

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ ПРИ ПРОКАТКЕ В КАЛИБРАХ

Владислав Валентинович Козельский

студент 4 курса, очная форма

Российская Федерация, г. Москва, Московский Государственный Технический Университет им.Н.Э. Баумана, кафедра «Оборудование и технологии прокатки»

Научный руководитель: Г.С. Никитин

доктор технических наук, кафедра «Оборудование и технологии прокатки»

1/3 выпускаемого проката – это мелкосортный и крупносортный прокат, который изготавливается в калибрах. [1,2,3]

При определении силы, действующей на валки при прокатке в калибрах необходимо решать две задачи:

- 1) определение контактной площади металла с валками F_k
- 2) определение среднего контактного напряжения P_{cp}

На рисунке 1а показаны условия процесса прокатки на гладкой бочке и в калибрах.

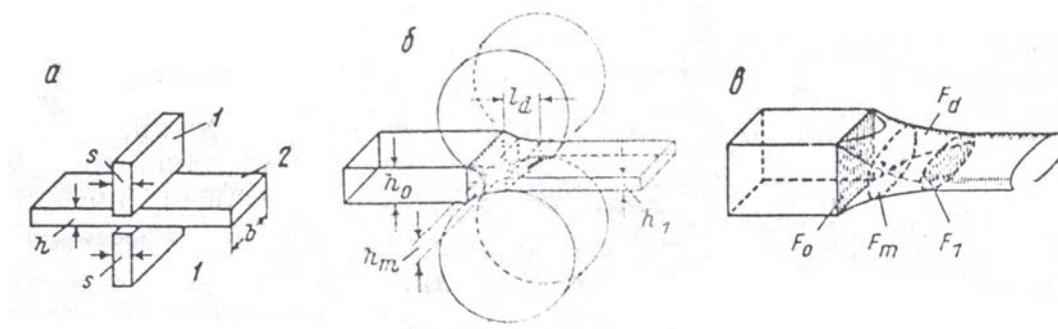


Рис. 1а. Геометрические условия некоторых процессов обработки давлением:

а – осаживание плоскими бойками;

б – плоская прокатка;

в – прокатка в калибрах.

1 – боек, 2 – плоский образец.

h - высота образца, b - ширина образца;

h_0 - начальная высота полосы; h_1 - высота полосы после прокатки;

h_m - средняя высота полосы; l_d - длина контактной поверхности;

F_0 - площадь поперечного сечения исходной заготовки;

F_1 - площадь поперечного сечения заготовки после прокатки;

F_d - площадь контакта металла с валками;

$$F_m = \frac{F_0 + F_1}{2} \quad (1)$$

Площадь контакта металла с валками можно определить, пользуясь:

а) методом приведения сечения полосы (F_0 и F_1) к прямоугольному

$$F_k = B_{cp} \cdot l_{np} \quad (2)$$

$$l_{np} = \sqrt{\Delta h_{np} \cdot D_k} \quad (3)$$

$$\Delta h_{np} = \frac{F_0}{B_0} - \frac{F_1}{B_1} \quad (4)$$

$$R_k = 0,5 \cdot \left(D - \frac{F_1}{B_1} \right) \quad (5)$$

б) методом соответственной полосы:

$$h_c = \sqrt{\frac{F_c}{a}} \quad (6)$$

$$b_c = a \cdot h_c \quad (7)$$

$$\frac{h_\phi}{b_\phi} = \frac{h_c}{b_c} = \frac{1}{a} \quad (8)$$

в) методом статических моментов (метод Ю.И. Синельникова); [4]

г) графическим методом.

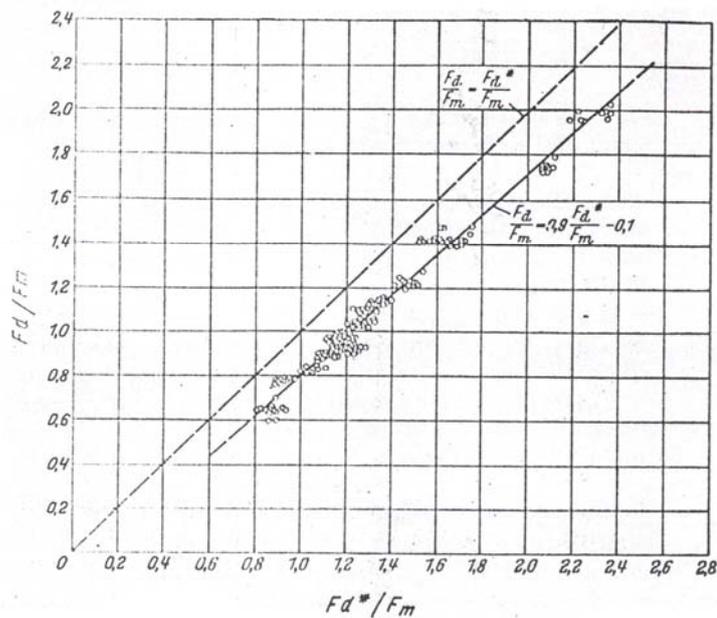


Рис. 2а. Сравнение измеренных $\frac{F_d}{F_m}$ и расчетных $\frac{F_d^*}{F_m}$ отношений площадей.

Для наглядности на графике под углом 45° к осям координат проведена штриховая прямая, соответствующая случаю равенства измеренного $\frac{F_d}{F_m}$ и расчетного $\frac{F_d^*}{F_m}$ значений отношения площадей. При расчете геометрических величин по указанному методу погрешность относительно больше при малых значениях отношения площадей, чем при больших значениях. В исследуемой области отклонения составляют 15-30%.

По полученным результатам выведено следующее эмпирическое уравнение, характеризующее зависимость между отношениями площадей $\frac{F_d}{F_m}$ и $\frac{F_d^*}{F_m}$:

$$\frac{F_d}{F_m} = 0,9 \cdot \frac{F_d^*}{F_m} - 0,1 \quad (9)$$

F_d^* - контактная площадь по приведенному сечению.

Оно позволяет достаточно точно определить без проведения опытов геометрическую величину $\frac{F_d}{F_m}$ для процесса прокатки в калибрах.

Среднее нормальное напряжение P_{cp} при прокатке в калибрах всегда больше, чем при прокатке на гладкой бочке. При прокатке в калибрах момент прокатки больше нежели при прокатке прямоугольной полосы на гладкой бочке (рис. 3а).

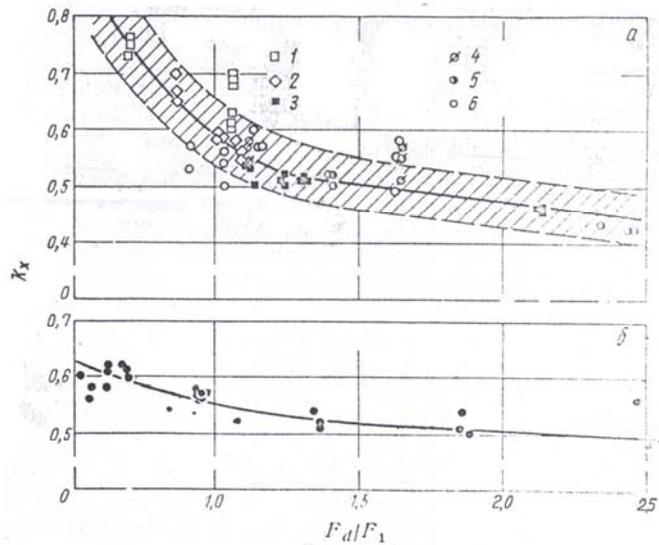


Рис. 3а. Зависимость коэффициента плеча k_x от отношения площадей $\frac{F_d}{F_1}$.

а – прокатка в калибрах;

б – плоская прокатка;

1 – квадрат-ромб; 2 – ромб-квадрат; 3 – квадрат-овал; 4 – овал-ребровый овал; 5 – ребровый овал-овал; 6 овал-круг.

Если не учитывать величину усилия в калибрах, то для однократного прохода это не играет роли, а при прокатке в 26 клетях погрешность будет накапливаться и ошибка составит 10-40% в зависимости от формы калибра.

Расчет усилий в калибрах необходим, важно знать точность получаемых профилей, изменение температуры при прокатке во всех клетях, т.к. это позволяет определить структуру готового проката, которая зависит от конечной деформации и конечной температуры.

Задача точного определения усилий при прокатке в калибрах является актуальной и в данной работе. Приводится сравнение двух методик расчета усилия прокатки и развитие той, которая была предложена на кафедре МТ10 Г.С. Никитиным.

Принято читать, что контактные нормальные напряжения и усилия при прокатке в калибрах выше, чем при сопоставимой прокатке в валках с гладкой бочкой. На рис. 1-4 приведены экспериментальные данные, иллюстрирующие это положение.

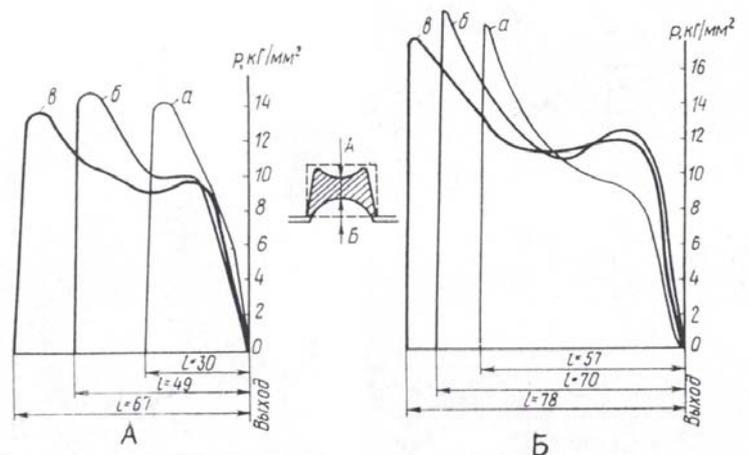


Рис. 1. Эпюры нормальных контактных напряжений по дуге захвата при прокатке в черновом швеллерном калибре стали 45 с различными вытяжками (А – на верхнем валке, Б – на нижнем валке):

- а) $h_0 = 56$ мм, $b_0 = 60$ мм, $\lambda = 1,09$, $l/h_c = 0,56$ (А); 1,11 (Б);
- б) $h_0 = 56$ мм, $b_0 = 60$ мм, $\lambda = 1,24$, $l_1/h_c = 0,99$ (А); 1,41 (Б);
- в) $h_0 = 56$ мм; $b_0 = 60$ мм, $\lambda = 1,40$, $l/h_c = 1,49$ (А); 1,37 (Б)

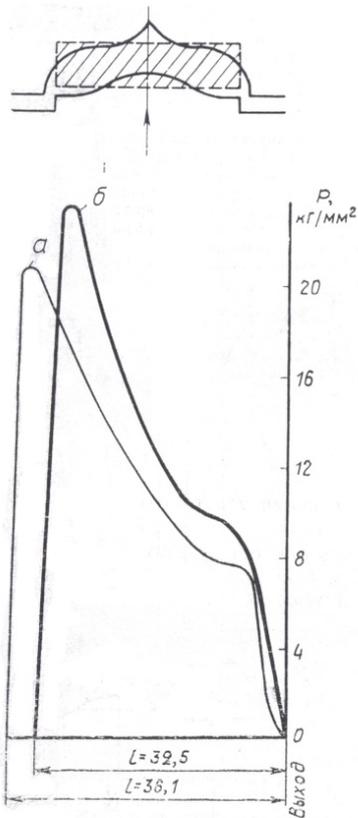


Рис. 3. Эпюры нормальных контактных напряжений по дуге захвата на нижнем валке в черновом уголкового калибре при прокатке стали 45 с различными вытяжками:
 а) $b_0 = 100$ мм, $h_0 = 40$ мм, $\lambda = 1,22$, $t \approx 1100^\circ\text{C}$, $l/h_c \approx 0,97$;
 б) $b_0 = 100$ мм, $h_0 = 40$ мм, $\lambda = 1,12$, $t \approx 1050^\circ\text{C}$, $l/h_c \approx 0,87$

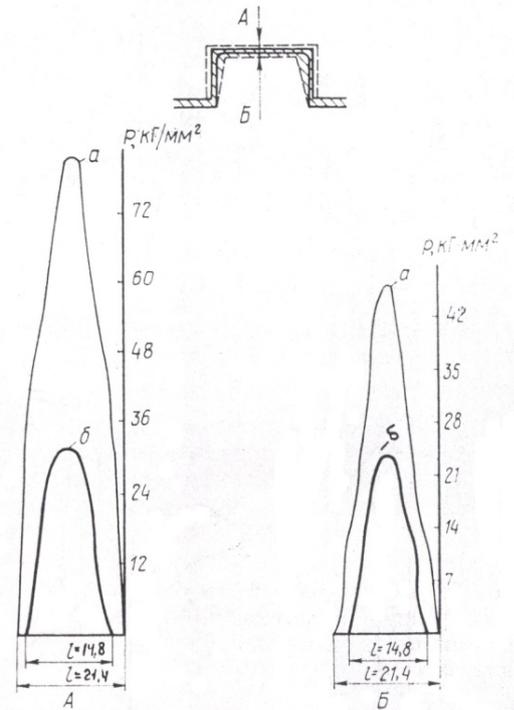


Рис. 2. Эпюры нормальных контактных напряжений по дуге захвата при прокатке в чистовом швеллерном калибре стали 45 с различными вытяжками (А — на верхнем валке, Б — на нижнем валке):

- а) $b_0 = 65,4$ мм, $\lambda = 1,11$, $t \approx 1030^\circ\text{C}$, $l/h_c \approx 5,3$;
 б) $b_0 = 65,4$ мм, $\lambda = 1,06$, $h_0 \approx 5$ мм, $t \approx 1090^\circ\text{C}$, $l/h_c \approx 3,3$

Эксперименты проведены на лабораторном стане с диаметром валков 400 мм при прокатке

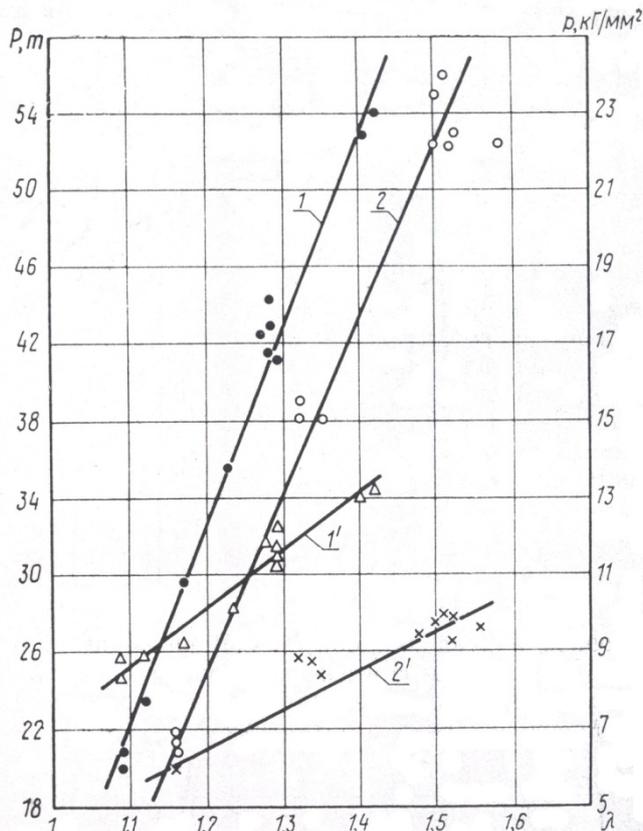


Рис. 4. Усилия и контактные давления при прокатке в разрезном швеллерном калибре (1 и 1') и на гладкой бочке (2 и 2')

в чистовом и черновом швеллерном и в черновом уголкового калибрах. Эти калибры приняты по чертежам действующей на среднесортном стане 350-1 Макеевского металлургического завода калибровке швеллера №6,5 и угловой стали 65x65x 6 мм. В каждом калибре устанавливались две точечные месдозы с проволочными датчиками в середине калибра верхнего и нижнего валков.

В черновой швеллерный калибр задавались прямоугольные заготовки при температуре около 1100°C из стали 45 сечением 60x60б 60x56 и 60x72 мм и в уголкового 100x40 мм. В чистовой швеллерный калибр задавался швеллер № 6,5. Далее для сопоставления такие же заготовки (кроме швеллера № 6,5) были прокатаны в валках с гладкой бочкой.

Указанный набор заготовок позволил исследовать процесс прокатки в интервале

вытяжек $\lambda = 1,10 \div 1,50$ и параметра $\frac{l}{h_{cp}} = 0,7 \div 5,3$, что соответствует промышленному процессу прокатки сортовых фланцевых профилей.

Анализ опытных данных нормальных контактных напряжений по дуге захвата (рис. 1-3) в черновом швеллерном и уголкового калибрах показывает, что эпюры для этих калибров схожи по внешнему виду, несмотря на то, что калибры разные по конфигурации. В чистовом швеллерном калибре, где параметр $\frac{l}{h_{cp}} = 3,3 \div 5,3$, эпюры по внешнему виду схожи с эпюрами при прокатке прямоугольной полосы на гладких валках. Это происходит из-за того, что характер деформации стенки профиля, где были установлены точечные месдозы в этом калибре, аналогичен прокатке на гладкой бочке. **Среднее контактное давление и усилие на валки в калибрах выше, чем при сопоставимой прокатке на гладкой бочке.** Это иллюстрирует рис. 4.

Анализ полученных данных показывает наличие трех видов эпюр нормального давления. При малых значениях параметра формы очага деформации $\frac{l}{h_{cp}} \leq 1$ максимум эпюры находится у входа в очаг деформации. По мере увеличения $\frac{l}{h_{cp}} \geq 1$ нормальное давление распределено близко к равномерному или эпюры имеют два небольших максимума. При дальнейшем росте $\frac{l}{h_{cp}} \geq 2$ остается один максимум, расположенный в середине либо ближе к выходу из очага деформации, при этом неравномерность распределения нормального контактного давления увеличивается.

Один из способов предложил Э. Зибель. Он проводил прокатку металла в гладких и калиброванных валках, и экспериментально получил следующие коэффициенты повышения констант ширины при прокатке в калибрах:

<i>Овал-квадрат</i>	1,1
<i>Ромб-квадрат</i>	1,1
<i>Квадрат-квадрат</i>	1,15
<i>Ромб-ромб</i>	1,25
<i>Квадрат-овал</i>	1,25
<i>Черновой калибр</i>	1,35

Зибель получил только экспериментальные данные. Теоретической расчетной формулы не было получено.

Наиболее распространенным способом расчета среднего контактного давления в калибрах является метод приведенной полосы, когда фасонная полоса заменяется равновеликой ей по площади сечения прямоугольной полосой и далее формуле определяют искомую величину.

$$P_{cp}^k = P_{cp} \cdot K_k \quad (10)$$

Этот способ является грубо приближенным и дает заниженное, часто более чем в 2 раза, значение между расчетными и опытными данными.

Для повышения точности данного способа предложены различные поправочные коэффициенты. Так, например, Зайков М.А. рекомендовал использовать в формуле Целикова А.И. величину δ :

$$\delta = \frac{2 \cdot l \cdot \mu \cdot U}{\Delta h \cdot b}, \quad (11)$$

где

U – полупериметр полосы,

b – ширина полосы.

Такое уточнение привело к некоторому увеличению расчетного контактного давления, но все же рассеивание между опытными и расчетными данными получалось значительным.

На основании анализа большого числа экспериментальных данных среднее контактное давление в калибрах можно определить по формуле:

$$P_{cp} = n_{\phi} \cdot P'_{cp}, \quad (12)$$

где n_{ϕ} - коэффициент стеснения, учитывающий особенности прокатки в калибре:

$$n_{\phi} \approx 0,7 + 0,15 \cdot \delta \quad (13)$$

P'_{cp} - среднее контактное давление при прокатке на гладкой бочке, определяемое по формуле Целикова А.И.

При правильно выбранном значении сопротивления линейной деформации эта формула дает приемлемую для инженерных расчетов сходимость опытных и расчетных величин среднего контактного давления. Известны и другие методы расчета среднего контактного напряжения.

В табл.1 приведены данные по интервалу рассеивания расчетных и опытных значений контактных давлений по разным формулам применительно к прокатке от первого до последнего прохода различных фасонных профилей на промышленных станах. В этих расчетах сопротивление металла линейной деформации определяли по опытным данным.

$$\text{Отношение } \frac{P_{расч}}{P_{он}} \text{ при прокатке}$$

Табл. 1.

Автор	Швеллер № 6,5 Стан 350-1	Швеллер № 12 Стан 500	Швеллер № 16 Стан 650	Швеллер № 24 Стан 750	Балка № 12 Стан 500	Балка № 16 Стан 650	Балка № 18 Стан 650	Балка № 20 Стан 650	Балка № 45 Стан 300
Экелунд С.	0,46-0,91	0,31-0,82	0,64-0,79	0,51-1,07	0,15-0,52	0,52-0,73	0,50-0,74	0,44-0,80	0,38-0,89
Гелеи Ш.	0,19-0,69	0,23-0,84	0,58-0,70	0,34-0,61	0,19-0,43	0,31-0,75	0,49-0,74	0,36-0,77	0,14-0,60
Штернов М.М.	0,67-1,82	0,63-1,42	0,75-1,52	0,54-0,76	0,40-0,97	0,83-1,27	0,78-1,21	-	0,61-2,00
Целиков А.И.	0,45-0,99	0,32-0,91	0,48-0,84	0,51-0,88	0,13-0,68	0,30-0,89	0,42-0,98	0,33-1,15	0,37-0,86
Зайков М.Н.	0,60-1,54	0,48-1,32	0,64-1,48	-	0,15-1,79	0,44-1,63	0,53-1,36	0,47-1,98	0,41-1,12
Николаев В.А.	-	-	0,59-1,07	0,72-0,96	-	0,39-1,20	-	0,46-1,27	-
Дрозд В. Г. Скрябин Н. П. Кирилин Н. М.	0,64-1,23	0,72-1,48	0,92-1,50	0,75-1,23	-	0,86-1,06	0,95-1,20	0,87-1,21	0,63-1,64

Точность расчета контактного давления и затем усилия прокатки в калибре в решающей степени зависят от правильного определения сопротивления металла линейной деформации с учетом температуры, скорости и степени деформации и затем контактной поверхности.

Контактную поверхность можно довольно точно определить графическим путем, но этот способ весьма трудоемок. Точные аналитические формулы очень громоздки расчеты по ним занимают много времени. Поэтому наиболее применимым является использование метода приведенной полосы.

В табл. 2 приведено сравнение контактных площадей, полученных графически и расчетом по способу приведенной полосы.

Табл. 2.

Номер прохода	Балка №10	Балка № 20	Балка № 22	Швеллер № 12	Швеллер № 18	Швеллер № 27
1	0,92	0,98	1,04	0,93	1,04	1,03
2	1,24	1,19	1,16	1,18	1,05	0,98
3	1,14	1,11	1,24	1,02	1,21	1,15
4	1,13	1,02	0,89	1,05	0,96	1,06
5	1,39	1,03	1,52	1,03	0,92	0,70
6	1,08	1,15	0,89	-	1,06	1,12
7	-	0,98	0,91	-	-	-
8	-	0,88	0,69	-	-	-
9	-	1,03	-	-	-	-

Существует мнение, что замена сложного фасонного сечения прямоугольником вносит значительную ошибку при определении контактных площадей применительно к двутавровым балкам. Ошибка составляет 30-50%.

Данное мнение основано на сравнении контактных площадей, определенных по способу приведенной полосы и аналитическим формулам. Однако точность по аналитическим формулам является неопределенной и поэтому данное сравнение неубедительно.

Для исследования влияния формы калибра на величину контактного давления воспользуемся уравнениями для случая вытяжки в вырезных бойках:

$$P_I = 2 \cdot k \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \frac{\alpha}{\pi} \cdot \frac{b}{d} \right) \quad (14)$$

И для случая вытяжки прямоугольного сечения полосы в плоских бойках [2]:

$$P_{II} = 2 \cdot k \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \mu \cdot \frac{b}{h} \right) \quad (15)$$

Обе формулы получены из уравнения равновесия выделенного элемента в очаге деформации во время прокатки.

Данные формулы пригодны для расчета усилия в случае прокатки широкой полосы. Заменяем коэффициент $2 \cdot k$ на $\gamma \cdot \sigma_\phi$ и получим формулы для полос любой ширины:

$$P_I = \gamma \cdot \sigma_\phi \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \frac{\alpha}{\pi} \cdot \frac{b}{d} \right); \quad (16)$$

$$P_{II} = \gamma \cdot \sigma_\phi \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \mu \cdot \frac{b}{h} \right). \quad (17)$$

Г.С. Никитин предложил найти n_k из этих двух формул:

$$n_k = 1,15 \cdot \frac{\left(1 + \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \frac{\alpha}{\pi} \cdot \frac{l}{h_{cp}} \right)}{\gamma \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \mu \cdot \frac{l}{h_{cp}} \right)} \quad (18)$$

(в случае прокатки используется отношение длины дуги охвата к средней высоте полосы $\frac{l}{h_{cp}}$, в случае вытяжки – отношение $\frac{b}{d}$ ширины к диаметру вытягиваемой заготовки)

μ - коэффициент трения,

α - угол охвата полосы в калибре,

γ - коэффициент Лодэ,

l - длина дуги захвата,

h_{cp} - высота полосы.

n_k - коэффициент, учитывающий влияние контактного трения в калиброванных бойках и их форму.

Но на практике довольно сложно посчитать среднюю высоту проката и отношение $\frac{l}{h_{cp}}$.

Поэтому Никитиным Г.С. было предложено использовать вместо отношения $\frac{l}{h_{cp}}$ отношение $\frac{F_{\kappa}}{F}$,

т.к. F_{κ} - площадь контакта металла с валком,

и F - площадь поперечного сечения полосы на выходе можно найти в любой момент времени.

Формула упрощается и принимает следующий вид:

$$n_{\kappa} = 1,15 \cdot \frac{\left(1 + \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \frac{\alpha}{\pi} \cdot \frac{F_{\kappa}}{F}\right)}{\gamma \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \mu \cdot \frac{F_{\kappa}}{F}\right)} \quad (19)$$

Момент при прокатке в калибрах больше, нежели при прокатке на гладкой бочке. Это можно объяснить влиянием внешних боковых зон. Эпюра контактных нормальных напряжений изменится – центр тяжести сместится и плечо станет больше. Таким образом двойное влияние на момент – увеличение P_{cp} и увеличение плеча.

Значение уточнения определения P_{cp} при прокатке в 20 клетях непрерывного стана при значении $n_{\epsilon} \cong 1,1 \dots 1,3$ будет приводить к увеличению $\Delta T_{\theta} = \frac{P_{cp} \cdot \ln(\lambda)}{P \cdot c}$ и может быть весьма существенным для определения температуры конца прокатки и точности профиля.

Список литературы:

1. А.И. Целиков, Г.С. Никитин, С.Е. Рокотян. Теория продольной прокатки. М. Металлургия, 1970.
2. М.В. Сторожев, Е.А. Попов. Теория обработки металлов давлением. М. Машиностроение, 1970.
3. О. Павельски, Э. Нойшюц. Сопротивление деформации и крутящий момент при прокатке в вытяжных калибрах. Черные металлы №12. 1986г.
4. Ю.И. Синельников. Метод статических моментов в теории продольной прокатки. М. МГТУ. 1975 г.