

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)  
УДК 621.77  
DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-4-54-60



## **ПРИМЕНЕНИЕ СОВМЕЩЕННОГО СПОСОБА «АСИММЕТРИЧНАЯ ПРОКАТКА - ВОЛОЧЕНИЕ В МОНОЛИТНОЙ ВОЛОКЕ» ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПРОВОЛОКИ С МЕЛКОЗЕРНИСТОЙ СТРУКТУРОЙ**

**Харитонов В.А., Песин А.М., Усанов М.Ю., Локотунина Н.М., Мелихов Е.Д.**

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

**Аннотация.** Организация конкурентоспособного производства проволоки различного назначения с мелкозернистой структурой является в настоящее время актуальной задачей метизного передела отечественной металлургии. В статье описан новый способ, позволяющий без изменения действующей технологической схемы повысить эффективность производства проволоки. Было выполнено моделирование в программном комплексе Deform-3d трех вариантов получения проволоки из стали марки 80Р: волочение в монолитной волоке; совмещенный процесс «холодная прокатка - волочение в монолитной волоке» и новый процесс – «холодная асимметрическая прокатка - волочение в монолитной волоке». Оценивалось распределение накопленной степени деформации в проволоке, полученной различными способами. Сравнительный анализ полученных результатов показал, что наименьшие значения накопленной степени деформации имеет проволока, протянутая в монолитной волоке. При совмещенном процессе плющения (прокатки круглой заготовки в валках с гладкой бочкой) – волочение в монолитной волоке – уровень накопленной степени деформации значительно растет благодаря прокатке. Применение асимметрической прокатки с соотношением скоростей вращения верхнего и нижнего валков, равным 2 или 5, еще больше повышает величину накопленной степени деформации. Показано, что способ «холодная асимметрическая прокатка – волочение в монолитной волоке» позволяет без замены оборудования и другой инфраструктуры повысить степень накопленной деформации в проволоке и тем самым обеспечить получение мелкозернистой структуры. Показаны также широкие возможности управления режимами деформации как в прокатной клети, так и в монолитной волоке, что открывает широкие возможности для совершенствования процесса волочения.

**Ключевые слова:** проволока, волочение, прокатка, асимметричная прокатка, совмещение, моделирование, накопленная степень деформации

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-19-20026, <https://rscf.ru/project/24-19-20026/>*

© Харитонов В.А., Песин А.М., Усанов М.Ю., Локотунина Н.М., Мелихов Е.Д., 2025

### **Для цитирования**

Применение совмещенного способа «асимметричная прокатка - волочение в монолитной волоке» при производстве проволоки с мелкозернистой структурой / Харитонов В.А., Песин А.М., Усанов М.Ю., Локотунина Н.М., Мелихов Е.Д. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №4. С. 54-60. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-54-60>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

# **APPLICATION OF THE COMBINED METHOD “ASYMMETRIC ROLLING - DRAWING IN A MONOLITHIC DIE” IN THE PRODUCTION OF WIRE WITH FINE-GRAINED STRUCTURE**

**Kharitonov V.A., Pesin A.M., Usanov M.Yu., Lokotunina N.M., Melikhov E.D.**

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

**Abstract.** The organization of a competitive production of wires for various applications with a fine-grained structure is currently a crucial task for the hardware manufacturing sector of domestic metallurgy. This paper describes a novel method that enables increasing the efficiency of wire production without changing the existing technological scheme. Numerical simulations were performed in the Deform-3D software package for three variants of wire manufacturing from 80R steel: drawing in a monolithic die; the combined process of “cold rolling – drawing in a monolithic die”; and a new process such as “cold asymmetric rolling – drawing in a monolithic die”. The distribution of accumulated strain in the wire obtained by these methods is evaluated. A comparative analysis of the results shows that the lowest accumulated strain values are obtained in wire drawn only in a monolithic die. In the combined process of flattening (rolling of a round blank with smooth rolls) followed by drawing in a monolithic die, the accumulated strain level increases significantly due to rolling. The application of asymmetric rolling with a ratio of the rotation speeds of the upper and lower rolls equal to 2 or 5 further increases the level of accumulated strain. It is demonstrated that the process of “cold asymmetric rolling – drawing in a monolithic die” allows for increasing the accumulated strain in the wire and thus producing a fine-grained structure without replacement of the existing equipment or infrastructure. Additionally, wide opportunities for controlling deformation modes in both the roll mill stand and monolithic die are revealed, which opens up promising ways for further improvement of the drawing process.

**Keywords:** wire, drawing, rolling, asymmetric rolling, combined processes, modeling, accumulated strain.

*The research was carried out at the expense of the Russian Science Foundation grant No. 24-19-20026 (Available at: <https://rscf.ru/project/24-19-20026/> )*

## **For citation**

Kharitonov V.A., Pesin A.M., Usanov M.Yu., Lokotunina N.M., Melikhov E.D. Application of the Combined Method “Asymmetric Rolling - Drawing in a Monolithic Die” in the Production of Wire With Fine-Grained Structure. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 4, pp. 54-60. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-4-54-60>

## **Введение**

Волочение в монолитных волоках на протяжении многих веков является основной операцией технологического процесса изготовления проволоки различного назначения как из черных, так и цветных металлов и их сплавов. Широкое применение волочения в монолитных волоках как способа обработки металлов давлением объясняется простотой применяемого инструмента по конструкции, изготовлению и эксплуатации, хорошей теоретической изученностью и наличием всей необходимой инфраструктуры (оборудование, инструмент, технологические смазки и т.п.). Однако при этом схема ввода энергии в очаг деформации (через передний конец), реактивное трение, неблагоприятная схема напряженного состояния металла при деформации значительно снижают качество проволоки и повышают затраты на ее изготовление. Этому же способствует неравномерность деформации по сечению проволоки, присущая этому способу. Схема деформации при волочении – схема истечения, эффективная при формоизменении, затрудняет получение мелкодисперсной равновесной микроструктуры.

Введение при производстве проволоки в качестве основной операции нового способа обработки металлов давлением, например, протяжки в роликовых волоках, холодной (теплой) сортовой прокатки в двух- и многовалковых калибрах, требует разработки и реализации новых технологических схем, что очень сложно, дорого и на сегодня просто нецелесообразно.

На наш взгляд, волочение нужно сохранить в качестве основной операции, а эффективность производства проволоки повысить разработкой новых комбинаций совмещенных процессов обработки металлов давлением. При этом, наряду с устранением недостатков волочения в монолитной волоке, нужно поставить дополнительную задачу получения ультрамелкодисперсных структур. Для решения этих задач необходимо применять совмещение волочения с методами интенсивной пластической деформации. Например, совмещенный способ деформирования прессование-волочение, который обладает существенным преимуществом по сравнению с ранее известными способами получения металла с ультрамелкозернистой структурой. Данный способ деформиро-

вания за счет совмещения двух способов – интенсивной пластической деформации в равноканальной ступенчатой матрице и процесса волочения – позволяет получать проволоку требуемых размеров и формы поперечного сечения, обладающую ультрамелкозернистой структурой. В этом направлении известны работы Карагандинского государственного индустриального университета и других университетов [1, 2].

Разработанный учеными Донецкого физико-технического института совмещенный способ прокатки со сдвигом и традиционного волочения позволяет получить проволоку малых сечений без промежуточного отжига, благодаря большому запасу пластичности, что обеспечивается формированием специфической структуры с мелким, однородным, изотропным, равноосным зерном с преимущественно большеугловыми границами и низкой плотностью дислокаций в теле зерна [3, 4].

В Магнитогорском государственном техническом университете еще в 50-х годах прошлого века под руководством профессора М.И. Бояршинова были начаты исследования по применению многовалковых калибров для изготовления сортового проката и проволоки. В 80-е годы прошлого века на Белорецком металлургическом комбинате был смонтирован ипущен в эксплуатацию пятиклетевой прокатный стан. Развитие этого направления показало эффективность нового процесса «прокатка - волочение» и пути его реализации [5].

Как показали проведенные нами исследования, волочение круглой проволоки в овальной монолитной волоке приводит к изменению распределения накопленной степени деформации по сечению проволоки. Применение в маршруте волочения круглых и овальных монолитных волок дает возможность управлять характером распределения накопленной степени деформации проволоки, повышая тем самым ее качество [6].

За рубежом также проводились работы по исследованию влияния диаметра валков на распределение деформации, изменение формы, контактное давление и значение повреждаемости заготовки при плоской прокатке проволоки с целью управления свойствами. Показано, что неравномерность деформации в плоской проволоке возрастает с увеличением диаметра валков. Данные различия в распределениях деформации, изменении формы и значениях повреждаемости обусловлены изменением длины контактного участка, напрямую зависящим от диаметра валков при плоской прокатке проволоки [7]. Сравнительный анализ механических свойств проволоки, полученной волочением в монолитных волоках и сортовой прокаткой, посвящены работы [8, 9]. Было выявлено большое различие в механических свойствах. Однако в данных работах рассматриваются отдельно способы только волочения или только прокатки круглой заготовки.

Асимметричная прокатка в настоящее время применяется в основном при листовой холодной и горячей прокатке различных металлов и их сплавов.

При этом обеспечивается получение градиентных мелкодисперсных микроструктур, обеспечивающих повышение прочности и пластичности [10–12]. Таким образом, значительный исследовательский интерес представляет оценка возможности этого процесса при производстве других изделий, включая проволоку.

Целью данной работы является оценка распределения накопленной деформации в высокоуглеродистой проволоке, полученной волочением в монолитных волоках и совмещенными способами «прокатка-волочение» на основе моделирования.

### Материалы и методы исследования

Для исследования процесса «асимметричная прокатка - волочение» было выполнено моделирование в программном комплексе Deform-3d. Задача принималась пластическая, изотермическая. Температура заготовки 20°C. Диаметр исходной заготовки 16,00 мм, длина 150 мм, сталь марки 80Р. При постановке задачи заготовка разбивалась на 68569 конечных элементов. Тип сетки – абсолютная, коэффициент отношения равен 1. Размер ячеек при данных условиях составил 1 мм. В начале заготовка обжимается на плоский овал в прокатной кассете, затем проходит через монолитную волоку. На выходе проволоки из волоки к ее переднему концу приложено тянувшее усилие и осуществляется процесс волочения (рис. 1).

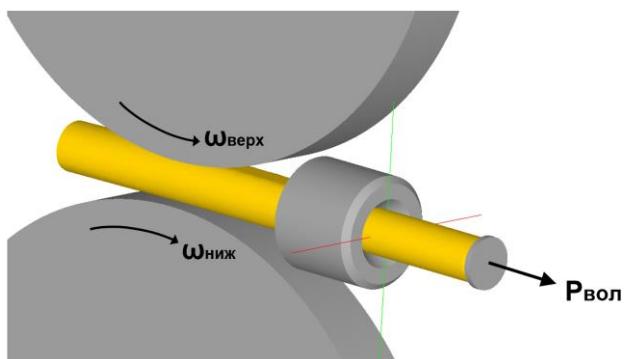


Рис. 1. Модель процесса «прокатка - волочение»  
Fig. 1. Model of the rolling-drawing process

Валки прокатной кассеты принимались диаметром 200 мм, обжатие составляло 1 мм на сторону (то есть получался плоский овал высотой 14,0 мм). При этом нижний валок всегда оставался скоростным и вращался со скоростью 10 рад/с. Скорость верхнего валка менялась и его скорость в разных экспериментах составляла соответственно 10, 5 и 2 рад/с.

Монолитная волока имеет диаметр 13,76 мм, рабочий угол –  $2\alpha = 12^\circ$ .

Коэффициент трения при прокатке и волочении задавался в соответствии с законом Кулона. Для прокатки значение коэффициента трения составляло 0,3 [10], а для волочения в монолитной волоке он принимался равным 0,08.

### Полученные результаты и их обсуждение

Для сравнения результатов моделирования прокатки и волочения был смоделирован процесс волочения в монолитной волоке одной протяжки с диаметром 16,00 мм на диаметр 13,76 мм со скоростью 1000 мм/с. Измеренное усилие волочения при этом составило 84,22 кН.

Затем выполнено моделирование с валками, вращающимися с одинаковой скоростью 10 рад/с. При этом передний конец проволоки на выходе из роликов подходит к монолитной волоке и фактически начинается процесс прессования. Однако усилия от прокатки не хватает, чтобы полностью «продавить» заготовку через монолитную волоку, и валки начинают буксовать по поверхности проволоки. Данное усилие можно измерить, оно составило 31 кН. Для измерения скорости перемещения заготовки на ее передний и задний торец были нанесены точки и с помощью инструмента «Point Tracking» были получены скорости переднего и заднего концов заготовки в процессе прокатки и они составили соответственно 1012,2 и 972,1 мм/с. Зная исходный диаметр заготовки, из условия постоянства секундных объемов ( $F_0V_0 = F_nV_n$ ) определяем площадь полученного плоского овала 193,1 мм<sup>2</sup>. Вычисляем скорость готовой проволоки на выходе из монолитной волоки, которая составила 1313,7 мм/с.

Аналогичным образом были получены данные для других экспериментов, которые сведены в таблицу.

Исходя из полученных данных о скоростях проволоки после прокатки и проволоки на выходе из монолитной волоки, возможно несколько вариантов их синхронизации:

- скорости проволоки после прокатки и на выходе из волоки совпадают с учетом вытяжки в монолитной волоке;

- скорость проволоки на выходе из монолитной волоки с учетом вытяжки меньше скорости после прокатки, таким образом реализуется режим волочения с подпором;

- скорость проволоки на выходе из монолитной волоки с учетом вытяжки больше скорости после прокатки, в данном случае реализуется режим волочения с натяжением.

В данной статье рассматривается случай, когда скорости проволоки после прокатки и на выходе из

волоки совпадают с учетом вытяжки в монолитной волоке. Для данного варианта было оценено распределение накопленной степени деформации [6]. Методика оценки заключается в следующем: на исходную заготовку в поперечном сечении наносится 360 точек, распределенных по нескольким концентрическим окружностям. Затем строятся графики с развертками полученных данных. Отсчет точек начинается с левой боковой поверхности, если смотреть, что проволока движется на нас. Точка 90 находится сверху заготовки под верхним валком, точка 180 – на правой боковой поверхности и точка 270 – снизу заготовки, над нижним валком (рис. 2).

Из данных на рис. 2 видно, что накопленная степень деформации при волочении только в монолитной волоке имеет значение от 0,31 на оси проволоки до 0,37 на ее поверхности. Применение прокатной клети с равными скоростями вращения приводит к увеличению накопленной степени деформации в центре до 0,38 и до величины 0,70 на ее поверхности в тех зонах, которые находились при прокатке под валками. Применение асимметрии приводит к перераспределению значений накопленной степени деформации. Со стороны верхнего «медленного» валка наблюдается ее снижение до значения 0,65, в то время как со стороны более «скоростного» валка значение накопленной степени деформации увеличивается до 0,85 и до 0,89 для соотношения скоростей 2 и 5 соответственно.

### Заключение

1. В программном комплексе Deform-3d впервые выполнено моделирование совмещенного процесса «асимметричная прокатка – волочение в монолитных волоках».

2. Сравнительный анализ показал, что степень накопленной деформации в проволоке, полученной способом «прокатка – волочение», в 1,9 раза выше, чем у волоченой проволоки. Применение асимметричной прокатки повышает это значение до 2,2 и 2,4 в зависимости от соотношения скоростей валков.

3. Процесс «прокатка – волочение» является «чувствительным» к изменению соотношения асимметрии при прокатке и режимов волочения, что позволяет управлять значением накопленной степени деформации в проволоке, тем самым обеспечивая получение необходимых ее свойств.

Таблица. Параметры процесса прокатки с различным соотношением скоростей валков  
Table. Rolling process parameters for different roll-speed ratios

Скорость верхнего валка, рад/с	Скорость нижнего валка, рад/с	Скорость переднего конца проволоки после прокатки, мм/с	Рассчитанная скорость переднего конца проволоки после монолитной волоки, мм/с
10	10	1012,2	1313,7
5	10	522,1	678,6
2	10	200,4	270,8

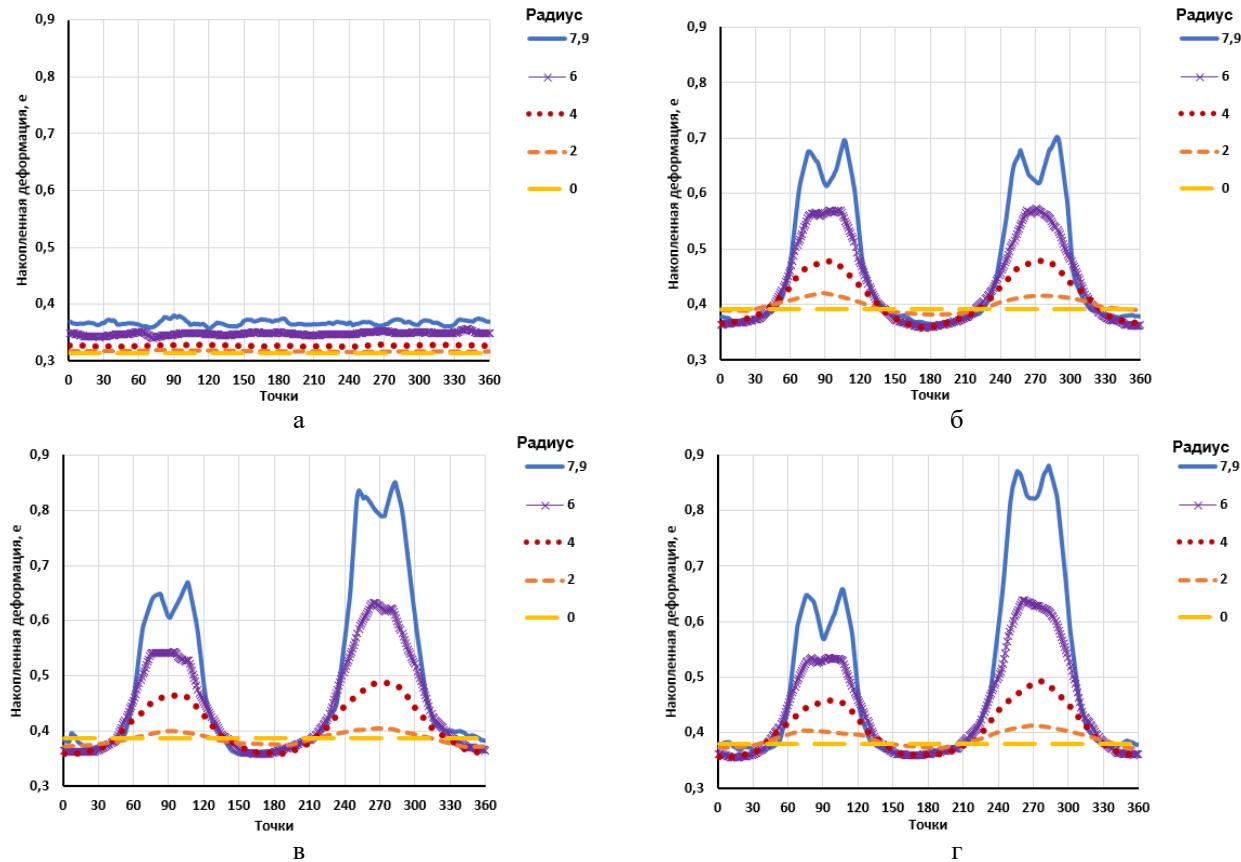


Рис. 2. Распределение накопленной степени деформации по сечению заготовки после прокатки - волочения с соотношением скоростей валков: а – волочение в монолитной волоке с 16,00 на 13,76 мм; б –  $V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 1$ ; в –  $V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 2$ ; г –  $V_{\text{ниж}}/V_{\text{верх}} = 5$

Fig. 2. Distribution of accumulated strain over the cross-section of the workpiece after rolling-drawing with different roll-speed ratios: а is drawing in a monolithic die from 16.00 to 13.76 mm; б is  $V_{\text{low}}/V_{\text{top}} = 1$ ; в is  $V_{\text{low}}/V_{\text{top}} = 2$ ; г is  $V_{\text{low}}/V_{\text{top}} = 5$

#### Список источников

1. Разработка и исследование совмещенного процесса равноканального углового прессования / А.А. Богатов, А.Б. Найзабеков, С.Н. Лежнев, И.В. Лещев, В.Г. Козлов // Производство проката. 2016. № 3. С. 33–38.
2. Влияние процесса прессование-волочение на изменение структуры и механических свойств стали / С.Н. Лежнев, И.Е. Волокитина, А.В. Волокитин // Сталь. 2017. № 3. С. 44–48.
3. Пашинская Е.Г., Завдовеев А.В. Применение прокатки со сдвигом и традиционного волочения для формирования структуры и свойств малоуглеродистых сталей // Физика и техника высоких давлений. 2012. Т. 22. № 3. С. 113–124.
4. Нетривиальные изменения физико-механических свойств и структуры малоуглеродистой проволоки, полученной прокаткой со сдвигом и холодным волочением / Е.Г. Пашинская, А.В. Завдовеев, Л.С. Метлов, Ю.И. Непочатых, А.А. Максакова, В.М. Ткаченко // Materials Physics and Mechanics. 2015. Т. 24. № 2. С. 163–177.
5. Харитонов В.А., Таранин И.В. Исследование эффективности изготовления проволоки совмещенным
- способом «прокатка-волочение в монолитной волоке с подпором» // Кузнецко-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2014. № 10. С. 24–28.
6. Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Исследование процесса волочения круглой высокоуглеродистой проволоки в овальной монолитной волоке // Теория и технология металлургического производства. 2022. № 1 (40). С. 37–40.
7. Hwang J.-K., Kim S.-J., Kim K.-J. Influence of Roll Diameter on Material Deformation and Properties during Wire Flat Rolling // Applied Sciences. 2021, vol. 11, no. 18, p. 8381.
8. Hwang J.-K. Hardening and Softening Behavior of Caliber-Rolled Wire // Materials (Basel, Switzerland). 2022. vol. 15, no.8, p. 2939.
9. Comparison of reduction ability between multi-stage cold drawing and rolling of stainless steel wire – Experimental and numerical investigations of damage / T.-S. Cao, C. Vachey, P. Montmitonnet, P.-O. Bouchard // Journal of Materials Processing Tech. 2015, vol. 217, pp. 30–47.
10. Асимметричная прокатка листов и лент: история и перспективы развития / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, О.Д. Бирюкова, А.Е. Кожемякина // Вестник

- ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2020. Т. 20. № 3. С. 81–96.
11. Effect of asymmetry on microstructure and mechanical behavior of as-rolled AZ31 magnesium alloy medium plates during coiling at warm temperatures / C. Zhou, Q. Le, T. Wang, Q. Liao, Y. Zhu, D. Zhao, L. Bao, W. Jia // Materials Science and Engineering: A. 2024, vol. 894, p. 146174.
12. Effects of asymmetric rolling with tilted material entry on texture and mechanical properties of aluminium / D. Byrska-Wójcik, M. Ostachowska, J. Gibek, K. Wierzbowski, M. Wróbel, R. Błoniarz, A. Baczański, M. Kopyściański, I. Kalemba-Rec // Journal of Materials Processing Tech. 2025, vol. 338, p. 118796.

### References

1. Bogatov A.A., Naizabekov A.B., Lezhnev S.N., Leshchev I.V., Kozlov V.G. Development and study of the combined process of equal-channel angular pressing. Proizvodstvo prokata [Rolled products manufacturing]. 2016;(3):33-38. (In Russ.)
2. Lezhnev S.N., Volokintina I.E., Volokitin A.V. Influence of the pressing-drawing process on structural evolution and mechanical properties of steel. Stal [Steel]. 2017;(3):44-48. (In Russ.)
3. Pashinskaya E.G., Zavdoveev A.V. Application of shear rolling and conventional drawing to form the structure and properties of low-carbon steels. Fizika i tekhnika vysokikh davlenii [High pressure physics and technology]. 2012;22(3):113-124. (In Russ.)
4. Pashinskaya E.G., Zavdoveev A.V., Metlov L.S., Nepochatykh Yu.I., Maksakova A.A., Tkachenko V.M. Nontrivial changes in the physical and mechanical properties and structure of low-carbon wire produced by shear rolling and cold drawing. Materials Physics and Mechanics. 2015;24(2):163-177. (In Russ.)
5. Kharitonov V.A., Tararin I.V. Study of the efficiency of producing wire by the combined method «rolling-drawing in a monolithic die with back-tension». Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem [Forging and stamping production. Metal forming]. 2014;(10):24-28. (In Russ.)
6. Kharitonov V.A., Usanov M.Yu. Research of round high-carbon wire drawing in oval one-piece drawing die. Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva [Theory and technology of metallurgical production]. 2022;1(40):37-40. (In Russ.)
7. Hwang J.-K., Kim S.-J., Kim K.-J. Influence of Roll Diameter on Material Deformation and Properties during Wire Flat Rolling. Applied Sciences. 2021;11(18):8381.
8. Hwang Joong-Ki. Hardening and Softening Behavior of Caliber-Rolled Wire. Materials (Basel, Switzerland). 2022;15(8):2939.
9. Cao T.-S., Vachey C., Montmitonnet P., Bouchard P.-O. Comparison of reduction ability between multi-stage cold drawing and rolling of stainless steel wire – Experimental and numerical investigations of damage. Journal of Materials Processing Tech. 2015;217:30-47.
10. Pesin A.M., Pustovoytov D.O., Biryukova O.D., Kozhemyakina A.E. Asymmetric rolling of sheets and strips: history and development prospects. Vestnik YuUrGU. Seriya «Metallurgiya» [Vestnik of SUSU. Metallurgy Series]. 2020;20(3):81-96. (In Russ.)
11. Zhou C., Le Q., Wang T., Liao Q., Zhu Y., Zhao D., Bao L., Jia W. Effect of asymmetry on microstructure and mechanical behavior of as-rolled AZ31 magnesium alloy medium plates during coiling at warm temperatures. Materials Science and Engineering: A. 2024;894:146174.
12. Byrska-Wójcik D., Ostachowska M., Gibek J., Wierzbowski K., Wróbel M., Błoniarz R., Baczański A., Kopyściański M., Kalemba-Rec I. Effects of asymmetric rolling with tilted material entry on texture and mechanical properties of aluminium. Journal of Materials Processing Tech. 2025;338:118796

Поступила 18.11.2025; принята к публикации 05.12.2025; опубликована 25.12.2025  
Submitted 18/11/2025; revised 05/12/2025; published 25/12/2025

**Харитонов Вениамин Александрович** – кандидат технических наук, профессор,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: hva-46@yandex.ru. ORCID 0000-0003-3487-7110

**Песин Александр Моисеевич** – доктор технических наук, профессор,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: pesin@bk.ru. ORCID 0000-0002-5443-423X

**Усанов Михаил Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: barracuda\_m@mail.ru. ORCID 0000-0002-5920-3449

**Локотунина Наталья Михайловна** – кандидат технических наук, доцент,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: nml76@mail.ru. ORCID 0000-0002-9917-5550

**Мелихов Егор Дмитриевич** – студент магистратуры,  
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.  
Email: melihovegor77@gmail.com. ORCID 0009-0002-7628-8859

**Veniamin A. Kharitonov** – PhD (Eng.), Professor,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: hva-46@yandex.ru. ORCID 0000-0003-3487-7110

**Alexander M. Pesin** – DrSc (Eng.), Professor,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: pesin@bk.ru. ORCID 0000-0002-5443-423X

**Mikhail Yu. Usanov** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: barracuda\_m@mail.ru. ORCID 0000-0002-5920-3449

**Natalia M. Lokotunina** – PhD (Eng.), Associate Professor,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: nml76@mail.ru. ORCID 0000-0002-9917-5550

**Egor D. Melikhov** – Master's Student,  
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.  
Email: melihovegor77@gmail.com. ORCID 0009-0002-7628-8859