



УДК 621.778.1

DOI 10.17073/0368-0797-2025-3-228-232



Оригинальная статья
Original article

АНАЛИЗ ЭНЕРГОЗАТРАТ МНОГОКРАТНОГО ВОЛОЧЕНИЯ СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ

С. М. Головизнин[✉], И. Ю. Брюханов

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

✉ smgoloviznin@magtu.ru

Аннотация. В статье анализируется потребление энергии при волочении стальной проволоки для маршрутов с различной кратностью. Авторы сравнивают маршруты волочения проволоки различной кратности с одинаковым суммарным обжатием. В работе рассчитаны зависимости параметров процесса волочения от кратности маршрута и представлены методики расчета работы однородной и неоднородной деформации, работы сил трения при волочении проволоки в монолитных волоках. Получены зависимости однородной, неоднородной работы деформации, а также работы сил трения и полной работы от кратности маршрута волочения. Значительная доля затрат энергии при волочении проволоки приходится на совершение неоднородной деформации. Работа неоднородной деформации – это часть работы деформации, которая вызвана изменением направления течения металла на входе и выходе из волоки. Такие показатели деформации при волочении проволоки, как обжатие и вытяжка, неоднородную деформацию не учитывают. Работа неоднородной деформации зависит от формы очага деформации. Форма очага деформации характеризуется Δ -фактором, который равен отношению средней высоты к средней длине очага деформации. В работе установлено, что расчеты без учета неоднородной деформации приводят к заниженной оценке энергозатрат на волочение проволоки. В статье приведены критерии выбора кратности маршрута волочения с учетом затрат энергии на процесс деформации проволоки при волочении. Было определено, что увеличение числа проходов многократного волочения при неизменных начальном и конечном диаметрах проволоки приводит к росту затрат энергии на деформацию проволоки и трение на контактной поверхности проволока – волока. Доля неоднородной деформации в увеличении энергозатрат на волочение проволоки составила 68 %, доля сил трения – 32 %. На основе полученных результатов авторы дают рекомендации по выбору оптимального маршрута волочения.

Ключевые слова: волока, волочение проволоки, энергозатраты, стальная проволока, деформация, однородная работа, неоднородная работа, маршрут волочения, кратность волочения, многократное волочение

Для цитирования: Головизнин С.М., Брюханов И.Ю. Анализ энергозатрат многократного волочения стальной проволоки. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2025;68(3):228–232. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-3-228-232>

ENERGY CONSUMPTION ANALYSIS OF MULTISTAGE STEEL WIRE DRAWING

S. M. Goloviznin[✉], I. Yu. Bryukhanov

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

✉ smgoloviznin@magtu.ru

Abstract. The paper analyzes energy consumption during steel wire drawing for pass schedules with different number of passes. The authors compare wire drawing pass schedules that have different number of passes and the same total reduction. Dependences of the wire drawing process parameters on the number of passes were calculated. The methods for calculating the uniform and redundant deformation work, the friction forces work during wire drawing in monolithic dies are presented. The authors obtained the dependences of uniform and redundant deformation work, as well as the friction forces work and total work on the passes number of the pass schedule. A significant proportion of energy consumption is due to redundant work. Such wire drawing deformation measures as reduction and elongation do not consider redundant deformation. The redundant deformation work depends on the shape of the deformation zone characterized by the Δ -factor, which is equal to the ratio of the average height to the average length of the deformation zone. It was established that energy consumption calculations for wire drawing without taking into account redundant deformation lead to energy consumption underestimation. The paper provides criteria for selecting the number of passes, taking into account the energy consumption for wire deformation during wire drawing. It was determined that an increase in multistage wire drawing number of passes with the initial and final wire diameters equal leads to an increase in energy consumption for wire deformation and friction on the wire-die contact surface. The redundant deformation share in the increase in energy consumption for wire drawing was 68 %, the friction forces share was 32 %. The authors provide recommendations for choosing the optimal pass schedule based on the results obtained.

Keywords: drawing die, wire drawing, energy consumption, steel wire, deformation, uniform work, redundant work, pass schedule, number of passes, multistage drawing

For citation: Goloviznin S.M., Bryukhanov I.Yu. Energy consumption analysis of multistage steel wire drawing. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(3):228–232. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-3-228-232>

ВВЕДЕНИЕ

Одним из ключевых факторов, влияющих на качество готовой продукции и условия волочения, является выбор маршрута волочения, т. е. выбор количества проходов и единичных обжатий волок. Маршрут волочения должен обеспечивать отсутствие обрывов проволоки и гарантировать требуемое качество готовой продукции при максимальной производительности [1 – 5].

При проектировании режимов многократного волочения проволоки необходимо учитывать такие факторы, как условия смазки, нагрев проволоки, механические свойства проволоки, потребление энергии, количество проходов, величины суммарных и единичных обжатий [2; 3; 6; 7]. Кратность волочения существенно влияет на устойчивость процесса волочения и качество готовой проволоки, поэтому возникает необходимость анализа маршрутов с различной кратностью и ее влияния на технологические параметры процесса волочения стальной проволоки [8 – 10].

Производительность волочильных станов во многом определяется затратами энергии на деформацию проволоки [11; 12]. Энергозатраты на волочение проволоки складываются из затрат на трение между проволокой и волокой и затрат на деформацию проволоки в волоке [13 – 15]. Работа деформации складывается из однородной работы, связанной с изменением диаметра проволоки, и неоднородной или избыточной работы, вызванной изменением направления течения металла на входе и выходе из волоки [16]. Степень деформации при волочении оценивают, как правило, с помощью таких величин, как обжатие и вытяжка, которые не учитывают наличие неоднородной деформации, т. е. деформации, не связанной с изменением диаметра проволоки. Неоднородную деформацию можно оценить с помощью фактора неоднородности Φ , который равен отношению доли неоднородной деформации к полной деформации [1]. Наличие дополнительной неоднородной деформации часто не учитывают при разработке маршрутов волочения проволоки, что приводит к заниженной оценке для работы деформации при многократном волочении проволоки [17 – 21].

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

В работе были изучены следующие маршруты волочения стальной проволоки:

– пятикратный маршрут 9,00 – 7,79 – 6,85 – 6,10 – 5,50 – 5,03 мм;

– шестикратный маршрут 9,00 – 7,95 – 7,00 – 6,80 – 6,10 – 5,50 – 5,03 мм;

– семикратный маршрут 9,00 – 8,19 – 7,48 – 6,85 – 6,31 – 5,83 – 5,40 – 5,03 мм;

– восьмикратный маршрут 9,00 – 8,30 – 7,70 – 7,10 – 6,60 – 6,10 – 5,65 – 5,30 – 5,03 мм.

Во всех исследованных маршрутах начальный и конечный диаметры проволоки и, следовательно, суммарное обжатие, одинаковы.

Неоднородную (дополнительную) работу учитывали с помощью фактора неоднородной деформации

$$\Phi = \frac{w_u + w_r}{w_u},$$

где w_u – работа однородной деформации; w_r – работа неоднородной деформации.

Работа однородной деформации

$$w_u = \sigma_a \ln \left(\frac{1}{1-r} \right), \quad (1)$$

где σ_a – среднее сопротивление деформации при волочении проволоки; r – обжатие.

Работа неоднородной деформации

$$w_r = (\Phi - 1)w_u = (\Phi - 1)\sigma_a \ln \left(\frac{1}{1-r} \right). \quad (2)$$

Полная работа деформации

$$w = \Phi \sigma_a \ln \left(\frac{1}{1-r} \right). \quad (3)$$

Фактор неоднородной деформации

$$\Phi = 0,8 + \frac{\Delta}{4,4}, \quad (4)$$

где Δ – Δ -фактор очага деформации при волочении проволоки, равный отношению средней высоты к средней длине очага деформации.

Среднее численное значение для Δ [1; 16]

$$\Delta = \frac{\alpha}{r} \left[1 + (1-r)^{1/2} \right]^2 \approx \frac{4 \tan \alpha}{\ln \left(\frac{1}{1-r} \right)}, \quad (5)$$

где α – полуугол волоки.

Общее выражение для работы сил трения на единицу объема

$$w_f = \mu \operatorname{ctg} \alpha \Phi \sigma_a \ln \left(\frac{1}{1-r} \right), \quad (6)$$

где μ – коэффициент трения.

Работа сил трения в калибрующем пояске обычно в практических расчетах не учитывается.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На основе проведенных расчетов были получены зависимости работы трения, работы однородной и неоднородной деформации от кратности волочения стальной проволоки для приведенных выше маршрутов. При этом полагали, что начальный и конечный диаметры проволоки, коэффициент трения и значение сопротивления деформации для всех исследованных маршрутов остаются неизменными. На рис. 1 представлена зависимость суммарной работы однородной деформации от кратности волочения проволоки.

В данном случае суммарная работа деформации – это сумма работ деформации по всем проходам многократного волочения проволоки. Согласно полученным данным, суммарная работа однородной деформации не зависит от числа проходов маршрута волочения при одинаковом суммарном обжатии проволоки, так как работа однородной деформации определяется обжатием и прочностью проволоки [1].

Согласно зависимости, показанной на рис. 2, с увеличением кратности волочения при неизменных начальном и конечном диаметрах проволоки работа сил трения растет. Это можно объяснить тем, что при увеличении кратности волочения уменьшается средняя величина обжатия, увеличиваются Δ -фактор и фактор неоднородности,

а также число проходов. Прирост мощности деформации при повышении проходов с пяти до восьми за счет работы сил трения составил 2,4 кВт.

На рис. 3 представлена зависимость суммарной работы неоднородной деформации, т. е. суммы работ неоднородной деформации для всех проходов маршрута волочения, от кратности маршрута волочения.

Согласно приведенной на рис. 3 зависимости, при увеличении кратности волочения суммарная работа неоднородной деформации растет. При увеличении кратности уменьшается среднее обжатие, растет Δ -фактор и, согласно выражению (4), растет фактор неоднородности Φ , что приводит к увеличению работы неоднородной деформации. Кроме того, дополнительный вклад в рост работы неоднородной деформации вносит увеличение числа проходов. Прирост мощности деформации при увеличении числа проходов с пяти до восьми за счет работы неоднородной деформации составил 4,98 кВт.

На рис. 4 представлена зависимость полной работы, т. е. суммы работы однородной, неоднородной деформации и работы сил трения по всем проходам от кратности маршрута волочения проволоки.

Согласно приведенной на рис. 4 зависимости, с увеличением кратности волочения растут затраты энергии на волочение проволоки. Прирост полной мощности при увеличении числа проходов с пяти до восьми составил 7,37 кВт. Основной вклад в рост энергозатрат вносит работа неоднородной деформации и работа сил трения. Работа однородной деформации определяется суммарной деформацией, т. е. начальным и конечным диаметрами проволоки. Работа сил трения при умень-

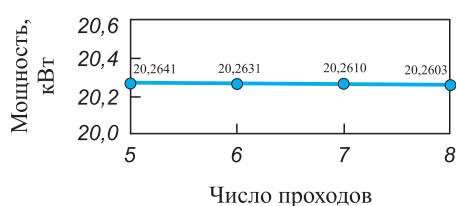


Рис. 1. Суммарная однородная работа в зависимости от кратности маршрута волочения

Fig. 1. Total uniform work depending on the number of passes

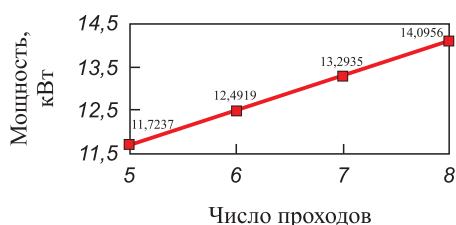


Рис. 2. Суммарная работа сил трения в зависимости от кратности маршрута волочения

Fig. 2. Total friction forces work depending on the number of passes

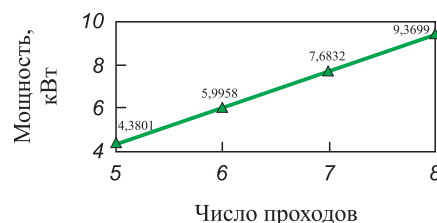


Рис. 3. Работа неоднородной деформации в зависимости от кратности маршрута волочения

Fig. 3. Redundant deformation work depending on the number of passes

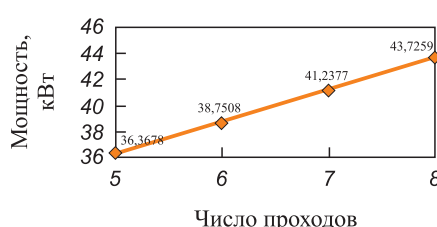


Рис. 4. Полная работа в зависимости от кратности маршрута волочения

Fig. 4. Total work depending on the number of passes

шении обжатия и неизменном коэффициенте трения также уменьшается. Для рассматриваемых маршрутов волочения проволоки снижение работы сил трения на отдельных проходах компенсируется повышением числа проходов при увеличении кратности волочения, поэтому с ростом кратности суммарная работа сил трения также растет. Работа неоднородной деформации определяется формой очага деформации, т. е. величиной Δ -фактора. При повышении кратности волочения Δ -фактор увеличивается, что приводит к росту работы неоднородной деформации.

В работе [9] были произведены расчеты и разработаны рекомендации по выбору кратности маршрута волочения проволоки марки 70 с учетом различных факторов. Выводы работы [9] соответствуют полученным выше выводам. В работе показано, что уменьшение кратности волочения с 10 до 9 проходов повышает степень однородности деформации по сечению проволоки при снижении энергозатрат на волочение.

Выводы

Увеличение кратности волочения при неизменных начальном и конечном диаметрах проволоки приводит к росту энергозатрат на волочение. Вклад в рост энергозатрат вносят работа сил трения и работа неоднородной деформации. Для исследуемых маршрутов волочения проволоки доля прироста мощности, затрачиваемой на трение, составила 32 %, а доля прироста мощности, затрачиваемой на совершение неоднородной деформации – 68 %. Увеличение работы сил трения вызвано повышением значения фактора формы очага деформации (Δ -фактора) при уменьшении среднего обжатия и ростом числа проходов. Работа неоднородной деформации вносит значительный вклад в рост затрат при повышении кратности маршрута волочения. Расчеты без учета неоднородной деформации приводят к заниженной оценке энергозатрат на волочение проволоки. Работа неоднородной деформации определяется значением Δ -фактора очага деформации и должна учитываться при проектировании маршрутов волочения стальной проволоки. Однородная работа определяется начальным и конечным диаметрами проволоки и не вносит вклад в увеличение затрат на волочение проволоки с ростом кратности волочения. При проектировании маршрута волочения стальной проволоки с целью уменьшения затрат энергии на волочение можно рекомендовать увеличение числа проходов и единичных обжатий с учетом других технологических параметров волочения проволоки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Wright R.N. Wire Technology: Process Engineering and Metallurgy. Butterworth-Heinemann; 2016:340.
- Enghag P. Steel Wire Technology. 2nd ed. Örebro: Applied materials technology. Materialteknik HB; 2002:311.
- Dieter G.E., Kuhn H.A., Semiatin S.L. Handbook of Workability and Process Design. Materials Park, Ohio: ASM International; 2003:409.
- Белалов Х.Н., Клековкин А.А., Клековкина Н.А., Гун Г.С., Корчунов А.Г., Полякова М.А. Стальная проволока: Монография. Магнитогорск: Издательство Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова; 2011:395.
- Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. Москва: Металлургия; 1971:448.
- Lee S.-K., Lee S.-B., Kim B.-M. Process design of multistage wet wire drawing for improving the drawing speed for 0.72wt% C steel wire. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010;210(5):776–783.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2010.01.007>
- Головизнин С.М., Маминов Г.И., Терских Д.С., Головизнин Д.С. Влияние кратности маршрута и скорости волочения на распределение микротвердости по сечению стальной проволоки. *Металлург*. 2020;(2):56–61.
Goloviznin S.M., Maminov G.I., Terskikh D.S., Goloviznin D.S. Influence of route multiplicity and drawing rate on microhardness distribution over steel wire cross section. *Metallurgist*. 2020;64(1-2):145–152.
<https://doi.org/10.1007/s11015-020-00976-z>
- Харитонов В.А., Галлямов Д.Э. Производство пружинной проволоки. Магнитогорск: Издательство Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова; 2013:153.
- Маминов Г.И., Головизнин С.М., Терских Д.С. Разработка рекомендаций по выбору кратности маршрута волочения стальной проволоки. *Моделирование и развитие процессов ОМД*. 2018;(26):39–44.
Maminov G.I., Goloviznin S.M., Terskikh D.S. Recommendations development for steel wire drawing number of passes. *Modelirovanie i razvitie protsessov OMD*. 2018;(26):39–44. (In Russ.).
- Маминов Г.И., Головизнин С.М. Влияние кратности маршрута на условия волочения стальной проволоки. *Моделирование и развитие процессов ОМД*. 2018;(24):53–60.
Maminov G.I., Goloviznin S.M. The influence of pass schedule on the steel wire drawing conditions. *Modelirovanie i razvitie protsessov OMD*. 2018;(24):53–60. (In Russ.).
- Зюзин В.И., Клековкина Н.А., Харитонов В.А. и др. Ресурсосбережение в метизном производстве: Теория и практика работы Белорецкого металлургического комбината. Коллективная монография. Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова; 2001:163.
- Radionova L.V., Lisovsky R.A., Lezin V.D. Theory of Energy Conservation as the Basis for the Design of Wire Drawing. In: *Proceedings of the 6th Int. Conf. on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. ICIE 2021. Radionov A.A., Gasiyarov V.R. eds. Springer, Cham; 2021:1150–1163.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_134
- Харитонов В.А., Головизнин С.М. Проектирование режимов высокоскоростного волочения проволоки на основе моделирования: Монография. Магнитогорск:

- Издательство Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова; 2011:117.
14. Sas-Boca I.M., Tintelecan M., Pop M., Iluțiu-Varvara D.-A., Miha A.M. The wire drawing process simulation and the optimization of geometry dies. *Procedia Engineering*. 2017;181: 187–192. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.368>
 15. Suliga M., Wartacz R., Kostrzewa J., Hawryluk M. Assessment of the possibility of reducing energy consumption and environmental pollution in the steel wire manufacturing process. *Materials*. 2023;16(5):1940. <https://doi.org/10.3390/ma16051940>
 16. Backofen W.A. Deformation Processing. Reading – Mass: Addison-Wesley; 1972:326.
 17. Caddell R.M., Atkins A.G. The influence of redundant work when drawing rods through conical dies. *Journal of Engineering for Industry*. 1968;90(2):411–416. <https://doi.org/10.1115/1.3604653>
 18. Hwang J.-K. Impact of die radius in a streamlined die during wire drawing. *Applied Sciences*. 2021;11(9):3922. <https://doi.org/10.3390/app11093922>
 19. Kajino S., Tanai Y., Shioda M., Hasegawa Y., Kubota K. Improving accuracy of aluminum alloy wire drawing force prediction by examining friction and redundant work. *Journal of Manufacturing Processes*. 2024;124:1449–1458. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.06.061>
 20. Majzooobi G.H., Saniee F.F., Aghili A. An investigation into the effect of redundant shear deformation in bar drawing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008; 201(1-3):133–137. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.127>
 21. Park S.-C., Lee K.-H. Prediction method for shape drawing force considering redundant deformation. *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*. 2023;47(6):336–342. <https://doi.org/10.5916/jamet.2023.47.6.336>

Сведения об авторах

Сергей Михайлович Головизнин, к.т.н., доцент кафедры металлургии и стандартизации, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
ORCID: 0000-0002-4751-9198
E-mail: smgoloviznin@magtu.ru

Илья Юрьевич Брюханов, лаборант кафедры металлургии и стандартизации, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
ORCID: 0009-0005-9731-2127
E-mail: bryuhanov_ilya@mail.ru

Information about the Authors

Sergei M. Goloviznin, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Metallurgy and Standardization”, Nosov Magnitogorsk State Technical University
ORCID: 0000-0002-4751-9198
E-mail: smgoloviznin@magtu.ru

Ilya Yu. Bryukhanov, Laboratory Assistant of the Chair “Metallurgy and Standardization”, Nosov Magnitogorsk State Technical University
ORCID: 0009-0005-9731-2127
E-mail: bryuhanov_ilya@mail.ru

Вклад авторов

С. М. Головизнин – научное руководство, формирование основной концепции.
И. Ю. Брюханов – обзор литературы, анализ полученных данных, общая редакция работы.

Contribution of the Authors

S. M. Goloviznin – scientific guidance, conceptualization.
I. Yu. Bryukhanov – literary review, data analysis, general editing.

Поступила в редакцию 23.12.2024
 После доработки 04.02.2025
 Принята к публикации 23.04.2025

Received 23.12.2024
 Revised 04.02.2025
 Accepted 23.04.2025