

## ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

### METAL FORMING

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

УДК 621.778

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-1-49-60



## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ ТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ ИЗ НОВОГО СПЛАВА ПАЛЛАДИЯ

Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Лопатин В.А., Беляев С.В., Арнаутов А.Д., Дитковская Ю.Д.

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

**Аннотация.** Разработка новых технологий производства длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов драгоценных металлов, в частности сплавов на основе палладия, является актуальной задачей металлургического производства. Особенно это важно для получения изделий технического назначения, предназначенных для высокоточных электрических приборов и устройств, которые в настоящее время производятся за рубежом. В представленной работе решается задача по разработке технологии для получения проволоки из нового сплава на основе палладия с заданным комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств. В первую очередь это достигается тем, что на основе патентного анализа имеющихся технических решений предложен и запатентован сплав палладия, предназначенный для термомодеформационной обработки и получения проволочных контактов для передачи видеосигналов. Для разработки режимов деформации и определения силовых параметров в программном комплексе Deform-3D проведено моделирование с использованием аппроксимационной формулы для расчета временного сопротивления в зависимости от суммарной степени обжатия, которая была необходима для создания компьютерных моделей процессов сортовой прокатки и волочения. С их помощью были изучены особенности формоизменения металла, напряженно-деформированное состояние, определены силовые параметры этих процессов и проведена их оценка с позиций ограничения по допустимой нагрузке оборудования, а также возможности разрушения заготовок при прокатке с использованием критерия Кокрофта-Латама. Для проверки адекватности работы компьютерных моделей были проведены экспериментальные исследования процессов сортовой прокатки и волочения, результаты которых дали возможность получить опытные образцы проволоки и изучить ее физико-механические свойства и структуру металла. Проведенные экспериментальные исследования процесса получения проволоки технического назначения из нового сплава палладия показали, что предложенные режимы обжатий позволяют получать проволоку диаметром до 0,5 мм с требуемым уровнем механических и электрических характеристик. Результаты проведенных исследований могут послужить базой для создания промышленной технологии с использованием оборудования, применяемого на заводах по обработке драгоценных металлов и их сплавов.

**Ключевые слова:** палладий, сплавы, проволока, сортовая прокатка, волочение, энергосиловые параметры, отжиг, физико-механические свойства

*Работа выполнена в рамках государственного задания на науку ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», номер проекта FSRZ-2020-0013.*

© Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Лопатин В.А., Беляев С.В., Арнаутов А.Д., Дитковская Ю.Д., 2024

#### Для цитирования

Исследование технологии получения проволоки технического назначения из нового сплава палладия / Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Лопатин В.А., Беляев С.В., Арнаутов А.Д., Дитковская Ю.Д. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 49-60. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-49-60>



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

## RESEARCH ON THE PRODUCTION TECHNOLOGY FOR TECHNICAL WIRE FROM A NEW PALLADIUM ALLOY

Sidelnikov S.B., Lopatina E.S., Lopatin V.A., Belyaev S.V., Arnautov A.D., Ditkovskaya Yu.D.

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**Abstract.** The development of new technologies for the production of long-length deformed semi-finished products from precious metal alloys and, in particular, palladium-based alloys, is a currently relevant task of metallurgical production. This is especially important for manufacturing technical products designed for high-precision electrical appliances and devices that are currently manufactured abroad. The presented research solves the task of developing a technology for producing wire from a new palladium-based alloy with a given set of physical and mechanical, and operational properties. First of all, this is achieved, as based on a patent analysis of available technical solutions, the authors proposed and patented a palladium alloy designed for thermal deformation treatment and producing wire contacts for transmitting video signals. To develop reduction modes and determine force parameters, the DEFORM-3D software package was applied for simulation by an approximation formula for calculating ultimate tensile strength depending on the total degree of reduction, which was necessary to create computer models of the long product rolling and drawing processes. The models were used to study the features of metal shaping, and the stress and strain state, determine the power parameters of these processes and evaluate them from the standpoint of limiting the permissible load of equipment, as well as the possibility of workpiece fracture during rolling, using the Cockcroft-Latham criterion. To validate the computer models for adequacy, the authors carried out experimental studies on the long product rolling and drawing processes, whose results provided for a possibility of producing experimental samples of wire and study the physical and mechanical properties and the metal structure. The conducted experimental studies of the process of producing technical wire from a new palladium alloy have shown that the proposed reduction modes can be used to produce wire with a diameter of up to 0.5 mm and the required level of mechanical and electrical characteristics. The results of the conducted research can serve as a basis for developing an industrial technology using equipment available at plants for treatment of precious metals and their alloys.

**Keywords:** palladium, alloys, wire, long product rolling, drawing, power parameters, annealing, physical and mechanical properties

*The research was carried out as part of the state task for science of Siberian Federal University, Project No. FSRZ-2020-0013.*

### For citation

Sidelnikov S.B., Lopatina E.S., Lopatin V.A., Belyaev S.V., Arnautov A.D., Ditkovskaya Yu.D. Research on the Production Technology for Technical Wire from a New Palladium Alloy. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 49-60. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-49-60>

### Введение

В промышленности широко используются палладий и его сплавы, обладающие хорошими эксплуатационными свойствами и оптическими характеристиками, при этом они имеют привлекательный вид и сочетаются с драгоценными, полудрагоценными камнями и эмалями [1, 2]. Сплавы палладия имеют высокие механические свойства, пригодны для всех видов обработки давлением и резанием и обладают интенсивным белым цветом [3]. Для получения сплавов на основе палладия с повышенными механическими свойствами в него в качестве легирующих элементов обычно добавляют золото, серебро, никель, медь и другие элементы [4]. Изделия из палладия за последнее время стали пользоваться большей популярностью, при этом цены на палладий существенно возросли и превысили цены на платину [5].

Сплавы драгоценных металлов распространены для применения в приборах электронных устройств,

для изготовления элементов высокочастотных электрических приборов и устройств, в частности проволочных контактов для плат передачи видеосигналов, где желательно низкое контактное сопротивление. С этой целью используются составы сплавов, содержащих палладий, золото, серебро и платину, а также медь и цинк. Для них требуются высокая проводимость в данном диапазоне частот, определенный уровень пластических свойств (возможность гибки контакта под определенную форму) и высокая износостойкость.

Однако существует и ряд особенностей, ограничивающих область их применения, в том числе высокая стоимость, способность к поглощению водорода при литье слитков, нормы безопасности для здоровья человека и экологии. Так, например, изделия из сплавов, содержащих более 0,05% никеля, директива Европейского Сообщества 76/769/ЕЕС [1] запрещает производить и продавать.

Анализ научно-технической литературы показал, что сведения об обработке давлением палладиевых

сплавов немногочисленны, а имеющиеся в основном посвящены получению полуфабрикатов для ювелирного производства [6-8].

Поэтому для производства изделий различного назначения из сплавов на основе палладия необходимо выполнение следующих требований:

- сплавы, используемые для производства, должны быть экологически безвредными и гипоаллергенными, что достигается отсутствием в них никеля, кобальта и других элементов;

- наличие легирующих элементов в сплаве и их концентрации должны обеспечивать соответствующую цветовую гамму изделий и сравнительно низкую себестоимость;

- уровень физико-механических и электрических свойств этих сплавов должен обеспечивать применение больших степеней холодной деформации и для получения хороших эксплуатационных свойств изделий;

- должна быть обеспечена технологичность обработки на применяемом оборудовании и рациональность режимов деформации металла с целью снижения брака и увеличения производительности производства изделий из этих сплавов.

Проведенный технико-экономический анализ производства длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов драгоценных металлов позволил сделать следующие выводы:

- отечественная продукция из сплавов драгоценных металлов обладает низкой конкурентоспособностью, в том числе из-за несоответствия качества изделий требованиям мирового рынка из-за отсутствия научных разработок по созданию новых сплавов и технологий их термомеханической обработки;

- произошла реструктуризация рынка и возрос спрос на изделия из этих сплавов;

- основными требованиями при создании новых сплавов является повышение технологических и физико-механических свойств литых и деформированных полуфабрикатов из них за счет модифицирования, снижение стоимости изделий и обеспечение соответствия европейским нормам безопасности.

Целью исследований, таким образом, является разработка комплекса научно-технических решений для создания технологии получения проволоки из сплавов палладия для плат передачи видеосигналов.

#### Материалы, оборудование и методы исследования

Исследованиям подвергались деформированные полуфабрикаты из нового сплава палладия [9], предна-

значенного для изготовления проволочных контактов.

На основе результатов проведенного патентного поиска [9, 10] был предложен и запатентован сплав палладия [11], химический состав которого представлен в **табл. 1**.

В этом сплаве палладий является основным элементом и обеспечивает в заданных пределах получение требуемых физико-механических свойств изделий из него. Серебро при сплавлении с палладием образует систему с непрерывной взаимной растворимостью компонентов и снижает электрическое сопротивление. Медь в качестве легирующего компонента выбрана в связи с образованием с палладием непрерывной системы твердых и жидких растворов. Ее содержание является оптимальным для замещения в сплаве палладия и обеспечивает повышенные прочностные свойства, твердость и износостойкость. Золото повышает пластичность и антикоррозионные свойства, а также уменьшает склонность к газопоглощению при литье. Кроме того, наличие в сплаве серебра, золота и меди в указанных количествах обеспечивает снижение температуры литья на 50-100°C. Платина при сплавлении с палладием также образует систему с непрерывной взаимной растворимостью компонентов и придает сплаву блестящий белый цвет. Добавление цинка снижает температуру плавления сплава и обеспечивает хорошую пластичность. Родий, наряду с модифицирующим действием для измельчения зеренной структуры литой заготовки, является упрочняющей добавкой, повышающей антикоррозионные свойства.

В качестве оборудования использовали сортовые прокатные и волочильные станы фирмы «Марио ди Майо». В **табл. 2** приведены данные для основного прокатного оборудования (**рис. 1, а**), применяемого для исследований. Для многократного волочения проволоки применяли волочильную машину типа 10 NFS TRONIC (**рис. 1, б**), техническая характеристика которой приведена в **табл. 3**.

Исследование структуры полуфабрикатов из нового сплава на основе палладия проводили с использованием светового микроскопа Observer.A1m, Carl Zeiss при увеличении 500 крат. Твердость измеряли с помощью цифрового микротвердомера DM8. Микрорентгеноспектральный анализ образцов проводился с помощью растрового электронного микроскопа EVO 50 с энергодисперсионным анализатором Inca ENERGY 350. Для определения механических свойств литых, кованных и прокатанных образцов использовали универсальную машину LFM 400 kN, имеющую технические характеристики, приведенные в **табл. 4**.

Таблица 1. Химический состав исследуемого сплава палладия

Table 1. Chemical composition of the palladium alloy under study

Содержание компонентов, мас.%						
Pd	Pt	Au	Cu	Zn	Rh	Ag
33,8-54,0	5,0-8,7	5,0-10,5	15-17	1,0-1,8	0,001-0,01	20,0-28,4

Таблица 2. Параметры прокатных станов, применяемых для исследований  
 Table 2. Parameters of rolling mills used for research

Наименование параметра	Величина параметра	
	AF 200+180R	LG 200
Длина бочки валков, мм	200+180	200
Диаметр валков, мм	130	110
Скорость прокатки, м/мин	12,5-26	25
Допустимая сила прокатки, кН	60	500
Максимальный момент прокатки, кН·м	13,6	10,3
Максимальная мощность электродвигателя, кВт	7,5	7,5



а



б

Рис. 1. Общий вид сортопрокатного стана AF 200+180R (а) и волочильного стана 10 NFS TRONIC (б)  
 Fig. 1. General view of rolling mill AF 200+180R (a) and drawing mill 10 NFS TRONIC (б)

Таблица 3. Параметры волочильного стана, применяемого для исследований  
 Table 3. Parameters of the drawing mill used for research

Наименование параметра	Величина параметра
Число проходов	10
Диаметр проволоки, мм	0,12-2
Скорость волочения, м/мин	0-300
Максимальная мощность электродвигателя, кВт	8

Таблица 4. Характеристики универсальной разрывной машины LFM 400 kN  
 Table 4. Characteristics of universal testing machine LFM 400 kN

Характеристика	Значение
Максимальное статическое усилие, кН	400
Максимальная скорость, мм/мин	500
Ход траверсы, мм	1000
Максимальное расстояние между захватами, мм	800

Методика экспериментальных исследований базировалась на результатах компьютерного моделирования изучаемых процессов деформации металла, а также результатах опытных работ и включала следующие этапы:

- анализ действующих режимов деформации металла для известных сплавов на основе палладия при изготовлении прутков и проволоки;

- экспериментальная апробация предложенных технологий в лабораторных условиях;

- расчет технологических режимов деформации металла с помощью программы «PROVOL» и базы данных «Металлы и оборудование» [1], разработка новых рациональных режимов обжатий и расчет энергосиловых параметров процессов прокатки и волочения с проверкой ограничений;

– определение физико-механических характеристик полуфабрикатов из нового сплава, анализ структуры и свойств полученных длинномерных полуфабрикатов и установление закономерностей их изменения в зависимости от режимов деформации металла.

Для изготовления проволочных контактов (рис. 2, а) из исследуемого сплава провели анализ технологии получения проволоки, применяемой в настоящее время в промышленных условиях, для сплавов на основе палладия, который показал, что в качестве заготовки используется кованный отожженный пруток размерами  $15 \times 15$  мм (размер стороны  $x_i = 15$  мм). Далее ведут прокатку прутков на размер  $x_i = 10,5$  мм за 8 проходов на сортовом прокатном стане AF 200+180R с диаметром рабочих валков 130 мм и допустимой силой прокатки 620 кН, а затем получают прутки размерами  $x_i = 1,05$  мм за 37 проходов на стане LG 200 с диаметром валков 110 мм и допустимой силой прокатки 500 кН. Окончательно проволоку диаметром в диапазоне 0,50-0,70 мм производят на многократном волоочильном стане со скольжением с допустимой силой волочения 5 кН за 10 переходов.

Выявлено, что при действующей схеме обжатия по проходам распределены неравномерно (рис. 2, б), что приводит к большой вероятности обрыва в 4, 5 и 6-м проходах при прокатке вследствие быстрого упрочнения металла и увеличению силовой загрузки оборудования.

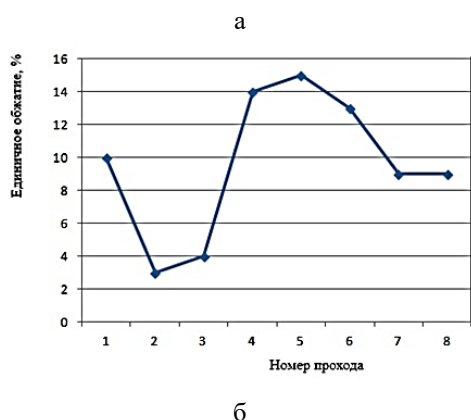
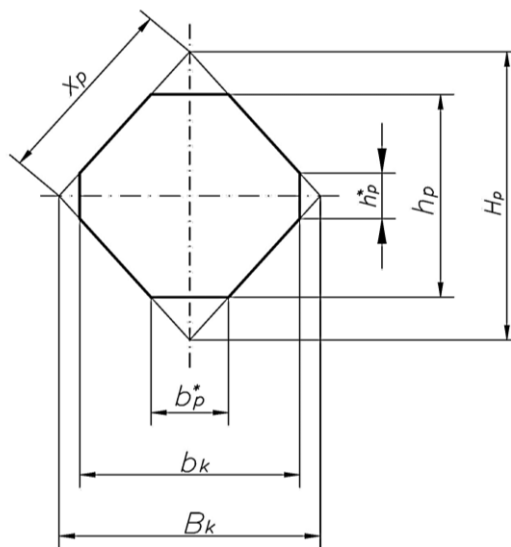


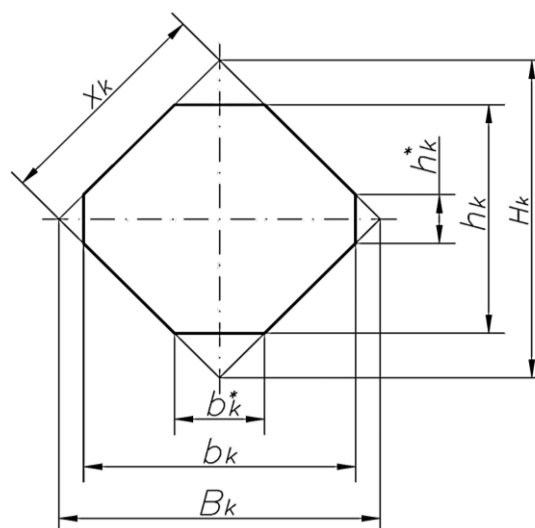
Рис. 2. Вид проволочного контакта из сплавов палладия (а) и изменение единичных обжатий  $\varepsilon_{сд}$  по проходам для действующего режима прокатки прутков размером  $x_i = 10,5$  мм из заготовки размером  $x_i = 15$  мм (б)

Fig. 2. Wire contact made of palladium alloys (а) and the change in single reductions  $\varepsilon_{сд}$  by passes for the current rolling mode of bars of size  $x_i = 10.5$  mm from a blank of size  $x_i = 15$  mm (б)

При прокатке прутков из драгоценных металлов и их сплавов на промышленных сортовых станах традиционно используется калибровка ромб-квадрат со срезанными угловыми элементами (рис. 3, 4). Данная схема калибров позволяет добиться большей точности геометрии и размеров получаемого прутка, обеспечивает равномерность деформации в процессе прокатки по проходам, а также является более близкой к кругу – поперечному сечению получаемой затем волочением проволоки. Применение данной системы калибров увеличивает прочность и стойкость инструмента, поскольку уменьшается разница между рабочими диаметрами валков.



а



б

Рис. 3. Калибры, применяемые для производства сортового проката из драгоценных металлов и их сплавов: а – ромбический; б – квадратный  
Fig. 3. Passes used for manufacturing long products made of precious metals and their alloys: а is a diamond pass; б is a square pass

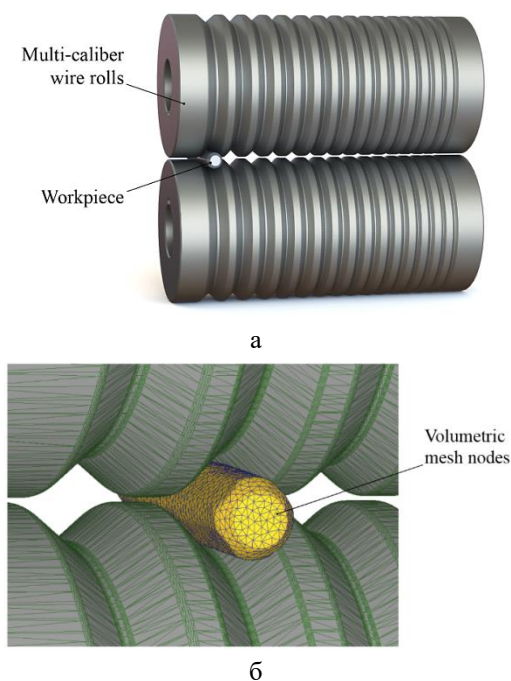


Рис. 4. Общий вид модели сортовой прокатки прутков: а – модель валков в SolidWorks; б – модель процесса прокатки заготовки с конечно-элементной сеткой в Deform-3D  
 Fig. 4. General view of the long bar rolling model: a is a model of rolls in SolidWorks; б is a model of the billet rolling process with a finite element grid in Deform-3D

### Полученные результаты и их обсуждение

На основании проведенного анализа промышленной технологии предложено перераспределить единичные обжатия  $\varepsilon_{ед}$  на первом этапе при прокатке на сортовом стане AF 200+180R с диаметром рабочих валков 130 мм и допустимой силой прокатки 620 кН и за 8 проходов получать пруток размерами  $x_i = 9$  мм (табл. 5). Суммарное обжатие  $\varepsilon_{\Sigma}$  при этом за 8 проходов не превышает 64%, что дает возможность прогнозировать прокатку без промежуточного отжига и разрушения металла.

Компьютерное моделирование режимов сортовой прокатки прутка из исследуемого сплава палладия проводили в программе Deform-3D, которая позволила оптимизировать маршрут обработки заготовки путем анализа распределения напряжений и прогнозирования вероятности ее разрушения. Модель включала спроектированные в среде SolidWorks заготовку, рабочий инструмент (см. рис. 4) и задаваемые для них в препроцессоре Deform-3D граничные условия и параметры модели (табл. 6) в соответствии с особенностями используемой технологии.

Для моделирования и расчета силы прокатки  $P_{п}$  использовали полученную экспериментальным путем формулу для определения временного сопротивления в зависимости от суммарной степени обжатия, которая имеет вид

$$\sigma_b = 0,1302 \cdot \varepsilon_{\Sigma}^2 - 7,7913 \cdot \varepsilon_{\Sigma} + 260.$$

Таблица 5. Предложенный режим первого этапа прокатки прутков из сплавов палладия  
 Table 5. The proposed mode of the first stage of rolling bars made of palladium alloys

Номер прохода $i$	Размер стороны $x_i$ , мм	Единичная вытяжка $\lambda_{ед}$	Единичное обжатие $\varepsilon_{ед}$ , %	Суммарное обжатие $\varepsilon_{\Sigma}$ , %	Сила прокатки $P_{п}$ , кН
–	15,0	–	–	–	–
1	14,0	1,15	12,9	12,9	22,3
2	13,1	1,14	11,9	23,7	16,2
3	12,4	1,12	10,4	31,6	12,9
4	11,6	1,14	12,1	40,2	14,3
5	11,0	1,11	10,1	46,2	13,1
6	10,5	1,10	8,9	51,0	12,9
7	9,7	1,17	14,6	58,2	17,6
8	9,0	1,16	13,9	64,0	18,2

Таблица 6. Параметры модели для первого этапа сортовой прокатки прутков и волочения  
 Table 6. Model parameters for the first stage of long bar rolling and drawing

Параметр	Значение	
	Прокатка	Волочение
Разрешение сетки	1/5 ширины сечения заготовки	
Разрешение хода решателя	1/3 минимального элемента сетки	
Материал инструмента	Абсолютно жесткий	
Материал заготовки	Вязкопластичный	
Коэффициент Пуассона	0,3897	
Температура, °С	20	
Скорость, м/мин	9,7	20
Угол волоки, град	–	7
Коэффициент трения заготовки по инструменту	0,25	0,08
Количество элементов	32000	10000

На рис. 5 представлено распределение напряжений (рис. 5, а) и критерия разрушения Кокрофта-Латама (рис. 5, б), которое позволяет заключить, что металл в конце прокатки обладает достаточным запасом пластичности при его обработке с принятой степенью деформации без использования промежуточных отжигов, при этом значение критерия разрушения близко, но не достигает значения, равного 1. Расчеты показали также

(см. табл. 5), что сила прокатки не превышает допустимой для действующего оборудования.

На втором этапе прокатки использовали режим обжатий, представленный в табл. 7. Расчеты силы прокатки для предлагаемых режимов обжатий также показали, что загрузка оборудования удовлетворяет допустимым значениям этой величины для применяемых сортопрокатных станков.

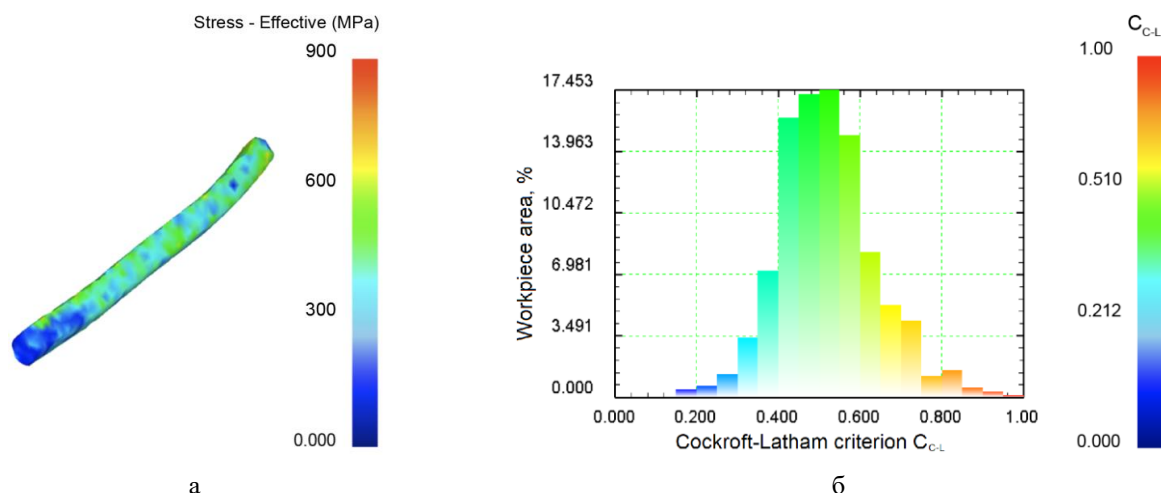


Рис. 5. Визуализация распределения напряжений (а) и распределения критерия разрушения Кокрофта-Латама по поверхности полуфабриката (б)

Fig. 5. Visualization of the stress distribution (a) and the distribution of the Cockcroft-Latham fracture criterion on the surface of the semi-finished product (б)

Таблица 7. Режим обжатий для второго этапа прокатки прутков из исследуемого сплава

Table 7. Reduction mode for the second stage of rolling bars from the alloy under study

Номер прохода $i$	$x_i$ , мм	$\lambda_{ед}$	$\epsilon_{ед}$ , %	$\epsilon_{\Sigma}$ , %	$P_{п}$ , кН
1	7,9	1,26	20,5	20,5	8,4
2	7,2	1,20	16,94	34,0	8,3
3	6,4	1,26	20,49	47,5	9,8
4	5,9	1,18	14,97	55,3	9,0
5	5,3	1,25	20,17	64,3	11,8
6	4,6	1,32	24,37	72,7	13,8
7	4,0	1,33	25,14	79,8	13,9
8*	3,4	1,39	27,90	85,4	13,5
9	2,9	1,34	25,30	25,3	2,8
10	2,5	1,38	27,32	45,7	2,7
11	2,2	1,26	20,48	56,8	2,6
12	2,0	1,19	16,43	63,9	2,5
13	1,9	1,20	10,44	67,6	2,1
14	1,8	1,12	10,30	71,0	2,0
15	1,45	1,58	36,56	81,6	4,1
16	1,2	1,46	31,43	87,4	3,3
17	1,0	1,44	30,56	91,2	2,6

\* Проход, после которого проводится промежуточный отжиг.

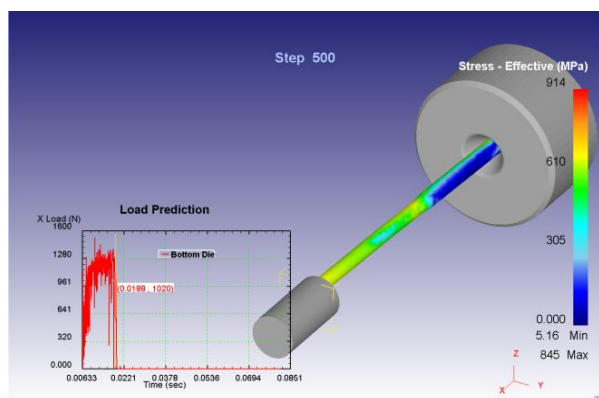
С применением разработанной в программе Deform-3D компьютерной модели процесса волочения [1] (см. табл. 6) проведено его моделирование по предлагаемому режиму обжатий (табл. 8), позволившее учесть влияние параметров волочения на напряжения и силовые характеристики процесса (рис. 6, 7). Результаты расчетов по модели для исследуемого сплава представлены в графическом ви-

де на рис. 7. Анализ представленных данных показывает, что коэффициент запаса  $\eta_B$  по переходам для получения проволоки диаметром до 0,5 мм составляет 1,69, что свидетельствует о высокой стабильности процесса деформации металла при волочении. Величины силы волочения  $P_B$  невелики, поэтому силовая нагрузка оборудования находится в допустимых пределах.

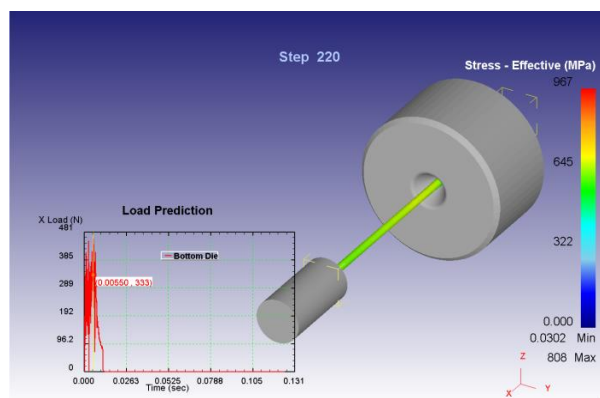
Таблица 8. Предложенный режим волочения для исследуемого сплава палладия

Table 8. The proposed drawing mode for the palladium alloy under study

Номер перехода	Диаметр, мм	$\lambda_{сд}$	$\epsilon_{сд}, \%$	$\epsilon_{\Sigma}, \%$	$\eta_B$	$P_B, \text{кН}$
1	1,00	1,27	21,5	21,5	1,77	0,22
2	0,90	1,23	19,1	36,4	1,50	0,26
3	0,80	1,27	21,1	49,8	1,52	0,23
4	0,70	1,30	23,3	61,5	1,58	0,17
5	0,60	1,36	26,5	71,7	1,58	0,12
6	0,50	1,44	30,7	80,4	1,69	0,09



а



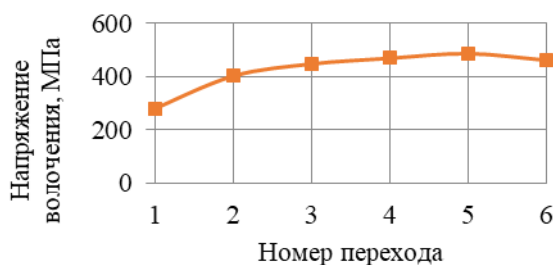
б

Рис. 6. Результаты моделирования процесса волочения проволоки из нового сплава палладия:

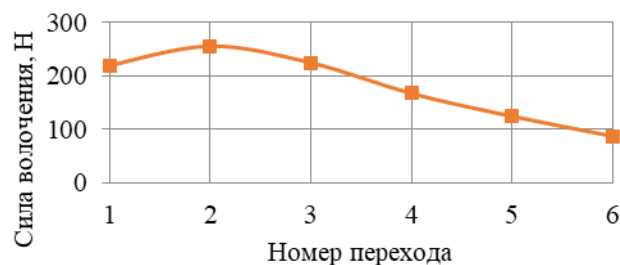
а – распределение напряжений на первом переходе; б – распределение напряжений на шестом переходе

Fig. 6. Simulation of the process of drawing wire from a new palladium alloy:

a is the stress distribution at the first pass; б is the stress distribution at the sixth pass



а



б

Рис. 7. Графики изменения напряжения (а) и силы волочения (б) по переходам

Fig. 7. Graphs of stress changes (a) and drawing force (б) by passes



Анализ распределения напряжений (см. рис. 6) показывает, что максимальные напряжения наблюдаются в калибрующей зоне волокна и их значения не превышают допустимых значений. Полученное распределение значений критерия Кокрофта-Латама по поверхности заготовки (рис. 8) показало достаточно высокий ресурс пластичности проволоки, что позволяет рекомендовать данный маршрут волочения для промышленного опробования.

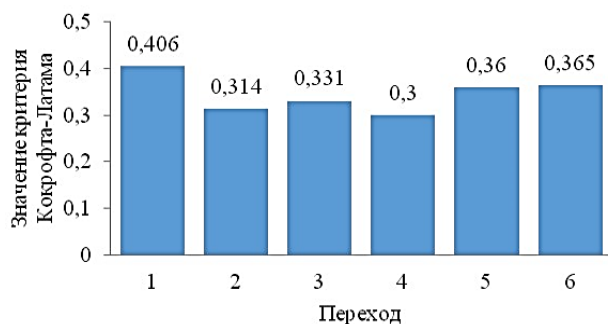


Рис. 8. Значения критерия Кокрофта-Латама по переходам волочения

Fig. 8. Values of the Cockcroft-Latham criterion by drawing passes

Результаты моделирования учитывали при выборе параметров технологического процесса и инструмента, а для их проверки были проведены экспериментальные исследования технологии получения литых и деформированных полуфабрикатов из опытных сплавов в лабораторных условиях на прокатных станах AF 200+180R и LG 200, а также волочильном стане 10 NFS TRONIC. Анализ результатов экспериментальных исследований подтвердил данные моделирования и показал, что для получения из ковальной заготовки размером  $x_0 = 15$  мм проволоки диаметром 0,5 мм из нового сплава палладия возможно использование предлагаемых режимов обжатий при прокатке и волочении.

Физико-механические свойства определяли на образцах в деформированном и отожженном при температуре 900°C и выдержке 8 ч состояниях, полученных путем прокатки и волочения (табл. 9) в лабораторных

условиях. Для образцов диаметром 0,5 и 0,7 мм определяли удельное электросопротивление, которое находилось в пределах 20-22 мкОм/см, и микротвердость HV в диапазоне 296-350 кгс/мм<sup>2</sup>.

Металлографические исследования показали, что для литой заготовки характерно дендритное строение, формируемое при кристаллизации. Компоненты, входящие в состав исследуемого сплава, образуют твердые растворы с неограниченной растворимостью в твердом и жидком состояниях. В связи с этим легирующие элементы при литье и кристаллизации заготовки распределяются неоднородно, формируя дендритную структуру. Для снижения неоднородности литой заготовки проводился отжиг при температуре 900°C в течение 8 ч, при этом дендритное строение становится менее выраженным и уменьшается размер дендритных ячеек.

В структуре полуфабрикатов, полученных при прокатке при небольших степенях деформации, сохраняется дендритное строение. С ее увеличением происходит искажение дендритных кристаллов и их вытягивание в направлении деформации (рис. 9, а, б). Изменения, происходящие в структуре, приводят к увеличению значений микротвердости (см. табл. 9).

Деформация заготовок волочением на более значительные степени приводит к формированию волокнистого строения в проволоке. С уменьшением диаметра проволоки зёрна в структуре становятся более тонкими и вытянутыми (рис. 9, в, г). Формирование тонкого волокнистого строения проволоки сопровождается деформационным упрочнением сплава и повышением микротвердости до 350 кгс/мм<sup>2</sup> (см. табл. 9).

Микрорентгеноспектральный анализ фаз в структуре исследуемых образцов (рис. 10) показал, что в структуре сплава наблюдается неоднородный твердый раствор на основе палладия. В микроструктуре присутствуют светлые и темные участки, в различной степени обогащенные медью, серебром, золотом и платиной. Анализ образца в отожженном состоянии выявил, что неоднородность в распределении легирующих элементов по сечению твердого раствора сохраняется.

Таблица 9. Физико-механические свойства полуфабрикатов из исследуемого сплава

Table 9. Physical and mechanical properties of semi-finished products from the alloy under study

Номер образца	Размер (диаметр), мм, и состояние	Площадь, мм <sup>2</sup>	Суммарное обжатие $\varepsilon_{\Sigma}$ , %	Микротвердость HV, кгс/мм <sup>2</sup>	Временное сопротивление $\sigma_b$ , МПа
1	5×5, деформированное	25,0	50	178,7	322
2	3,4×3,4, деформированное	10,2	59,2	163,2	278
3	3,4×3,4, отожженное	—	—	131	—
4	2,2×2,2, деформированное	4,84	80,6	250	470
5	2,2×2,2, отожженное	—	—	190	—
6	∅0,7, деформированное	0,385	92	296	632
7	∅0,5, деформированное	0,196	96	350	777

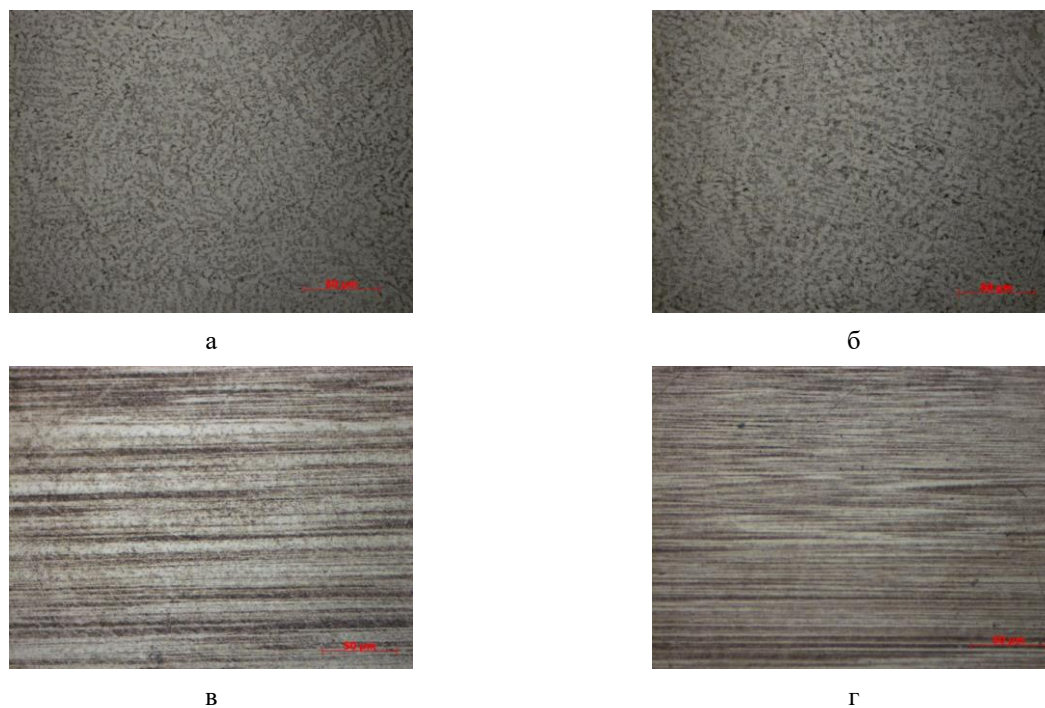
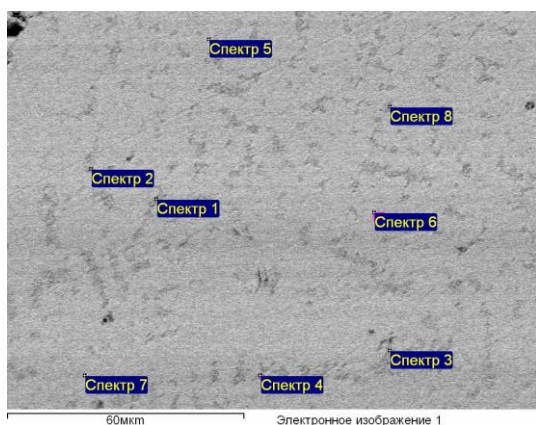


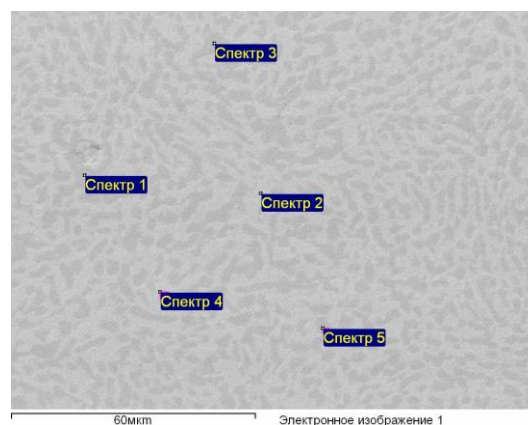
Рис. 9. Микроструктура прутков и проволоки из исследуемого сплава палладия,  $\times 500$ :  
 а – размер  $x_i = 3,4$  мм; б – размер  $x_i = 2,2$  мм; в – диаметр 0,7 мм; г – диаметр 0,5 мм

Fig. 9. Microstructure of rods and wire made of the palladium alloy under study,  $\times 500$ :  
 a is size  $x_i = 3.4$  mm; б is size  $x_i = 2.2$  mm; в is a diameter of 0.7 mm; г is a diameter of 0.5 mm



Все результаты в весовых %

Спектр	Cu	Pd	Ag	Au
Спектр 1	35,24	33,82	30,94	0,00
Спектр 2	0,00	35,35	35,22	29,44
Спектр 3	22,15	26,27	29,01	22,57
Спектр 4	17,12	37,51	28,28	17,09
Спектр 5	22,47	38,27	39,26	0,00
Спектр 6	0,00	49,92	50,08	0,00
Спектр 7	46,40	53,60	0,00	0,00
Спектр 8	17,18	26,72	35,04	21,06



Все результаты в весовых %

Спектр	Cu	Pd	Ag	Pt	Au
Спектр 1	22,93	35,78	41,29	0,00	0,00
Спектр 2	0,00	34,35	44,89	0,00	20,76
Спектр 3	0,00	80,00	0,00	20,00	0,00
Спектр 4	0,00	0,00	61,80	0,00	38,20
Спектр 5	25,08	55,98	0,00	18,94	0,00

Рис. 10. Микрорентгеноспектральный анализ образцов сплава палладия в литом (а) и отожженном (б) состояниях  
 Fig. 10. X-ray microanalysis of the palladium alloy samples in cast (a) and annealed (б) states

### Заключение

Таким образом, для нового сплава палладия проведено моделирование процессов термомеханической обработки и выполнены комплексные исследования физико-механических свойств и структуры металла, результаты которых могут быть использованы при разработке рациональных технологических режимов сортовой прокатки и волочения проволоки для изготовления проволочных контактов.

По их результатам можно сделать следующие выводы:

- для исследуемого сплава палладия получена аппроксимационная формула для расчета временного сопротивления в зависимости от суммарной степени деформации, которая использовалась для моделирования процессов деформации металла в программном комплексе Deform-3D;

- проведено компьютерное моделирование первого этапа сортовой прокатки для получения прутков размером 10,5 мм, характерного только для обработки сплавов на основе палладия, и с использованием этих результатов изучены закономерности формоизменения и напряженно-деформированного состояния металла, силовые параметры и возможность разрушения заготовок при прокатке;

- моделирование и исследование процесса получения проволоки технического назначения из нового сплава палладия показали, что предложенные режимы обжарки при прокатке и волочении позволяют получать длинномерные деформированные полуфабрикаты диаметром до 0,5 мм с требуемым уровнем механических и электрических характеристик;

- металлографические исследования литых и деформированных полуфабрикатов из нового сплава палладия показали, что в микроструктуре присутствуют светлые и темные участки, в различной степени обогащенные медью, серебром, золотом и платиной.

### Список источников

1. Технологические основы производства длинномерных литых и деформированных полуфабрикатов из сплавов драгоценных металлов: монография / С.Б. Сидельников, Е.С. Лопатина, Н.Н. Довженко и др. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2022. 204 с.
2. Теория и практика ювелирного дела / Э. Бреполь; под ред. Ю.Н. Баскакова и В.Ф. Каргина. 13-е изд. СПб.: Соло, 2000. 528 с.
3. Благородные металлы: справ. изд. / под ред. Е.М. Савицкого. М.: Металлургия, 1984. 592 с.
4. ГОСТ 30 649–99. Сплавы на основе благородных металлов ювелирные. Марки. М.: Стандартинформ, 2000.
5. Милькина А. Будут ли расти цены на платину и палладий в 2023 году и стоит ли в них инвестировать [Электронный ресурс]. Официальный сайт Банка.ру – финансовый маркетплейс. Режим доступа: <https://www.banki.ru/news/daytheme/?id=10978312>.

6. Рудницкий Э.А., Довженко Н.Н., Ходюков Б.П. Исследование свойств новых палладиевых сплавов и совершенствование технологии их обработки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2009. №3. С. 41–44.
7. Материаловедение. Металловедение палладия и его сплавов: учеб. пособие / В.С. Биронт, Н.Н. Довженко, С.Н. Мамонов и др. Красноярск: ГУЦМиЗ, 2007. 152 с.
8. Рудницкий Э.А. Совершенствование технологии производства проволоки из палладиевых ювелирных сплавов: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2009. 221 с.
9. Пат. GB861646А Великобритания, МПК C22C. An improved electrical resistance alloy / Alan Sydney Darling, опублик. 28.07.1959.
10. Пат. US5484569А США, МПК C22C30/02. Silver palladium alloy / Arthur S. Klein, Edward F. Smith, III, опублик. 16.01.1996.
11. Пат. 2788879 РФ. Сплав на основе палладия / Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Лопатин В.А. и др.; опублик. 25.01.2023, Бюл. № 3.

### References

1. Sidelnikov S.B., Lopatina E.S., Dovzhenko N.N. et al. *Tekhnologicheskie osnovy proizvodstva dlinnomernykh litykh i deformirovannykh polufabrikatov iz splavov dragotsennykh metallov: monografiya* [Technology of production of long cast and deformed semi-finished products from precious metal alloys: monograph]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2022, 204 p. (In Russ.)
2. Brepol E. *Teoriya i praktika yuvelirnogo dela* [Theory and practice of jewelry]. Saint Petersburg: Solo, 2000, 528 p. (In Russ.)
3. Savitsky E.M. *Blagorodnye metally: sprav. izd.* [Noble metals: reference book]. Moscow: Metallurgiya, 1984, 592 p. (In Russ.)
4. GOST 30 649-99. *Splavy na osnove blagorodnykh metallov yuvelirnye. Marki* [Noble metal-based alloys for jewelry. Grades]. Moscow: Standartinform, 2000. (In Russ.)
5. Milkina A. Will the prices for platinum and palladium rise in 2023 and is it worth investing in them? Available at: <https://www.banki.ru/news/daytheme/?id=10978312>
6. Rudnitsky E.A., Dovzhenko N.N., Khodyukov B.P. Study on the properties of new palladium alloys and improvement of their treatment technology. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2009;(3):41–44. (In Russ.)
7. Biront V.S., Dovzhenko N.N., Mamonov S.N. et al. *Materialovedenie. Metallovedenie palladiya i ego splavov: ucheb. posobie* [Materials science. Metal science of palladium and its alloys: study guide]. Krasnoyarsk: State University of Non-Ferrous Metals and Gold, 2007, 152 p. (In Russ.)

8. Rudnitsky E.A. *Sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva provoloki iz palladievyykh yuvelirnykh splavov: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improving the technology of wire production from palladium jewelry alloys: PhD (Eng.) thesis]. Krasnoyarsk, 2009, 221 p.
9. Alan Sydney Darling. An improved electrical resistance alloy. Patent GB, no. 861646A, 1959.
10. Arthur S. Klein, Edward F. Smith, III. Silver palladium alloy. Patent US, no. 5484569A, 1996.
11. Sidelnikov S.B., Lopatina E.S., Lopatin V.A. et al. *Splav na osnove palladiya* [Palladium-based alloy]. Patent RU, no. 2788879, 2023.

Поступила 19.12.2023; принята к публикации 06.02.2024; опубликована 28.03.2024  
Submitted 19/12/2023; revised 06/02/2024; published 28/03/2024

**Сидельников Сергей Борисович** – доктор технических наук, профессор, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.  
Email: sbs270359@yandex.ru. ORCID 0000-0002-5611-2808

**Лопатина Екатерина Сергеевна** – кандидат технических наук, доцент, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.  
Email: eslopatina@mail.ru. ORCID 0000-0002-1604-1857

**Лопатин Владимир Александрович** – аспирант, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.  
Email: lopatin9028@mail.ru. ORCID 0009-0005-4179-0920

**Беляев Сергей Владимирович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой литейного производства, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.  
Email: 244812@mail.ru. ORCID 0000-0002-7495-1509

**Арнаутв Александр Дмитриевич** – кандидат технических наук, доцент, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.  
Email: goodmorner@gmail.com. ORCID 0000-0002-2631-9920

**Дитковская Юлия Дмитриевна** – кандидат технических наук, доцент, Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия.  
Email: yulianomennescio@bk.ru. ORCID 0009-0003-9913-0023

**Sergey B. Sidelnikov** – DrSc (Eng.), Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.  
Email: sbs270359@yandex.ru. ORCID 0000-0002-5611-2808

**Ekaterina S. Lopatina** – PhD (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.  
Email: eslopatina@mail.ru. ORCID 0000-0002-1604-1857

**Vladimir A. Lopatin** – postgraduate student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.  
Email: lopatin9028@mail.ru. ORCID 0009-0005-4179-0920

**Sergey V. Belyaev** – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Foundry Department, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.  
Email: 244812@mail.ru. ORCID 0000-0002-7495-1509

**Aleksandr D. Arnautov** – PhD (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.  
Email: goodmorner@gmail.com. ORCID 0000-0002-2631-9920

**Yuliya D. Ditkovskaya** – PhD (Eng.), Associate Professor, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia.  
Email: yulianomennescio@bk.ru. ORCID 0009-0003-9913-0023