

Методы оценки формул для расчета среднего контактного напряжения при прокатке полос

Представлены методы расчета СНКН и силы прокатки для условий горячей и холодной прокатки, позволяющие объективно оценивать достоверность теоретических формул для определения среднего нормального контактного напряжения. Библиоогр.: 10 назв.

Ключевые слова: прокатка, сила, трение, напряжение, контакт, течение, металл
The methods of calculation of SNKN and forces of rolling are presented for terms hotter and cold rolling, allowing objectively to estimate authenticity of theoretical formulas for determination of middle normal contact tension.

Keywords: rolling, force, friction, tension, contact, flow, metal

Введение

Проблемы расчета силы прокатки P возникают в связи с необходимостью точного расчета среднего нормального контактного напряжения p_{cp} (СНКН) и длины дуги контакта l_d , значения которых должны отражать фактические условия деформации металла в реальном процессе прокатки полосы. Существуют различные методы определения СНКН:

- на базе дифференциального уравнения Т. Кармана [1];
- с использованием уравнения равенства мощностей внешних и внутренних сил; [2];
- метод конечных разностей [3].

Первые два метода позволяют после решения получить зависимости для определения СНКН, а третий метод полезен, главным образом, для определения СНКН при изменении нормальных контактных напряжений по дуге контакта при резком изменении механических свойств и геометрии прокатываемого металла, например, на участке сварного шва при холодной прокатке полос [4]. Для получения зависимостей для расчета СНКН в серийных условиях прокатки чаще применяют первый метод, впервые разработанный А. И. Целиковым.

При решении дифференциального уравнения Т. Кармана и получении зависимостей для СНКН, А. И. Целиков принимает допущения, представленные в работе [1]. В последующих работах [4-7] получены инженерные решения для СНКН при устранении (смягчении) известных допущений. При этом установлено, что учет упрочнения металла по дуге контакта увеличивает p_{cp} на 2-4 %, а учет зоны прилипания - в такой же степени уменьшает p_{cp} . Замена хорды, при решении задачи для тонких полос и коэффициенте трения $f < 0,2$, параболической дугой контакта практически не влияет на p_{cp} . Величина p_{cp} заметно увеличивается при увеличении зоны отставания, но рассматривать этот факт в отрыве от изменения при этом коэффициента трения не имеет смысла.

Оценку точности теоретических формул для расчета СНКН на основании экспериментальных

величин выполняют различными методами. В данной статье предлагается некоторая систематизация методов оценки СНКН.

Основная часть исследований

С учетом минимума допущений в работах [6-7] представлено выражение для расчета СНКН для условий холодной прокатки, которое имеет вид:

$$p_{cp} = \sigma_{\phi} [n_{cp} + C_H \cdot f_{\Pi} \cdot l_c / h_{cp}] \cdot (1 - x_2 / l_c) + 0,5 \sigma_{\phi_1} x_2 / l_c; \quad (1)$$

$$x_2 = n_1 \cdot \sigma_{\phi_1} \cdot R / 95000; \quad n_{cp} = 1 - (\sigma_0 + \sigma_1) / 2 \sigma_{\phi};$$

$$n_1 = 1 - \sigma_1 / \sigma_{\phi_1}; \quad \sigma_{\phi} = \lambda \cdot \sigma_{\tau};$$

$$C_H = 0,17(1 + 14,7 f_{\Pi}) \text{ при } f_{\Pi} \leq 0,12;$$

$$C_H = 0,48 \text{ при } f_{\Pi} \geq 0,12$$

где l_c - длина дуги контакта с учетом упругих деформаций валков и полосы; h_{cp} - средняя толщина полосы в очаге деформации; f_{Π} - показатель трения из условия Э. Зибеля; C_H - коэффициент, учитывающий интенсивность трения; x_2 - упругая составляющая длины дуги контакта; σ_0 и σ_1 - напряжения соответственно заднего и переднего натяжений; λ - коэффициент Лоде; σ_{τ} - среднее напряжение течения металла в очаге деформации; σ_{ϕ} и σ_{ϕ_1} - сопротивление металла деформации соответственно среднее и после прокатки (на выходе из валков); n_{cp} и n_1 - коэффициенты, учитывающие влияние натяжений.

При прокатке полос без натяжений и без учета параметра x_2 упругих деформаций валков и полосы получим ($l_d / h_{cp} > 1,0$) [6, 7]

$$p_{cp} = \sigma_{\phi} (1 + C_H \cdot f_{\Pi} \cdot l_d / h_{cp}). \quad (2)$$

Показатель трения равен:

$$\text{горячая прокатка} - f_{\Pi} = f(0,92 + 1,27\varepsilon); \quad (3)$$

$$\text{холодная прокатка} - f_{\Pi} = 1,6 \cdot f - 0,018, \quad (4)$$

где f - коэффициент трения из условия Г. Амонтона (но не условие Кулона-Амонтона, как это встречается в некоторых публикациях. Условие Ш. Кулона имеет иную структуру).

Таким образом, из выражения (2) следует, что (не считая влияния длины дуги контакта) параметр СНКН определяется напряжением течения металла σ_{τ} (или σ_{ϕ}) и показателем f_{Π} (коэффициентом f)

трения. Установлено экспериментально, что показатель трения определяется величиной коэффициента трения, а при горячей прокатке и относительным обжатием.

Между условиями трения Г. Амонтона ($\tau = f \cdot p$) и Э. Зибеля ($\tau = f_n \cdot \sigma_\phi$) существует логическая связь, показанная в работах [6, 10] (τ – контактное касательное напряжение). Приравнявая при $\tau = \text{const}$ приведенные два выражения (3) и (4) получим:

$$f \cdot p = f_n \cdot \sigma_\phi; \quad f_n = f \cdot p / \sigma_\phi; \quad f_n / f = n_\sigma = p / \sigma_\phi, \quad (5)$$

где n_σ – коэффициент напряженного состояния.

Особенность выражений (5) заключается в том, что отношение f_n / f может быть определено только экспериментальным путем, то есть при наличии опытных данных, например, $p = p_{cp}$ и σ_ϕ . Именно таким образом были получены выражения (3) и (4) для показателя трения f_n [6, 10].

Существуют обязательные условия определения параметров (σ_τ, f_n, f, l_c) при оценке точности теоретических формул для расчета СНКН, в сравнении с данными промышленных опытов, не соблюдение которых вряд ли может обеспечить достоверные результаты оценки. Например, в том случае если коэффициент трения определяют по эмпирическим формулам, полученным в лабораторных экспериментах, или принимают не обоснованные приблизительные величины, при этом утверждая, что коэффициент трения не зависит от скорости прокатки; для расчета показателя трения применяют формулы, учитывающие лишь влияние геометрических параметров, в которых не отражено каким либо образом влияние температуры, скорости прокатки, шероховатости валков и т. п. Такие методы оценки теоретических формул для расчета СНКН дискредитируют результаты и вводят в заблуждение исследователей.

Метод 1. Оценка любой теоретической формулы для расчета СНКН может быть выполнена только по тем экспериментальным данным СНКН, например, при холодной прокатке, которые получены в условиях такого эксперимента, где одновременно определены сила прокатки (с помощью тарированных месдоз), известными методами напряжение течения металла, коэффициент трения и длина дуги контакта с учетом упругих деформаций валков и полосы. Например, напряжение течения металла определяют на прокатанных образцах, на тарированных разрывных машинах, коэффициент трения – по опережению, длину дуги контакта известным методом параллельной прокатки опытных стальных полос и свинцовых полос. То есть должны быть получены реальные значения СНКН при расчете по формулам (1, 2).

По методу 1 выполнена оценка точности различных формул при холодной прокатке полос на лабораторном стане 260 [7, 8]. На основании анализа формул: А. И. Целикова, А. А. Королева, А. В. Третьякова, М. Д. Стоуна, В. М. Луговского, В. А. Николаева (формулы приведены в указан-

ных работах) установлено, что при использовании опытных значений параметров f_n, f, σ_τ, l_c размах ошибки расчета составляет 10-16,2 %, при меньших значениях ошибки по формулам В. А. Николаева (2) (11 %) и по формуле В. М. Луговского (10 %)

$$p_{cp} = \sigma_\phi (1 + 0,5 \cdot f \cdot l_c / h_{cp}). \quad (6)$$

Таким образом, даже при использовании опытных величин параметров f_n, f, σ_τ, l_c в конкретных условиях эксперимента, размах ошибки колеблется в пределах 10-16 %, что обусловлено, очевидно, уровнем влияния допущений, принятых в различных формулах, колебанием механических свойств различных образцов, переменными условиями контактного трения.

Метод 2. При оценке теоретических формул для расчета СНКН по опытным величинам силы прокатки в промышленных условиях и СНКН необходим иной подход. Параметры f_n, f, σ_τ, l_c должны быть определены по аналитическим (экспериментальным) формулам (параметры f_n, f, σ_τ) или теоретическим зависимостям (l_c). Однако достоверность зависимостей для расчета указанных параметров прокатки должна быть всесторонне подтверждена в специальных лабораторных и промышленных условиях прокатки.

Этот метод применен для оценки некоторых теоретических формул для СНКН при горячей прокатке полос [7, 9]. В этих расчетах параметры f и f_n определяли по методу, предложенному в работах [6, 7, 9], в котором базовая составляющая зависимости, учитывающая влияние скорости прокатки и шероховатости валков, определена на промышленных станах. Напряжение течения металла определяли по методу из работ [7, 9], который при сравнительной оценке, выполненной А. В. Яковченко [24], обеспечивает точность расчета со средней ошибкой 14,5 % против ошибки в 21,2 % при расчете по методу Л. В. Андреюка и др.

На основании расчетов по формулам: А. И. Целикова, А. А. Динника, М. Я. Бровмана, В. Ф. Потапкина, А. А. Королева, В. М. Луговского, В. А. Николаева (по экспериментальным данным при горячей прокатке А. А. Динника) показано, что размах ошибки расчетов увеличился и составляет уже 12,6-26,0 %. При этом, как и по методу 1, минимальные ошибки в расчете СНКН получены по формулам В. М. Луговского (~13 %) и В. А. Николаева (~16 %). Таким образом, расчеты по различным формулам и сравнение их с опытными данными позволяет утверждать, что наиболее достоверные теоретические величины СНКН могут быть получены по формулам В. А. Николаева [(1) и (2)] и по формуле В. М. Луговского [6].

Метод 3. Известен также метод экспериментального определения коэффициента напряженного состояния металла в очаге деформации на основании экспериментальных данных по опережению (углу критического сечения) при одновременном экспериментальном определении длины дуги контак-

та с учетом упругих деформаций валков и полосы [7]. В этих работах с использованием уравнения Т. Кармана и условия трения Э. Зибеля получены теоретические зависимости распределения нормальных контактных напряжений в зонах отставания и опережения и выражение для определения угла критического сечения γ с учетом влияния кривизны валков, упрочнения металла и упругих деформаций валков и полосы. После некоторых упрощений получили выражение для расчета угла γ , имеющего вид (9)

$$\frac{\gamma}{\alpha} = \frac{2fn\sqrt{\frac{R}{h}} \arctg \sqrt{\frac{\Delta h}{h}} - \ln\left(1 + \frac{\Delta h}{h}\right)}{4fn \cdot \frac{l_d}{h}} \quad (7)$$

Дальнейшее упрощение приводит к следующему известному выражению:

$$\gamma/\alpha = 0,5(1 - \alpha/2f) \quad (8)$$

т. е. к формуле Эжелунда-Павлова (f – коэффициент трения по закону Амантона), которое не учитывает исходную кривизну валков.

Из выражений (7) и (8) соответственно определим показатель и коэффициент трения:

$$f_n = \frac{0,5 \cdot \ln(1 + \Delta h/h)}{\sqrt{R/h} \cdot (\arctg \sqrt{\Delta h/h} - 2 \frac{\gamma}{\alpha} \cdot \sqrt{\Delta h/h})} \quad (9)$$

$$f = 0,5\alpha/(1 - 2\lambda/\alpha) \quad (10)$$

В выражениях (7)-(10) параметры R , α и γ/α определяются с учетом упругих деформаций валков и полосы, что обеспечивает точность определяемых параметров.

Выражение (9) позволяет по экспериментальным данным непосредственно получить значения показателя трения. С другой стороны известно, что между законами трения Амонтона и Зибеля существует тесная связь через коэффициент напряженного состояния [12, 15, 21]

$$n_\sigma = p/\sigma_\phi = f_\pi/f \quad (11)$$

Таким образом, при наличии экспериментальных данных для угла критического сечения (или опережения) и длины дуги контакта всегда можно определить коэффициент напряженного состояния n_σ (или СНКН) без использования специальной аппаратуры и месдоз. Кроме того, этот метод может быть использован как база и для оценки теоретических формул для расчета СНКН.

Покажем, что это действительно так, на примере при следующих исходных данных: $H = 1,41$ мм, $h = 1,05$ мм, $l_c = 7,66$ мм, $R_c = 163$ мм, $\alpha_c = 0,0469$ рад, $\lambda = 0,0151$ рад, $\lambda/\alpha = 0,332$, $f = 0,066$, $f_\pi = 0,077$, $n_\sigma = f_\pi/f = 0,077/0,066 = 1,17$. Все параметры получены опытным путем [25, табл. 8]. Расчет коэффициента n_σ по известным формулам дает следующие результаты ($m = f \cdot l_c/h_{cp}$):

М. Д. Стоуна $n_\sigma = (e^m - 1)/m = 1,31$; ~ 11 % ошибка

В. М. Луговского (6) $n_\sigma = 1,21$; $\sim 3,5$
 В. А. Николаева (2) $n_\sigma = 1,178$. $0,8$

Таким образом, и в этом методе лучшие результаты расчета СНКН получены по формулам (2) и (6).

Выводы

Выше представлены методы (методы 1-3) расчета СНКН и силы прокатки для условий горячей и холодной прокатки, позволяющие объективно оценивать достоверность теоретических формул для определения СНКН.

В статье отмечается, что принимаемые при решении дифференциального уравнения допущения оказывают некоторое влияние на точность зависимостей для расчета среднего нормального контактного напряжения (СНКН), но вносят незначительную ошибку в результаты расчетов. Разработаны алгоритмы экспериментальной оценки теоретических зависимостей для расчета коэффициента n_σ (СНКН), показаны требования к зависимостям для расчета указанных параметров, обеспечивающие меньшую величину ошибки по сравнению с экспериментальными данными. Предложен метод экспериментального определения коэффициента n_σ в лабораторных и промышленных условиях

Библиографический список

1. Целиков А. И. Основы теории прокатки. – М.: Металлургия, 1965. – 247 с.
2. Тарновский И. Я. Теория обработки металлов давлением. // И. Я. Тарновский, А. А. Поздеев, О. А. Ганаго и др. – М.: Металлургиздат, 1963. – 672 с.
3. Мазур В. Л. Производство листа с высококачественной поверхностью. – К.: Техніка, 1982. – 160 с.
4. Целиков А. И., Никитин Г. С., Рокотян Е. С. Теория продольной прокатки. М.: Металлургия, 1980. – 320 с.
5. Полухин В. П. Математическое моделирование и расчет на ЭВМ листовых прокатных станов. – М.: Металлургия, 1972. – 512 с.
6. Николаев В. А. Теория прокатки. – Запорожье: ЗГИА, 2007. – 228 с.
7. Николаев В. А. Исследования параметров, способы и устройства прокатки полос. – Запорожье: Акцент Инвест-Трейд, 2012. – 264 с.
8. Николаев В. А. Оценка точности формул для расчета среднего контактного напряжения при холодной прокатке // Изв. вузов. Черная металлургия. 2004. – № 11. – С. 32-36.
9. Николаев В. А. Расчет усилия при горячей прокатке // Изв. вузов. Черная металлургия. 2005. – № 11. – С. 24-30.
10. Чекмарев А. П., Нефедов А. А., Николаев В. А. Теория продольной прокатки. – Харьков: ХГУ, 1965. – 212 с.

Поступила 27.09.2013