

РАСЧЕТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГОСИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ ПРОВОЛОКИ В МОНОЛИТНЫХ ВОЛОКАХ

Л.В. Радионова¹, radionovalv@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9587-2925>

Д.В. Громов¹, gromov111999@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6036-3784>

Р.А. Лисовский², lisovskiiira@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8857-2606>

С.Р. Фаизов², faizovsr@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6644-1173>

Л.А. Глебов², glebovla@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6484-1894>

В.А. Быков², bykovva@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1036-900X>

¹ Московский политехнический университет, Москва, Россия

² Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Энергосиловые параметры процесса волочения зависят от таких технологических факторов, как механические свойства обрабатываемого материала, склонность его к упрочнению при холодной деформации, единичная степень деформации, коэффициент трения на контакте «металл – волокна», конструктивные параметры волокна, скорость волочения. От точности определения энергосиловых параметров зависит стабильность (безобрывность) процесса, эффективная и безаварийная загруженность волочильной машины, обоснованность выбора волочильного оборудования при проектировании производственных линий. В настоящей статье разработана методика расчета энергосиловых параметров процесса волочения в монолитных волокнах на прямоточных волочильных машинах. Предложенная методика расчета усилия волочения проволоки позволяет учитывать упрочнение при холодной пластической деформации обрабатываемого сплава, параметры очага деформации при монолитном волочении, а именно степень деформации, рабочий полуугол волокна, трение на контакте «металл – волокна». Определение скорости волочения осуществляется из особенностей процесса волочения на машинах прямоточного типа, т. е. повышение скорости волочения от прохода к проходу осуществляется на величину коэффициента вытяжки в волокне. Мощность, потребляемая электродвигателями каждого тянущего барабана, определяется усилием волочения и линейной скоростью волочения в данном проходе. Экспериментальная проверка методики определения усилия волочения, проведенная на автоматизированном лабораторном волочильном стане, показала ее адекватность. Ошибка между расчетными и экспериментальными значениями усилия волочения не превышала 12 %, что допустимо при выполнении оценочных расчетов энергосиловых параметров процесса волочения проволоки. Предложенная методика расчета энергосиловых параметров процесса волочения проволоки в монолитных волокнах на станах прямоточного типа может быть полезна при анализе и корректировке действующих маршрутов волочения проволоки, оценке эффективности использования волочильных машин, при выборе и проектировании нового волочильного оборудования, разработке технологии изготовления проволоки.

Ключевые слова: волочение проволоки, монолитная волокна, прямоточный волочильный стан, усилие волочения, мощность

Для цитирования: Расчетное и экспериментальное определение энергосиловых параметров при волочении проволоки в монолитных волокнах / Л.В. Радионова, Д.В. Громов, Р.А. Лисовский и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2022. Т. 22, № 4. С. 81–93. DOI: 10.14529/met220409

ALCULATED AND EXPERIMENTAL DETERMINATION OF ENERGY-POWER PARAMETERS IN WIRE DRAWING IN MONOLITHIC DIES

L.V. Radionova¹, radionovalv@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9587-2925>

D.V. Gromov¹, gromov111999@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-6036-3784>

R.A. Lisovskiy², lisovskiiira@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8857-2606>

S.R. Faizov², faizovsr@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6644-1173>

L.A. Glebov², glebovla@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6484-1894>

V.A. Bykov², bykovva@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1036-900X>

¹ Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

² South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The energy and power parameters of the drawing process depend on such technological factors as the mechanical properties of the material being processed, its tendency to harden during cold deformation, a single degree of deformation, the friction coefficient at the “metal – die” contact, the design parameters of the die, and the drawing speed. The stability (non-break) of the process, the efficient and trouble-free workload of the drawing machine, and the validity of the choice of drawing equipment when designing production lines depend on the accuracy of determining the energy-power parameters. In this article, a method for calculating the energy-power parameters of the drawing process in monolithic dies on straight-line drawing machines has been developed. The proposed method for calculating the wire drawing force makes it possible to take into account hardening during cold plastic deformation of the alloy being processed, the parameters of the deformation zone during monolithic drawing, namely the degree of deformation, the working half-angle of the die, and the friction at the “metal – die” contact. The drawing speed is determined from the features of the drawing process on straight-line machines, i.e. the increase in the speed of drawing from pass to pass is carried out by the value of the drawing coefficient in the die. The power consumed by the electric motors of each pull drum is determined by the drawing force and the linear drawing speed in a given pass. Experimental verification of the method for determining the drawing force carried out on an automated laboratory drawing machine showed its adequacy. The error between the calculated and experimental values of the drawing force did not exceed 12%, which is acceptable when performing estimated calculations of the energy-power parameters of the wire drawing process. The proposed method for calculating the energy-power parameters of the wire drawing process in monolithic dies on straight-line machines can be useful in analyzing and correcting existing wire drawing routes, evaluating the efficiency of drawing machines, selecting and designing new drawing equipment, and developing wire manufacturing technology.

Keywords: wire drawing, monolithic die, straight-line drawing machine, drawing force, power

For citation: Radionova L.V., Gromov D.V., Lisovskiy R.A., Faizov S.R., Glebov L.A., Bykov V.A. Alculated and experimental determination of energy-power parameters in wire drawing in monolithic dies. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy.* 2022;22(4):81–93. (In Russ.) DOI: 10.14529/met220409

Введение

Проволоку можно получить различными процессами обработки металлов давлением, а именно прокаткой, прессованием и волочением или эффективным их сочетанием [1–6], однако наиболее массовым способом ее производства остается монолитное волочение [7–9]. Переход от применения волочильных машин (станов) магазинного типа к прямоточным привел к изменению технических и технологических параметров процесса волочения в монолитной волоке. Существенные изменения с внедрением прямоточных волочильных

машин связаны с повышением скорости волочения. Высокая степень автоматизации современного волочильного оборудования позволила повысить скорости волочения проволоки при сухом волочении с 8 до 40 м/с, что в свою очередь влечет за собой изменение требований к смазочным материалам, качеству подготовки поверхности заготовки, волочильного инструмента [10]. Прямоточный принцип высокоскоростного волочения проволоки вносит свои особенности и в методики построения маршрутов волочения, и оценку энергосиловых параметров процесса.

Энергосиловые параметры процесса волочения зависят от таких технологических факторов, как механические свойства обрабатываемого материала, склонность его к упрочнению при холодной деформации, единичная степень деформации, коэффициент трения на контакте «металл – волокна», конструктивные параметры волокна, скорость волочения [11–14]. От точности определения энергосиловых параметров зависит стабильность (безобрывность) процесса, эффективная и безаварийная загруженность волочильной машины, обоснованность выбора волочильного оборудования при проектировании производственных линий.

Для определения энергосиловых параметров процесса волочения может быть применено математическое моделирование [15–18], в том числе компьютерное в таких хорошо зарекомендовавших себя пакетах, как QForm, ABAQUS, DEFORM [19, 20]. Можно определить усилие волочения и мощность, потребляемую при волочении, экспериментально. Для этого необходимо установить тензометрические датчики на волочильный стан [21] и предусмотреть системой автоматизации фиксацию и последующую обработку электрических сигналов в показания усилия волочения и потребляемую электродвигателем мощность [22]. Компьютерное моделирование, как известно, – процесс, требующий высокой квалификации специалиста и очень длительный по времени. Обоснованность его применения очевидна при теоретических исследованиях процесса волочения [23]. Для практических и производственных задач, требующих быстрого отклика, он неприменим. Для таких целей эффективным инструментом является

традиционный оценочный метод расчета энергосиловых параметров, применяемый во многих базовых работах по волочению [24, 25]. В то же время нужно сказать, что расчетный метод определения энергосиловых параметров требует адаптации под современные условия прямоточного высокоскоростного волочения.

Целью настоящей работы является разработка методики расчета энергосиловых параметров процесса волочения в монолитных волокнах на прямоточных высокоскоростных машинах и оценка ее адекватности при проведении экспериментального волочения проволоки на лабораторном автоматизированном прямоточном волочильном стане.

Методика расчета энергосиловых параметров волочения проволоки на станах прямоточного типа

Под энергосиловыми параметрами процесса волочения принято понимать мощность и усилие волочения [26]. Мощность, расходуемая на процесс волочения, определяется усилием и скоростью волочения:

$$W_i = P_i \cdot V_i, \quad (1)$$

где V_i – скорость волочения на выходе из i -й волокна;

P_i – усилие волочения в i -й волокне.

Скорость волочения по проходам на современных прямоточных волочильных станах (рис. 1) зависит от коэффициента вытяжки и определяется как

$$V_i = V_{i-1} \cdot \mu_i, \quad (2)$$

где V_{i-1} – скорость волочения на входе в i -ю волоку;

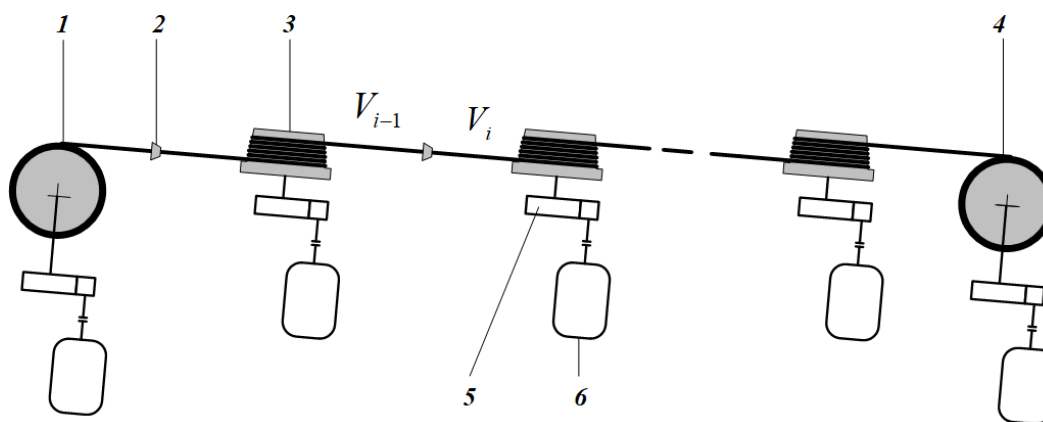


Рис. 1. Схема многократного прямоточного волочильного стана: 1 – барабан размоточного аппарата; 2 – волнока; 3 – барабан волочильного (тянущего) блока; 4 – барабан намоточного аппарата; 5 – редуктор; 6 – электродвигатель

Fig. 1. Scheme of a multiple direct-flow drawing bench: 1 – unwinding drum; 2 – portage; 3 – drum of a drawing (pulling) block; 4 – winder drum; 5 – gearbox; 6 – electric motor

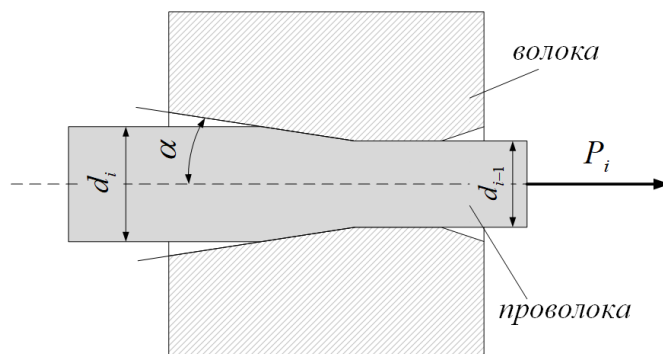


Рис. 2. Очаг деформации при монолитном волочении круглой проволоки
Fig. 2. Deformation zone during monolithic drawing of round wire

$$\mu_i = \frac{F_{i-1}}{F_i} = \frac{d_{i-1}^2}{d_i^2} - \text{коэффициент вытяжки в}$$

i -й волоке при волочении круглой проволоки (рис. 2);

F_{i-1} – площадь сечения проволоки на входе в i -ю волоку;

F_i – площадь сечения проволоки на выходе из i -й волоки;

d_{i-1} – диаметр проволоки на входе в i -ю волоку;

d_i – диаметр проволоки на выходе из i -й волоки.

В качестве показателя деформации в процессе волочения часто используют не только коэффициент вытяжки, но и степень деформации, которая определяется как

$$\varepsilon_i = \frac{F_{i-1} - F_i}{F_{i-1}} = \frac{d_{i-1}^2 - d_i^2}{d_{i-1}^2} \cdot 100\% \quad (3)$$

Величина единичной степени деформации может задаваться или выбирается при построении маршрута волочения из различных соображений [27]. Это может быть мощность приводов и кратность имеющегося волочильного стана [28], особенности обрабатываемой проволоки [29], качество подготовки поверхности проволоки перед волочением [30, 31] и др. Однако при выборе маршрута волочения необходимо помнить о неравномерности деформации по сечению проволоки в процессе волочения в монолитной волоке [32].

В работах [8, 14] показано, что для снижения неравномерности деформации степень деформации за проход необходимо согласовывать с рабочим углом волоки и коэффициентом трения:

$$\varepsilon_i \geq 1 - \left(\frac{1 - \arctg(\tg\alpha + f)}{1 + \arctg(\tg\alpha + f)} \right)^2 \quad (4)$$

Если рабочий полуугол волоки α задается конструктивно при изготовлении волоки и может составлять от 3 до 9°, то величина коэффициента трения f – сложно определяемая и непостоянная. Трение скольжения в процессе волочения определяется качеством подготовки поверхности проволоки и волоки, маркой сплава, подвергаемого волочению, типом применяемой технологической смазки, скоростью волочения. Определить коэффициент трения в промышленных условиях достаточно проблематично, однако в исследованиях [8, 31] экспериментально установлено, что его величина может принимать значения от 0,01 до 0,15.

Параметры очага деформации и механические свойства обрабатываемой проволоки определяют напряжение волочения, которое будет возникать при протягивании заготовки через волоку. Для определения напряжения волочения имеется несколько формул [15], однако только некоторые из них учитывают такой важный для энергосиловых параметров показатель, как угол волоки.

Для определения напряжения волочения, на наш взгляд, наиболее адекватной является формула Кёрбера и Эйхингера [8]

$$\sigma_{\text{вол}_i} = \sigma_{T_i} [(1 + \delta) \cdot \ln \mu_i + 0,77 \tg\alpha], \quad (5)$$

где σ_{T_i} – средний предел текучести металла в очаге деформации;

$\delta = f/\tg\alpha$ – средний коэффициент, учитывающий условия трения в очаге деформации.

В процессе волочения в результате холодной пластической деформации обрабатываемый сплав упрочняется [8, 33], т. е. временное сопротивление разрыву σ_B и предел текучести σ_T ($\sigma_{0,2}$) возрастают. Однако зависимо-

сти, по которым изменяются эти показатели, для каждого сплава индивидуальны. Также на изменение прочностных свойств в процессе волочения оказывают влияние и такие технологические параметры процесса, как скорость волочения, маршрут волочения, рабочий угол волокна [8]. Кривые упрочнения строятся по результатам экспериментальных исследований [33]. Аппроксимация этих кривых позволяет получить зависимости временного сопротивления разрыву σ_B и предела текучести σ_T ($\sigma_{0,2}$) от степени деформации (рис. 3).

В табл. 1 приведены зависимости упрочнения для некоторых сплавов, подвергаемых волочению.

Напряжение волочения является показателем, который не только определяет усилие и мощность волочения, но и позволяет оценить стабильность процесса, т. е. вероятность обрыва переднего тянущего конца проволоки при протягивании ее через сужающееся отверстие волокна.

Коэффициент запаса прочности γ оценивается соотношением временного сопротивления разрыву проволоки на выходе из i -й волокна σ_{B_i} к напряжению волочения, возникающему в ней:

$$\gamma_i = \frac{\sigma_{B_i}}{\sigma_{вол_i}}. \quad (6)$$

Коэффициент запаса прочности для безобрывного волочения должен быть не менее 1,5 [8].

Для определения усилия волочения необходимо знать напряжение волочения и площадь сечения проволоки на выходе из i -й волокна:

$$P_i = F_i \cdot \sigma_{вол_i}. \quad (7)$$

Результаты расчета энергосиловых параметров процесса волочения должны удовлетворять трем основным условиям:

$$\gamma_i \geq [\gamma_i]; P_i \leq [P_i]; W_i \leq [W_i],$$

где $[\gamma_i]$ – допустимый запас прочности для данного типоразмера проволоки;

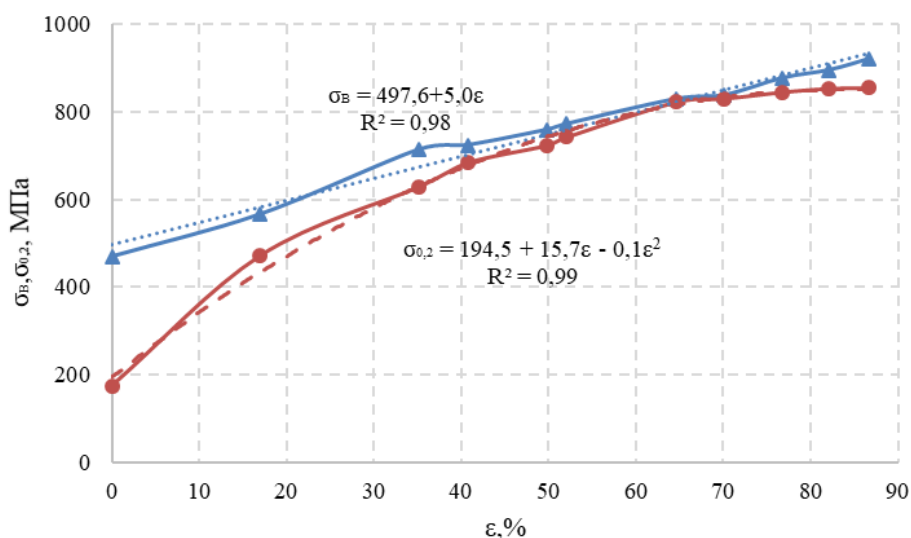


Рис. 3. Кривые упрочнения никеля марки НП2 при волочении
Fig. 3. Hardening curves for nickel grade NP2 during drawing

Зависимости упрочнения для некоторых сплавов

Hardening dependencies for some alloys

Таблица 1

Table 1

Марка сплава	$\sigma_B = f(\epsilon)$	$\sigma_{T(0,2)} = f(\epsilon)$
НП2 (никель)	$\sigma_B = 497,6 + 5,0\epsilon$	$\sigma_{0,2} = 194,5 + 15,7\epsilon - 0,1\epsilon^2$
СВА5 (алюминиевый сплав)	$\sigma_B = 92,36 + 0,53\epsilon$	$\sigma_{0,2} = 61,61 + 2,67\epsilon - 0,01\epsilon^2$
10 (сталь)	$\sigma_B = 322,27 + 8,35\epsilon - 0,05\epsilon^2$	$\sigma_{0,2} = 224,86 + 10,80\epsilon - 0,08\epsilon^2$
70 (сталь)	$\sigma_B = 1023,3 + 7,86\epsilon$	$\sigma_{0,2} = 661,81 + 10,71\epsilon$

Расчет режимов волочения для получения проволоки диаметром 1,80 мм
из заготовки диаметром 4,94 мм

Calculation of drawing modes for obtaining a wire with a diameter of 1.80 mm
from a billet with a diameter of 4.94 mm

Исходные данные							
Диаметр заготовки, мм	4,94						
Диаметр готовой проволоки, мм	1,80						
Временное сопротивление разрыву заготовки, МПа	469						
Предел текучести заготовки, МПа	174						
Результаты расчета							
Номер прохода	1	2	3	4	5	6	7
Маршрут волочения	4,30	3,70	3,20	2,80	2,40	2,10	1,80
Степень единичной деформации ε , %	24,23	25,96	25,20	23,44	26,53	23,44	26,53
Суммарная степень деформации $\varepsilon_{\text{сум}}$, %	24,23	43,90	58,04	67,87	76,40	81,93	86,72
Коэффициент вытяжки μ	1,32	1,35	1,34	1,31	1,36	1,31	1,36
Суммарная вытяжка $\mu_{\text{сум}}$	7,53						
Временное сопротивление разрыву σ_B , МПа	619	717	788	837	880	907	931
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	514	689	767	797	808	808	802
Полуугол волоки α , °	4	4	4	4	4	4	4
Полуугол волоки α , рад	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067	0,067
Коэффициент трения f	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Напряжение волочения $\sigma_{\text{вол}}$, МПа	188	354	415	413	483	426	484
Коэффициент запаса γ	3,3	2,0	1,9	2,0	1,8	2,1	1,9
Площадь сечения F , мм ²	14,51	10,75	8,04	6,15	4,52	3,46	2,54
Усилие волочения P , Н	2730	3802	3333	2541	2185	1476	1232
Скорость волочения V , м/мин	20	27	36	47	64	84	114
Мощность, потребляемая электродвигателями W , кВт	0,91	1,71	2,01	2,00	2,34	2,06	2,34

$[P_i]$ – допустимое усилие волочения по паспорту стана;

$[W_i]$ – мощность двигателей, установленных на стане.

Пример расчета энергосиловых параметров волочения проволоки диаметром 1,80 мм из никеля НП2, выполненный по представленной методике, приведен в табл. 2.

Экспериментальное определение энергосиловых параметров процесса волочения проволоки в монолитных волоках

Для проведения экспериментальных исследований процесса волочения проволоки был спроектирован и изготовлен [21] лабораторный автоматизированный трехкратный прямооточный стан с системой сбора данных (рис. 4). Трехкратное исполнение стана в пол-

ной мере отражает принципы многократного процесса волочения, так как есть возможность анализировать процессы на первом, последнем и промежуточном барабане.

На каждом волочильном блоке располагаются измеритель натяжения, мыльница с установленной в ней волокой и тянущий барабан диаметром 400 мм (рис. 5). Поскольку стан предназначен для проведения лабораторных научно-исследовательских работ, скорость волочения была ограничена величиной 1 м/с. Для привода тянущих барабанов используются мотор-редукторы, в состав каждого из которых входит асинхронный электродвигатель мощностью 2,2 кВт и редуктор с передаточным числом 25,23. Мыльница представляет собой отсек для технологической смазки, через который проволока поступает в волоку, которая устанавливается в волоко-

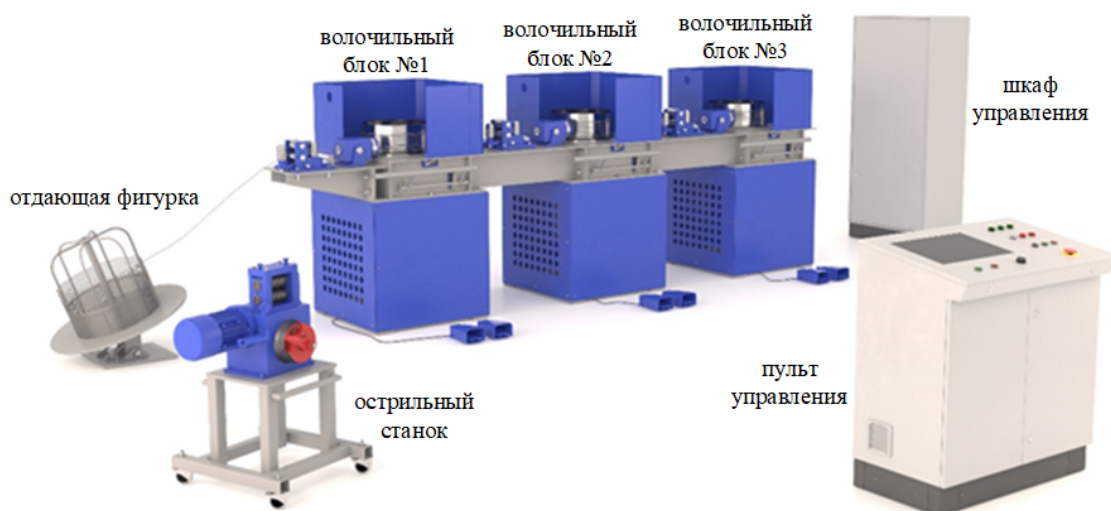


Рис. 4. Лабораторный автоматизированный волочильный стан
Fig. 4. Laboratory automated drawing machine

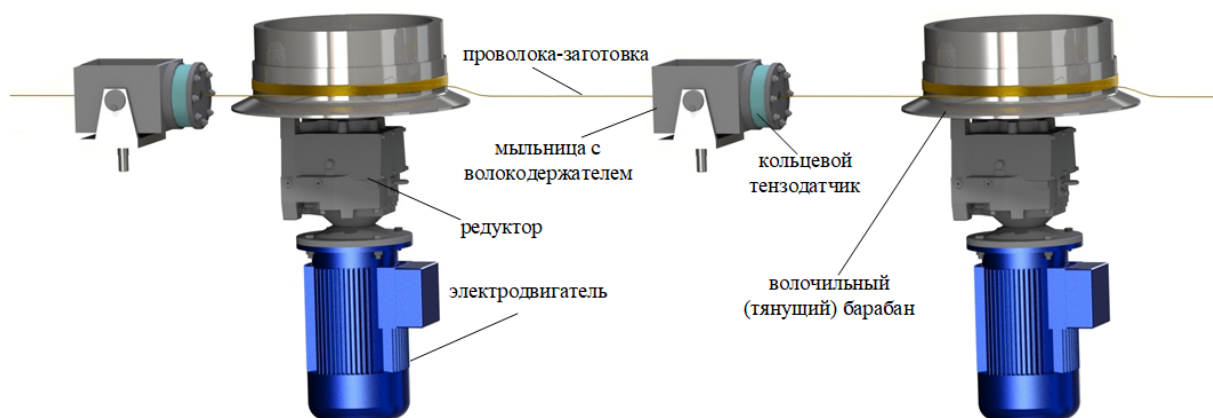


Рис. 5. Схема волочения проволоки на прямоточном лабораторном стане
Fig. 5. Scheme of wire drawing on a direct-flow laboratory mill

держатель. Волока в процессе волочения давит на кольцевой тензодатчик, что позволяет измерять усилие волочения. Предельное допустимое усилие для измерения – 9800 Н. Мельница сконструирована так, что может отклоняться по горизонтали вверх и вниз. Это позволяет проволоке на выходе из мельницы не изгибаться при наматывании на тянущий барабан.

Скорость вращения тянущего барабана регулируется оператором в ручном или автоматическом режиме с пульта управления с учетом показаний инкрементального энкодера, установленного на валу двигателя. На лицевой панели пульта располагается сенсорный монитор для отображения параметров процесса, а именно скорость волочения, усилие волочения и противонапряжения. Информация по измеряемым величинам представляется в табличном виде и в виде графиков. Помимо

экрана на пульте располагаются основные кнопки и рычаги управления, а также сигнальные лампы и лампы состояний. Стан предусматривает ручной (при котором скорость волочения во все моменты времени регулируется оператором) и автоматический режим волочения. Системой автоматизации предусмотрен заправочный режим, когда волочение осуществляется на пониженной скорости. Конструкцией стана предусмотрены элементы защиты и безопасности различного рода: металлические ограждения волочильных барабанов с контактными датчиками, рычаги аварийной остановки стана на каждом волочильном блоке, кнопка аварийного торможения на лицевой панели пульта управления. Техническая реализация системы управления станом включает в себя следующее оборудование: программируемый логический контроллер и векторный преобразователь частоты производ-

Таблица 3

Расчетные и экспериментальные усилия волочения проволоки из сплава НП2

Table 3

Calculated and experimental forces of drawing wire from alloy NP2

Диаметр проволоки, мм	Расчетное усилие волочения, Н	Экспериментальное усилие волочения, Н	Ошибка, %
2,40	2185	1918–2274	≤ 12
2,10	1476	1358–1536	≤ 8
1,80	1232	1182–1285	≤ 5

ства компании ОВЕН, кольцевые и S-образные тензодатчики, цифровые инкрементальные энкодеры.

Преобразователь частоты работает по алгоритму векторного управления и позволяет организовать систему подчиненного регулирования скорости асинхронного двигателя. Для осуществления обратной связи по контролируемой величине используется цифровой оптический энкодер, установленный на валу двигателя. Программируемый логический контроллер объединяет три двигателя с их системами управления по скорости и, учитывая все взаимовлияющие факторы, осуществляет управление по величине противонапряжения.

Контроль за технологическим процессом осуществляется посредством специализированного программного обеспечения [34].

Для проверки адекватности результатов расчетов усилия волочения по методике, приведенной выше, и сравнения их с измеренными тензодатчиками автоматизированной системой сбора данных, которой оснащен лабораторный волочильный стан, был проведен эксперимент. Волочение проволоки с измерением усилия волочения осуществлялось по маршруту

$2,80 \xrightarrow{26,53\%} 2,40 \xrightarrow{23,44\%} 2,10 \xrightarrow{26,53\%} 1,80$.

Расчетные и экспериментальные результаты представлены в табл. 3.

При определении усилия волочения экспериментально значения колеблются в определенном диапазоне. Объяснить это можно тем, что в процессе волочения изменяется коэффициент трения в зависимости от шероховатости поверхности проволоки-заготовки, захвата и поступления технологической смазки в волоку. Ошибка в 5–12 %, полученная при сравнении экспериментальных и расчетных значений усилия волочения, может считаться допустимой при выполнении оценоч-

ных расчетов энергосиловых параметров процесса волочения.

Заключение

Разработана методика расчета энергосиловых параметров процесса волочения в монолитных волоках на прямоточных волочильных машинах. Предложенная методика расчета усилия волочения проволоки позволяет учитывать упрочнение при холодной пластической деформации обрабатываемого сплава, параметры очага деформации при монолитном волочении, а именно степень деформации, рабочий полуугол волоки, трение на контакте «металл – волока». Определение скорости волочения осуществляется из особенностей процесса волочения на станах прямоточного типа, т. е. повышение скорости волочения от прохода к проходу осуществляется на величину коэффициента вытяжки в этом проходе. Мощность, потребляемая электродвигателями каждого тянущего барабана, определяется усилием волочения и линейной скоростью волочения в данном проходе. Экспериментальная проверка методики определения усилия волочения, проведенная на автоматизированном лабораторном волочильном стане, показала ее адекватность. Ошибка между расчетными и экспериментальными значениями усилия волочения не превышала 12 %, что допустимо при выполнении оценочных расчетов энергосиловых параметров процесса волочения проволоки.

Предложенная методика расчета энергосиловых параметров процесса волочения проволоки в монолитных волоках на станах прямоточного типа может быть полезна при анализе и корректировке действующих маршрутов волочения проволоки, оценке эффективности использования волочильных машин, при выборе и проектировании нового волочильного оборудования, разработке технологии изготовления проволоки.

Список литературы

1. Ресурсосбережение в метизном производстве: Теория и практика работы Белорецкого металлургического комбината: коллектив. моногр. / В. И. Зюзин, Н. А. Клековкина, В. А. Харитонов [и др.]. Магнитогорск: Магнитогор. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2001. 163 с. EDN SFHUGD
2. О возможности снижения мощности, расходуемой на процесс прокатки проволоки на совмещенном прокатно-волочильном стане / А.А. Радионов, Л.В. Радионова, В.А. Харитонов, О.С. Малахов // Электротехнические системы и комплексы. 2005. № 10. С. 63–70. EDN QYKFMR
3. On the direct extrusion of solder wire from 52In-48Sn alloy / S. Faizov, A. Sarafanov, I. Erdakov [et al.] // Machines. 2021. Vol. 9, no. 5. DOI: 10.3390/machines9050093. DN ORYYEP
4. Radionova L.V., Sarafanov A.E., Siverin O.O. Roller drawing of simple profiles from hard-to-form alloys // Materials Science Forum. 2022. Vol. 1052 MSF. P. 364–369. DOI: 10.4028/p-jpaol6. EDN ZSSVEY
5. Харитонов В.А., Таранин И.В. Холодная прокатка проволоки: история и направления развития. Магнитогорск: Магнитогор. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2018. 124 с. EDN YPAXXF
6. Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Совершенствование деформационных режимов волочения проволоки из углеродистых марок стали в монолитных и роликовых волокнах. Магнитогорск: Магнитогор. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2020. 133 с. EDN AFQGBT
7. Радионова Л.В., Радионов А.А. Современное состояние и перспективы развития волочильного производства стальной проволоки // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. Т. 1, № 1. С. 3–11. EDN RKPAED
8. Харитонов В.А., Радионова Л.В. Проектирование ресурсосберегающих технологий производства высокопрочной углеродистой проволоки на основе моделирования: моногр. Магнитогорск: МГТУ, 2008. 171 с. EDN QNCBVB
9. Даненко В.Ф. Проектирование маршрутов волочения стальной проволоки: учеб. пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Обработка металлов давлением». Волгоград: Политехник, 2006. 92 с. EDN QNBIFL
10. Радионова Л.В. Исследование влияния технологических параметров на скорость деформации при высокоскоростном волочении проволоки в монолитных волокнах // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2022. Т. 22, № 3. С. 66–75. DOI: 10.14529/met220306. EDN GRNHPV
11. Бровман Т.В. Разработка новых методов расчета энергосиловых параметров волочения и прессования // Механическое оборудование металлургических заводов. 2021. № 2 (17). С. 22–27. EDN VQURBD
12. Сметнева Н.Ю., Харитонов В.А. Анализ влияния технологических параметров на величину энергозатрат в процессе волочения и способы их определения в производственных условиях // Обработка сплошных и слоистых материалов. 2018. № 1 (47). С. 8–20. EDN YTGHNH
13. Бровман М.Я. Анализ точности формул для расчета энергосиловых параметров процесса волочения // Производство проката. 2013. № 9. С. 32–34. EDN RCFBNV
14. 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. EDN CERPLG
15. Сафонов Е.В. Повышение эффективности технологии производства высокоуглеродистой проволоки волочением на основе математического моделирования: специальность 05.16.05 «Обработка металлов давлением»: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Сафонов Евгений Владимирович. Магнитогорск, 2005. 15 с. EDN NIDIQB
16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617269 Российской Федерация. Цифровая модель волочения высокоуглеродистой проволоки. № 2022616657; заявл. 18.04.2022; опублик. 19.04.2022 / Р.Р. Дема, С.П. Нефедьев, С.А. Амирова [и др.]; заявитель Общество с ограниченной ответственностью «ЗСМ «ОКТАМИКС». EDN ORRGDF
17. Брюханов И.Ю., Олейник Д.Г., Головизнин С.М. Математическое моделирование волочения проволоки с различными значениями полуугла волюки // Приложение математики в экономических и технических исследованиях. 2019. № 1 (9). С. 83–89. EDN URUVUO

18. Березин И.М., Поляков А.П. Математическое моделирование процесса волочения прутков, полученных из титановой губки, с учетом порообразования // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 2016. № 4. С. 47–57. DOI: 10.17073/0021-3438-2016-4-47-57. EDN WJUIJL
19. Радионова Л.В., Иванов В.А., Шаталов В.С. Исследование влияния величины рабочего угла монолитной волоки на напряженно-деформированное состояние проволоки в очаге деформации // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2014. Т. 2, № 2. С. 21–25. EDN SFRHMP
20. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением: учеб. пособие / А.А. Богатов, Д.А. Павлов, М.В. Ерпалов [и др.]; под общ. ред. А.А. Богатова. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 248 с. EDN UUHNSC
21. Автоматизированный лабораторный волочильный стан / Л.В. Радионова, С.Р. Фаизов, Р.А. Лисовский, Т.А. Лисовская // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2017. Т. 5, № 2. С. 68–73. DOI: 10.24892/RIJE/20170211. EDN ZRNJCX
22. Определение энергосиловых параметров процессов обработки металлов давлением косвенным методом / А.А. Радионов, Д.Ю. Усатый, А.С. Карандаев, А.С. Сарваров. Деп. ВИНТИ. 20.04.2000. № 1085-B00. 10 с.
23. Компьютерное моделирование процесса волочения проволоки из перлитной стали с учетом микроструктурного строения / Д.В. Константинов, А.Г. Корчунов, О.П. Ширяев, М.В. Зайцева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2017. Т. 17, № 3. С. 106–114. DOI: 10.14529/met170313. EDN ZIZUDN
24. Красильников Л.А., Лысенко А.Г. Волочильщик проволоки: учеб. пособие. М.: Металлургия; 1987. 320 с.
25. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. 2-е изд. М.: Металлургия, 1971. 448 с.
26. Радионов А.А. Автоматизированный электропривод станков для производства стальной проволоки. Магнитогорск: Магнитогор. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2007. 311 с. EDN PVAPSZ
27. Радионова Л.В. Разработка технологии производства высокопрочной проволоки с повышенными пластическими свойствами из углеродистых сталей: специальность 05.16.05 «Обработка металлов давлением»: дис. ... канд. техн. наук / Радионова Людмила Владимировна. Магнитогорск, 2001. 137 с. EDN QDJKQP
28. Маминов Г.И., Головизнин С.М. Влияние кратности маршрута на вероятность разрушения и энергоэффективность волочения стальной проволоки // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2019. № 2 (29). С. 22–25. EDN ASNIBU
29. Усанов М.Ю. Совершенствование технологии изготовления углеродистой проволоки на основе повышения эффективности деформационных режимов волочения: специальность 05.16.05 «Обработка металлов давлением»: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Усанов Михаил Юрьевич. Магнитогорск, 2018. 16 с. EDN XZJBHQ
30. Голубчик Э.М., Гулин А.Е. Исследование формирования шероховатости в совмещенном процессе подготовки поверхности высокоуглеродистых заготовок перед сухим волочением // Сталь. 2020. № 5. С. 38–40. EDN ZZADKV
31. New technological lubricants for steel wire drawing / V.A. Kharitonov, V.I. Zyuzin, L.V. Radionova, L.D. Rol'shchikov // Stal. 2001. No. 12. P. 49–50. EDN MPJVSF
32. Даненко В.Ф., Гуревич Л.М., Новиков Р.Е. Роль масштабного фактора в формировании деформированного состояния деформационной зоны при волочении стальной проволоки // Черные металлы. 2019. № 2. С. 48–55. EDN VWCBSY
33. Radionova L.V., Lisovskiy R.A., Svistun A.S., Erdakov I.N. Change in mechanical properties during drawing of wire from Ni 99.6 // Materials Science Forum. 2022. Vol. 1052 MSF. P. 358–363. DOI: 10.4028/p-o90yv1. EDN JGQZMY
34. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020613452 Российская Федерация. Программа сбора и анализа данных процесса многократного волочения; № 2020612287; заявл. 21.02.2020; опубл. 16.03.2020 / Т.А. Лисовская. EDN ESQQKW

References

1. Zyuzin V.I., Klekovkina N.A., Kharitonov V.A. et al. *Resursosberezheniye v metiznom proizvodstve: Teoriya i praktika raboty Beloretskogo metallurgicheskogo kombinata: kollektiv. monogr.* [Resource saving in hardware production: Theory and practice of the Beloretsk metallurgical plant. Collective monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ.; 2001. 163 p. (In Russ.) EDN SFHUGD
2. Radionov A.A., Radionova L.V., Kharitonov V.A., Malakhov O.S. [On the possibility of reducing the power consumed for the process of rolling wire on a combined rolling and drawing mill]. *Elektrotehnicheskie sistemy i komplekсы*. 2005;(10):63–70. (In Russ.) EDN QYKFMР
3. Faizov S., Sarafanov A., Erdakov I. et al. On the direct extrusion of solder wire from 52In-48Sn alloy. *Machines*. 2021;9(5). DOI: 10.3390/machines9050093. DN ORYYEP
4. Radionova L.V., Sarafanov A.E., Siverin O.O. Roller drawing of simple profiles from hard-to-form alloys. *Materials Science Forum*. 2022;1052 MSF:364–369. DOI: 10.4028/p-jpaol6. EDN ZSSVEY
5. Kharitonov V.A., Taranin I.V. *Kholodnaya prokatka provoloki: istoriya i napravleniya razvitiya* [Cold rolling of wire: history and directions of development]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ.; 2018. 124 p. (In Russ.) EDN YPAXXF
6. Kharitonov V.A., Usanov M.Yu. *Sovershenstvovaniye deformatsionnykh rezhimov volocheniya provoloki iz uglerodistykh marok stali v monolitnykh i rolikovykh volokakh* [Improving the deformation modes of drawing wire from carbon steel grades in monolithic and roller dies]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ.; 2020. 133 p. (In Russ.) EDN AFQGBT
7. Radionova L.V., Radionov A.A. [Current state and prospects for the development of steel wire drawing production]. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*. 2013;1(1):3–11. (In Russ.) EDN RKPAED
8. Kharitonov V.A., Radionova L.V. *Proyektirovaniye resursosberegayushchikh tekhnologiy proizvodstva vysokoprochnoy uglerodistoy provoloki na osnove modelirovaniya: monogr.* [Design of resource-saving technologies for the production of high-strength carbon wire based on modeling: monograph.]. Magnitogorsk: MSTU Publ.; 2008. 171 p. (In Russ.) EDN QNCBVB
9. Danenko V.F. *Proyektirovaniye marshrutov volocheniya stal'noy provoloki: ucheb. posobiye* [Design of steel wire drawing routes: a textbook]. Volgograd: Polytechnic Publ.; 2006. 92 p. (In Russ.) EDN QNBIFL
10. Radionova L.V. A study of the impact of technological parameters on deformation speed at high speed wire drawing in monolith wires. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2022;22(3): 66–75. (In Russ.) DOI: 10.14529/met220306. EDN GRNHPV
11. Brovman T.V. [Development of new methods for calculating the energy-power parameters of drawing and pressing]. *Mechanical equipment of metallurgical plants*. 2021;2(17);22–27. (In Russ.) EDN VQURBD
12. Smetneva N.Yu., Kharitonov V.A. [Analysis of the influence of technological parameters on the amount of energy consumption in the process of drawing and methods for their determination in production conditions]. *Processing of continuous and layered materials*. 2018;1(47):8–20. (In Russ.) EDN YTGHH
13. Brovman, M. Ya. [Analysis of the accuracy of formulas for calculating the energy-power parameters of the drawing process]. *Production of rolled products*. 2013;(9):32–34. (In Russ.) EDN RCFBNV
14. 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;20(1):68–79. (In Russ.) DOI: 10.14529/met200108. EDN CERPLG
15. Safonov E.V. *Povysheniye effektivnosti tekhnologii proizvodstva vysokouglerodistoy provoloki volocheniym na osnove matematicheskogo modelirovaniya: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Improving the efficiency of high-carbon wire production technology by drawing on the basis of mathematical modeling. Abstract of cand. diss.]. Magnitogorsk; 2005. 15 p. (In Russ.) EDN NIDIQB
16. Dema R.R., Nefedyev S.P., Amirova S.A. et al. *Tsifrovaya model' volocheniya vysokouglerodistoy provoloki* [High-carbon wire drawing digital model]. Certificate of state registration of the computer program No. 2022617269 Russian Federation, 2022. (In Russ.) EDN ORRGDF

17. Bryukhanov I.Yu., Oleinik D.G., Goloviznin S.M. [Mathematical modeling of wire drawing with different values of the semi-angle of the die]. *Application of mathematics in economic and technical research*. 2019;1(9):83–89. (In Russ.) EDN URUVUO
18. Berezin I.M., Polyakov A.P. [Mathematical modeling of the process of drawing rods obtained from titanium sponge, taking into account pore formation]. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy*. 2016;(4):47–57. (In Russ.) DOI: 10.17073/0021-3438-2016-4-47-57. EDN WJUIJL
19. Radionova L.V., Ivanov V.A., Shatalov V.S. [Study of the influence of the working angle of a monolithic wire on the stress-strain state of the wire in the deformation zone]. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*. 2014;2(2):21–25. (In Russ.) EDN SFRHMP
20. Bogatov A.A., Pavlov D.A., Erpalov M.V. et al. *Komp'yuternoye modelirovaniye protsessov obrabotki metallov davleniyem: ucheb. posobiye* [Computer modeling of metal forming processes: textbook]. Ekaterinburg: Ural University Press; 2018. 248 p. (In Russ.) EDN UUHNSC
21. Radionova L.V., Faizov S.R., Lisovsky R.A., Lisovskaya T.A. [Automated laboratory drawing bench]. *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*. 2017;5(2):68–73. (In Russ.) DOI: 10.24892/RIJIE/20170211. EDN ZRNJCX
22. Radionov A.A., Usatyy D.Yu., Karandayev A.S., Sarvarov A.S. *Opredeleniye energosilovykh parametrov protsessov obrabotki metallov davleniyem kosvennym metodom* [Determination of energy-power parameters of metal processing processes by pressure by an indirect method]. Dep. VINITI. 20.04.2000. No. 1085-B00. 10 p. (In Russ.)
23. Konstantinov D.V., Korchunov A.G., Shiryaev O.P., Zaytseva M.V. Microstructure-Based Computer Simulation of Pearlitic Steel Wire Drawing. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2017;17(3):106–114. (In Russ.) DOI: 10.14529/met170313. EDN ZIZUDN
24. Krasilnikov L.A., Lysenko A.G. *Volochil'shchik provoloki: ucheb. posobiye* [Wire drawer: textbook]. Moscow: Metallurgiya Publ.; 1987. 320 p. (In Russ.)
25. Perlin I.L., Ermanok M.Z. *Teoriya volocheniya* [Theory of drawing]. 2nd ed. Moscow: Metallurgiya Publ.; 1971. 448 p. (In Russ.)
26. Radionov A.A. *Avtomatizirovannyi elektroprivod stanov dlya proizvodstva stal'noy provoloki* [Automated electric drive of mills for the production of steel wire]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University; 2007. 311 p. (In Russ.) EDN PVAPSZ
27. Radionova L.V. *Razrabotka tekhnologii proizvodstva vysokoprochnoy provoloki s povyshennymi plasticheskimi svoystvami iz uglerodistykh staley: dis. kand. tekhn. nauk* [Development of technology for the production of high-strength wire with increased plastic properties from carbon steels. Cand. sci. diss.]. Magnitogorsk; 2001. 137 p. (In Russ.) EDN QDJKQP
28. Maminov G.I., Goloviznin S.M. [Influence of the multiplicity of the route on the probability of destruction and energy efficiency of steel wire drawing]. *Modelirovaniye i razvitie protsessov obrabotki metallov davleniyem*. 2019;2(29):22–25. (In Russ.) EDN ASNIBU
29. Usanov M.Yu. *Sovershenstvovaniye tekhnologii izgotovleniya uglerodistoy provoloki na osnove povysheniya effektivnosti deformatsionnykh rezhimov volocheniya: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Improving the technology of manufacturing carbon wire on the basis of increasing the efficiency of deformation modes of drawing. Abstract of cand. diss.]. Magnitogorsk; 2018. 16 p. (In Russ.) EDN XZJBHQ
30. Golubchik E.M., Gulin A.E. [Study of roughness formation in the combined process of preparing the surface of high-carbon blanks before dry drawing]. *Steel*. 2020;(5):38–40. (In Russ.) EDN ZZADKV
31. Kharitonov V.A., Zyuzin V.I., Radionova L.V., Rol'shchikov L.D. [New technological lubricants for steel wire drawing]. *Stal*. 2001;(12):49–50. EDN MPJVCF
32. Danenko V.F., Gurevich L.M., Novikov R.E. [The role of the scale factor in the formation of the deformed state of the deformation zone during steel wire drawing]. *Stahl und Eisen*. 2019;(2):48–55. (In Russ.) EDN VWCBSY
33. Radionova L.V., Lisovskiy R.A., Svistun A.S., Erdakov I.N. Change in mechanical properties during drawing of wire from Ni 99.6. *Materials Science Forum*. 2022;1052 MSF:358–363. DOI: 10.4028/p-o90yv1. EDN JGQZMY
34. Lisovskaya T.A. *Programma sbora i analiza dannykh protsessa mnogokratnogo volocheniya* [Data collection and analysis program for the multiple drawing process]. Certificate of state registration of the computer program No. 2020613452 Russian Federation, 2020.

Информация об авторах

Радионова Людмила Владимировна, канд. техн. наук, доц. кафедры металлургии, Московский политехнический университет, Москва, Россия; radionovalv@rambler.ru.

Громов Дмитрий Владимирович, аспирант кафедры металлургии, Московский политехнический университет, Москва, Россия; gromov111999@gmail.com.

Лисовский Роман Андреевич, научный сотрудник кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, lisovskiiira@susu.ru.

Фаизов Сергей Радиевич, аспирант, преподаватель кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, faizovsr@susu.ru.

Глебов Лев Александрович, аспирант, преподаватель кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, glebovla@susu.ru.

Быков Виталий Алексеевич, аспирант, преподаватель кафедры процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, bykovva@susu.ru.

Information about the authors

Lyudmila V. Radionova, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof. of the Department of Metallurgy, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia; radionovalv@rambler.ru.

Dmitry V. Gromov, Postgraduate Student of the Department of Metallurgy, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia; gromov111999@gmail.com.

Roman A. Lisovskiy, Researcher of the Department of Processes and Machines for Metal Forming, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; lisovskiiira@susu.ru.

Sergey R. Faizov, Postgraduate Student of the Department of Processes and Machines for Metal Forming, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; faizovsr@susu.ru.

Lev A. Glebov, Postgraduate Student of the Department of Processes and Machines for Metal Forming, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; glebovla@susu.ru.

Vitaly A. Bykov, Postgraduate Student of the Department of Processes and Machines for Metal Forming, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; bykovva@susu.ru.

Статья поступила в редакцию 30.10.2022

The article was submitted 30.10.2022