

На правах рукописи

*Лопатин*

**ЛОПАТИН Владимир Александрович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ  
ПРОКАТКИ И ВОЛОЧЕНИЯ ПОЛУФАБРИКАТОВ  
ИЗ СПЛАВОВ ПЛАТИНЫ И ПАЛЛАДИЯ**

**2.6.4 – Обработка металлов давлением (технические науки)**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Красноярск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет».

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор Беляев Сергей Владимирович

**Официальные оппоненты:**

**Логинов Юрий Николаевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет», профессор кафедры обработки металлов давлением.

**Тулупов Олег Николаевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский технический университет им. Г.И. Носова», профессор кафедры технологий обработки материалов.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

Защита состоится «25» октября 2024 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.404.01 на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу 660025, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 95, ауд. 219.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет» и на сайте <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Лесив Елена Михайловна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследований

Производство продукции из сплавов драгоценных металлов и сплавов находит широкое применение во многих отраслях промышленности и имеет огромное практическое применение для развития мировой и отечественной экономики. Длинномерные деформированные полуфабрикатов из сплавов на основе платины и палладия являются основной заготовительной базой для изготовления изделий ювелирного назначения в виде цепей, колец, браслетов и т.п., и технического назначения при изготовлении катализаторных сеток, питателей, припоев, контактов и т.п.

В качестве продукции технического назначения можно выделить каталитические системы для окисления аммиака в агрегатах получения азотной кислоты, которые представляет собой комбинацию катализаторных, улавливающих и разделительных сеток, изготавливаемых из проволоки сплавов палладия, платины и др. Их использование в качестве катализаторов рентабельно, так как нет других материалов, обладающих такой совокупностью каталитических свойств, химической устойчивостью, высокими температурами плавления и кипения.

В качестве продукции ювелирного назначения из драгоценных металлов и их сплавов можно выделить ювелирные цепи, объем изготовления которых достаточно велик. Производство ювелирных изделий развито наиболее широко и обеспечивает ими российский и мировой рынок. Статистические исследования показывают, что среди потребителей ювелирной продукции особой популярностью также пользуются сплавы на основе платины и палладия. В связи с этим целесообразным является разработка новых сплавов на их основе, соответствующих нормативным документам, и внедрение их в производство. Однако для этого необходимо провести комплексные исследования, связанные с разработкой новых энергоэффективных технологических режимов производства деформированных полуфабрикатов из этих сплавов с использованием имеющегося на специализированных металлургических предприятиях литейного, прокатного и волочильного оборудования.

Таковыми предприятиями, обеспечивающими большую долю потребности отечественного рынка по продажам изделий из драгоценных металлов и их сплавов, является Красноярский завод цветных металлов имени В.Н. Гулидова (ОАО «Красцветмет») и Екатеринбургский завод по обработке цветных металлов (АО «ЕЗ ОЦМ»).

Анализ существующих технологий производства длинномерных деформированных полуфабрикатов из драгоценных металлов и их сплавов показал, что они обладают рядом недостатков, снижающих качество продукции, увеличивающих стоимость и затраты на производство. Поэтому создание новых сплавов и совершенствование технологий их обработки, а также проектирование технологических процессов и инструмента с

применением современных методов компьютерного моделирования и специализированного программного обеспечения является актуальной задачей.

Актуальность этих исследований подчеркивается тем, что они велись в рамках программ Министерства образования и науки РФ по проектам «Разработка новых сплавов и припоев на основе драгоценных металлов и технологий производства из них слитков, полуфабрикатов и ювелирных изделий», «Исследование закономерностей формирования фазового состава и структуры новых сплавов многокомпонентных систем из драгоценных металлов и изучение их свойств», «Создание новых сплавов драгоценных металлов с повышенными эксплуатационными характеристиками и исследование их свойств», «Исследование реологических характеристик деформированных полуфабрикатов из сплавов цветных металлов с использованием новых технологий совмещенной обработки и модифицирования». Практическую и научную ценность исследований представляют работы по хозяйственным договорам с ОАО «Красцветмет» по темам «Разработка технологии получения ювелирных палладиевых сплавов 850 пробы», «Разработка технологии изготовления слитков готовой продукции из платины и палладия», «Испытание на растяжение образцов сплавов на основе драгоценных металлов согласно ГОСТ 1497-84» и др.

**Степень разработанности темы:** Результаты исследований по получению полуфабрикатов из сплавов платины и палладия изложены в основном в работах уральских ученых, выполненных под руководством профессора Ю.Н. Логинова, и сотрудников ОАО «Красцветмет». Однако для решения научной задачи по разработке энергоэффективных технологий получения проволоки и листового проката ювелирного и технического назначения из новых и применяемых в промышленности сплавов необходимы дополнительные комплексные исследования и моделирование процессов их термомодеформационной обработки, а также изучение их свойств.

**Целью исследований** является разработка комплекса технических и технологических решений для совершенствования технологии производства изделий ювелирного и технического назначения из сплавов на основе платины и палладия.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

- разработка серии новых сплавов драгоценных металлов на основе палладия и платины для производства изделий ювелирного и технического назначения с заданным комплексом механических свойств и эксплуатационных характеристик;
- анализ существующей технологии производства деформированных полуфабрикатов из сплавов на основе платины и палладия и разработка более эффективных режимов обжатий при реализации операций прокатки и волочения;
- применение существующего программного обеспечения для анализа деформационных режимов обработки и энергосиловых параметров при прокатке и волочении из исследуемых сплавов на основе платины и палладия;

- компьютерное моделирование процессов сортовой, листовой прокатки и волочения, использующихся в технологической схеме получения длинномерных полуфабрикатов в виде проволоки и листового проката из сплавов на основе палладия и платины;
- экспериментальные исследования этих процессов в лабораторных и промышленных условиях для совершенствования технологии производства изделий из исследуемых сплавов и проверки адекватности разработанных моделей;
- исследование механических свойств и структуры полуфабрикатов из сплавов на основе палладия и платины в зависимости от их химического состава, режимов деформации и термической обработки;
- подготовка рекомендаций по совершенствованию технологии производства проволоки и листового проката из сплавов платины и палладия.

### **Научная новизна полученных результатов исследований.**

Научная новизна полученных результатов исследований.

1. Создана и экспериментально опробована методика проведения исследований технологии производства деформированных полуфабрикатов из новых сплавов на основе платины и палладия, применение которой дало возможность установить деформационные и силовые параметры прокатки и волочения для производства длинномерных изделий технического и ювелирного назначения.
2. Получены аппроксимационные формулы для расчета временного сопротивления полуфабрикатов из исследуемых сплавов на основе платины и палладия в зависимости от суммарной степени деформации, что позволило провести анализ силовых условий и загрузки оборудования при их обработке.
3. Установлены закономерности формирования физико-механических свойств длинномерных полуфабрикатов из исследуемых сплавов при холодной листовой, сортовой прокатки и волочении в зависимости от режимов и дробности деформации металла, наличия и количества отжигов при термообработке.
4. Получены с применением численного моделирования на ЭВМ новые научные данные по формоизменению металла, его напряженно-деформированному состоянию и возможности разрушения при заданных режимах деформации для исследуемых сплавов, позволившие усовершенствовать технологические режимы обработки.

### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

1. Разработаны и запатентованы новые сплавы платины и палладия, которые применимы для производства длинномерных полуфабрикатов в виде проволоки ювелирного и технического назначения, имеющей высокий уровень механических и эксплуатационных свойств.
2. Реализованы численные расчеты с помощью программного комплекса DEFORM 3D процессов холодной сортовой, листовой прокатки и волочения для новых сплавов платины и палладия, позволяющие определить при различных условиях обработки формоизменение металла, характеристики

напряженно-деформированного состояния, силовые параметры и возможность разрушения с использованием критерия Кокрофта-Латама.

3. Научно обоснованы и усовершенствованы технологии производства из новых сплавов платины и палладия:

- проволоки для улавливающих сеток каталитических систем диаметром 0,060-0,075 мм из сплава ПдН-5, и в производственных условиях ОАО «Красцветмет» проведена ее опытно-промышленная апробация, что позволило за счет стабилизации процесса волочения проволоки на последнем этапе ее обработки повысить производительность на 5-10% и увеличить выход годного на 1-3%.

- полос толщиной до 1,0 мм из сплава ПЛРд-20, и в производственных условиях ОАО «Красцветмет» проведена ее опытно-промышленная апробация, что позволило уменьшить трудоемкость процесса за счет снижения количества проходов при прокатке в 1,5 раза.

4. Результаты исследований внедрены в учебный процесс СФУ и используются для подготовки магистров по направлению 22.04.02 Metallургия (программа 22.05.02.10 «Технологии ювелирной и художественной обработки металлов») и аспирантов по направлению 22.06.01 «Технологии материалов» специальности 2.6.4 «Обработка металлов давлением».

#### **Методология и методы исследований.**

Исследования выполнены с использованием основных законов обработки металлов давлением, экспериментальных методов определения параметров процесса деформации металла и свойств методами испытаний на растяжение, металлографических методов исследований структуры металла и метода конечных элементов в программном комплексе DEFORM.

#### **На защиту выносятся:**

- технические решения на составы запатентованных автором новых ювелирных сплавов на основе платины 550 пробы и нового сплава палладия технического назначения;
- результаты компьютерного моделирования процессов листовой, сортовой прокатки и волочения для исследуемых сплавов платины и палладия;
- результаты экспериментальных исследований механических свойств, представленные в виде аппроксимационных формул для расчета временного сопротивления исследуемых сплавов в зависимости от суммарного обжатия;
- технические и технологические решения для получения проволоки диаметром 0,06-0,50 мм из исследуемых сплавов на основе платины и палладия, разработанных с применением результатов исследований и моделирования.

**Степень достоверности полученных результатов** подтверждается применением научных методов исследований на аттестованном и поверенном оборудовании и программных комплексов для компьютерного моделирования, а также данными практической реализации опытно-промышленного опробования разработанных технологий в условиях ОАО «Красцветмет».

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы изложены и обсуждены на национальных и международных конференциях и конгрессах, таких как «Цветные металлы и минералы» (г. Красноярск, 2018,

2019 г.); «Научное пространство России: генезис и трансформация в условиях реализации целей устойчивого развития» (г. Москва, 2020 г.); «Magnitogorsk Rolling Practice 2022» (г. Магнитогорск, 2022 г.), научно-технических конференциях СФУ (2019-2022 гг.).

**Публикации.** Результаты диссертационной работы отражены в 14 печатных трудах, из них в 1 монографии, 2 статьях из перечня журналов, рекомендуемых ВАК, 5 статьях в изданиях, входящих в базу цитирования Scopus, и 3 патентах.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 115 источников, 3 приложений. Материал изложен на 170 страницах, включая 54 таблицы и 74 рисунка.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана и обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цели и задачи, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

**В первой главе** рассмотрено современное состояние и области применения сплавов на основе платины и палладия для производства деформированных полуфабрикатов в виде листового и сортового проката, а также проволоки малых поперечных сечений для изготовления изделий технического и ювелирного назначения.

Рассмотрены тенденции и приведено обоснование технико-экономической целесообразности внедрения новых сплавов драгоценных металлов и технологий, их термомеханической обработки в производство. Выполнен обзор имеющихся в научно-технической литературе данных по физико-механическим свойствам платины и палладия, а также сплавов на их основе. Проведен анализ диаграмм состояния на основе платины и палладия и выявлены основные легирующие элементы, в качестве которых используется серебро, медь, платина, иридий, никель, а в качестве модифицирующих добавок рекомендуется использовать рутений, родий и др. элементы.

Обзор результатов научных исследований по тематике диссертационной работы показал, что основные данные приведены в диссертационных работах А.Е. Первухина, А.А. Фомина, Э.А. Рудницкого и их публикациях. Авторами получены формулы для расчета временного сопротивления для некоторых сплавов на основе платины и палладия в зависимости от суммарной степени деформации.

На основании проведенного анализа, в том числе возможных технологических схем обработки исследуемых сплавов, и сделанных выводов сформулированы цель и задачи исследований.

**Во второй главе** представлены материалы, оборудование и методики для проведения исследований.

Предложена методика проведения исследований технологии производства деформированных полуфабрикатов из новых сплавов платины и палладия, применение которой дает возможность установить рациональные режимы обработки для производства длинномерных изделий.

В соответствии с ней проведен анализ патентной литературы и диаграмм состояния на основе платины и палладия, который позволил установить наиболее применяемые в промышленном производстве длинномерных изделий ювелирного и технического назначения составы сплавов палладия и платины. На основании этого анализа предложены новые сплавы на основе платины 585 пробы для изготовления ювелирных цепей (сплавы 2, 3) и палладия технического назначения (сплав 7) для изготовления проволочных контактов (табл. 1), на составы которых получены патенты РФ.

Таблица 1 - Химический состав исследуемых сплавов

Сплав	Содержание компонентов, масс. %									
	Pt	Pd	Au	Cu	Zn	Ni	Ag	Rh	Ru	Прочие
Сплавы платины										
№1	92,2-92,8	3,8-4,2	-	-	0,01	-	0,11	3,3-3,7	-	-
№2*	58,5-59,0	-	10-14,5	-	3,1-6,4	-	Ост.	-	0,001-0,01	-
№3*	58,5-59,0	-	-	14-16	2,1-6,4	-	Ост.	0,001-0,01	-	-
№4	79,6-80,4	-	-	-	-	-	-	19,6-20,4	-	0,04
Сплавы палладия										
№5	-	85,0-85,5	2,0-2,5	-	-	-	Ост.	0,01-0,5	-	-
№6*	5,0-8,7	33,6-54,0	5,0-10,5	15-17	1,0-1,8	-	20,0-28,4	0,001-0,01	-	-
№7	0,0039	94,96	0,0003	0,0004	-	5,03	-	0,0008	-	0,0023

\* - сплавы по патентам РФ № 2751061 (сплав 2), № 2751063 (сплав 3), №2788879 (сплав 6)

Для совершенствования технологии термомодеформационной обработки использовались и промышленные сплавы, такие как, ПЛРД-20 (сплав 4), ПДН-5 (сплав 7) и др. Их химический состав приведен в табл. 1.

Для термомодеформационной обработки сплавов использовалось уникальное прокатное и волочильное оборудование фирмы Марио ди Майо: сортопрокатный стан марки AF 200+180R, листопрокатный стан марки LS 400x240, десятикратная волочильная машина типа 10 NFS TRONIC и др., а для исследований свойств - универсальная разрывная машина LFM 400 kN.

Приведены также методика компьютерного моделирования в программном комплексе DEFORM 3D и методика экспериментальных

исследований, которая апробировалась путем проведения опытных работ в лабораторных и промышленных условиях.

В третьей главе представлены результаты моделирования и исследования технологии производства длинномерных полуфабрикатов из сплавов на основе платины ювелирного №1-3 и технического №4 назначения.

Для сплавов платины провели совершенствование промышленной технологии. В соответствии с ней после литья непрерывнолитой прутки диаметром 8,0 мм поступает на сортовую прокатку, которая проводится за 12 проходов на стане 1 с диаметром валков 130 мм и допустимой силой прокатки  $P_d = 620$  кН для получения прутка размерами 3,6×3,6 мм. Далее по данной технологии осуществляется рекристаллизационный отжиг и прокатка за 8 проходов до размера 2х2 мм на стане 2 с диаметром валков 130 мм ( $P_d = 620$  кН). На третьем стане с диаметром валков 110 мм ( $P_d = 500$  кН) мм прокатку осуществляют за 8 проходов на конечный размер 1×1 мм. Завершающей операцией является волочение проволоки диаметром до 0,25 мм на многократном стане со скольжением ( $P_d = 5$  кН).

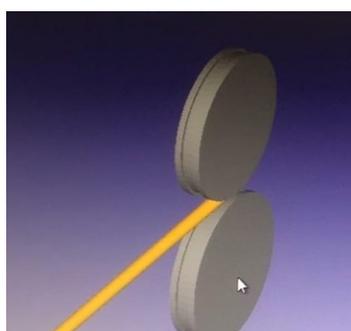
Для моделирования использовали режим обжатий (табл. 2), предложенный на основе анализа действующей технологии для ювелирных сплавов платины, где после 12 прохода был предусмотрен отжиг. Разработанная компьютерная модель процесса сортовой прокатки была создана с использованием программных комплексов SolidWorks и DEFORM-3D (рис. 1, а).

При моделировании использовали формулы для определения временного сопротивления  $\sigma_B$  в зависимости от суммарной степени обжатия  $\varepsilon_\Sigma$ , полученные аппроксимацией экспериментальных данных и имеющих вид:

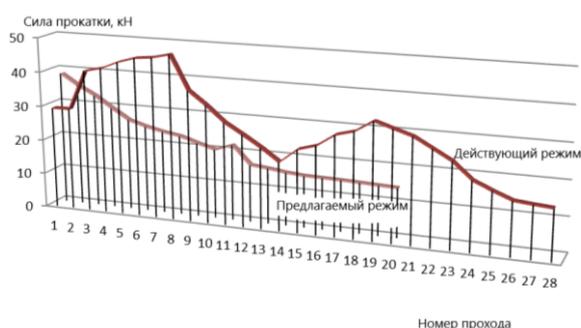
$$\text{для сплава №1} \quad \sigma_B = -0,00295 \varepsilon_\Sigma^2 + 6,8494 \varepsilon_\Sigma + 136,98; \quad (1)$$

$$\text{для сплава №2} \quad \sigma_B = 0,0161 \varepsilon_\Sigma^2 + 0,6431 \varepsilon_\Sigma + 249,79; \quad (2)$$

$$\text{для сплава №3} \quad \sigma_B = 0,0175 \varepsilon_\Sigma^2 + 0,6827 \varepsilon_\Sigma + 250,37. \quad (3)$$



а



б

Рисунок 1 - 3D-модель валков с заготовкой (а) и график (б) изменения силы по действующему и предлагаемому режимам прокатки прутков из сплава платины №1

Анализ результатов моделирования показал, что для получения прутков со стороны  $x_i = 1,0$  мм из непрерывнолитой заготовки диаметром 8 мм достаточно 2 прокатных станов вместо 3, а количество проходов сокращается с 28 до 20 по сравнению с действующим (см. табл. 2). Расчет силовых параметров прокатки

для сплава №1 (рис. 1, б) подтвердил, что ограничения по допустимой силе прокатки выполняются на всех проходах. На кривой изменения силы  $P_{п}$  по проходам нет пиковых значений, характерных для действующего режима. Аналогичные результаты были получены для сплавов №2, №3.

Таблица 2 – Предлагаемый режим сортовой прокатки для сплавов платины

Номер прохода $i$	$x_i$ , мм	$\varepsilon_{ед.}$ , %	$\varepsilon_{\Sigma}$ , %	$\lambda_{ед.}$	$\lambda_{\Sigma}$	$P_{п}$ , кН		
						сплав №1	сплав №2	сплав №3
1	7,70	24,4	24,4	1,32	1,32	38,6	34,9	35,0
2	6,76	23,0	41,8	1,30	1,72	34,6	27,5	27,6
3	6,09	18,8	52,8	1,23	2,12	31,3	22,6	22,7
4	5,53	17,3	61,0	1,21	2,60	28,6	20,1	20,2
5	5,08	15,8	67,2	1,19	3,04	26,4	17,6	17,7
6	4,70	14,3	71,8	1,17	3,55	24,7	16,4	16,5
7	4,39	12,7	75,4	1,14	4,07	23,4	15,2	15,3
8	4,15	11,0	78,1	1,12	4,57	22,4	14,4	14,5
9	3,95	9,3	80,1	1,10	5,04	21,6	13,4	13,5
10	3,80	7,6	81,6	1,08	5,45	21,0	13,2	13,3
11	3,67	6,7	82,9	1,07	5,84	20,6	12,7	12,8
12	3,60	3,9	83,5	1,04	6,08	20,3	12,4	12,5
13	2,83	38,0	38,0	1,61	9,80	12,0	10,3	10,4
14	2,28	35,0	59,7	1,54	15,10	12,1	9,2	9,3
15	1,90	30,5	72,0	1,44	21,70	11,9	8,7	8,8
16	1,61	28,2	79,9	1,39	30,20	11,7	8,2	8,3
17	1,39	25,8	85,1	1,35	40,70	11,6	8,5	8,6
18	1,22	22,8	88,5	1,30	52,80	11,5	8,6	8,7
19	1,09	20,1	90,8	1,25	66,05	11,4	9,4	9,7
20	1,00	16,0	92,3	1,19	78,5	11,3	10,0	10,3

Анализ действующих режимов волочения проволоки из сплавов платины показал, что единичные обжатия, также, как и при прокатке, распределены неравномерно. Особенно это опасно для последнего перехода, так как металл сильно упрочняется, а суммарная степень обжатия достигает 95% (табл. 3).

Исследования с использованием разработанной компьютерной модели показали, что при увеличении единичного обжатия очаг деформации увеличивается, что приводит к росту протяженности зон максимальных значений напряжений. Критерий разрушения Кокрофта-Латама по переходам (рис. 2) при этом не превышает критического значения, равного 1.

Анализ сил волочения (см. табл. 3) подтвердил, что максимальные значения этого параметра, как и при сортовой прокатке, реализуются для сплава №1, а для сплавов №2 и №3 они ниже и практически совпадают, и при этом они не превышают допустимых значений.

Результаты расчета деформационных и силовых параметров волочения проволоки для опытных сплавов платины после перераспределения деформаций (см. табл. 3) показывают, что предлагаемый режим волочения

характеризуется достаточно высокими коэффициентами запаса, что дает возможность рекомендовать его для промышленной апробации.

Таблица 3 – Предлагаемый режим волочения проволоки из сплавов платины

Номер перехода	Диаметр, мм	$\varepsilon_{ед}, \%$	$\varepsilon_{\Sigma}, \%$	Коэффициент запаса $\eta$			$P_{в}, Н$		
				Сплав №1	Сплав №2	Сплав №3	Сплав №1	Сплав №2	Сплав №3
1	0,90	36,4	36,4	2,15	1,46	1,44	111,8	128,3	136,1
2	0,80	21,0	50	1,62	1,40	1,46	140,9	114,8	106,3
3	0,70	23,4	62	1,56	1,49	1,51	120,3	90,5	79,7
4	0,60	26,5	72	1,59	1,57	1,57	92,6	68,1	58,8
5	0,50	30,6	80	1,60	1,61	1,59	70,1	49,5	43,9
6	0,45	19,0	84	1,71	1,70	1,71	50,4	39,0	31,4
7	0,40	21,0	87	1,70	1,70	1,70	38,4	31,6	23,9
8	0,35	23,4	90	1,74	1,75	1,74	28,6	24,1	17,8
9	0,30	26,5	93	1,86	1,87	1,86	20,8	16,9	12,9
10	0,25	30,6	95	2,11	2,12	2,11	14,8	10,6	9,2

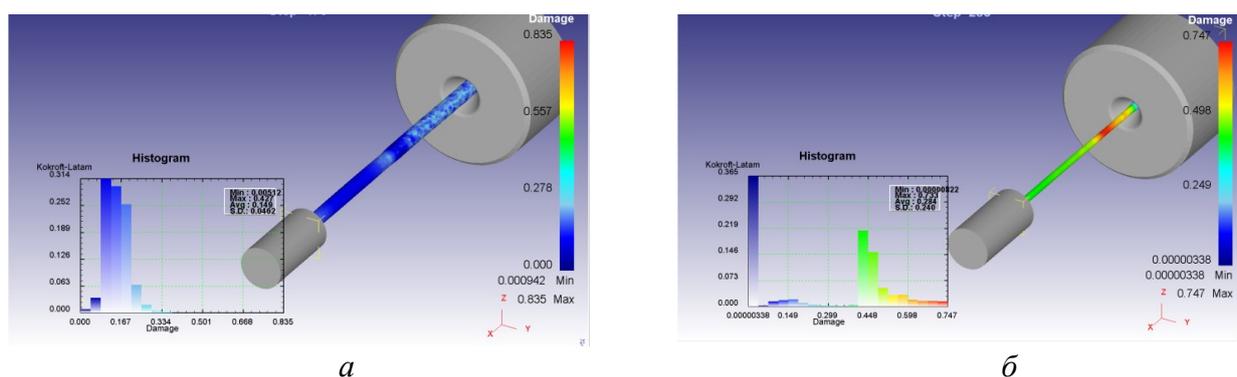


Рисунок 2. Распределение критерия Кокрофта-Латама при многократном волочении проволоки из сплава платины №1: *а* - диаметр проволоки 0,9 мм; *б* - диаметр проволоки 0,25 мм

Для совершенствования технологии производства листового проката из платинородиевых сплавов провели моделирование и исследование процесса листовой прокатки полос из сплава №4 технического назначения.

Анализ действующей технологии и проведенные расчеты показали, что на производстве при прокатке кованой заготовки шириной до 100,0 мм и толщиной до 28,0 мм используют малые единичные обжатия, составляющие 0,1-0,2 мм за проход, поэтому количество проходов достигает 138, а значения сил и моментов прокатки не превышают допустимых значений. Поэтому по энергосиловым параметрам имеется достаточно большой запас для увеличения обжатия за проход. Все это негативно сказывается на производительности процесса прокатки. В связи с этим было предложено увеличить величину обжатия за проход и проверить возможность реализации таких режимов

прокатки экспериментально. Однако, ограничения по величине обжатия, связанные с появлением трещин и разрушением металла при его холодной деформации и упрочнении, вызвали необходимость проведения исследований твердости раската по проходам с целью определения ее предельных величин. В процессе прокатки изменяли значения абсолютного обжатия 0,2; 0,3; 0,4 и 0,5 мм, фиксировали изменение твердости и определяли влияние обжатия на степень упрочнения сплавов в процессе их обработки, а также контролировали качество раската и определяли оптимальные режимы деформации и количество промежуточных отжигов, чтобы снизить вероятность возникновения микротрещин в изделии при прокатке. Исследования показали, что для опытного сплава №4 предельная величина твердости равна 2400 Н/мм<sup>2</sup> по Виккерсу.

При значениях абсолютного обжатия 0,2 мм за проход максимальная твердость достигалась при степени деформации 67% и требовалось 3 отжига. Конечную толщину изделия 1,0 мм при увеличении обжатия до 0,3 мм удалось получить за 90 прохода с использованием 2 промежуточных отжигов. Максимальная твердость вследствие более быстрого упрочнения металла увеличилась и была достигнута при степени деформации 56%. Увеличение единичного обжатия за проход до 0,4 мм сократило количество проходов до 69, но максимальная твердость была достигнута при степени деформации 50%, поэтому количество промежуточных отжигов увеличилось до 4. При проведении эксперимента с обжатием 0,5 мм образец достаточно быстро упрочнился, достигнув максимума твердости уже при степени деформации 38%, при этом на поверхности полосы появились трещины. На основании проведенных исследований предложен новый режим обжатий с абсолютным обжатием за проход 0,3 мм и 2 промежуточными отжигами после 61 и 86 проходов (табл. 4).

Таблица 4 – Предлагаемый режим и параметры прокатки полос из сплава №4

Номера проходов	Толщина полосы после последнего прохода, мм	Суммарное абсолютное обжатие за проходы, мм	Временное сопротивление, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Твердость HV, Н/мм <sup>2</sup>
1-11	24,5	3,5	-	-	-	1590
12-21	21,5	3,0	-	-	-	1850
22-31	18,5	3,0	-	-	-	1950
32-41	15,5	3,0	-	-	-	2030
42-51	12,5	3,0	-	-	-	2150
52-61	9,5	3,0	767	752	10	2400
62-71	6,5	3,0	-	-	-	1950
72-81	3,5	3,0	-	-	-	2230
82-86	2,0	1,5	786	772	6	2400
87-90	1,0	1,0	700	675	7	2320

Для моделирования процесса листовой прокатки по предлагаемому режиму была разработана компьютерная модель (рис. 3) с использованием программных комплексов SolidWorks и DEFORM 3D. Параметры объектов были следующими: диаметр валков 280 мм; длина бочки валков 580 мм; максимальная скорость прокатки 12 м/мин; допустимая сила прокатки 2520 кН. Условия симуляции: тип материала заготовки - вязко-пластичный; инструмент - абсолютно жесткий; коэффициент трения принимали равным 0,3.

Формула для расчета временного сопротивления для сплава №4, полученная при проведении экспериментальных исследований, имеет вид

$$\sigma_B = 0,0124 \varepsilon_{\Sigma}^2 + 3,4751 \varepsilon_{\Sigma} + 444,89. \quad (4)$$

Визуализация напряженного состояния заготовки при прокатке исследуемого сплава (рис. 4, а б) показала, что максимальные напряжения наблюдаются в центральной зоне заготовки, а их величина в последнем проходе прокатки не превышает 400 МПа.

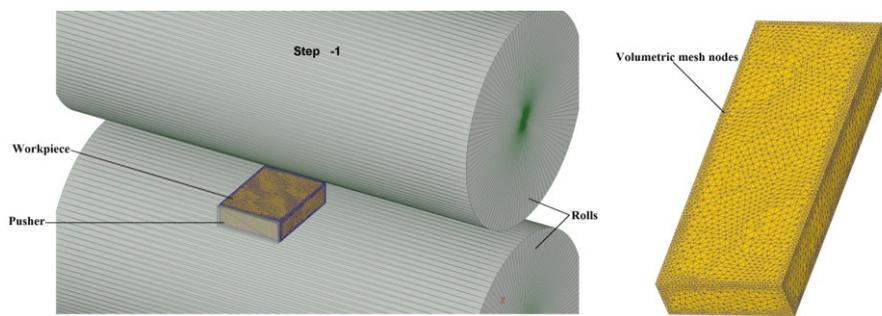


Рисунок 3 - Объекты моделирования в DEFORM 3D: а – модель заготовки в клети прокатного стана; б – заготовка с нанесенной сеткой конечных элементов

Сила прокатки  $P_R$  (рис. 4 и 5, в) с увеличением суммарной степени обжатия  $\varepsilon_{\Sigma}$  растет, но не превышает допустимых значений.

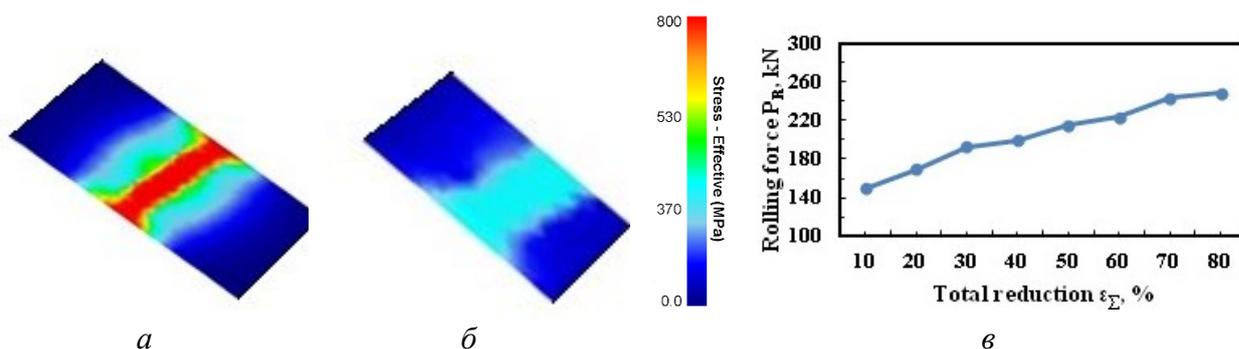


Рисунок 4 - Результаты моделирования в DEFORM 3D процесса листовой прокатки заготовки из сплава №4: а – распределение напряжений в очаге деформации перед первым отжигом; б – распределение напряжений в очаге деформации на последнем проходе прокатки; в – зависимость силы прокатки от суммарной степени обжатия  $\varepsilon_{\Sigma}$

Эти данные подтверждаются распределением критерия Кокрофта-Латама (рис. 5) в тех проходах, когда твердость достигала критических значений, и требовался отжиг.

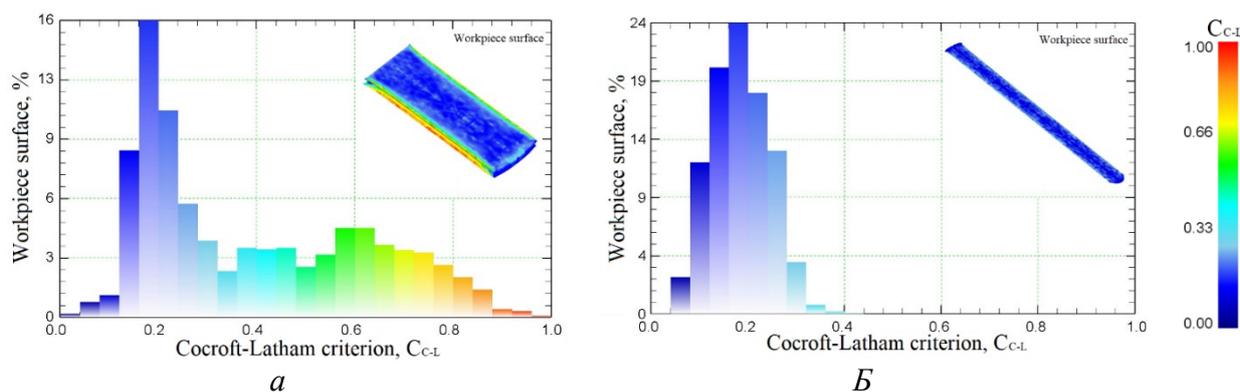


Рисунок 5 - Гистограмма распределения критерия разрушения Кокрофта-Латама по поверхности проката: *а* – перед 1-м отжигом; *б* – в конце прокатки

Перед первым отжигом (рис. 5, *а*) накопленное значение критерия разрушения было близко к критическому значению, но не превышало его. Перед вторым отжигом этот показатель также не достигал 1, что позволяет сделать вывод об имеющемся запасе пластичности металла. В конце прокатки (рис. 5, *б*) предложенный режим обеспечивает получение полосы толщиной 1,0 мм без трещин, так как критерий Кокрофта-Латама не превышает 0,4.

Для проверки результатов компьютерного моделирования провели опытную прокатку полуфабрикатов по предлагаемому режиму в промышленных условиях ОАО «Красцветмет» с замером физико-механических свойств образцов на различных этапах обработки (см. табл. 4). Их анализ показал, что прокатка с обжатием за проход в среднем 0,3 мм возможна без разрушения полуфабрикатов, а использование предлагаемого режима прокатки, по сравнению с действующим, приводит к снижению количества проходов при прокатке в 1,5 раза и значительному увеличению производительности, что подтверждается актом опытно-промышленной апробации предлагаемой технологии, проведенной в промышленных условиях ОАО «Красцветмет».

**В четвертой главе** представлены результаты моделирования и исследования технологии производства длинномерных полуфабрикатов из сплавов на основе палладия ювелирного №5 и технического №6, №7 назначения.

Для исследований сплавов №5 и №6 проведенный анализ технологии получения проволоки в промышленных условиях показал, что в отличие от обработки сплавов платины в качестве заготовки используется кованный отожженный пруток размерами 15x15 мм. Далее ведут прокатку на размер 10,5×10,5 мм за 8 проходов на прокатном стане с диаметром рабочих валков 130 мм и допустимой силой прокатки 620 кН, а затем получают прутки размерами 1,05x1,05 мм за 37 проходов на стане с диаметром валков 110 мм и допустимой силой прокатки 500 кН. Окончательно проволоку диаметром 0,30 мм производят на волочильном стане со скольжением за 10 переходов. На основании проведенного анализа предложено перераспределить единичные обжатия на первом этапе сортовой прокатки прутков в этих проходах и за 8 проходов получать пруток размерами 9,0x9,0 мм (табл. 5).

Таблица 5 – Предложенный режим первого этапа прокатки прутков из сплавов палладия

Номер прохода $i$	$x_i$ , мм	$\varepsilon_{ед}$ , %	$\varepsilon_{\Sigma}$ , %	$P_{п}$ , кН	
				сплав №5	сплав №6
-	15,0	-	-	-	-
1	14,0	12,9	12,9	59,5	22,3
2	13,1	11,9	23,7	54,5	16,2
3	12,4	10,4	31,6	46,4	12,9
4	11,6	12,1	40,2	49,1	14,3
5	11,0	10,1	46,2	41,2	13,1
6	10,5	8,9	51,0	36,7	12,9
7	9,7	14,6	58,2	43,0	17,6
8	9,0	13,9	64,0	38,8	18,2

Компьютерное моделирование режимов сортовой прокатки прутка из сплава палладия №5 проводили в программе DEFORM-3D, которая позволила оптимизировать маршрут обработки заготовки путем анализа распределения напряжений и прогнозированием вероятности ее разрушения. Модель включала спроектированные в среде SolidWorks заготовку, рабочий инструмент (рис. 6) и задаваемые для них в препроцессоре DEFORM-3D граничные условия в соответствии с особенностями используемой технологии прокатки.

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

$$\sigma_B = 0,0337 \varepsilon_{\Sigma}^2 + 0,2507 \varepsilon_{\Sigma} + 474,5. \quad (5)$$

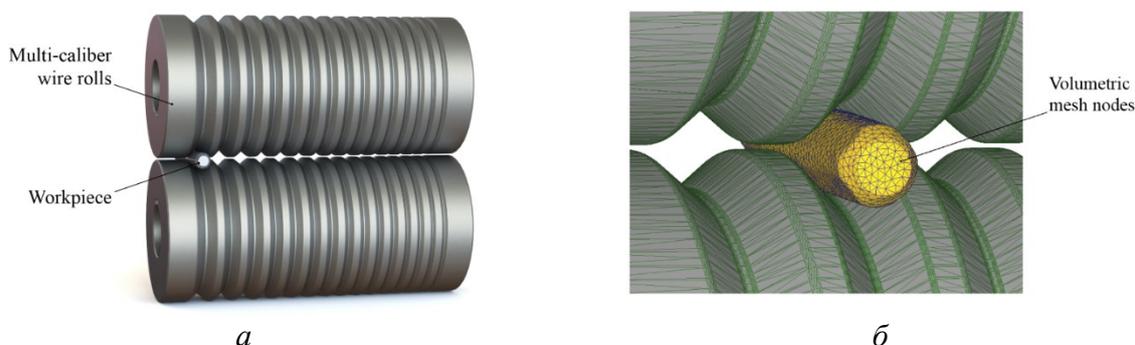


Рисунок 6 – Общий вид модели сортовой прокатки прутков: *a* – модель валков в SolidWorks; *б* – модель в DEFORM-3D прокатки заготовки с конечно-элементной сеткой

На рис. 7 представлено полученное при моделировании распределение критерия разрушения Кокрофта-Латама по поверхности прутков по проходам, которое позволяет заключить, что металл обладает достаточным запасом пластичности при прокатке без использования промежуточных отжигов. После второго прохода он не превышал 0,14, а к окончанию 8-го возрастал до 0,53.

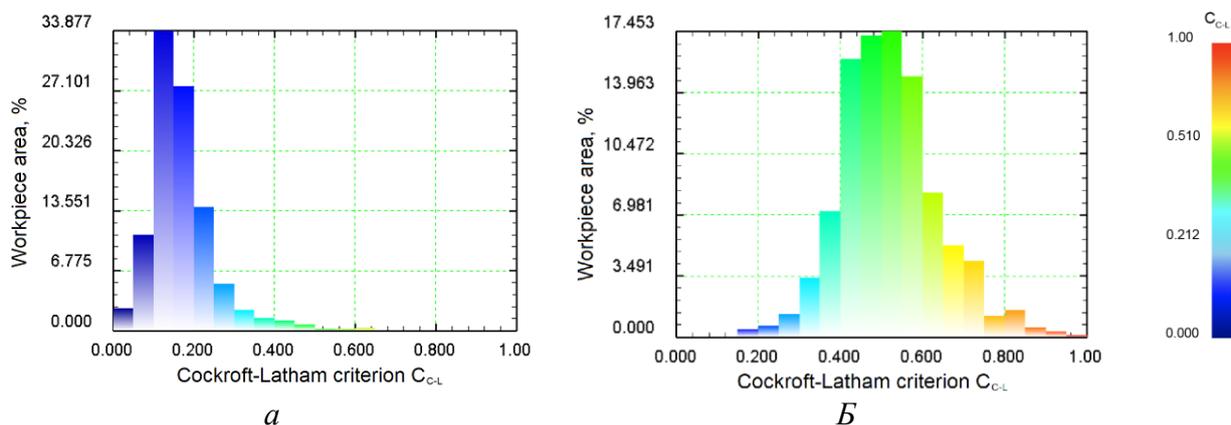


Рисунок 7 - Гистограмма распределения критерия разрушения Кокрофта-Латама по поверхности проката: *a* – 2 проход, *б* – 8 проход,

На втором этапе прокатки использовали режим обжатий, представленный в табл. 2. Расчеты силы прокатки для предлагаемых режимов обжатий показали, что нагрузка оборудования удовлетворяет допустимым значениям этой величины для применяемых сортопрокатных станов.

С применением разработанной ранее компьютерной модели процесса волочения проведено его моделирование для исследуемых сплавов по предлагаемому режиму обжатий (табл. 6), позволившее учесть влияние параметров волочения на силовые характеристики процесса.

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.

Таблица 6 – Предложенный режим волочения для сплавов палладия

Номер перехода	Диаметр, мм	$\varepsilon_{ед}, \%$	$\varepsilon_{\Sigma}, \%$	$\eta_{в}$		$P_{в}, Н$	
				сплав 5	сплав 6	сплав 5	сплав 6
1	1,00	21,5	21,5	1,39	1,77	251,7	219,9
2	0,90	19,1	36,4	1,44	1,50	187,2	256,0
3	0,80	21,1	49,8	1,50	1,52	137,5	225,0
4	0,70	23,3	61,5	1,56	1,58	100,6	167,5
5	0,60	26,5	71,7	1,59	1,58	74,8	124,7
6	0,50	30,7	80,4	1,70	1,69	53,3	87,5
7	0,45	18,8	84,1	1,70	-	40,6	-
8	0,40	20,8	87,4	1,74	-	30,2	-
9	0,35	23,8	90,4	1,86	-	21,9	-
10	0,30	26,0	90,1	2,11	-	15,6	-

Анализ результатов экспериментальных исследований подтвердил данные моделирования и показал, что для получения из кованой заготовки размерами 15x15 мм проволоки диаметром 0,3 мм из нового сплава палладия

№5 возможно использование предлагаемых режимов обжатий при прокатке и волочении с выполнением ограничений по силовой загрузке оборудования.

Для нового сплава №6, предназначенного для изготовления проволочных контактов при передаче видеосигналов, при моделировании были приняты условия и режимы обжатий, которые использовались для сплава №5. Для моделирования и расчета силы прокатки применили формулу для определения временного сопротивления в зависимости от суммарной степени обжатия, полученную в результате экспериментальных исследований

$$\sigma_B = 0,1302 \varepsilon_{\Sigma}^2 - 7,7913 \varepsilon_{\Sigma} + 260. \quad (6)$$

Расчеты силы прокатки для предлагаемых режимов обжатий (см. табл. 5) показали, что нагрузка оборудования удовлетворяет допустимым значениям этой величины для применяемых сортопрокатных станов.

На стадии волочения также использовали имеющийся режим (см. табл. 6), для которого конечным полуфабрикатом являлась проволока диаметром 0,7 и 0,5 мм. В результате моделирования установлено, что величина напряжений (рис. 8) не достигает критических величин и не приводит к разрушению. При этом коэффициент запаса  $\eta_B$  для получения проволоки диаметром до 0,5 мм составляет 1,69 (см. табл. 6), а сила – 87,5 Н, что свидетельствует о высокой стабильности деформации металла и небольшой силовой нагрузке.

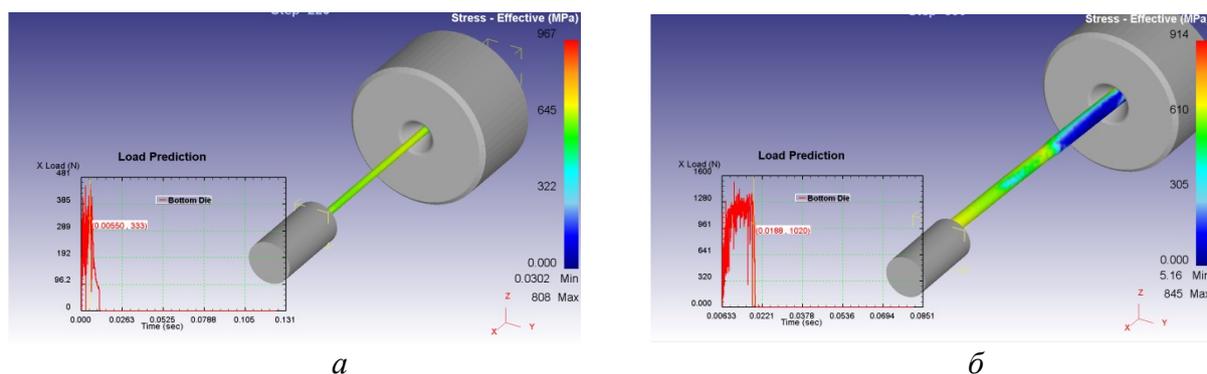


Рисунок 8 - Результаты моделирования распределения напряжений волочения проволоки из сплава палладия №6 по переходам: *а* – первый переход; *б* – шестой переход. Физико-механические свойства полуфабрикатов из сплава №6 определяли на деформированных образцах, полученных путем прокатки и волочения в лабораторных условиях, а также отожженных при температуре 900 °С и выдержке 8 час образцах (табл. 8).

Для проволоки 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>.

Для сплава №7 проведен анализ недостатков промышленной технологии производства проволоки и ее совершенствование. Технология включала следующие переделы: литье слитка размерами 140×155×200 мм, ковка прутка квадратного сечения с размером стороны 30 мм; прокатка на сортопрокатном стане с диаметром валков 130 мм и допустимой силой прокатки 620 кН (стан 1); прокатка на сортопрокатном стане с диаметром валков 110 мм и допустимой

силой прокатки 500 кН (стан 2); прокатка на непрерывном сортопрокатном стане с диаметром валков 130 мм и допустимой силой прокатки 500 кН (стан 3); волочение на двух однократных и одном многократном станах.

Таблица 8 – Физико-механические свойства полуфабрикатов из сплава №6

Номер образца	Размер (диаметр), мм и состояние образца	Суммарное обжатие $\varepsilon_{\Sigma}$ , %	Микротвердость HV, кгс/мм <sup>2</sup>	Временное сопротивление $\sigma_B$ , МПа
1	5x5 деформированное	50	178,7	322
2	3,4x3,4 деформированное	59,2	163,2	278
3	3,4x3,4 отожженное	-	131	-
4	2,2x2,2 деформированное	80,6	250	470
5	2,2x2,2 отожженное	-	190	-
6	диаметр 0,7 деформированное	92	296	632
7	диаметр 0,5 деформированное	96	350	777

Предложены новые режимы обжатий при прокатке, отличающиеся тем, что после перераспределения единичных вытяжек количество проходов уменьшилось с 28 до 20, и волочении, где изменения в маршруте обработки позволило стабилизировать процесс и исключить обрывы проволоки. По разработанным режимам обжатий в промышленных условиях была проведена сортовая прокатка ковальной заготовки квадратного сечения размерами 30x30 мм. После прокатки на станах 2 и 3 на основании данных моделирования был предусмотрен отжиг при температуре 900 °С и выдержке 60 мин.

Моделирование процессов сортовой прокатки прутков и волочения проволоки из сплава №7 проводили в программном комплексе DEFORM 3D. Для моделирования использовали формулу для расчета временного сопротивления в зависимости от суммарной степени обжатия следующего вида:

$$\sigma_B = -0,0178 \varepsilon_{\Sigma}^2 + 4,7689\varepsilon_{\Sigma} + 340,64. \quad (7)$$

Анализ результатов моделирования (рис. 9, 10) показал, что максимальные значения напряжений достигаются в последних проходах второго этапа прокатки на стане 2 (рис. 9, а) и к концу прокатки (рис. 9, б).

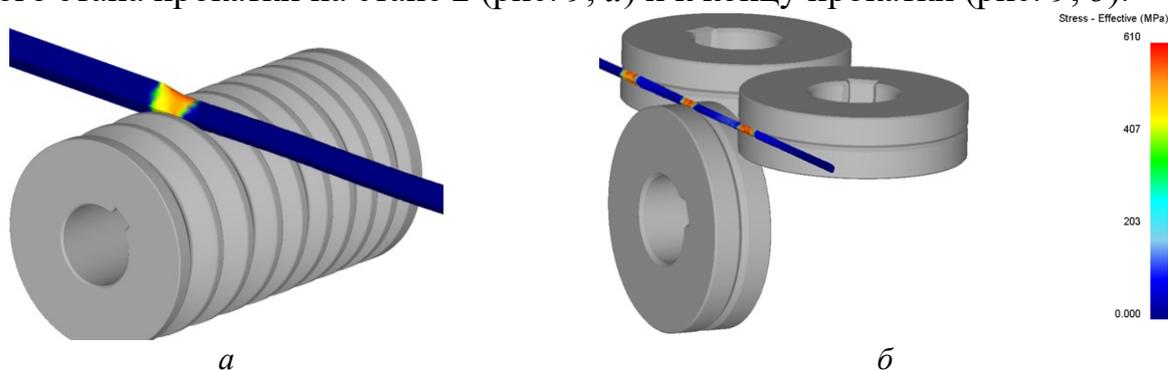


Рисунок 9 - Результаты моделирования в DEFORM 3D процесса прокатки: а – распределение напряжений после прокатки на стане 2; б – после прокатки на стане 3

Суммарная степень обжатия при прокатке на стане 2 составила 95,4 %, при этом сила прокатки не превышала 80 % от допустимой. Значения критерия разрушения (рис. 10) достигают значений порядка 0,95, что свидетельствует о полном исчерпании материалом запаса пластичности и необходимости проведения отжига.

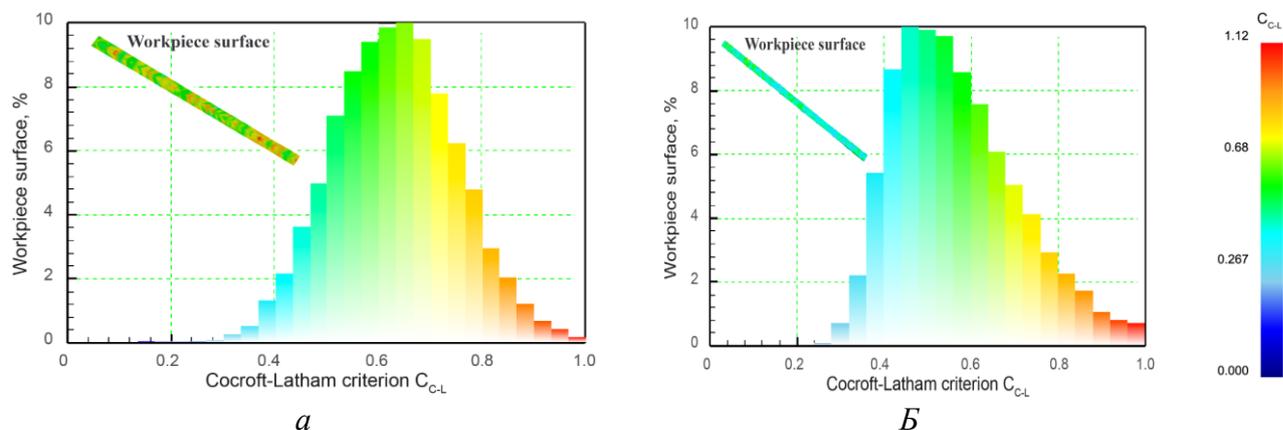


Рисунок 10 - Гистограмма распределения по поверхности проката критерия разрушения Кокрофта-Латама: *а* – на первом этапе прокатки; *б* – на последнем этапе прокатки

Для получения проволоки диаметром 0,060 мм из катанки квадратного сечения размерами 3,45x3,45 мм было предложено изменить режим обжатий (табл. 9) и провести в промышленных условиях ОАО «Красцветмет» экспериментальные исследования технологических режимов волочения и анализ появления обрывов при деформации металла. Весь процесс волочения был разбит на три этапа с использованием трех волочильных станов. На первом стане выполнялось волочение проволоки с размера прутка 3,45x3,45 до диаметра 1,18. Затем после отжига на втором стане проводили волочение до диаметра 0,175 мм, подвергали омеднению и получали проволоку диаметром 0,060 мм.

Таблица 9 - Режим волочения проволоки из сплава №7

Номер перехода	Размер, мм	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	Номер перехода	Размер, Мм	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
Действующий режим				Предлагаемый режим			
	3,45 × 3,45	313	43,0		3,45 × 3,45	313	43,0
1	3,54	419	9,6	1	3,46	433	10,3
2	3,16	483	8,9	2	3,13	486	9,5
3	2,82	521	7,6	3	2,82	518	7,0
4	2,53	559	5,2	4	2,53	552	4,6
5	2,26	573	5,4	5	2,26	574	4,0
6	2,02	589	3,9	6	2,02	603	3,7
7	1,81	595	3,1	7	1,81	632	3,2
8	1,62	644	2,7	8	1,62	639	2,4
9	1,45	662	2,4	9	1,45	648	2,1
-	-	-	-	10	1,31	649	1,8
-	-	-	-	11	1,18	666	1,7

После каждого цикла волочения проводился отжиг при температуре  $850 \pm 20$  °С и выдержке 60 мин. Перераспределение вытяжек на первом этапе волочения снизило количество обрывов и позволило получить качественные полуфабрикаты из сплава №7.

Для расчета параметров волочения проволоки диаметром до 0,060 мм было проведено компьютерное моделирование в программном комплексе DEFORM 3D и изучено напряженно-деформированное состояние металла, а также распределение критерия разрушения Кокрофта-Латама по переходам. Анализ распределения напряжений (рис. 11) показал, что максимальные напряжения наблюдаются в калибрующей зоне волоки.

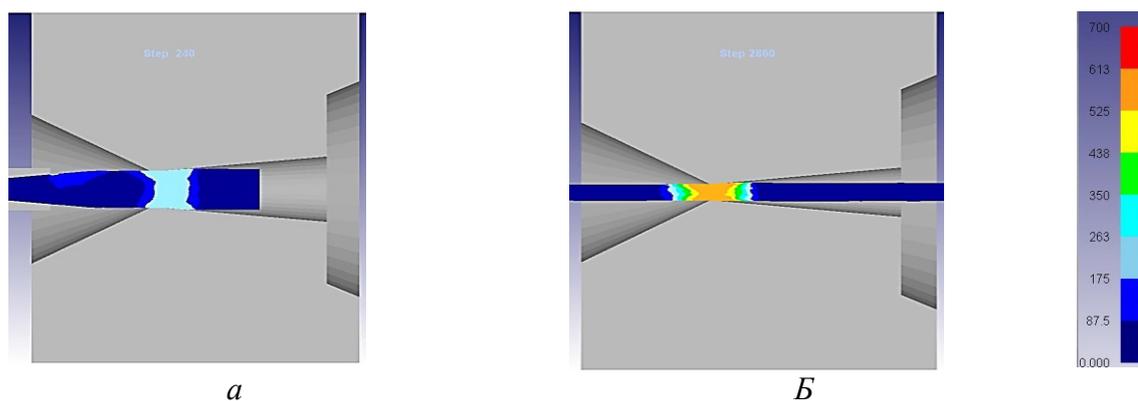


Рисунок 11 - Распределение напряжений по длине очага деформации при волочении на стане 3 на первом (а) и последнем (б) переходах

Полученные значения коэффициентов запаса дают возможность утверждать, что предложенные режимы обработки не приведут к обрывам проволоки во время волочения. Полученное распределение значений критерия Кокрофта-Латама (рис. 12) показало, что данный маршрут волочения можно рекомендовать для промышленного опробования.

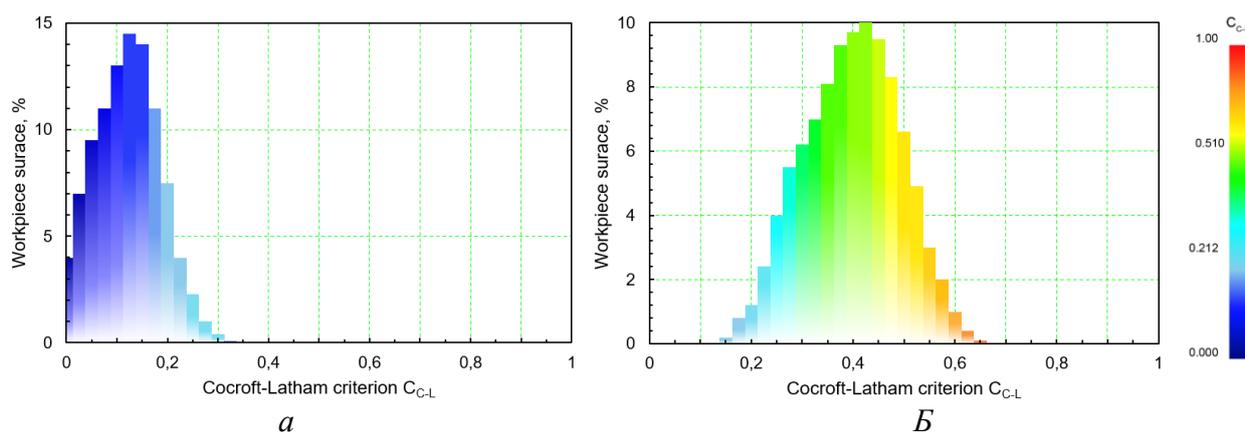


Рисунок 12 - Гистограмма распределения критерия Кокрофта-Латама в первом (а) и последнем (б) переходах для предлагаемого режима обжатий при волочении

Для проверки данных, полученных моделированием, в промышленных условиях ОАО «Красцветмет» были проведены экспериментальные исследования процесса волочения проволоки из сплава №7 и получены

опытные партии проволоки диаметром до 0,060 мм. Результаты замера механических свойств (табл. 10) показывают, что уровень механических свойств полученной проволоки соответствует требованиям технических условий.

Таблица 10 - Механические свойства проволоки из сплава №7 в отожженном состоянии, полученной многократным волочением

D, мм	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_b$ , Мпа	$\delta$ , %
	Действующий режим		Предлагаемый режим	
0,172	361	27,1	338	29,6
0,150	362	25,7	331	27,5
0,120	365	22,3	340	25,0
0,090	354	15,8	310	17,2
0,085	324	15,7	304	16,5
0,075	345	16,5	316	17,3
0,060	434	17,3	390	18,1

Таким образом, для исключения обрывов длинномерных полуфабрикатов из сплава №7 необходимо использовать предлагаемый режим обжати при волочении, который позволяет за счет перераспределения вытяжек по переходам получать качественную проволоку диаметром до 0,060 мм из этого сплава, свойства которой удовлетворяют требованиям действующих стандартов.

Такой вывод подтверждается актом опытно-промышленной апробации предлагаемой технологии, проведенной в промышленных условиях ОАО «Красцветмет».

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ**

1. Разработаны и запатентованы новые сплавы на основе платины и палладия для производства изделий ювелирного и технического назначения с улучшенным комплексом механических свойств и эксплуатационных характеристик.
2. Предложена методика проведения исследований технологии производства деформированных полуфабрикатов, применение которой позволило установить деформационные и силовые параметры прокатки и волочения для производства длинномерных изделий технического и ювелирного назначения из 7 сплавов платины и палладия.
3. С применением существующего программного обеспечения проведен анализ технологии получения прутков и проволоки из исследуемых сплавов и предложены более эффективные режимы обжати при реализации операций прокатки и волочения.
4. Для процессов холодной листовой, сортовой прокатки и волочения длинномерных полуфабрикатов из исследуемых сплавов в программных комплексах SolidWorks и DEFORM 3D созданы компьютерные модели,

позволившие с использованием предложенных режимов обжати́й получить новые научные данные по формоизменению металла, оценить его напряженно-деформированное состояние и возможность разрушения с помощью критерия Кокрофта-Латама.

5. В лабораторных и промышленных условиях с использованием разработанных режимов обжати́й проведены экспериментальные исследования процессов прокатки и волочения для получения прутков и проволоки из исследуемых сплавов, которые подтвердили адекватность разработанных моделей, позволили выбрать оборудование и проверить ограничения по его силовой нагрузке.

6. Проведены исследования механических свойств и структуры полуфабрикатов из сплавов платины и палладия в зависимости от их химического состава, режимов деформации и вида термической обработки, при этом получены формулы для расчета временного сопротивления в зависимости от суммарного обжати́я для всех исследуемых сплавов.

7. В условиях ОАО «Красцветмет» проведена опытно-промышленная апробация предложенных технических и технологических решений для изготовления проволоки диаметром до 0,060 мм из сплава ПдН-5 и листового проката толщиной до 1 мм из сплава ПЛРд-20, результаты которой позволили рекомендовать их для совершенствования технологии производства длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов платины и палладия.

8. Результаты работы внедрены в учебный процесс для подготовки магистров по направлению 22.04.02 Металлургия (программа 22.05.02.10 «Технологии ювелирной и художественной обработки металлов») и аспирантов по направлению 22.06.01 «Технологии материалов» специальности 2.6.4 «Обработка металлов давлением».

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ**

1. **Лопатин, В.А.** Технологические основы производства длинномерных литых и деформированных полуфабрикатов из сплавов драгоценных металлов: монография / С. Б. Сидельников, Е. С. Лопатина, Н. Н. Довженко, С.В. Беляев, И.Л. Константинов, Ю.Д. Дитковская, О.С. Лебедева, Э.А. Рудницкий, О.О. Виноградов, **В.А. Лопатин**. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2021.

2. **Лопатин, В.А.** Совершенствование технологических режимов изготовления проволоки ювелирного назначения из новых сплавов драгоценных металлов / С. Б. Сидельников, Ю.Д. Дитковская, **В.А. Лопатин** // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Вып. 11: в 3 ч. Ч. 1. – Тула: Издательство ТулГУ, 2017. – С. 27-33. (**ВАК**).

3. **Лопатин, В.А.** Исследование технологии получения проволоки технического назначения из нового сплава палладия / С. Б. Сидельников, Е.С. Лопатина, **В.А.**

**Лопатин, С.В.** Беляев, А.Д. Арнаут, Ю.Д. Дитковская // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т.22. №1. С. 40–51. (**ВАК**).

**4. Lopatin, V.A.** Computer simulation and analysis of the parameters of the drawing process of thin wire from the alloy PD-5Ni / Sidelnikov S., Bindareva K., Lopatina E., // Key Engineering Materials, 2019, 805, 13–18, (**Scopus**).

**5. Lopatin, V.A.** Study of the stress-strain state of the process of drawing wire from an alloy of palladium with nickel / Sidelnikov S., Lopatin V., Dobrovenko M. // Materials Science Forum, 2020, 992, 504–510, (**Scopus**).

**6. Lopatin, V.A.** Investigation modes for production technology of wire from the Pd5Ni alloy for catchment gauzes of the chemical industry / Konstantinov I.L., Sidelnikov S.B., Lopatina E.S., Arnautov A.D., Rudnitskiy E.A., Voroshilov D.S., Mansurov Yu.N., **Lopatin V.A.**, Yuryev P.O., Dobrovenko M.P., Ber V.I. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022, 121(11–12), 7229–7246, (**Scopus**).

**7. Лопатин, В.А.** Физическое и математическое моделирование процесса сортовой прокатки для совершенствования производства длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов драгоценных металлов / С.Б. Сидельников, Ю.Д. Дитковская, Е.С. Лопатина, **В.А. Лопатин** // Сборник докладов 11-го международного конгресса "Цветные металлы и минералы-2019", 5.09.2019, С. 513-520.

**8. Лопатин, В.А.** Современные тенденции развития производства конкурентоспособных ювелирных цепей из сплавов драгоценных металлов / С.Б. Сидельников, Ю.Д. Дитковская, Е.С. Лопатина, **В.А. Лопатин** // Сборник науч. статей по итогам Национальной научно-практической конференции «Научное пространство России: генезис и трансформация в условиях реализации целей устойчивого развития», 17-18 апреля 2020 г. СПбГЭУ, 2020, С. 97-100.

**9. Лопатин, В.А.** Разработка режимов деформации и моделирование процесса волочения проволоки из сплава PdNi-5 / **В.А. Лопатин**, М.П. Добровенко // Материалы XVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективны-2021», Красноярск, 2021, С. 2569-2571.

**10. Lopatin, V.A.** Modeling and investigation of the process of deformation processing of precious metal alloys to obtain jewelry wire // Ditkovskaia Yu.D., Sidelnikov S.B., Lopatina E.S., Voroshilov D.S., Lebedeva O.S., Konstantinov I.L., Ber V.I., Rudnitskiy E.A., **Lopatin V.A.** // Сборник тезисов VI Международной молодежной конференции «Magnitogorsk Rolling Practice 2022», г. Магнитогорск, 31.05-04.06.2022, С. 66-67.

**11.** Пат. 2751061 Российская Федерация, МПК С 22С 5/04. Сплав на основе платины 585 пробы / С. Б. Сидельников, Н. Н. Довженко, Дитковская Ю.Д., Лопатина Е.С., Беляев С.В., Столяров А.В. Лебедева О.С., **Лопатин В.А.**; опубл. 07.07.2021, Бюл. №19.

**12.** Пат. 2751063 Российская Федерация, МПК С 22С 5/04. Сплав на основе платины 585 пробы / С. Б. Сидельников, Н. Н. Довженко, Дитковская Ю.Д.,

Лопатина Е.С., Беляев С.В., Столяров А.В. Лебедева О.С., **Лопатин В.А.**; опубл. 07.07.2021, Бюл. №19.

**13.** Пат. 2788879 Российская Федерация, МПК С 22С 5/04. Сплав на основе палладия / С. Б. Сидельников, Е.С. Лопатина, **В.А. Лопатин**, Ю.Д. Дитковская, Д.С. Ворошилов, С.В. Беляев, О.С. Лебедева; опубл. 25.01.2023, Бюл. №3.

**14. Лопатин, В.А.** Совершенствование технологии производства проволоки ювелирного назначения из сплавов платины / С. Б. Сидельников, Е.С. Лопатина, **В.А. Лопатин**, И.Л. Константинов, Ю.Н. Мансуров, А.Д. Арнаутов, Р.И. Галиев // *Металлург*, 2024, №6, с. 30-35. (**ВАК**).

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета  
24.2.404.01 на базе ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»  
(протокол № \_\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2024 г.)

Подписано в печать \_\_\_\_ . \_\_\_\_ .2024. Печать плоская. Формат 60x84/16

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тир 100 экз. Заказ \_\_\_\_

Отпечатано полиграфическим центром  
Библиотечно-издательского комплекса  
Сибирского федерального университета  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а  
Тел./факс: 8(391)206-26-67, 206-26-49  
E-mail: [print\\_sfu@mail.ru](mailto:print_sfu@mail.ru); <http://lib.sfu-kras.ru>