рабочих валках. В этом процессе в полной мере проявляется негативное влияние контактного трения, вызывающее появление значительных усилий прокатки и расхода электроэнергии [1, 2]. Снижение влияния контактного трения и, вместе с этим, мощности, затрачиваемой на прокатку металла на 20-30 %, обеспечивается применением одновалкового привода [3-11]. Еще больший эффект снижения энергосиловых параметров получен при волочении металла в холостых роликах [12]. Приведенное в работе [12] выражение

$$\frac{p_{cp}}{2\tau_s} = (\ln \lambda + \alpha / 2) / (\lambda - 1) \quad (1)$$

свидетельствует об отсутствии влияния на процесс волочения контактного трения в очаге деформации. Однако увеличение коэффициента напряженного состояния ( $p_{cp} / 2\tau_s$ ) при уменьшении коэффициента высотной деформации  $\lambda$  вызывает сомнение ( $p_{cp}$  – среднее нормальное контактное напряжение;  $\tau_s$  – напряжение сдвига металла;  $\alpha$  – угол контакта полосы в валках).

Ниже предлагается решение, которое позволяет более точно оценить влияние условий деформации металла в холостых (неприводных) валках на изменение усилия прокатки. В соответствии с приближенной теорией пластичности соотношение между напряжениями, действующими в очаге деформации, имеет вид

$$\sigma_1 = \sigma_\phi + \sigma_3, \quad (2)$$

где  $\sigma_\phi$  – сопротивление металла деформации;  $\sigma_1$  – нормальное вертикальное напряжение;  $\sigma_3$  – продольное подпиральное напряжение.

С достаточной точностью принимают  $\sigma_1 = p_{cp}$  и тогда

$$p_{cp} = \sigma_\phi + \sigma_3. \quad (3)$$

Дифференциальное уравнение прокатки Т. Кармана позволяет установить связь между напряжениями  $\sigma_3$  и  $p_{cp}$  по длине дуги, а также получить соотношения между средними их значениями, которые используют для расчета среднего нормального контактного напряжения и усилия прокатки. Из работы [13] следует, что формулы, полученные из уравнения Т. Кармана, дают близкие между собой результаты и в достаточной степени адекватны экспериментальным данным. В связи с этим, для решения задачи определения продольных напряжений в очаге деформации при прокатке-волочении в холостых валках используем следующее выражение, полученное из решения дифференциального уравнения Т. Кармана [5, 13]:

$$p_{cp} = \sigma_\phi (1 + C_n f_n l_c / h_{cp}), \quad (4)$$

где  $f_n$  – показатель трения;  $l_c$  – длина дуги контакта с учетом упругих деформаций валков и полосы;  $h_{cp}$  – средняя толщина полосы в очаге деформации;  $C_n$  – коэффициент, учитывающий интенсивность влияния контактного трения

$$C_n = 0,17 (1 + 14,7 f_n) \quad \text{при } f_n \leq 0,12; \quad (5)$$

$$C_n = 0,48 \quad \text{при } f_n > 0,12.$$

Из сравнения выражений (3) и (4) следует, что среднее продольное подпиральное напряжение  $\sigma_3$  равно

$$\sigma_3 = \sigma_\phi C_n f_n l_c / h_{cp}.$$

Из работ [1, 2 и других] также известно, что приложение к переднему концу полосы внешнего натяжения уменьшает влияние напряжения  $\sigma_3$  и снижает величины среднего нормального контактного напряжения  $p_{cp}$ . Приложение к полосе допустимых внешних напряжений  $\sigma_n$ , равных

$$\sigma_n = \sigma_3 = \sigma_\phi C_n f_n l_c / h_{cp}, \quad (6)$$

нивелирует влияние контактного трения и обеспечивает существенное снижение средних нормальных напряжений [1].

Среднее нормальное контактное напряжение при прокатке-волочении в холостых валках при воздействии продольных напряжений натяжения  $\sigma_n = \sigma_3$  определим из условия равновесия горизонтальных составляющих контактных сил трения, действующих в очаге деформации. Влияние горизонтальной составляющей усилия прокатки косвенно учитывается через коэффициент  $C_n$ . Поскольку напряжение  $\sigma_3$  является результатом действия контактных сил трения в очаге деформации, то имеем [1, 2]

$$-T_1 \cos \varphi_1 + -T_2 \cos \varphi_2 = \sigma_n h / 2, \quad (7)$$

где  $T_1$  и  $T_2$  — силы трения соответственно в зонах отставания и опережения;  $\varphi_i$  — углы приложения равнодействующих сил.

Представим выражение (7) через контактные напряжения, принимая ширину полосы  $B = 1$ , (закон трения Г. Амонтона)  $\sin \varphi_0 \approx \alpha/2$ ,  $\cos \varphi_1 \approx \cos \varphi_2 \approx 1$  и после преобразований получим

$$-f_b p_{cp} R(\alpha - \gamma) + f_b p_{cp} R\gamma = \sigma_n h / 2$$

или

$$p_{cp} = \frac{\sigma_n}{2f_b \frac{l_c}{h} \left( \frac{2\gamma}{\alpha} - 1 \right)}, \quad (8)$$

где  $f_b$  и  $\gamma$  — коэффициент трения и угол критического сечения при прокатке-волочении;  $\gamma/\alpha$  — отношение для прокатки-волочения ( $\gamma/\alpha \approx 0,5-0,7$ ) [6];  $\sigma_n$  — напряжение, определяемое из выражения (6).

Решая совместно выражения (6) и (8), получим ( $\sigma_\phi = \sigma_\tau$  для волочения)

$$\frac{p_{cp}}{\sigma_\tau} = \left( 0,5 C_n \frac{f_n}{f_b} \frac{h}{h_{cp}} \right) / \left( \frac{2\gamma}{\alpha} - 1 \right). \quad (9)$$

Из сопоставления законов трения Г. Амонтона и Э. Зибеля ранее установлено [2]

$$f_n = f p_{cp} / \sigma_\tau,$$

где  $p_{cp}$  — среднее нормальное напряжение, определенное опытным путем;  $\sigma_\tau$  — среднее напряжение течения металла в очаге деформации, определенное опытным путем. Это соотношение действительно для любого случая прокатки. Тогда для условий прокатки в холостых валках получим

$$\frac{f_n}{f} = \frac{p_{cp}}{\sigma_\tau}. \quad (10)$$

Из опытных значений  $p_{cp}$  и  $\sigma_\tau$  для различных условий волочения в холостых валках с использованием выражения (10) можно получить зависимость для предварительного расчета отношения  $f_n/f$ , как это представлено в работе [2] для условий прокатки.

В связи с дальнейшим развитием теории и практики протягивания (волочения) в неприводных валках представляет интерес получение оценки процесса прокатки-волочения (ПВ) при деформации тонких полос в сравнении с классическим процессом прокатки в приводных валках (ПРВ). Исследования выполняли в клети дуо с диаметром валков  $D \approx 51,8$  мм и шероховатостью поверхности  $Ra$ , мкм: верх — 0,45; низ — 0,97. Прокатывали отоженные полосы алюминия марки АКЛП-ПТ-5Е толщиной  $H = 1,07$  мм и шириной  $B \approx 23,5$  мм с обжатием  $\varepsilon = 0,05-0,48$ . В приводных валках при их окружной скорости  $v_b \approx 0,05$  м/с прокатывали первую часть каждой полосы длиной  $L \approx 500$  мм. После прокатной серии клеть без привода переносили на горизонтальную волочительную установку и при помощи приводного барабана протягивали вторую часть полосы со скоростью  $v_n = 0,05$  м/с в холостых валках. Измеряли толщину до и после прокатки с точностью 0,01 мм и коэффициент вытяжки ( $\mu$ ) по керновым отметкам на полосе до и после прокатки. В стандартных условиях определяли напряжения течения  $\sigma_\tau$  металла в зависимости от величины относительного обжатия.

Усилие на валки определяли тензометрическими месдозами, а усилие протягивания (волочения) полосы в холостых валках измеряли переносным динамометром. Все измерительные устройства тарировали до и после процесса деформирования.

При волочении в холостых валках (ПВ) коэффициент трения  $f_b$  рассчитывали без учета влияния сил трения в подшипниках качения по формуле

$$f_b = T_{пв} / 2P, \quad (11)$$

где  $T_{пв}$  — усилие волочения;  $P$  — усилие, действующее на валки. Экспериментальные и расчетные данные исследований представлены в табл. 1, 2.

Напряжения протягивания  $\sigma_n$  ( $\sigma_n = T_{пв} / bh$ ) при волочении полосы в холостых валках обусловлены сопротивлением течению металла в очаге деформации. Чем больше величина обжатия, тем больше значения  $\sigma_n$  и  $\sigma_n / \sigma_\tau$ . При обжатиях  $\varepsilon < 0,15$  нормальные контактные напряжения при волочении меньше на 21-32 %.

Таблица 1

### Результаты экспериментов при прокатке и прокатке-волочении полос из алюминия

$h$ , мм	$\varepsilon$ , %	$b$ , мм	$P$ , кН	$P_{cp}$ , МПа	$T_{пв}$ , кН	$\sigma_{н'}$ , МПа
<i>Прокатка в приводных валках</i>						
1,02	4,67	23,50	2,03	74,6	-	-
0,98	8,41	23,55	2,83	77,3	-	-
0,93	13,08	23,60	4,29	93,8	-	-
0,87	18,69	23,55	6,71	123,1	-	-
0,80	25,23	23,50	7,65	121,8	-	-
0,75	29,91	23,45	9,53	140,0	-	-
0,70	34,58	23,60	10,93	148,7	-	-
0,65	39,25	23,65	11,4	145,5	-	-
0,62	42,06	23,60	12,26	151,5	-	-
0,56	47,66	23,75	13,2	152,6	-	-
<i>Волочение полос в неприводных валках</i>						
0,99	7,48	23,40	1,79	54,2	0,250	10,6
0,94	12,15	23,30	2,50	67,3	0,400	17,9
0,90	15,89	23,30	3,75	78,3	0,575	26,9
0,85	20,56	23,30	4,92	85,1	0,755	37,4
0,79	26,17	23,35	5,70	91,7	0,975	51,9
0,71	33,64	23,35	6,56	92,7	1,250	74,0
0,67 <sup>1)</sup>	37,38	23,40	6,87	93,3	1,300	81,3
0,62 <sup>2)</sup>	42,06	23,40	7,09	92,3	1,480	100,1
0,565 <sup>3)</sup>	47,20	22,35	7,34	87,8	1,575	122,4

Примечание: 1 – появление линий течения Людерса; 2 – обрыв полосы в конце протягивания; 3 – обрыв полосы в начале протягивания

Таблица 2

### Опытные и расчетные величины при $P_{cp}/\sigma_T$ прокатке-волочении в холостых валках

$h$ , мм	$\sigma_T$ , МПа	$f_b$	$P_{cp}/\sigma_T$	
			опытные	расчетные
0,99	67,0	0,076	0,81	0,68
0,94	74,4	0,080	0,91	0,92
0,90	78,0	0,075	1,01	1,03
0,85	81,8	0,077	1,04	1,05
0,79	85,1	0,085	1,08	1,03
0,71	89,1	0,094	1,04	1,02

Очевидно, в тех условиях деформации полос, когда относительное обжатие не превышает  $\varepsilon = 0,10 - 0,15$  целесообразно вместо процесса прокатки (дрессировки) применять процесс прокатки-волочения в валках с отключенным приводом (то есть в холостых валках). При волочении с обжатием  $\varepsilon = 0,3 - 0,4$  среднее нормальное контактное напряжение

$P_{cp}$  на 32-36 % ниже, чем при прокатке. Однако при прокатке-волочении с  $\varepsilon = 37,38$  % на готовой полосе в процессе протягивания образуются линии течения (линии Людерса), а при обжатиях  $\varepsilon \geq 42,06$  происходит обрыв полосы после выхода ее из валков. В этих условиях отношение  $\sigma_{н'}/\sigma_T \geq 0,8$ .

Из табл. 1, 2 следует, что при прокатке в приводных валках среднее нормальное контактное напряжение  $P_{cp}$  во всем диапазоне обжатий превышает величины напряжения течения металла  $\sigma_T$ , особенно при  $\varepsilon > 0,3$ . Это свидетельствует о существовании в очаге деформации объемного напряженного состояния. При волочении в неприводных валках значения среднего нормального контактного напряжения  $P_{cp}$  во всем диапазоне обжатий меньше напряжения течения  $\sigma_T$  на выходе из валков. Это обусловлено различным характером напряженного состояния металла в очаге деформации.

При расчете отношения  $P_{cp}/\sigma_T$  по формуле (9) коэффициент  $C_n$  определяем по выражению (5), отношение  $f_n/f_b$  — по выражению (10). Отношение  $\gamma/\alpha$  для средних значений относительных обжатий, определенное экспериментальным путем по опережению, оказалось равным  $\gamma/\alpha \approx 0,58$  (отношение  $\gamma/\alpha$  учитывает влияние сил трения в подшипниках качения). Как следует из табл. 2, опытные значения  $P_{cp}/\sigma_T$  при обжатиях  $\varepsilon \leq 12$  % оказались меньше единицы. Это свидетельствует о том, что в этих условиях деформации влияние напряжений натяжения полосы превалирует над влиянием контактного трения в очаге деформации. Однако и при обжатиях  $\varepsilon \geq 12$  % влияние трения незначительно и коэффициент напряженного состояния всего  $P_{cp}/\sigma_T = 1,01 - 1,08$ . Из табл. 2 также следует, что при использовании действительных (опытных) значений  $f_n/f_b$  и отношения  $\gamma/\alpha$  теоретические значения и отношения  $P_{cp}/\sigma_T$  достаточно близки к опытным. Это свидетельствует о правомерности представленной теоретической зависимости (9).

### Выводы

Таким образом, при прокатке-волочении полос усилие деформации металла и средние нормальные контактные напряжения на 21-36 % меньше, чем при прокатке в приводных валках и близки к средним величинам напряжения течения металла. Предложена теоретическая зависимость расчета коэффициента напряженного состояния  $P_{cp}/\sigma_T$  при прокатке-волочении в неприводных валках, которая достоверно отражает напряженное состояние в очаге деформации.



## Литература

1. Целиков А. И., Гришков А. И. Теория прокатки. – М.: Металлургия, 1970. – 358 с.
2. Николаев В. А. Теория прокатки. – Запорожье: ЗГИА, 2007. – 228 с.
3. Королев А. А. Новые исследования деформации металла при прокатке. – М.: Машгиз, 1953. – 257 с.
4. Выдрин В. Н. Динамика прокатных станов. – Свердловск: Metallurgizdat, 1960. – 247 с.
5. Николаев В. А., Скороходов В. Н., Полухин В. П. Несимметричная тонколистовая прокатка. – М.: Металлургия, 1993. – 192 с.
6. Теория и технология несимметричной прокатки / В. А. Николаев, В. Л. Мазур, А. К. Голубченко, Е. В. Бинкевич. – М.: Агенство «Информарт», 1996. – 262 с.
7. Николаев В. А. Влияние несимметрии на силовые условия прокатки // Металлургическая и горнорудная пром-сть. – 2005. – № 4. – С. 43-46.
8. Николаев В. А. Силовые параметры в несимметричных условиях прокатки // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 2007. – № 3. – С. 20-22.
9. Освоение технологии несимметричной горячей прокатки на НШС 2000 ЧерМК / А. Ф. Пименов, Ю. В. Липухин, А. И. Трайно и др. // Сталь. – 1988. – № 6. – С. 37-42.
10. Экспериментальное исследование неустановившегося процесса прокатки в клети с одним холостым валком / В. П. Холодный, В. К. Звонарев, А. В. Устинов и др. // Металлургия и коксохимия. – Киев: Техника, 1982. – № 78. – С. 75-78.
11. Николаев В. А. Удельные давления при прокатке в валках разного диаметра // Изв. вузов. Чер. металлургия. – 1970. – № 1. – С. 87-90.
12. Степаненко В. И., Стукач А. Г., Железняк Л. М. Силовые условия при волочении через роликовую волоку // Там же. – 1973. – № 8. – С. 97-103.
13. Николаев В. А. Оценка точности формул для расчета среднего нормального контактного напряжения при холодной прокатке // Там же. – 2004. – № 11. – С. 36-38.

### НИКОЛАЄВ В. О., ВАСИЛЬЄВ А. О. Силові параметри при волочінні у холостих валках

*Наведено результати лабораторних досліджень процесу прокатки-волочіння штаб. Дослідами встановлено, що при прокатуванні-волочінні штаб зусилля деформування металу та середні нормальні контактні напруження на 21-36 % менші, ніж при прокатуванні у приводних валках і близькі до середніх величин напруження металу. Запропонована теоретична модель розрахунку коефіцієнту напруженого стану  $p_{cp}/\sigma_T$  при прокатуванні-волочінні у неприводних валках, яка достовірно відображує напружений стан в осередку деформації.*

### NIKOLAIV V., VASYL'YEV A. Force parameters in the process of drawing in free rolls

*The results of laboratory researches of rolling-drawing strips are proposed in this article. On the base of many experiments it was established that during the process of rolling-drawing strips the strain of metal and average normal contact strains are 21-36 % less than during the rolling in driven rolls and they are close to average value of yield metal limits. The theoretical calculation model of index strains condition  $p_{AV}/\sigma_{YML}$  in the rolling-drawing process in free rolls is proposed here, and it truthly shows the strain condition in straining region.*