

РАЗВИТИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МЕТОДА РАСЧЕТА СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ВОЛОЧЕНИЯ ПОЛОСЫ В МОНОЛИТНОЙ ВОЛОКЕ

© 2016 г. **И.В. Добров**

Национальная металлургическая академия Украины (НМетАУ), г. Днепропетровск

Статья поступила в редакцию 28.10.14 г., доработана 24.12.14 г., подписана в печать 02.10.15 г.

Получил дальнейшее развитие энергетический метод решения технологических задач обработки металлов давлением. Разработан алгоритм и приведены расчетные формулы для определения энергосиловых параметров процесса волочения полосы в монолитной волоке. Результаты расчетов удовлетворительно корреспондируются с данными экспериментальных исследований и позволяют расширить представление о характере распределения удельных сил трения в очаге деформации на основании баланса мощности этих сил и результирующей силы трения на поверхности заготовки. Метод эффективен при проектировании рациональных маршрутов волочения полосы в монолитной волоке.

Ключевые слова: волочение, полоса, монолитная волока, мощность деформации, напряжение волочения, контактные напряжения, коэффициент трения скольжения, приведенный коэффициент трения.

Добров И.В. – докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой прикладной механики НМетАУ (49600, Украина, г. Днепропетровск, пр. Гагарина, 4). E-mail: igordobrov@yahoo.com.

Для цитирования: Добров И.В. Развитие энергетического метода расчета силовых параметров процесса волочения полосы в монолитной волоке // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2016. No. 4. С. 58–66.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-4-58-66.

Dobrov I.V.

Development of energy method for calculation of one-piece die strip drawing power parameters

The energy method used for solving metal forming process problems was further developed. The algorithm was designed and formulas for calculating power parameters of one-piece die strip drawing were given. Calculation results satisfactorily correspond with the data obtained in experimental studies and allow for deeper understanding of the nature of specific friction force distribution in the deformation area based on the power balance of these forces and resultant friction force on a workpiece surface. The method is effective for the design of rational one-piece die strip drawing sequences.

Keywords: drawing, strip, one-piece die, deformation capacity, drawing stress, contact stress, sliding friction factor, superficial friction factor.

Dobrov I.V. – Dr. Sci. (Tech.), Prof., Head of the Department of applied mechanics, National Metallurgical Academy of Ukraine (49005, Ukraine, Dnepropetrovsk, Gagarin str., 4). E-mail: igordobrov@yahoo.com.

Citation: Dobrov I.V. Razvitie energeticheskogo metoda rascheta silovykh parametrov protsessa volocheniya polosity v monolitnoi voloke. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2016. No. 4. P. 58–66.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-4-58-66.

Введение

В настоящее время при анализе энергосиловых параметров процесса пластической деформации заготовки используют два принципиально отличающихся метода расчета [1]: первый — основан на соблюдении условий пластичности заготовки при равновесии сил в очаге деформации [2–4]; второй, энергетический, — на соблюдении баланса мощности внешних и внутренних сил пластически деформируемой заготовки [5–9].

Интенсификация процессов волочения в условиях расширения номенклатуры протягиваемых

профилей в монолитных волоках при различных технологических смазках настоятельно требует совершенствования методов расчета технологических параметров процессов волочения при стремлении к их унификации [10–12].

Целью настоящей работы является дальнейшее развитие энергетического метода расчета силовых параметров процесса волочения полосы в монолитной волоке. При этом используются граничные условия в виде мощности сил трения на контактной поверхности очага деформации, учитываю-

шие неравномерность распределения нормальных контактных напряжений по длине очага деформации и неравномерную скорость скольжения заготовки по инструменту.

Методика исследования

Рассмотрим процесс волочения (рис. 1, а) полосы 1 (ее ширина $b_0 = b_1$, исходная высота $H_0 = 2h_0$) со скоростью v_0 на входе в монолитную волоку 2 с углом конусности α очага деформации длиной L , включающего зону деформации размером l_d (расстояние между проекциями на ось OX точек A , B и A' , B') и калибрующую зону протяженностью l_k (расстояние между точками B , C и B' , C'). Сила волочения ($P_{\text{вол}}$) обеспечивает волочение полосы высотой $H_1 = 2h_1$ на выходе из очага деформации со скоростью v_1 .

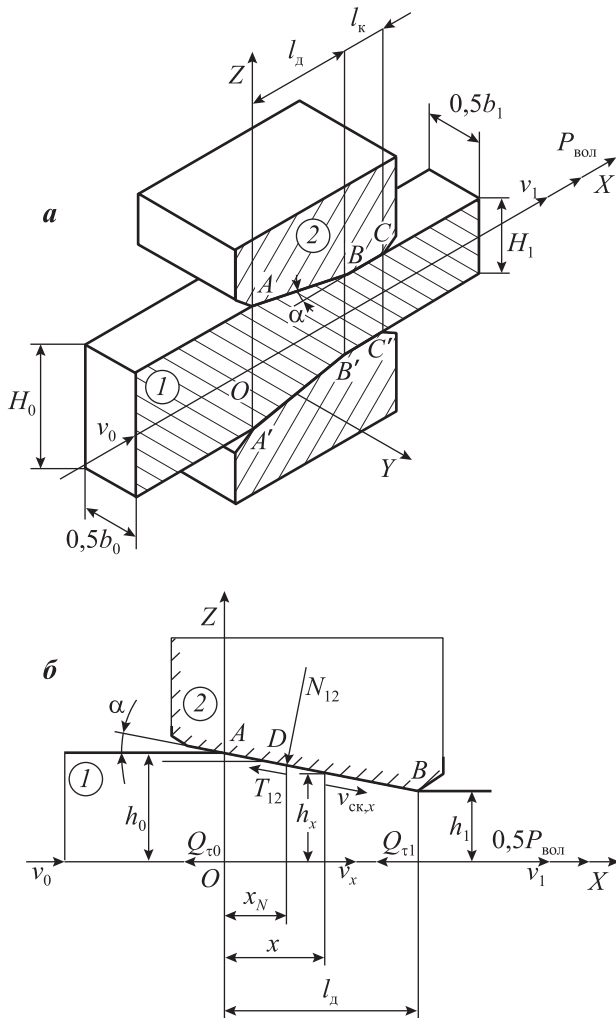


Рис. 1. Процесс волочения полосы в монолитной волоке
а – схема процесса;
б – расчетная схема распределения энергосиловых параметров

Для определения $P_{\text{вол}}$ расчетная схема волочения представлена в плоскости ZOX системы координат $ZOXY$ (рис. 1, б), в которой влияние калибрующей зоны на энергосиловые параметры процесса не учитываются [5, 6, 8]. Эта схема используется при составлении уравнений равновесия сил ($\Sigma X = 0$ и $\Sigma Y = 0$), действующих на симметричную половину заготовки 1 со стороны верхней половины волоки 2 вдоль осей координат OX и OZ :

N_{12}^1 – результирующая сила нормальных контактных напряжений $\sigma_{12}(x)$, действующая в т. D контактной поверхности очага деформации на расстоянии x_N от оси OZ ;

T_{12} – результирующая сила трения, действующая на заготовку в точке приложения N_{12} ;

$Q_{\tau 0}$ и $Q_{\tau 1}$ – силы среза, действующие в нормальных сечениях заготовки на входе в очаг деформации и на выходе из него [5, 7, 8].

Из условия постоянства расхода материала заготовки в текущем сечении очага деформации, перпендикулярном оси волочения, кинематические параметры деформации заготовки определяются системой уравнений [1–5]

$$\begin{cases} v_x(x) = v_0 h_0 / h_x = v_0 \mu_x = v_0 (1 - \varepsilon_x)^{-1}, \\ v_N = v_0 \frac{h_0}{h_0 - x_N \operatorname{tg} \alpha}, \\ v_{x, \text{ск}}(x) = v_x(x) (\cos \alpha)^{-1}, \\ l_d = (h_0 - h_1) / \operatorname{tg} \alpha. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $v_x(x)$ – горизонтальная скорость нормального к оси OX сечения заготовки высотой $h_x = h_0 - x \operatorname{tg} \alpha$ (средняя скорость материала заготовки в нормальном сечении рабочей зоны очага деформации, положение которого определяется координатой $0 \leq x \leq l_d$); $v_{x, \text{ск}}(x)$ – скорость скольжения материала заготовки в текущем сечении рабочей зоны очага деформации на расстоянии x от входа заготовки в очаг деформации; $\mu_x = h_0 / h_x$ и $\varepsilon_x = (h_0 - h_x) / h_0$ – соответственно коэффициенты вытяжки и обжатия в текущем сечении очага деформации; v_N – горизонтальная скорость нормального сечения заготовки, к которому в т. D приложена сила N_{12} .

В общем случае для волочения без противонапряжения мощность, затраченная при деформации за-

¹ Далее по тексту и на рисунках нижний двойной цифровой индекс обозначает: первая цифра – тело (заготовка), на которое действует сила; вторая цифра – тело (волока), со стороны которого действует эта сила.

готовки как жесткопластичного тела (см. рис. 1, а), определяются по уравнению [5, 7, 8]

$$W_{\text{вол}} = W_{\text{ф}} + W_{\text{т}} + W_{\text{тр}} = P_{\text{вол}}v_1, \quad (2)$$

где $W_{\text{ф}}$, $W_{\text{т}}$ и $W_{\text{тр}}$ — мощности, затраченные силой $P_{\text{вол}}$ на формоизменение материала заготовки в очаге деформации ($W_{\text{ф}}$), преодоление мощности сил среза на входе заготовки в очаг деформации и выходе из него ($W_{\text{т}}$) и преодоление мощности сил трения в очаге деформации ($W_{\text{тр}}$). Из (2) следует

$$P_{\text{вол}} = W_{\text{вол}}/v_1 = P_{\text{вол,ф}} + P_{\text{вол,т}} + P_{\text{вол,тр}} = P_{\text{вол,д}} + P_{\text{вол,тр}}. \quad (3)$$

Здесь $P_{\text{вол,и}}$ — составляющие силы волочения $P_{\text{вол}}$: $P_{\text{вол,ф}}$ обеспечивает формоизменение заготовки в очаге деформации; $P_{\text{вол,т}}$ — в ходе формоизменения заготовки уравнивает силы среза, действующие в ее сечениях на входе и выходе из очага деформации; $P_{\text{вол,тр}}$ — уравнивает силу трения в очаге деформации; $P_{\text{вол,д}} = P_{\text{вол,ф}} + P_{\text{вол,т}}$ — обеспечивает деформацию заготовки без учета влияния силы трения, т.е.

$$P_{\text{вол,д}} = \frac{W_{\text{ф}} + W_{\text{т}}}{v_1}. \quad (4)$$

Отметим, что, разделив компоненты уравнения (2), определяющие расход мощности на деформацию заготовки в очаге деформации, на скорость v_N из (1)–(4), получим уравнение равновесия сил ($\Sigma X = 0$), действующих вдоль оси OX , приведенных к нормальному сечению заготовки в т. D очага деформации [7, 8]:

$$P_{\text{вол,д}} = \frac{W_{\text{ф}} + W_{\text{т}} + W_{\text{тр}}}{v_N} = P_{\text{вол,фD}} + P_{\text{вол,тD}} + P_{\text{вол,трD}} = P_{\text{вол}} \frac{v_1}{v_N}, \quad (5)$$

где $P_{\text{вол,д}}$ — составляющая силы волочения $P_{\text{вол}}$, приведенная к нормальному сечению заготовки в т. D очага деформации; $P_{\text{вол,фD}}$, $P_{\text{вол,тD}}$ и $P_{\text{вол,трD}}$ — соответственно составляющие силы $P_{\text{вол,д}}$, приведенные к нормальному сечению заготовки в т. D очага деформации.

Проанализируем влияние каждой из них на силу волочения в зависимости от геометрических размеров монолитной волоки (α , h_1) и технологических параметров процесса волочения (h_0 , $\mu(\epsilon)$, f) заготовок из различных материалов ($\tau_s(\epsilon)$ — предел текучести материала заготовки на сдвиг).

1. Энергосиловые параметры процесса дефор-

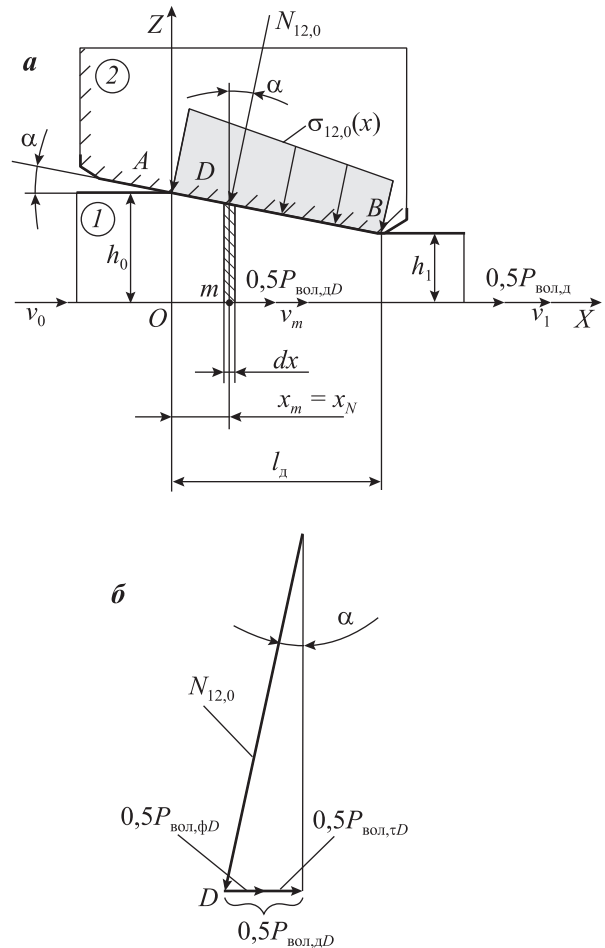


Рис. 2. Энергосиловые параметры процесса деформации заготовки без трения
а — схема процесса; б — схема сил, действующих в сечении заготовки, проходящем через центр ее массы (m)

мации при волочении (рис. 2) без учета силы трения (коэффициент трения скольжения $f=0$) в очаге деформации [5, 7, 8] ($W_{\text{тр}} = 0$ и $P_{\text{вол,тр}} = 0$) определяются на основании уравнений (3), (5) и рис. 2, б:

$$\begin{cases} 0,5P_{\text{вол,д}} = 0,5(W_{\text{ф}} + W_{\text{т}})/v_1, \\ 0,5P_{\text{вол,д}}v_1/v_m = 0,5(P_{\text{вол,фD}} + P_{\text{вол,тD}}) = N_{12,0}\sin\alpha. \end{cases} \quad (6)$$

Здесь $N_{12,0}$ — результирующая сила нормальных контактных напряжений $\sigma_{12,0}(x)$ в очаге деформации при $f=0$, действующая на элементарное сечение заготовки в окрестностях т. m , определяющей положение центра массы заготовки в очаге деформации с координатой x_m :

$$x_m = \int_0^{l_d} (h_0 - x \operatorname{tg}\alpha) x dx / \int_0^{l_d} (h_0 - x \operatorname{tg}\alpha) dx = x_N,$$

где v_m — скорость перемещения центра массы заготовки в очаге деформации:

$$v_m = \frac{v_0 h_0}{h_0 - x_m \operatorname{tg} \alpha},$$

$$0,5 W_\tau = b \tau_{s, \text{cp}} \left(\int_0^{\frac{h_0}{2}} |v_z|_{x=0} dz + \int_0^{\frac{h_1}{2}} |v_z|_{x=l_d} dz \right),$$

где $\tau_{s, \text{cp}}$ — среднее значение предела текучести на сдвиг материала заготовки на входе ее в очаг деформации и на выходе из него:

$$0,5 W_\phi = b \tau_{s, \text{cp}} \int_0^{l_d} \int_0^{h_z} H dx dz,$$

$$H = \sqrt{4 \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right)^2},$$

где H — интенсивность скорости деформации сдвига и v_x, v_z скорости деформации в направлении осей OX, OZ [1, 5, 7]).

Из условия $\partial v_x / \partial z = -\partial v_z / \partial x$ при $\alpha < 15^\circ$ получим [5]

$$\begin{cases} 0,5 W_\tau = b \tau_{s, \text{cp}} v_0 h_0 \operatorname{tg} \alpha, \\ 0,5 W_\phi \approx 2b \tau_{s, \text{cp}} v_0 h_0 \left(1 + \frac{1}{6} \operatorname{tg}^2 \alpha \right) \ln \mu. \end{cases} \quad (7)$$

Из (6), (7) следует

$$N_{12,0} = \frac{0,5(W_\phi + W_\tau)}{v_m \sin \alpha}. \quad (8)$$

Принимая в первом приближении линейный закон распределения нормальных контактных напряжений на поверхности волокна [4, 7, 8]:

$$\sigma_{12,0}(x) = \sigma_{12,0}(x=0) - \frac{\sigma_{12,0}(x=0) - \sigma_{12,0}(x=l_d)}{l_d} x, \quad (9)$$

где $\sigma_{12,0}(x=0)$ и $\sigma_{12,0}(x=l_d)$ — соответственно нормальные контактные напряжения на входе заготовки в волоку и выходе из нее при $f=0$, получим

$$\begin{cases} N_{12,0} = \frac{b}{\cos \alpha} \int_0^{l_d} \sigma_{12,0}(x) dx = \\ = \frac{b l_d}{2 \cos \alpha} (\sigma_{12,0}(x=0) + \sigma_{12,0}(x=l_d)), \\ x_m = x_N = \frac{\frac{1}{\cos \alpha} \int_0^{l_d} \sigma_{12,0}(x) x dx}{\frac{1}{\cos \alpha} \int_0^{l_d} \sigma_{12,0}(x) dx} = \\ = \frac{l_d}{3} \left(\frac{\sigma_{12,0}(x=0) + 2\sigma_{12,0}(x=l_d)}{\sigma_{12,0}(x=0) + \sigma_{12,0}(x=l_d)} \right). \end{cases} \quad (10)$$

Из (7), (8), (10) следует

$$\sigma_{12,0}(x) = \frac{0,5(W_\phi + W_\tau)}{b v_m l_d \operatorname{tg} \alpha} \times \left[\left(2 - \frac{3x_m}{l_d} \right) - \frac{3(l_d - 2x_m)}{l_d^2} x \right]. \quad (11)$$

2. Распределение энергосиловых параметров процесса волочения в очаге деформации, связанных с расходом мощности на преодоление мощности сил внешнего трения, в рабочей зоне очага деформации представлено на рис. 3.

Учитывая, что элементарная сила трения на расстоянии x от входа в очаг деформации (рис. 3, а) определяется уравнением

$$dT_{12} = f b \sigma_{12}(x) \frac{dx}{\cos \alpha},$$

элементарная мощность силы трения в этом сечении очага деформации составит

$$dW_{\text{тр}} = dT_{12} v_{x, \text{ср}} = f b \frac{\sigma_{12}(x)}{\cos^2 \alpha} v_0 \frac{h_0}{h_0 - x \operatorname{tg} \alpha} dx, \quad (12)$$

где $\sigma_{12}(x) \neq \sigma_{12,0}(x)$ — распределение нормальных контактных напряжений (см. рис. 2, а и рис. 3, а), обусловленных влиянием на $P_{\text{вол}, D}$ силы трения

$$T_{12} = 0,5 W_{\text{тр}} \cos \alpha / v_N = N_{12} \operatorname{tg} \theta_{\text{пр}, D}.$$

Соответственно, из многоугольника сил (рис. 3, б) получим

$$\begin{aligned} 0,5 P_{\text{вол}, D} &= R_{12} \sin(\alpha + \theta_{\text{пр}, D}) = \\ &= \frac{N_{12}}{\cos \theta_{\text{пр}, D}} \sin(\alpha + \theta_{\text{пр}, D}). \end{aligned} \quad (13)$$

Здесь N_{12} — результирующая сила нормальных контактных напряжений $\sigma_{12}(x)$ в условиях деформации заготовки с учетом внешнего трения; $\theta_{\text{пр}, D}$ и $f_{\text{пр}, D}$ — соответственно угол трения и коэффициент трения в очаге деформации [8]:

$$\operatorname{tg} \theta_{\text{пр}, D} = \frac{0,5 W_{\text{тр}} \cos \alpha}{v_N N_{12}} = f_{\text{пр}, D},$$

$\bar{R}_{12} = \bar{T}_{12} + \bar{N}_{12}$ — полная сила реакции, действующая в очаге деформации на заготовку со стороны верхней полуволоки.

Мощность удельных сил трения в зоне очага деформации составит

$$0,5 W_{\text{тр}} = \int_0^{l_d} dW_{\text{тр}} = v_0 \frac{f b h_0}{\cos^2 \alpha} \int_0^{l_d} \frac{\sigma_{12}(x)}{h_0 - x \operatorname{tg} \alpha} dx. \quad (14)$$

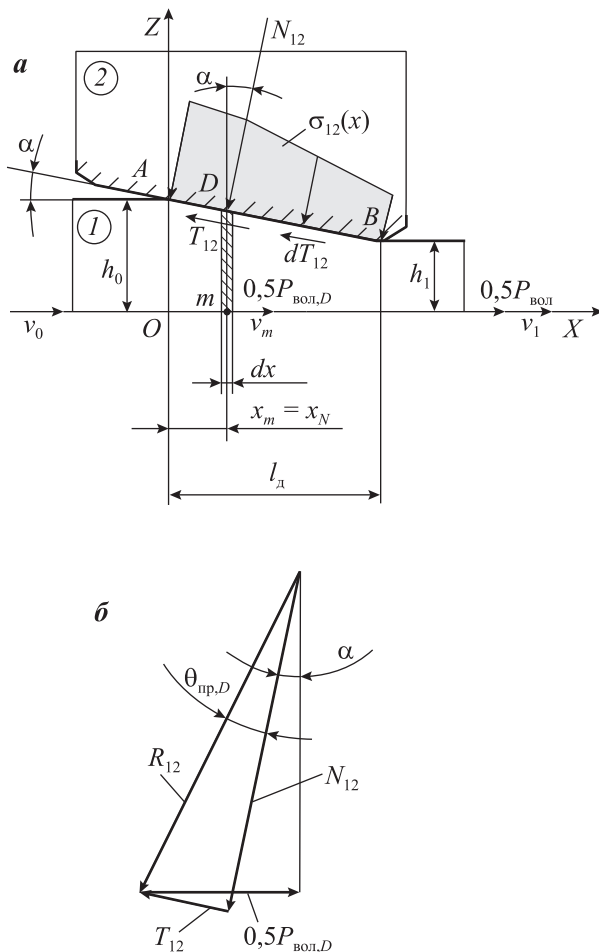


Рис. 3. Влияние внешнего трения в очаге деформации на усилии волочения

а – расчетная схема процесса; **б** – схема сил, действующих в сечении заготовки, проходящем через центр ее массы (*m*)

Учитывая (см. рис. 3, *a*), что расход мощности удельных сил трения в очаге деформации (14) определяется балансом мощности этих сил на участках контактной поверхности (*AD* и *DB*), разделенных между собой точкой приложения N_{12} [7, 8], при определении $\sigma_{12}(x)$ необходимо обеспечить следующие условия:

$$\begin{cases} x_m N_{12} = \frac{b}{\cos \alpha} \int_0^{l_d} \sigma_{12}(x) x dx, \\ N_{12} = \frac{b}{\cos \alpha} \int_0^{l_d} \sigma_{12}(x) dx, \\ v_0 \frac{fbh_0}{\cos^2 \alpha} \int_0^{x_m} \frac{\sigma_{12}(x)}{h_0 - x \operatorname{tg} \alpha} dx = \\ = v_0 \frac{fbh_0}{\cos^2 \alpha} \int_0^{l_d} \frac{\sigma_{12}(x)}{h_0 - x \operatorname{tg} \alpha} dx = 0,25W_{\text{тр}}. \end{cases} \quad (15)$$

Учитывая характер распределения $\sigma_{12}(x)$ (см. рис. 3, *a*), при решении уравнений (5), (14), (15) принимаем

$$\begin{cases} \sigma_{12}(x) = \sigma_{12,A} - \frac{\sigma_{12,A} - \sigma_{12,D}}{x_m} x \\ \text{при } 0 \leq x \leq x_m, \\ \sigma_{12}(x) = \sigma_{12,D} - \frac{\sigma_{12,D} - \sigma_{12,B}}{l_d - x_m} (l_d - x) \\ \text{при } x_m \leq x \leq l_d, \end{cases} \quad (16)$$

где $\sigma_{12,A} = \sigma_{12}(x = 0)$, $\sigma_{12,D} = \sigma_{12}(x = x_m)$ и $\sigma_{12,B} = \sigma_{12}(x = l_d)$ – соответственно нормальные контактные напряжения на входе в очаг деформации в точке приложения N_{12} и выходе из нее (см. рис. 3, *a*).

Уравнения (5), (14)–(16) определяют энерго-силовые параметры процесса волочения полосы $P_{\text{вол}} = f_1(H_0, v_1, \alpha, f, \varepsilon, \tau_s)$, в том числе и в относительных величинах:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{вол,отн}} &= \frac{\sigma_{\text{вол}}}{2\tau_{s,\text{cp}}} = \frac{P_{\text{вол}}}{2\tau_{s,\text{cp}} H_1 b}, \\ \sigma_{\text{cp,отн}} &= \frac{\sigma_{12,\text{cp}}}{\sigma_{\text{вол}}} = \frac{N_{12} \cos \alpha}{bL \sigma_{\text{вол}}}, \\ \sigma_{12,\text{отн}} &= \frac{\sigma_{12}(x)}{\max \sigma_{12}}, \end{aligned}$$

которые позволяют сравнить полученные результаты расчета с аналогичными данными других авторов, а также с результатами экспериментальных исследований процессов волочения, представленными в технической литературе [2–5, 8, 9, 12, 13].

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 приведены результаты расчета $\sigma_{\text{вол,отн}}$ и $\sigma_{\text{cp,отн}}$ по разработанной методике и уравнениям¹ [5]:

$$\begin{cases} \frac{\sigma_{\text{вол}}}{2\tau_{s,\text{cp}}} = \left(\ln \mu + \frac{\alpha}{2} \right) \left(1 + \frac{f}{\alpha} \right), \\ \frac{\sigma_{12,\text{cp}}}{\sigma_{\text{вол}}} = \frac{1}{(\mu - 1) \left(1 + \frac{f}{\alpha} \right)}. \end{cases} \quad (17)$$

¹ В формулах (17) обозначения параметров (напряжение волочения, среднее нормальное контактное напряжение, коэффициент вытяжки и коэффициент трения) приняты в соответствии с обозначением этих же величин в материалах настоящей статьи.

Таблица 1
Сравнение результатов расчета по предложенной методике (числитель) и уравнениям (22) работы [5] (знаменатель)

μ	f	σ _{вол,отн}			σ _{ср,отн}		
		α = 5°	10°	15°	5°	10°	15°
1,1	0	0,139	0,182	0,227	10,508	10,508	10,508
		0,139	0,182	0,227	10,0	10,0	10,0
	0,1	0,3	0,292	0,322	4,913	6,742	7,723
		0,298	0,287	0,313	4,66	6,357	7,236
	0,15	0,382	0,347	0,369	3,88	5,717	6,82
		0,378	0,339	0,356	3,678	5,378	6,357
1,3	0	0,306	0,35	0,393	3,855	3,855	3,855
		0,306	0,35	0,393	3,333	3,333	3,333
	0,1	0,662	0,558	0,558	1,8	2,72	2,832
		0,657	0,55	0,543	1,553	2,119	2,412
	0,15	0,842	0,665	0,641	1,422	2,096	2,501
		0,832	0,65	0,619	1,226	1,793	2,119
1,5	0	0,449	0,493	0,536	2,533	2,533	2,533
		0,449	0,493	0,536	2,0	2,0	2,0
	0,1	0,972	0,787	0,761	1,182	1,623	1,86
		0,964	0,775	0,741	0,932	1,271	1,447
	0,15	1,237	0,937	0,874	0,933	1,376	1,642
		1,221	0,916	0,844	0,736	1,076	1,271
1,7	0	0,574	0,618	0,662	1,972	1,972	1,972
		0,574	0,618	0,662	1,429	1,429	1,429
	0,1	1,245	0,988	0,939	0,919	1,262	1,443
		1,232	0,972	0,914	0,666	0,908	1,034
	0,15	1,584	1,176	1,078	0,725	1,07	1,277
		1,561	1,149	1,041	0,525	0,768	0,908

Сравнение представленных расчетных параметров процессов волочения показывает, что при принятых допущениях при определении W_{ϕ} , W_{τ} и характеристик сил трения в очаге деформации по закону Кулона [1–3, 5, 6] результаты расчетов $\sigma_{вол,отн}$ практически соответствуют друг другу. Вместе с тем отличия значений $\sigma_{ср,отн}$ составляют 1,04–1,07 и 1,38–1,41 при $\mu = 1,1$ и 1,7 соответственно, и требует уточнения закон распределения нормальных контактных напряжений, обуславливающих распределение удельных сил трения по длине очага деформации, которые определяют износ поверхностей инструмента и заготовки и оказывают влияние на распределение остаточных напряжений в протянутом изделии [14].

С этой целью в табл. 2 и на рис. 4 представлены результаты сравнения экспериментальных

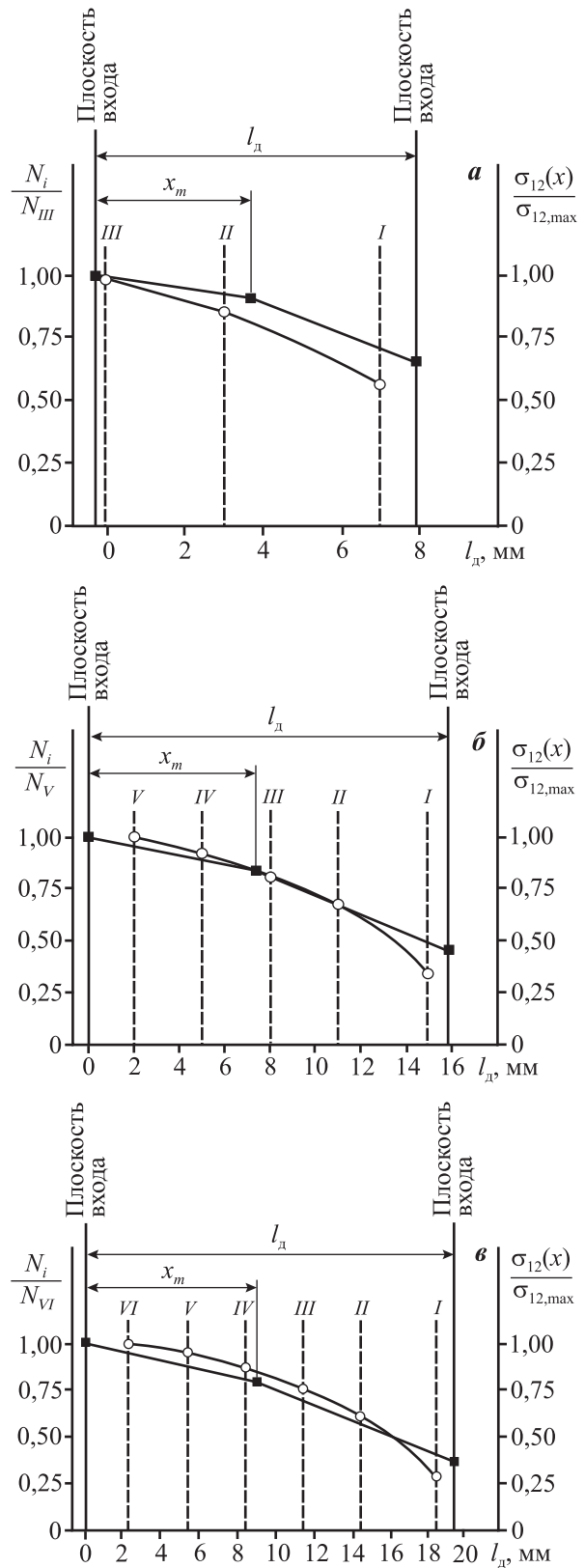


Рис. 4. Характер распределения измеренных сил давления $N_i/N_{i,max}$ (○) в сечениях I–VI очага деформации [15] и расчетных величин $\sigma_{12}(x)/\sigma_{12,max}$ (■) $\alpha - \mu = 1,27$, $\beta - 1,56$, $\epsilon - 1,72$

Таблица 2
Результаты эксперимента [15] и теоретических расчетов

Результаты эксперимента						Результаты расчета приведенной полосы							
Диаметр заготовки d_0 , мм	Коэффициент вытяжки μ	№ i -го сечения по длине волокна	Длина очага деформации l_d , мм	Нормальная сила давления на месдозу в i -м сечении		Приведенный угол конусности клиновидной волокна $\alpha_{пр}$, град	Высота заготовки $2h_0$, мм	Расчетная длина очага деформации l_d , мм	Координата N_{12}		Распределение напряжений по длине волокна l_d		
				N_i , Н	$N_i/\max N_i$				x_N , мм	x_N/l_d	$\frac{\sigma_{12,N}}{\sigma_{12,A}}$	$\frac{\sigma_{12,B}}{\sigma_{12,A}}$	
18	1,27	<i>I</i>	15,71	115	0,57	10,2	18	15,71	7,54	0,48	0,91	0,66	
		<i>II</i>		173	0,86								
		<i>III</i>		202	1,0								
19	1,41	<i>I</i>	21,43	108	0,67	10,0	19	21,43	10,07	0,47	0,87	0,55	
		<i>II</i>		171	0,74								
		<i>III</i>		209	0,91								
		<i>IV</i>		230	1,0								
20	1,56	<i>I</i>	28,57	90	0,33	9,9	20	28,57	13,14	0,46	0,83	0,45	
		<i>II</i>		185	0,69								
		<i>III</i>		222	0,83								
		<i>IV</i>		245	0,91								
		<i>V</i>		269	1,0								
21	1,72	<i>I</i>	35,7	75	0,26	9,8	21	35,7	16,07	0,45	0,79	0,37	
		<i>II</i>		185	0,64								
		<i>III</i>		220	0,74								
		<i>IV</i>		250	0,87								
		<i>V</i>		277	0,95								
		<i>VI</i>		288	1,0								

исследований [15] распределения нормальных контактных напряжений (сил, действующих нормально контактной поверхности и измеренных штифтовыми месдозами в различных сечениях по длине очага деформации) в монолитной волоке с углом конусности 7° и выходным отверстием $d_1 = 16$ мм при волочении прутков с расчетной величиной $\sigma_{ср,отн}$ приведенной полосы, для которой принято

$$2h_{0,пр} = d_0, \quad h_{1,пр} = h_{0,пр}/\mu,$$

$$\alpha_{пр} = \arctg\left(\operatorname{tg}\alpha \frac{2(h_{0,пр} - h_{1,пр})}{d_0 - d_1}\right), \quad (18)$$

$$b_0 = b_1 = b = 1.$$

Здесь $h_{0,пр}$ и $h_{1,пр}$ — соответственно значения высоты приведенной полосы на входе и выходе из очага деформации с приведенным углом конусности волокна ($\alpha_{пр}$), обеспечивающие равные

величины коэффициента вытяжки (μ) и длины очага деформации (l_d) в условиях эксперимента по волочению прутка [15] и в расчетной схеме волочения приведенной полосы единичной ширины (см. рис. 1, б).

Анализ данных табл. 2 и рис. 4 подтверждает качественное совпадение результатов экспериментов [15] и расчетов нормальных контактных напряжений по уравнениям (5), (14)—(16).

Следовательно, характер распределения удельных сил трения, действие которых подчиняются закону Кулона, в каждом из поперечных сечений очага деформации определяется приведенным коэффициентом трения [14] и не является постоянной величиной на поверхности контакта инструмента и пластически деформируемой заготовки:

$$f_{пр}(x) = f_{пр,D} \frac{v_m}{v(x)} \neq \text{const}. \quad (19)$$

Заключение

На основании развития энергетического метода решения технологических задач ОМД разработана методика и получены расчетные формулы для определения энергосиловых параметров процесса волочения полосы в монолитной волоке, учитывающие неравномерное распределение удельных сил трения в очаге деформации в условиях неравномерной скорости скольжения заготовки на контактной поверхности.

Показано, что влияние сил трения скольжения, подчиняющихся закону Кулона, на процесс трения заготовки по инструменту отличается от влияния тех же сил на процесс трения твердых (недеформируемых) тел при постоянной скорости относительного скольжения.

Эти отличия учитываются, когда при определении результирующей силы трения в очаге деформации используется приведенный коэффициент трения скольжения, который рассчитывается на основании баланса мощности удельных сил трения и мощности результирующей силы трения на поверхности заготовки.

Литература

1. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1986.
2. Rubio E.M., Camacho A.M., Sevilla L., Sebastián M.A. Calculation of the forward tension in drawing processes // *J. Mater. Process. Technol. A*. 2005. Vol. 162-163. P. 551–557.
3. Hernan A. Gonzalez R., Calvet J., Bubnovich V. A new analytical solution for prediction of forward tension in the drawing process // *J. Mater. Process. Technol. A*. 2008. Vol. 198. P. 93–98.
4. Kesavulu P., Ravindra Reddy G., Sreedhar N. Finite element analysis of concave and convex die contours in wire drawing process // *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng. A*. 2014. Vol. 4. P. 477–480.
5. Степаненко В.Н., Стукач А.Г., Железняк А.Г. Механика процесса волочения полосы // *Изв. вузов. Чер. металлургия*. 1972. No. 8. С. 93–97.
6. Радионов А.А., Радионова Л.В. Энергетический подход к исследованию влияния противонапряжения на процесс волочения // *Изв. вузов. Чер. металлургия*. 2008. No. 5. С. 19–22.
7. Dobrov I.V. Power Parameters of the Drawing Process in a Roller Die // *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2009. Vol. 50. P. 221–227.

8. Добров И.В., Семичев А.В., Гетьман И.И. Расчетно-энергетический метод определения силовых параметров волочения круглого профиля в монолитной волоке // *Изв. вузов. Чер. металлургия*. 2010. No. 7. С. 32–38.
9. Sang-Kon L., Seon-Bong L., Bynung-Min K. Process design of multi-stage wet wire drawing for improving the drawing speed for 0,72 wt.% C steel wire // *J. Mater. Process. Technol. A*. 2010. Vol. 210. P. 776–783.
10. Битков В.В. Технология и машины для производства проволоки. Екатеринбург: УрО РАН, 2004.
11. Радионов А.А., Радионова Л.А. Современное состояние перспективы развития волочильного производства стальной проволоки // *Машиностроение: Эл. сет. журн.* 2013. No. 1. С. 3–11.
12. Panteghini A., Genna F. An engineering analytical approach to the design of cold wire drawing processes for strain-hardening materials // *Int. J. Mater. Form. A*. 2010. Vol. 3. P. 279–289.
13. Massé T., Fourment L., Montmitonnet P., Bobadilla C., Foissey S. The optimal die semi-angle concept in wire drawing, examined using automatic optimization techniques // *Int. J. Mater. Form. A*. 2013. Vol. 3. P. 377–389.
14. Добров И.В. К вопросу пластического трения в очаге деформации с неподвижными контактными поверхностями // *Кузн.-штамп. пр-во. Обработка материалов давлением*. 2013. No. 12. С. 9–14.
15. Чекмарев А.П., Чуйко П.И. Силовые параметры при волочении // *Металлургия и коксохимия. Межвед. респ. науч.-техн. сб. (Обработка металлов давлением)*. 1966. Вып. 4. С. 179–190.

References

1. Kolmogorov V.L. *Mehanika obrabotki metallov davleniem* [Mechanics of metal forming]. Moscow: Metallurgija, 1986.
2. Rubio E.M., Camacho A.M., Sevilla L., Sebastián M.A. Calculation of the forward tension in drawing processes. *J. Mater. Process. Technol. A*. 2005. Vol. 162-163. P. 551–557.
3. Hernan A. Gonzalez R., Calvet J., Bubnovich V. A new analytical solution for prediction of forward tension in the drawing process. *J. Mater. Process. Technol. A*. 2008. Vol. 198. P. 93–98.
4. Kesavulu P., Ravindra Reddy G., Sreedhar N. Finite element analysis of concave and convex die contours in wire drawing process. *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng. A*. 2014. Vol. 4. P. 477–480.
5. Stepanenko V.N., Stukach A.G., Zheleznyak A.G. *Mehaniка processa volochenija polosity* [The mechanics of the

- process of drawing the strip]. *Izv. vuzov. Cher. metallurgija*. 1972. No. 8. P. 93–97.
6. Radionov A.A., Radionova L.V. Jenergeticheskij podhod k issledovaniju vlijaniya protivonatjazhenija na process volochenija [Energy method of the investigation of the counterstrain influence on the process of drawing]. *Izv. vuzov. Cher. metallurgija*. 2008. No. 5. P. 19–22.
 7. Dobrov I.V. Power parameters of the drawing process in a roller die. *Russ. J. Non-Ferr. Met.* 2009. Vol. 50. P. 221–227.
 8. Dobrov I.V., Semichev A.V., Get'man I.I. Raschetno-jenergeticheskij metod opredelenija silovyh parametrov volochenija kruglogo profilja v monolitnoj voloke [Energy method for determining of the force parameters of drawing a round profile in a monolithic die]. *Izv. vuzov. Cher. metallurgija*. 2010. No. 7. P. 32–38.
 9. Sang-Kon L., Seon-Bong L., Bynung-Min K. Process design of multi-stage wet wire drawing for improving the drawing speed for 0,72 wt.% C steel wire. *J. Mater. Process. Technol. A*. 2010. Vol. 210. P. 776–783.
 10. Bitkov V.V. Tehnologija i mashiny dlja proizvodstva provoloki [Technology and machines for the production of wire]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2004.
 11. Radionov A.A., Radionova L.A. Sovremennoe sostojanie perspektivy razvitija volochil'nogo proizvodstva stal'noj provoloki [The actual conditions of development possibilities of drawing of steel wire]. *Mashinostroenie: Jelektronnyj setevoj zhurnal*. 2013. No. 1. P. 3–11.
 12. Panteghini A., Genna F. An engineering analytical approach to the design of cold wire drawing processes for strain-hardening materials. *Int. J. Mater. Form. A*. 2010. Vol. 3. P. 279–289.
 13. MasséT., Fourment L, Montmitonnet P., Bobadilla C., Foissey S. The optimal die semi-angle concept in wire drawing, examined using automatic optimization techniques. *Int. J. Mater. Form. A*. 2013. Vol. 3. P. 377–389.
 14. Dobrov I.V. K voprosu plasticheskogo trenija v ochage deformacii s nepodvizhnymi kontaktnymi poverhnostjami [To the question of plastic friction in the deformation zone with fixed surfaces]. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2013. No. 12. P. 9–14.
 15. Chekmarev A.P., Chujko P.I. Silovye parametry pri volochenii [Force parameters of drawing]. In: *Metallurgija i koksohimija. Mezhvedomstvennyj resp. nauch.-tehn. sbornik (Obrabotka metallov davleniem)*. 1966. Vol. 4. P. 179–190.