

Влияние технологических параметров на процесс волочения проволоки. Сообщение 1

Предложены точные и приближенные формулы для определения образующей и средней величины рабочей угла конусности волоки. Разработан новый метод определения показателя трения при волочении путем холостого (повторного) протягивания проволоки. Коэффициентами определено влияние технологических факторов на напряжение волочения. Ил. 3. Табл. 2. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: волочение, коэффициент и показатель трения, напряжение волочения, угол конусности волоки

Exact and close formulas for the calculation of average generatrix working cone and die corner while are offered. The new method of friction index determination at drawing is offered by the single (repeated) reaching of wire. Coefficients which take into account influence of technological factors on tension of dragging are defined.

Keywords: drawing, coefficient and friction index, drawing tension, die corner

Общим направлением совершенствования технологии волочения проволоки является определение рациональных условий формоизменения металла, минимизация силовых условий и износа волок с учетом параметров очага деформации, особенностей силовых воздействий на металл и эффектов трения. В частности, исследуются вопросы влияния конструкции и вращения волоки, геометрии рабочей зоны, формирования режима и уровня трения, заднего натяжения проволоки и др. [1]. Для расчета напряжения волочения проволоки известен ряд зависимостей, но их возможности ограничены тем, что они, во-первых, могут быть использованы только для случаев волочения в одинарной волоке, а во-вторых, не учитывают всего многообразия факторов, влияющих на условия деформации металла.

Постановка задачи

Для оценки силовых условий волочения используют ряд эмпирических, полуэмпирических и теоретических выражений, лучшими из которых признаны формулы [2]:

- Э. Зибеля ($f_I = \tau / \sigma_T$):

$$\sigma_{AE} = \sigma_T [(1 + \delta_I) \ln \mu + 0,67 \operatorname{tg} \alpha_E + 4f \cdot l_k / d_1]; \quad (1)$$

- Кербера-Эйхингера ($f = \tau / p_{CP}$):

$$\sigma_{AE} = \sigma_T \left[\frac{\delta + 1}{\delta} (1 - \mu^{-\delta}) \ln \mu + 0,77 \operatorname{tg} \alpha_E + 4f \cdot l_k / d_1 \right]; \quad (2)$$

- Кербера-Эйхингера ($f_I = \tau / \sigma_T$):

$$\sigma_{AE} = \sigma_T [(1 + \delta_I) \ln \mu + 0,77 \operatorname{tg} \alpha_E + 4f \cdot l_k / d_1], \quad (3)$$

$$\delta_n = f_n / \operatorname{tg} \alpha_k; \delta = f / \operatorname{tg} \alpha_k \quad (4)$$

и некоторые другие (А. А. Динника [3], А. П. Губкина [2] и т. д.), где σ_D - среднее значе-

ние напряжения течения в очаге деформации; $\mu = d_0^2 / d_1^2$; d_0, d_1 - диаметр заготовки (на входе в волоку и диаметр проволоки (на выходе из волоки) соответственно; α_E - половина угла конусности волоки в ее рабочей зоне; l_E - длина калибрующего пояса волоки; f_I - показатель трения по Э. Зибелю; f - коэффициент трения по Амонтону; τ - напряжение трения на контакте; p_{CP} - среднее нормальное контактное напряжение на контакте; δ_n, δ - коэффициенты, учитывающие влияние контактного трения в очаге деформации.

При решении дифференциального уравнения равновесия сил с использованием условия трения Э. Зибеля первое слагаемое уравнения (2) получает такой же вид, как и в формуле (1), но при этом коэффициент при слагаемом $\operatorname{tg} \alpha_E$ равен 0,77.

О влиянии факторов процесса волочения на тяговое напряжение σ_{AE} можно судить по структуре формул (1)-(3). При этом, напряжение течения σ_T зависит от материала проволоки, степени предварительного упрочнения металла, скорости волочения (через скорость деформации) и температуры.

Значение параметров δ и δ_I , существенно влияющих на напряжение волочения, зависит от величины полуугла рабочего конуса волоки.

В работах А. Л. Тарнавского, А. М. Должанского [4], автора и др. показано, что на напряжение волочения заметное неоднозначное влияние оказывает заднее натяжение.

Представленные выше и другие известные формулы для расчета напряжения волочения получены, в основном, для условий волочения проволоки в одинарных волоках, недостаточно

систематизированных рекомендаций по расчету коэффициента трения в зависимости от геометрических и технологических параметров, а также по определению среднего угла волоки, величина которого оказывает существенное влияние на напряжение волочения.

Цель работы

Получение зависимостей коэффициента и показателя трения от параметров деформации в волоке, необходимых для расчета напряжений волочения металла.

Основная часть

Одним из существенных факторов, определяющих величину напряжения волочения, является полуугол конусности волоки α_k , который для прямолинейной образующей конуса из геометрических соотношений определяется формулой [2]:

$$tg\alpha_{\hat{E}} = \Delta d / 2l_D, \tag{5}$$

где $\Delta d = (d_0 - d_1)$ – обжатие проволоки; l_p – длина рабочей части волоки (без длины l_k).

На практике при изготовлении и в результате износа образующие рабочего конуса волок отличаются от прямолинейной формы, а калибрующий поясок часто фактически отсутствует. Для такого случая в работе [5] показано, что при $d = 6,93...2,13$ мм и фактических параметрах рабочего канала средний угол рабочей зоны волоки можно оценить по формуле:

$$tg\alpha = \frac{0,5\Delta d}{l_p} \left[1 - \frac{0,5}{(1+n)} \right] \approx 0,815\alpha_{\hat{E}}, \tag{6}$$

где $n \approx 2,7$ – средний показатель степенной функции, описывающей профиль рабочей зоны волоки.

Результаты экспериментальных исследований и расчеты по формуле (6) согласуются между собой, а значения α следует использовать в выкладках вместо $\alpha_{\hat{E}}$. В этом случае при расчете напряжения волочения $\sigma_{вп}$ по формулам (1)-(3) параметр l_k следует принимать равным нулю ($l_k = 0$). Еще одним важным фактором, определяющим силовые условия волочения, являются характеристики трения, сами зависящие от условий проведения процесса.

Для экспериментального определения коэффициента (показателя) трения при волочении обычно используют метод обратного пересчета по силе (напряжению) волочения с использованием одной из известных и хорошо зарекомендовавшей себя формулы для расчета [2, 6, и др.] или метод разрезной волоки [3], предложенный А. А. Динником. Оба способа имеют существенные недостатки.

Для реализации первого способа требуется определение (кроме силы волочения) еще и напряжения течения металла, а также фактиче-

ского среднего угла конусности волоки по формуле (6). При этом значения f (или f_i) корректно использовать с той же формулой, которая применена для обратного пересчета.

Условия деформации металла в разрезной волоке (второй способ), состоящей из двух половин, существенно отличаются от реальных условий волочения из-за выдавливания смазки в зазор между половинками волоки. Кроме того, проблематичным становится определение фактического угла образующей в очаге деформации относительно оси в связи с перекосом частей инструмента, изготовление которого также представляет определенные сложности.

Для «прямой» оценки параметров трения при волочении с использованием разработанного с участием автора метода холостого повторного (или обратного) протягивания проволоки без пластической деформации выполнены исследования на лабораторной установке, которая представлена на рис. 1.

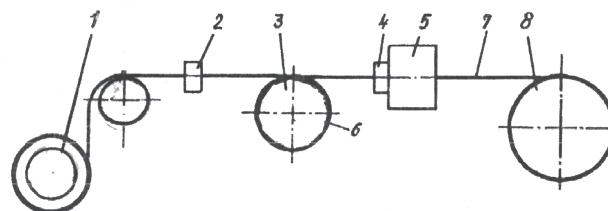


Рис. 1. Схема установки для волочения проволоки с противонатяжением

Заготовка из бунта 1 протягивается через волоку 2 приводным барабаном 8. Волока 2 создает противонатяжение проволоки на входе второй рабочей волоки 4, закрепленной в волокодержателе 5. После выхода из волоки 4 готовая проволока 7 сматывается на тянущий барабан 8 диаметром 265 мм. Установка дополнительно снабжена оребренным роликом 3, на котором могли размещаться витки протягиваемого металла 6. Для измерения соответствующих сил на каждой волоке были установлены тензоизмерители. Окружная скорость тянущего барабана $v = 0,33$ м/с. В качестве заготовки использовали медную и стальную отожженную проволоку.

В этой серии экспериментов использовали проволоку из стали марки БСтОМ с исходными диаметром $d_0 = 2,15$ мм и пределом текучести $\sigma_{Т0} = 280$ Н/мм². Смазкой служил порошок натриевого мыла. Диаметр d_1 первой волоки изменяли в диапазоне 1,72-1,91 мм, а второй – $d_2 = 1,69$ мм (см. рис. 1). В процессе исследования измеряли противонатяжение P_1 , силу P_2 волочения с противонатяжением через вторую волоку, силу P_3 волочения через вторую волоку без противонатяжения, а также силу Q холостого (повторного) протягивания во второй волоке без обжатия уже предварительно протянутой и

упрочненной проволоки. Вид типичных эпюр указанных сил, зафиксированных с помощью усилительного устройства и самописца, представлен на рис. 2.

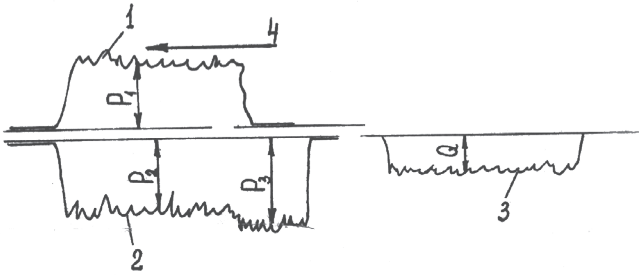


Рис. 2. Эпюра сил волочения:

1 – в первой волоке, или противонапряжения для второй волоки; 2 – во второй волоке; 3 – холостой протяжки через вторую волоку; 4 – направление волочения

Экспериментальные значения силы Q , с учетом выражения (3), позволяют оценить показатель f_i трения из условия Э. Зибеля в выходной части волоки по формуле [7]:

$$f_i = Q / (3,14 \cdot d_2 \cdot l_E \cdot \sigma_{T2}), \quad (7)$$

где σ_{T2} – в данном случае предел упругости металла в чистой (второй) волоке.

Опытные данные по результатам холостой протяжки металла через вторую волоку (см. рис. 1) позволяют оценить также уровень коэффициента трения f на выходном участке из условия Г. Амонтона следующим образом. Принимая во внимание уравнение пластичности для осесимметричной задачи в упрощенном виде ($\sigma_1 + \sigma_3 = \sigma_T$; $\sigma_3 \approx p_{CP}$; $\sigma_1 = \sigma_{ВЛ}$; $\sigma_T = \sigma_{T2}$), получим:

$$\sigma_{T2} = p_{CP} + \sigma_{ВЛ}; p_{CP} = \sigma_{T2} - \sigma_{ВЛ} \quad (8)$$

где σ_3 , σ_1 – главные максимальное и минимальное напряжения в металле соответственно.

Для «холостой протяжки» (без обжатия) экспериментальные средние значения напряжения p_{CP} при волочении и касательного напряжения τ_{CP} на выходном участке рабочего конуса второй волоки, а также коэффициент трения с учетом выражения (4) можно определить по соответствующим формулам:

$$\sigma_{ВЛ} = Q / (0,785 d_1^2); \tau_{CP} = Q / (3,14 d_1 \cdot l_K); f = \tau_{CP} / p_{CP} \quad (9)$$

Например, с использованием опытных значений: $d_0 = 1,91$ мм, $d_2 = 1,72$ мм, $Q = 158$ Н, $\sigma_{T2} = 535$ Н/мм², $l_K = 0,84$ мм (определяются экспериментально) и скорости волочения $v = 0,33$ м/с использование формул (7)-(9) дает:

$$\begin{aligned} f_{\Pi} &= 158 / (3,14 \cdot 1,72 \cdot 0,84 \cdot 535) = 0,065; \\ \sigma_{ВЛ} &= 158 / (0,785 \cdot 1,72^2) = 68,7 \text{ Н/мм}^2; \\ p_{CP} &= 535 - 68,7 = 466,3 \text{ Н/мм}^2; \\ \tau_{CP} &= 158 / (3,14 \cdot 1,72 \cdot 0,84) = 35 \text{ Н/мм}^2; \\ f &= 35 / 466,3 = 0,068. \end{aligned}$$

Как видно, показатель трения несколько меньше коэффициента трения, а их отношение оказалось равным $f_{\Pi} / f \approx 0,95$.

Различие между показателем трения f_{Π} (по Э. Зибелю) и коэффициентом трения f (по Г. Амонтону) обусловлено тем, что в первом случае средние контактные касательные напряжения отнесены к сопротивлению металла деформации, а во втором – к среднему нормальному контактному напряжению:

$$f_{\Pi} = \tau_{CP} / \sigma_{\Phi}; f = \tau_{CP} / p_{CP} \quad (10)$$

Из выражений (10) следует

$$n_{\sigma} = f_{\Pi} / f = p_{CP} / \sigma_{\Phi} \quad (11)$$

где σ_{Φ} – сопротивление металла деформации ($\sigma_{\Phi} = \lambda \cdot \sigma_T$); τ_{CP} – среднее контактное касательное напряжение; n_{σ} – коэффициент напряженного состояния металла в очаге деформации; λ – коэффициент Лоде.

Выражения (10) и (11) действительны для любого вида обработки металлов давлением. О том, что отношение f_{Π} / f является коэффициентом напряженного состояния (КНС) металла в очаге деформации впервые было обращено внимание в работе [8].

Этот коэффициент может быть определен на основании экспериментальных данных о силовых параметрах деформации в том или ином процессе обработки металла давлением. Для процесса волочения проволоки КНС был экспериментально установлен в работе [4], в которой отмечено, что его значение обусловлено способом подготовки поверхности заготовки к волочению и типом технологической смазки, а самое отношение f_{Π} / f может быть больше или меньше единицы.

В настоящей работе предлагается иной вариант определения соотношения f_{Π} / f – итерационным методом, основанным на использовании результатов экспериментального определения напряжения волочения и теоретических выражений (2) и (3) – для коэффициента трения из условия Г. Амонтона и показателя трения из условия Э. Зибеля. В экспериментах определяли силу волочения, рассчитывали напряжение волочения, а показатель трения f_{Π} вычисляли обратным пересчетом по формуле (3). Затем при равенстве правых частей выражений (2) и (3) для каждого соотношения $\sigma_{ВЛ} / \sigma_T$ по переходам многократного волочения итерационным методом определяли значения коэффициента трения f .

В опытах протягивали заготовку из стали СВ08Г2С с $d_0 = 2,86$ мм (после отжига: $\sigma_{T0} = 327$ Н/мм², шероховатость поверхности $Ra_n = 0,7 \dots 0,8$ мкм) с получением диаметра $d = 2,43 \dots 2,75$ мм, и из отожженной заготовки с $d_0 = 2,43 \dots 2,75$ мм ($Ra_n = 0,47 \dots 0,59$ мкм) на

$d = 2,35$ мм. При этом коэффициент вытяжки μ изменяли в пределах 1,08-1,38. Волочение выполняли со скоростью $v = 0,8$ м/с и смазкой из сухого порошка натриевого мыла в одинарных волокнах без напорной втулки. Подобные исследования выполнены и при волочении заготовки из меди М1 с $d_0 = 7,2$ мм на размер проволоки $d = 2,13$ мм. Параметры $P_{вп}$, $\sigma_{тл}$, 2α , необходимые для расчета коэффициента трения, определяли экспериментально. Часть полученных результатов исследований представлена в табл. 1 и на рис. 3.

Таблица 1

Опытные и расчетные параметры волочения проволоки из стали СВ08Г2С (без подсмазочного слоя)

d_0 , мм	d , мм	μ	$P_{вп}$, Н	$\sigma_{тл}$, Н/мм ²	2α , рад	f_n/f
2,86	2,75	1,08	800	375	0,078	0,133/0,164
2,86	2,65	1,16	1050	416	0,082	0,077/0,103
2,86	2,55	1,26	1400	438	0,108	0,081/0,116
2,86	2,43	1,38	1800	481	0,11	0,078/0,152
2,75	2,35	1,37	1640	480	0,143	0,082/0,143
2,65	2,35	1,27	1100	442	0,136	0,081/0,118
2,55	2,35	1,18	750	424	0,129	0,071/0,085
2,43	2,35	1,07	620	374	0,10	0,128/0,154

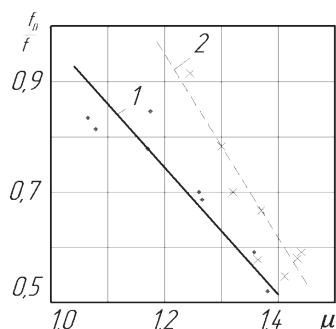


Рис. 3. Изменение коэффициента напряженного состояния металла ($n_0 = f_n/f$) в очаге деформации при волочении проволоки в зависимости от коэффициента вытяжки:

- 1 – сталь СВ08Г2С без подсмазочного слоя;
- 2 – медь М1 с мыльным подсмазочным слоем

Анализ результатов исследований показал, что наиболее подходящей функцией для обобщения полученных данных является зависимость вида $n_0 = f_n/f = \Phi(\mu)$. Как следует из данных табл. 1 и рис. 3, параметр f_n/f увеличивается с уменьшением коэффициента вытяжки μ и может быть меньше или больше единицы, например, при волочении меди при $\mu < 1,17$ (кривая 2).

Для одинаковых значений коэффициента вытяжки μ коэффициент напряженного состояния n_0 металла в очаге деформации при волочении проволоки из меди заметно выше, чем при волочении стальной заготовки. Это может быть связано с наличием подсмазочного слоя при волочении медной заготовки, что обусловило сме-

нение режима трения в сторону жидкостного [4] и уменьшение вследствие этого растягивающих напряжений в металле.

В результате обработки результатов исследований получены выражения, которые конкретизируют зависимость $n_0 = f_n/f = \Phi(\mu)$:

- для стальной проволоки (без подсмазочного слоя):

$$f_n/f = 2,13 - 1,16\mu; \tag{12}$$

- для медной проволоки (с подсмазочным слоем)

$$f_n/f = 3,08 - 1,77\mu, \tag{13}$$

а приемлемые для практических расчетов данные по определению коэффициента трения (при известном f_n) могут быть получены из зависимости:

$$f = 0,04 + 0,38 (f_n - 0,04)^{0,5}. \tag{14}$$

Аналогичный анализ данных, полученных автором ранее и представленных в работах [7 и др.], выявил влияние основных параметров процесса волочения на показатель трения, в том числе влияние коэффициента вытяжки проволоки, величины угла рабочего конуса волоки, типа технологического инструмента, типа технологической смазки, скорости волочения, противонапряжения и виброн нагружения проволоки.

Не повторяя здесь подробное описание всех исследований, отметим следующее.

Выявлено, что при значениях коэффициента вытяжки стальной проволоки с $\mu \approx 1,08$ (см. табл. 1) показатель трения оказался равным $f_n = 0,128...0,133$, а в области $\mu \approx 1,16...1,38$, показатель трения $f_n = 0,072...0,082$ и несколько зависит от полуугла рабочей части волоки при изменении его в пределах $\alpha = 0,039...0,08$ рад. На вид соответствующей функции $f_n = \Phi(\alpha)$ влияет наличие подсмазочного слоя на заготовке (перед очередной волокой). Для последующих волок (после первой) подсмазочным слоем является смазка, оставшаяся на проволоке после волочения. Она существенно увеличивает толщину смазочного слоя в волоке. Влияние подсмазочного слоя на коэффициент трения учитывается коэффициентом $k_{пс}$ ($k_{пс} = 0,75$), значение которого при отсутствии подсмазочного слоя на заготовке равно $k_{пс} = 1,0$.

С учетом этого, функция $f_n = \Phi(\alpha)$ может быть аппроксимирована выражением:

$$f_n = k_{пс} (0,062 + 0,25 \alpha). \tag{15}$$

При калибровке стальной проволоки ($\mu < 1,1$) со смазкой в виде мыльного порошка можно принимать $f_n = 0,125...0,135$.

Полученная зависимость показателя трения от коэффициента вытяжки может быть объяснена условиями формирования напряженного со-

стояния металла [4] и сохранения смазки в очаге деформации. На небольшой длине контакта (при малых значениях коэффициента вытяжки) растягивающие напряжения в металле невелики, что согласно формуле (8) сопровождается ростом нормального контактного напряжения и увеличением f_{II} сообразно с выражением (10). Также можно представить, что смазка легче выдавливается из короткого очага деформации, обуславливая рост сил трения. При этом может сильнее проявиться отрицательная роль окисной пленки на заготовке, образовавшейся в процессе охлаждения последней на воздухе после отжига.

При больших значениях коэффициента вытяжки, длины рабочей зоны и обновления поверхности проволоки при наличии достаточного количества технологической смазки показатель трения существенно уменьшается, и его значения изменяются в пределах $f_{II} = 0,072...0,082$. Угол волоки сильнее влияет при волочении медной проволоки (табл. 2).

Таблица 2

Экспериментальные данные по волочению упрочненной проволоки из меди М1 ($d_0 = 7,2$ мм; $v = 0,33$ м/с; смазка – мыльный порошок; наличие подсмазочного слоя в переходах 2-8)

Номер перехода	d , мм	μ	P_{2r} , кН	σ_{Tr} , Н/мм ²	$tg\alpha$	f	f_{II}
1	6,5	1,23	4,15	125	0,03	0,038	0,035
2	5,7	1,3	4,15	163	0,065	0,074	0,057
3	4,73	1,46	4,55	260	0,081	0,111	0,065
4	3,96	1,43	3,85	314	0,06	0,135	0,072
5	3,34	1,41	3,0	343	0,042	0,106	0,056
6	2,85	1,37	2,05	320	0,036	0,072	0,045
7	2,48	1,32	1,5	309	0,028	0,056	0,039
8	2,13	1,36	1,15	323	0,027	0,054	0,031

Кроме параметров, приведенных в табл. 2, профилометром типа «Калибр» определяли шероховатость Ra_n поверхностей заготовки и проволоки (после волочения) по переходам, которая оказалась равной, в мкм: заготовка – 3,04, проволока после 1-го перехода – 0,3, после 2...8-го переходов – 0,22...0,28.

Из табл. 2 видно, что в первом переходе (при $\mu \approx 1,23$), несмотря на отсутствие подсмазочного слоя, показатель трения ($f_{II} = 0,035$) существенно меньше, чем в последующих переходах при наличии подсмазочного слоя после предыдущего перехода. Это может объясняться относительно высокой шероховатостью поверхности заготовки, обеспечивающей улучшенное нагнетания смазки в очаг деформации.

Анализ данных табл. 2 свидетельствует, что с увеличением среднего полуугла волоки в преде-

лах $\alpha = 0,027...0,082$ рад показатель трения возрастает по параболической зависимости с постепенным затуханием влияния α и может быть описан, с учетом влияния подсмазочного слоя, выражением:

$$f_{II} = k_{пс} [0,057 + 0,157(\alpha - 0,03)^{0,5}]. \quad (16)$$

Формулы (15) и (16) могут быть использованы при расчете напряжений волочения.

Выводы

Предложено выражение для расчета средне-взвешенной величины полуугла конусности волоки с учетом параболической формы ее образующей. Разработан и опробован новый метод определения показателя трения при волочении путем холостого (повторного) протягивания проволоки. Показано, что отношение показателя трения к коэффициенту трения в приведенных условиях волочения меньше единицы. Выполнены исследования и предложены обобщающие выражения для расчета показателя и коэффициента трения в зависимости от коэффициента вытяжки и полуугла конусности волоки.

Библиографический список

1. Юхвец И. А. Волочильное производство. – М.: Металлургия, 1965. – 302 с.
2. Зыков Ю. С. Теория волочения сплошных профилей. – К.: УМК ВО, 1991. – 116 с.
3. Динник А. А. Экспериментальное определение коэффициента трения при волочении // Прокатное производство: Науч. тр. ДМетИ. – М.: Металлургия. – 1951. – Вып. 27. – С. 141-146.
4. Должанский А. М. Определение тягового напряжения и оптимального угла волоки с учетом критерия формы очага деформации. Сообщение 1 // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2003. – № 2. – С. 70-73.
5. Николаев В. А., Таратута К. В., Васильев А. Г. Определение среднего угла параболического профиля рабочего канала волоки // Металлургия: Сб. тр. – Запорожье: ЗГИА. – 2001. – № 4. – С. 106-110 с.
6. Должанский А. М., Ковалев В. С. Должанский О. А. Исследование коэффициента трения при волочении проволоки // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2002. – № 5. – С. 48-53.
7. Николаев В. А., Васильев А. Г. Зависимость коэффициента трения от условий волочения // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2000. – № 2. – С. 67-69.
8. Чекмарев А. П., Нефедов А. А., Николаев В. А. Теория продольной прокатки. – Харьков: ХГУ, 1965. – 212 с.

Поступила 22.10.2014