



Оригинальная статья

УДК 621.778.073

DOI 10.17073/0368-0797-2022-9-609-614

<https://fermet.misis.ru/jour/article/view/2392>



ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА МОКРОГО ВОЛОЧЕНИЯ ПО КРИТЕРИЮ ЗАПАСА ПРОЧНОСТИ

С. М. Головизнин, И. М. Петров, А. Б. Иванцов

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (Россия, 455000, Челябинская обл., Магнитогорск, пр. Ленина, 38)

Аннотация. Статья является продолжением предшествующих работ авторов в рамках исследования мокрого волочения. Рассмотрен процесс мокрого тончайшего и нанотончайшего волочения стальной латунированной проволоки с целью повышения износостойкости волок. Произведен анализ различного типа волочильного инструмента (твердосплавные волокни, синтетические алмазные волокни, волокни из натуральных алмазов) на предмет актуальности его применения для волочения проволоки малых диаметров. Дана классификация составляющих эксплуатационной стойкости волочильного инструмента. Приведено описание методики исследования, включающее порядок и условия проведения замеров, применявшееся для получения исходных данных промышленное оборудование, а также тип волочильного стана. В работе проведен сравнительный анализ полученных данных с результатами исследований других авторов, полученных для аналогичного волочильного инструмента. Рассчитаны основные характеристики распределения износостойкости (асимметрия, эксцесс, коэффициент вариации). На основе статистического анализа массива экспериментальных данных для выборки объемом более 500 образцов выявлена высокая корреляция износостойкости волок с критерием коэффициента запаса прочности и слабая корреляция с критериями усилия и напряжения волочения. Показано, что оптимальные, т. е. наиболее высокие и стабильные результаты по износостойкости волочильного инструмента достигаются при значениях коэффициента запаса прочности в диапазоне от 1,9 до 2,5. Предложена формула определения значения коэффициента запаса прочности в зависимости от диаметра проволоки, обеспечивающая максимальные значения износостойкости инструмента по маршруту волочения. Полученные результаты рекомендуются к применению при проектировании новых маршрутов мокрого волочения с применением синтетических алмазных волок.

Ключевые слова: коэффициент запаса прочности, синтетические алмазные волокни, износостойкость волок, мокрое волочение, стальная латунированная проволока, усилие волочения, статистический анализ

Для цитирования: Головизнин С.М., Петров И.М., Иванцов А.Б. Оптимизация процесса мокрого волочения по критерию запаса прочности // Известия вузов. Черная металлургия. 2022. Т. 65. № 9. С. 609–614. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-9-609-614>

Original article

OPTIMIZATION OF WET DRAWING ACCORDING TO THE RATIO OF BREAKING STRESS TO DRAW STRESS

S. M. Goloviznin, I. M. Petrov, A. B. Ivantsov

Nosov Magnitogorsk State Technical University (38 Lenina Ave., Magnitogorsk, Chelyabinsk Region 455000, Russian Federation)

Abstract. The paper continues the previous authors' works in the field of wet wire drawing. The process of wet fine brass-plated steel wire drawing is considered. The subject of the paper is increase of the wire die wearability. The analysis of various wire drawing tools (hard alloy dies, synthetic diamond dies, natural diamond dies) was carried out for the relevance of its application for small diameter wire drawing. The authors studied the wire die wearability. The research methodology is presented, which include the procedure and conditions for measurements, industrial equipment and type of wire drawing machine. In the paper, the comparative analysis of the experimental data with the results of other authors for similar wire drawing tool was carried out. The authors calculated the main characteristics of the wire die wearability distribution (asymmetry, kurtosis, coefficient of variation). A statistical analysis of the array of experimental data for selection of more than 500 samples was performed. A high correlation of the drawing die wearability with the ratio of breaking stress to draw stress and a weak correlation with the drawing force and stress were revealed. The highest and most stable die life results are achieved when ratio of breaking stress to draw stress has values of 1.9 – 2.5. A formula was proposed for determining the optimal value of the ratio of breaking stress to draw stress, depending on the wire diameter. The formula allows one to determine the maximum die wearability values, depending on the wire drawing schedule. The work results can be used when designing new wet wire drawing schedules using synthetic diamond dies.

Keywords: ratio of breaking stress to draw stress, synthetic diamond wire drawing dies, die wearability, wet wire drawing, brass-plated steel wire, drawing force, statistical analysis

For citation: Goloviznin S.M., Petrov I.M., Ivantsov A.B. Optimization of wet drawing according to the ratio of breaking stress to draw stress. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2022, vol. 65, no. 9, pp. 609–614. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-9-609-614>

ВВЕДЕНИЕ

Стойкость волочильного инструмента является фактором, во многом определяющим производительность волочильных машин и затраты на производство проволоки. Стойкость монолитных волок при волочении стальной проволоки зависит от материала волокни и используемых смазок [1]. При волочении применяются твердосплавные и алмазные монолитные волокни. Твердосплавные волокни дешевле и проще в эксплуатации; алмазные волокни дороже, но обладают большей износостойкостью. При волочении стальной проволоки применяются волокни как из поликристаллических синтетических алмазов, так и из натуральных алмазов. Волокни из искусственных алмазов дешевле, но обладают меньшей износостойкостью. К преимуществам волок из искусственных поликристаллических алмазов можно отнести более равномерный износ поверхности, к недостаткам – некоторое снижение качества поверхности по сравнению с волокнами из натуральных алмазов [2, 3].

Рубеж тончайшего (диаметр проволоки 0,2 – 0,4 мм по ГОСТ 2333-80) и наитончайшего (0,1 – 0,2 мм) волочения определяет возможность использования сухого (более 0,4 мм) и мокрого волочения, а также эффективность применения твердосплавных волок (более 0,1 мм), волок из природных алмазов (целесообразно использовать при диаметре проволоки менее 0,2 мм, поскольку для данных диаметров они имеют сопоставимую с синтетическими износостойкость и обеспечивают лучшее качество поверхности) и синтетических алмазов. В данном диапазоне диаметров принципиальный выбор вида волочения и используемого инструмента определится даже незначительным превышением его эффективности над другими, что может быть достигнуто за счет выбора оптимального значения параметров технологического процесса.

Эксплуатационная стойкость, как критерий выхода волок из строя по любым причинам, является ключевым показателем экономической эффективности работы волочильного инструмента [4] и определяется количеством проволоки, протянутой до выхода волокни из строя. В работе рассмотрена износостойкость, являющаяся базовой составляющей эксплуатационной стойкости и определяемая как количество проволоки, протянутой до выхода диаметра калибрующей зоны волокни из поля допуска.

Метод исследования

Данная работа продолжает анализ результатов исследований, опубликованных авторами ранее [5 – 7], и основана на обработке массива экспериментальных данных испытаний более 500 образцов поликристаллических синтетических алмазных волок (тип Т по ГОСТ 6271-90) на предмет эксплуатационной стой-

кости и ее составляющих. Полученные для анализа параметры:

- усилие вытяжки (затяжка на разрывной машине, аналогичная по величине обжатия на маршруте);
- фактическое разрывное усилие (там же);
- масса протянутой проволоки до выхода волокни из строя (килограммы, с последующим переводом в длину протянутой проволоки, при принятом значении плотности стали 7820 кг/м³).

Мокрое волочение стальной латунированной проволоки производилось до диаметров 0,180 мм ($\sigma_b = 2350 - 2940$ Н/мм²) и 0,265 мм ($\sigma_b = 2350 - 2840$ Н/мм²), согласно ГОСТ 14311-85, с допуском по диаметру $\pm 0,01$ мм.

В качестве заготовки применялась патентованная проволока из стали 70 диаметрами 1,00 и 1,05 мм. Латунирование производилось перед волочильным переделом. Волочение латунированной проволоки осуществлялось на 21-кратном стане, не имеющем обводных барабанов, предназначенном для волочения стальной проволоки диаметром 0,15, 0,18, 0,22 и 0,27 мм со скоростью 6,6 м/с с использованием эмульсии из смазки «Олон-технический». Вытяжка, начиная со второго прохода, для всех волок составляла $\sim 1,18$.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно первичной обработке экспериментальных данных, выявлены следующие составляющие эксплуатационной стойкости (классификация по И.А. Юхвецу):

- износостойкость (90,7 % массива данных, определялась как выход за заданную величину размера канала волокни);
- стойкость до разрушения (7,2 % массива данных, определялась как невозможность продолжения эксплуатации, где две трети приходились на обрывы, остальные на затяжки и др.);
- стойкость до налипания (2,1 % массива данных, в основном причинами являлись высветленные участки от задиров).

На рис. 1 показано фактическое распределение износостойкости для каждого диаметра рассматриваемых маршрутов от минимального до максимального значения – границы диапазонов от наименьшего до наибольшего значения износостойкости из исходного массива данных для каждого диаметра анализируемых маршрутов. Из массива были исключены значения, соответствующие стойкости до разрушения, а также значения износостойкости, признанные выбросами при проверке по критерию Романовского с доверительной вероятностью 95 %. Линия 5 на рис. 1 является линией тренда для объединенного массива данных, построенная по средним значениям износостойкости двух маршрутов.

Наблюдаемое изменение износостойкости по рассматриваемым маршрутам волочения, с ее ростом

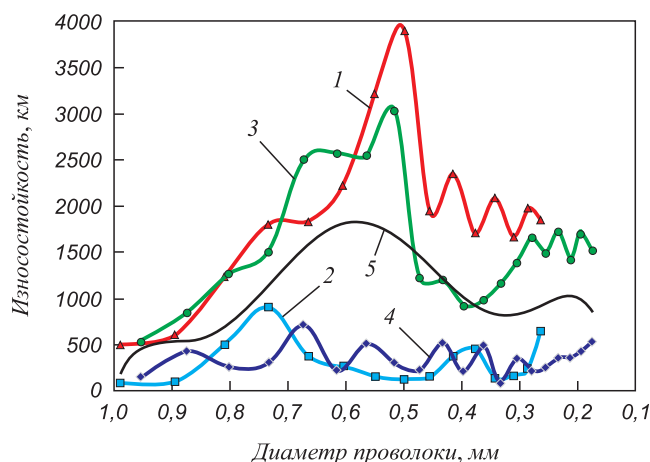


Рис. 1. Максимальная и минимальная износостойкость волок по диаметрам:

1 и 2 – маршрут 1,050 – 0,265 мм, максимальная и минимальная износостойкость соответственно; 3 и 4 – маршрут 1,000 – 0,176 мм, максимальная и минимальная износостойкость соответственно; 5 – полиномиальная линия тренда средних значений износостойкости обоих маршрутов

Fig. 1. Maximum and minimum wearability of dies by diameters: 1 and 2 – wire drawing schedule 1.050 – 0.265 mm, maximum and minimum wearability, respectively; 3 and 4 – wire drawing schedule 1.000 – 0.176 mm, maximum and minimum die wearability, respectively; 5 – polynomial trend line of average values of die wearability for both wire drawing schedules

в начале маршрута и последующим резким снижением и стагнацией, вызвано действием ряда противоположно влияющих факторов [3, 8 – 11]. Увеличение давления смазки на входе в волоку с ростом скорости волочения приводит к улучшению условий смазки и снижению коэффициента трения и износа волок. Упрочнение проволоки, рост ее температуры и уменьшение количества захватываемой проволокой смазки с увеличением скорости проволоки ухудшают условия трения и приводят к снижению износостойкости волок [12 – 14].

Так, с ростом скорости волочения в первой половине маршрута увеличивается давление смазки на входе в волоку, что приводит к улучшению условий смазки, снижению неравномерности деформации [15] и, в конечном итоге, снижению коэффициента трения и износа волок с достижением максимальной износостойкости для диаметров 0,50 – 0,55. Далее в ходе процесса волочения уменьшается количество захватываемой проволокой смазки, что ухудшает условия трения во второй половине маршрута [16, 17]. Упрочнение проволоки и рост ее температуры [12 – 14] по маршруту волочения также приводит к снижению износостойкости волок.

В итоге, наблюдаемая тенденция роста износостойкости в начале маршрута волочения вызвана преобладанием фактора увеличения давления смазки на входе в волоку с ростом скорости волочения. В конце маршрута, с увеличением температуры, скорости во-

лочения и наклепа, преобладают факторы уменьшения вязкости смазки, снижения количества захватываемой смазки и роста наклепа проволоки [8].

Для объединенного массива значений износостойкости по рассматриваемым маршрутам характерны высокие показатели положительной асимметрии $As = 1,05$ и коэффициента эксцесса $Ex = 0,71$. Рассчитанные значения коэффициента вариации для показателей износостойкости по каждому диаметру рассматриваемых маршрутов свидетельствуют о неоднородности части анализируемых данных: для маршрута 0,176 мм коэффициент вариации находится в пределах 19,14 – 53,76 %, для маршрута 0,265 мм – 22,81 – 76,17 %. Данные показатели указывают на значительный потенциал повышения износостойкости при оптимизации условий волочения.

Также произведено сравнение максимальной стойкости (рис. 2) соответствующих участков анализируемых маршрутов (см. рис. 1, линии 1 и 3) с известными маршрутами для синтетических алмазных волок типа Т по ГОСТ 6271-90 и волок из природных алмазов на больших массивах выборки (более 130 тыс. и более 12 тыс. образцов соответственно) [4]. В маршрутах, приведенных из работы [4], остальная часть волок не представлена, так как волочение производилось на твердосплавных волоках.

Стоит указать на характерное монотонное снижение стойкости для всех рассматриваемых маршрутов. Имеющиеся различия в значениях стойкости для близ-

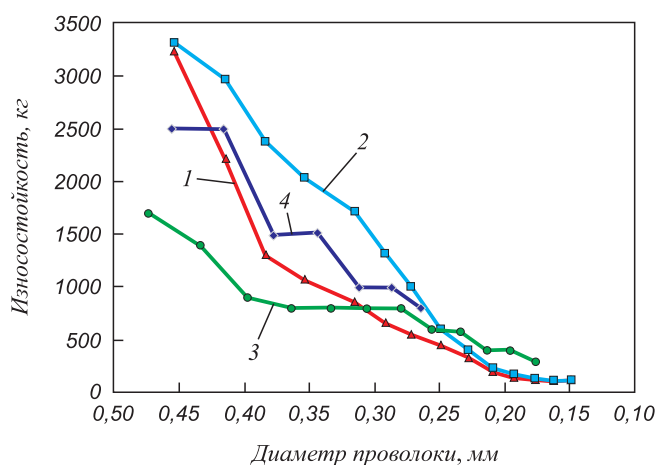


Рис. 2. Сравнение стойкости анализируемых волок с известными данными:

1 – стойкость природных алмазов [4]; 2 – стойкость поликристаллических синтетических алмазов [4]; 3 – маршрут 1,000 – 0,176 мм, максимальная стойкость (см. рис. 1, линия 3); 4 – маршрут 1,050 – 0,265 мм, максимальная стойкость (см. рис. 1, линия 1)

Fig. 2. Comparison of wearability of the analyzed dies with published data:

1 – wearability of natural diamonds according to [4]; 2 – wearability of polycrystalline synthetic diamonds according to [4]; 3 – schedule 1.000 – 0.176 mm, maximum wearability (Fig. 1, line 3); 4 – schedule 1.050 – 0.265 mm, maximum wearability (Fig. 1, line 1)

ких диаметров (см. рис. 1, кривые 2 и 3) можно объяснить особенностями построения маршрутов.

Использование усилия вытяжки или напряжения вытяжки в качестве параметра для оптимизации по результатам корреляционного анализа их взаимосвязи с износостойкостью было признано неэффективным. Значения коэффициентов корреляции составили 0,12 и 0,22 для усилия вытяжки и напряжения вытяжки соответственно, что говорит о слабой корреляции согласно шкале Чеддока.

В связи с этим, авторами была предпринята попытка поиска иного критерия, характеризующего изменение износостойкости волок при мокром волочении. Как наиболее эффективный был выявлен критерий коэффициента запаса прочности γ , являющийся отношением временного сопротивления к усилию волочения. Поскольку в числителе приводится временное сопротивление проволоки, это позволяет учитывать наклеп по маршруту.

Определение зависимости износостойкости от коэффициента запаса прочности производилось для объединенного массива с исключением значений, признанных выбросами по критерию Романовского (рис. 3). Рост износостойкости идет пропорционально повышению коэффициента запаса прочности, с достижением максимума для диапазона значений $\gamma = 1,9 - 2,5$. Дальнейший рост коэффициента запаса прочности критически ухудшает величину износостойкости до порядка 10^6 м для обоих маршрутов (10,2 % значений с $\gamma > 2,5$). Это преимущественно можно объяснить ростом растягивающих напряжений при малых обжатиях [18], снижающих ресурс волоки и способствующий ее расколу.

Также на рис. 3 затемнениями выделены три нижние границы области, которые, согласно работе [1], наиболее эффективны:

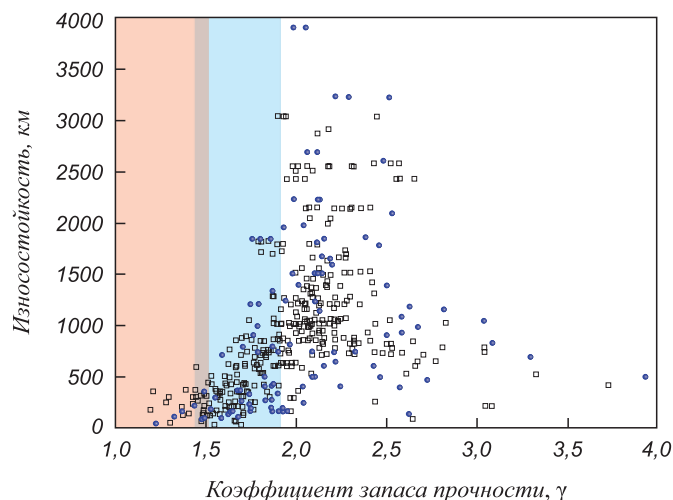


Рис. 3. Зависимость износостойкости от коэффициента запаса прочности для обоих маршрутов

Fig. 3. Dependence of wearability on the ratio of breaking stress to draw stress for both wire drawing schedules

- для диаметров проволоки более 1,0 мм – $\gamma > 1,4$;
- для диаметров 1,0 – 0,4 мм – $\gamma > 1,5$;
- для диаметров 0,4 – 0,1 мм – $\gamma > 1,8$.

Это в целом согласуется с приведенной рекомендацией $\gamma > 1,9$ для охвата диаметров 0,176 – 1,000 мм. Для маршрута 0,176 мм 33 % диаметров относились к диаметрам менее 0,4 мм, что соответствовало $\gamma > 1,8$, для маршрута 0,270 мм – соответственно 20 %. Таким образом, подавляющая часть данных (см. рис. 3) соответствует критерию Перлина $\gamma > 1,5$.

Из массива данных получена кривая (рис. 4) соответствия максимальной износостойкости, в 2 – 3 раза выше среднего, что обеспечивает эффективность использования синтетических поликристаллических алмазных волок и определяет принципиальный выбор типа волок в данном диапазоне диаметров обрабатываемой проволоки.

Формализация приведенных выше рекомендаций методом регрессионного анализа позволила получить следующее уравнение, характеризующее зависимость между диаметром проволоки по маршруту волочения и коэффициентом запаса прочности:

$$\gamma = -3,6275d^3 + 6,755d^2 - 4,2368d + 2,9051, \quad (1)$$

где γ – коэффициент запаса прочности; d – диаметр проволоки по маршруту мокрого тончайшего и наитончайшего волочения латунированной высокоуглеродистой проволоки.

Рекомендуемые значения коэффициента запаса прочности, полученные по данной зависимости, имеют

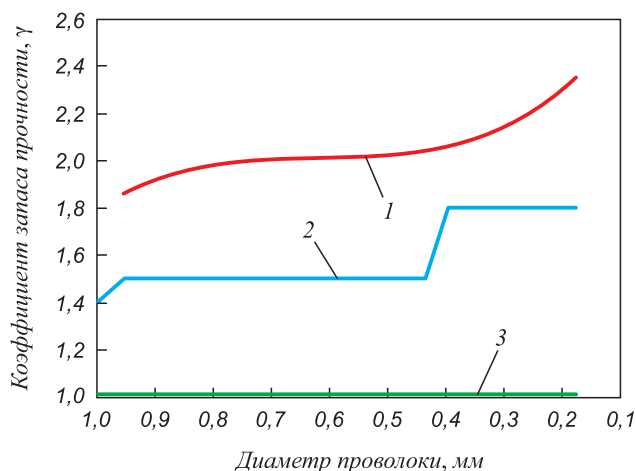


Рис. 4. Зависимость коэффициента запаса прочности от диаметра латунированной проволоки:

1 – значения коэффициента запаса прочности, полученные по уравнению (1); 2 – рекомендации по Перлину; 3 – минимальное допустимое значение коэффициента запаса прочности

Fig. 4. Dependence of the ratio of breaking stress to draw stress on diameter of brass-plated wire:

1 – values of the the ratio of breaking stress to draw stress obtained by equation (1); 2 – Perlin recommendations; 3 – minimum allowable value of the ratio of breaking stress to draw stress

ют схожую тенденцию с рекомендуемыми значениями по Перлину (см. рис. 4), а также аналогичны критериям, заявленным в модели многократного волочения со скольжением [19] проволоки тончайших размеров (микропроволоки).

Полученное авторами уравнение определяет величину коэффициента запаса прочности, обеспечивающую, с учетом масштабного фактора для процессов в тонкой, тончайшей и микропроволоке [20], максимальную износостойкость для определенного диаметра латунированной проволоки. Это может быть использовано при разработке маршрутов волочения латунированной проволоки.

Выводы

Увеличение износостойкости в начале маршрута вызвано повышением давления смазки на входе в волоку с ростом скорости проволоки. Последующее резкое снижение и стагнация связаны с ростом температуры на контактной поверхности волоки вследствие увеличения скорости протяжки и наклепа проволоки, а также с уменьшением захвата смазки проволокой при увеличении ее скорости, что приводит к значительному ухудшению условий смазки на второй половине маршрута.

Анализ взаимосвязи параметров усилие вытяжки и напряжение к износостойкости показал неудовлетворительный результат – низкую силу корреляции по шкале Чеддока. Это привело к необходимости использования нового показателя – коэффициента запаса прочности γ .

Предложенный комплексный показатель – коэффициент запаса прочности γ позволил выделить эффективный диапазон $\gamma = 1,9 - 2,5$, обеспечивающий максимальную величину износостойкости.

Выход γ за границы диапазона $\gamma = 1,9 - 2,5$ приводит к снижению износостойкости. В частности, увеличение γ определяет выход на низкие значения порядка 10^6 м и менее, с получением большого разброса износостойкости за счет роста растягивающих напряжений, способствующих расколу волоки.

Получена зависимость коэффициента запаса прочности γ от диаметра латунированной проволоки, обеспечивающая максимальную износостойкость по подобным маршрутам мокрого волочения, где характер распределения коэффициента запаса прочности по маршруту согласуется с рекомендациями Перлина. Уравнение может быть использовано при разработке маршрутов волочения латунированной проволоки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. Москва: Металлургия, 1971. 448 с.
2. Enghag P. *Steel Wire Technology*. Örebro: Applied materials technology, Materialteknik HB. 2002. 311 p.
3. Wright R.N. *Wire Technology: Process Engineering and Metallurgy*. Oxford: Butterworth-Heinemann (Elsevier). 2011. 320 p.
4. Стальная проволока / Х.Н. Белалов, А.А. Клековкин, Н.А. Клековкина, Г.С. Гун, А.Г. Корчунов, М.А. Полякова. Магнитогорск: Издательство МГТУ им. Г.И. Носова, 2011. 689 с.
5. Головизнин С.М., Харитонов В.А. Оценка неоднородности деформации при высокоскоростном волочении проволоки с применением волновой теории пластичности // Известия вузов. Черная металлургия. 2007. № 4. С. 70.
6. Харитонов В.А., Головизнин С.М., Столяров А.Ю. Влияние скорости протяжки на условия волочения со скольжением и качество тонкой высокоуглеродистой проволоки // Производство проката. 2007. № 7. С. 23–29.
7. Головизнин С.М. Совершенствование технологии изготовления высокопрочной проволоки на основе моделирования температурно-деформационных режимов высокоскоростного мокрого волочения: Диссертация ... кандидата технических наук. Магнитогорск, 2005. 139 с.
8. Харитонов В.А., Головизнин С.М. Влияние скорости на свойства и режимы волочения тонкой высокопрочной проволоки // Сталь. 2007. № 7. С. 86–87.
9. Lee S.-K., Lee S.-B., Kim B.-M. Process design of multi-stage wet wire drawing for improving the drawing speed for 0.72 wt % C steel wire // Journal of Materials Processing Technology. 2010. Vol. 210. No. 5. P. 776–783. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.01.007>
10. Enghag P., Larsson R., Pettersson K. An investigation into the forces and friction in wire drawing // Wire Industry. 2001. Vol. 69. No. 809. P. 272–277.
11. Camenchi J., Cristescu N., Sandru N. Contributii privind trefilarea sirmei cu mare viteza // Cercetari Metalurgice. 1979. Vol. 20. P. 401–406.
1. Perlín I.L., Ermanok M.Z. *Theory of Drawing*. Moscow: Metallurgiya, 1971, 448 p. (In Russ.).
2. Enghag P. *Steel Wire Technology*. Örebro: Applied materials technology, Materialteknik HB, 2002, 311 p.
3. Wright R.N. *Wire Technology: Process Engineering and Metallurgy*. Oxford: Butterworth-Heinemann (Elsevier), 2011, 320 p.
4. Belalov Kh.N., Klekovkin A.A., Klekovkina N.A., Gun G.S., Korchunov A.G., Polyakova M.A. *Steel Wire: Monograph*. Magnitogorsk: Nosov MSTU, 2011, 689 p. (In Russ.).
5. Goloviznin S.M., Kharitonov V.A. Estimation of strain inhomogeneity in high-speed wire drawing using the wave theory of plasticity. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2007, no. 4, p. 70. (In Russ.).
6. Kharitonov V.A., Goloviznin S.M., Stolyarov A.Yu. Influence of broach speed on conditions of drawing with sliding and quality of thin high-carbon wire. *Proizvodstvo prokata*. 2007, no. 7, pp. 23–29. (In Russ.).
7. Goloviznin S.M. *Improving the technology of manufacturing high-strength wire based on simulation of temperature-strain modes of high-speed wet drawing: Cand. Tech. Sci. Diss.* Magnitogorsk, 2005, 139 p. (In Russ.).
8. Kharitonov V.A., Goloviznin S.M. Influence of speed on the properties and modes of drawing thin high-strength wire. *Stal'*. 2007, no. 7, pp. 86–87. (In Russ.).
9. Lee S.-K., Lee S.-B., Kim B.-M. Process design of multi-stage wet wire drawing for improving the drawing speed for 0.72 wt % C steel wire. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010, vol. 210, no. 5, pp. 776–783. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.01.007>
10. Enghag P., Larsson R., Pettersson K. An investigation into the forces and friction in wire drawing. *Wire Industry*. 2001, vol. 69, no. 809, pp. 272–277.
11. Camenchi J., Cristescu N., Sandru N. Contributii privind trefilarea sirmei cu mare viteza. *Cercetari Metalurgice*. 1979, vol. 20, pp. 401–406. (In Romanian).

12. Golis B., Pilarczyk J.W., Muskalski Z., Dyja H. Strain rate in wire drawing process // *Wire Industry*. 2004. Vol. 71. No. 840. P. 200–206.
13. Ford E.H. Das Drahtziehverfahren. Ein Ruckblick auf fundamentale Prinzipien // *Draht*. 1982. Vol. 33. No. 5. P. 353–355.
14. Lancaster P.R., Smith B.F. High speed wire drawing // *Wire Industry*. 1974. Vol. 41. No. 491. P. 933–937.
15. Tseng Ampere A., Wang Shi R., Lau A.C.W. Local variations of strain and strain rate in roll bite region during rolling of steels // *Journal of Engineering Materials and Technology*. 1998. Vol. 120. No. 1. P. 86–96. <https://doi.org/10.1115/1.2806843>
16. Person L.E. Drawing wire with a smaller die angle // *Wire Industry*. 2004. Vol. 71. No. 846. P. 437.
17. Durante M., Zangella A., Capuce M. Ziehsteinverschleiss beim Ziehen hochgekoelter Stahldrahte // *Draht*. 2001. Vol. 52. No. 5. P. 22–25.
18. Cristescu N. Plastic flow through conical converging dies, using a viscoplastic constitutive equation // *International Journal of Mechanical Sciences*. 1975. Vol. 17. No. 6. P. 425–433. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(75\)90040-5](https://doi.org/10.1016/0020-7403(75)90040-5)
19. Бондаренко Г.Г., Волков А.В. Разработка и реализация модели процесса многократного волочения микропроволоки // *Наукоемкие технологии*. 2002. № 5. С. 19–23.
20. Кулеша В.А. Разработка научных основ формирования свойств высококачественных метизов и создание эффективных технологий их производства: Диссертация ... доктора технических наук. Москва, 2000. 69 с.
12. Golis B., Pilarczyk J.W., Muskalski Z., Dyja H. Strain rate in wire drawing process. *Wire Industry*. 2004, vol. 71, no. 840, pp. 200–206.
13. Ford E.H. Das Drahtziehverfahren. Ein Ruckblick auf fundamentale Prinzipien. *Draht*. 1982, vol. 33, no. 5, pp. 353–355. (In Germ.).
14. Lancaster P.R., Smith B.F. High speed wire drawing. *Wire Industry*. 1974, vol. 41, no. 491, pp. 933–937.
15. Tseng Ampere A., Wang Shi R., Lau A.C.W. Local variations of strain and strain rate in roll bite region during rolling of steels. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 1998, vol. 120, no. 1, pp. 86–96. <https://doi.org/10.1115/1.2806843>
16. Person L.E. Drawing wire with a smaller die angle. *Wire Industry*. 2004, vol. 71, no. 846, pp. 437.
17. Durante M., Zangella A., Capuce M. Ziehsteinverschleiss beim Ziehen hochgekoelter Stahldrahte. *Draht*. 2001, vol. 52, no. 5, pp. 22–25. (In Germ.).
18. Cristescu N. Plastic flow through conical converging dies, using a viscoplastic constitutive equation. *International Journal of Mechanical Sciences*. 1975, vol. 17, no. 6, pp. 425–433. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(75\)90040-5](https://doi.org/10.1016/0020-7403(75)90040-5)
19. Bondarenko G.G., Volkov A.V. Development and realization of a model for multiple drawing of microwire. *Naukoemkie tekhnologii*. 2002, no. 5, pp. 19–23. (In Russ.).
20. Kulesha V.A. *Development of scientific foundations for the formation the properties of high-quality hardware and creation of effective technologies for their production: Dr. Tech. Sci. Diss.* Moscow, 2000, 69 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергей Михайлович Головизнин, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой металлургии и стандартизации, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ORCID: 0000-0002-4751-9198

E-mail: smgoloviznin@magtu.ru

Игорь Михайлович Петров, к.т.н., доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ORCID: 0000-0003-4400-0056

E-mail: petrov.mgtu@gmail.com

Артём Борисович Иванцов, к.т.н., доцент кафедры металлургии и стандартизации, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ORCID: 0000-0002-4504-3739

E-mail: art.belor@yandex.ru

Sergei M. Goloviznin, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Head of the Chair "Metallurgy and Standardization", Nosov Magnitogorsk State Technical University

ORCID: 0000-0002-4751-9198

E-mail: smgoloviznin@magtu.ru

Igor' M. Petrov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Nosov Magnitogorsk State Technical University

ORCID: 0000-0003-4400-0056

E-mail: petrov.mgtu@gmail.com

Artem B. Ivantsov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Metallurgy and Standardization", Nosov Magnitogorsk State Technical University

ORCID: 0000-0002-4504-3739

E-mail: art.belor@yandex.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

С. М. Головизнин – руководство работой, предоставление исходных данных, формирование основной концепции.

И. М. Петров – статистическая обработка данных, анализ полученных результатов, общая редакция работы.

А. Б. Иванцов – обзор литературы, анализ технологического процесса, анализ полученных результатов.

S. M. Goloviznin – scientific guidance, initial data provision, formation of the main concept.

I. M. Petrov – statistical data processing, analysis of the received data, general editing of the text.

A. B. Ivantsov – literature review, analysis of the technological process and received data.

Поступила в редакцию 24.03.2022

После доработки 25.04.2022

Принята к публикации 28.06.2022

Received 24.03.2022

Revised 25.04.2022

Accepted 28.06.2022