

УДК 620.178.16:621.771.3

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ КРУГЛОГО СПЛОШНОГО ПРОФИЛЯ

© Г. Н. Гурьянов¹

Статья поступила 2 марта 2015 г.

Приведены известные и предложены новые методы определения коэффициента трения при волочении круглого сплошного профиля, которые могут быть использованы при оценке качества смазок и оптимизации режимов подготовки поверхности заготовки перед волочением. Выполнены расчеты предельных и допустимых значений коэффициента трения в проходе волочения. Обоснован способ определения коэффициента трения по минимальной силе волочения. Результаты расчетов подтвердили зависимость величины коэффициента трения от формул, принятых для его расчета. Отмечено, что правильный выбор смазки и режимов обработки поверхности заготовки перед волочением снижает затраты энергии на волочение и температуру деформирования. Это, в свою очередь, повышает стойкость волок и положительно влияет на качество углеродистой проволоки. Показана необходимость единой оценки коэффициента трения при волочении прутков и проволоки.

Ключевые слова: волочение; проволока; пруток; коэффициент трения; качество технологических смазок; методика расчета; достоверность оценки; стандартизация испытаний; снижение затрат энергии при волочении.

Степень деформации в каждом проходе маршрута волочения проволоки (прутков) выбирают с учетом условий контактного трения. С уменьшением силы трения в рабочей зоне волоки увеличивают единичные обжатия заготовки, что повышает эффективность ее формоизменения и производительность волочильных станов. На практике возникает также обратная технологическая задача: по заданным деформациям в проходах маршрута волочения необходимо выбрать технологическую смазку или способ подготовки поверхности заготовки для обеспечения минимальных затрат энергии на процесс волочения, оценить условия контактного трения. Критерием эффективности применения смазки является величина коэффициента контактного трения f , которая зависит от многих факторов, в том числе и от параметров деформации [1 – 6]. Если определить допустимые значения коэф-

фициента трения в зависимости от основных параметров деформации, используемых в проволочном производстве, то по величине f можно выбрать наиболее подходящую технологическую смазку. Для оценки коэффициента трения в конкретных условиях волочения и обоснования предельных и допустимых значений f необходимы соответствующие методы их определения, особенно при разработке технологических смазок и применении новых материалов для прутков и проволоки. С условиями контактного трения связано качество прутков и проволоки. С увеличением f усиливается неоднородность деформации, повышается уровень остаточных напряжений и температура волочения. В результате усиливается деформационное старение, что ведет к снижению пластичности и сопротивления процессам усталости и ползучести углеродистых марок сталей [1, 5, 6].

В настоящее время предпочтение отдают расчетно-экспериментальным методам определения коэффи-

¹ ООО «Феникс+», г. Белорецк, Россия;
e-mail: ggnbelorhome@rambler.ru

циента трения по Амонтону – Кулону. Например, по величине силы волочения выполняется расчет коэффициента трения на основе формулы, предназначенной для определения осевого напряжения волочения [3, 4, 7]. Аналогичный метод описан в работе [8], но для вычисления коэффициента f использованы значения усилия волочения без противонапряжения и с его применением. Принятие закона трения по Амонтону – Кулону предполагает пропорциональную зависимость напряжения трения от контактного давления. Однако большинство аналитических зависимостей для расчета напряжения (силы) волочения включает усредненную величину σ_s предела текучести в очаге деформации. Следовательно, напряжение трения рассчитывается при постоянном усредненном давлении вдоль всей длины очага деформации проволоки (прутка). Однако коэффициент трения зависит от контактного давления [1]. Поэтому формулы, включающие усредненную величину предела текучести σ_s , не учитывают принятый закон трения по Кулону вдоль длины очага деформации. Более того, нет единого мнения о методе расчета средней величины σ_s предела текучести в рабочем канале волоки. Например, при расчете осевого напряжения волочения использована среднегеометрическая величина предела текучести [7]. В работах [9, 10] обосновано принятие средней интегральной величины σ_s , так как при этом учитывается форма кривой упрочнения. В большинстве же случаев принимается среднеарифметическое значение, рассчитанное по пределу текучести на входе σ_{s0} и выходе σ_{sk} очага пластической деформации [3, 11]. Поскольку среднеарифметическая величина больше среднегеометрической ($\sigma_s = \sqrt{\sigma_{s0}\sigma_{sk}}$), то расчетный коэффициент трения будет меньше при среднеарифметическом значении предела текучести при использовании одной формулы для расчета осевого напряжения. При волочении возможно интенсивное изменение прочностных свойств материала вдоль длины очага деформации, поэтому возникает значительный градиент давления вдоль оси волочения. В результате снижается точность расчета осевого напряжения по формулам, включающим усредненную величину предела текучести [9, 10], а следовательно, достоверность определения коэффициента трения с использованием этих формул.

Таким образом, формула для расчета коэффициента трения по измеренной силе волочения должна учитывать форму кривой упрочнения материала проволоки (прутка), прирост осевого напряжения от деформации сдвига [9, 12] и действие противонапряжения (если оно приложено при замере силы). Кроме того, она должна быть достаточно простой для использования технологиями волочильного производства.

В данной работе оценены допустимые и предельные значения коэффициента трения при разных параметрах деформации проволочной заготовки, обосновано применение известных и предлагаемых

формул для расчета коэффициента трения и показана необходимость стандартизации оценки коэффициента контактного трения при волочении круглого сплошного профиля.

Аналитические зависимости для расчета коэффициента контактного трения

Запас прочности проволоки на выходе волоки можно оценивать по величине коэффициента запаса прочности по И. Л. Перлину [3]:

$$\gamma = \sigma_{sk}/\sigma_{zk},$$

где σ_{sk} , σ_{zk} — предел текучести и осевое напряжение на выходе рабочего канала волоки.

Допустимые значения коэффициента трения определяются из численного решения нелинейного уравнения, отражающего заданный запас прочности при разных значениях коэффициента γ ,

$$\sigma_{sk}/\gamma - \sigma_{zk} = 0. \quad (1)$$

Примем зависимость предела текучести обрабатываемого металла от величины вытяжки μ в виде степенной функции

$$\sigma_{sk} = \sigma_{s0}\mu^k, \quad (2)$$

где σ_{s0} и σ_{zk} — предел текучести проволоки до и после обжатия; $\mu = d_0^2/d_k^2$ — коэффициент вытяжки; d_0 и d_k — диаметр проволоки на входе и выходе волоки; k — коэффициент упрочнения. Расчет основной составляющей полного осевого напряжения σ_{zk} на выходе волоки — прироста осевого напряжения σ_{z1} в рабочем конусе волоки и прироста осевого напряжения σ_{z2} от приложения напряжения противонапряжения при принятом законе упрочнения (2) выполняли по следующим формулам [13]:

$$\sigma_{z1} = \frac{\sigma_{s0}}{k} (\mu^k - 1)(1 + fctg\alpha); \quad (3)$$

$$\sigma_{z2} = \sigma_q \left(1 - \frac{f(\mu^k - 1)}{ktg\alpha} \right), \quad (4)$$

где f — коэффициент трения по Амонтону – Кулону; α — угол наклона образующей рабочего конуса к оси волочения; σ_q — напряжение противонапряжения. При расчете напряжения σ_{z1} по формуле (3) учитывали изменения предела текучести и давления вдоль длины очага деформации.

Прирост осевого напряжения σ_{z3} от деформации сдвига металла на входе и выходе рабочего конуса волоки рассчитывали по известной в теории волочения формуле

$$\sigma_{z3} = \frac{4\sigma_s tga}{3\sqrt{3}}, \quad (5)$$

где $\sigma_s = (\sigma_{s0} + \sigma_{sk})/2$ — средний предел текучести ме-

талла в очаге деформации. Полное осевое напряжение в формуле (1)

$$\sigma_{zk} = \sigma_{z1} + \sigma_{z2} + \sigma_{z3}.$$

Из уравнения (1) следует формула для расчета допустимой величины коэффициента трения

$$f = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{(\mu^k - 1)(1 - \bar{\sigma}_q)} \times \\ \times (1 - \mu^k - k\bar{\sigma}_q - 0,385k \operatorname{tg} \alpha (1 + \mu^k) + k\mu^k / \gamma), \quad (6)$$

где $\bar{\sigma}_q = \sigma_q / \sigma_{s0}$ — относительная величина напряжения противонапряжения. При коэффициенте запаса прочности γ , равном единице, когда полное осевое напряжение σ_{zk} равно пределу текучести σ_{sk} протянутого металла, по формуле (6) вычисляли предельное значение коэффициента трения. Если $\gamma > 1$, то волочение происходит с запасом прочности [3] и формула (6) определяет допустимую величину коэффициента трения. Из равенства (6) можно найти допустимые и предельные значения других параметров деформации, например, коэффициента вытяжки или напряжения противонапряжения, если известна величина коэффициента трения f .

Для расчета коэффициента трения по величине осевого напряжения σ_{zk} представим формулу (6) в виде

$$f = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{(\mu^k - 1)(1 - \bar{\sigma}_q)} \times \\ \times (1 - \mu^k - k\bar{\sigma}_q - 0,385k \operatorname{tg} \alpha (1 + \mu^k) + k\bar{\sigma}_{zk}), \quad (7)$$

где $\bar{\sigma}_{zk} = \sigma_{zk} / \sigma_{s0}$ — относительная величина напряжения волочения. Значения параметров, входящих в формулу (7), определить несложно. Основное отличие формулы (7) от известных аналогичных аналитических зависимостей заключается в том, что при ее выводе использованы уравнения для расчета прироста осевого напряжения в рабочем конусе (3) и от действия напряжения противонапряжения (4), которые учитывают изменение предела текучести вдоль длины очага деформации согласно зависимости (2). В методиках [3, 8] расчета коэффициента трения принята усредненная величина предела текучести в очаге деформации и не учитывается характер изменения предела текучести и давления вдоль его длины.

При регулировании силы противонапряжения в процессе волочения упрощается метод определения коэффициента трения с применением формул (6) и (7). В этом случае имеется возможность применения одной волоки для волочения при одинаковых параметрах деформации: фиксированных режимах термической обработки и подготовки поверхности к волочению заготовки одного размера, равных скоростных и температурных условиях деформирования. Для расчета по этим формулам измеряют значения угла α , диаметра до и после обжатия, находят исходный предел текучести и коэффициент упрочнения. Если использу-

ется формула (6), то необходимо определить среднюю величину силы противонапряжения, при которой начнутся частые обрывы заготовки. При наступлении такого момента предельного волочения коэффициент запаса прочности γ принимается равным единице. Для расчета предельного значения коэффициента трения по формуле (6) не требуется относительная величина осевого напряжения, т.е. измерение силы волочения, как при использовании зависимости (7). Таким образом, коэффициент трения по формуле (6) определяется при $\gamma = 1$, а по формуле (7) — при $\gamma \geq 1$.

Упрощенные аналитические формулы для расчета коэффициента трения по Амантону – Кулону

Представим формулы (6) и (7) при следующих допущениях. Пусть в процессе волочения не изменяется предел текучести. Это возможно, когда коэффициент упрочнения $k = 0$. Тогда из формул (6) и (7) соответственно получим

$$f = \frac{\operatorname{tg} \alpha (1/\gamma - \ln \mu - \bar{\sigma}_q - 0,77 \operatorname{tg} \alpha)}{\ln \mu (1 - \bar{\sigma}_q)}, \quad (8)$$

$$f = \frac{\operatorname{tg} \alpha (\bar{\sigma}_z - \bar{\sigma}_q - \ln \mu - 0,77 \operatorname{tg} \alpha)}{\ln \mu (1 - \bar{\sigma}_q)}. \quad (9)$$

Если для оценки коэффициента трения принять формулы (8) и (9), то относительные значения осевого напряжения и напряжения противонапряжения определяются следующим образом: $\bar{\sigma}_z = \sigma_z / \sigma_s$ и $\bar{\sigma}_q = \sigma_q / \sigma_s$.

Необходимость использования для расчета среднего предела текучести σ_s (а не исходного σ_{s0}) обусловлена наличием в реальном процессе холодного волочения деформационного упрочнения протягиваемого материала ($k \neq 0$). Таким образом, при приближенной оценке коэффициента трения с применением зависимостей (8) и (9) не требуется кривая упрочнения (2), так как достаточно определить предел текучести заготовки до и после обжатия.

Для оценки качества волочильной смазки и под-смазочных покрытий (так иногда называют покрытия, образовавшиеся после бурирования, фосфатирования, известкования и т.п.) использован расчетно-экспериментальный метод определения коэффициента трения [4]

$$f = \alpha \left(\frac{P_b / (\sigma_s S_k) - 2\alpha / 3}{\ln \mu - 1} \right), \quad (10)$$

где S_k — площадь поперечного сечения проволоки или прутка на выходе волоки; P_b — экспериментальная величина силы волочения; α — угол в радианах. В работе [4] отмечены недостатки формулы (10), в частности, «...средняя величина σ_s является средним арифметическим между значениями этого показателя на входе и выходе из волоки и постоянно по всей длине

волокни. Недостаток заключается в неточности значения сопротивления деформации, что влечет за собой погрешность в определении коэффициента трения. Из-за этого такая методика лишь ограниченно пригодна для испытаний эффективности технологических смазок». Однако при наличии недостатков определения коэффициента трения по формуле (10) отмечается: «Несмотря на довольно существенные упрощения, этот способ нашел применение на практике, потому что имеются устройства для измерения силы волочения». Использование зависимости (10) для оценки и выбора смазки для волочения [4] допускает возможность применения для этой же цели формулы (9). Поскольку зависимость (9) дополнительно включает величину напряжения противонапряжения, то граница ее применения шире, чем формулы (10), так как имеется возможность замера силы волочения при разном уровне σ_p . Если принять приближенное равенство $\text{tg } \alpha = \alpha$, то при отсутствии противонапряжения формула (9) примет вид

$$f = \alpha \left(\frac{\bar{\sigma}_z - 0,77\alpha}{\ln \mu} - 1 \right). \quad (11)$$

Уравнения (10) и (11) отличаются коэффициентом (в круглых скобках) возле угла α . Таким образом, для определения коэффициента трения по величине силы волочения здесь приведены новые формулы (7), (9) и (11). Зависимость (7) в отличие от (9) и (11) учитывает характер изменения предела текучести вдоль длины очага деформации согласно принятой модели упрочнения (2). Но для ее использования необходимы два параметра кривой упрочнения материала проволоки или прутка — исходный предел текучести σ_{s0} и коэффициент упрочнения k . Другими словами, для уточненного расчета коэффициента трения [4] следует определить характер изменения прочностных свойств материала проволоки или прутка.

Определение коэффициента трения по минимальной силе волочения

Используем аналитическую зависимость [13, 14] для расчета оптимального угла волочения при модели упрочнения (2):

$$\text{tg}^2 \alpha_{\text{опт}} = \frac{f(\mu^k - 1)(1 - \sigma_{q0}/\sigma_{s0})}{0,385k(\mu^k + 1)}. \quad (12)$$

При отсутствии противонапряжения и принятии допущения $\text{tg } \alpha = \alpha$ из формулы (12) следует

$$f = 0,385k\alpha_{\text{опт}}^2 \frac{\mu^k + 1}{\mu^k - 1}. \quad (13)$$

Необходимо отметить незначительную зависимость оптимального угла волочения от коэффициента упрочнения k [9, 14]. Поэтому для стальной проволоки ко-

эффициент упрочнения можно принять равным 0,25 [9]. В этом случае равенство (13) запишется в виде

$$f = 0,096\alpha_{\text{опт}}^2 \frac{\mu^{0,25} + 1}{\mu^{0,25} - 1} = 0,096\alpha_{\text{опт}}^2 \frac{\sqrt{d_0/d_k} + 1}{\sqrt{d_0/d_k} - 1}. \quad (14)$$

Для расчета коэффициента трения по формуле (14) необходимо при известных значениях диаметра проволоки до (d_0) и после (d_k) деформации (по заданной единичной вытяжке) определить угол рабочего конуса волокни при минимальной силе волочения.

Пусть кривая упрочнения задана формулой

$$\sigma_s = \sigma_{s0} + m\varepsilon^n = \sigma_{s0} + m(\ln \mu)^n, \quad (15)$$

где m, n — эмпирические коэффициенты; для волочения $\varepsilon = \ln \mu$ — степень деформации. В зависимости (15) больше эмпирических коэффициентов, поэтому она дает возможность представлять более сложные формы кривых упрочнения, чем степенная функция (2). При кривой упрочнения (15) оптимальный угол волочения [13]

$$\text{tg}^2 \alpha_{\text{опт}} = \frac{Af}{B} \left(1 - \frac{\sigma_{q0}}{\sigma_{s0}} \right), \quad (16)$$

где

$$A = \sigma_{s0} \ln \mu + \frac{m(\ln \mu)^{n+1}}{n+1}; \quad B = \frac{2\sqrt{3}}{9} \sigma_{s0} \left[2 + \frac{m(\ln \mu)^n}{\sigma_{s0}} \right].$$

После определения оптимального угла $\alpha_{\text{опт}}$ рассчитывают коэффициент трения

$$f = \frac{B \text{tg}^2 \alpha_{\text{опт}}}{A(1 - \sigma_{q0}/\sigma_{s0})}. \quad (17)$$

Результаты расчета предельных и допустимых значений коэффициента трения по формуле (6)

На рис. 1 приведены зависимости предельного ($\gamma = 1$) и допустимого ($\gamma = 1,4$) значений коэффициента трения f от коэффициента вытяжки при исходном пределе текучести σ_{s0} заготовки (1000 МПа) и значениях коэффициента упрочнения k в модели (2), равного 0; 0,25; 0,75 и 1,25. Для рабочего конуса волокни угол α — 3 и 12°; напряжение противонапряжения — 0,250 и 500 МПа.

Предельные и допустимые значения коэффициента трения интенсивно снижаются с ростом степени деформации в проходе волочения. Все кривые (см. рис. 1, $a - \varepsilon$) расходятся при фиксированной величине угла α . Это указывает на усиление влияния напряжения противонапряжения на искомую величину коэффициента трения с повышением обжатия. Однако при $\gamma = 1$ и $k = 1,25$ (z) это влияние значительно снизилось, особенно при $\alpha = 12^\circ$ (кривые 4 – 6). При коэффициенте упрочнения 0,75 (ε) и 1,25 (z) кривые не пе-

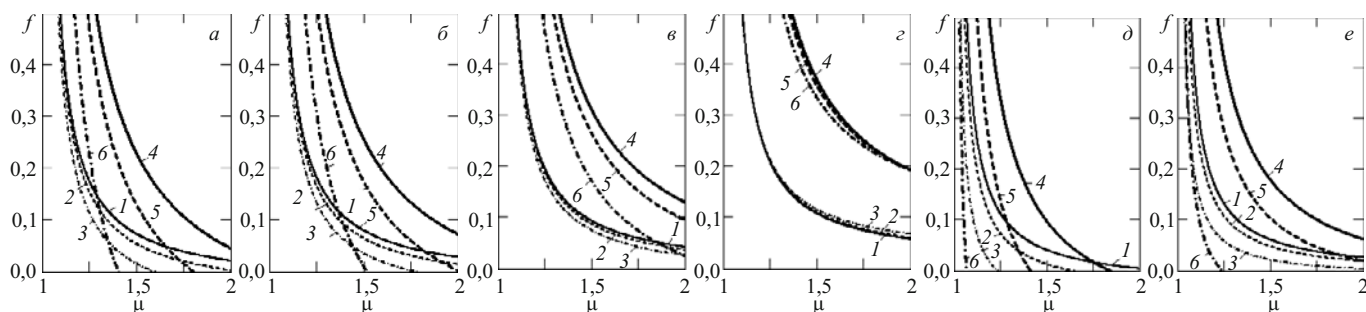


Рис. 1. Зависимости предельных (*a*–*z*) и допустимых (*d*, *e*) значений коэффициента трения от коэффициента вытяжки: *a*–*z* — $\gamma = 1$; *d*, *e* — $\gamma = 1,4$; α равно 3° (*1*–*3*) и 12° (*4*–*6*); σ_q равно 0 (*1*, *4*), 250 МПа (*2*, *5*) и 500 МПа (*3*, *6*); *k* равно 0 (*a*), 0,25 (*b*, *d*), 0,75 (*e*) и 1,25 (*z*, *e*)

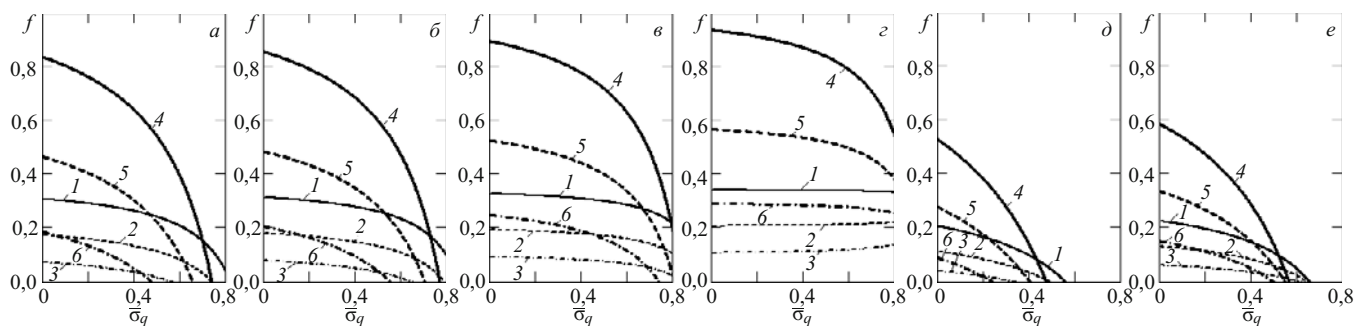


Рис. 2. Зависимости предельных (*a*–*z*) и допустимых (*d*, *e*) при $\gamma = 1,4$ значений коэффициента трения от относительного напряжения противонапряжения: *k* равно 0 (*a*), 0,25 (*b*, *d*), 0,75 (*e*), 1,25 (*z*, *e*); α равен 3° (*1*–*3*), 9° (*4*–*6*); μ равен 1,15 (*1*, *4*), 1,25 (*2*, *5*), 1,50 (*3*, *6*)

ресекают ось абсцисс. Следовательно, в заданном интервале изменения коэффициента вытяжки отсутствуют предельные значения коэффициента f .

Увеличение коэффициента запаса прочности γ от 1 до 1,4 вызвало значительное снижение расчетного значения коэффициента f . Это показывает сравнение расположения соответствующих кривых на рис. 1, *b* и *d* при $k = 0,25$, *z* и *e* при $k = 1,25$. При увеличении коэффициента γ усилилось влияние напряжения противонапряжения, особенно это заметно при коэффициенте упрочнения 1,25 (см. рис. 1, *z* и *e*). При фиксированном значении угла α допустимые и предельные значения коэффициента трения меньше при напряжении противонапряжения 500 МПа (кривые 3 и 6). Кривые 4, 5 и 6 при $\alpha = 12^\circ$ удалены на большее расстояние друг от друга, чем 1, 2 и 3 при $\alpha = 3^\circ$, т.е. с увеличением угла α повышается влияние напряжения противонапряжения на искомые значения коэффициента f .

На рис. 2 приведены зависимости предельных (*a*–*z*) и допустимых (*d*, *e*) значений коэффициента трения от относительного напряжения противонапряжения. Заданы коэффициенты вытяжки, равные 1,15 (относительное обжатие $q = 13,0\%$), 1,25 ($q = 20,0\%$) и 1,50 ($q = 33,3\%$); угол α равен 3° и 9° ; значения коэффициента упрочнения оставлены без изменения. Видно, что с ростом уровня напряжения противонапряжения все кривые сближаются (в отличие от расположения кривых на рис. 1). Это позволяет заключить, что повышение напряжения противонапряжения снижает

влияние степени деформации и угла α на предельные и допустимые значения коэффициента трения. Однако увеличение коэффициента упрочнения ослабляет влияние напряжения противонапряжения на предельную величину коэффициента трения. В большей мере это заметно при коэффициенте упрочнения 1,25 (см. рис. 2, *z*). При угле $\alpha = 9^\circ$ (кривые 4–6) очевидней влияние степени обжатия на искомую величину f . Увеличение коэффициента упрочнения от 0,25 до 1,25 привело к более заметному изменению формы кривых для предельного коэффициента трения (*b*, *z*), чем кривых для допустимого коэффициента f (*d*, *e*).

При заправке и волочении без противонапряжения термообработанной заготовки диаметром 4,0 мм из стали 12Х18Н10Т наблюдали повышенную частоту ее обрыва [15]. Причиной этого была некачественная подготовка поверхности заготовки перед волочением. Данное заключение подтверждается тем, что после нанесения на эту же заготовку другого подмазочного покрытия режим волочения стабилизировался. При волочении применяли волокна с углом рабочего конуса 7° . Величина коэффициента вытяжки 1,4 ($q = 28,6\%$). Примем, что при обрывах проволоки коэффициент запаса прочности равен единице, а прирост осевого напряжения в калибрующем пояске отсутствует. Предельную величину коэффициента трения оценим по формуле (6) при коэффициенте упрочнения, равном 0,25 и 1,37. Первая величина коэффициента k характерна для углеродистой стали после

патентирования, а вторая — для холодной деформации проволочной заготовки из стали 12Х18Н10Т в первых проходах маршрута волочения [9]. Результаты расчета показали высокие значения коэффициента трения — 0,223 и 0,298 соответственно при k , равном 0,25 и 1,37. Но это не противоречит данным о величине коэффициента трения при холодном волочении. Например, в работе [3] приведены значения $f = 0,015 - 0,13$ при волочении круглых сплошных профилей. Отмечены и более высокие значения коэффициента трения (до 0,20) при волочении стальных прутков [2]. Однако в работах [2, 3] коэффициент трения был определен на основе замера усилия волочения в процессе установившегося волочения проволоки или прутков. Здесь же расчет выполнен для предельного случая волочения, когда наблюдалась повышенная частота обрывов переднего конца проволоки из-за некачественного нанесения подмазочного покрытия.

Покажем зависимость значений коэффициента трения от формул, принятых для его расчета. Составляющие σ_{z1} и σ_{z2} полного напряжения σ_{zk} вычислим по наиболее используемым в теории волочения аналитическим зависимостям:

$$\sigma_{z1} = \sigma_s \ln \mu \left(1 + \frac{f}{\operatorname{tg} \alpha} \right), \quad (18)$$

$$\sigma_{z2} = \sigma_q / \mu^{f/\operatorname{tg} \alpha}. \quad (19)$$

Формула Зибеля (18) учитывает прочностные свойства протягиваемой заготовки по усредненному пределу текучести σ_s в очаге деформации. Зависимость (19) для расчета прироста осевого напряжения от действия напряжения волочения наиболее простая и при этом удовлетворительно описывает влияние противонапряжения на напряжение волочения [9]. Искомая величина коэффициента трения является показателем степени в уравнении (19), что затрудняет получение простых аналитических зависимостей в виде формул (6) и (7). Поэтому предельные и допустимые значения коэффициента трения находили путем решения уравнения (1), в котором величина полного напряжения σ_{zk} определена с использованием известных формул (18) и (19). В табл. 1 приведены предельные (расчеты № 1 и 2) и допустимые (расчеты № 3) значения коэффициента трения f_1 согласно формуле (6), а также f_2 , найденные численным методом. При расчете приняли: исходный предел текучести 1000 МПа; коэффициент упрочнения k равен 0,25 и 1,37. Волочение осуществляли при отсутствии противонапряжения (расчеты № 1 и 3) и напряжении противонапряжения 250 МПа (расчет № 2). Приняты семь значений коэффициента вытяжки, угол α равен 6 и 9°. Допустимые значения f получены при коэффициенте запаса прочности $\gamma = 1,4$.

При отсутствии противонапряжения и коэффициенте упрочнения 0,25 значения f_1 и f_2 не отличаются до четвертой цифры после запятой (расчет № 1). При высоком коэффициенте упрочнения 1,37 и отсут-

Таблица 1. Результаты расчета предельного (расчет № 1 и № 2) и допустимого (расчет № 3) значений коэффициента трения в зависимости от коэффициентов вытяжки и упрочнения при $\alpha = 6$ и 9°

№ расчета	μ	$k = 0,25$				$k = 1,37$			
		$\alpha = 6^\circ$		$\alpha = 9^\circ$		$\alpha = 6^\circ$		$\alpha = 9^\circ$	
		f_1	f_2	f_1	f_2	f_1	f_2	f_1	f_2
1	1,15	0,599	0,599	0,857	0,856	0,660	0,658	0,948	0,945
	1,25	0,341	0,341	0,485	0,485	0,403	0,399	0,578	0,573
	1,35	0,230	0,230	0,325	0,325	0,293	0,288	0,420	0,412
	1,45	0,168	0,168	0,236	0,236	0,232	0,225	0,332	0,322
	1,55	0,129	0,128	0,179	0,179	0,194	0,185	0,277	0,264
	1,65	0,101	0,101	0,139	0,139	0,167	0,157	0,239	0,224
	1,75	0,081	0,081	0,110	0,110	0,148	0,136	0,211	0,194
2	1,15	0,553	0,505	0,771	0,707	0,653	0,579	0,922	0,821
	1,25	0,302	0,277	0,416	0,384	0,403	0,352	0,569	0,498
	1,35	0,194	0,179	0,264	0,245	0,297	0,254	0,418	0,359
	1,45	0,134	0,125	0,179	0,167	0,238	0,199	0,334	0,281
	1,55	0,096	0,089	0,125	0,117	0,200	0,164	0,281	0,230
	1,65	0,069	0,065	0,087	0,082	0,174	0,139	0,245	0,195
	1,75	0,050	0,047	0,059	0,056	0,156	0,120	0,218	0,169
3	1,15	0,261	0,248	0,332	0,317	0,338	0,310	0,447	0,412
	1,25	0,118	0,112	0,138	0,133	0,195	0,175	0,255	0,230
	1,35	0,056	0,054	0,055	0,054	0,134	0,118	0,173	0,152
	1,45	0,021	0,021	0	0	0,100	0,085	0,127	0,108
	1,55	0	0			0,079	0,064	0,098	0,080
	1,65					0,064	0,050	0,078	0,060
	1,75					0,053	0	0,064	0,045

ствии противонапряжения различие не превышает 0,02 при обоих значениях угла α . При действии напряжения противонапряжения разница значений коэффициента f_1 и f_2 увеличилась, причем больше при коэффициенте упрочнения 1,37 (расчет № 2). Различия значений прироста осевого напряжения от действия противонапряжения, рассчитанных по формулам (4) и (19), больше разницы прироста в рабочем конусе волокна, полученной по формулам (3) и (18). Поэтому при варианте расчета № 2 с использованием формул для прироста осевого напряжения от действия противонапряжения значения f_1 и f_2 отличаются больше.

Предельные и допустимые значения f_1 и f_2 при $\alpha = 9^\circ$ больше, чем при $\alpha = 6^\circ$, независимо от коэффициента вытяжки и напряжения противонапряжения. При этом $f_1 > f_2$, особенно при $k = 1,37$ и действии противонапряжения. В общем случае от приложения противонапряжения коэффициенты f_1 и f_2 уменьшились. Но при значениях коэффициентов вытяжки $\mu = 1,75$ и упрочнения $k = 1,37$ коэффициент f_1 несколько увеличился от приложения противонапряжения — с 0,148 до 0,156 при $\alpha = 6^\circ$ (см. табл. 1). При этом коэффициент f_2 уменьшился от 0,136 до 0,120. При той же величине угла α и $k = 1,37$, но $\mu = 1,15$ коэффициент f_1 уменьшился от 0,660 до 0,653 в результате приложения противонапряжения. Это объясняется тем, что при расчете прироста осевого напряжения от приложения противонапряжения по формуле (4) величина прироста при высоких значениях коэффициентов вытяжки и упрочнения и пониженных углах α может быть отрицательной, т.е. от приложения противонапряжения [14] напряжение волока снижается.

Увеличение коэффициента запаса прочности от 1 до 1,4 при отсутствии противонапряжения вызвало значительное снижение коэффициента трения по обеим методикам расчета (расчет № 3). При коэффициенте упрочнения $k = 0,25$ и повышенных степенях деформации даже при отсутствии контактного трения ($f = 0$) не обеспечивается заданный запас прочности, характеризуемый $\gamma = 1,4$. Для этого случая в табл. 1 не приведены значения f_1 и f_2 . При $\gamma = 1,4$ допустимые значения

f_1 и f_2 с повышением степени деформации интенсивно снижаются, причем в большей мере при меньшем коэффициенте упрочнения, равном 0,25. Малое отличие коэффициентов f_1 и f_2 при $k = 0,25$ и отсутствии противонапряжения обусловлено близостью значений прироста осевого напряжения, найденных по формулам (3) и (18).

По заданной величине напряжения волока выполнили расчет коэффициента трения по формулам (7) и (10). Определили также коэффициент f численным способом с использованием формулы Зибеля (18) и аналогичных зависимостей А. П. Гавриленко и Закса:

$$\sigma_{z1} = \sigma_s(\mu - 1)(1 + f/\operatorname{tg} \alpha), \quad (20)$$

$$\sigma_{z1} = \sigma_s \left[1 - \frac{1}{\mu} \frac{f}{\operatorname{tg} \alpha} \right] \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{f} \right). \quad (21)$$

Приближенная зависимость А. П. Гавриленко (20) определяет более высокий, а формула (21) Закса — меньший прирост осевого напряжения, чем уравнения (3) и (18), что показано в работе [9]. При расчете коэффициента трения с использованием формул (20) и (21) также использовали равенство (5) для учета прироста осевого напряжения от деформации сдвига. Степень расхождения значений коэффициента трения оценивали по формуле

$$\delta = \frac{100[f(7) - f_i]}{f(7)}, \quad \%, \quad (22)$$

где $f(7)$ и f_i — величины коэффициента трения, полученные соответственно по формуле (7) и по i -му варианту расчета. В табл. 2 приведены значения угла α (в градусах), коэффициента вытяжки и осевого напряжения σ_{zk} (МПа) на выходе волокна ($\alpha/\mu/\sigma_{zk}$). Расчет выполняли при отсутствии противонапряжения. Расчеты 1–9 проводили при коэффициенте упрочнения $k = 0,25$, а 10 — при $k = 0,75$. Исходный предел текучести σ_{s0} в модели упрочнения (2) приняли равным 1000 МПа.

Таблица 2. Результаты расчета коэффициента трения (числитель) и расхождения δ (знаменатель) при разных значениях угла α , коэффициента вытяжки μ и осевого напряжения на выходе рабочего конуса σ_{zk}

Номер расчета	Параметры $\alpha^\circ/\mu/\sigma_{zk}$, МПа	Номер формулы для расчета коэффициента трения или прироста осевого напряжения в конусе				
		(7)	(10)	(18)	(20)	(21)
1	5/1,15/250	0,024	0,030/–25,0	0,024/0	0,016/33,3	0,026/–8,3
2	5/1,15/350	0,086	0,091/–5,8	0,086/0	0,074/13,9	0,100/–16,3
3	5/1,15/500	0,178	0,183/–2,8	0,178/0	0,160/10,1	0,229/–28,6
4	8/1,25/400	0,036	0,045/–25,0	0,036/0	0,017/52,8	0,042/–16,7
5	8/1,25/500	0,097	0,106/–8,5	0,097/0	0,072/25,8	0,121/–24,7
6	8/1,25/600	0,159	0,167/–5,3	0,159/0	0,127/20,1	0,212/–33,3
7	12/1,50/700	0,050	0,062/–24,0	0,050/0	0,004/99,2	0,067/–34,0
8	12/1,50/800	0,100	0,111/–11,0	0,100/0	0,041/59,0	0,145/–45,0
9	12/1,50/900	0,150	0,160/–6,7	0,150/0	0,081/46,0	0,238/–58,7
10	12/1,50/900	0,105	0,113/–7,6	0,102/2,8	0,043/59,0	0,149/–41,9

Поскольку по формуле (20) А. П. Гавриленко прирост осевого напряжения в рабочем конусе больше, чем по другим зависимостям, то при фиксированных параметрах деформации (α , μ , σ_{zk} , k) величина коэффициента трения оказалась значительно меньше. Расхождение δ (22), вычисленное с использованием формулы (20), более существенное. Коэффициент трения, найденный из формулы (21) Закса, больше f , рассчитанного по выражению (7). Незначительное расхождение значений коэффициента f , полученного по новой зависимости (7) и определенного с использованием формулы Зибеля (18), наблюдается только при коэффициенте упрочнения 0,75 (расчет 10, $\delta = 2,8\%$). Коэффициент f , рассчитанный по известной формуле (10), оказался больше, чем по зависимости (7). Увеличение коэффициента упрочнения k от 0,25 до 0,75 при тех же значениях параметров α , μ и σ_{zk} привело к снижению коэффициента f при оценках его по разным формулам, что показывает сравнение результатов по расчетам 9 и 10. Более заметно уменьшение коэффициента f от увеличения k при использовании формулы А. П. Гавриленко (20). В целом с повышением степени деформации усилилась разница δ значений коэффициента f . Данные табл. 2 наглядно показывают существенную зависимость величины коэффициента трения от используемых формул для его расчета и параметров деформации.

В заключение следует обратить внимание на актуальность достоверной оценки коэффициента трения для практики и теории волочения. Коэффициент трения — субъективная величина — зависит от метода его определения. Об этом свидетельствуют, например, данные работы [4] и результаты расчета коэффициента f (см. табл. 1 и 2). Необходимо нормировать порядок оценки коэффициента f . Отсутствие стандарта на метод определения коэффициента трения обесценивает или не позволяет в полной мере использовать результаты теоретических исследований. Например, в работе [16] рассчитаны поля напряжений, деформаций и температуры в очаге пластической деформации при волочении высокоуглеродистой проволоки для металлокорда. По результатам расчетов сделаны выводы и рекомендации, в частности: «Для увеличения скорости волочения без потери качества предложено уменьшить коэффициент контактного трения до 0,02. Анализ расчетных данных показал эффективность этого предложения для высокоскоростного волочения высокоуглеродистой проволоки». Очевидно, специалист технологической службы волочильного цеха не может воспользоваться такой рекомендацией для повышения производительности производства высокопрочной проволоки без снижения ее качества, так как он (технолог) не знает величину коэффициента трения при существующих в цехе режимах волочения, а также достоверную методику его определения. Рекомендуемая величина f до 0,02 [16] по причине отсутствия в настоящий момент общепринятой методики его определения только указывает на необходимость

снижения напряжений контактного трения для ограничения температуры волочения.

Приведенные допустимые и предельные значения коэффициента трения, например на рис. 1 и 2, не отделены от метода их расчета на основе формулы (6). При ином методе расчета и тех же исходных параметрах деформации в общем случае будут получены другие значения коэффициента трения. Поскольку в настоящее время исследователи и технологи волочильного производства имеют неоднозначное мнение о целесообразности применения той или иной методики для определения k [3, 7, 8, 11], то необходимо проведение соответствующих работ по разработке, согласованию и утверждению единой оценки коэффициента трения при волочении. Это позволит создать банк значений коэффициента трения в зависимости от условий волочения проволоки и прутка из разных материалов, что ускорит поиск и внедрение наиболее подходящих технологических смазок и подмазочных покрытий, оптимальных режимов обработки в волочильном производстве.

Таким образом, предложены аналитические формулы (6) и (8) для расчета предельных и допустимых значений коэффициента трения, формулы (7), (9) и (11) для оценки коэффициента трения по величине измеренной силы волочения. Показан характер влияния основных параметров деформации на предельные и допустимые значения коэффициента трения. Установлено значительное влияние коэффициента запаса прочности γ по И. Л. Перлину на допустимую величину коэффициента трения.

Результаты расчетов подтвердили зависимость величины коэффициента трения от формул, принятых для его расчета. Обоснован способ определения коэффициента трения по минимальной силе волочения на основе формул (13), (14) и (17). Предложенные зависимости для расчета коэффициента трения могут быть использованы при оценке качества смазок для волочения прутков и проволоки и условий контактного трения. Правильный выбор смазки и режимов обработки поверхности заготовки перед волочением снижает затраты энергии на волочение и температуру деформирования [17, 18], а уменьшение температуры волочения повышает стойкость волок и положительно влияет на качество углеродистой проволоки [19]. Показана необходимость единой оценки коэффициента трения при волочении прутков и проволоки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Леванов А. Н., Колмогоров В. Л., Буркин С. П. и др. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением. — М.: Металлургия, 1976. — 412 с.
2. Джонсон У., Меллор П. Теория пластичности для инженеров / Пер. с англ. — М.: Машиностроение, 1979. — 567 с.
3. Перлин И. Л., Ерманок М. З. Теория волочения. — М.: Металлургия, 1971. — 447 с.

4. Мор У., Павельски О., Расп В. Оценка технологических смазок для волочения прутков и катанки / Черные металлы. 1987. № 10. С. 16 – 22.
5. Колмогоров В. Л., Орлов С. И., Колмогоров Г. Л. Гидродинамическая подача смазки. — М.: Metallurgiya, 1975. — 256 с.
6. Колмогоров Г. Л. Гидродинамическая подача смазки при обработке металлов давлением. — М.: Metallurgiya, 1986. — 168 с.
7. Кучеряев Б. В., Николаев Р. А., Жукова Е. А. Расчет энергосиловых параметров процесса волочения прутков / Производство проката. 2006. № 6. С. 30 – 31.
8. Добров И. В. Новый метод определения коэффициента трения при волочении / Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. 2000. № 4. С. 51 – 54.
9. Гурьянов Г. Н. Расчет, анализ напряжений, деформаций и запаса прочности при холодном волочении проволоки. — Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. — 358 с.
10. Гурьянов Г. Н. Запас прочности нержавеющей проволоки при различных методах учета среднего предела текучести в очаге деформации / Изв. вузов. Черная металлургия. 2009. № 10. С. 24 – 27.
11. Воронцов А. Л. О новом расчете энергосиловых параметров процесса волочения прутков / Производство проката. 2007. № 7. С. 34 – 40.
12. Богатов А. А., Мижирецкий О. И., Смирнов С. В. Ресурс пластичности при обработке давлением. — М.: Metallurgiya, 1984. — 144 с.
13. Гурьянов Г. Н. Оценка параметров волочения при разных моделях упрочнения проволочной заготовки / Сталь. 2014. № 7. С. 71 – 77.
14. Гурьянов Г. Н. Расчет оптимального угла рабочего конуса волюки / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2010. Т. 76. № 3. С. 57 – 58.
15. Иванов В. П., Гурьянов Г. Н., Белалов Х. Н. и др. Разработка и освоение производства проволоки, канатов и кабелей, предназначенных для работ в средах, содержащих до 25 % сероводорода / Отчет о НИР. № Г.Р.01850018374. — Магнитогорск: ВНИИметиз, 1985. — 43 с.
16. Верещагин М. Н., Бобарикин Ю. Л., Савенок А. Н. и др. Влияние скорости волочения на температуру и напряженно-деформированное состояние высокоуглеродистой проволоки / Сталь. 2007. № 12. С. 54 – 58.
17. Гурьянов Г. Н., Платов С. И., Терентьев Д. А. Приrost средней температуры в проходе волочения с противонапряжением при разных моделях упрочнения материала проволоки / Производство проката. 2015. № 9. С. 14 – 22.
18. Гурьянов Г. Н. Влияние величины коэффициента контактного трения на напряженное состояние и запас прочности при волочении круглого сплошного профиля / Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 11. С. 27 – 36.
19. Гурьянов Г. Н., Зуев Б. М. Качество и технологичность волочения проволоки специального назначения / Сталь. 2013. № 3. С. 78 – 80.
5. Kolmogorov V. L., Orlov S. I., Kolmogorov G. L. Gidrodinamicheskaya podacha smazki [The hydrodynamic lubrication]. — Moscow: Metallurgiya, 1975. — 256 p. [in Russian].
6. Kolmogorov G. L. Gidrodinamicheskaya podacha smazki pri obrabotke metallov davleniem [Hydrodynamic lubrication flow during metal forming]. — Moscow: Metallurgiya, 1986. — 168 p. [in Russian].
7. Kucheryaev B. V., Nikolaev R. A., Zhukova E. A. Raschet énergosi- lovykh parametrov protsessa volocheniya prutkov [Calculation of power parameters of the process of drawing rods] / Proizv. Prokata. 2006. N 6. P. 30 – 31 [in Russian].
8. Dobrov I. V. Novyi metod opredeleniya koéffitsienta treniya pri volochenii [The new method of determining the coefficient of friction during drawing] / Metallurg. Gornorud. Promyshl. N 4. 2000. P. 51 – 54 [in Russian].
9. Guryanov G. N. Raschet, analiz napryazhenii, deformatsii i zapasa prochnosti pri kholodnom volochenii provoloki [Calculation, analysis of stresses, strains and safety factor at the cold wire drawing]. — Magnitogorsk: Izd. GOU VPO “MGU,” 2008. — 358 p. [in Russian].
10. Guryanov G. N. Zapas prochnosti nerzhavayushchei provoloki pri razlichnykh metodakh ucheta srednego predela tekuchesti v ochage deformatsii [Safety factor of stainless wires with different methods of taking into account the average yield strength in the deformation] / Izv. Vuzov. Cher. Met. 2009. N 10. P. 24 – 27 [in Russian].
11. Vorontsov A. L. O novom raschete énergosi- lovykh parametrov protses- sa volocheniya prutkov [A new calculation of power parameters of the process of drawing rods] / Proizv. Prokata. 2007. N 7. P. 34 – 40 [in Russian].
12. Bogatov A. A., Mizhiritsky O. I., Smirnov S. V. Resurs plastichnosti pri obrabotke davleniem [Source plasticity by pressure treatment]. — Moscow: Metallurgiya, 1984. — 144 p. [in Russian].
13. Guryanov G. N. Otsenka parametrov volocheniya pri raznykh mode- lyakh uprochneniya provolochnoi zagotovki [Evaluation of drawing parameters for different models of hardening wire rod] / Stal'. 2014. N 7. P. 71 – 77 [in Russian].
14. Guryanov G. N. Raschet optimal'nogo ugla rabocheho konusa voloki [Calculation of the optimum angle of the drawhole working cone] / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2010. Vol. 76. N 3. P. 57 – 58 [in Russian].
15. Ivanov V. P., Guryanov G. N., Belalov H. N., et al. Razrabotka i osvoenie proizvodstva provoloki, kanatov i kabelei, prednaznachennykh dlya rabot v sredakh, soderzhashchikh do 25 % serovodoroda [Design and development of production of wire, rope and cables designed to work in environments with up to 25% of hydrogen sulfide] / Sci. Report. N G.R.01850018374. — Magnitogorsk. Izd. VNIImetiz, 1985. — 43 p. [in Russian].
16. Vereschagin M. N., Bobarikin J. L., Savienok A. N., et al. Vliyanie skorosti volocheniya na temperaturu i napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie vysokouglerodistoï provoloki [Effect of speed on the drawing temperature and stress-strain state of the high-carbon steel wire] / Stal'. 2007. N 12. P. 54 – 58 [in Russian].
17. Guryanov G. N., Platov S. I., Terentyev D. A. Prirost srednei tempera- tury v prokhode volocheniya s protivonatyazheniem pri raznykh mode- lyakh uprochneniya materiala provoloki [Increase in the average tempera- ture in the passage from the drawing counterstrain at different models of material hardening wire] / Proizv. Prokata. 2015. N 9. P. 14 – 22 [in Russian].
18. Guryanov G. N. Vliyanie velichiny koéffitsienta kontaktnogo treniya na napryazhennoe sostoyanie i zapas prochnosti pri volochenii kruglogo sploshnogo profilya [The effect of the contact friction coefficient on the stress state and the margin at drawing a round solid profile] / Trenie Smazka Mashin. Mekhanizm. 2015. N 11. P. 27 – 36 [in Russian].
19. Guryanov G. N., Zuyev B. M. Kachestvo i tekhnologichnost' voloche- niya provoloki spetsial'nogo naznacheniya [The quality and manufacturability of wire drawing special purpose] / Stal'. 2013. N 3. P. 78 – 80 [in Russian].

REFERENCES

1. Levanov A. N., Kolmogorov V. L., Burkin S. P., et al. Kontaknoe trenie v protsessakh obrabotki metallov davleniem [Contact friction in metal forming processes]. — Moscow: Metallurgiya, 1976. — 412 p. [in Russian].
2. Johnson W., Mellor P. Plasticity theory for engineers. — Moscow: Mashinostroenie, 1979. — 567 p. [Russian translation].
3. Perlin I. L., Ermanok M. Z. Teoriya volocheniya [The theory of drawing]. — Moscow: Metallurgiya, 1971. — 447 p. [in Russian].
4. Moore W., Pavelski O., Rasp B. Otsenka tekhnologicheskikh smazok dlya volocheniya prutkov i katanek [Assessment of technological lubricants for the drawing of bars and rods] / Chernye Metally. 1987. N 10. P. 16 – 22 [in Russian].