

На правах рукописи



ДИТКОВСКАЯ Юлия Дмитриевна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ХОЛОДНОЙ
СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ В ВОСЬМИГРАННЫХ КАЛИБРАХ
ПРУТКОВ ИЗ НОВЫХ БЕЗНИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ СЕРЕБРА И
ЗОЛОТА**

05.16.05 – Обработка металлов давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск–2020

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Сидельников Сергей Борисович**

Официальные оппоненты:

Тулупов Олег Николаевич, доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной работе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова».

Первухин Александр Евгеньевич, кандидат технических наук, ведущий инженер-технолог технологической группы металлообработки АО «Екатеринбургский завод по обработке цветных металлов».

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург.

Защита состоится 20 марта 2020 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.10 на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет» по адресу 660025, г. Красноярск, пр. «Красноярский рабочий», д. 95, ауд. 212.

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 « ____ » _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.099.10



Лесив Елена Михайловна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В настоящее время после экономического кризиса 2014 – 2015 гг. наблюдается стабилизация международного и отечественного ювелирного рынка. При этом в связи со снижением объема экспорта особую актуальность приобретают задачи повышения качества ювелирной продукции отечественных производителей и ее соответствие зарубежным, в том числе европейским, требованиям к безопасности. Так, например, Директива Европейского Сообщества 76/769/ЕЕС запрещает производить и продавать ювелирные изделия и бижутерию, содержащие более 0,05% никеля, что закрывает зарубежный рынок для отечественных производителей, продукция которых не соответствует этим требованиям и уступает в конкурентной борьбе из-за ее низкого качества.

Статистические исследования показывают, что среди потребителей ювелирной продукции особой популярностью пользуются сплавы на основе золота и серебра. Так, например, сплавы белого золота, содержащие никель, палладий или платину, серебро и цинк, имеют благородный цвет и блеск и, благодаря сходству с дорогостоящими сплавами палладия и платины, имеют меньшую стоимость. Вместе с тем растет спрос на изделия из серебра, как драгоценного металла, имеющего наименьшую стоимость. В связи с этим целесообразным является разработка новых сплавов на основе золота и серебра, соответствующих нормативным документам ЕС, и внедрение их в производство.

Наиболее постоянным спросом, особенно на фоне нестабильной экономической ситуации на рынке, пользуются такие виды продукции, как обручальные кольца, цепи и браслеты-цепи. Лидером отечественного рынка по продажам ювелирных цепей из золота и серебра является Красноярский завод цветных металлов имени В.Н. Гулидова (ОАО «Красцветмет»). Анализ существующей технологии производства длинномерных деформированных полуфабрикатов, применяемой на этом предприятии, показал, что она обладает рядом недостатков, снижающих качество продукции, увеличивающих ее стоимость и затраты на производство. Кроме того, до сих пор для изготовления ювелирных цепей используются сплавы драгоценных металлов, содержащие в своем составе никель

Поэтому создание новых безникелевых ювелирных сплавов и совершенствование технологий их обработки, а также проектирование технологических процессов и инструмента с применением методов математического и физического моделирования и специализированного программного обеспечения, является актуальной задачей.

Данная работа является продолжением комплекса исследований, проводимых учеными института цветных металлов и материаловедения (ИЦМиМ) Сибирского федерального университета (СФУ), и выполнена в рамках госбюджетных НИР «Исследование закономерностей формирования

фазового состава и структуры новых сплавов многокомпонентных систем из драгоценных металлов и изучение их свойств» и «Создание новых сплавов драгоценных металлов с повышенными эксплуатационными характеристиками и исследование их свойств», проводимых по заданию Министерства образования и науки Российской Федерации, а также по договору с ОАО «Красцветмет» по теме «Разработка технологии изготовления золотого ювелирного сплава белого цвета 585 пробы, не содержащего никель, и проволоки для изготовления цепей».

Степень разработанности темы. В области обработки давлением сплавов драгоценных металлов и производства из них деформированных полуфабрикатов имеются лишь единичные публикации, основными из которых являются труды ученых Уральского и Сибирского федеральных университетов, а также специалистов Красноярского завода цветных металлов. Поэтому задачи создания новых гипоаллергенных сплавов, обладающих заданным уровнем свойств и технологий их термомодеформационной обработки, требуют проведения дополнительных исследований в данном направлении.

Целью диссертационной работы является разработка комплекса научно-технологических решений, направленных на повышение эффективности производства деформированных полуфабрикатов из сплавов белого золота 585 пробы и серебра 925 пробы для ювелирных цепей.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Разработка ряда безникелевых сплавов белого цвета на основе золота 585 пробы и серебра 925 пробы с повышенным уровнем механических и эксплуатационных свойств.

2. Решение задачи по определению формоизменения при холодной сортовой прокатке прутков в восьмигранных калибрах с применением вариационного метода минимума полной мощности.

3. Компьютерное и физическое моделирование процесса холодной сортовой прокатки в восьмигранных калибрах новых сплавов драгоценных металлов.

4. Разработка алгоритмов, программного обеспечения и базы данных для анализа существующих и проектирования новых режимов для производства длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов цветных металлов, в том числе и сплавов драгоценных металлов.

5. Опытно-промышленная апробация результатов исследований в промышленных условиях ОАО «Красцветмет».

Научная новизна полученных результатов исследований:

1. Разработана математическая модель формоизменения металла при холодной сортовой прокатке прутков в восьмигранных калибрах и установлены закономерности его изменения в заданном диапазоне безразмерных параметров процесса.

2. Созданы компьютерные модели прокатки в восьмигранных калибрах, с применением которых рассчитаны и обоснованы технологические режимы деформации металла и энергосиловые параметры процесса для новых сплавов серебра и золота.

3. Экспериментальным путем изучено влияние технологических режимов прокатки на структуру и механические свойства деформированных полуфабрикатов из исследуемых сплавов и установлены закономерности их изменения по сечению и длине прутков.

4. С применением методов математического и физического моделирования разработана методика расчета деформационных и энергосиловых параметров процесса холодной сортовой прокатки сплавов драгоценных металлов.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработаны и запатентованы составы новых безникелевых сплавов белого цвета на основе золота 585 пробы (патенты РФ № 2586175 и №2697142) и серебра 925 пробы (патент РФ № 2513502) и способ модифицирования сплавов на основе золота (патент РФ № 2507284).

2. С применением методов математического планирования эксперимента получены регрессионные зависимости для расчета прочностных свойств новых сплавов.

3. Созданы алгоритмы, программное обеспечение и база данных для проектирования инструмента и технологии холодной сортовой прокатки прутков из сплавов драгоценных металлов (свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612273 и № 2015620276).

4. Разработаны рациональные режимы холодной сортовой прокатки, обеспечивающие повышенный уровень механических свойств деформированных полуфабрикатов из новых безникелевых сплавов золота 585 пробы и серебра 925 пробы;

5. В условиях ОАО «Красцветмет» проведена опытно-промышленная апробация разработанных технологий и получены опытные партии ювелирных цепей из новых безникелевых сплавов белого золота 585 пробы с повышенным уровнем прочностных и эксплуатационных свойств.

6. Результаты исследований внедрены в учебный процесс для подготовки бакалавров и магистров по направлению Металлургия, а также аспирантов по специальности 05.16.05 – Обработка металлов давлением.

Методология и методы исследований базируются на применении основных законов обработки металлов давлением, вариационных принципов механики деформируемого тела, методов планирования и обработки опытных данных, экспериментальных методов исследования формоизменения и энергосиловых параметров процесса деформации металла, методов определения механических свойств путем испытаний на растяжение, универсальных металлографических методов исследований

структуры металла, систем объектно-ориентированного проектирования Delphi с визуализацией расчетных данных и автоматизированного проектирования в программах AutoCAD и SolidWorks, а также метода конечных элементов в программном комплексе DEFORM-3D.

На защиту выносятся:

- математическая модель формоизменения металла при холодной сортовой прокатке в восьмигранных калибрах;
- результаты экспериментальных исследований деформационных и энергосиловых параметров сортовой прокатки новых безникелевых сплавов золота и серебра;
- результаты компьютерного моделирования процесса холодной сортовой прокатки сплавов драгоценных металлов;
- программное обеспечение и методики для проектирования инструмента и технологии изготовления длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов драгоценных металлов;
- технологические решения для получения длинномерных деформированных полуфабрикатов ювелирного назначения из новых безникелевых сплавов золота и серебра.

Степень достоверности научных положений и полученных результатов доказана применением научно-обоснованных методов теоретических и экспериментальных исследований, обработки результатов компьютерного моделирования и практической реализацией полученных результатов в лабораторных условиях ИЦМиМ СФУ и промышленных условиях ОАО «Красцветмет».

Апробация работы.

Основные положения диссертационной работы изложены и обсуждены на Международных конгрессах «Цветные металлы» (Красноярск, 2012-2019 гг.), Международной научно-технической конференции «Современные технологии обработки материалов давлением: моделирование, проектирование, производство» (Москва, 2013 г.), ежегодных Всероссийских научно-технических конференциях Сибирского федерального университета с международным участием «Молодежь и наука» (Красноярск, 2011-2014 гг.), международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспектив Свободный» (Красноярск, 2015, 2016 гг.), Международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства» (Магнитогорск, 2015 г.), научно-практической конференции «Миссия молодежи в науке» (Ростов-на-Дону, 2015 г.), Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки, техники и образования» (Магнитогорск, 2019 г.).

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 41 печатном труде (ниже приведены основные труды), 8 из которых опубликованы в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендуемых

ВАК, а также в 4 патентах РФ и 2 свидетельствах о государственной регистрации программного обеспечения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, содержащего 114 источников, и 4 приложений. Основной материал изложен на 116 страницах, включая 33 таблицы и 42 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, отмечена ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

В первой главе проведен анализ тенденций развития производства деформированных полуфабрикатов для изготовления ювелирных цепей из сплавов драгоценных металлов, описаны свойства сплавов золота 585 пробы и серебра 925 пробы. На основе этого анализа и результатов патентного поиска предложены новые химические составы таких сплавов (таблица 1), отличительными признаками которых является отсутствие никеля и выбор модифицирующих добавок: для сплавов золота – рутения и родия; для сплава серебра – индия и кремния.

Таблица 1 - Химический состав новых сплавов на основе золота белого цвета 585 пробы и серебра 925 пробы

Сплав	Химический состав сплава, массовая доля компонента, %									
	Au	Ag	Pd	Cu	Zn	In	Ru	Rh	Sn	Si
№1	58,5	21,6	10,0	8,4	1,5	-	0,01	-	-	-
№2	58,5	26,0	8,0	5,5	1,5	0,5	0,01	-	-	-
№3	58,5	26,0	8,0	5,5	1,5	0,5	-	0,1	-	-
№4	58,5	26,0	8,0	5,5	1,5	0,5	0,05	0,05	-	-
№5	-	93,0	-	Ост.	2,3	0,07	-	-	0,09	0,07

Рассмотрены применяемая в промышленных условиях технологическая схема производства прутков и проволоки для изготовления ювелирных цепей, оборудование и система калибров для сортовой прокатки драгоценных металлов. Установлено, что для получения длинномерных деформированных полуфабрикатов литой прутков из сплавов драгоценных металлов диаметром 8–10 мм подвергают холодной сортовой прокатке на непрерывных станах в три этапа за 28 проходов с промежуточными отжигами. Далее полученная заготовка сечением 1,1×1,1 мм подвергается волочению для получения проволоки диаметром 0,25–0,35 мм.

Проанализированы известные методики определения формоизменения металла и энергосиловых параметров процесса сортовой прокатки и представлен обзор существующего программного обеспечения для моделирования и проектирования технологических процессов и инструмента.

Проведенный анализ научно-технической и патентной литературы позволил сделать следующие выводы.

1. Одной из важных тенденций производства длинномерных деформированных полуфабрикатов для производства ювелирных цепей является создание новых безникелевых сплавов золота и серебра и технологий их деформационной обработки для повышения их механических, технологических и эксплуатационных свойств, снижения стоимости изделий из них и обеспечения соответствия существующим нормам безопасности.

2. Совершенствование технологии производства прутков из сплавов драгоценных металлов, получаемых в промышленной практике холодной сортовой прокаткой с применением восьмигранных калибров, является актуальной задачей и требует новых научно-обоснованных решений.

3. Существующие методики расчета формоизменения и энергосиловых параметров сортовой прокатки разработаны в основном для других систем калибров и условий горячей прокатки сталей, либо основаны на применении эмпирических формул, поэтому для новых сплавов драгоценных металлов необходимо комплексное исследование процесса прокатки в восьмигранных калибрах с применением методов математического и физического моделирования.

4. Разработка программного обеспечения для проектирования технологических процессов сортовой прокатки и калибровки валков целесообразна в среде программирования Delphi, базирующегося на полученной математической модели с блоком графической поддержки и применением возможностей программных продуктов Microsoft Access и Autodesk FeatureCAM, а компьютерное моделирование сортовой прокатки для новых сплавов по предлагаемым маршрутам рекомендуется проводить в программном комплексе DEFORM-3D, так как имеются многочисленные примеры его успешного использования для процессов ОМД.

На основании сделанных выводов сформулированы цель и задачи данного диссертационного исследования.

Во второй главе представлены результаты математического и компьютерного моделирования процесса сортовой прокатки в восьмигранных калибрах, алгоритмы, программное обеспечение и методика проектирования технологии для получения длинномерных деформированных полуфабрикатов в виде прутков и проволоки из сплавов драгоценных металлов, а также рассчитанные с их помощью рациональные режимы деформации для промышленных условий обработки.

Решение задачи по определению формоизменения металла холодной сортовой прокатки в восьмигранных калибрах сплавов драгоценных металлов выполнено с применением методики профессора В.К. Смирнова на основе использования принципа минимума полной мощности и метода баланса мощностей

$$\delta(N_{\text{вн}} + N_{\text{ср}} + N_{\text{ск}} + N_{\text{вал}}) = 0, \quad (1)$$

$$N_{\text{вн}} + N_{\text{ср}} + N_{\text{ск}} + N_{\text{вал}} = 0, \quad (2)$$

где $N_{вн}$ – мощность внутренних сил; $N_{ср}$ – мощность сил среза в плоскости входа металла в валки; $N_{ск}$ – мощность сил трения на скоростях скольжения; $N_{вэл}$ – мощность, подводимая валками.

При решении задачи независимые безразмерные параметры, однозначно описывающие очаг деформации при прокатке в восьмигранных калибрах (рисунок 1), варьировали на трех уровнях для применяющихся на практике диапазонов их изменения в следующих пределах: коэффициент обжатия $\frac{1}{\eta} = h_0/h_i = 1,0-1,5$; приведенный диаметр валков $A = D_0/h_i = 10-80$; отношение сторон $a = 0,92-1,08$; коэффициент формы $k_a = 1,23-1,37$ (квадратный калибр – $k_a = (1,85b_{i-1})/b'_i$, ромбический калибр – $k_a = (0,8b_{i-1})/b'_i$), где h_i – высота калибра; D_0 – диаметр валков; b_i – ширина калибра, b'_i – ширина площадки калибра. Показатель трения составлял $\psi = 0,1 - 0,5$.

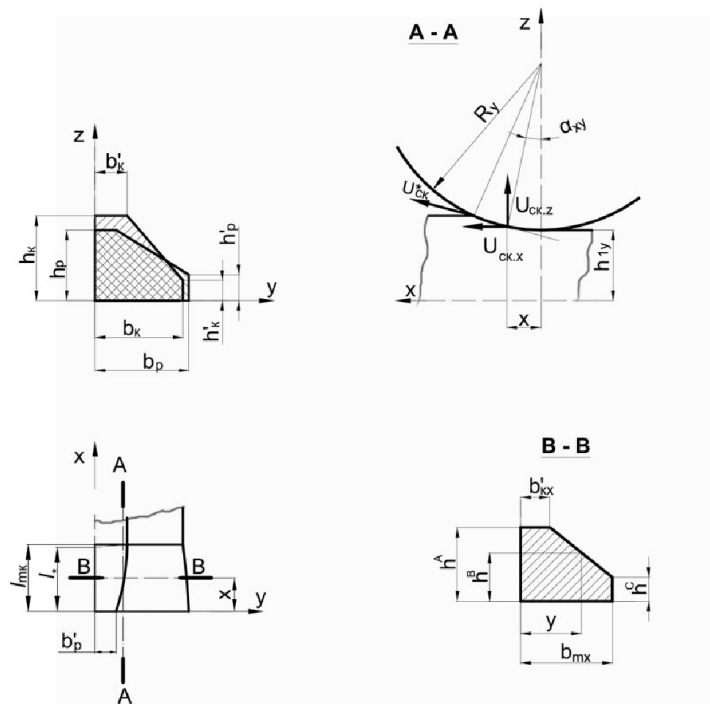


Рисунок 1 – Схема прокатки в восьмигранном калибре

Искомыми неизвестными параметрами являлись коэффициенты уширения β и опережения v , для которых в результате аппроксимации численного массива данных, рассчитанных с помощью математической модели, получены следующие формулы:

$$\beta = 1 + 0,357 \cdot \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)^{0,023} \cdot A^{-0,325} \cdot k_a^{-1,134} \cdot \psi^{0,095}, \quad (3)$$

$$v = 1 + 0,087 \cdot \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)^{0,954} \cdot A^{0,084} \cdot k_a^{0,148} \cdot \psi^{0,036} \quad (4)$$

Погрешность определения расчетных значений по сравнению с опытными не превышала 1 – 3% (рисунок 2), что позволяет судить об адекватности полученной математической модели. Расчет производился при фиксированных значениях показателя трения и приведенного диаметра валков ($\psi=0,4$, $A=45$, отношения сторон исходного раската $a=1,0$).

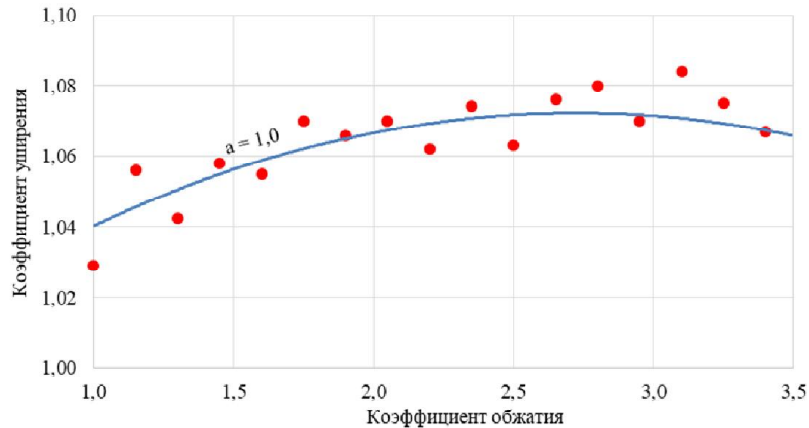


Рисунок 2 – Распределение опытных и расчетных значений коэффициента уширения

С применением полученной математической модели разработаны алгоритм и методика расчета формоизменения металла и энергосиловых параметров холодной сортовой прокатки. На их основе создана программа «PROVOL» для проектирования технологии изготовления полуфабрикатов из сплавов драгоценных металлов и калибровки валков (рисунок 3).

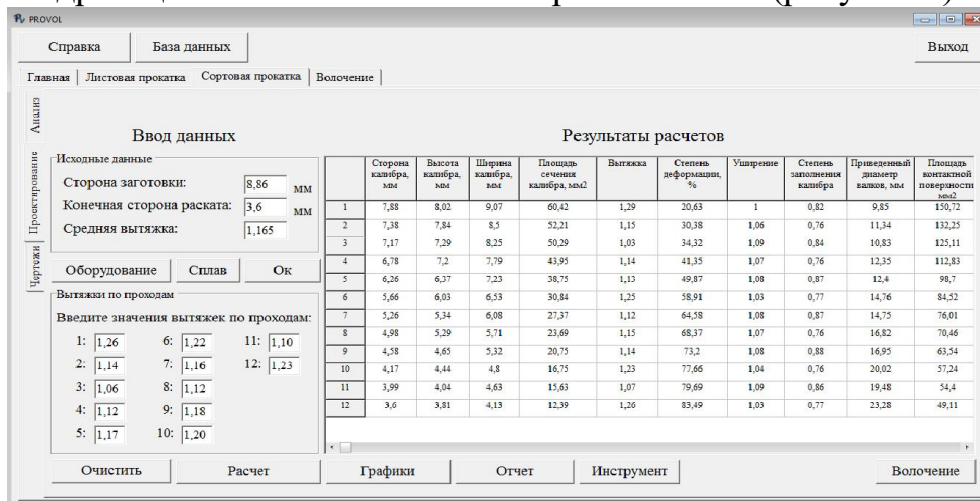


Рисунок 3 – Окно программы для проектирования режимов сортовой прокатки

Она реализована в среде программирования Delphi и включает в себя модули для проектирования технологических процессов прокатки и волочения, которые могут использоваться автономно или в комплексе для расчетов режимов деформации длинномерных деформированных полуфабрикатов из цветных металлов и их сплавов, а также для определения энергосиловых параметров и выбора оборудования. С применением

программы “PROVOL” спроектированы рациональные маршруты сортовой прокатки длинномерных деформированных полуфабрикатов для ювелирных цепей из новых сплавов драгоценных металлов (рисунок 4).

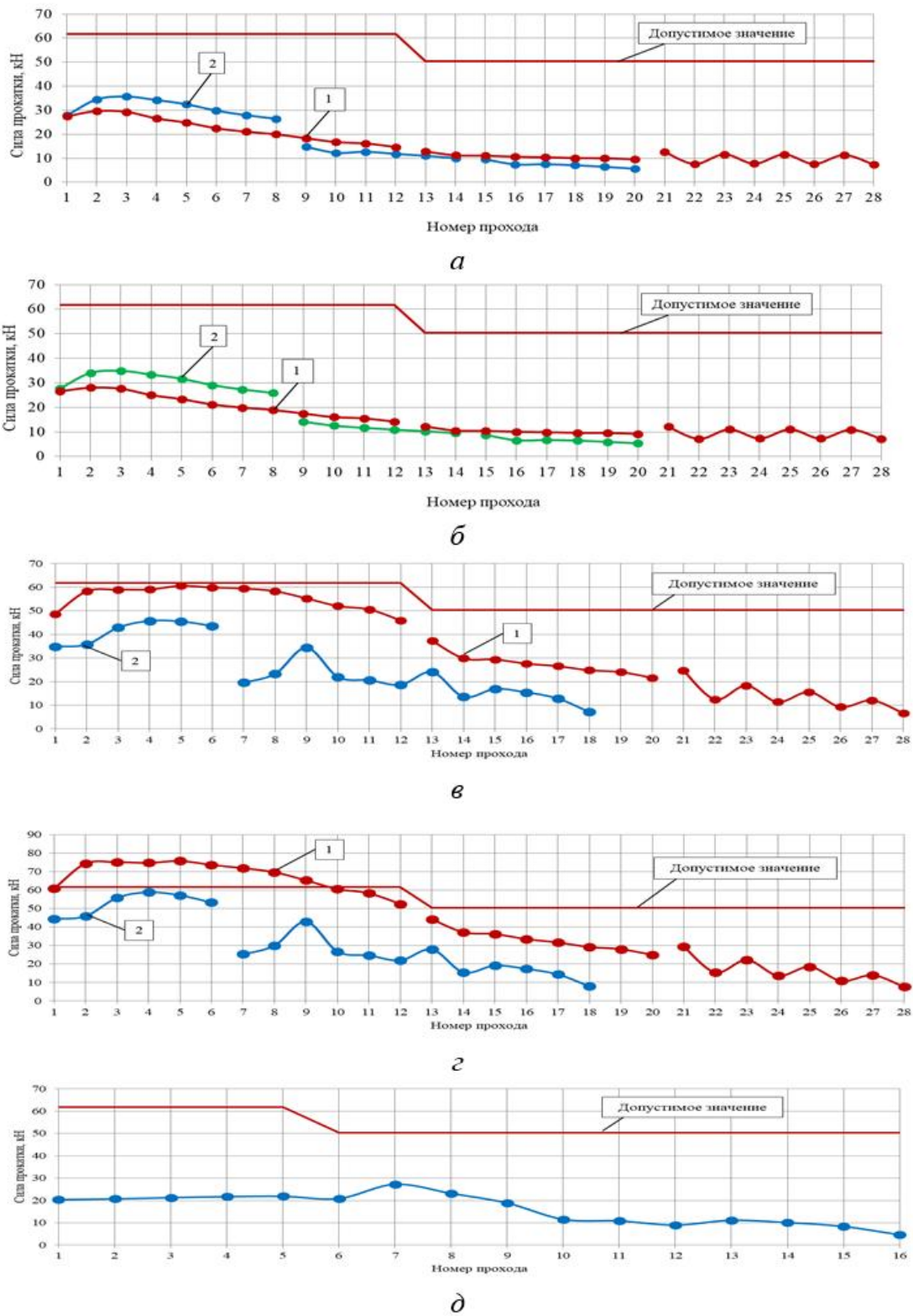


Рисунок 4 – Изменение силы прокатки по действующим (1) и предложенным (2) маршрутам для исследуемых сплавов драгоценных металлов:
а – сплав №1; *б* – сплав №2; *в* – сплав №3 *г* – сплав №4; *д* – сплав №5

Их применение позволяет сократить количество проходов, оптимизировать энергосиловую загрузку оборудования и обеспечить равномерность деформации заготовки при прокатке по предложенным маршрутам.

Компьютерное моделирование процесса сортовой прокатки и инструмента было выполнено с помощью программного пакета DEFORM-3D (рисунок 5, а) и системы FeatureCAM (рисунок 5, б) с целью формирования 3D-модели валков и их калибровки, а также для их изготовления на токарно-фрезерном оборудовании. Расчеты по разработанной модели подтвердили реализуемость процесса сортовой прокатки прутков из исследуемых сплавов по разработанным маршрутам без обрывов и превышения допустимой силы прокатки. Сравнение результатов моделирования с данными экспериментов показало, что погрешность расчетов не превышает 5 %.

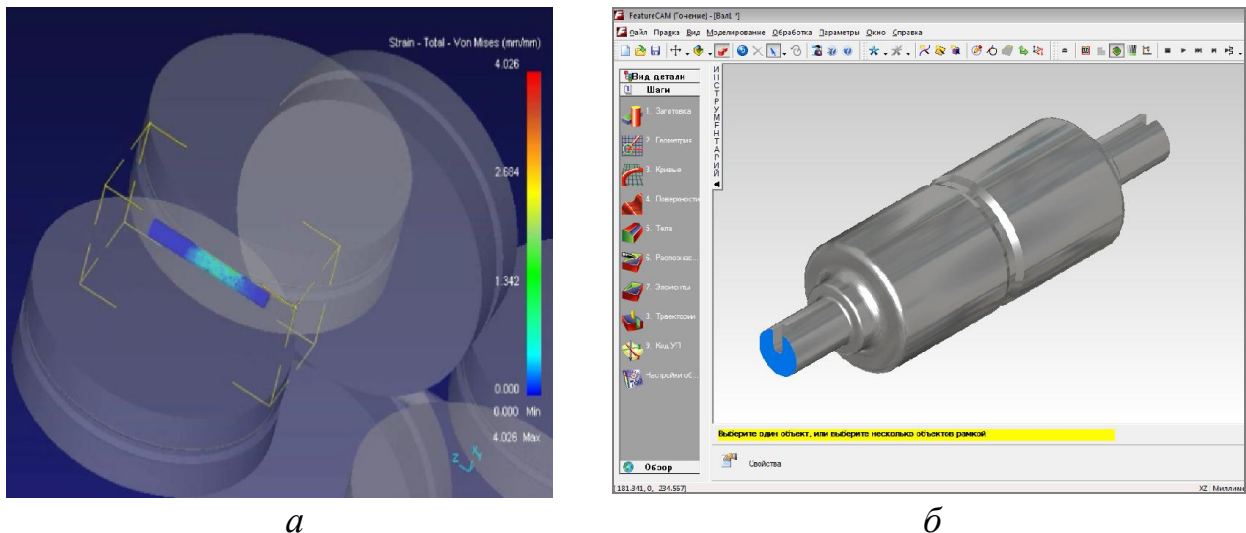


Рисунок 5 – 3D-модели процесса сортовой прокатки и валков

В третьей главе приведены методика, оборудование и результаты экспериментальных исследований формоизменения, силовых параметров, структуры и свойств металла при холодной сортовой прокатке прутков из безникелевых сплавов золота №3, №4 и серебра №5 по спроектированным маршрутам. Получены уравнения регрессии для определения прочностных свойств исследуемых сплавов.

Для оценки влияния величины накопленной степени деформации (ε_{Σ}) при сортовой прокатке на уровень механических свойств (предела текучести σ_T и временного сопротивления разрыву σ_B) был спланирован полный факторный эксперимент, который дал возможность получить регрессионные зависимости для определения прочностных свойств новых сплавов:

$$\text{сплав №1:} \quad \sigma_T = -0,0096 \varepsilon_{\Sigma}^2 + 2,60 \varepsilon_{\Sigma} + 150,96; \quad (5)$$

$$\sigma_B = -0,0023 \varepsilon_{\Sigma}^2 + 2,55 \varepsilon_{\Sigma} + 333,91. \quad (6)$$

$$\text{сплав №2:} \quad \sigma_T = -0,0041 \varepsilon_{\Sigma}^2 + 2,02 \varepsilon_{\Sigma} + 150,72; \quad (7)$$

$$\sigma_B = -0,0017 \varepsilon_{\Sigma}^2 + 3,11 \varepsilon_{\Sigma} + 220,18. \quad (8)$$

$$\text{сплав №3: } \sigma_{\tau} = -0,0045 \varepsilon_{\Sigma}^2 + 6,20 \varepsilon_{\Sigma} + 265,84; \quad (9)$$

$$\sigma_{\text{в}} = -0,0434 \varepsilon_{\Sigma}^2 + 9,44 \varepsilon_{\Sigma} + 336,25. \quad (10)$$

$$\text{сплав №4: } \sigma_{\tau} = -0,0036 \varepsilon_{\Sigma}^2 + 9,41 \varepsilon_{\Sigma} + 321,22; \quad (11)$$

$$\sigma_{\text{в}} = -0,0074 \varepsilon_{\Sigma}^2 + 12,39 \varepsilon_{\Sigma} + 401,31. \quad (12)$$

$$\text{сплав №5: } \sigma_{\tau} = 0,0328 \varepsilon_{\Sigma}^2 + 0,36 \varepsilon_{\Sigma} + 169,24; \quad (13)$$

$$\sigma_{\text{в}} = 0,0317 \varepsilon_{\Sigma}^2 + 0,89 \varepsilon_{\Sigma} + 249,97. \quad (14)$$

В ходе экспериментальных исследований на сортовом прокатном стане модели AMBIFILO VELOCE ROSEN 180+200xø130 фирмы Mario Di Maio с системой восьмигранных калибров обрабатывали спроектированные режимы обжатий для сплавов №3, №4 и №5, измеряли уширение металла и контактную площадь, а также с помощью тензометрической аппаратуры и месдоз фиксировали силу прокатки. По ходу прокатки отбирали образцы и определяли механические свойства (таблица 2) методом растяжения на универсальной разрывной машине LFM 400.

Таблица 2 – Свойства литых и деформированных образцов из опытных сплавов

Проход прокатки, после которого отбирался образец	Степень деформации, %	Предел текучести, МПа	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %	Микро-твердость, кгс/мм ²
Сплав №3					
Литой образец		266	336	33,8	150
4	44,3	487	680	13,0	201
12	78,8	730	794	8,3	204
13	83,6	802	814	4,9	210
14	87,2	804	816	4,7	212
17	92,6	809	830	4,1	214
18	93,8	878	891	4,0	217
Сплав №4					
Литой образец		307	384	31,0	158
4	44,3	667	716	11,9	202
7	69,0	799	882	4,9	207
17	92,6	883	903	4,8	215
18	93,8	907	927	3,9	219
Сплав №5					
Литой образец		168	248	30,0	68
3	45,1	258	363	27,0	111
7	85,8	437	544	11,1	117
8	90,1	465	580	8,8	120
11	95,0	497	603	6,7	141
12	96,0	504	638	5,9	141
13	96,8	510	645	4,2	142
16	98,1	519	656	1,3	142

Исследования показали, что новые сплавы имеют высокий уровень механических свойств, мелкозернистую структуру, хорошую технологичность при литье и обработке давлением, обеспечивающую получение проволоки для цевязания с высокими потребительскими характеристиками.

Металлографические исследования дали возможность выявить, что структура сплава №3 в литом состоянии (рисунок 6, *а*) характеризуется наличием дендритной ликвации, однако имеет тонкоразветвленные ветви дендритов с малым размером дендритной ячейки. При этом обеспечивается получение дендритных кристаллов с размером дендритной ячейки 4 мкм. К последним проходам прокатки была достигнута однородная по длине и сечению полуфабриката волокнистая структура (рисунок 6, *б*). Повышенные прочностные и пластические свойства сплава №3 позволили исключить в технологической схеме обработки операции промежуточного отжига.

*а**б*

Рисунок 6 – Микроструктура прутков из сплава золота №3:
а – в литом состоянии, $\times 200$; *б* – при степени деформации 93,8 %, $\times 200$

Металлографические исследования сплава №5 показали, что в периферийных зонах наблюдаются столбчатые кристаллы, а в центре образца формируются равноосные зерна различного размера (рисунок 7, *а*).

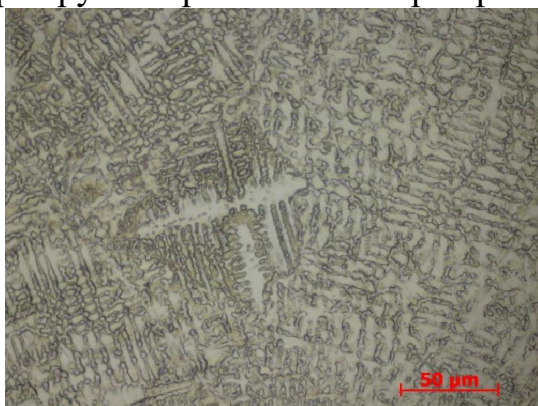
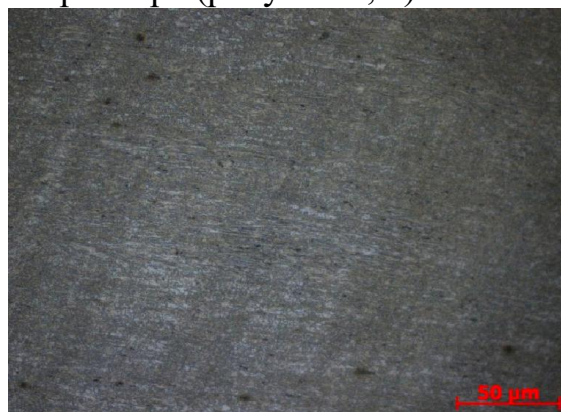
*а**б*

Рисунок 7 – Микроструктура прутков из сплава серебра №5:
а - литое состояние, $\times 500$; *б* – при степени деформации 98,1%, $\times 500$

Внутри равноосных зерен крупного размера (от 260 мкм) наблюдается дендритная ликвация, тогда как в зернах меньшего размера она не наблюдается, поскольку успевают пройти процессы выравнивающей диффузии. Средний размер зерна исследуемой литой заготовки составил 216 мкм, а средний размер дендритной ячейки - 7 мкм, что свидетельствует о большой степени переохлаждения при кристаллизации.

При пластической деформации в результате постепенного выравнивания химического состава в микрообъемах происходит преобразование литой структуры от дендритной химически неоднородной до относительно однородной на конечном переделе. Образец, прокатанный с максимальной степенью деформации (рисунок 7, б), имеет волокнистое строение, а его структура представлена дисперсными деформированными зернами. Установлено, что опытный сплав серебра имеет достаточную пластичность и технологичность при холодной пластической деформации, поэтому он может подвергаться обработке со степенями деформации до 98% без промежуточных отжигов.

В четвертой главе представлены новые технические решения по химическим составам безникелевых сплавов на основе серебра (патент РФ №2513502), на основе золота (патенты РФ №2586175 и №2697142) и способу модифицирования последних рутением (патент РФ №2507284), а также результаты опытно-промышленной апробации технологии изготовления из новых сплавов золота 585 пробы (сплавы №1 и №2) длинномерных деформированных полуфабрикатов для производства ювелирных цепей в промышленных условиях ОАО «Красцветмет».

Основной задачей являлось создание безникелевых сплавов на основе золота 585 пробы белого цвета, обладающих высокой коррозионной стойкостью и изделий из него, имеющих повышенный уровень потребительских и механических свойств, а также их равномерное распределение по длине деформированных полуфабрикатов.

В предложенных составах сплавов содержание золота находилось в пределе 58,0-59,0%, благодаря чему обеспечивалась их пробность. Введение палладия являлось основным техническим решением для замещения никеля, вследствие чего достигалось повышение коррозионной стойкости, предотвращение охрупчивания и обеспечение цветовой гаммы сплавов. Медь вводилась для понижения температуры плавления, обеспечивала необходимую пластичность и улучшала технологичность сплавов при литье. Цинк снижал температуру плавления, а серебро придавало сплавам мягкость, ковкость и пониженную температуру плавления. Добавка индия в пределах 0,4-0,6 мас. % обеспечивает необходимый интервал температуры плавления сплава.

В качестве основной модифицирующей добавки был выбран рутений, который в пределах 0,01-0,10 мас. % обеспечивал получение мелкозернистой структуры сплавов №1 и №2 и необходимый диапазон изменения размера

зерен в пределах 5-10 мкм, а также способствовал повышению пластичности и выравниванию свойств по длине и сечению литой заготовки. Вместе с тем в известном способе введения рутения в расплав его ограниченная растворимость в золоте из-за высокой температуры плавления приводила к образованию крупных включений в структуре сплава (рисунок 8, *а*), что являлось причиной возникновения брака при обработке давлением.

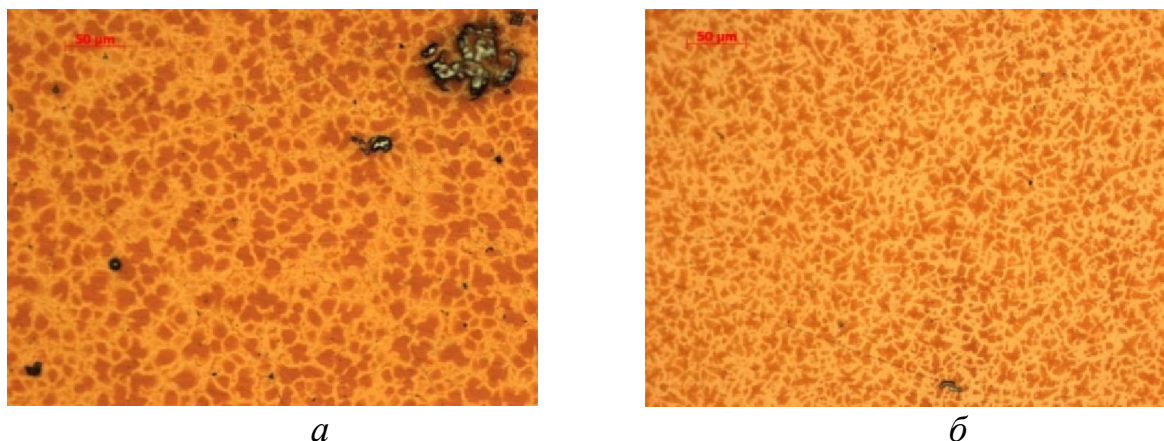


Рисунок 8 – Микроструктура сплавов золота 585 пробы в литом состоянии, модифицированных различными способами: *а* – известный; *б* – новый; $\times 500$

Для повышения модифицирующей способности лигатурного материала, выражающейся в измельчении зеренного строения слитков сплавов золота, был разработан новый способ модифицирования сплавов, согласно которому рутений предварительно осаждают из электролита гальваническим способом на серебро и вводят его в расплав в виде лигатуры Ag-Ru с содержанием рутения в количестве 0,001 до 0,01 масс.% непосредственно перед кристаллизацией. Это позволяет улучшить его растворение в золоте, в результате чего в сплаве происходит полное усвоение введенного модификатора. Кроме того, данный способ обеспечивает точное определение количества введенного в расплав рутения.

Полуфабрикаты из сплава белого золота 585 пробы, полученные с использованием этой технологии, имеют равномерную мелкозернистую структуру по всей длине и сечению слитка (рисунок 8, *б*), что обеспечивает высокое качество и эффективность модифицирования.

Для проверки результатов теоретических исследований и моделирования была проведена опытно-промышленная апробация технология получения проволоки для производства ювелирных цепей из новых сплавов золота белого цвета 585 пробы (сплавы №1 и №2) в условиях ОАО «Красцветмет». В результате были получены опытные партии проволоки, из которой на цепевязальном станке были изготовлены наиболее сложные в технологии ювелирные цепи НЦ 12-078 типа «Снейк». Полученные данные для новых сплавов анализировали в сравнении с характеристиками никельсодержащего сплава белого золота ЗлНЦМ 585-12,5-4 ГОСТ 30649-99.

Сплавы №1 и №2 были получены с применением нового способа модифицирования прямым сплавлением основных компонентов с добавками лигатуры Ag-Ru, которая вводилась в расплав непосредственно перед литьем.

Литая заготовка диаметром 8 мм была получена в печи непрерывного литья Z50-26M IESCO (температура расплава 1200 °С, фильеры – 750 °С). Далее она подвергалась холодной сортовой прокатке в клетях непрерывных станов в три этапа (28 проходов) до получения полуфабриката сечением 1,1×1,1 мм с промежуточными отжигами после каждого этапа. Режимы деформации и термической обработки представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры деформации и термической обработки для сплавов №1 и №2

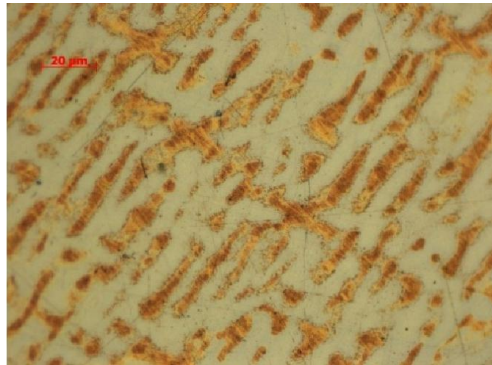
Этап сортовой прокатки	Режимы деформации			Режимы термической обработки		
	размеры заготовки, мм	количество проходов	конечные размеры, мм	температура, °С	время, мин	среда охлаждения
1	Ø 8,0	12	3,7×3,7	675	50	вода
2	3,7×3,7	8	2,1×2,1	675	35	вода
3	2,1×2,1	8	1,1×1,1	675	35	вода

Исследования механических свойств (таблица 5) опытных сплавов показали, что они имеют достаточно высокий уровень пластических и прочностных свойств, обеспечивающий получение проволоки с высокими потребительскими характеристиками.

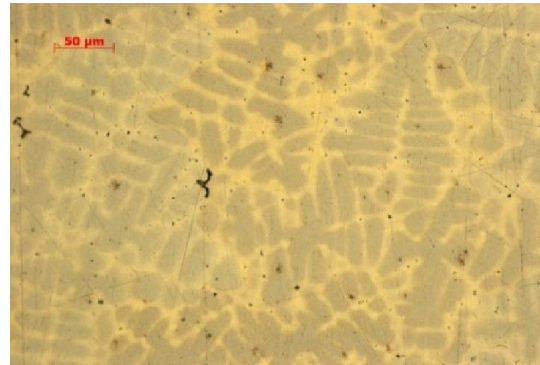
Таблица 5 – Механические свойства сплавов опытно-промышленной плавки

Операция	Размер стороны, мм	Деформированное состояние			Отожженное состояние		
		σ_b , МПа	δ , %	Микротвердость, кгс/мм ²	σ_b , МПа	δ , %	Микротвердость, кгс/мм ²
Сплав 1							
1 этап прокатки	3,7×3,7	940	4,0	307	533	35,0	242
2 этап прокатки	2,1×2,1	881	2,4	292	464	27,2	185
3 этап прокатки	1,1×1,1	820	1,5	294	489	31,0	160
Волочение	диаметр 0,25	958	4,2	300	560	33,0	145
Сплав 2							
1 этап прокатки	3,7×3,7	942	3,6	228	450	35,0	124
2 этап прокатки	2,1×2,1	753	2,6	271	430	32,0	163
3 этап прокатки	1,1×1,1	661	1,9	264	434	25,0	149
Волочение	диаметр 0,25	879	3,6	273	503	39,2	139
Сплав ЗлНЦМ 585-12,5-4							
1 этап прокатки	3,7×3,7	815	3,6	245	513	78,2	126
2 этап прокатки	2,1×2,1	1011	2,7	233	543	54,2	121
3 этап прокатки	1,1×1,1	1015	1,7	232	694	27,1	119
Волочение	диаметр 0,25	1236	1,6	222	625	44,2	125

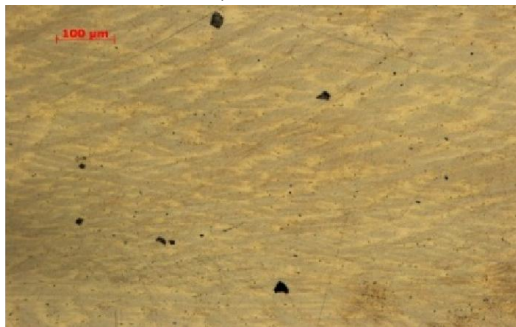
Сравнение структуры литых образцов из никельсодержащего сплава ЗлНЦМ 585-12,5-4 (рисунок 9, *а*) показывает, что для сплавов №1 и №2 применение модифицирования приводит к значительному измельчению макростроения слитков.



а, ×320



б, ×320



в, ×160



з, ×160



д, ×800



е, ×800

Рисунок 9 - Микроструктура полуфабрикатов из исследуемых сплавов в литом и деформированном состояниях: *а* – литое состояние сплава ЗлНЦМ 585-12,5-4; *б* – литое состояние сплава №1; *в* – после сортовой прокатки прутка из сплава №1 размерами 3,7×3,7 мм; *з* – после сортовой прокатки прутка из сплава №2 размерами 3,7×3,7 мм; *д* – после волочения проволоки диаметром 0,25 мм из сплава №1; *е* – после волочения проволоки диаметром 0,25 мм из сплава №2

Так, например, значение параметра дендритной ячейки литых образцов из сплава №1 (рисунок 9, *б*) уменьшается и становится равным 20 – 25 мкм, а размер литых дендритных кристаллов составляет 150 – 200 мкм. Расслоение

по химическому составу в сплаве №1 менее выражено, чем в сплаве ЗлНЦМ 585-12,5-4. Структура выравнивается уже на стадии сортовой прокатки (рисунок 9, в), а при последующем волочении (рисунок 9, д) имеет вытянутое строение в направлении деформации. Установлено также, что деформированные полуфабрикаты имеют мелкозернистую структуру, равномерную по длине и сечению.

Микроструктура сплава № 2 в литом состоянии характеризуется аналогичным дендритным строением, что и сплав №1 в связи с химической неоднородностью. При пластической деформации (рисунок 9, з), а также при отжигах происходит преобразование литой структуры от дендритной химически неоднородной до однородной на конечном переделе (рисунок 9, е). Это достигается в результате протекания рекристаллизационных процессов и постепенного выравнивания химического состава в микрообъемах от передела к переделу по мере осуществления пластической деформации и тепловых процессов при отжиге.

Результаты проведенных исследований структуры и свойств полученных полуфабрикатов, а также получение опытных партий ювелирных цепей типа «Снейк», позволяют утверждать, что проволока ювелирного назначения из новых безникелевых сплавов золота 585 пробы имеет требуемый уровень механических свойств и пригодна для изготовления ювелирных цепей в промышленных условиях.

В заключении представлены основные выводы и результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработан и запатентован ряд новых безникелевых сплавов на основе белого золота 585 пробы и серебра 925 пробы, обеспечивающих повышенные механические и эксплуатационные свойства деформированных полуфабрикатов, предназначенных для изготовления ювелирных цепей.

2. Решена вариационная задача определения формоизменения и энергосиловых параметров холодной сортовой прокатки в восьмигранных калибрах сплавов драгоценных металлов и установлены закономерности их изменения.

3. Разработано и зарегистрировано программное обеспечение для проектирования процессов производства длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов драгоценных металлов, с помощью которого рассчитаны режимы обжатий при сортовой прокатке новых сплавов.

4. С использованием результатов компьютерного моделирования обоснованы технологические параметры прокатки и определена энергосиловая нагрузка оборудования.

5. Проведены экспериментальные исследования и регрессионный анализ опытных данных, на основании которых получены формулы для определения прочностных свойств новых сплавов.

6. Проведена опытно-промышленная апробация в условиях ОАО «Красцветмет» технических и технологических решений для изготовления проволоки, из которой получены партии ювелирных цепей из новых сплавов белого золота 585 пробы, имеющие требуемые эксплуатационные характеристики.

7. Результаты работы внедрены в учебный процесс для подготовки бакалавров и магистров по направлению «Металлургия» в области обработки металлов давлением, а также аспирантов по специальности 05.16.05 – Обработка металлов давлением.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Издания из перечня ВАК

1. **Gaylis, J. D. (Дитковская, Ю. Д.)** Development Calculation Methods of Technological Parameters for Receipt Deformed Semi-Finished Products of Gold Based Alloys of Probe 585 / S.B. Sidelnikov, N.N. Dovjhenko, O.S. Lebedeva, S.V. Belyaev, J.D. Gailis, E.V. Feskov // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies №6 (2012, 5) – p. 615-623.

2. **Гайлис, Ю. Д. (Дитковская, Ю. Д.)** Разработка подсистемы САПР технологических процессов производства ювелирных изделий / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, Ю.Д. Гайлис, О.С. Лебедева // Известия МГТУ «МАМИ». Научный рецензируемый журнал. Серия 2. Технология машиностроения и материалы. – М., МГТУ «МАМИ», №2(16), 2013, т.2. – С. 216 – 220.

3. **Дитковская, Ю. Д.** Анализ и проектирование технологии получения проволоки ювелирного назначения из новых сплавов драгоценных металлов / С.Б. Сидельников, Ю.Д. Дитковская, О.С. Лебедева [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». т. 15, №4. 2015. – С. 108 – 115.

4. **Дитковская, Ю. Д.** Создание новых сплавов ювелирного назначения из многокомпонентных систем драгоценных металлов и технологий их обработки / С.Б. Сидельников, Ю.Д. Дитковская, Н.Н. Довженко [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета. - 2015. №4. – С. 38 – 44.

5. **Ditkovskaia, Iu.D. (Дитковская, Ю. Д.)** Computer simulation and automated calculation of parameters for process and receipt of deformed semi-finished products of new precious metals alloys for jewelry chains production / Iu.D. Ditkovskaia, S.B. Sidelnikov, N.N. Dovjhenko, O.S. Lebedeva, K. A. Bindareva // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 2016, 9(5) – P. 632-642.

6. **Дитковская, Ю. Д.** 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, 2017. – С. 27-33.

7. **Ditkovskaya, Yu.D.** Study of the technique to produce bimetallic deformed semi-finished products for jewelry chains made from red gold alloys / S.B. Sidelnikov, E.S. Chibisova, E.S. Lopatina, Yu.D. Ditkovskaya, K.A. Bindareva, V.A. Lopatin // Вестник Магнитогорского государственного технического университета. – 2018. Т. 16. №4. – С. 39-44.

8. **Дитковская, Ю. Д.** Опытнo-промышленная апробация технология получения проволоки из сплавов белого золота / С.Б. Сидельников, Е.С. Лопатина, О.С. Лебедева, Ю.Д. Дитковская, В.А. Лопатин // Производство проката, 2018. №12. – С. 22-25.

Патенты и свидетельства

9. Пат. № 2507284 Российская федерация, МПК С1 С22С 5/02 С22С 1/03. Способ модифицирования сплавов на основе золота / Сидельников С.Б., Довженко Н. Н., Беляев С. В., **Гайлис Ю. Д. (Дитковская Ю. Д.)** [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – 2012154131/02; заявл. 13.12.2012; опубл. 20.02.2014. Бюл. №5.

10. Пат. № 2513502 Российская федерация, МПК С1 С22С 5/08. Сплав белого цвета на основе серебра 925 пробы, модифицированный кремнием / Сидельников С.Б., Беляев С.В., Столяров А.В., Усков И.В., Аникина В. И., Усков Д.И., Аникин А.И., Богданов Д.В., **Гайлис Ю.Д. (Дитковская Ю. Д.)**, Феськов Е.В.; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – 2013117667/02; 16.04.2013; опубл. 20.04.2014. Бюл. № 11.

11. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620276. Металлы и оборудование / Н.Н. Довженко, С.Б. Сидельников, О.С. Лебедева, Э.А. Рудницкий, О.О. Виноградов, **Ю. Д. Дитковская**; зарегистр. 13.02.2015; опубл. 20.03.2015, Бюл №3.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612273. PROVOL / С.Б. Сидельников, С.В. Беляев, О.С. Лебедева, Э.А. Рудницкий, **Ю.Д. Дитковская**, Е.С. Леонтьева, А.С. Соляникова; зарегистр. 16.02.2015; опубл. 20.03.2015, Бюл №3.

13. Пат. № 2586175 Российская федерация, МПК С1 С22С 5/05. Сплав на основе золота белого цвета 585 пробы / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, В.С. Беляев, А.В. Столяров, И.В. Усков, Е.С. Лопатина, О.С. Лебедева, **Ю.Д. Дитковская**, Е.С. Леонтьева, К.А. Биндарева; заявитель

и патентообладатель ФГОУ ВО «Сибирский федеральный университет». – № 2015121955/02, заявл. 08.06.2015; опубл. 10.06.2016. Бюл. №16.

14. Пат. № 2697142 Российская Федерация, МПК С22С 5/02. Сплав белого цвета на основе золота 585 пробы / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, **Ю.Д. Дитковская** [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВО «Сибирский федеральный университет». – № 2018143190, заявл. 05.12.2018; опубл. 12.08.2019. Бюл. 23.

Другие публикации

15. **Гайлис, Ю. Д. (Дитковская, Ю. Д.)** Разработка методики расчета формоизменения металла при сортовой прокатке прутков из сплавов золота 585 пробы / О.С.Лебедева, Е.В. Феськов, Ю.Д.Гайлис // XII Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металловедов – молодых ученых: сб. науч. тр. – Екатеринбург: УрФУ, 2011 г. – С. 205 – 207.

16. **Гайлис, Ю. Д. (Дитковская, Ю. Д.)** Анализ и автоматизация расчета деформационных режимов холодной листовой прокатки и волочения благородных металлов и их сплавов // Молодёжь и наука: в 4 т.: материалы конф. Т.3. / отв. за выпуск О.А.Краев. – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2012. – С. 530 – 535.

17. **Гайлис, Ю. Д. (Дитковская, Ю. Д.)** Разработка программного обеспечения для расчета деформационных режимов листовой, сортовой прокатки и волочения деформируемых полуфабрикатов из сплавов золота 585 пробы / С.Б. Сидельников, О.С. Лебедева, Ю.Д.Гайлис, Е.В.Феськов // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: междунар. сб. науч. тр. / под.ред. В.М. Салганика. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. тех. ун-та им. Г.И.Носова, 2012. – С. 25 – 30.

18. **Гайлис, Ю. Д. (Дитковская, Ю. Д.)** Разработка и исследование технологии получения деформированных полуфабрикатов из сплавов золота 585 пробы /С.Б.Сидельников, С.В.Беляев, О.С.Лебедева, Е.А.Павлов, А.В.Столяров, И.В.Усков, Е.В.Феськов, Ю.Д.Гайлис // Цветные металлы-2012: Сб. научн. статей. – Красноярск: Версо, 2012. – С.802 – 807.

19. **Гайлис, Ю. Д. (Дитковская, Ю. Д.)** Расчет параметров формоизменения процесса холодной сортовой прокатки прутков из сплавов золота 585 пробы / С.Б. Сидельников, О. С. Лебедева, А. В. Столяров, Ю.Д.Гайлис, Е.В. Феськов // Сб. науч. Тр. SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития '2012». – Выпуск 3. Том 9. – Одесса: КУПРИЕНКО, 2012. – С.64 – 69.

20. **Гайлис, Ю. Д. (Дитковская, Ю. Д.)** Автоматизация проектирования технологических режимов получения проволоки из сплавов золота для производства ювелирных цепей // Интеллектуальный потенциал

XXI века: ступени познания: сб. материалов XIII Молодежной научно-практической конференции / Под общ.ред. С.С.Чернова. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – С.64 – 69.

21. **Гайлис, Ю. Д. (Дитковская, Ю. Д.)** Проектирование технологии и моделирование инструмента для производства длинномерных ювелирных изделий // Научный потенциал мира-2013: сборник материалов IX международной научно-практической конференции. – София: «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2013. – С. 86 – 90.

22. **Gaylis, Y. D. (Ditkovskaya Y. D.)** Using of CAD and CAM systems in technology designing and tools 3D-modeling in long-length semi-finished products processes / Y.D. Gaylis, E.I. Lepp // “Applied Sciences and technologies in the United States and Europe: common challenges and scientific findings”: Papers of the 3rd International Scientific Conference (November 11–12, 2013). Cibunet Publishing. - New York, USA. 2013. – p.128 – 130.

23. **Дитковская, Ю. Д.** Исследование технологии получения проволоки из сплавов золота 585 пробы и разработка программного обеспечения для ее сопровождения // Миссия молодежи в науке: Сборник материалов научно-практической конференции: в 2 т. Т. 2. – Ростов-на-Дону, Издательство Южного федерального университета, 2015. – С. 9-12.

24. **Дитковская, Ю. Д.** Постановка вариационной задачи по определению формоизменения и энергосиловых параметров прокатки в восьмиугольных калибрах // Проспект Свободный-2016: материалы научной конференции, посвященной году образования в Содружестве Независимых Государств. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т., 2016. – С. 25 – 27.

25. **Дитковская, Ю. Д.** Исследование технологии получения проволоки ювелирного назначения из сплавов золота и серебра с помощью физического и математического моделирования / С.Б. Сидельников, Ю.Д. Дитковская, В.А. Лопатин // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 77-й международной научно-технической конференции. Т.1. – Магнитогорск, 2019. – С. 147-148.

26. **Дитковская, Ю. Д.** Физическое и математическое моделирование процесса сортовой прокатки для производства длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов драгоценных металлов / Ю.Д. Дитковская, С.Б. Сидельников, Е.С. Лопатина, В.А. Лопатин // Цветные металлы и минералы: Сборник докладов XI Международного Конгресса «Цветные металлы и минералы». – Красноярск: 2019. – С. 542-549.