

ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ METAL FORMING

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 621.77

DOI: 10.18503/1995-2732-2026-24-2-67-74



ВЛИЯНИЕ МАРШРУТА ВОЛОЧЕНИЯ НА КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ СТАЛЕМЕДНОЙ ПРОВОЛОКИ

Терентьев Д.В., Харитонов В.А., Шеметова Е.С., Усанов М.Ю., Платов С.И.

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

Аннотация. Процесс изготовления биметаллической проволоки включает два этапа: получение заготовки (катанки) и готовой продукции (проволоки). На основе научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, проводившихся в Магнитогорском горно-металлургическом институте им. Г.И. Носова, учеными была разработана технология производства сталемедной катанки методом твердофазного соединения металлов и внедрена на одном из предприятий г. Магнитогорска. Данная технология позволила значительно повысить сцепление оболочки с сердечником и устойчивость процесса волочения катанки в проволоку. Однако при этом вопрос снижения затрат на производство биметаллической проволоки остался нерешенным. Поэтому важным является расчет эффективного маршрута волочения, который должен обеспечить получение качественной проволоки с минимальными затратами на ее изготовление. Для анализа выбран существующий маршрут изготовления проволоки диаметром 1,15 мм, включающий три передела и 20 протяжек на одном из предприятий г. Магнитогорска, а также предлагаемый маршрут волочения, где использовали методику, разработанную в нашем университете, которая основывается на оценке напряженно-деформированного состояния проволоки в очаге деформации. Результаты расчетов обеспечивают возможность получения проволоки заданного уровня качества при минимальных энерго- и материалозатратах. Анализ действующего и предлагаемого маршрутов волочения показал, что последний обеспечивает устойчивость процесса (значения коэффициентов запаса ниже предельных), требуемое качество проволоки за счет обеспечения равномерной деформации по сечению проволоки и высокую производительность за счет повышения стойкости волок и уменьшения суммарной длины проволоки, проходящей через волоки. При этом количество протяжек сократилось на 7 или 35%, экономия электроэнергии составила 23%. Это обеспечивает снижение затрат на покупку оборудования и амортизационные отчисления также на 35%.

Ключевые слова: сталемедная проволока, волочение, маршрут, кратность, конкурентоспособность

© Терентьев Д.В., Харитонов В.А., Шеметова Е.С., Усанов М.Ю., Платов С.И., 2026

Для цитирования

Влияние маршрута волочения на конкурентоспособность сталемедной проволоки / Терентьев Д.В., Харитонов В.А., Шеметова Е.С., Усанов М.Ю., Платов С.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2026. Т. 24. №2. С. 67-74. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-67-74>



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

INFLUENCE OF THE DRAWING ROUTE ON THE COMPETITIVENESS OF STEEL-COPPER WIRE

Terentyev D.V., Kharitonov V.A., Shemetova E.S., Usanov M.Yu., Platov S.I.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The bimetallic wire manufacturing process involves two stages: the production of the blank (rod) and the finished product (wire). Based on the research and development conducted at the Nosov Magnitogorsk Mining and Metallurgical Institute, scientists have developed a technology for producing steel-copper rod using solid-phase metal bonding and implemented it at one of the enterprises in Magnitogorsk. This technology has significantly improved the adhesion of the sheath to the core and the stability of the wire rod drawing process. However, the issue of reducing the cost of bimetallic wire production remains unresolved. Therefore, the calculation of an efficient drawing route is of great importance, as it should ensure the production of high-quality wire with minimal manufacturing costs. For the analysis, an existing route for producing wire with a diameter of 1.15 mm has been selected, which includes three processing stages and 20 drawing passes at one of the enterprises in Magnitogorsk. In addition, a proposed drawing route has been considered, developed using a methodology created at our university, based on the evaluation of the stress-strain state of the wire in the deformation zone. The calculation results make it possible to obtain wire of the required quality level with minimal energy and material consumption. An analysis of the existing and proposed drawing routes has showed that the latter ensures process stability (safety factor values remain below the limiting values), the required wire quality due to uniform deformation across the wire cross-section, and high productivity by increasing die life and reducing the total length of wire passing through the dies. At the same time, the number of drawing passes has been reduced by 7 (or 35%), and electricity consumption has decreased by 23%. This also leads to a 35% reduction in equipment purchase costs and depreciation expenses.

Key words: steel-copper wire, drawing, route, pass multiplicity, competitiveness

For citation

Terentyev D.V., Kharitonov V.A., Shemetova E.S., Usanov M.Yu., Platov S.I. Influence of the Drawing Route on the Competitiveness of Steel-Copper Wire. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2026, vol. 24, no. 2, pp. 67-74. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2026-24-2-67-74>

Введение

Современный этап функционирования и развития многих отраслей промышленности требует производства слоистых композиционных металлов, сочетающих в себе высокие электропроводные и прочностные свойства. Наибольшее и всевозрастающее применение находит сталемедная проволока, которая используется в качестве проводниковых и силовых элементов подвески контактной сети электрифицированных железных дорог, телефонных проводов, специальных микрокабелей, авиа- и сейсмографических кабелей, выводов радиокабелей и компонентов электронной техники [1]. Также происходит разработка и внедрение новых видов биметаллической проволоки, таких как платиниты, стальная легированная, из редкоземельных металлов, специального назначения [2].

Одним из важных показателей, определяющих уровень и объем потребления биметаллической проволоки, является ее конкурентоспособность, оцениваемая свойствами проволоки и затратами на ее производство и обеспечиваемая уровнем технического процесса ее изготовления.

Процесс изготовления биметаллической проволоки включает два этапа: получение заготовки (катанки) и готовой продукции (проволоки). Основной объем промышленного производства сталемедной проволоки в Российской Федерации (ранее в СССР) и

ведущих странах мира долгое время производился на основе металлургического способа. Технология производства включает в себя операции травления стального сердечника, получения биметаллического слитка путем заливки стального сердечника жидкой медью, прокатку слитка в катанку на сортовом стане и волочение на готовый размер на станах сухого и мокрого волочения, при необходимости с промежуточными отжигами [3]. Технология, несмотря на высокую стоимость и затраты, не обеспечивала требуемого сцепления оболочки со стержнем, что при дальнейшем волочении приводило к потере устойчивости процесса путем обрыва оболочки и ее стержня [4]. Для устранения этого при волочении использовали сравнительно небольшие единичные обжатия (вытяжки), что требовало многократных маршрутов волочения, увеличение сложности волочильного оборудования и другой инфраструктуры, а также приводило к дополнительным затратам.

На основе научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок, проводившихся совместно с Магнитогорским калибровочным заводом и Магнитогорским горно-металлургическим институтом им. Г.И. Носова, была разработана технология производства сталемедной катанки методом твердофазного соединения металлов и внедрена на предприятии ООО «ЗМИ-Профит», г. Магнитогорск [3-5].

Технологический процесс включает: одновременную подачу стальной проволоки и медной ленты; очистку поверхности стального сердечника электролитоплазменной обработкой и с очисткой поверхности медной ленты стальными щетками; сваривание продольного шва медной оболочки; однокомпонентную деформацию медной оболочки сталемедной заготовки на 20–25%; высокоскоростной поточный нагрев с промежуточными выдержками в течение 1–2 с в пароводяной среде; двухстадийную совместную деформацию слоистой заготовки, проволоки [3]. Это позволило значительно повысить сцепление оболочки с сердечником и устойчивость процесса волочения катанки в проволоку. Однако при этом вопрос снижения затрат на производство биметаллической проволоки остался нерешенным. Во-первых, новый способ получения катанки нельзя считать дешевым, во-вторых, отечественные производители практически не изменили подход к выбору среднего единичного обжатия, оставив его малым. Кроме того, при этом не были учтены особенности волочения биметаллической проволоки, которые использовали зарубежные производители подобной продукции [6, 7].

В связи с чем целью данной работы является оценка влияния кратности маршрута волочения на показатели качества проволоки и затраты на ее производство.

Материалы и методы исследования

Исследования проводились на одном из предприятий г. Магнитогорска. На этом предприятии изготавливают биметаллическую катанку диаметром 7,10 мм методом твердофазного соединения, а также осуществляют волочение готовой биметаллической проволоки диаметрами от 1,15 до 4,0 мм. Материал катанки: сердечник – сталь 10; оболочка – медь М1.

Волочение осуществляется в монолитных волоках с применением волочильных машин 6-кратных (Рубин 16/6) и 7-кратных (Рубин 8/7). Для анализа нами выбран маршрут изготовления проволоки минимального диаметра 1,15 мм, включающий три передела и 20 протяжек по следующей схеме:

1-й передел (машина 6-кратная):

7,10 $\frac{16\%}{}$ 6,50 $\frac{18\%}{}$ 5,90 $\frac{19\%}{}$ 5,30 $\frac{19\%}{}$ 4,77 $\frac{18\%}{}$ 4,30 $\frac{15\%}{}$ 3,96;

2-й передел (машина 7-кратная):

3,96 $\frac{17\%}{}$ 3,60 $\frac{16\%}{}$ 3,30 $\frac{15\%}{}$ 3,05 $\frac{14\%}{}$ 2,82 $\frac{16\%}{}$ 2,58 $\frac{17\%}{}$
2,35 $\frac{16\%}{}$ 2,15;

3-й передел (машина 7-кратная):

2,15 $\frac{18\%}{}$ 1,95 $\frac{18\%}{}$ 1,77 $\frac{17\%}{}$ 1,61 $\frac{16\%}{}$ 1,47 $\frac{16\%}{}$ 1,35 $\frac{15\%}{}$
1,24 $\frac{14\%}{}$ 1,15.

При анализе и расчете маршрутов волочения использовали методику, разработанную в нашем университете [9, 10, 12], которая основывается на оценке напряженно-деформированного состояния проволоки в очаге деформации. Данная методика обеспечивает возможность получения проволоки заданного уровня

качества при минимальных энерго- и материалозатратах. Особенности волочения биметаллической проволоки были учтены введением в методику расчета рекомендаций, изложенных в источниках [4, 8]. По этой же методике был рассчитан новый малооборотный маршрут волочения:

7,10 $\frac{28\%}{}$ 6,02 $\frac{27\%}{}$ 5,13 $\frac{27\%}{}$ 4,38 $\frac{26\%}{}$ 3,76 $\frac{26\%}{}$ 3,24 $\frac{25\%}{}$
2,81 $\frac{25\%}{}$ 2,44 $\frac{25\%}{}$ 2,13 $\frac{24\%}{}$ 1,87 $\frac{23\%}{}$ 1,64 $\frac{23\%}{}$ 1,45 $\frac{22\%}{}$
1,29 $\frac{21\%}{}$ 1,15.

В качестве основных критериев оценки волочения были взяты устойчивость процесса волочения (коэффициент запаса прочности), так как метод твердофазного соединения гарантирует требуемое сцепление медной оболочки со стальным сердечником [3]; качество проволоки (дельта-фактор – равномерность деформации – Δ); производительность процесса (стойкость волок).

Устойчивый процесс волочения возможен при соблюдении неравенства $\sigma_{\text{вол}} < \sigma_{\text{T}}$, иначе пластическая деформация будет продолжаться и после выхода протягиваемого металла из волочильного инструмента. В результате происходят затяжки (утонения) проволоки и частые обрывы. Для ведения устойчивого (безобрывного) процесса волочения должно строго соблюдаться в течение всего процесса волочения следующее соотношение [11]:

$$\gamma_3 = \frac{\sigma_{\text{T}}}{\sigma_{\text{вол}}}, \quad (1)$$

где σ_{T} , $\sigma_{\text{вол}}$ – соответственно предел текучести и напряжение волочения на выходе проволоки из зоны деформации; γ_3 – коэффициент запаса прочности при волочении (1,4–2,0). Значение 1,4 считается минимальным, при котором еще можно гарантировать отсутствие обрывов, а 2,0 – это уже запас, который позволяет избежать проблем при возможных отклонениях в материале или условиях процесса.

Для оценки вероятности разрушения заготовки используются значения гидростатического напряжения, а для оценки влияния геометрии рабочего канала волоки – дельта-фактор (неравномерность Δ). Дельта-фактор зависит от геометрии рабочего канала волоки и степени деформации. Принимаемое им значение характеризует глубину проникновения сжимающих напряжений, так называемых «конусов скольжения» в очаге деформации при волочении [10]. Если дельта-фактор находится в пределах 1,0 до 2,0, то в очаге деформации действуют сжимающие напряжения на оси проволоки и обеспечивается высокая равномерность деформации.

Дельта-фактор определяли по следующей формуле [11]:

$$\Delta = \frac{\alpha}{r} (1 + \sqrt{1-r})^2, \quad (2)$$

где r – обжатие за проход; α – полуугол рабочего конуса волоки, рад.

Стойкость волок определяет как производительность процесса волочения, путем воздействия на коэффициент использования оборудования, так и издержки производства. Высокий износ волок снижает коэффициент использования оборудования из-за внеплановой остановки оборудования для замены волок и требует дополнительной перестановки волок, что приводит к росту затрат.

Стойкость волок во многом определяется силой трения, действующей на контакте металл-волокна, которое определяется зависимостью [13]

$$F = fN, \quad (3)$$

где f – коэффициент трения; N – сила нормального давления, Па.

В качестве оценки критерия стойкости волок принимаем нормальное напряжение, действующее в очаге деформации. В основу расчета было взято упрощенное условие пластичности при волочении проволоки в монолитных волоках [13]:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_T, \quad (4)$$

где σ_1 – напряжение волочения, кг/мм²; σ_2 – нормальное напряжение, кг/мм²; σ_T – предел текучести, кг/мм².

В проводимых сравнительных оценочных расчетах за показатель сопротивления деформации приняты значение предела прочности.

Стойкость волок определяется не только трением, но и длиной проволоки, проходящей через них.

Суммарная длина проволоки, прошедшей через все волоки [13], определяется как

$$L_{др.деф} = \mu_{\Sigma} \frac{\delta_{\Sigma}}{\delta_{сд}}, \quad (5)$$

где $\delta_{сд}$ – среднее значение обжатий,

Таблица 1. Существующий маршрут волочения сталемедной проволоки диаметром 1,15 мм, 1-й передел
Table 1. Existing route for drawing steel-copper wire with a diameter of 1.15 mm, 1st stage

Номер перехода	0 (заг.)	1	2	3	4	5	6
Диаметр проволоки, мм	7,10	6,50	5,90	5,30	4,77	4,30	3,96
Обжатие единичное, %		16,19	17,61	19,30	19,00	18,74	15,19
Обжатие суммарное, %		16,19	30,95	44,28	54,86	63,32	68,89
Вытяжка единичная		1,19	1,21	1,24	1,23	1,23	1,18
Суммарная вытяжка		1,19	1,45	1,79	2,22	2,73	3,21
Полуугол волоки, град		6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Коэффициент трения		0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Степень неравномерности Δ		2,37	2,16	1,95	1,99	2,02	2,54
Площадь проволоки F , мм ²	39,59	33,18	27,34	22,06	17,87	14,52	12,32
Усилие волочения, кН		4,94	4,58	4,21	3,55	3,00	2,23
Усилие волочения суммарное, кН		4,94	9,52	13,73	17,28	20,28	22,51
Напряжение волочения, кг/мм ²		14,89	16,74	19,08	19,85	20,66	18,14
Предел прочности проволоки, кг/мм ²	41,00	42,85	44,98	47,46	50,03	52,69	54,91
Коэффициент запаса прочности		2,81	2,62	2,42	2,46	2,49	2,97
Нормальное напряжение, кг/мм ²		27,03	27,17	27,14	28,90	30,70	35,66

$$\delta_{сд} = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n}{n},$$

n – число переходов.

Чем больше дробность деформации и, соответственно, больше число переходов при одинаковой величине суммарной деформации, тем больше общая длина проволоки, прошедшей через все переходы, и тем выше затраты на волочение единицы массы готовой продукции.

Полученные результаты и их обсуждение

С использованием новой методики [9, 10, 12] был проведен расчет существующего маршрута волочения (табл. 1–3), а также предлагаемого маршрута волочения (табл. 4).

На основе результатов полученных расчетов провели сравнительный анализ существующего и предлагаемого маршрутов волочения на устойчивость процесса волочения (коэффициент запаса прочности), качество проволоки (дельта-фактор – равномерность деформации Δ), производительность процесса (стойкость волок) для сталемедной проволоки (табл. 5), а также построили графики (рис. 1-3, где 1, 2, 3 – номер передела на существующем маршруте волочения).

В табл. 5 проведен сравнительный анализ существующего и предлагаемого маршрутов волочения для проволоки диаметром 1,15 мм. Видно, что у предлагаемого маршрута волочения количество протяжек (количество барабанов, двигателей, смазочного материала) сократилось на 35%, суммарное усилие волочения снизилось на 23%. Стойкость волок определяется не только трением, но и длиной проволоки, проходящей через них. Известно, что при одинаковой величине суммарной деформации общая длина проволоки, прошедшей через все волоки маршрута, растет с увеличением кратности волочения. Это повышает трудоемкость процесса и затраты энергии. Так, суммарная длина проволоки на действующем маршруте волочения на 29 % больше, чем проволоки, полученной по предлагаемому маршруту [13].

Таблица 2. Существующий маршрут волочения сталемедной проволоки диаметром 1,15 мм, 2-й пердел
 Table 2. Existing route for drawing steel-copper wire with a diameter of 1.15 mm, 2nd stage

Номер перехода		1	2	3	4	5	6	7
Диаметр проволоки, мм	3,96	3,60	3,30	3,05	2,82	2,58	2,35	2,15
Обжатие единичное, %		17,36	15,97	14,58	14,51	16,30	17,03	16,3
Обжатие суммарное, %		74,29	78,40	81,55	84,22	86,80	89,04	90,83
Вытяжка единичная		1,21	1,19	1,17	1,17	1,19	1,21	1,19
Суммарная вытяжка		3,89	4,63	5,42	6,34	7,57	9,13	10,91
Полуугол волоки, град		6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Коэффициент трения		0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Степень неравномерности		2,20	2,41	2,66	2,67	2,36	2,24	2,36
Площадь проволоки F , мм ²		10,18	8,55	7,31	6,25	5,23	4,34	3,63
Усилие волочения, кН		2,16	1,77	1,46	1,30	1,24	1,12	0,95
Усилие волочения суммарное, кН		24,67	26,44	27,9	29,20	30,44	31,56	32,50
Напряжение волочения, кг/мм ²		21,18	20,68	20,02	20,75	23,77	25,82	26,04
Предел прочности, кг/мм ²		57,59	60,15	62,57	65,07	68,03	71,28	74,52
Коэффициент запаса прочности		2,66	2,85	3,06	3,08	2,80	2,70	2,80
Нормальное напряжение, кг/мм ²		36,61	39,47	42,37	44,32	44,26	45,46	48,48

Таблица 3. Существующий маршрут волочения сталемедной проволоки диаметром 1,15 мм, 3-й пердел
 Table 3. Existing route for drawing steel-copper wire with a diameter of 1.15 mm, 3rd stage

Номер перехода		1	2	3	4	5	6	7
Диаметр проволоки, мм	2,15	1,95	1,77	1,61	1,47	1,35	1,24	1,15
Обжатие единичное, %		17,74	17,61	17,26	16,64	15,66	15,63	13,99
Обжатие суммарное, %		17,74	32,22	43,92	53,25	60,57	66,74	97,01
Вытяжка единичная		1,22	1,21	1,21	1,2	1,19	1,19	1,16
Суммарная вытяжка		1,22	1,48	1,78	2,14	2,54	3,01	3,5
Полуугол волоки, град		6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Коэффициент трения		0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Степень неравномерности		2,15	2,16	2,21	2,3	2,46	2,47	2,78
Площадь проволоки F , мм ²		2,99	2,46	2,04	1,7	1,43	1,21	1,04
Усилие волочения, кН		0,88	0,75	0,64	0,54	0,46	0,4	0,33
Усилие волочения суммарное, кН		0,88	1,63	2,27	2,81	3,27	3,67	4,00
Напряжение волочения, кг/мм ²		29,31	30,57	31,53	32,02	31,83	33,17	31,59
Предел прочности, кг/мм ²		78,25	82,13	86,11	90,12	94,04	98,12	101,89
Коэффициент запаса прочности		2,61	2,62	2,67	2,75	2,89	2,90	3,17
Нормальное напряжение, кг/мм ²		48,94	51,56	54,58	58,10	62,21	64,95	70,30

Таблица 4. Предлагаемый маршрут волочения сталемедной проволоки диаметром 1,15 мм
 Table 4. Proposed route for drawing steel-copper wire with a diameter of 1.15 mm

Номер перехода	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Диаметр проволоки, мм	7,10	6,02	5,13	4,38	3,76	3,24	2,81	2,44	2,13	1,87	1,64	1,45	1,29	1,15
Обжатие единичное, %		28,11	27,38	27,10	26,31	25,75	24,78	24,60	23,80	22,92	23,09	21,83	20,85	20,53
Обжатие суммарное, %		28,11	47,79	61,94	71,95	79,18	84,34	88,19	91,00	93,06	94,66	95,83	96,70	97,38
Вытяжка		1,39	1,38	1,37	1,36	1,35	1,33	1,33	1,31	1,30	1,30	1,28	1,26	1,26
Суммарная вытяжка		1,39	1,92	2,63	3,57	4,80	6,38	8,47	11,11	14,42	18,74	23,98	30,29	38,12
Полуугол, град.		6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6
Коэффициент трения		0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
Степень неравномерности		1,27	1,31	1,33	1,37	1,41	1,47	1,49	1,54	1,61	1,60	1,70	1,79	1,83
Площадь проволоки F , мм ²	39,59	28,46	20,67	15,07	11,10	8,24	6,20	4,68	3,56	2,75	2,11	1,65	1,31	0,55
Усилие волочения, кН		7,16	5,50	4,29	3,32	2,60	2,03	1,63	1,29	1,03	0,85	0,67	0,54	0,55
Усилие волочения суммарное, кН		7,16	12,66	16,95	20,28	22,88	24,91	26,54	27,83	28,85	29,70	30,37	30,91	0,52
Напряжение волочения, кг/мм ²		25,17	26,59	28,50	29,90	31,57	32,71	34,87	36,20	37,35	40,14	40,60	41,35	1,1
Предел прочности, кг/мм ²	41,00	44,53	48,24	52,21	56,35	60,70	65,18	69,95	74,87	79,91	85,33	90,75	96,21	1,04
Коэффициент запаса прочности		1,70	1,74	1,76	1,82	1,85	1,92	1,94	2,00	2,07	2,06	2,17	2,26	99,06
Нормальное напряжение, кг/мм ²		18,83	21,65	23,71	26,45	29,13	32,47	34,88	38,67	42,56	44,19	50,13	54,86	0,45

Таблица 5. Сравнительный анализ показателей существующего и предлагаемого маршрутов волочения
 Table 5. Comparative analysis of the indicators of the existing and proposed drawing routes

Показатели	Существующий маршрут волочения	Предлагаемый маршрут волочения	Эффективность предлагаемого маршрута волочения, %
Количество протяжек (количество барабанов, двигателей, мыльниц)	20	13	35,0
Усилие волочения суммарное, кН	40	31	23,0
Количество волок	20	13	35,0
Суммарная длина проволоки на маршруте волочения, м	5,71	4,04	29,0

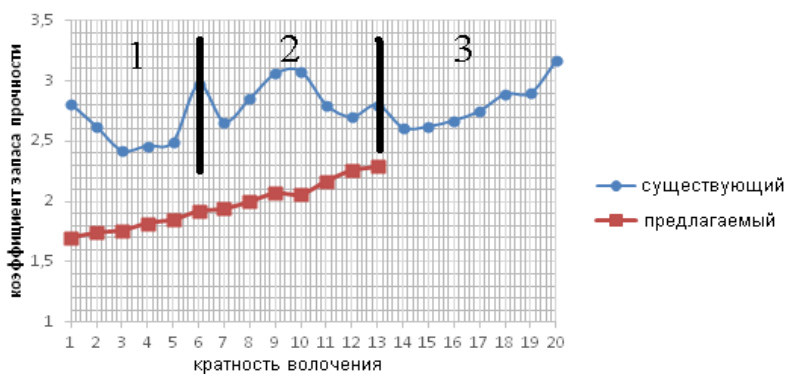


Рис. 1. Изменение коэффициента запаса прочности от кратности маршрутов волочения
 Fig. 1. Change in the safety factor depending on the number of drawing routes

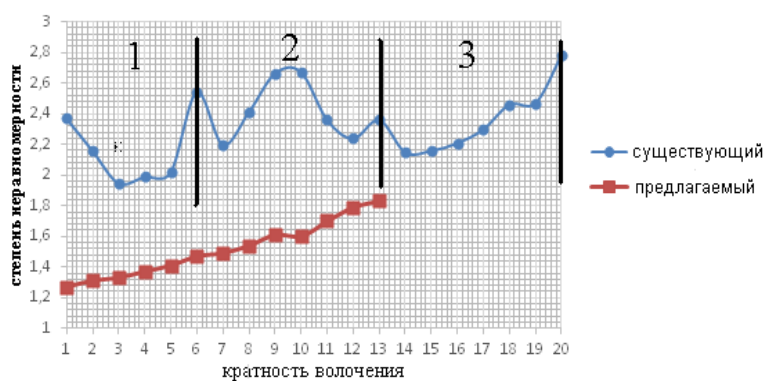


Рис. 2. Изменение степени неравномерности (Δ) в очаге деформации (значения дельта-фактора) от кратности маршрутов волочения
 Fig. 2. Change in the degree of unevenness (Δ) in the deformation zone (delta factor values) depending on the number of drawing routes

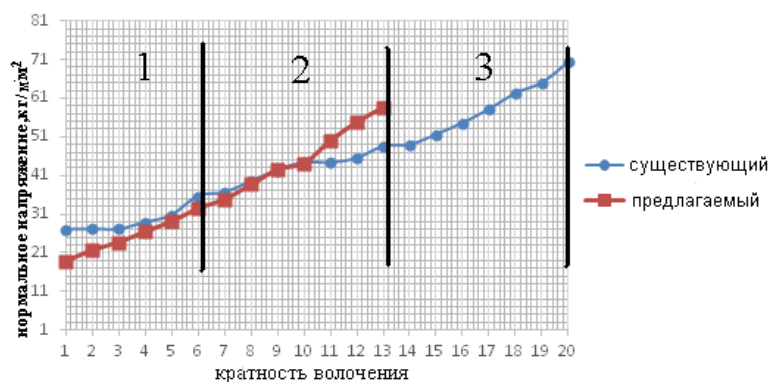


Рис. 3. Изменение нормального напряжения от кратности маршрутов волочения
 Fig. 3. Change in normal stress depending on the number of drawing routes

На графике на **рис. 1** показано изменение коэффициента запаса прочности от кратности маршрутов волочения. Из графика видно, что предлагаемый маршрут волочения обеспечивает высокую устойчивость процесса (значения коэффициентов запаса ниже предельных).

Изменение степени неравномерности в очаге деформации (значения дельта-фактора) от кратности маршрутов волочения представлен на графике на **рис. 2**. Из графика видно, что дельта-фактор на существующем маршруте значительно превышает значение 2,0, то есть здесь преобладают напряжения растяжения на оси проволоки, что может привести к ее разрушению. Существующий маршрут волочения неравномерный, присутствуют выраженные скачки. Предлагаемый маршрут волочения – равномерный.

График на **рис. 3** показывает, что, несмотря на значительное сокращение количества волок, меньшее количество волок работает в условиях трения лучше, чем волокна в действующем маршруте. Это позволяет сделать вывод о возможности снижения прямых затрат на волокна и повышения производительности процесса.

Заключение

Сравнительный технико-экономический анализ действующего и предлагаемого маршрутов волочения показал, что последний обеспечивает высокую устойчивость процесса (значения коэффициентов запаса ниже предельных), требуемое качество проволоки за счет обеспечения равномерной деформации по сечению проволоки и высокую производительность за счет повышения стойкости волок и уменьшения суммарной длины проволоки, проходящей через волокна. При этом количество протяжек сократилось на 7 или 35%. Это обеспечивает снижение затрат на покупку оборудования и амортизационные отчисления также на 35%. В условиях предприятия из процесса получения проволоки диаметром 1,15 мм может быть выведена семикратная волочильная машина, а при модернизации процесса вместо двух машин целесообразно установить одну тринадцатикратную машину, что значительно сократит затраты.

Список источников

1. Повышение качества сталемедной продукции и совершенствование технологии твердофазного соединения компонентов биметалла / Рашников С.Ф., Щербо Ю.А., Ситников И.В., Сычев А.Ю., Чукин М.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. №4 (16). С. 52-54.
2. Андреев А.В. Способ изготовления биметаллической проволоки из разнородных металлов холодным волочением: патент на изобретение RU 2628232 С2, 15.08.2017. Заявка № 2016103755 от 04.02.2016.
3. Стабильность процессов производства сталемедной катанки методом твердофазного соединения: монография / Чукин М.В., Ситников И.В., Щербо Ю.А., Копцева Н.В. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2006. 234 с.
4. Стальная проволока: монография / Х.Н. Белалов, А.А. Клековкин, Н.А. Клековкина, Г.С. Гун, А.Г. Корчунов, М.А. Полякова. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2011. 689 с.

5. Огарков Н.Н., Шеметова Е.С. Условие контакта между сердечником и оболочкой, исключающее их расслаивание во внеконтактной зоне при волочении // Сталь. 2010. №12. С. 48-50.
6. Investigation wavy interface forming and stretching in severe plastic deformed copper/steel bimetallic rod. Rashidi A.M., Elemadi M. Mech. Adv. Mater. And Struct. 2021. 28, no. 24, pp. 2595-2604.
7. Investigation of the Bimetal Clad Drawing by Uper Bound Method Malaki Massoud, Maleki Hamid, Malaki Mohsen, Roohani Hamid Reza. J. Mater. Eng. And Perform. 2013. 22, no. 4, pp. 943-951.
8. Битков В.В. Анализ неоднородности деформации при волочении композиционных прутков и проволоки // Заготовительные производства в машиностроении. 2010. № 8. С. 21-27.
9. Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Совершенствование деформационных режимов волочения проволоки из углеродистых марок стали в монолитных и роликовых волоках: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им.Г.И. Носова, 2020. 133 с.
10. Усанов М.Ю. Совершенствование технологии изготовления углеродистой проволоки на основе повышения эффективности деформационных режимов волочения: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова. Магнитогорск, 2018. 16 с.
11. Харитонов В.А., Галлямов Д.Э. Производство пружинной проволоки: учеб. пособие. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 151 с.
12. Оценка напряженно-деформированного состояния сталемедной проволоки при волочении в монолитной волоке на основе моделирования / Терентьев Д.В., Усанов М.Ю., Шеметова Е.С., Платов С.И., Харитонов В.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т.22. №3. С. 170-177.
13. Никифоров Б.А., Харитонов В.А., Копьев А.В. Технология волочения проволоки и плоченой ленты: учеб. пособие. Магнитогорск: МГТУ, 1999. 354 с.

References

1. Rashnikov S.F., Shcherbo Yu.A., Sitnikov I.V., Sychev A.Yu., Chukin M.V. Improvement of the quality of steel-copper products and development of solid-phase bonding technology for bimetal components. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2006;(4(16)):52-54. (In Russ.)
2. Andreev A.V. *Sposob izgotovleniya bimetallicheskoy provoloki iz raznorodnykh metallov kholodnym volocheniem* [Method for manufacturing bimetallic wire from dissimilar metals by cold drawing]. Patent RU, no. 2628232 C2, 2017.
3. Chukin M.V., Sitnikov I.V., Shcherbo Yu.A., Koptseva N.V. *Stabilnost protsessov proizvodstva stalemednoy kataniki metodom tverdogfaznogo soedineniya: monografiya* [Stability of production processes of steel-copper wire rod by solid-phase bonding method: monograph]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2006, 234 p. (In Russ.)
4. Belalov Kh.N., Klekovkin A.A., Klekovkina N.A., Gun G.S., Korchunov A.G., Polyakova M.A. *Stalnaya provoloka*

- ka: monografiya* [Steel wire: monograph]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2011, 689 p. (In Russ.)
5. Ogarkov N.N., Shemetova E.S. Contact condition between the core and the sheath preventing delamination in the non-contact zone during drawing. *Stal* [Steel]. 2010;(12):48-50. (In Russ.)
 6. Rashidi A.M., Elemadi M. Investigation of wavy interface forming and stretching in severe plastic deformed copper/steel bimetallic rod. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2021;28(24):2595-2604.
 7. Malaki M., Maleki H., Malaki M., Roohani H.R. Investigation of the bimetal clad drawing by upper bound method. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2013;22(4):943-951.
 8. Bitkov V.V. Analysis of deformation heterogeneity during drawing of composite rods and wire. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Blanking Productions in Mechanical Engineering]. 2010;(8):21-27. (In Russ.)
 9. Kharitonov V.A., Usanov M.Yu. *Sovershenstvovanie deformatsionnykh rezhimov volocheniya provoloki iz uglerodistykh marok stali v monolitnykh i rolkovykh volokakh: monografiya* [Improvement of deformation modes for drawing carbon steel wire in monolithic and roller dies: monograph]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2020, 133 p. (In Russ.)
 10. Usanov M.Yu. *Sovershenstvovanie tekhnologii izgotovleniya uglerodistoy provoloki na osnove povysheniya effektivnosti deformatsionnykh rezhimov volocheniya: avto-ref. dis. kand. tekhn. nauk* [Improvement of carbon steel wire production technology based on increasing the efficiency of drawing deformation regimes. Abstract of Ph.D. dissertation]. Magnitogorsk, 2018, 16 p.
 11. Kharitonov V.A., Gallyamov D.E. *Proizvodstvo pruzhinnoy provoloki: ucheb. posobie* [Production of spring wire: study guide]. Magnitogorsk: Publishing House of Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013, 151 p. (In Russ.)
 12. Terentyev D.V., Usanov M.Yu., Shemetova E.S., Platov S.I., Kharitonov V.A. Evaluation of the stress-strain state of steel-copper wire during drawing in a monolithic die based on modeling. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024;22(3):170-177. (In Russ.)
 13. Nikiforov B.A., Kharitonov V.A., Kopev A.V. *Tekhnologiya volocheniya provoloki i plyushchenoy lenty: ucheb. posobie* [Wire drawing and flat strip technology: study guide]. Magnitogorsk: Publishing House of NMSTU, 1999, 354 p. (In Russ.)

Поступила 18.09.2025; принята к публикации 11.11.2025; опубликована 30.06.2026
Submitted 18/09/2025; revised 11/11/2025; published 30/06/2026

Терентьев Дмитрий Вячеславович – доктор технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: dtterentyev@mail.ru. ORCID 0000-0001-7960-180X

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

Шеметова Елена Сергеевна – старший преподаватель,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: hellensh88@list.ru. ORCID 0000-0002-3412-0401

Усанов Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, доцент,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: barracuda_m@mail.ru. ORCID0000-0002-5920-3449

Платов Сергей Иосифович – доктор технических наук, профессор,
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: psipsi@mail.ru. ORCID 0000-0002-4868-4881

Dmitry V. Terentyev – DrSc (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: dtterentyev@mail.ru. ORCID 0000-0001-7960-180X

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

Elena S. Shemetova – Senior Lecturer,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: hellensh88@list.ru. ORCID 0000-0002-3412-0401

Mikhail Yu. Usanov – PhD (Eng.), Associate Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email:barracuda_m@mail.ru. ORCID0000-0002-5920-3449

Sergey I. Platov – DrSc (Eng.), Professor,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email:psipsi@mail.ru. ORCID 0000-0002-4868-4881