

УДК 621.771.26:621.778.1-422:621.7.011

Лещенко А. И.
Раздобреев В. Г.
Ключников К. Ю.
Токмаков П. В.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЯГОВОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ ПРОФИЛЕЙ В ДВУХРОЛИКОВОЙ ВОЛОКЕ

Начиная с 50–60-х годов XX века, все большее распространение приобретают процессы холодной деформации в роликовых волокнах (процессы прокатки-волочения). К настоящему времени исследователями накоплен значительный теоретический и экспериментальный материал, разработаны процессы и технологические линии для производства простых и сложных профилей из черных и цветных металлов, получает все большее распространение производство холоднодеформированной арматуры на специализированных линиях [1–3].

В то же время отмечено [1, с. 130], что «До сих пор не существует совершенной теории волочения, которую можно было использовать для предсказания усилия волочения, возникающего при данном способе с приемлемой степенью точности». При этом погрешность расчета величины тягового напряжения по известным методам [2–5] может достигать 30–50 % и более в сравнении с экспериментальными значениями. Таким образом, задача разработки теоретического метода, позволяющего с достаточной точностью определять величину тягового напряжения при волочении в роликовых волокнах, является актуальной и будет способствовать дальнейшему теоретическому и практическому развитию этого процесса.

Целью настоящей работы является разработка метода расчета тягового напряжения при волочении профилей прямоугольного сечения в двухроликовой волоке и оценка его точности по известным экспериментальным данным.

Разрабатываемый метод основан на подходе, принятом при определении сопротивления, создаваемого двухвалковой неприводной клетью (НК) при деформации в ней металла с задним подпором для случая непрерывной сортовой прокатки [6]. Метод, приведенный в работе [6], основан на положениях энергетической теории процесса прокатки и учитывает действительное положение нейтрального угла в очаге деформации НК.

Адаптируя разработанный метод применимо к процессу прокатки-волочения, запишем выражение по определению напряжения, необходимого для деформации металла в роликовой волоке (РВ) в следующем виде:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_s} = \frac{2}{\sqrt{3}} A_1 + 2f_{\sigma} \left\{ \sqrt{\frac{R}{h_1}} (2 \arctg \sqrt{\frac{R}{h_1}} \gamma - \arctg \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}}) + A_2 \right\} + A_3, \quad (1)$$

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

$$A_2 = 0,09 \frac{b_0}{h_0} \frac{n}{1+n} \left[\left(\frac{h_0}{h_1} \right)^{1+n} - 1 \right], \quad (3)$$

$$A_3 = \alpha_0 b_{cp} n_{\sigma} \frac{f_{u} d_{u}}{F_1 (1+S)}. \quad (4)$$

В выражениях (1)–(4) приняты следующие условные обозначения:

σ_1 – напряжение переднего (тягового) натяжения, необходимое для деформации металла в РВ;

σ_s – напряжение текучести металла на выходе из очага деформации РВ;
 f_σ – показатель сил трения;
 h_0, b_0 – геометрические размеры раската перед РВ;
 h_1 – высота раската после РВ;
 Δh – абсолютное обжатие в РВ;
 R – радиус вала РВ;
 γ – нейтральный угол в очаге деформации РВ;
 α_0 – угол контакта металла с валком в очаге деформации РВ;
 k – коэффициент распределения деформации, определяемый отношением скоростей линейной деформации в направлениях уширения и обжатия;
 λ – коэффициент вытяжки в РВ;
 m – поправочный коэффициент, определяющий интенсивность скорости деформации сдвига, $m = 0,35$;
 h_{cp}, b_{cp} – средняя высота и ширина полосы в очаге деформации РВ;
 ζ – корректирующий коэффициент;
 n – коэффициент пропорциональности, определяемый отношением уширения полосы и ее обжатия;
 n_σ – коэффициент напряженного состояния металла в очаге деформации РВ;
 f_{uu} – коэффициент трения в опорах валков РВ;
 d_{uu} – диаметр шейки вала РВ;
 F_1 – сечение раската на выходе из РВ;
 S – опережение в очаге деформации РВ.

Зависимости для расчета коэффициентов k , n и ζ приведены в работе [7].

Выражение для определения величины нейтрального угла γ в РВ при прокатке-волочении, входящее в выражение (1), запишем в следующем виде:

$$\gamma = \sqrt{\frac{h_1}{R}} \operatorname{tg} \frac{1}{2} \left[\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\Delta h}{h_1}} + \sqrt{\frac{h_1}{R}} \left(\frac{1}{2f_\sigma} \left\{ \frac{\sigma_1}{\sigma_s} - \frac{2}{\sqrt{3}} A_1 - A_3 \right\} - A_2 \right) \right], \quad (5)$$

где величины A_1 , A_2 , и A_3 определяются по зависимостям (2)–(4).

Так как величина γ в выражении (5) зависит от отношения σ_1/σ_s , то уравнения (1) и (5) решаются методом последовательных приближений по аргументу σ_1/σ_s .

Применяя рекомендации работы [7], используя упрощение $\operatorname{arctg}(x) \approx x$ и пренебрегая величиной A_2 ввиду малого уширения в процессе холодной деформации при прокатке-волочении, запишем зависимости (1) и (5) в виде:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_s} = \zeta \ln \lambda + 2f_\sigma R b_{cp} \frac{2\gamma - \alpha_0}{F_1} + \alpha_0 n_\sigma b_{cp} \frac{f_{uu} d_{uu}}{F_1(1+S)}, \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{\alpha_0}{2} + \frac{\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_s} - \zeta \ln \lambda \right) F_1 - \alpha_0 n_\sigma b_{cp} f_{uu} d_{uu}}{2f_\sigma R b_{cp}}, \quad (7)$$

где ζ – коэффициент, учитывающий неравномерность деформации и деформацию сдвига в плоскости входа металла в валки [7].

Анализ выражения (6) показывает, что при прокатке-волочении величина тягового напряжения зависит от энергозатрат на формоизменение деформируемой полосы, энергозатрат на преодоление сил контактного трения на поверхности «полоса-валок» с учетом размеров зон отставания и опережения и от энергозатрат на преодоление сил трения в опорах валков роликовой волоки.

С использованием выражений (6) и (7) выполнены расчеты величины тягового напряжения, необходимого для осуществления процесса деформации в РВ. Режимы деформации при расчете и экспериментальные значения напряжения волочения приняты на основании

экспериментальных исследований холодной прокатки-волочения медных (медь марки М1) и стальных (сталь марки 08) полос, представленных в работе [8]. Значения напряжения текучести металла определялись по кривым упрочнения, полученных авторами работы [8] экспериментально для использованных в опытах образцов. Значения коэффициента трения при установившемся процессе деформации в РВ приняты на основании работы [9] и составляют: $f = 0,18$ для медных и $f = 0,2$ для стальных образцов.

На рис. 1, 2 приведены значения погрешности расчета величины тягового напряжения при прокатке-волочении медных и стальных образцов по разработанным выражениям. Для сравнения, приведены значения погрешности расчета тягового напряжения по известным методам [2–5].



Рис. 1. Значения погрешности расчета величины тягового напряжения при прокатке-волочении медных образцов при изменении логарифмического показателя высотной деформации:

1 – по разработанным выражениям; 2 – по выражению (6) работы [2]; 3 – по выражению, приведенному в работе [3]; 4 – по выражению (37) работы [4]; 5 – по выражению (8) работы [5]

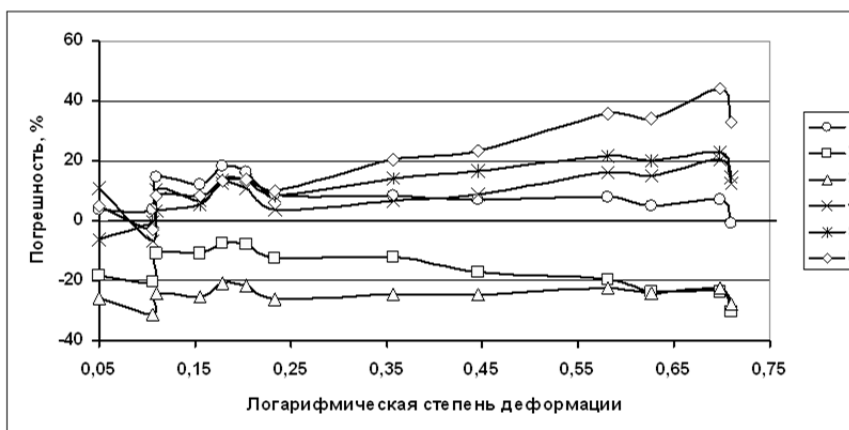


Рис. 2. Значения погрешности расчета величины тягового напряжения при прокатке-волочении стальных образцов при изменении логарифмического показателя высотной деформации:

1 – по разработанным выражениям; 2 – по выражению (6) работы [2]; 3 – по выражению, приведенному в работе [3]; 4 – по выражению (33) работы [4]; 5 – по выражению (37) работы [4]; 6 – по выражению (8) работы [5]

Основываясь на результатах расчетов по определению величины тягового напряжения при прокатке-волочении для различных металлических материалов, можно установить, что разработанные выражения позволяют с достаточной точностью определять этот параметр. Диапазон значений погрешности расчета тягового напряжения с использованием разработанных выражений составляет (-14...+12 %) для медных и (-1...+18 %) для стальных образцов.

Поскольку выражение (6) позволяет установить долю затрат в тяговом напряжении волочения на формоизменение проволочиваемой полосы, на преодоление сил контактного трения на поверхности «полоса-валок» и на преодоление сил трения в опорах валков РВ, нами была выполнена такая оценка с привлечением экспериментальных данных работы [8].

Анализ полученных данных позволил установить, что при холодной прокатке-волочении затраты на формоизменение составляют около 99 % от тягового напряжения волочения, а суммарная доля затрат на преодоление сил контактного трения и на преодоление сил трения в опорах валков составляет около 1 % от тягового напряжения.

Следовательно, для теоретического определения тягового напряжения в процессе прокатки-волочения выражение (6) настоящей работы можно привести к виду:

$$\sigma_1 = \zeta \sigma_s \ln \lambda, \quad (8)$$

где ζ – коэффициент, учитывающий неравномерность деформации и деформацию сдвига в плоскости входа в валки, определяемый по выражению, приведенному в работе [7].

ВЫВОДЫ

С использованием положений энергетической теории прокатки, получены выражения для определения величины тягового напряжения в процессе прокатки-волочения с применением двухвалковых роликовых волок. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало, что разработанные выражения можно использовать для определения величины тягового напряжения при прокатке-волочении с погрешностью, не превышающей 18 %.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Битков В. В. *Технология и машины для производства проволоки* / В. В. Битков. – Екатеринбург : УрО РАН, 2004. – 348 с.
2. Зинутти А. *Преимущества роликовых волок при волочении проволоки* / А. Зинутти, Д. Сапо // Специализированный журнал «Метизы». – Ассоциация «РосМетиз», 2009. – №1 (20) – С. 37–41.
3. Wright, Roger N. *Wire technology : process engineering and metallurgy* / Roger N. Wright. Copyright © 2011, Elsevier Inc. – 320 p.
4. Гулько В. И. *Производство профилей и проволоки в роликовых волоках* / В. И. Гулько, В. А. Войцеховский, А. К. Григорьев. – Ижевск : Удмуртия, 1989. – 132 с.
5. Николаев В. А. *Напряжение при волочении полос в неприводных валках* / В. А. Николаев // *Металл и литье Украины*. – 2009. – № 4–5. – С. 70–72.
6. Лещенко А. И. *Метод расчета сопротивления, создаваемого двухвалковой неприводной рабочей клетью при сортовой прокатке* / А. И. Лещенко, С. А. Воробей // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 3 (32) – С. 154–159.
7. Выдрин В. Н. *Процесс непрерывной прокатки* / В. Н. Выдрин, А. С. Федосиенко, В. И. Крайнов. – М. : Металлургия, 1970. – 456 с.
8. Тарновский И. Я. *Прокатка-волочение в неприводных валках* / И. Я. Тарновский, В. И. Шилов // *Расчет и конструирование заводского оборудования : сб. статей.* – Машигиз, 1958. – Вып. 64. – С. 111–127.
9. Грудев А. П. *Внешнее трение при прокатке* / А. П. Грудев. – М. : Металлургия, 1973. – 288 с.

Лещенко А. И. – мл. науч. сотрудник ИЧМ НАН Украины;

Раздобреев В. Г. – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник ИЧМ НАН Украины;

Ключников К. Ю. – мл. науч. сотрудник ИЧМ НАН Украины;

Токмаков П. В. – мл. науч. сотрудник ИЧМ НАН Украины.

ИЧМ НАН Украины – Институт черной металлургии им. З. И. Некрасова Национальной академии наук Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: office.isi@nas.gov.ua