

В. А. Николаев /д. т. н./

Запорожская государственная инженерная академия, г. Запорожье, Украина
e-mail: uanva@i.ua

Определение плеча крутящего момента при прокатке тонких полос

V. A. Nikolaev /Dr. Sci. (Tech.)/

Zaporozhye State Engineering Academy,
Zaporozhye, Ukraine
e-mail: uanva@i.ua

Definition of the shoulder of the torque moment for rolling the thin banks

Приведены условия определения собственно крутящего момента при прокатке полос. Выполнена оценка влияния скорости скольжения под нагрузкой на контакте между приводным и не приводным валками и показана возможная доля крутящего момента качения скольжения от момента на шейках рабочих валков.

Выполнен анализ результатов исследований по определению коэффициента плеча собственно крутящего момента при холодной прокатке полос и рекомендованы области применения полученных зависимостей для коэффициента плеча ψ_c . (Ил. 2. Табл. 1. Библиогр.: 8 назв.)

Ключевые слова: металл, прокатка, тонкая полоса, валок, плечо крутящего момента

Мощность, затрачиваемая на прокатку полос, в значительной степени обусловлена интенсивностью пластической деформации металла, величина которой оценивается крутящим моментом. Одним из составляющих крутящего момента является коэффициент плеча ψ , достоверность значений которого, вместе с другими параметрами, определяет точность расчетных величин мощности главного привода. В литературе имеются предложения по расчету коэффициента плеча момента, но отсутствует оценка их применимости. В связи с этим в настоящей статье выполнен анализ некоторых методов расчета коэффициента ψ и дано сравнение с опытными данными.

В общем случае крутящий момент в установленном процессе прокатки на шейках рабочих валков рассчитывают (без учета трения в деталях главной линии стана, шейках рабочих валков и холостого хода) по формуле:

$$M_{\text{пр}} = M_{\text{п}} + M_{\text{ТС}} + M_{\text{оп}} \quad (1)$$

где $M_{\text{п}}$, $M_{\text{ТС}}$, $M_{\text{оп}}$ – составляющие общего крутящего момента, затрачиваемые, соответственно, на: собственно прокатку (пластическую деформацию металла), трение качения (скольжения) на контакте рабочего и опорного валков и трение в шейках опорного валка.

Для определения крутящего момента собственно прокатки из опытных значений общего крутящего момента $M_{\text{пр}}$ используют выражение (1):

$$M_{\text{п}} = M_{\text{пр}} - M_{\text{ТС}} - M_{\text{оп}}. \quad (2)$$

Коэффициент плеча момента ψ рассчитывают из выражения:

$$\psi = M_{\text{п}} / P \cdot l_d \quad (3)$$

где ψ – коэффициент плеча момента; P – сила прокатки; l_d – длина дуги контакта.

Таким образом, для определения коэффициента плеча момента ψ по опытными значениям $M_{\text{пр}}$ в первую очередь необходимо определить величины моментов $M_{\text{ТС}}$ и $M_{\text{оп}}$.

Момент $M_{\text{оп}}$ рассчитывают известным методом [1], а момент $M_{\text{ТС}}$ необходимо определять отдельно для каждой клетки кварто. О параметре $M_{\text{ТС}}$ можно лишь условно говорить как о моменте трения качения, так как по длине контакта между рабочим и опорным валками всегда имеет место трение скольжения [2; 3] и существенные затраты (9...43 %) мощности главного привода на его преодоление [4]. По нашим исследованиям [2; 3], при вращении под нагрузкой нормальной силой P двух валков, один из которых холостой, на приводном валке возникает крутящий момент $M_{\text{ТС}}$, величина которого зависит от разницы Δ диаметров валков (диаметр валков ~ 100 мм).

Коэффициент трения на межвалковом контакте определяли из соотношения:

$$f_c = M_{\text{ТС}} / P \cdot R, \quad (4)$$

где R – радиус валка.

В условиях свободного скольжения на межвалковом контакте, когда ведомый валок работает подобно опорному валку клетки кварто, то есть без привода, коэффициент трения оказался равным (валки сухие) $f_c = 0,017$ (при $\Delta = 0,05$ мм и относительной скорости скольжения $v_{СК} \approx 0,0005$) и $f_c = 0,024$ при $\Delta = 0,2$ мм ($v_{СК} \approx 0,002$) ($P = 14,0$ кН):

$$v_{СК} = \frac{v_B - v_M}{v_B} = \frac{D_B - D_M}{D_B}, \quad (5)$$

где v_B, D_B – скорость и диаметр ведущего валка; v_M, D_M – скорость и диаметр ведомого валка.

То есть с увеличением скорости скольжения в 4 раза коэффициент трения на межвалковом контакте возрастает в 1,4 раза, а наличие технологической смазки (индустриальное масло) уменьшает коэффициент трения в два раза. Скорости скольжения, полученные в лабораторных условиях, соответствуют имеющим место на промышленных станах. Так, при разнице диаметров по длине бочек валков $\Delta = 0,3$ мм и $D_B = 600$ мм из формулы (5) получим $v_{СК} = 0,0005$. Очевидно, при таком скольжении и наличии смазки коэффициент трения может оказаться равным $f_c = 0,005 \dots 0,01$, а крутящий момент на рабочем валке окажется равным (для одной пары валков):

$$M_{TC} = f_c \cdot P \cdot R = 0,0075 \cdot 15 \cdot 0,3 = 0,034 \text{ МН}\cdot\text{м}, \quad (6)$$

величина которого соизмерима с величиной крутящего момента на шейках рабочих валков в клетях чистовой группы непрерывного широкополосного стана горячей прокатки (ШСГП) 1680 [5]. При известных значениях M_{TC} и M_{OP} из формул (2) и (3) представляется возможным установить истинные значения коэффициента плеча момента в очаге деформации.

В работе [5] коэффициент плеча момента определяли по опытным данным M_{PP} и P из формулы:

$$\psi = M_{PP} / P \cdot l_d \quad (7)$$

то есть с учетом дополнительных моментов трения M_{TC} и M_{OP} . На основании результатов исследований в работе [5] получена формула для расчета коэффициента плеча момента в виде (прокатка в клетях чистовой группы ШСГП 1680, $l_c/h_{CP} \approx 3 \dots 7$):

$$\psi = 0,498 - 0,0283 \left(\frac{l_d}{h_{CP}} \right), \quad (8)$$

где h_{CP} – средняя толщина полосы в очаге деформации.

Так как выражение (8) для коэффициента ψ получено с учетом параметров M_{TC} и M_{OP} , то оно не отражает действительного положения равнодействующей сил в очаге деформации и может быть использовано для расчета крутящего момента на шейках рабочих валков при деформационно-скоростном режиме подобном ШСГП 1680.

В работе [6] представлены обширные экспериментальные исследования влияния упругих деформаций валков и полосы на величину коэффициента плеча момента ψ_c при холодной прокатке стальных и алюминиевых полос. Значения коэффициента ψ_c получены при исключении потерь на трение в подшипниках опорных валков и на межвалковом контакте, то есть соответствуют чистому крутящему моменту в очаге деформации.

Анализ опытных данных [6] показывает, что упругие деформации валков и полосы, а также материал полос (величина средних нормальных контактных напряжений – СНКН) оказывают существенное влияние на коэффициент плеча момента. Так, увеличение длины дуги контакта в 1,2 раза (с $l_c/l_d = 1,0$ до $l_c/l_d = 1,2$) при прокатке стальных полос приводит к уменьшению коэффициента плеча момента с $\psi_c \approx 0,48$ до $\psi_c = 0,36$, а при прокатке алюминиевых полос – с $\psi_c = 0,53$ до $\psi_c = 0,34$. Такое снижение коэффициента ψ_c происходит за счет смещения центра тяжести эпюры нормальных напряжений в сторону вертикальной оси валков (рис. 1).

Из табл. 1 следует, что при одинаковых значениях фактора формы очага деформации l_c/h_{CP} при прокатке стальных полос относительное приращение упругих деформаций (l_c/l_d) существенно больше за счет больших значений напряжения

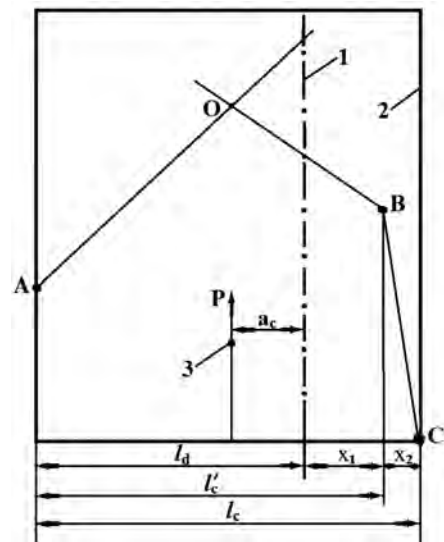


Рис. 1. Схема эпюры нормальных контактных напряжений по длине дуги контакта с учетом упругих деформаций валков и полосы:

1 – осевая линия валков; 2 – плоскость выхода полосы из валков; 3 – центр тяжести эпюры (A – плоскость входа; C – плоскость выхода полосы из валков) (a_c – плечо крутящего момента относительно осевой линии; l'_c – длина дуги контакта с учетом упругой деформации валков; x_1 и x_2 – приращение длины дуги за счет упругой деформации валков и упругого восстановления полосы

течения металла и, следовательно, СНКН. При $l_c/l_d \leq 1,05$ коэффициента плеча момента при прокатке алюминиевых полос оказывается больше, чем стальных полос, а при $l_c/l_d > 1,05$ – наоборот. Из опытных данных [6, рис. 21] также следует, что при прокатке полос с различными обжатиями в сплюснутых валках фактор формы l_c/h_{CP} мало влияет на величину коэффициента положения равнодействующей сил, что следует из достаточно плотно расположенных опытных точек на обобщенной зависимости.

Таблица 1

Параметры очага деформации [6] и среднее значение при холодной прокатке полос коэффициента плеча момента ψ_c

Материал полосы	l_c/h_{CP}	l_c/l_d	ψ_c
Сталь	1,81	1,28	0,365
Алюминий	1,84	1,0	0,53
Сталь	4,16	1,8	0,16
Алюминий	4,3	1,23	0,32

Дополнительный анализ экспериментальных данных [6] с учетом отмеченных особенностей прокатки стальных и алюминиевых полос позволяет предложить уточненные зависимости для расчета коэффициента плеча момента при холодной прокатке для стальных полос ($l_c/h_{CP} > 3,0$):

$$\psi_c = 0,48 (l_d/l_c)^{1,8} \quad (9)$$

Для расчета коэффициента плеча момента при прокатке алюминиевых полос, а также при горячей прокатке полос имеем ($l_c/h_{CP} > 3,0$):

$$\psi_c = 0,53(l_d/l_c)^{1,8}, \quad (10)$$

где ψ_c – коэффициент плеча момента с учетом упругих деформаций валков и полосы; l_c – длина дуги контакта с учетом упругих деформаций валков и полосы.

Таким образом, при определении крутящего момента для холодной прокатки полос из стали или других металлов при $p_{CP} > 200$ Н/мм² (для любых значений фактора l_d/h_{CP}) коэффициент ψ_c рекомендуется рассчитывать по формуле (9). При прокатке мягкого металла и при горячей прокатке, с учетом упругих деформаций валков и полосы ($l_c/h_{CP} > 3,0$), коэффициент ψ_c следует рассчитывать по формуле (10).

Выше рассмотрены результаты определения коэффициента плеча крутящего момента экспериментальным методом. В работах [7; 8] коэффициент ψ определяли расчетно-графическим методом по местоположению центра тяжести на эпюрах нормального контактного напряжения, полученных из известных формул А. И. Целикова. Исследования выполнили для широкого диапазона изменения фактора формы очага деформации ($l_d/h_{CP} = 1...5$) и отношения в пределах

$f/\alpha = 0,35...5$ при прокатке стальных полос, но без учета влияния упругих деформаций валков и полосы. Показано, что форма эпюры при одинаковых нормальных контактных напряжениях оказывает влияние на величину коэффициента плеча момента.

Установлено, что при $l_d/h_{CP} = 1$ и $f/\alpha = 0,35...5$ (но без учета влияния упругих деформаций валков и полосы) коэффициент ψ изменяется в пределах $\psi = 0,48...0,54$, уменьшаясь до $\psi = 0,42...0,50$ при $l_d/h_{CP} = 3,0$. Очевидно, такой вариант прокатки при отсутствии сплюсывания валков возможен в клетях черновой группы ШСП. Расчет коэффициента ψ для этих клетей может быть выполнен по выражению (при факторе формы $l_d/h_{CP} \leq 3,0$ и $f/\alpha = 1...1,67$) [7; 8].

$$\psi = 0,51 (l_d/h_{CP})^{-0,10} \quad (11)$$

Определение коэффициента плеча крутящего момента с учетом упругих деформаций валков и полосы может быть выполнено с использованием компьютерной программы Kompas v 15 portable. На каждой эпюре нормальных контактных напряжений (рис. 1) определяли площадь и положение центра тяжести относительно плоскости выхода полосы из валков, определяли плечо момента, а затем рассчитывали коэффициент плеча момента относительно оси валков (длины дуги контакта l_d) по формуле:

$$\psi_c = \frac{a}{l_c} \cdot \frac{S_1}{S_0} = \psi \cdot \frac{S_1}{S_0}, \quad (12)$$

где a – плечо момента относительно плоскости выхода полосы из валков; l_c – длина дуги контакта с учетом упругих деформаций валков и полосы; ψ – коэффициент плеча момента относительно плоскости выхода полосы из валков; S_1 и S_0 – площади эпюры соответственно до осевой линии валков и общая.

Оценку достоверности данных, полученных по формуле (12), выполнили для эпюр нормальных напряжений с различными параметрами l_c/l_d (1,22; 1,37; 1,63 и 1,83) применительно к прокатке тонких стальных полос. Расчетные и опытные данные представлены в табл. 2.

Таблица 2

Опытные и расчетные величины средних значений коэффициента ψ_c для холодной прокатки стальных полос

l_c/l_d	Коэффициент плеча ψ_c (опыт)	Коэффициент плеча ψ_c расчет
1,22	0,35	0,36
1,37	0,29	0,31
1,63	0,190	0,202
1,83	0,173	0,191

Опытные и расчетные значения коэффициента ψ_c при $l_c/l_d = 1,37$ получены из работы [6, рис. 4а, образец 112]. Как следует из данных табл. 2, метод расчета коэффициента ψ_c по эшюрам нормальных напряжений пригоден также для использования его и в условиях прокатки при наличии упругих деформаций валков и полосы с ошибкой, не превышающей 10 %.

Выводы. Приведены условия определения собственно крутящего момента при прокатке полос. Выполнена оценка влияния скорости скольжения под нагрузкой на контакте между приводным и не приводным валками и показана возможная доля крутящего момента качения скольжения от момента на шейках рабочих валков.

Выполнен анализ результатов исследований [6] по определению коэффициента плеча собственно крутящего момента при холодной прокатке полос и рекомендованы области применения полученных зависимостей для коэффициента плеча ψ_c .

Библиографический список / References

1. Целиков А. И. Теория прокатки. Справочник / А. И. Целиков, А. Д. Томленов, В. И. Зюзин [и др.]. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.

Tselikov A. I., Tomlenov A. D., Zyuzin V. I. *Teoriya prokatki. Spravochnik*. Moscow, Metallurgiya, 1982, 335 p.

2. Николаев В. А. Условия скольжения на контакте между валками / В. А. Николаев // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1975. – № 10. – С. 84–86.

Nikolaev V. A. *Usloviya skol'zheniya na kontakte mezhdu valkami*. Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya, 1975, no. 10, pp. 84-86.

3. Николаев В. А. Условия скольжения на контакте между рабочего и опорного валков клетки кварто / В. А. Николаев // Металлургия и коксохимия. – К.: Техніка, 1976. – С. 28–32.

Nikolaev V. A. *Usloviya skol'zheniya na kontakte mezhdu rabocheho i opornogo valkov kleti kvarto*. Metallurgiya i koksokhimiya. Kyiv, Tekhnika, 1976, pp. 28-32.

4. Гарбер Э. А. Определение затрат энергии на трение качения в клетях кварто / Э. А. Гарбер, С. Н. Самарин, В.В. Ермилов // Производство проката. – 2007. – № 2. – С. 25–32.

Garber E.A., Samarin S.N., Ermilov V.V. *Opreделение zatrat energii na trenie kacheniya v kletyakh kvarto*. Proizvodstvo prokata, 2007, no. 2, pp. 25-32.

5. Сафьян М. М. Прокатка широкополосной стали / М. М. Сафьян. – М.: Металлургия, 1969. – 460 с.

Saf'yan M. M. *Prokatka shirokopolosnoy stali*. Moscow, Metallurgiya, 1969, 460 p.

6. Полухин П. И. Контактное взаимодействие металла и инструмента при прокатке / П. И. Полухин, В. А. Николаев, В. П. Полухин [и др.]. – М., 1974. – 200 с.

Polukhin P. I., Nikolaev V. A., Polukhin V. P. *Kontaktное vzaimodeystvie metalla i instrumenta pri prokatke*. Moscow, 1974, 200 p.

7. Николаев В. А. Определение плеча момента при прокатке в гладких валках / В. А. Николаев // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1963. – № 2. – С. 82–86.

Nikolaev V. A. *Opreделение plecha momenta pri prokatke v gladkikh valkakh*. Izv. vuzov. Chernaya metallurgiya, 1963, no. 2, pp. 82-86.

8. Николаев В. А. Теория и технология прокатки металла / В. А. Николаев. – Запорожье: Акцент Инвест-трейд, 2013. – 232 с.

Nikolaev V. A. *Teoriya i tekhnologiya prokatki metalla*. Zaporozh'e, Aktsent Invest-treyd, 2013, 232 p.

Given the conditions determining the actual torque during rolling of strips. Estimation of the influence of sliding speed under load at the contact between the drive and driven rollers, and shows the possible proportion of torque of rolling sliding moment on the necks of the work rolls.

The analysis of research results by definition, coefficients of case the actual shoulder torque in cold rolling of strips and recommended field of application of the obtained dependences for coefficients of the out shoulder ψ_c .

Key words: metal, rolling, thin strip, roll, shoulder of torque.

**Рекомендована к публикации
д. т. н. С. А. Воробьем**

Поступила 9.03.2016

Metallurgical and Mining
Industry

www.metaljournal.com.ua