

## АНАЛИЗ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРОВОЛОКЕ ПОСЛЕ ВОЛОЧЕНИЯ В МОНОЛИТНОЙ ВОЛОКЕ

Д.В. Громов<sup>1</sup>, [gromov111999@gmail.com](mailto:gromov111999@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-6036-3784>  
Л.В. Радионова<sup>1</sup>, [radionovalv@rambler.ru](mailto:radionovalv@rambler.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9587-2925>  
Л.А. Глебов<sup>1,2</sup>, [glebovla@susu.ru](mailto:glebovla@susu.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6484-1894>

<sup>1</sup> Московский политехнический университет, Москва, Россия

<sup>2</sup> Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

**Аннотация.** В статье представлена компьютерная модель процесса волочения проволоки, которая позволяет рассчитывать методом конечных элементов напряженно-деформированное состояние проволоки в процессе волочения и после его завершения. Верификация разработанной компьютерной модели показала высокую сходимость полученных результатов с аналогичными расчетами, выполненными другими исследователями. В ходе анализа определены технологические параметры волочения, влияние которых на остаточные напряжения в проволоке планируется исследовать в последующих работах. В настоящей работе проведен анализ влияния рабочего полуугла волокна на осевые, радиальные и тангенциальные составляющие остаточных напряжений. Приведено распределение остаточных напряжений по сечению проволоки. Установлено, что уменьшение полуугла волокна с 8 до 4° приводит к снижению осевых напряжений на поверхности проволоки с 750 до 430 МПа, а тангенциальных напряжений – с 400 до 320 МПа. Поскольку качество проволоки в основном определяется величиной и знаком остаточных напряжений на поверхности проволоки, то снижение поверхностных растягивающих напряжений за счет уменьшения полуугла волокна положительно скажется на эксплуатационных свойствах проволоки. Неоднозначность влияния технологических параметров волочения и тем более их взаимное воздействие на знак и величину остаточных напряжений требуют проведения большого количества числовых экспериментов. Наличие специализированных программ для компьютерного моделирования и высокая степень достоверности получаемых результатов открывают возможности не только для расчета отдельных вариантов режимов волочения, но и для проведения комплексных исследований с перспективой получения зависимостей и моделей для прогнозирования остаточных напряжений после волочения проволоки.

**Ключевые слова:** проволока, остаточные напряжения, волочение, напряжение, деформация, полуугол волокна, компьютерное моделирование

**Для цитирования:** Громов Д.В., Радионова Л.В., Глебов Л.А. Анализ остаточных напряжений в проволоке после волочения в монолитной проволоке // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2025. Т. 25, № 3. С. 48–59. DOI: 10.14529/met250305

Original article  
DOI: 10.14529/met250305

## ANALYSIS OF RESIDUAL STRESSES IN WIRE DRAWING PROCESSES IN MONOLITHIC DIES

D.V. Gromov<sup>1</sup>, [gromov111999@gmail.com](mailto:gromov111999@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-6036-3784>  
L.V. Radionova<sup>1</sup>, [radionovalv@rambler.ru](mailto:radionovalv@rambler.ru), <https://orcid.org/0000-0001-9587-2925>  
L.A. Glebov<sup>1,2</sup>, [glebovla@susu.ru](mailto:glebovla@susu.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6484-1894>

<sup>1</sup> Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

<sup>2</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** The article presents a model for simulating the wire drawing process, which allows calculating the stress-strain state of the wire during and after drawing using the finite element method. Verification of the developed simulation model showed high convergence of the obtained results with similar calculations

performed by other researchers. During the analysis, the technological parameters of drawing were determined, the influence of which on residual stresses in the wire is planned to be studied in subsequent works. In this paper, the influence of the working half-angle of the die on the axial, radial and tangential components of residual stresses is analyzed. The distribution of residual stresses over the wire cross-section is given. It was found that a decrease in the half-angle of the die from 8 to 4° leads to a decrease in axial stresses on the wire surface from 750 to 430 MPa, and tangential stresses from 400 to 320 MPa. Since the quality of the wire is mainly determined by the magnitude and sign of residual stresses on the surface of the wire, reducing the surface tensile stresses by reducing the half-angle of the die will have a positive effect on the operational properties of the wire. The ambiguity of the influence of technological parameters of drawing and especially their mutual effect on the sign and magnitude of residual stresses require a large number of numerical experiments. The availability of specialized programs for computer modeling and a high degree of reliability of the results obtained open up opportunities not only for calculating individual options of drawing modes, but also for conducting complex studies with the prospect of obtaining dependencies and models for predicting residual stresses after wire drawing.

**Keywords:** wire, residual stresses, drawing, stress, deformation, half-angle of die, simulation

**For citation:** Gromov D.V., Radionova L.V., Glebov L.A. Analysis of residual stresses in wire drawing processes in monolithic dies. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*. 2025;25(3): 48–59. (In Russ.) DOI: 10.14529/met250305

## Введение

Остаточные напряжения, причиной которых является неравномерная деформация в процессах обработки металлов давлением и температурная неравномерность, обусловленная контактным трением при волочении, оказывают существенное влияние на эксплуатационные свойства проволоки [1–3]. Наличие остаточных напряжений оказывает влияние на механические свойства, износостойкость и коррозионную стойкость металлопродукции [4, 5]. Для снятия остаточных напряжений применяют термическую обработку – отжиг [6] или дополнительную механическую обработку – правкой на роликах, правкой растяжением, обработкой дробью [7, 8]. Однако применение термической обработки для снятия напряжений или применение дополнительных устройств для поверхностной деформации не всегда допустимо технологией производства проволоки и обоснованно экономически. Поэтому вопросу формирования остаточных напряжений при волочении проволоки было уделено внимание еще такими основоположниками процесса волочения, как Л.А. Красильниковым, И.Л. Перлиным и М.З. Ерманок [9, 10].

Проводимые ранее исследования установили [11, 12], что на величину и характер распределения остаточных напряжений по поперечному сечению стальной проволоки оказывают влияние: подготовка поверхности металла к волочению; величина суммарного обжатия; угол рабочей зоны волоки; содержание углерода в стали; величина единичных обжатий при постоянном суммарном обжатии;

способ термической обработки и конструктивные особенности оборудования.

Однако стоит отметить, что технологии волочения и оборудование, применяемое для их реализации, со временем существенно изменились. В настоящее время для подготовки микроструктуры катанки к волочению активно используется тепло прокатного нагрева, т. е. на смену патентованию в свинцовых ваннах пришла сорбитизация с прокатного нагрева [13]. Химическое травление заготовки все чаще заменяется на удаление окалина механическим способом [14]. Массово применяемые в прошлом столетии станы магазинного типа вытесняются станами прямоточного типа, скорость волочения на которых достигает 40 м/с [15]. По результатам многочисленных исследований, касающихся геометрии монолитных волок, рабочие углы также существенно изменились по отношению к ранее используемым в практике волочения [16]. При производстве проволоки для металлокорда в последние десятилетия заметно увеличилось применение стали с повышенным содержанием углерода, сейчас допустимо и распространено содержание до 0,85...0,90 % С [17]. Технологические смазки и подсмазочные покрытия также претерпели существенные изменения, поскольку высокие скорости волочения требуют их стойкости при повышенных температурах [18].

Технический прогресс коснулся не только волочильного оборудования и технологий, но внес существенные изменения в исследовательские инструменты и методики. Появление

специализированных программ для моделирования процессов обработки металлов давлением, в основе которых лежит метод конечных элементов, позволяет исследовать влияние технологических параметров процесса волочения на напряженно-деформированное состояние проволоки и определять остаточные напряжения в ней после волочения [19–21]. Это открыло новые возможности для исследования влияния технологических параметров волочения на напряженно-деформированное состояние проволоки.

Проведение комплексных числовых экспериментов с применением компьютерного моделирования требует больших временных ресурсов и навыков работы со специализированными программными продуктами, такими как QForm, DEFORM-3D, ABAQUS и другие. В настоящее время как российскими учеными, так и зарубежными коллегами этому вопросу уделяется некоторое внимание. Ю.Н. Логинов с коллегой [22] сравнивал напряженное состояние отрезка проволоки, находящегося на выходной стороне волюки в момент волочения с его напряженным состоянием после выхода проволоки из волюки. Ими установлено, что остаточные осевые напряжения после разгрузки уменьшаются примерно в два раза, а тангенциальные напряжения изменяются незначительно. В.А. Харитонов с учениками [23–25] уделил большое внимание влиянию угла волюки и единичной степени деформации на напряженно-деформированное состояние проволоки. Зарубежные исследователи [26–28] анализировали влияние технологических параметров на формирование остаточных напряжений.

Из вышеизложенного следует, что вопрос влияния технологических параметров процесса волочения на формирование остаточных напряжений в проволоке является актуальным и требует комплексного подхода для выявления качественных и количественных зависимостей остаточных напряжений от режимов волочения проволоки.

В настоящей работе планируется разработать компьютерную модель для анализа влияния технологических параметров процесса волочения на остаточные напряжения в проволоке. С помощью разработанной компьютерной модели оценить влияние полуугла волюки на формирование остаточных напряжений в низкоуглеродистой стальной проволоке.

### Разработка и верификация компьютерной модели расчета остаточных напряжений при монолитном волочении

Для определения уровня остаточных напряжений использовали метод конечных элементов, реализованный в специализированном программном комплексе DEFORM. Реологические свойства стали использовались из библиотеки DEFORM. Заготовка разбивалась конечными элементами прямоугольной формы. Сетка заготовки в очаге деформации разбита размером от 0,05 до 0,075 мм, что дает более 50 элементов на ширину очага деформации (рис. 1). В ходе исследований анализировали напряжения, деформации и скорости деформации в процессе волочения. После снятия нагрузки определяли осевые, радиальные и тангенциальные остаточные напряжения (рис. 2).

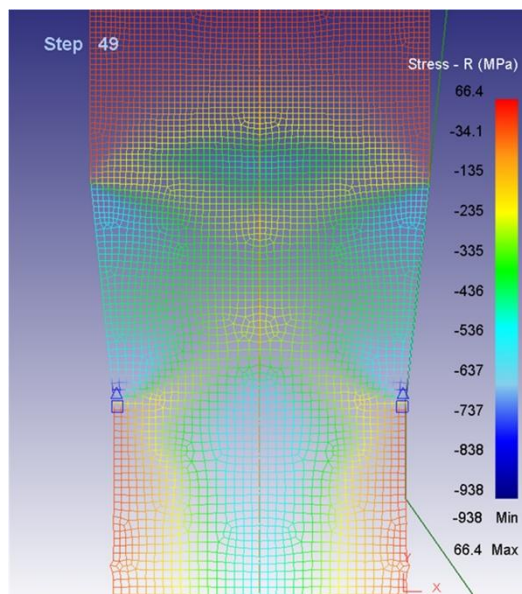


Рис. 1. Компьютерная модель процесса волочения проволоки в монолитной волюке  
Fig. 1. Computer model of the wire drawing process in a monolithic die

Верификацию разработанной компьютерной модели провели путем сравнения с результатами моделирования, представленными в работе [4]. Проверка модели осуществлялась при расчете распределения остаточных напряжений по радиусу сечения прутка исходного диаметра 10 мм из стали 12X18H10T после волочения с обжатиями ( $\epsilon$ ) = 0,1; 0,2; 0,3 и 0,4 при скорости волочения  $V = 1$  м/с, коэффициенте трения  $f = 0,08$  и полуугле волюки  $\alpha = 6^\circ$ . На рис. 3 приведены результаты

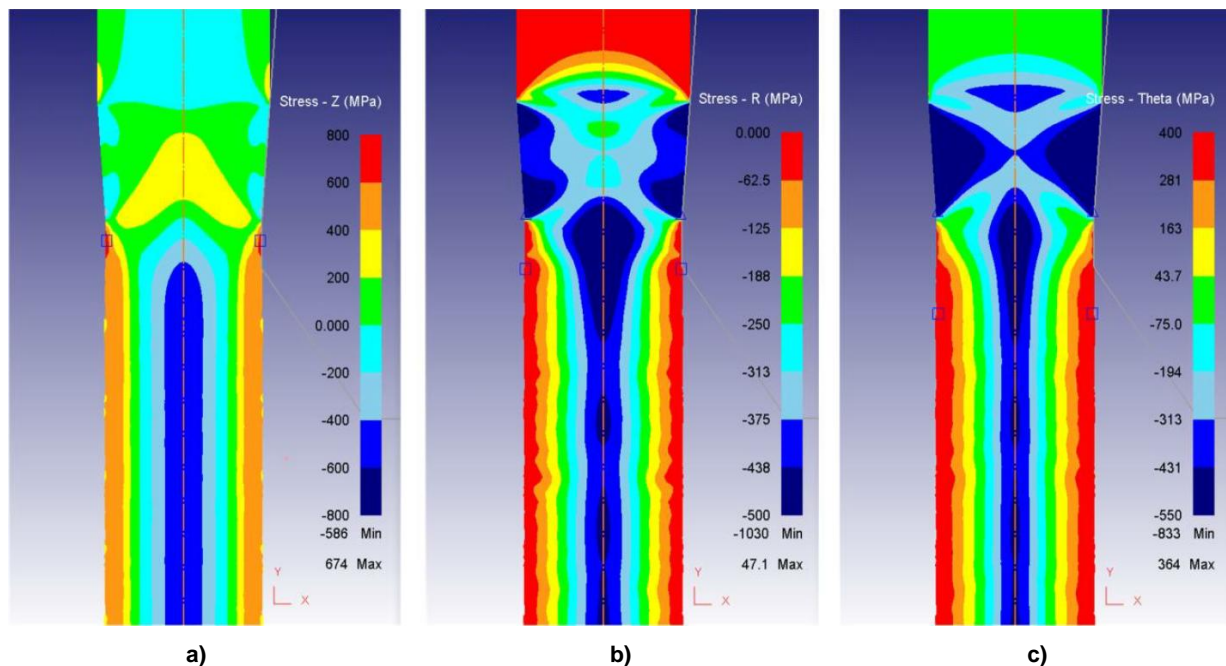


Рис. 2. Напряжения (остаточные) после разгрузки переднего конца проволоки: а – осевые; б – радиальные; с – тангенциальные  
Fig. 2. Stresses (residual) after unloading the front end of the wire: a – axial; b – radial; c – tangential

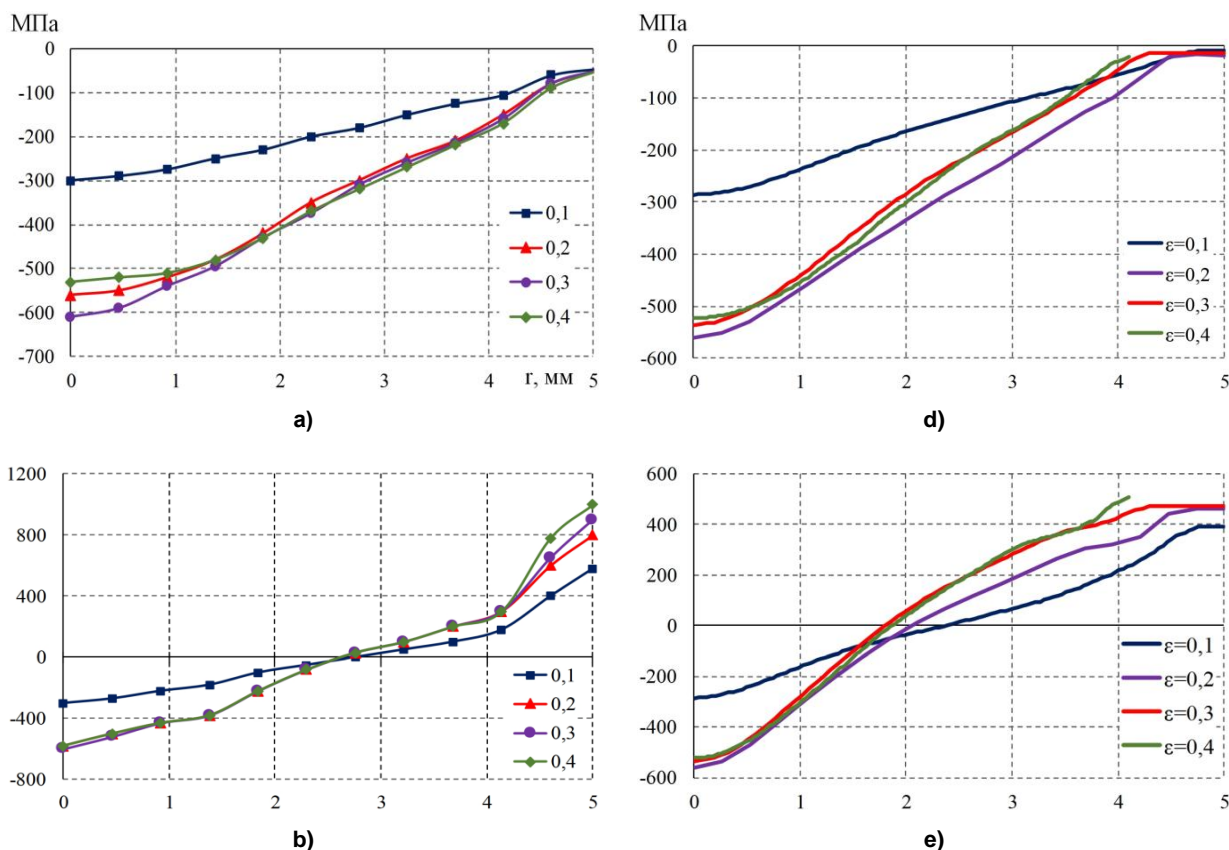


Рис. 3. Сравнение результатов расчета остаточных напряжений при верификации компьютерной модели: а, b, с – полученные в работе [4]; d, e, f – полученные нами; а, d – радиальные; b, e – тангенциальные; с, f – осевые (см. также с. 52)

Fig. 3. Comparison of the results of residual stress calculations during verification of the computer model: a, b, c – obtained in [4]; d, e, f – obtained by us; a, d – radial; b, e – tangential; c, f – axial (see also p. 52)

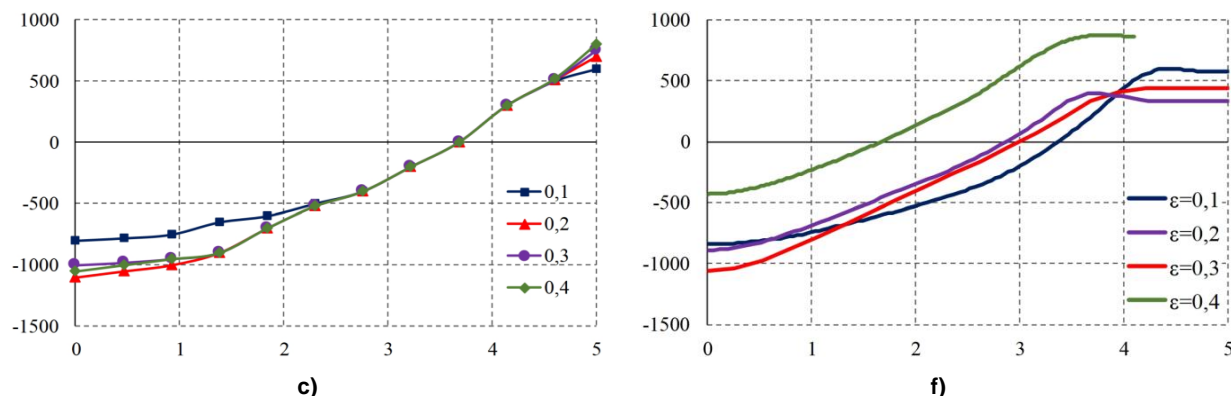


Рис. 3. Окончание  
Fig. 3. End

расчета остаточных напряжений, полученные в работе [4] и нами.

Результаты расчетов, полученные нами, качественно и в большинстве вариантов количественно совпадают с расчетами, выполненными в работе [4]. Следовательно, разработанная компьютерная модель может быть использована для проведения числовых экспериментов и анализа влияния технологических параметров на знак и уровень остаточных напряжений при волочении проволоки.

#### Анализ влияния технологических параметров волочения на остаточные напряжения в проволоке

Согласно ранее проводимым нами исследованиям [19], технологическими параметрами, оказывающими существенное влияние на напряженно-деформированное состояние, являются степень деформации, рабочий угол волоки, коэффициент трения. Не меньший интерес вызывает оценка влияния скорости волочения, типа волоки и содержание углерода на формирование остаточных напряжений.

Анализ влияния технологических параметров процесса проводился на проволоке-заготовке диаметром  $d_0 = 3,5$  мм из стали марки 10 (AISI 1015) и 65Г (AISI 1070). При проведении численных (вычислительных) экспериментов заготовка диаметром  $d_0 = 3,5$  мм протягивалась через монолитные волоки с рабочим полууглом  $\alpha = 3; 4; 5; 6; 7$  и  $8^\circ$  при коэффициенте трения  $f = 0,01; 0,05$  и  $0,10$  (закон Кулона). Обжатие (единичное)  $\varepsilon = 2 \ln \left( \frac{d_0}{d_k} \right) = 0,05; 0,1; 0,2; 0,3$ . Скорость волочения при-

нималась равной  $V_{\text{вол}} = 0,1$  и  $10$  м/с. Начальная температура волочения  $t_{\text{нач}} = 20^\circ$ .

Учитывая большой объем полученных результатов, в данной статье мы ограничимся только анализом влияния угла волоки на формирование остаточных напряжений.

Распределение осевых, радиальных и тангенциальных напряжений после выхода проволоки из волоки с разными углами приведено на рис. 4. Моделирование проводилось для следующих условий волочения: сталь марки 10 (AISI 1015), диаметр заготовки  $d_0 = 3,5$  мм; диаметр проволоки после волочения с обжатием ( $\varepsilon$ ) =  $0,2$  составил  $3,2$  мм; скорость волочения  $V = 1$  м/с, коэффициент трения  $f = 0,05$ .

Качественные и количественные значения полученных напряжений согласуются с результатами, полученными в работе [22].

Остаточные напряжения в проволоке самоуравновешены. Осевые уравновешены распределением по сечению, а тангенциальные и радиальные – за счет осевой симметрии. В волоке центральные слои металла получают большее удлинение, чем периферийные. Выравнивающее действие упругих областей проволоки приводит к тому, что центральные слои при разгрузке укорачиваются и все компоненты нормальных напряжений в центре становятся сжимающими.

Для наглядности и удобства проведения анализа влияния рабочего угла волоки на величину и тип остаточных напряжений результаты числовых экспериментов представлены в виде графиков изменения величины остаточных напряжений по сечению проволоки после волочения (рис. 5–7). Из графиков распределения напряжений следует, что все виды напряжений в центре проволоки имеют отрицательные

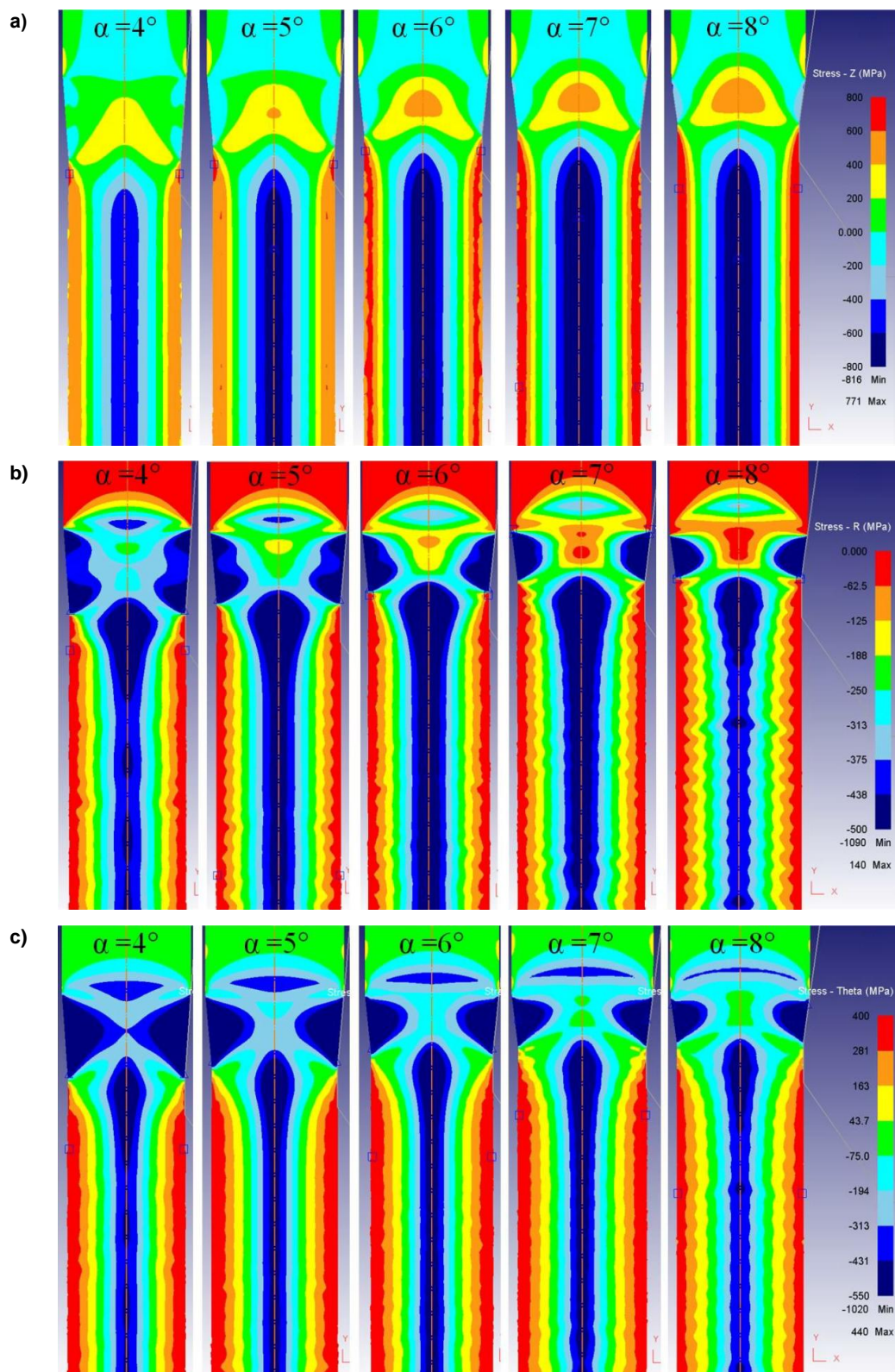


Рис. 4. Результаты расчета остаточных напряжений после волочения проволоки-заготовки диаметром  $d_0 = 3,5$  мм из стали марки 10 (AISI 1015) через монолитные волокы с рабочим полууглом  $\alpha = 3; 4; 5; 6; 7$  и  $8^\circ$  при коэффициенте трения  $f = 0,05$ , обжатии  $\varepsilon = 0,2$  и скорости волочения  $V_{\text{вол}} = 0,1$  м/с: а – осевые; б – радиальные; с – тангенциальные

Fig. 4. Results of calculating residual stresses after drawing a wire blank with a diameter of 3.5 mm made of grade 10 steel (AISI 1015) through monolithic dies with a working half-angle of 3; 4; 5; 6; 7 and  $8^\circ$  at a friction coefficient of 0.05, reduction of 0.2 and a drawing speed of 0.1 m/s: a – axial; b – radial; c – tangential

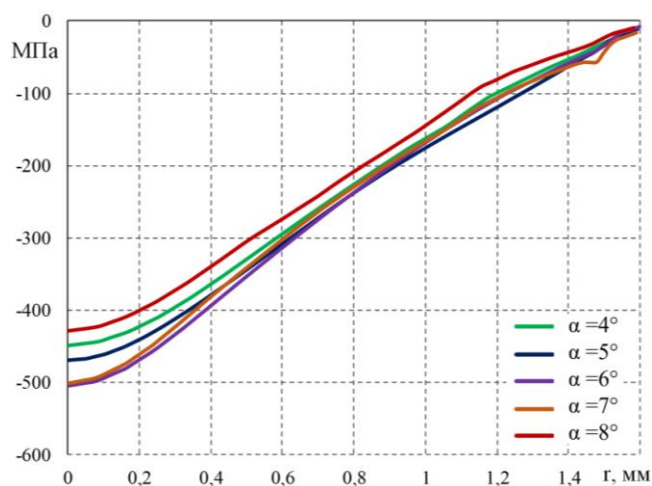


Рис. 5. Радиальные остаточные напряжения после волочения с разными полууглами волок  
Fig. 5. Radial residual stresses after drawing with different drawing half-angles

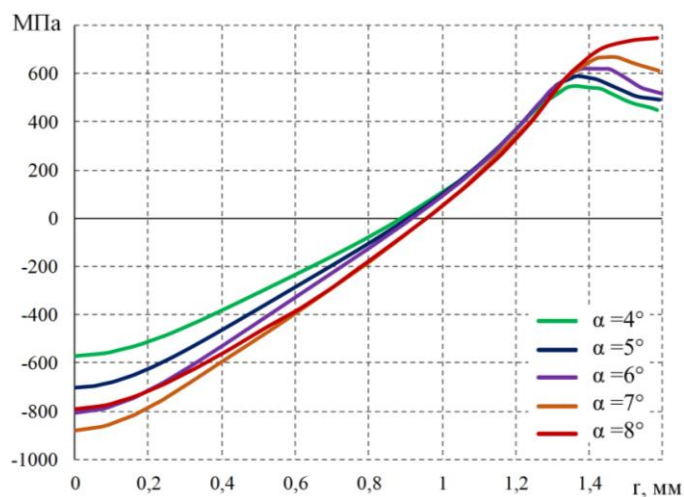


Рис. 6. Осевые остаточные напряжения после волочения с разными полууглами волок  
Fig. 6. Axial residual stresses after drawing with different drawing half-angles

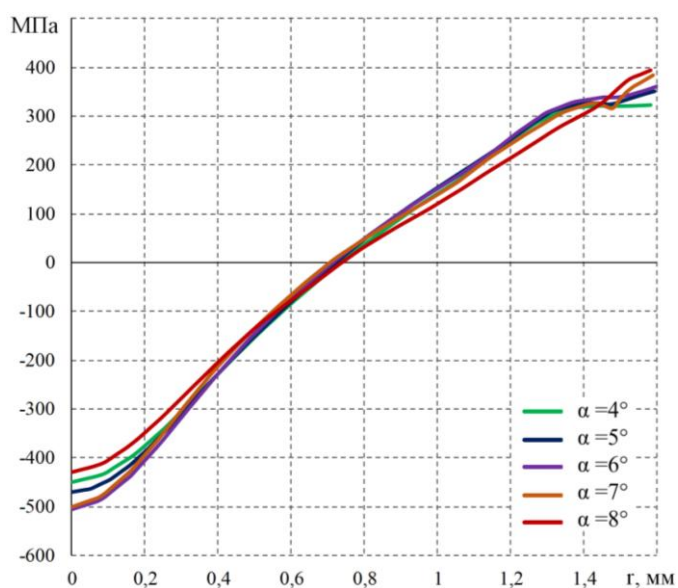


Рис. 7. Тангенциальные остаточные напряжения после волочения с разными полууглами волок  
Fig. 7. Tangential residual stresses after drawing with different drawing half-angles

значения, т. е. это напряжения сжатия. Сжимающие напряжения в центре проволоки создают благоприятные условия для поддержания высокой пластичности металла в этой области.

Радиальные остаточные напряжения в поверхностных слоях проволоки независимо от угла волоки близки к нулю. В центральном сечении проволоки наблюдается некоторое влияние угла волоки на величину сжимающих напряжений. Увеличение полуугла волоки  $\alpha$  с  $4^\circ$  до  $6^\circ$  приводит к повышению сжимающих напряжений с 425 до 500 МПа. Дальнейшее увеличение полуугла волоки приводит к снижению сжимающих напряжений. Эти результаты требуют дополнительной проверки и более глубокого анализа причин такого изменения радиальных составляющих остаточных напряжений. В то же время стоит отметить, что в работе [29] при анализе влияния углов волок в  $12^\circ$ ,  $14^\circ$ ,  $16^\circ$  и  $18^\circ$  при степенях деформации 10, 30 и 55 % было показано, что на уровень радиальных остаточных напряжений оказывает совместное влияние степени деформации и угла волоки. В этой работе при проведении расчетов в пакете ABACUS было получено, что при степени деформации 10 и 30 % сжимающие напряжения в центре проволоки с увеличением угла волоки уменьшаются, а при 55 % деформации при увеличении угла волоки – возрастают. Это может быть связано с неравномерностью деформации по сечению проволоки, которое определяется углом волоки, единичной степенью деформации и значением коэффициента трения, что подробно рассмотрено в работе [30].

После волочения с разными углами волок в поверхностных слоях проволоки возникают растягивающие осевые напряжения. В отличие от центральных слоев здесь четко прослеживается положительное влияние уменьшения угла волоки на величину остаточных напряжений. Уменьшение полуугла волоки с  $8^\circ$  до  $4^\circ$  приводит к снижению напряжений на поверхности проволоки с 750 до 430 МПа. Аналогичным образом оказывает влияние полуугол волоки на поверхностные тангенциальные остаточные напряжения. Уменьшение полуугла волоки с  $8^\circ$  до  $4^\circ$  приводит к снижению тангенциальных напряжений на поверхности проволоки с 400 до 320 МПа.

Поскольку качество проволоки в основ-

ном определяется величиной и знаком остаточных напряжений на поверхности проволоки, то снижение поверхностных растягивающих напряжений за счет уменьшения полуугла волоки положительно скажется на эксплуатационных свойствах проволоки.

В то же время неоднозначность влияния технологических параметров волочения и тем более их взаимное воздействие на знак и величину остаточных напряжений требуют проведения большого количества числовых экспериментов. В свою очередь наличие специализированных программ для компьютерного моделирования и высокая степень достоверности получаемых результатов открывает возможности не только для расчета отдельных вариантов режимов волочения, но и для проведения комплексных исследований с перспективой получения зависимостей и моделей для прогнозирования остаточных напряжений после волочения проволоки.

#### Заключение

Таким образом, авторами разработана компьютерная модель процесса волочения проволоки, позволяющая методом конечных элементов рассчитывать напряженно-деформированное состояние проволоки в процессе волочения и после его завершения. Верификация разработанной компьютерной модели показала высокую сходимость полученных результатов с аналогичными расчетами, выполненными другими исследователями. Определены технологические параметры волочения, влияние которых на остаточные напряжения в проволоке планируется исследовать в последующих работах. В настоящей работе проведен анализ влияния рабочего полуугла волоки на осевые, радиальные и тангенциальные составляющие остаточных напряжений. Установлено, что уменьшение полуугла волоки с  $8^\circ$  до  $4^\circ$  приводит к снижению осевых напряжений на поверхности проволоки с 750 до 430 МПа, а тангенциальных напряжений – с 400 до 320 МПа. Поскольку качество проволоки в основном определяется величиной и знаком остаточных напряжений на поверхности проволоки, то снижение поверхностных растягивающих напряжений за счет уменьшения полуугла волоки положительно скажется на эксплуатационных свойствах проволоки.

### Список литературы

1. Ткачева А.В., Абашкин Е.Е. Влияние локального комбинированного теплового воздействия на величину и распределение остаточных напряжений в пластине из стали 20 // *Металлург.* 2023. № 6. С. 85–93. DOI: 10.52351/00260827\_2023\_06\_85. EDN: ICMBJQ.
2. Колмогоров Г.Л., Кошелева Н.А. Температурные режимы и критические скорости при волочении проволоки // *Известия вузов. Цветная металлургия.* 2016. № 3. С. 34–39. DOI: 10.17073/0021-3438-2016-3-34-39. EDN: WIMGDN.
3. Температурные условия и режимы формирования остаточных напряжений при волочении проволоки / Г.Л. Колмогоров, Н.А. Кошелева, Е.В. Кузнецова, Т.В. Чернова // *Известия вузов. Цветная металлургия.* 2011. № 3. С. 23–26. EDN: MKJMQF.
4. Буркин С.П., Шимов Г.В., Андрюкова Е.А. Остаточные напряжения в металлопродукции Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2015. 248 с. ISBN 978-5-7996-1506-2. EDN: UWNVMB.
5. Чернышев Г.Н., Попов А.Л., Козинцев В.М. Полезные и опасные остаточные напряжения // *Природа.* 2002. № 10 (1046). С. 17–24. EDN: VMYCVT.
6. Основы теории термической обработки металлов / Н.И. Волгина, С.С. Хламкова, А.В. Шулгин и др. М.: Московский Политех, 2021. 150 с. ISBN 978-5-276-02659-6. EDN: GYVCMW.
7. Бобарикин Ю.Л., Мартыанов Ю.В., Ходосовская О.Ю. Исследование величины эквивалентных остаточных напряжений тонкой проволоки при знакопеременном изгибе в рихтовальном устройстве // *Актуальные вопросы машиноведения.* 2023. Т. 12. С. 191–194. EDN: ZPSOAB.
8. Радионова Л.В. Математическое моделирование знакопеременной деформации изгибом в многороликовом устройстве // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* 2013. № 9. С. 62–66. EDN: RCXGWT.
9. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. Изд. 2-е М.: Металлургия, 1971. 488 с.
10. Красильников Л.А., Лысенко А.Г. Волочильщик проволоки: учеб. пособие для сред. ПТУ. 3-е изд., испр. и доп. М.: Металлургия, 1987. 319 с.
11. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Хабарова Д.В. Остаточные напряжения и предельная деформируемость при волочении осесимметричных металлоизделий // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки.* 2015. № 10. С. 156–161. EDN: VKIBTZ.
12. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В. Остаточные напряжения и вторичные пластические деформации при волочении // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия.* 2006. № 12. С. 17–18. EDN: SMFTCX.
13. Ресурсосбережение в метизном производстве: Теория и практика работы Белорецкого металлургического комбината: коллектив. моногр. / В.И. Зюзин, Н.А. Клековкина, В.А. Харитонов и др. Магнитогорск, 2001. 163 с. ISBN 5-89514-237-0. EDN: SFHUGD.
14. Радионова Л.В. Волочильные станы для производства проволоки: учеб. пособие. М.: Московский политехн. ун-т, 2025. 100 с. ISBN 978-5-276-02909-2. EDN: LDLXDZ.
15. Радионова Л.В. Динамическое и статическое деформационное старение стали при высокоскоростном волочении проволоки // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации.* 2023. Т. 79, № 1. С. 38–48. DOI: 10.32339/0135-5910-2023-1-38-48. EDN: NAYELG.
16. Оценка напряженно-деформированного состояния сталемедной проволоки при волочении в монолитной волоке на основе моделирования / Д.В. Терентьев, М.Ю. Усанов, Е.С. Шеметова и др. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова.* 2024. Т. 22, № 3. С. 170–177. DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-170-177. EDN: RKAUOU.
17. Харитонов В.А., Столяров А.Ю. Совершенствование технологии производства высокопрочной проволоки для армирующих материалов автомобильных шин: моногр. Магнитогорск: Магнитогорский гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2016. 97 с. ISBN 978-5-9967-0811-6. EDN: XIRQRN.
18. Трение и смазки при волочении проволоки в монолитных волоках / В.А. Харитонов, М.Ю. Усанов, А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов. Магнитогорск: ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», 2025. 293 с. ISBN 978-5-9967-3368-2. EDN: FNDXFM.
19. Исследование напряженно-деформированного состояния проволоки при высокоскоростном монолитном волочении / Л.В. Радионова, Д.В. Громов, Р.А. Лисовский, И.Н. Ермаков // *Черная*

металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2023. Т. 79, № 3. С. 242–250. DOI: 10.32339/0135-5910-2023-3-242-250. EDN: ZNRHBR.

20. Харитонов В.А., Усанов М.Ю. Моделирование процесса волочения проволоки в монолитной проволоке в программном комплексе DEFORM-3D: Электронный ресурс. Магнитогорск: Магнитогорский гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2018. ISBN 978-5-9967-1282-3. EDN: UQKCD.

21. Логинов Ю.Н., Грехов С.К. Особенности деформированного состояния при калибровке стальной проволоки // *Сталь*. 2022. № 5. С. 13–16. EDN: XSMZJP.

22. Логинов Ю.Н., Грехов С.К. Формирование остаточных напряжений при волочении низкоуглеродистой проволоки // *Сталь*. 2021. № 5. С. 25–28. EDN: LZNGFZ.

23. Харитонов В.А., Таранин И.В. Изучение напряженного состояния и разрушения металла при производстве проволоки различными способами ОМД // *Обработка сплошных и слоистых материалов*. 2013. № 1 (39). С. 112–120. EDN: RYZPHB.

24. Харитонов В.А., Сметнева Н.Ю. Совершенствование методики расчета маршрутов волочения на основе оценки напряженного состояния проволоки в очаге деформации // *Актуальные проблемы современной науки, техники и образования*. 2017. Т. 1. С. 126–129. EDN: ZEYVNH.

25. Харитонов В.А., Галлямов Д.Э. Выбор рациональной формы промежуточного профиля при изготовлении стальной проволоки совмещенным способом «прокатка-волочение» // *Производство проката*. 2015. № 3. С. 30–33. EDN: TKUCTJ.

26. Effect of a Multiple Reduction Die on the Residual Stress of Drawn Materials / J.-H. Kim, C.-H. Baek, S.-K. Lee et al. // *Materials*. 2021. Vol. 14 (6). P. 1358. DOI: 10.3390/ma14061358

27. Influence of back tension on wire deformation heterogeneity and texture intensity: A coupled macro-micro calculation study / R. Cai, C. Jia, Y. Zhao et al. // *Journal of Materials Research and Technology*. 2025. Vol. 36. P. 6240–6256. DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.04.267

28. Toribio J., Lorenzo M. Reduction of Residual Stresses in Cold Drawn Pearlitic Steel by a Soft Secondary Wire Diameter Reduction // *Metals*. 2023. Vol. 13 (2). P. 433. DOI: 10.3390/met13020433

29. Demin D. Analysis of Residual Stress in Circular Cross-Section Wires after Drawing Process // *Procedia Manufacturing*. 2019. Vol. 37. P. 335–340. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.12.056

30. Харитонов В.А., Радионова Л.В. Проектирование ресурсосберегающих технологий производства высокопрочной углеродистой проволоки на основе моделирования: моногр. Магнитогорск: МГТУ, 2008. 171 с. ISBN 978-5-89514-984-3. EDN: QNCBVB.

### References

1. Tkacheva A.V., Abashkin E.E. Influence of local combined thermal action on the magnitude and distribution of residual stresses in a plate of steel // *Metallurgist*. 2023;(6):85–93. (In Russ.) DOI: 10.52351/00260827\_2023\_06\_85

2. Kolmogorov G.L., Kosheleva N.A. Temperature conditions and critical speeds in wire drawing. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous metallurgy*. 2016;(3):34–39. (In Russ.) DOI: 10.17073/0021-3438-2016-3-34-39

3. Kolmogorov G.L., Kosheleva N.A., Kuznetsova E.V., Chernova T.V. Temperature conditions and modes of formation of residual stresses during wire drawing. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya = Izvestiya. Non-Ferrous metallurgy*. 2011;(3):23–26. (In Russ.)

4. Burkin S.P., Shimov G.V., Andryukova E.A. *Residual stresses in metal products*. Ekaterinburg: Ural Federal University, 2015. 248 p. (In Russ.)

5. Chernyshev G.N., Popov A.L., Kozintsev V.M. Useful and dangerous residual stresses. *Priroda*. 2002;10(1046):17–24. (In Russ.)

6. Volgina N.I., Khlamkova S.S., Shulgin A.V., et al. *Fundamentals of the theory of thermal processing of metals*. Moscow: Moscow Polytechnic, 2021. 150 p. (In Russ.)

7. Bobarikin Y.L., Martyanov Y.V., Khodosovskaya O.Y. Study of the magnitude of equivalent residual stresses of thin wire under alternating bending in a straightening device. *Current issues in mechanical engineering*. 2023;12:191–194. (In Russ.)

8. Radionova L.V. Mathematical modeling of alternating deformation by bending in a multi-roller device. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2013;(9):62–66. (In Russ.)

9. Perlin I.L., Ermanok M.Z. *Drawing Theory*. 2nd ed. Moscow: Metallurgiya, 1971. 488 p. (In Russ.)

10. Krasilnikov L.A., Lysenko A.G. *Wire drawer: a textbook for secondary vocational schools*. 3rd ed., corr. and enl. Moscow: Metallurgiya, 1987. 319 p. (In Russ.)
11. Kolmogorov G.L., Kuznetsova E.V., Khabarova D.V. Residual stresses and ultimate deformability during drawing of axisymmetric metal products. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki = Izvestiya Tula State University. Technical science*. 2015;(10):156–161. (In Russ.)
12. Kolmogorov G.L., Kuznetsova E.V. Residual stresses and secondary plastic deformations during drawing. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous metallurgy*. 2006;(12):17–18. (In Russ.)
13. Zyuzin V.I., Klekovkina N.A., Kharitonov V.A. et al. *Resource conservation in hardware production: Theory and practice of the Belorets Iron and Steel Works*. Magnitogorsk, 2001. 163 p. (In Russ.)
14. Radionova L.V. *Drawing machines for wire production: Textbook*. Moscow: Moscow Polytechnic University, 2025. 100 p. (In Russ.)
15. Radionova L.V. Dynamic and static deformation aging of steel during high-speed wire drawing. *Ferrous metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2023;79(1):38–48. (In Russ.) DOI: 10.32339/0135-5910-2023-1-38-48
16. Terentyev D.V., Usanov M.Y., Shemetova E.S. et al. Assessment of the stress-strain state of steel-copper wire during drawing in a monolithic die based on modeling. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk state technical university*. 2024;22(3):170–177. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-3-170-177
17. Kharitonov V.A., Stolyarov A.Y. *Improvement of the production technology of high-strength wire for reinforcing materials of automobile tires*. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk state technical university, 2016. 97 p. (In Russ.)
18. Kharitonov V.A., Usanov M.Y., Pesin A.M., Pustovoitov D.O. *Friction and lubrication during wire drawing in monolithic dies*. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk state technical university, 2025. 293 p. (In Russ.)
19. Radionova L.V., Gromov D.V., Lisovsky R.A., Erdakov I.N. Study of the stress-strain state of wire during high-speed monolithic drawing. *Ferrous metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*. 2023;79(3):242–250. (In Russ.) DOI: 10.32339/0135-5910-2023-3-242-250
20. Kharitonov V.A., Usanov M.Y. *Modeling of the wire drawing process in a monolithic die in the DEFORM-3D software package: Electronic resource*. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk state technical university, 2018. (In Russ.)
21. Loginov Y.N., Grekhov S.K. Features of the deformed state during the calibration of steel wire. *Steel*. 2022;(5):13–16. (In Russ.)
22. Loginov Y.N., Grekhov S.K. Formation of residual stresses during drawing of low-carbon wire. *Steel*. 2021;(5):25–28. (In Russ.)
23. Kharitonov V.A., Taranin I.V. Study of the stress state and fracture of metal during wire production by various metal forming methods. *Processing of solid and laminate materials*. 2013;1(39):112–120. (In Russ.)
24. Kharitonov V.A., Smetneva N.Y. Improvement of the methodology for calculating drawing routes based on the assessment of the stress state of the wire in the deformation zone. *Actual Problems of Modern Science, Technology and Education*. 2017;1:126–129. (In Russ.)
25. Kharitonov V.A., Gallyamov D.E. Selection of a rational shape of the intermediate profile in the manufacture of steel wire by the combined rolling-drawing method. *Rolling*. 2015;(3):30–33. (In Russ.)
26. Kim J.-H., Baek C.-H., Lee S.-K., Kang J.-H., Park J.-H., Ko D.-C. Effect of a Multiple Reduction Die on the Residual Stress of Drawn Materials. *Materials (Basel)*. 2021;14(6):1358. DOI: 10.3390/ma14061358
27. Cai R., Jia C., Zhao Y., Yang Z., Liu T., Chen X. et al. Influence of back tension on wire deformation heterogeneity and texture intensity: A coupled macro-micro calculation study. *Journal of Materials Research and Technology*. 2025;36:6240–6256. DOI: 10.1016/j.jmrt.2025.04.267
28. Toribio J., Lorenzo M. Reduction of Residual Stresses in Cold Drawn Pearlitic Steel by a Soft Secondary Wire Diameter Reduction. *Metals (Basel)*. 2023;13(2):433. DOI: 10.3390/met13020433

29. Demin D. Analysis of Residual Stress in Circular Cross-Section Wires after Drawing Process. *Procedia Manufacturing*. 2019;37:335–340. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.12.056

30. Kharitonov V.A., Radionova L.V. *Design of Resource-Saving Technologies for the Production of High-Strength Carbon Wire Based on Simulation*. Magnitogorsk: Magnitogorsk State Technical University, 2008. 171 p. (In Russ.)

#### *Информация об авторах*

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

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

**Глебов Лев Александрович**, младший научный сотрудник кафедры автоматизации и управления, Московский политехнический университет, Москва, Россия; научный сотрудник, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; glebovla@susu.ru.

#### *Information about the authors*

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

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

**Lev A. Glebov**, Junior Researcher of the Department of Automation and Control, Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia; Researcher, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; glebovla@susu.ru.

*Статья поступила в редакцию 15.05.2025*

*The article was submitted 15.05.2025*