

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ КАК ОСНОВА МЕТОДА РАСЧЕТА РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ МАРШРУТОВ ВОЛОЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ

Л.В. Радионова, Р.А. Лисовский, А.В. Брык, В.Д. Лезин

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

На основании развития энергетического метода решения технологических задач обработки металлов давлением, основоположником которого является В.Н. Выдрин, получены расчетные формулы для определения мощности, расходуемой на процесс волочения проволоки в монолитной волоке. Мощность электрической энергии, преобразуемая электродвигателем в механическую энергию и подводимая к барабану волочильного стана посредством редуктора, расходуется на преодоление сил трения в монолитной волоке и на формоизменение металла при волочении.

В статье приведена методика расчета коэффициента полезного действия (КПД) процесса волочения проволоки. Установлено, что повышения механических свойств проволоки можно достичь за счет снижения неравномерности деформации по ее сечению. Определено, что с точки зрения формирования механических свойств и сохранения запаса пластичности проволоки маршрут волочения необходимо строить с максимально допустимыми по условию безобрывного волочения единичными степенями деформации, минимальным углом волоки и при обеспечении низкого коэффициента трения. Предложено при построении ресурсосберегающих маршрутов волочения руководствоваться не только критерием качества проволоки, характеризующимся уровнем механических свойств, но и энергоэффективностью процесса, который предложено оценивать по КПД процесса. Расчет мощности, расходуемой на формоизменение и преодоление сил трения в очаге деформации, показал, что КПД процесса волочения повышается с увеличением единичной степени деформации, уменьшением величины рабочего угла волоки и значения коэффициента трения. Анализ типового маршрута волочения с точки зрения этих принципов выявил, что эффект ресурсосбережения достигается при применении монолитных волок с рабочим углом 8° , при условии согласования его с остальными параметрами очага деформации (единичной степенью деформации и коэффициентом трения, обеспечиваемого качеством подготовки поверхности заготовки и применяемой технологической смазкой).

Ключевые слова: волочение проволоки, монолитная волока, маршрут волочения, мощность формоизменения, рабочий полуугол волоки, единичная степень деформации, коэффициент трения.

Введение

Энергетическая теория прокатки, основоположником которой является Выдрин Владимир Николаевич, базируется на фундаментальных законах сохранения и минимума энергии. Она широко используется как метод научного исследования и решения проблемных задач теории обработки металлов давлением [1].

Волочение проволоки в монолитной волоке – один из видов обработки металлов давлением, который на первый взгляд кажется очень простым и достаточно легко реализуемым. Однако это ошибочное мнение. Получить стабильный процесс волочения проволоки из различных марок стали с высокими

суммарными деформациями и на тех скоростях, которые сегодня обеспечивают современные станы, – задача достаточно сложная. И для решения этой задачи многие исследователи-волочильщики провели большое количество экспериментальных и теоретических исследований [2–5].

При построении маршрутов волочения необходимо учитывать несколько особенностей процесса. В первую очередь волочение должно быть безобрывным. Переднее тянущее усилие, посредством которого осуществляется процесс пластической деформации проволоки, ограничивается пределом прочности металла.

В практике волочения проволоки принято иметь коэффициент запаса прочности 1,4...1,5 [6], который определяется как

$$\gamma_i = \frac{\sigma_{в_i}}{\sigma_{вол_i}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{в_i}$ – временное сопротивление разрыву проволоки, МПа;

$\sigma_{вол_i}$ – напряжение волочения, МПа.

Готовая проволока должна соответствовать требованиям ГОСТа или ТУ по геометрическим параметрам и механическим характеристикам.

Получение требуемых механических свойств проволоки напрямую связано с диаметром готовой проволоки. Большое количество проволочной продукции поставляется в нагартованном состоянии. Упрочнение металла связано с суммарной степенью деформации. Однако различные марки стали и сплавов упрочняются по-разному, более того, даже при одинаковой суммарной степени деформации механические свойства зависят от типа маршрута волочения, а они могут быть равномерными, убывающими или возрастающими. В последнее время появились работы, в которых рекомендуется строить маршрут волочения, исходя из принципа снижения неравномерности деформации по сечению проволоки в процессе волочения [7–9]. И как показывают результаты исследований [10], проволока, полученная по таким маршрутам, имеет повышенный ресурс пластичности и может деформироваться с большими суммарными обжатиями, тем самым обеспечивая повышенный предел прочности при сохранении ее пластических свойств. Проволока с повышенными механическими свойствами более конкурентоспособна на рынке метизов. Однако кроме высокого уровня механических свойств не менее важным показателем конкурентоспособности является и ее себестоимость, которая складывается из стоимости заготовки и расходов на процесс ее формоизменения, т. е. волочения. Поэтому при построении ресурсосберегающих маршрутов волочения необходимо руководствоваться не только получением требуемых геометрических размеров и комплексом механических свойств, но и затратами, которые позволили их обеспечить.

Затраты складываются в первую очередь из потребления электроэнергии на процесс

волочения, а уже во вторую – из расхода инструмента, технологической смазки, промежуточных термических обработок для восстановления пластичности и т. п.

В настоящее время для анализа энергосиловых параметров процесса волочения используют два принципиально отличающихся метода расчета [11]: первый основан на соблюдении условий пластичности заготовки при равновесии сил в очаге деформации [12], а второй, энергетический, – на соблюдении баланса мощностей внешних и внутренних сил в процессе пластической деформации металла [1, 13, 14].

Целью работы является разработка метода расчета ресурсосберегающих маршрутов волочения проволоки, в основе которого лежит энергетическая теория баланса мощностей внешних и внутренних сил, затрачиваемых на процесс пластической деформации, при условии обеспечения высокого уровня механических свойств готовой проволоки.

Энергетическая теория процесса волочения

Мощность электрической энергии $P_{дв}$, преобразуемая электродвигателем в механическую энергию $N_{дв}$ и подводимая к барабану волочильного стана посредством редуктора, расходуется на преодоление следующих сил (рис. 1):

– силы, осуществляющей основную пластическую деформацию – формоизменение проволоки;

– силы, затрачиваемой на преодоление трения между проволокой и поверхностью рабочей части волюки;

– силы, осуществляющей дополнительную пластическую и упругую деформации;

– силы, преодолевающей противонапряжения проволоки при его наличии.

Баланс мощностей процесса волочения может быть определен на основании закона сохранения энергии и записан в виде

$$N_T - N_Q = N_{\phi} + N_{уд} + N_T + N_{дд} + N_{др}, \quad (2)$$

где N_T – мощность, подводимая к очагу деформации тянущим усилием T через передний конец проволоки;

N_Q – мощность, подводимая к очагу деформации противонапряжением Q через задний конец проволоки;

N_{ϕ} – мощность, затрачиваемая на формоизменение (вытяжку) металла;

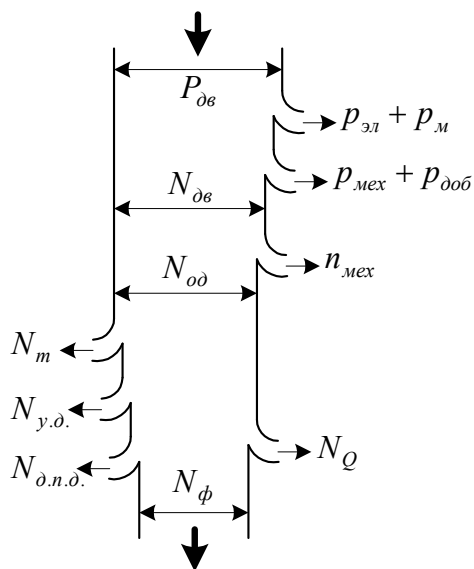


Рис. 1. Энергетическая диаграмма:

$P_{эл}$, P_m , $P_{мех}$, P_d – электрические, магнитные, механические и прочие (добавочные) потери в приводном электродвигателе; $n_{мех}$ – механические потери в кинематической линии волоочильного блока; $N_{од}$ – мощность, подводимая к очагу деформации; N_T – мощность силы контактного трения; $N_{у.д.}$ – мощность силы упругой деформации; $N_{д.п.д.}$ – мощность силы дополнительной пластической деформации; N_Q – мощность силы на преодоление противонапряжения; N_ϕ – мощность, расходуемая на формоизменение

$N_{уд}$ – мощность, расходуемая на упругую деформацию проволоки в волоке;

N_T – мощность сил трения скольжения на контактной поверхности обрабатываемого металла с волокой (как ее конической, так и калибрующей частями);

$N_{дд}$ – мощность, затрачиваемая на создание дополнительных деформаций (сдвигов), обусловленных формой канала волоки;

$N_{др}$ – другие виды мощностей (на изменение кинетической энергии обрабатываемой проволоки и др.).

При дальнейших рассуждениях мощностью дополнительных деформаций и другими видами мощности пренебрегается ввиду их незначительной величины.

Мощности, подводимые к очагу деформации тянущим усилием и противонапряжением, могут быть определены как:

$$N_T = T \cdot V_{п}^{вх};$$

$$N_Q = Q \cdot V_{п}^{вх} = Q \cdot \frac{V_{п}^{вх}}{\mu}, \quad (3)$$

где $\mu = \frac{S_{п}^{вх}}{S_{п}^{вых}}$ – коэффициент вытяжки;

$S_{п}^{вх}$, $S_{п}^{вых}$ – соответственно сечение обрабатываемого металла на входе в очаг деформации и на выходе из него, мм²;

T – переднее тянущее усилие при волочении, Н;

Q – усилие противонапряжения, Н;

$V_{п}^{вх}$, $V_{п}^{вых}$ – скорость движения проволоки на входе в очаг деформации и выходе из него, м/с.

Мощность N_ϕ , осуществляющая основную пластическую деформацию, называется мощностью чистой деформации и может быть определена из формулы Финка [15], записанной для работы чистой деформации:

$$A_\phi = \sigma_s \cdot \theta_{см}, \quad (4)$$

где σ_s – предел текучести деформируемого металла, МПа;

$\theta_{см}$ – величина смещенного объема, определяемого как

$$\theta_{см} = \theta \cdot \ln \frac{d_n^2}{d_k^2}, \quad (5)$$

где $\ln \frac{d_n^2}{d_k^2}$ – интегральный показатель степени деформации;

d_n , d_k – диаметр проволоки до и после волоки соответственно, мм;

θ – объем металла, обработанного за время t , м³;

$$\theta = \frac{\pi \cdot d_k^2}{4} \cdot L_{пр} = \frac{\pi \cdot d_k^2}{4} \cdot V_{в}^{вых} \cdot t, \quad (6)$$

где $L_{пр}$ – длина проволоки, обработанной за время t , м.

При подстановке (5) и (6) в (4) с учетом, что $A_\phi = N_\phi \cdot t$, мощность формоизменения определится в виде

$$N_\phi = \sigma_s \cdot \frac{\pi \cdot d_k^2}{4} \cdot V_{в}^{вых} \cdot \ln \frac{d_n^2}{d_k^2}. \quad (7)$$

Аналогично мощность, расходуемая на

упругую деформацию в волоке, может быть найдена из выражения

$$N_{уд} = \frac{dA_{уд}}{dt} = \sigma_{\text{плц}} \cdot \ln \left(\frac{\sigma_{\text{плц}}}{E} + 1 \right) \cdot \frac{d\theta}{dt} =$$

$$= \sigma_{\text{плц}} \cdot \ln \left(\frac{\sigma_{\text{плц}}}{E} + 1 \right) \cdot S_{\text{п}}^{\text{ВХ}} \cdot V_{\text{п}}^{\text{ВХ}}. \quad (8)$$

Мощность N_{T} , расходуемая на преодоление сил трения на контактной поверхности в очаге деформации, может быть найдена суммированием значений элементарных мощностей $\Delta N_{\text{T}I}$, выделяемых на элементарных участках контактной поверхности рабочей части волоки и мощности, расходуемой на преодоление сил трения на контактной поверхности калибрующей части $N_{\text{ТК}}$:

$$N_{\text{T}} = \sum_I \Delta N_{\text{T}I} + N_{\text{ТК}}. \quad (9)$$

Для этого поверхность рабочей части волоки с коническим профилем (рис. 2) необходимо разбить на элементарные цилиндры, каждый из которых будет иметь радиус r_I , ширину Δl_I и площадь ΔS_I .

Основой для расчета силы трения служит закон Кулона – Амонтона для расчета удельной силы трения τ :

$$\tau = f \cdot \sigma_{\text{н}}, \quad (10)$$

где f – коэффициент трения на контактной поверхности (принимается неизменным по всей длине очага деформации);

$\sigma_{\text{н}}$ – нормальное напряжение, МПа.

Изменение силы трения, возникающей на элементарном участке, может быть определено как

$$\Delta F_{\text{T}I} = \tau \cdot \Delta S = f \cdot \sigma_{\text{н}} \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_I \cdot \Delta l_I. \quad (11)$$

Тогда мощность этой силы может быть найдена из выражения

$$\Delta N_{\text{T}I} = \Delta F_{\text{T}I} \cdot V_I, \quad (12)$$

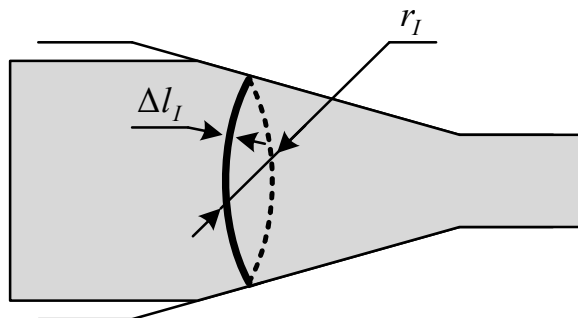


Рис. 2. Очаг деформации при волочении проволоки в монолитной волоке

где V_I – скорость движения проволоки по поверхности волоки в I -м сечении, проекция которой на ось движения проволоки (рис. 3) определяется тригонометрическим соотношением

$$v_{Ix} = V_I \cdot \cos \alpha, \quad (13)$$

где α – полуугол волоки.

Эта скорость может быть определена из выражений, записанных для вытяжки проволоки от начала очага деформации до этого сечения:

$$\mu_I = \frac{v_{Ix}}{V_{\text{В}}^{\text{ВХ}}} = \frac{d_{\text{н}}^2}{d_I^2} \quad (14)$$

в виде

$$v_{Ix} = \frac{d_{\text{н}}^2}{d_I^2} \cdot V_{\text{В}}^{\text{ВХ}}. \quad (15)$$

Тогда, при совместном рассмотрении (13) и (15) скорость движения проволоки по поверхности волоки определится как

$$V_I = \frac{d_{\text{н}}^2 \cdot V_{\text{В}}^{\text{ВХ}}}{d_I^2 \cdot \cos \alpha}, \quad (16)$$

или с учетом, что (см. рис. 3)

$$d_I = d_{\text{н}} - 2 \cdot \sin \alpha \cdot \Delta l_{I\Sigma}, \quad (17)$$

в виде

$$V_I = \frac{d_{\text{н}}^2 \cdot V_{\text{В}}^{\text{ВХ}}}{(d_{\text{н}} - 2 \cdot \sin \alpha \cdot \Delta l_{I\Sigma})^2 \cdot \cos \alpha}. \quad (18)$$

Здесь $\Delta l_{I\Sigma}$ – длина поверхности волоки от начала до I -го сечения включительно

$$\Delta l_{I\Sigma} = \sum_{J=1}^I \Delta l_J. \quad (19)$$

При подстановке (11), (18) и (19) в (12) после несложных преобразований получим

$$\Delta N_{\text{T}I} = \pi \cdot f \cdot \sigma_{\text{н}} \cdot \Delta l_I \times$$

$$\times \frac{d_{\text{н}}^2 \cdot V_{\text{В}}^{\text{ВХ}}}{\left(d_{\text{н}} - 2 \cdot \sin \alpha \cdot \sum_{J=1}^I \Delta l_J \right)^2 \cdot \cos \alpha}. \quad (20)$$

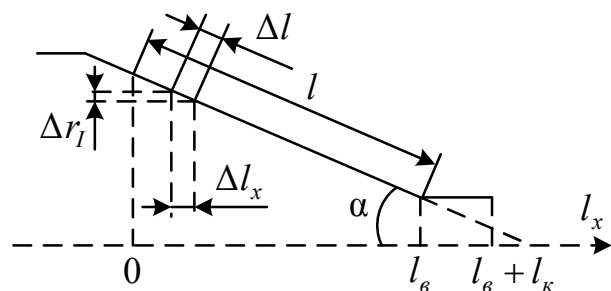


Рис. 3. К расчету мощности, расходуемой на преодоление сил трения

Мощность сил трения в калибрующей части волокна можно определить как

$$N_{\text{ТК}} = F_{\text{ТК}} \cdot V_{\text{В}}^{\text{БЫХ}} = \tau \cdot S_{\text{К}} \cdot V_{\text{В}}^{\text{БЫХ}} = f \cdot \sigma_s \cdot \pi \cdot d_{\text{К}} \cdot l_{\text{К}} \cdot V_{\text{В}}^{\text{БЫХ}}, \quad (21)$$

где $l_{\text{К}}$ – длина калибрующей части волокна.

Мощность, расходуемая на преодоление сил трения, может быть определена по выражению:

$$N_{\text{Т}} = \pi \cdot f \cdot \sigma_s \cdot d_{\text{К}} \cdot V_{\text{В}}^{\text{БЫХ}} \times \left[\frac{d_{\text{К}}}{\cos \alpha} \cdot \sum_I \frac{\Delta l_I}{\left(d_{\text{Н}} - 2 \cdot \sin \alpha \cdot \sum_{J=1}^I \Delta l_J \right)} + l_{\text{К}} \right]. \quad (22)$$

Коэффициент полезного действия для процесса волочения можно определить как

$$\text{КПД} = \frac{N_{\text{Ф}}}{N_{\text{Т}} + N_{\text{Ф}}} \cdot 100 \%$$

Построение маршрутов волочения, обеспечивающих высокие механические свойства проволоки

В работе [16] показано, что для повышения механических свойств проволоки за счет снижения неравномерности деформации по сечению проволоки маршрут волочения следует строить из условия

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{1 - \arctg(\text{tg} \alpha + f)}{1 + \arctg(\text{tg} \alpha + f)} \right)^2, \quad (23)$$

где $\varepsilon = \frac{d_{\text{Н}}^2}{d_{\text{И}}^2}$ – степень деформации.

Для получения сжимающих напряжений в поверхностном слое обжатия следует выбирать из условия

$$\varepsilon < 1 - \left(\frac{1 - \arctg(\text{tg} \alpha + f)}{1 + \arctg(\text{tg} \alpha + f)} \right)^2. \quad (24)$$

Чтобы получить растягивающие напряжения, необходимо выполнить условие

$$\varepsilon > 1 - \left(\frac{1 - \arctg(\text{tg} \alpha + f)}{1 + \arctg(\text{tg} \alpha + f)} \right)^2. \quad (25)$$

Для предварительного выбора величины единичной деформации при возможных изменениях угла волокна и величины коэффициента трения можно воспользоваться графиками (рис. 4), построенными по соотношению (23).

Как следует из рис. 4, для получения равномерной по сечению проволоки единичные обжатия должны быть достаточно высокими, порядка 35–45 %. Для выбора необходимого значения единичного обжатия, обеспечивающего определенный характер остаточных напряжений в проволоке согласно соотношениям (23) и (25), удобно пользоваться графиками, подобными приведенному на рис. 5.

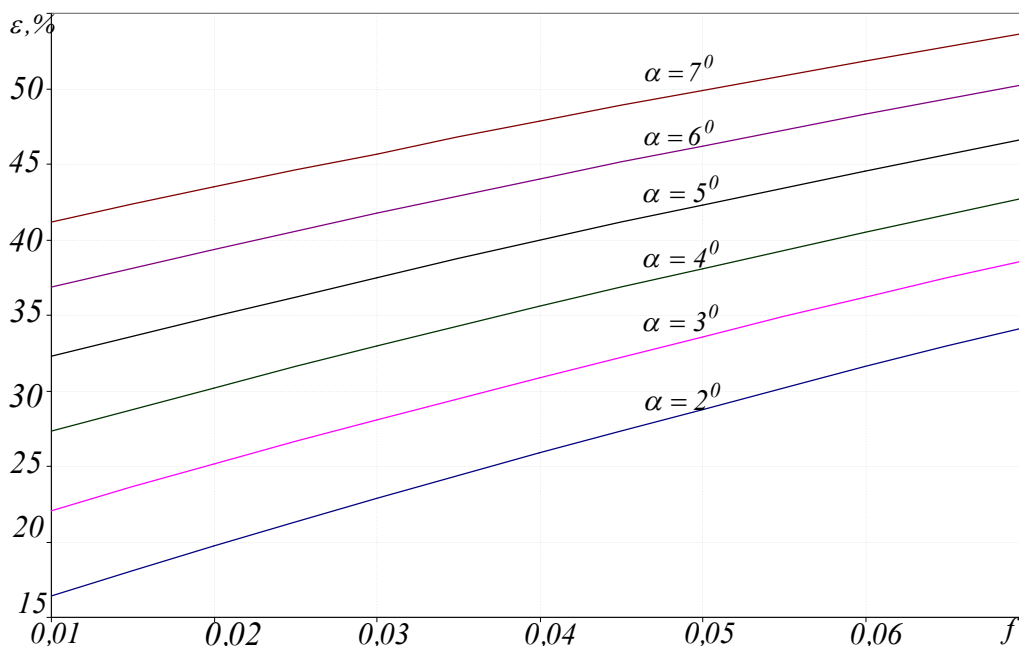


Рис. 4. Значения единичной степени деформации, обеспечивающей равномерную деформацию по сечению проволоки в зависимости от коэффициента трения f и полуугла волокна α

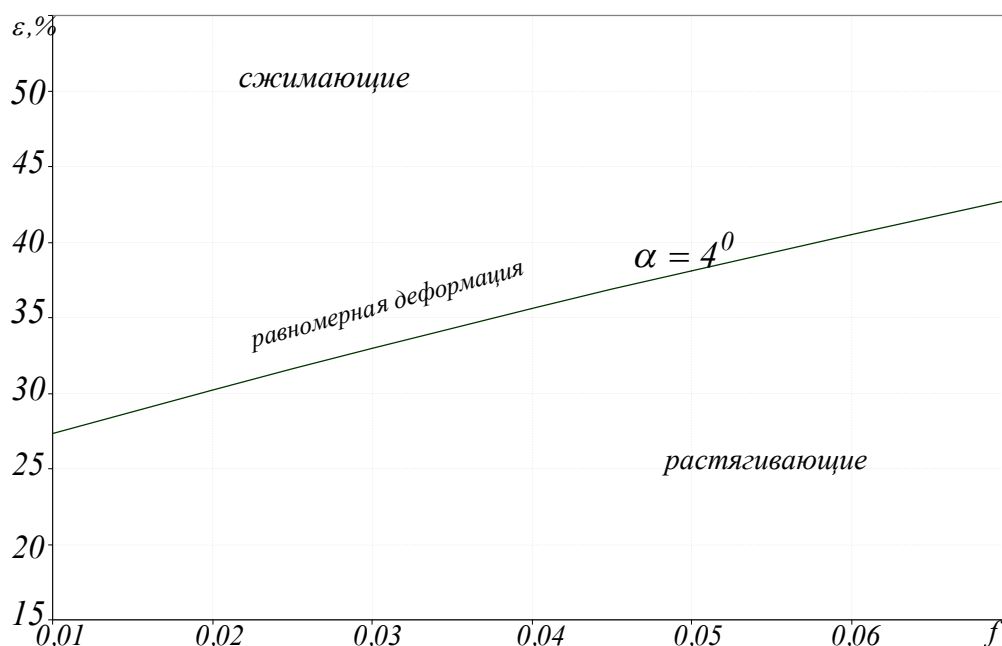


Рис. 5. Характер остаточных напряжений в поверхностном слое в зависимости от технологических параметров

Известно [17], что наличие сжимающих напряжений в поверхностном слое проволоки повышает износостойкость, коррозионную стойкость, циклическую и статическую прочность. Наличие же растягивающих напряжений в поверхностном слое проволоки является причиной расслоения и трещинообразования [18].

Для экспериментального подтверждения возможности повышения механических свойств и качества проволоки за счет формирования типа остаточных напряжений в процессе волочения были проведены исследования [19], в ходе которых заготовку диаметром 5,5 мм (сталь марки 70, $\sigma_B^C = 1150$ МПа) протягивали в лабораторных условиях на однократном волочильном стане с одинаковым обжатием при условии формирования «растягивающих», «близких к нулю» и «сжимающих» напряжений в поверхностном слое проволоки (табл. 1).

Эксперимент был дополнен волочением проволоки до диаметра 3,00 мм по маршрутам:

- Образец 1 – 5,50 $\xrightarrow{33\%}$ 4,50 $\xrightarrow{33\%}$ 3,70 $\xrightarrow{33\%}$ 3,00 ($2\alpha = 10^\circ$);
- Образец 2 – 5,50 $\xrightarrow{33\%}$ 4,50 $\xrightarrow{33\%}$ 3,70 $\xrightarrow{33\%}$ 3,00 ($2\alpha = 8^\circ$);
- Образец 3 – 5,50 $\xrightarrow{33\%}$ 4,50 $\xrightarrow{33\%}$ 3,70 $\xrightarrow{33\%}$ 3,00 ($2\alpha = 6^\circ$).

Проволоку диаметром 3,00 мм, полученную в результате экспериментального волочения в лабораторных условиях, испытывали на разрыв, скручивание и изгиб. Результаты механических испытаний приведены в табл. 2.

Уровень трещиностойкости материала нельзя оценить только по значениям какой-либо одной характеристики – прочности или пластичности ($\sigma_B, \sigma_{0,2}, \psi, \delta$) [20]. Он определяется величиной удельной энергии деформации

Таблица 1

Формирование типа остаточных напряжений в зависимости от параметров очага деформации при волочении

Номер образца	Диаметр проволоки до волочения d_n , мм	Диаметр проволоки после волочения d_k , мм	Единичная степень деформации ε , %	Рабочий угол волоки 2α , °	Тип остаточных осевых напряжений на поверхности проволоки
1	5,50	4,50	33	10	Растягивающие
2	5,50	4,50	33	8	Близкие к нулю
3	5,50	4,50	33	6	Сжимающие

Таблица 2

Механические свойства проволоки из стали марки 70 диаметром 3,00 мм

Номер образца	Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Число скручиваний m	Число гибов n
1	1640	1425	2,5	56	40	18
2	1635	1390	3,0	60	43	20
3	1645	1435	3,5	64	48	26

Таблица 3

Значения критериев зарождения $K_{зт}$ и распространения трещин $K_{рт}$

Номер образца	Критерий зарождения $K_{зт}$	Критерий распространения трещин $K_{рт}$
1	0,8947	0,6710
2	1,0132	0,7599
3	1,1169	0,8377

ции, для расчета которой необходимы одновременно все перечисленные параметры. Как показали результаты расчетов, подробно приведенные в работе [21], проволока, полученная по маршруту

$$5,5 \xrightarrow{33\%} 4,5 \xrightarrow{33\%} 3,7 \xrightarrow{33\%} 3,0$$

($2\alpha = 6^\circ$) (образец № 3), т. е. при наличии сжимающих напряжений в поверхностном слое имеет повышенную трещиностойкость (табл. 3).

Критерий зарождения трещины количественно определяет способность материала сопротивляться возникновению трещин при деформации (чем выше $K_{зт}$, тем труднее в материале зарождаются трещины).

Критерий распространения трещины количественно определяет способность материала сопротивляться свободному движению трещин при деформации в условиях достижения критического напряженного состояния (чем выше $K_{рт}$, тем труднее в материале распространяются трещины).

Получается, что с точки зрения формирования механических свойств и сохранения запаса пластичности проволоки маршрут волочения необходимо строить с максимально допустимыми по условию (1) единичными степенями деформации, минимальным углом волоки и при обеспечении низкого коэффициента трения. Однако возникает вопрос, а как такие технологические параметры скажутся на энергоэффективности процесса волочения?

Принципы построения ресурсосберегающих маршрутов волочения проволоки

Расчет мощности, расходуемой на формоизменение (7) и преодоление сил трения в очаге деформации (22) показал (табл. 4–6), что КПД процесса волочения повышается с увеличением единичной степени деформации, уменьшением величины рабочего угла волоки и значения коэффициента трения.

При условии выбора параметров очага деформации по соотношению (23) и при по-

Таблица 4

Результаты расчета КПД процесса волочения проволоки в зависимости от величины единичной степени деформации

№ п/п	Диаметр заготовки d_0 , мм	Диаметр проволоки d_1 , мм	Единичная степень деформации ε , %	Полуугол волоки α , °	Коэффициент трения, f	Мощность на преодоление сил трения N_t , Вт	Мощность формоизменения N_ϕ , Вт	КПД, % $\frac{N_\phi}{N_t + N_\phi}$
1	5,5	5,07	15	4	0,03	10 866	9204	45,9
2	5,5	4,92	20	4	0,03	10 271	11 864	53,6
3	5,5	4,76	25	4	0,03	9655	14 400	59,9
4	5,5	4,60	30	4	0,03	9057	16 630	64,7
5	5,5	4,43	35	4	0,03	8443	18 674	68,9

Таблица 5

Результаты расчета КПД процесса волочения проволоки в зависимости от величины рабочего полуугла волокна

№ п/п	Диаметр заготовки d_0 , мм	Диаметр проволоки d_1 , мм	Единичная степень деформации ε , %	Полуугол волокна α , °	Коэффициент трения, f	Мощность на преодоление сил трения N_T , Вт	Мощность формоизменения N_Φ , Вт	КПД, % $\frac{N_\Phi}{N_T + N_\Phi}$
1	5,5	4,79	24	3	0,03	9545	13948	59,4
2	5,5	4,79	24	4	0,03	9769	13948	58,8
3	5,5	4,79	24	5	0,03	10010	13948	58,2
4	5,5	4,79	24	6	0,03	10273	13948	57,6
5	5,5	4,79	24	7	0,03	10559	13948	56,9

Таблица 6

Результаты расчета КПД процесса волочения проволоки в зависимости от величины коэффициента трения

№ п/п	Диаметр заготовки d_0 , мм	Диаметр проволоки d_1 , мм	Единичная степень деформации ε , %	Полуугол волокна α , °	Коэффициент трения, f	Мощность на преодоление сил трения N_T , Вт	Мощность формоизменения N_Φ , Вт	КПД, % $\frac{N_\Phi}{N_T + N_\Phi}$
1	5,5	4,76	25	4	0,03	9655	14400	59,9
2	5,5	4,76	25	4	0,04	12873	14400	52,8
3	5,5	4,76	25	4	0,05	16091	14400	47,2
4	5,5	4,76	25	4	0,06	19309	14400	42,7

Таблица 7

Результаты КПД процесса волочения проволоки с учетом коэффициента трения

№ п/п	Диаметр заготовки d_0 , мм	Диаметр проволоки d_1 , мм	Единичная степень деформации ε , %	Полуугол волокна α , °	Коэффициент трения, f	Мощность на преодоление сил трения N_T , Вт	Мощность формоизменения N_Φ , Вт	КПД, % $\frac{N_\Phi}{N_T + N_\Phi}$
1	5,5	4,7	28	3	0,03	9213	15272	62,4
2	5,5	4,5	33	4	0,03	8694	17873	67,3
3	5,5	4,4	37	5	0,04	11388	19001	62,5
4	5,5	4,2	42	6	0,05	13391	20922	60,1

стоянном значении коэффициента трения для всех рассмотренных случаев КПД процесса волочения возрастает при увеличении единичной степени деформации. Однако в работе [22] установлено, что коэффициент трения существенно зависит от угла волокна. Экспериментально полученные данные показывают [23], что только с изменением угла волокна коэффициент трения может изменяться с 0,05 до 0,03.

При учете же изменения коэффициента трения в зависимости от рабочего угла волокна (табл. 7) наблюдается максимум КПД процесса при угле волокна в 8° и единичной степени деформации в 33 %. Связано это с тем, что при уменьшении рабочего угла волокна коэффициент трения уменьшается. Такая зависимость фиксировалась нами ранее [19] при экспериментальных исследованиях, анало-

гичные данные получены и зарубежными учеными [24].

Заключение

На основании развития энергетического метода решения технологических задач обработки металлов давлением, основоположником которого является В.Н. Выдрин, получены расчетные формулы для определения мощности, расходуемой на процесс волочения проволоки в монолитной проволоке.

Показано, что при проектировании ресурсосберегающих маршрутов волочения проволоки необходимо руководствоваться двумя принципами. Первый – получение высокого качества проволоки, которое достигается путем снижения неравномерности деформации по сечению проволоки и формированием сжимающих напряжений на поверхности про-

волокни. Достичь этого возможно согласованием единичной степени деформации, рабочего угла волокни и коэффициента трения.

Второй – снижение мощности, потребляемой на волочение и повышение КПД процесса, за счет выбора энергосберегающих технологических параметров процесса волочения. Очевидно, что КПД процесса волочения растет с увеличением единичной степени деформации.

Анализ типового маршрута волочения с точки зрения этих принципов показал, что эффект ресурсосбережения достигается при применении монолитных волокон с рабочим углом 8° , при условии согласования его с остальными параметрами очага деформации (единичной степенью деформации и коэффициентом трения, обеспечиваемого качеством подготовки поверхности заготовки и применяемой технологической смазкой).

Литература

1. Выдрин, В.Н. Динамика прокатных станов / В.Н. Выдрин. – Свердловск: Металлургия, 1960. – 256 с.
2. Харитонов, В.А. Ресурсосбережение при производстве проволоки / В.А. Харитонов, В.И. Зюзин, А.К. Белан. – Магнитогорск: МГТУ, 2003. – 194 с.
3. Красильников, Л.А. Волокнильщик проволоки: учеб. пособие / Л.А. Красильников, А.Г. Лысенко. – М.: Металлургия, 1987. – 320 с.
4. Перлин, И.Л. Теория волочения / И.Л. Перлин, М.З. Ерманок. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1971. – 448 с.
5. Изготовление высококачественных металлов: коллектив. моногр. / В.А. Кулеца, Н.А. Клековкина, Х.Н. Белалов и др. – Белорецк, 1999. – 328 с.
6. Рудской, А.И. Волочение: учеб. пособие / А.И. Рудской, В.А. Лунев, О.П. Шаболдо. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 126 с.
7. Радионова, Л.В. Исследование влияния величины рабочего угла монолитной волокни на напряженно-деформированное состояние проволоки в очаге деформации / Л.В. Радионова, В.А. Иванов, В.С. Шаталов // Машиностроение: сетевой электрон. науч. журн. – 2014. – № 2. – С. 21–25.
8. Гурьянов, Г.Н. Методика расчета оптимального угла рабочего конуса волокни при волочении круглого сплошного профиля / Г.Н. Гурьянов // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – № 6. – С. 58–60.
9. Development of dislocation based-unified material model for simulating microstructure evolution in multipass hot rolling / J. Lin, Y. Liu, D. Farrugia et al. // Philosophical Magazine. – 2005. – Vol. 85, no. 18. – P. 1967–1987.
10. Харитонов, В.А. Проектирование ресурсосберегающих технологий производства высокопрочной углеродистой проволоки на основе моделирования: моногр. / В.А. Харитонов, Л.В. Радионова. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. – 171 с.
11. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1986. – 689 с.
12. Calculation of the forward tension in drawing processes / E.M. Rubio, A.M. Camacho, L. Sevilla, M.A. Sebastián // J. Mater. Process. Technol. A. – 2005. – Vol. 162–163. – P. 551–557.
13. Добров, И.В. Развитие энергетического метода расчета силовых параметров процесса волочения полосы в монолитной волоке / И.В. Добров // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2016. – № 4. – С. 58–66.
14. Радионов, А.А. Энергетический подход к исследованию влияния противонапряжения на процесс волочения / А.А. Радионов, Л.В. Радионова // Известия вузов. Черная металлургия. – 2008. – № 5. – С. 19–22.
15. Гун, Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением (теория пластичности) / Г.Я. Гун. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с.
16. Радионова, Л.В. Аналитические исследования влияния технологических параметров на скорость деформации при высокоскоростном волочении проволоки / Л.В. Радионова // Машиностроение: сетевой электрон. науч. журн. – 2014. – № 1. – С. 28–33.
17. Зайдес, С.А. Остаточные напряжения и качество калиброванного металла / С.А. Зайдес. – Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1992. – 200 с.
18. Вишняков, Я.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах / Я.Д. Вишняков, В.Д. Пискарев. – М.: Металлургия, 1989. – 254 с.
19. Харитонов, В.А. Проектирование ресурсосберегающих технологий производства высокопрочной углеродистой проволоки на основе моделирования: моногр. / В.А. Харитонов, Л.В. Радионова. – Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. – 171 с.

20. Барон, А.А. Удельная энергия пластической деформации как мера трещиностойкости конструкционных материалов / А.А. Барон, Д.С. Гевлич, Ю.С. Бахрачева // *Металлы*. – 2003. – № 6. – С. 85–90.

21. Харитонов, В.А. Способ производства высокопрочной проволоки с повышенными пластическими свойствами из углеродистой стали / В.А. Харитонов, Л.В. Радионова, Е.В. Сафонов // *Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: межвуз. сб. науч. тр.* – Магнитогорск: МГТУ, 2002 – С. 41–45.

22. *New technological lubricants for steel*

wire drawing / L.V. Radionova, V.A. Kharitonov, V.I. Zyuzin, L.D. Rol'shchikov // *Steel in Translation*. – 2001. – No. 12. – P. 49–50.

23. Новые технологические смазки и энергосиловые параметры волочения стальной проволоки / В.А. Харитонов, В.И. Зюзин, Л.В. Радионова, Л.Д. Рольщиков // *Бюллетень «Черная металлургия»*. – 2001. – № 10. – С. 38–39.

24. Muskalski Z. *The theoretical analysis of wire drawing process or hydrodynamic friction conditions* / Z. Muskalski, S. Wiewiórowska // *Metallurgical and mining industry*. – 2011. – Vol. 3, no. 7. – P. 74–78.

Радионова Людмила Владимировна, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; radionovalv@susu.ru; ORCID: 0000-0001-9587-2925.

Лисовский Роман Андреевич, аспирант, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; johnkoffee.work@gmail.com; ORCID ID: 0000-0002-8857-2606.

Брык Анастасия Владимировна, студент, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; 89193497818n@gmail.com; ORCID ID: 0000-0003-2266-4599.

Лезин Вячеслав Дмитриевич, студент, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; vyacheslavlezin@gmail.com; ORCID ID: 0000-0002-7568-2005.

Поступила в редакцию 11 января 2020 г.

DOI: 10.14529/met200108

ENERGETICAL THEORY OF METAL PROCESSING AS THE BASIS OF THE CALCULATING RESOURCE-SAVING SEQUENCES METHOD OF WIRE-DRAWING

L.V. Radionova, radionovalv@susu.ru,
R.A. Lisovskiy, johnkoffee.work@gmail.com,
A.V. Bryk, 89193497818n@gmail.com,
V.D. Lezin, vyacheslavlezin@gmail.com

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

The calculation formulas for determining the power spent on the process of wire drawing in a monolithic die based on the energy method for solving technological problems of metal forming are obtained in this article. The founder of this method is V.N. Vydrin. The power of electric energy was converted by an electric motor into mechanical energy and supplied to the block of a drawing mill by reducer. It is spent on overcoming the friction forces in a monolithic drawing die and on the shape change of metal during drawing.

The article provides a methodology for calculating the energy efficiency of the wire drawing process. It is established that an increase in mechanical properties can lead to a decrease in the inhomogeneity of deformation over its cross section. It has been determined that for the formation of mechanical properties and the retention of the ductility margin of the wire, the drawing

sequence must be constructed with the maximum degrees of deformation that are maximum permissible under the condition of continuous drawing, the minimum angle of die, and ensuring a low coefficient of friction. It is necessary to be guided not only by the quality criterion of the wire, characterized by the level of mechanical properties, but also by the energy efficiency of the process, for constructing resource-saving drawing sequences. The calculation of the power spent on shaping and overcoming the friction forces in the deformation zone showed that the efficiency of the drawing process increases with an increase in an elementary degree of deformation, a decrease in the working angle of the die and the value of the friction coefficient. The analysis of a typical drawing sequence from the point of view of these principles revealed that the resource-saving effect is achieved when using monolithic dies with a working angle of 8° . In this case, the route should be consistent with the remaining parameters of the deformation zone (an elementary degree of deformation and a coefficient of friction provided by the quality of preparation of the surface of the workpiece and the applied process lubricant).

Keywords: wire drawing, monolithic drawing die, working half-angle of wire drawing, elementary degree of deformation, coefficient of friction.

References

1. Vydrin V.N. *Dinamika prokatnykh stanov* [The dynamics of rolling mills]. Sverdlovsk, Metallurgizdat Publ., 1960. 256 p.
2. Kharitonov V.A., Zyuzin V.I., Belan A.K. *Resursosberezheniye pri proizvodstve provoloki* [Resource conservation in wire production]. Magnitogorsk, MSTU Publ., 2003. 194 p.
3. Krasilnikov L.A., Lysenko A.G. *Volochil'shchik provoloki: ucheb. posobiye* [Wire Drawer]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987. 320 p.
4. Perlin I.L., Yermanok M.Z. *Teoriya volocheniya* [Theory of drawing]. 2nd ed. Moscow, Metallurgiya Publ., 1971. 448 p.
5. Kulesha V.A., Klekovkina N.A., Belalov H.N. et al. *Izgotovleniye vysokokachestvennykh metizov* [Production of high-quality hardware]. Beloretsk, 1999. 328 p.
6. Rudskoy A.I., Lunev V.A., Shaboldo O.P. *Volocheniye: ucheb. posobiye* [Drawing]. St. Petersburg, Polytechnic University Publ., 2011. 126 p.
7. Radionova L.V., Ivanov V.A., Shatalov V.S. [Investigation of the influence of the working angle of a monolithic die on the stress-strain state of a wire in a deformation zone]. *Engineering: a network electronic scientific journal*, 2014, no. 2, pp. 21–25. (in Russ.)
8. Guryanov G.N. [The method of calculating the optimal angle of the working cone of the die when drawing a round solid profile]. *Metallurgical and Mining Industry*, 2010, no. 6, pp. 58–60. (in Russ.)
9. Lin J., Liu Y., Farrugia D. et al. Development of dislocation based-unified material model for simulating microstructure evolution in multipass hot rolling. *Philosophical Magazine*, 2005, vol. 85, no. 18, pp. 1967–1987. DOI: 10.1080/14786430412331305285
10. Kharitonov V.A., Radionova L.V. *Proyektirovaniye resursosberegayushchikh tekhnologiy proizvodstva vysokoprochnoy uglerodistoy provoloki na osnove modelirovaniya: monogr.* [Designing resource-saving technologies for the production of high-strength carbon wire based on modeling: monograph]. Magnitogorsk, MSTU Publ., 2008. 171 p.
11. Kolmogorov V.L. *Mekhanika obrabotki metallov davleniyem* [Mechanics of metal forming]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986. 689 p.
12. 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, pp. 551–557. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.122
13. Dobrov I.V. [The development of the energy method for calculating the power parameters of the process of strip drawing in a monolithic fiber]. *Proceedings of Universities. Non-Ferrous Metallurgy*. 2016, no. 4, pp. 58–66. (in Russ.)
14. Radionov A.A., Radionova L.V. [The energy approach to the study of the effect of counter-tension on the process of drawing]. *Proceedings of Universities. Ferrous Metallurgy*, 2008, no. 5, pp. 19–22. (in Russ.)

15. Gun G.Ya. Teoreticheskiye osnovy obrabotki metallov davleniyem (teoriya plastichnosti) [Theoretical foundations of metal forming (plasticity theory)]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980. 456 p.
16. Radionova L.V. [Analytical studies of the influence of technological parameters on the strain rate during high-speed wire drawing]. *Engineering: network electronic scientific journal*, 2014, no. 1, pp. 28–33. (in Russ.)
17. Zaydes S.A. *Ostatochnyye napryazheniya i kachestvo kalibrovannogo metalla* [Residual stresses and quality of calibrated metal]. Irkutsk, Irkut. University Publ., 1992. 200 p.
18. Vishnyakov Y.D., Piskarev V.D. *Upravleniye ostatochnymi napryazheniyami v metallakh i splavakh* [Control of residual stresses in metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1989. 254 p.
19. Kharitonov B.A., Radionova L.V. *Proyektirovaniye resursosberegayushchikh tekhnologiy proizvodstva vysokoprochnoy uglerodistoy provoloki na osnove modelirovaniya* [Designing resource-saving technologies for the production of high-strength carbon wire based on modeling]. Magnitogorsk, MSTU Publ., 2008. 171 p.
20. Baron A.A., Gavlich D.S., Bahracheva Yu.S. [Specific energy of plastic deformation as a measure of crack resistance of structural materials]. *Metals*, 2003, no. 6, pp. 85–90. (in Russ.)
21. Kharitonov V.A., Radionova L.V., Safonov E.V. [Method for the production of high-strength wire with increased plastic properties of carbon steel]. *Modeling and development of metal forming processes: interuniversity proceedings*. Magnitogorsk, MSTU Publ., 2002, pp. 41–45. (in Russ.)
22. Radionova L.V., Kharitonov V.A., Zyuzin V.I., Rol'shchikov L.D. New technological lubricants for steel wire drawing. *Steel in Translation*, 2001, no. 12, pp. 49–50.
23. Kharitonov V.A., Zyuzin V.I., Radionova L.V., Rol'shchikov L.D. [New technological lubricants and power parameters for drawing steel wire]. *Bulletin "Ferrous metallurgy"*, 2001, no. 10, pp. 38–39. (in Russ.)
24. Muskalski Z., Wiewiórowska S. The theoretical analysis of wire drawing process or hydrodynamic friction conditions. *Metallurgical and Mining Industry*, 2011, vol. 3, no. 7, pp. 74–78.

Received 11 January 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Энергетическая теория обработки металлов давлением как основа метода расчета ресурсосберегающих маршрутов волочения проволоки / Л.В. Радионова, Р.А. Лисовский, А.В. Брык, В.Д. Лезин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 68–79. DOI: 10.14529/met200108

FOR CITATION

Radionova L.V., Lisovskiy R.A., Bryk A.V., Lezin V.D. Energetical Theory of Metal Processing as the Basis of the Calculating Resource-Saving Sequences Method of Wire-Drawing. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 68–79. (in Russ.) DOI: 10.14529/met200108