

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ДИТКОВСКАЯ Юлия Дмитриевна

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

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
СИДЕЛЬНИКОВ Сергей Борисович

Красноярск – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 4 |
| ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЮВЕЛИРНЫХ ЦЕПЕЙ ИЗ СПЛАВОВ ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ | 8 |
| 1.1 Анализ современного состояния рынка и тенденций развития производства ювелирных цепей из сплавов драгоценных металлов..... | 8 |
| 1.2 Характеристика сплавов белого золота и их свойств | 11 |
| 1.3 Сплавы на основе серебра 925 пробы..... | 15 |
| 1.4 Анализ промышленной технологии производства ювелирных цепей из сплавов драгоценных металлов | 18 |
| 1.5 Анализ существующих методик для определения формоизменения и энергосиловых параметров сортовой прокатки | 22 |
| 1.6 Обзор программного обеспечения для моделирования и проектирования технологических процессов обработки металлов давлением.. | 25 |
| 1.7 Выводы по главе..... | 30 |
| ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ ПРУТКОВ ИЗ СПЛАВОВ ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ | 31 |
| 2.1 Постановка и решение вариационной задачи по определению формоизменения металла при сортовой прокатке в восьмигранных калибрах . | 31 |
| 2.2 Разработка программного обеспечения и методики для проектирования технологии и инструмента для холодной сортовой прокатки длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов драгоценных металлов | 39 |
| 2.3 Проектирование технологических режимов прокатки прутков из новых безникелевых сплавов серебра и золота | 49 |
| 2.4 Компьютерное моделирование процесса сортовой прокатки полуфабрикатов из новых сплавов серебра и золота | 55 |

| | |
|--|-----|
| 2.5 Выводы по главе..... | 57 |
| ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ НОВЫХ БЕЗНИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ СЕРЕБРА И ЗОЛОТА В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ | 59 |
| 3.1 Материалы, оборудование и методика проведения исследований..... | 59 |
| 3.2 Планирование эксперимента и получение регрессионных зависимостей для исследуемых сплавов..... | 64 |
| 3.3 Результаты экспериментальных исследований процесса сортовой прокатки нового сплава серебра 925 пробы и их анализ | 69 |
| 3.4 Результаты экспериментальных исследований процесса сортовой прокатки новых сплавов золота 585 пробы и их анализ | 74 |
| 3.5 Выводы по главе..... | 77 |
| ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И ИХ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ | 78 |
| 4.1 Новые технические решения по составам сплавов драгоценных металлов | 78 |
| 4.2 Новые технологические решения по обработке сплавов на основе золота 585 пробы..... | 80 |
| 4.3 Опытно-промышленная апробация технологии получения проволоки из новых сплавов драгоценных металлов..... | 81 |
| 4.4 Выводы по главе..... | 87 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 88 |
| ЛИТЕРАТУРА..... | 89 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А | 100 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б..... | 114 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В | 115 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г..... | 116 |

ВВЕДЕНИЕ

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, а также 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».

Целью 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.

На основании анализа научно-технической и патентной литературы были сформулированы задачи для достижения поставленной цели:

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 прутков из 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), 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 базы данных № 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.

Исследования выполнены с использованием 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.

Положения, выносимые на защиту:

- 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 обоснована 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».

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на Всероссийских и Международных научно-технических конференциях Сибирского федерального университета (Красноярск, 2011-2016 гг.), Международных конгрессах «Цветные металлы» (Красноярск, 2012-2019 гг.), Международной научно-технической конференции «Современные технологии обработки материалов давлением: моделирование, проектирование, производство» (Москва, 2013 г.), 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.) и др.

Результаты диссертационной работы отражены в 41 печатном труде, 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.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ПРОИЗВОДСТВА ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЮВЕЛИРНЫХ ЦЕПЕЙ ИЗ СПЛАВОВ ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ

1.1 Анализ современного состояния рынка и тенденций развития производства ювелирных цепей из сплавов драгоценных металлов

Проектирование технологии производства изделий способами обработки металлов давлением связано с поиском рациональных деформационных режимов, обеспечивающих необходимый уровень качества и снижение себестоимости производства. При этом требуется разработка математических моделей для определения параметров технологических процессов и проведение расчетов, связанных со значительными затратами времени, необходимостью сбора и систематизации большого количества данных.

Для производства ювелирных изделий применяются различные операции обработки металлов давлением, которые позволяют получать изделия с повышенными механическими и эксплуатационными свойствами [1, 2]. Для длинномерных деформированных полуфабрикатов в виде прутков и проволоки для ювелирных цепей такими основными операциями являются холодная сортовая прокатка и волочение.

Ювелирные цепи и браслеты-цепи пользуются на рынке наиболее постоянным спросом. Это объясняется постоянной потребностью в этих изделиях, меньшей их подверженностью моде и колебаниям цен за счет отсутствия вставок из драгоценных и полудрагоценных камней.

Для производства этого вида продукции имеется ряд требований, которые могут быть сформулированы следующим образом:

- сплавы, используемые для производства цепей, должны быть гипоаллергенны, так как Директива Европейского Сообщества 76/769/ЕЕС запрещает производить и продавать ювелирные изделия и бижутерию, содержащие более 0,05% никеля, или изделия из сплавов с никелем, имеющие длительный контакт с кожей человека [3];
- уровень прочностных и пластических свойств этих сплавов должен обеспечивать применение больших степеней холодной деформации для обеспечения хороших эксплуатационных свойств изделий;
- наличие легирующих элементов в сплаве и их концентрации должно обеспечивать соответствующую цветовую гамму ювелирных изделий и сравнительно низкую себестоимость;
- должна быть обеспечена технологичность обработки на цепевязальных станках для получения качественной продукции в виде ювелирных цепей.

Анализ научно-технической литературы показал, что динамика объемов экспорта и импорта ювелирной продукции после кризисного спада в 2014-2016 г.г. имеет тенденцию увеличения (рисунок 1.1). Причем по данным Пробирной палаты в 2018 г. объем импорта ювелирных изделий уже в 4,5 раз превысил объем экспорта [4, 5]. Это создало благоприятную обстановку для отечественных производителей на внутреннем рынке, снизив конкуренцию с зарубежными поставщиками за счет сокращения доли их присутствия на рынке и повышения стоимость их продукции из-за колебаний курсов валют и снижения курса рубля [6].

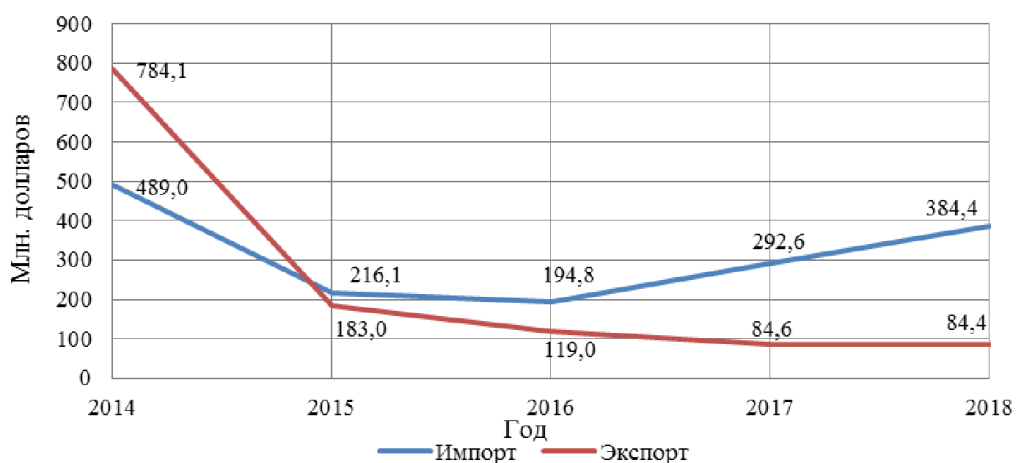
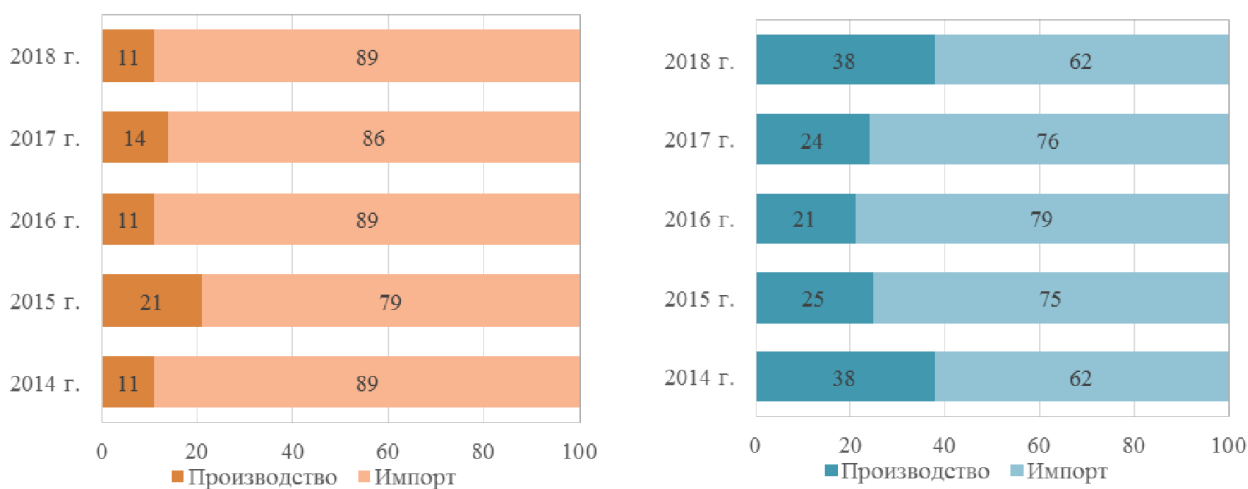


Рисунок 1.1 – Динамика экспорта и импорта ювелирных изделий России

Соотношение долей производства и импорта ювелирных изделий на отечественном рынке свидетельствует о том, что в настоящее время ситуация выравнивается. В 2018 году достигнут докризисный уровень производства ювелирных изделий из золота и серебра [7] (рисунок 1.2).



а

б

Рисунок 1.2 – Динамика соотношения долей производства и импорта ювелирных изделий на отечественном рынке: а – из золота; б – из серебра

Установлено также, что в 2014-2015 гг. производство ювелирных изделий из золота в России снизилось примерно на 40%, а из серебра, напротив, повысилось на 10-15% [8], что свидетельствует о предпочтении изделиям из более дешевого серебра.

Таким образом, отечественные производители находятся в ситуации, когда на рынке наблюдается некоторое сокращение доли импорта на фоне значительного падения покупательской способности. Вследствие этого повысилась конкуренция, и острее обозначились тенденции к повышению качества продукции, расширению ее ассортимента и модельного ряда, использованию новых гипоаллергенных сплавов и материалов.

Основным производителем ювелирных цепей России является ОАО «Красцветмет». (рисунок 1. 3). Кроме того, по данным маркетингового исследования, проведенного журналом «Экспо-Ювелир» [9], он является и лидером по продажам ювелирных цепей из золота и серебра на отечественном рынке (таблица 1.1). В ходе проведенного исследования потребителями оценивались сильные и слабые стороны производителей, и среди преимуществ этого предприятия отмечалось высокое качество изделий и низкий процент брака, а недостатков – цена, логистика и неразнообразный ассортимент продукции.



Рисунок 1.3 – Типы ювелирных цепочек, изготавливаемых на ОАО «Красцветмет»:

а - «снейк»; б - «корда»; в - «love's»; г - «ромб тройной»; д - «гурмета»; е - «китайский шнур»

Таким образом, тенденции развития производства ювелирных цепей и состояние рынка их производства обуславливают актуальность исследований в области поиска новых составов сплавов, для которых должны выполняться указанные выше требования, и технологий их деформационной обработки с целью получения проволоки для изготовления ювелирных цепей.

Таблица 1.1 – Доли лидеров рынка по товарным группам ювелирных цепочек

| № п/п | Предприятие | Доля рынка по группе изделий, % |
|------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Цепи из золота | | |
| 1 | ОАО «Красцветмет» | 18,0 |
| 2 | ЮЗ «Эстет» | 10,1 |
| 3 | Адамас (ООО «АДАМАС-ЮВЕЛИРТОРГ») | 10,1 |
| Цепи из серебра | | |
| 1 | ОАО «Красцветмет» | 15,4 |
| 2 | SOKOLOV | 15,4 |
| 3 | ТД «Серебро» | 13,5 |

Особенно это характерно для ювелирных цепей из сплавов белого золота и серебра, обладающих высоким уровнем механических свойств, хорошим внешним видом и цветовой гаммой.

1.2 Характеристика сплавов белого золота и их свойств

Основные марки ювелирных сплавов на основе золота приведены в межгосударственном стандарте ГОСТ 30649-99 [10], который регламентирует их химический состав и свойства. Сплавы белого золота делятся на две группы: первые наряду с основным металлом содержат платину или палладий, вторые – никель.

Присутствие платины обеспечивает высокую устойчивость к окислению, прочностные характеристики, способность к термическому упрочнению. Однако легирование платиной приводит к значительному повышению стоимости ювелирного изделия.

Никель в расплавленном состоянии неограниченно растворим в золоте, измельчает зерно сплава при кристаллизации, что сопровождается повышением прочности и твердости сплавов. Такие сплавы трудны для обработки, но при содержании никеля от 10 до 18 % становятся весьма технологичными, поскольку в этом случае достигается минимальная температура плавления, до минимума сужается температурный интервал кристаллизации. Влияние никеля при создании белого золота благоприятно, однако необходимо его исключение из состава сплава, поскольку этот элемент является гаптенем. Поэтому в настоящее время активно ведутся исследования по созданию новых безникелевых золотых сплавов.

Основные свойства и химический состав сплавов белого золота 585 пробы, согласно ГОСТ, представлены в таблицах 1.2 и 1.3. Эти сплавы пригодны как для литья, так и для холодной обработки давлением, пластичны при холодной деформации, не подвержены горячему растрескиванию в процессе отжига и пайки.

С целью снижения стоимости сплава и повышения эксплуатационных свойств разрабатываются новые составы лигатур и сплавы золота путем применения новых легирующих элементов и варьирования их соотношения.

Таблица 1.2 – Химический состав ювелирных сплавов золота белого цвета [10]

| Марка | Массовая доля компонента, % | | | | | |
|----------------------|-----------------------------|----------|-----------|------|---------|--------|
| | серебро | палладий | никель | медь | цинк | кадмий |
| ЗлСрПд 585-255-160 | 25,0-26,0 | Ост. | - | - | - | - |
| ЗлСрПдЦ 585-287-100 | 28,2-29,2 | 9,5-10,5 | - | - | 1,3-3,3 | - |
| ЗлСрПдКд 585-280-100 | 27,5-28,5 | 9,5-10,5 | - | - | - | Ост. |
| ЗлНЦМ 585-12,5-4 | - | - | 12,0-13,0 | Ост. | 3,6-4,4 | - |

Таблица 1.3 – Свойства сплавов белого золота [10]

| Марка | Расчетная плотность, г/см ³ | Температура плавления, °С | Твердость HV, кг/мм ² | |
|----------------------|--|---------------------------|----------------------------------|--------|
| | | | твердый | мягкий |
| ЗлСрПд 585-255-160 | 14,76 | 1175-1220 | 185 | 75 |
| ЗлСрПдЦ 585-287-100 | 14,31 | 1150-1180 | 160 | 70 |
| ЗлСрПдКд 585-280-100 | 14,60 | 1160-1190 | 140 | 110 |
| ЗлНЦМ 585-12,5- 4 | 12,85 | 870-950 | 300 | 170 |

Технические решения по имеющимся составам сплавов золота белого цвета 585 пробы по патентам РФ и других стран представлены в патентах [11 – 21] и сведены в таблицу 1.4.

В соответствии с патентом РФ №2115755 [11] заявлен сплав на основе золота ювелирного назначения, обладающий улучшенными литейными и технологическими свойствами, вязкостью и пластичностью при сохранении хороших коррозионных качеств и устойчивым белым цветом, однако имеющий высокую стоимость.

Введение в состав сплава [12] иридия позволяет добиться устойчивого белого цвета, достаточной пластичности и коррозионной стойкости, низкой температуры плавления.

Благодаря свойству палладия образовывать неокисляющуюся фазу с никелем, коррозионная стойкость сплава [13] достаточно велика, что предопределяет отсутствие потускнения изделий из него. Сплав обладает высокой износостойкостью, повышенной твердостью, в процессе нагрева под пайку и последующего охлаждения не наблюдается растрескивания изделий. Однако данный сплав также обладает высокой стоимостью из-за большого содержания дорогостоящего палладия.

Сплав [14] обладает приятным белым цветом, высокой пластичностью, имеет лучший блеск а присутствие индия снижает температуру плавления.

Сплав белого золота [15] содержит дополнительно литий до 0,03 масс.%, имеет приятный белый цвет, мелкозернистую структуру и низкую твердость в отожженном состоянии.

В соответствии с изобретением [16] сплав включает дополнительно 5,0-10,0 % марганца, что обеспечивает оптимальное соотношение необходимой обрабатываемости, высоких литейных свойств и белого цвета, а также сравнительно низкой стоимости сплава.

Сплав золота белого цвета [17] содержит дополнительно до 0,75% германия и обладает хорошей коррозионной стойкостью.

Наличие палладия в сплаве [18] придает ему схожий с платиной цвет и блеск.

Таблица 1.4 – Химический состав сплавов белого цвета на основе золота 585 пробы [11–21]

| Сплав | Массовая доля компонента, % | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|---------|---------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----|---------|
| | Au | Ag | Pd | Cu | Zn | In | Ru | Rh | Ni | Ir | Pt | Co | Sn |
| Патент РФ № 2115755 [11] | 58,0-59,0 | 16,5-28,5 | 2,0-6,0 | - | - | - | - | - | - | - | 10,0-22,0 | - | - |
| Патент РФ № 2151211 [12] | 58,0-59,0 | 8,0-9,0 | - | 22,4-23,4 | 1,2-1,8 | - | - | - | 8,0-9,0 | 0,04-0,15 | - | - | - |
| Патент РФ № 2156824 [13] | 58,0-59,0 | - | 15,0-20,0 | Ост. | 1,5-3,0 | - | - | - | 10,0-14,0 | - | - | - | - |
| Патент РФ № 2002644 [14] | 58,0-59,0 | 25,0-26,0 | 11,5-10,0 | - | 1,5-1,0 | 3,5-4,0 | - | - | - | - | - | - | - |
| Патент США № 5919320 [15] | 58,0-59,0 | 12,0-20,0 | 12,0-18,0 | 8,0-15,0 | до 1,0 | 0,1-1,0 | до 0,02 | - | - | до 0,02 | - | 0,5 | 0,1-1,0 |
| Патент Кореи № 20030033344 [16] | 58,0-59,0 | 15-10 | - | 15,0-10,0 | 1,0-6,0 | 2,0-6,0 | - | - | - | - | - | - | - |
| Патент США № 6951588 [17] | 58,0-59,0 | 35,0-40,0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 0,5-1,8 |
| Патент Кореи № 20090105731 [18] | 58,0-59,0 | 15,0-26,0 | 4,0-8,0 | 1,0-2,0 | 1,0-5,0 | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Патент РФ № 2439179 [19] | 58,0-59,0 | Ост. | 10,0-11,0 | 8,4-9,0 | 1,5-1,6 | - | 0,001-0,01 | - | - | - | - | - | - |
| Патент РФ № 2430982 [20] | 58,0-59,0 | Ост. | 7,0-9,0 | 5,0-6,0 | 1,4-1,6 | 0,4-0,6 | 0,01-0,10 | - | - | - | - | - | - |
| Патент РФ № 2586175 [21] | 58,0-59,0 | Ост. | 7,5-10,0 | 5,0-6,0 | 1,4-1,6 | 0,4-0,6 | - | 0,01-0,10 | - | - | - | - | - |

Таким образом, основными легирующими элементами, используемыми для получения сплавов белого цвета на основе золота, являются никель, палладий, серебро, медь, цинк и т.д. Для получения устойчивого белого цвета в состав заявляемых сплавов вводят палладий и платину, замещающие никель. Однако их применение связано с повышением стоимости сплава и рядом технологических проблем, обусловленных иным фазовым и структурным состоянием сплавов.

Учеными ИЦМиМ СФУ и сотрудниками ОАО «Красцветмет» были разработаны сплавы золота, модифицированные рутением [19 – 21] индием и иридием [22, 23], обладающие

повышенным уровнем механических и физико-механических свойств производимой из них проволоки ювелирного назначения. Однако найденные решения были получены для составов сплавов золота красного цвета. В 2008-2018 гг. были также предложены новые составы лигатур и безникелевые сплавы белого цвета, модифицированные рутением и родием. На эти сплавы получены патенты на изобретения №2430982 [24], №2439179 [25] и № 2586175 [26].

Можно отметить, что применение рутения и родия в качестве модификаторов эффективно, поскольку они образуют в расплаве большее количество центров кристаллизации, обеспечивают получение мелкозернистой структуры металла и, соответственно, приводят к повышению уровня механических свойств. Рутений ограниченно растворяется в золоте (рисунок 1.4, *а*). В условиях переохлаждения ниже температуры 1066 °С в изотермических условиях протекает перитектическая кристаллизация, результатом которой, при условии неоднородного химического состава жидкого раствора, становится большое число формирующихся зародышей кристаллизации и происходит образование мелкозернистой структуры слитка [27]. Родий также образует с золотом перитектическую систему (рисунок 1.4, *б*) [28]. Перитектическая точка в системе золото-родий отвечает содержанию родия 0,84 % мас. при температуре 1068 °С.

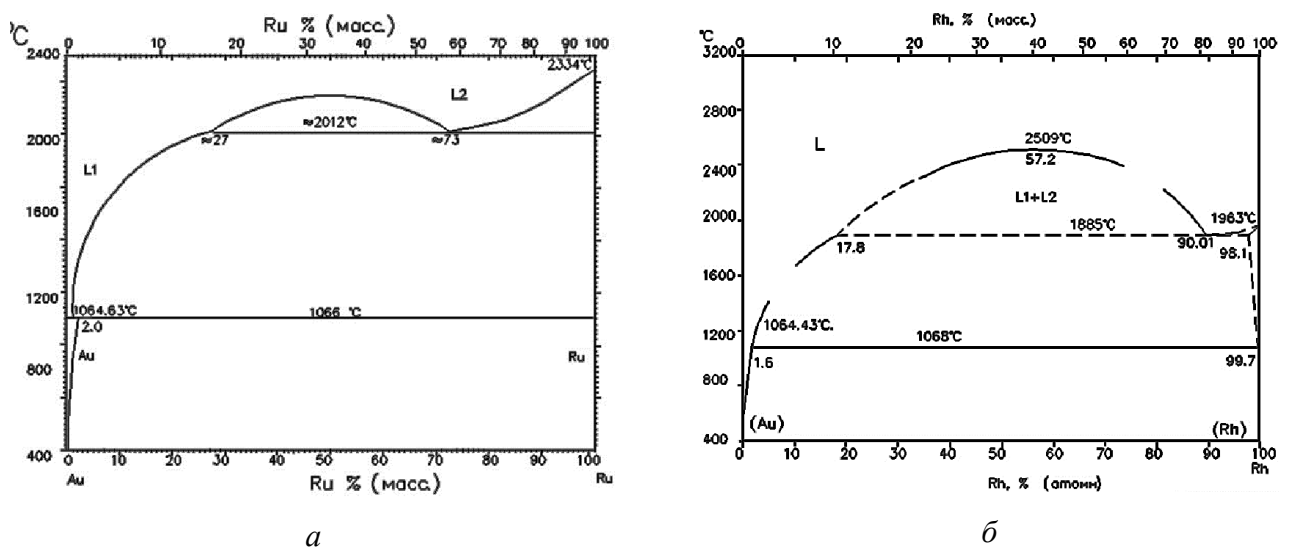


Рисунок 1.4 – Диаграммы состояния: *а* – Au-Ru, *б* – Au-Rh

Содержание палладия в заявленных пределах является оптимальным для замещения никеля, повышения коррозионной стойкости, обеспечения цветовой гаммы без охрупчивания, которое происходит при его содержании свыше 10 % (по массе) [29] (рисунок 1.5, *а*), однако приводит к повышению температуры плавления и расширению температурного интервала кристаллизации. В связи с этим вводятся такие легкоплавкие компоненты, как цинк и индий,

которые снижают температуру плавления, обеспечивают повышение механических свойств и отсутствие растрескивания при пайке.

Медь вводится для улучшения технологичности сплавов при литье (рисунок 1.5, б), обеспечивает понижение температуры плавления и необходимую пластичность [30]. Серебро в придает сплаву мягкость, ковкость и понижает температуру плавления.

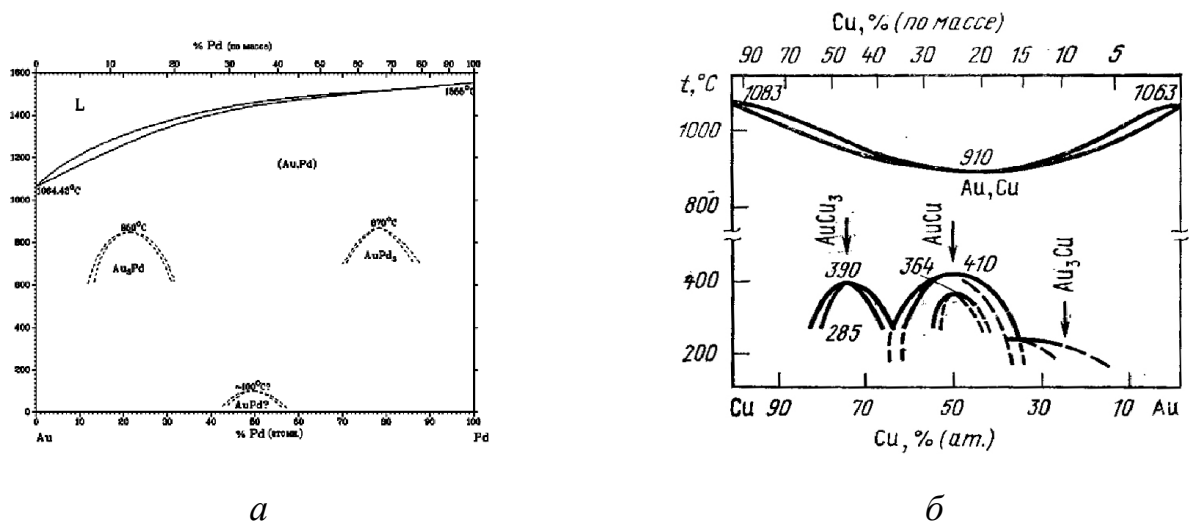


Рисунок 1.5 – Диаграммы состояния: а – Au-Pd; б – Au-Cu

Рутений и родий, поскольку обеспечивают получение мелкозернистой структуры, повышают пластичность и прочностные свойства металла, а также способствуют выравниванию свойств по длине литой заготовки. Однако родий имеет довольно высокую стоимость, в связи с чем был предложен сплав [31], легированный родием и рутением, что позволяет снизить содержание дорогостоящего модификатора при сохранении повышенного уровня прочностных и пластических свойств.

1.3 Сплавы на основе серебра 925 пробы

Основные марки сплавов на основе серебра также приведены в стандарте ГОСТ 30649-99 [10], который устанавливает химический состав и свойства сплава СрМ 925, получившего наибольшее распространение для изготовления ювелирных изделий, так называемого «стерлинго» или «стандартного» серебра.

Этот сплав пригоден для всех видов холодной обработки и литья, имеет белый цвет и высокие механические свойства. Однако отливки имеют крупнозернистую структуру. После пайки и отжига размер зерен не увеличивается, но происходит дополнительное окисление поверхностных зон отливок, что приводит к возникновению хрупкости.

Наиболее распространены сплавы серебра, содержащие наряду с основным металлом медь (рисунок 1.6). С повышением содержания меди до 28 % твердость и прочность сплавов повышается, а пластичность падает. Увеличение содержания меди приводит к появлению желтого оттенка.

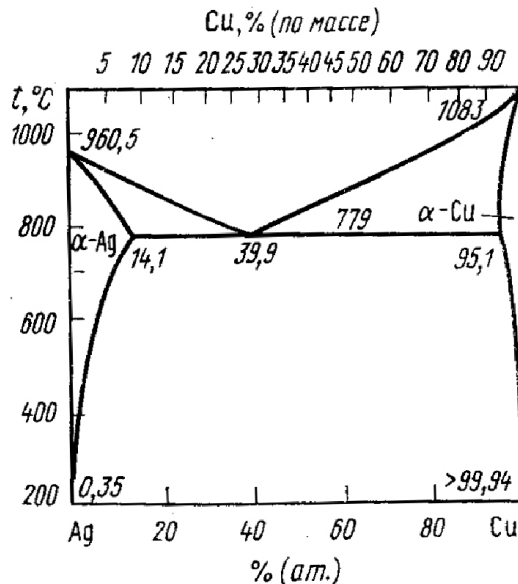


Рисунок 1.6 – Диаграмма состояния Ag-Cu

Поиск технических решений по составам сплавов серебра 925 пробы позволил выявить составы близких по свойствам и назначению сплавов, которые представлены в патентах [32 – 38] и сведены в таблицу 1.5.

Сплав [32] имеет недостаточно высокую коррозионную стойкость, малую отражательную способность и технологичность, кроме того, он содержит никель.

Сплав [33] дополнительно содержит марганец 0,5-1,0 масс. % и обладает повышенными прочностными характеристиками (временное сопротивление разрыву составляет 450-470 МПа).

Повышенное содержание бора в сплаве [34] отрицательно влияет на его структуру, делая сплав хрупким. Высокое содержание никеля вследствие плохой растворимости в серебре значительно повышает температуру плавки и заливки, ухудшает обрабатываемость резанием. Индий и германий делают сплав более пластичным, но и более мягким. В связи с этими недостатками сплав не пригоден для изготовления ювелирных изделий, и может применяться только в качестве припоя.

Таблица 1.5 – Химический состав сплавов на основе серебра 925 пробы [10, 32 – 37]

| Сплав | Массовая доля компонента, % | | | | | | | | | | |
|------------------------------|-----------------------------|---------|-----------|---------|-----------|-------------|-----------|-------------|----------|-----------|-------------|
| | Ag | Cu | Ni | Zn | Ge | B | Sn | Ti | Al | In | Si |
| СрМ 925 (ГОСТ 30649-99) [10] | 92,5-93,0 | Ост. | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Патент РФ № 2207394 [32] | 92,5-93,0 | 5,8-6,8 | 0,3-0,5 | - | - | 0,025-0,035 | 0,5-0,9 | 0,015-0,025 | - | - | - |
| Патент РФ № 2328541 [33] | 87,5-92,5 | Ост. | - | - | 0,3-0,7 | - | - | - | 0,5-1,0 | - | - |
| Патент РФ № 2332477 [34] | 87,5-92,5 | 3,4-7,4 | 2,5-3,5 | - | 0,5-1,0 | 0,05-0,1 | - | - | - | 0,5-1,0 | - |
| Патент РФ № 2405052 [35] | 92,0-93,0 | Ост. | 3,0-3,6 | - | 0,35-0,45 | - | - | - | - | - | - |
| Патент РФ № 2442836 [36] | 92,0-93,0 | Ост. | 0,14-0,19 | - | - | 0,02-0,04 | 0,2-0,4 | 0,015-0,025 | 0,06-0,1 | - | 0,012-0,017 |
| Патент РФ № 2513502 [37] | 92,5-93,0 | Ост. | - | 2,3-2,5 | - | - | 0,07-0,09 | - | - | 0,05-0,07 | 0,05-0,07 |

Сплав [35] характеризуется повышенной прочностью и применяется для изготовления деталей приборов, корпусов часов. Сплав [36] дополнительно содержит фосфор (0,01 – 0,02 масс. %) в качестве сильного раскислителя, препятствующего окислительной реакции меди. Он имеет повышенную коррозионную стойкость. Изделия, изготовленные из заявленного сплава, имеют блестящую поверхность и не темнеют со временем. Однако эти сплавы также содержат никель.

Основу всех рассмотренных сплавов составляют серебро и медь, а легирующими элементами, используемыми для получения сплавов белого цвета на основе серебра, являются никель, германий, бор, олово и т.д. При этом четыре из шести сплавов имеют в своем составе никель, при содержании которого до 1 % замедляется рост зерна, и улучшаются механические свойства, однако с его увеличением до 2,5 % снижается обрабатываемость сплава. Кроме того, содержание никеля в таких сплавах нежелательно, так как неблагоприятно сказывается на здоровье человека [3].

Поэтому одной из задач настоящих исследований являлось создание новых сплавов белого цвета на основе серебра 925 пробы, не содержащих никель, обладающих высокой коррозионной стойкостью и повышенным уровнем потребительских и механических свойств. Для ее решения учеными кафедры ОМД ИЦМиМ СФУ в 2014 г. был разработан и запатентован новый безникелевый сплав белого цвета на основе серебра [37], модифицированный кремнием.

Содержание легирующих компонентов в заявленных пределах (табл. 1.6) дает возможность снизить температуру плавления сплава и получать полуфабрикаты из него с высоким уровнем механических свойств, а применения кремния в качестве модификатора уменьшить величину зерна при литье.

Таблица 1.6 – Химический состав новых сплавов на основе золота белого цвета 585 пробы и серебра 925 пробы

| Маркировка сплава | Сплав | Химический состав сплава, массовая доля компонента, % | | | | | | | | | | |
|-------------------|--------------------------|---|------|------|------|-----|----|------|------|------|------|------|
| | | Au | Ag | Pd | Cu | Zn | Ni | In | Ru | Rh | Sn | Si |
| Сплав №1 | Патент РФ № 2439179 [24] | 58,5 | 21,6 | 10,0 | 8,4 | 1,5 | - | - | 0,01 | - | - | - |
| Сплав №2 | Патент РФ № 2430982 [25] | 58,5 | 26,0 | 8,0 | 5,5 | 1,5 | - | 0,5 | 0,01 | - | - | - |
| Сплав №3 | Патент РФ № 2586175 [26] | 58,5 | 26,0 | 8,0 | 5,5 | 1,5 | - | 0,5 | - | 0,1 | - | - |
| Сплав №4 | Патент РФ № 2697142 [31] | 58,5 | 26,0 | 8,0 | 5,5 | 1,5 | - | 0,5 | 0,05 | 0,05 | - | - |
| Сплав №5 | Патент РФ № 2513502 [37] | - | 93,0 | - | Ост. | 2,3 | - | 0,07 | - | - | 0,09 | 0,07 |

Таким образом, анализ имеющихся технических решений по химическим составам сплавов золота и серебра, позволил предложить и запатентовать новые безникелевые сплавы на основе этих металлов (см. табл. 1.6), для которых проводились настоящие исследования.

1.4 Анализ промышленной технологии производства ювелирных цепей из сплавов драгоценных металлов

Присутствие любых легирующих компонентов сказывается на параметрах процесса обработки сплава и особенностях производства полуфабрикатов из него. Поэтому переход на новые сплавы драгоценных металлов вызывает необходимость решения ряда технологических проблем из-за иного, по сравнению с применяемыми, фазового и структурного состояния сплавов (повышение температуры плавления, расширение интервала кристаллизации и т.д.). Поиск новых сплавов драгоценных металлов и развитие производственных технологий – это взаимосвязанные процессы, начинающиеся с древности от возникновения ювелирного дела до современного развития ювелирной промышленности [2, 38 – 41].

При изготовлении ювелирных цепей одним из основных этапов является получение деформируемых полуфабрикатов – прутков и проволоки. Ключевые операции для их производства – это литье, обработка давлением и термообработка, которые характеризуются рядом особенностей при реализации технологического процесса их изготовления.

Технологическая схема, используемая при промышленном изготовлении деформированных полуфабрикатов, приведена на рисунке 1.7 [42].

Литой пруток диаметром 8 – 10 мм подвергается холодной сортовой прокатке на станах Famog TL 12T и станах типа BILER марки INVIMEC [42, 43]. Она ведется в три этапа (всего 28

проходов) с промежуточными отжигами. Далее заготовка подвергается волочению до получения проволоки диаметром 0,25 – 0,35 мм.

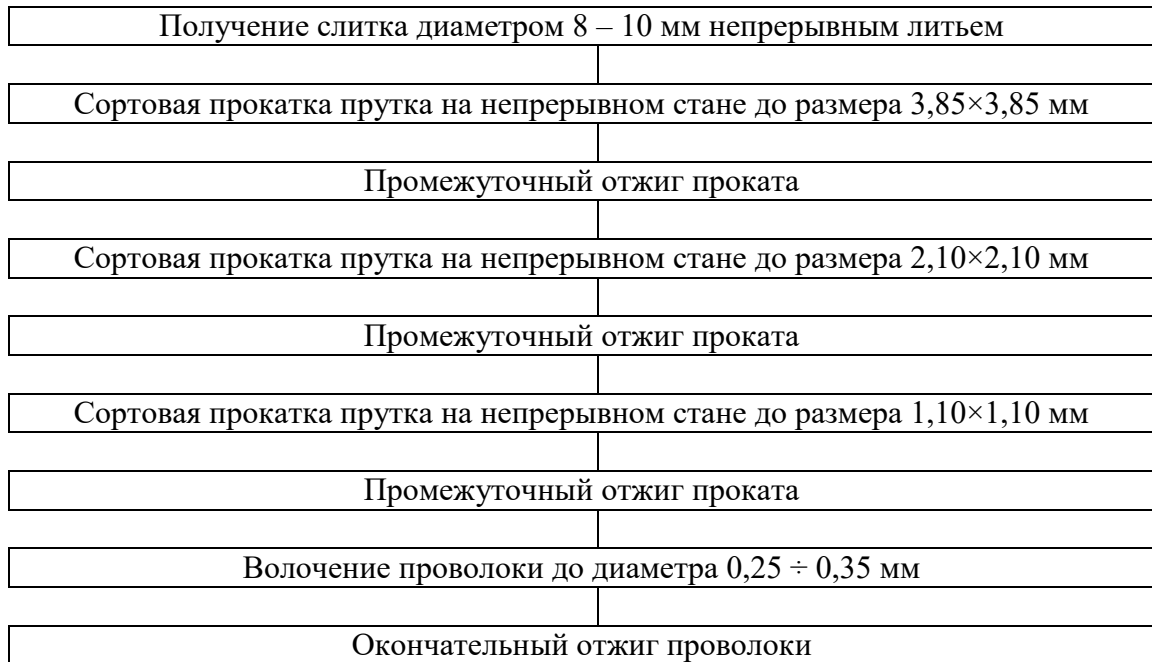


Рисунок 1.7 – Технологическая схема промышленного производства проволоки для изготовления ювелирных цепей

Особо следует отметить калибровку прокатных валков, применяемую в заводских условиях при сортовой прокатке полуфабрикатов для изготовления ювелирных цепей из сплавов драгоценных металлов.

Выбор системы калибров [44] позволяет решить ряд задач, среди которых:

- определение рациональной формы раската в каждом сечении, достижение точности размеров и формы, чистоты поверхности, структуры и механических свойств полуфабрикатов;
- обеспечение высокой производительности стана за счет минимального числа проходов для получения профиля с наименьшим циклом прокатки;
- рациональное использование бочки валков и расположение на ней калибров с учетом их назначения.

Вытяжные системы с чередующимися калибрами широко используются в практике прокатного производства, поскольку позволяют получать профиль из любого промежуточного сечения калибра, сокращая количество проходов. Выбор системы калибров зависит от сортамента получаемых профилей, их размеров, свойств обрабатываемых материалов, конструктивных особенностей оборудования и анализа ее достоинств и недостатков.

В настоящее время для получения сортового проката применяют систему калибров «ромб–квадрат» [44], состоящую из очередности ромбических и квадратных калибров, врезанных в валки по диагонали (рисунок 1.8). Необходимость кантовки раската устраняется использованием непрерывных прокатных станов с чередующимися вертикальными и горизонтальными клетями. Основные преимущества этой системы – возможность получения геометрической точности сечения и одинаковое обжатие по ширине, несмотря на неравномерное протекание процесса деформации заготовки в калибре. Однако существенная глубина вреза ручьев в валки и разница по ширине их рабочих диаметров уменьшает прочность инструмента и вызывает повышенный износ калибров.

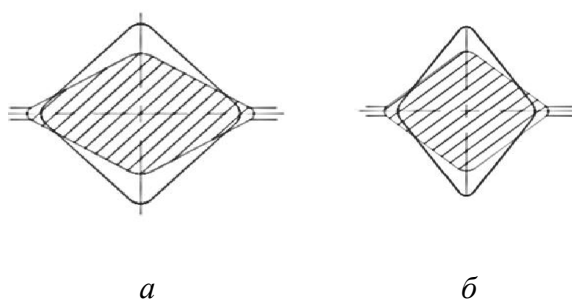


Рисунок 1.8 – Схема прокатки для системы чередующихся калибров «ромб–квадрат»:

a – ромбический калибр, *б* – квадратный калибр

Особенность калибровки, применяемой при сортовой прокатке сплавов драгоценных металлов, близкой к системе «ромб-квадрат», заключается в геометрии калибров: поперечное сечение представляет собой ромб и квадрат со срезанными вершинами (восьмигранник). Подобная система калибров нашла широкое применение в производстве деформированных полуфабрикатов ювелирного назначения. Схема восьмигранных калибров с обозначением геометрических параметров, характеризующих их, представлена на рисунке 1.9. Она характеризуется рядом параметров:

- высота калибра, h_i ;
- ширина калибра, b_i ;
- геометрическая высота калибра, H_i ;
- геометрическая ширина калибра, B_i ;
- величина разъема калибра по высоте, h'_i ;
- ширина дна ручья по калибру, b'_i .

Геометрические размеры применяемой системы восьмигранных калибров представлены в таблице 1.7 [43]

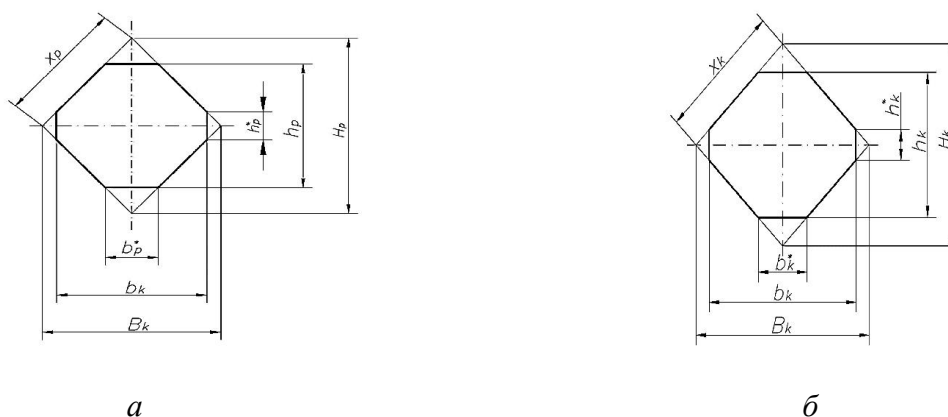


Рисунок 1.9 – Схема восьмигранных калибров: *a* – ромбический; *б* – квадратный

Таблица 1.7 – Размеры калибров, применяемых для сортовой прокатки прутков из сплавов драгоценных металлов

| Номер калибра, i | Размер калибра x_i , мм | Форма калибра |
|--------------------|---------------------------|---------------|
| 1 | 7,9 | квадрат |
| 2 | 7,7 | ромб |
| 3 | 7,4 | квадрат |
| 4 | 6,8 | ромб |
| 5 | 6,3 | квадрат |
| 6 | 5,7 | ромб |
| 7 | 5,3 | квадрат |
| 8 | 5,0 | ромб |
| 9 | 4,6 | квадрат |
| 10 | 4,2 | ромб |
| 11 | 4,0 | квадрат |
| 12 | 3,6 | ромб |
| 13 | 3,4 | квадрат |
| 14 | 3,2 | ромб |
| 15 | 3,0 | квадрат |
| 16 | 2,7 | ромб |
| 17 | 2,5 | квадрат |
| 18 | 2,3 | ромб |
| 19 | 2,2 | квадрат |
| 20 | 2,0 | ромб |
| 21 | 1,8 | квадрат |
| 22 | 1,6 | ромб |
| 23 | 1,5 | квадрат |
| 24 | 1,4 | ромб |
| 25 | 1,3 | квадрат |
| 26 | 1,2 | ромб |
| 27 | 1,1 | квадрат |
| 28 | 1,0 | ромб |

Данная схема калибров позволяет добиться большей точности геометрии и размеров получаемого прутка. Такая форма калибров обеспечивает равномерность деформации в процессе сортовой прокатки по проходам, является более близкой к кругу – поперечному сечению получаемой волочением проволоки. Применение данной системы калибров увеличивает прочность и стойкость инструмента, поскольку уменьшается разница между рабочими диаметрами валков.

Существует ряд путей повышения технико-экономических показателей технологии производства деформированных полуфабрикатов для изготовления ювелирных изделий: замена оборудования на более производительное и снижение энерго- и трудозатрат, процента брака и безвозвратных потерь. Однако замена оборудования влечет за собой большие затраты, повышает стоимость конечной продукции и как единичная мера не обеспечивает однозначного повышения эффективности технологии, если и новое оборудование используется нерационально. Тем более, если речь идет о современном оборудовании, обеспечивающем высокие уровень производительности и степень автоматизации.

В связи с этим целесообразно совершенствование существующих и разработка новых маршрутов обработки полуфабрикатов из сплавов драгоценных металлов, учитывающих особенности поведения таких материалов. Также имеет широкое распространение практика, когда разработанные технологии применяются без учета пластических и прочностных свойств обрабатываемых материалов и, особенно, упрочнения в процессе холодной деформации, характерного для сплавов драгоценных металлов. Это приводит к применению нерациональных маршрутов деформации металла и режимов термической обработки, что, в свою очередь, влечет повышение процента брака и снижение качества продукции.

1.5 Анализ существующих методик для определения формоизменения и энергосиловых параметров сортовой прокатки

Одним из ключевых этапов любой методики расчета формоизменения металла в процессе сортовой прокатки является вычисление величины уширения – условие точности расчета калибровки. Формулы для определения этого параметра можно классифицировать на эмпирические, полуэмпирические и формулы, полученные с использованием вариационных принципов механики сплошных сред [45].

Эмпирические методы применялись преимущественно в начальные периоды исследования систем калибров и основывались на практическом опыте создания калибровок валков [46 – 48]. Полуэмпирические – имеют уточняющие эмпирические коэффициенты [49 –

52]. Однако наиболее точно решать задачи по определению параметров при прокатке в калибрах позволяют вариационные методы теории пластичности [45, 53].

В настоящее время для расчета формоизменения металла при сортовой прокатке и построения калибровок валков используется методика, основанная на применении вариационного принципа минимума полной мощности, разработанная В.К. Смирновым, В.А. Шиловым, Ю.В. Инатовичем [54]. Применение этой методики позволяет определить интегральные характеристики формоизменения и энергосиловых параметров для прокатки в калибрах простой формы. Однако данная методика, например, для системы калибров «ромб – квадрат», как и многие другие, предназначена для горячей прокатки сталей.

В соответствии с этой методикой форму и размеры очага деформации характеризуют следующие независимые параметры:

- приведенный диаметр валков $A = \frac{D^*}{H_1} = \frac{D_0 - H_1}{H_1}$;
- отношение сторон калибра $a_k = \frac{B_k}{H_1}$;
- отношение сторон раската до прохода (отношение отрезков вертикальной и горизонтальной осей поперечного сечения раската) $a_0 = \frac{H_0}{B_0}$;
- коэффициент обжатия $\frac{1}{\eta} = \frac{H_0}{H_1}$.

Условия трения на контактной поверхности учитывают с помощью показателя трения по Зибелю ψ .

Уширение металла при горячей прокатке описывают зависимостью:

$$\beta = 1 + C_0 \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right)^{C_1} A^{C_2} a_0^{C_3} a_k^{C_4} \delta_0^{C_5} \psi^{C_6} \operatorname{tg} \psi^{C_7}, \quad (1.1)$$

где C_0, \dots, C_7 – постоянные коэффициенты, принимающие численные значения в зависимости от схемы прокатки.

В соответствии с методикой [54] при найденных в результате численного решения границах очага деформации силу прокатки P определяют по выражению:

$$P = 2 \int_0^{l_{mk}} \int_0^{b_{kx}} (p_{nz} + \tau_{tpz}) K dx dy, \quad (1.2)$$

где p_{nz} и τ_{tpz} – соответственно вертикальные проекции нормального к поверхности контакта напряжения \bar{p}_n и напряжения трения $\bar{\tau}_{tp}$ в произвольной точке контактной поверхности.

С другой стороны, сила прокатки:

$$P = pF_r, \quad (1.3)$$

где p – давление; $F_r = 2 \int_0^{l_{mk}} \int_0^{b'_{kx}} dx dy$ – площадь горизонтальной проекции контактной поверхности.

Приравнивая (1.2) и (1.3), получили:

$$p = \frac{2 \int_0^{l_{mk}} \int_0^{b'_{kx}} (p_{нз} + \tau_{тпз}) K dx dy}{2 \int_0^{l_{mk}} \int_0^{b'_{kx}} dx dy}. \quad (1.4)$$

Тогда среднее по контактной поверхности давление определяют по формуле:

$$p = \frac{\int_0^{l_{mk}} \int_0^{b'_{kx}} \frac{\tau_{тп}}{U_{скx}} \left(U_{скx} + U_{скz} \frac{dh^A}{dx} \right) K dx dy}{\int_0^{l_{mk}} \int_0^{b'_{kx}} \frac{dh^A}{dx} dx dy}. \quad (1.5)$$

Так как напряжения трения в зонах отставания и опережения не равны, то интеграл в числителе последней формулы берется отдельно по зонам отставания и опережения.

Задачи формоизменения и определения энергосиловых параметров с применением вариационного принципа минимума полной мощности решались Д.Л. Шварцем [54 – 58] для прокатки прямоугольной полосы на гладкой бочке валков и рельсового профиля в универсальных калибрах. Математические и компьютерные модели, разработанные автором, позволяют рассчитать рациональный скоростной режим процесса, моделировать температурное и напряженное состояние прокатываемого металла для горячей прокатки сталей.

В 1980-х годах С.А. Тулуповым, Г.С. Гуном, В.А. Курдюмовой и др. было предложено матричное описание контура калибра простой формы [59, 60]. Данный метод формоизменения металла в калибрах хорошо коррелирует с решениями, полученными полуаналитическим методом конечных элементов. В соответствии с ним моделируемый очаг деформации при прокатке в вытяжных калибрах разделен на пять зон по длине и учитывается вытяжная способность калибра, исходя из соотношения обжимаемых и необжимаемых участков полосы по длине калибра. Дальнейшее развитие данная методика получила под руководством О.Н. Тулупова [61 – 65]. Ее применение позволяет установить влияние факторов (технологические параметры, поперечное сечение заготовки, вытяжка и др.) на формоизменение металла в вытяжных калибрах на основании решения матрицы, все компоненты которой связаны через характеристическое уравнение с инвариантом матрицы, и получить статистическую модель формоизменения с учетом коэффициента поперечной деформации, на основании которой решаются задачи по построению и совершенствованию контуров калибров. Однако данная методика также применялась для решения задач сортовой прокатки стальных профилей.

Исследование процессов обработки сплавов драгоценных металлов проводились Ю.Н. Логиновым с соавторами [66 – 69], в том числе, с применением метода конечных элементов.

Анализ формоизменения, напряженно-деформированного состояния металла, особенностей реологии и условий трения при обработке металлов давлением выполнялся для сплавов платины при производстве технических изделий, а установленные и обоснованные особенности уширения металла и уравнение регрессии для расчета его коэффициента [69] были получены для сплава меди.

Исследованиям сплавов ювелирного назначения на основе золота [22, 23] и платины и палладия [70, 71] посвящены работы В.Ю. Гурской с соавторами. В качестве модифицирующей добавки в сплаве красного цвета на основе золота применялся иридий, при этом исследовали способ его введения и оптимальное количество в сплаве.

В работах [19, 72] О.С. Лебедевой была предложена методика для определения технологических и энергосиловых параметров холодной прокатки сплавов драгоценных металлов в квадратных и ромбических калибрах, основанная на применении эмпирических формул для расчета уширения, полученных в результате обработки данных экспериментальных исследований. Для расчета энергосиловых параметров прокатки получена эмпирическая зависимость для расчета площади контакта металла заготовки с валками. Методика позволяет учесть особенности сортовой прокатки в восьмигранных калибрах, однако ее применение ограничено диапазоном параметров, при которых проводились экспериментальные исследования.

1.6 Обзор программного обеспечения для моделирования и проектирования технологических процессов обработки металлов давлением

Существует множество факторов, которые необходимо учитывать при проектировании технологических процессов – свойства материала, система калибров при прокатке, условия трения и т.д. Такие расчеты трудоемки и затратны по времени, а от точности их результата зависит рациональность выбранного маршрута обработки. Кроме того, физическое моделирование и отладка технологии на сплавах драгоценных металлов требуют значительных затрат. Поэтому для оптимизации подобных расчетов все чаще используются методы компьютерного моделирования с применением специализированного программного обеспечения.

В области обработки металлов давлением традиционно используются методы математического и физического моделирования, пакеты прикладных программ и статистическая обработка экспериментальных данных. Со временем все большие требования предъявляются к проектированию технологических процессов с помощью ЭВМ [73].

Особенностью анализа многих операций обработки металлов давлением является необходимость многовариантных расчетов параметров процесса. Поэтому здесь широко применяются системы автоматизированного проектирования (САПР), эффективность применения которых значительно повышается при адаптации их к технологическим процессам и базировании программ на алгоритмах и методиках, разработанных с учетом специфических особенностей процесса.

На кафедре обработки металлов давлением Красноярского института цветных металлов (ныне ИЦМиМ СФУ) созданы методические основы, математические модели и авторские методики расчетов процессов обработки металла давлением, которые представлены в виде алгоритмов расчета и легли в основу программных средств и САПР [73].

Программа “ROLLING” позволяет быстро и эффективно рассчитать оптимальный режим обжатий при горячей прокатке заготовок из алюминиевых, медных и никелевых сплавов на реверсивных и непрерывных станах. В ее основу легла математическая модель расчета формоизменения при горячей прокатке цветных сплавов, полученная в результате теоретических и экспериментальных исследований этого процесса. Предусмотрено два алгоритма расчета режимов обжатий – для каждого типа оборудования.

Однако программа работает с ограниченным набором сплавов и оборудования, поэтому необходимо расширение базы данных.

САПР «BALKA» позволяет проводить анализ формоизменения металла и энергосиловых параметров при горячей сортовой прокатке стальных балок различных номеров на последовательных и непрерывных прокатных станах. Использование этой программы требует ввода большого количества данных по характеристикам оборудования и ее применение возможно только для сталей [73, 74].

Алгоритм расчета САПР «Сортовая прокатка», предназначенной для проектирования прокатки простых сортовых и фасонных профилей общего назначения на заготовочных, сортовых и проволочных станах непрерывного, последовательного и линейного типа, основан на методике, приведенной в работе [44]. Система позволяет проводить анализ и моделирование технологических режимов процесса, проектировать калибровки валков, рассчитывать оптимальные производственные программы. В ее основу легли математические модели скоростного и температурного режима, формоизменения металла и энергосиловых параметров.

Созданию САПР на базе модели сопротивления горячей деформации для ряда сталей, которая может быть использована при конечно-элементном моделировании, посвящена работа С.А. Аксенова [75]. Были разработаны и реализованы алгоритмы расчета параметров формоизменения и развития микроструктуры материала в процессе прокатки в калибрах на основе гипотез и теоретических положений методики «2.5D». Программа позволяет

автоматически определять начальную скорость полосы и нейтральное сечение, рассчитывать температуру и микроструктурные параметры металла в процессе осуществления переходов и в паузах между ними, рассчитывать форму контактной поверхности вала.

Подобные разработки существуют и для проектирования волочения проволоки. Например, программное обеспечение для автоматизированного расчета маршрутов волочения высокоуглеродистой проволоки (свидетельство о регистрации № 2004610746) [76]. Расчет ведется в соответствии с выбором пользователя по кратности волочильного стана (волочение без увеличения или уменьшения запаса проволоки на барабане), с выбором единичной степени деформации (коэффициента вытяжки) или с учетом угла волок (когда целью является равномерность деформации по сечению проволоки).

Таким образом, имеющиеся программные продукты предназначены в основном для проектирования процессов горячей сортовой прокатки сталей, а также сплавов на основе алюминия и меди. Их использование для расчетов процесса холодной сортовой прокатки и волочения сплавов драгоценных металлов требует значительной доработки, создания новых алгоритмов и баз данных по реологическим свойствам сплавов и оборудованию.

Для моделирования процессов обработки металлов давлением используются системы инженерного анализа, позволяющие не только выполнить численные расчеты методами математического анализа, но и визуализировать представленные решения.

К специализированным инженерным системам относят программный комплекс QForm, разрабатываемый фирмой «КванторФорм» (Россия), предназначенный для моделирования и оптимизации процессов обработки металлов давлением [77]. Программа основана на методе конечных элементов. Интеграция двумерного и трехмерного моделирования в одной системе дает возможность эффективно моделировать технологические цепочки.

Моделирование процессов обработки металлов давлением также возможно в получившем большую известность многоцелевом конечно-элементном пакете ANSYS (ANSYS, Inc. США), предназначенном для проведения анализа в широкой области инженерных дисциплин [78]. Интегрированная в среду ANSYS программа LS-DYNA (разработка LSTC) позволяет численно моделировать процессы формования материалов, в том числе, в несколько переходов, учитывая анизотропию свойств материала.

Специализированный программный комплекс DEFORM, разработанный американской компанией Scientific Forming Technologies Corporation (SFTC, США) для моделирования процессов обработки металлов давлением, также основан на методе конечных элементов [79]. К преимуществам программы относят универсальность, совместимость с большинством программных пакетов для создания геометрических моделей и генерации конечно-элементной сетки, возможность использования различных моделей пластичности материала. Кроме того,

комплекс обладает большой базой данных по характеристикам материалов и оборудования с возможностью ее редактирования и расширения; позволяет моделировать различные условия трения и виды движения инструмента. Данный программный пакет имеет широкую практику применения для моделирования различных процессов обработки металлов давлением в большом ряду исследований.

Данные программные комплексы позволяют проверить, отработать и оптимизировать технологические процессы непосредственно за компьютером, а не в ходе дорогостоящих и трудно организуемых экспериментов на производстве или в лабораторных условиях. Благодаря этому существенно сокращаются сроки выпуска продукции, повышается ее качество и снижается себестоимость. Вместе с тем расширяются возможности исследования технологических процессов. Таким образом, обозначенные программные продукты, как и описанные выше расчетные программы, работают с ограниченным рядом материалов и оборудования, поэтому для моделирования обработки сплавов драгоценных металлов требуется создание компьютерных моделей.

Кроме того, для моделирования какого-либо технологического процесса необходим комплекс систематизированных экспериментальных данных, полученных в ходе исследований, или массив данных, сформированный на этапе проектирования при разработке новой технологии. Также необходимо создание геометрических моделей рабочего инструмента в специализированных программных пакетах и генерация конечно-элементной сетки.

Анализ существующих на сегодняшний день программ для проектирования и моделирования процессов обработки металлов давлением показал, что они не предназначены для проектирования процессов производства ювелирных изделий. Поэтому целесообразно создание комплексного программного обеспечения, позволяющего работать с цветными, в том числе драгоценными, металлами и сплавами при расчете параметров волочения, холодной листовой и сортовой прокатки – процессов, являющихся основными при производстве длинномерных деформированных полуфабрикатов ювелирного назначения.

Создание систем автоматизированного проектирования ведется в среде программирования, выбор которой определяется назначением разрабатываемой программы. Система объектно-ориентированного проектирования Delphi (продукт компании Borland и на данный момент принадлежащий и разрабатываемый Embarcadero Technologies) – императивный, структурированный, объектно-ориентированный язык программирования, обладает широкой функциональностью и рядом преимуществ по сравнению с аналогами [80]. Она обеспечивает высокую производительность и низкие требования разработанного приложения к ресурсам ЭВМ, позволяет оперировать обширной объектной библиотекой. Таким

образом, система Delphi является оптимальной средой программирования для создания САПР технологических процессов.

Особую роль при разработке программного обеспечения для автоматизации проектирования играет структурирование, хранение и извлечение данных. В связи с этим актуально создание баз данных, интегрированных в САПР. Оптимальным программным продуктом для этого является Microsoft Office Access – реляционная СУБД корпорации Microsoft [81]. Он имеет широкий спектр функций, включая связанные запросы, связь с внешними таблицами и базами данных. Система поддерживает первичные и внешние ключи и обеспечивает целостность данных. Кроме того, таблицы в Access снабжены средствами проверки допустимости данных, предотвращающими некорректный ввод, а каждое поле таблицы имеет свой формат и стандартные описания, что существенно облегчает ввод данных.

На этапе проектирования сортовой прокатки формируется комплекс данных для последующего моделирования процесса. Необходима автоматизация создания модели валкового инструмента, а также моделирования его изготовления. Подобным функционалом обладает целый ряд систем: PowerMill [82], MasterCam [83], SprutCAM [84] и др. Среди программных продуктов для проектирования и моделирования токарно-фрезерной обработки следует выделить среду FeatureCAM (разработка компании Delcam, приобретенная и разрабатываемая корпорацией Autodesk). Она позволяет с высокой степенью автоматизации за счет широких возможностей программного интерфейса приложения (API) моделировать производство детали, включая все этапы – от построения двухмерной модели до получения кода управляющей программы для токарно-фрезерного оборудования с ЧПУ [85].

Таким образом, целесообразно создание комплексного программного обеспечения, объединяющего возможности ряда программ. Разрабатываемая программа должна позволять проектировать процесс сортовой прокатки в соответствии со спецификой технологии, применяемой на производстве, учитывая особенности калибровки прокатных валков, а также обеспечивать возможность построения модели валкового инструмента с подготовкой информации для его изготовления на станках с ЧПУ.

В настоящее время с развитием прикладной математики и специализированных программных пакетов широкое распространение получили пакеты математических вычислений, среди которых MATHCAD [86], MATLAB [87], MATHEMATICA [88], Maxima [87] и др. Благодаря дружественному пользовательскому интерфейсу, возможности выполнения численных и символьных вычислений и широкому набору методов решений наибольшее распространение получила программа MATHCAD [73, 90–92]. Она нашла широкое применение при решении инженерных задач, в том числе, по определению формоизменения и

энергосиловых параметров процессов обработки металлов давлением с применением вариационного принципа минимума полной мощности.

1.7 Выводы по главе

Проведенный анализ научно-технической литературы позволил сделать следующие выводы:

1. Одной из важных тенденций производства длинномерных деформированных полуфабрикатов для изготовления ювелирных цепей является создание новых безникелевых сплавов золота и серебра и технологий их деформационной обработки для повышения механических, технологических и эксплуатационных свойств получаемых изделий, снижения их стоимости 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, представленные во введении.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ ПРУТКОВ ИЗ СПЛАВОВ ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ

При проектировании новых и анализе существующих технологий производства полуфабрикатов методами обработки металлов давлением большое внимание уделяется математическому моделированию технологических процессов. Это обусловлено возможностью аналитически оценить целесообразность предложенных маршрутов обработки, спроектировать инструмент и рассчитать параметры процесса, обеспечить его экономическую эффективность и повысить качество готовой продукции. В данном разделе приведена постановка и решение вариационной задачи по определению формоизменения металла при холодной сортовой прокатке в восьмигранных калибрах [93, 94].

Для расчета геометрических и энергосиловых параметров сортовой прокатки была разработана подсистема САПР «PROVOL» и база данных по реологическим свойствам сплавов цветных металлов и оборудования [95 – 96]. С их использованием были спроектированы рациональные маршруты и калибровка валков для холодной сортовой прокатки прутков из новых безникелевых сплавов драгоценных металлов [97 – 102].

Для анализа формоизменения и напряженно-деформированного состояния металла были созданы компьютерные модели процесса и инструмента в программных комплексах на базе метода конечных элементов. Моделирование холодной сортовой прокатки деформированных полуфабрикатов по спроектированным маршрутам было выполнено в пакете DEFORM-3D [94, 103].

2.1 Постановка и решение вариационной задачи по определению формоизменения металла при сортовой прокатке в восьмигранных калибрах

Поставленная задача решалась с применением баланса мощностей и принципа минимума полной мощности [44] и включала построение геометрической модели очага деформации с точностью до неизвестных параметров, поля скоростей течения металла, запись составляющих мощности и численное решение системы уравнений.

При постановке вариационной задачи рассматривали процесс холодной сортовой прокатки заготовки цилиндрической формы с кантовкой после каждого прохода в системе восьмигранных калибров.

Для решения задачи была принята геометрическая модель процесса прокатки, приведенная на рисунке 2.1. Заготовка восьмигранной формы поперечного сечения, близкой к

квадрату, прокатывается в ромбическом восьмигранном калибре. Принято, что диаметры верхнего и нижнего валков равны. Скорости вращения обоих валков также приняты равными.

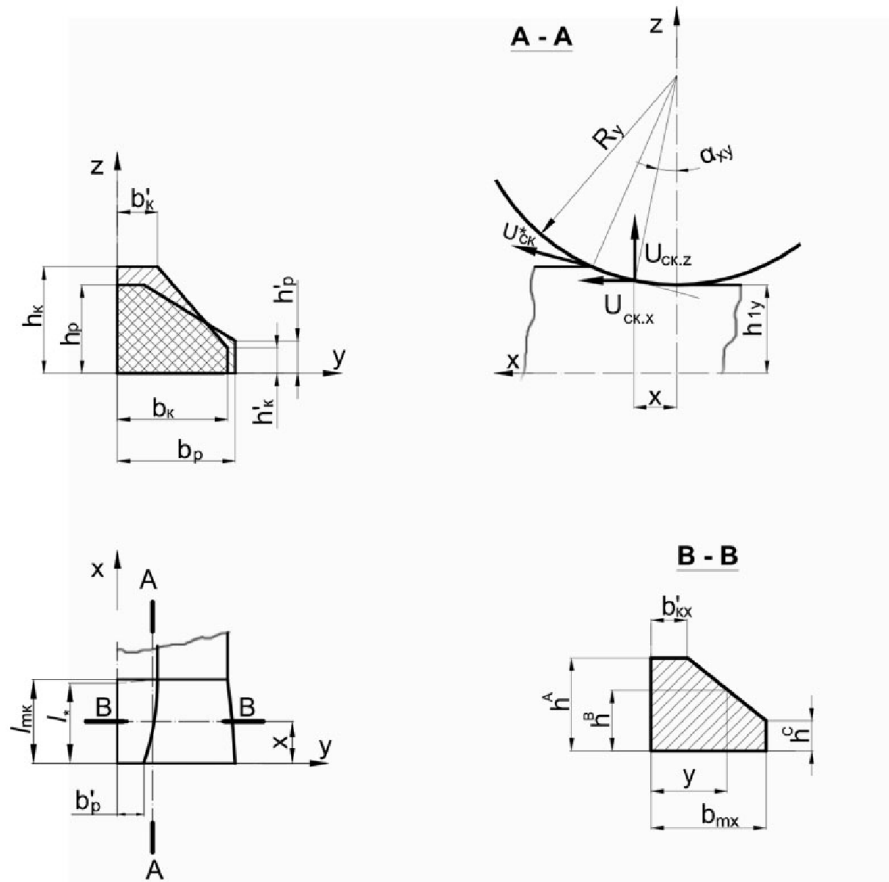


Рисунок 2.1 – Схема прокатки в восьмигранном калибре

Симметрия очага деформации позволяет рассматривать четвертую его часть. Геометрический очаг деформации состоит из контактных зон А и В, боковой внеконтактной зоны С и вертикальных зон в плоскостях входа и выхода металла из валков при $x = 0$ и $x = l_{mk}$. Для упрощения решения задачи принято, что промежуточная зона при $l^* < x < l_{mk}$ и $0 < y < b'_k$ мала и ею можно пренебречь. В соответствии с методикой решения задачи [44] в качестве неизвестных варьируемых параметров выбраны коэффициент уширения β и коэффициент опережения ν .

Уравнения поверхностей имеют вид:

$$h^A = h_{1y} + 0,5 \frac{x^2}{R_y}, \quad (2.1)$$

$$h^B = a_{0k}(b_{mx} - y), \quad (2.2)$$

$$h^C = b_{mx} \cdot \sqrt{\beta^2 - (\beta^2 - 1) \cdot \frac{x^3}{l^3} \cdot \left(10 - 15 \cdot \frac{x}{l} + 6 \cdot \frac{x^2}{l^2}\right)}. \quad (2.3)$$

Здесь $\alpha_{0k} = \frac{h_0}{b_0}$ – отношение сторон предыдущего калибра, b_{mx} – ширина калибра с учетом площадки на металле по вертикали.

Текущая площадь поперечного сечения заготовки в очаге деформации:

$$w_x = \frac{1}{2} \cdot h_{1y} (b'_{kx} + b_{mx}) + h'_{kx} \cdot b_{mx}, \quad (2.4)$$

где b'_{kx} и h'_{kx} – размеры площадок по ширине и высоте калибра.

Поле скоростей течения металла определялось с учетом гипотезы плоских сечений, гипотезы прямых вертикалей, условия несжимаемости и кинематического граничного условия. При этом продольная V_x , поперечная V_y и вертикальная V_z скорости перемещения металла описываются следующим образом:

$$V_x = V_1 \cdot \frac{w_1}{w_x}, \quad (2.5)$$

где w_1 и V_1 – соответственно площадь поперечного сечения раската и продольная скорость металла в плоскости выхода металла из валков (при $x = 0$); w_x – текущая вдоль оси x площадь поперечного сечения раската.

$$\text{Для зоны А} \quad V_y = -\frac{1}{h^A} \int_0^y \frac{\partial}{\partial x} (V_x \cdot h^A); \quad (2.6)$$

$$\text{Для зоны В} \quad V_y = -\frac{1}{h^B} \int_{b_{kx}}^y \frac{\partial}{\partial x} (V_x \cdot h^B) - V_y \cdot h^A |_{y = b_{kx}}; \quad (2.7)$$

$$\text{Для зоны С} \quad V_z = V_x \cdot \frac{\partial h^C}{\partial x} \cdot \frac{1}{h^C} \cdot z. \quad (2.8)$$

Скорость раската в сечении выхода из валков равна:

$$V_1 = v \cdot V^*_B, \quad (2.9)$$

где v – коэффициент опережения, а V^*_B – окружная скорость валка в продольно-вертикальном сечении при $y = 0$.

Таким образом, кинематически возможное поле скоростей в очаге деформации определено с точностью до двух неизвестных величин: коэффициента уширения β и коэффициента опережения v .

Принимаем допущение, что на всей контактной поверхности происходит скольжение металла относительно валков и среднее напряжение трения равно

$$\bar{\tau}_{\text{тр.оп}} = \psi \cdot \tau_S, \quad (2.10)$$

где ψ – показатель трения, зависящий от температуры прокатки и состояния поверхности валков; $0,5 \leq \psi \leq 1,0$; τ_s – предел текучести металла на сдвиг.

Принято, что среднее напряжение трения распределяется по зонам отставания и опережения пропорционально средним скоростям скольжения в этих зонах. С учетом этого средние напряжения трения в зонах отставания и опережения рассчитываются по формулам:

$$\bar{\tau}_{\text{тр.от}} = \bar{\tau}_{\text{тр}} \cdot \frac{v_{\text{ск.от}}}{\bar{v}_{\text{ск}}}, \quad (2.11)$$

$$\bar{\tau}_{\text{тр.оп}} = \bar{\tau}_{\text{тр}} \cdot \frac{v_{\text{ск.оп}}}{\bar{v}_{\text{ск}}}. \quad (2.12)$$

Средние скорости скольжения равны

$$\bar{V}_{\text{ск.от}} = \frac{1}{F_{\text{от}}} \cdot \int_{F_{\text{от}}} \bar{V}_{\text{ск}} dF; \quad (2.13)$$

$$\bar{V}_{\text{ск.оп}} = \frac{1}{F_{\text{оп}}} \cdot \int_{F_{\text{оп}}} \bar{V}_{\text{ск}} dF; \quad (2.14)$$

$$\bar{V}_{\text{ск}} = \bar{V}_{\text{ск.от}} \cdot \frac{\bar{V}_{\text{ск.от}} \cdot F_{\text{от}} + \bar{V}_{\text{ск.оп}} \cdot F_{\text{оп}}}{F_{\text{от}} + F_{\text{оп}}}. \quad (2.15)$$

Границей раздела контактной поверхности на зоны опережения и отставания является нейтральная линия, уравнение которой определяется из условия равенства нулю проекции полной скорости скольжения на касательную к окружности валка. Так как проекция $V_{\text{ск},y}$ на касательную к поверхности калибра, лежащую в продольно-вертикальной плоскости, проходящей через выбранную точку, равна нулю, то

$$V_{\text{ск}}^* = V_{\text{ск},x} \cdot \cos \alpha_{xy} + V_{\text{ск},z} \cdot \sin \alpha_{xy}. \quad (2.16)$$

Для определения неизвестных параметров β и γ использовались два уравнения [44]:

– вариационное уравнение принципа минимума полной мощности для жестко-пластической среды

$$\delta(N_{\text{вн}} + N_{\text{ср}} + N_{\text{ск}} + N_{\text{вал}}) = 0; \quad (2.17)$$

– уравнение баланса мощности

$$N_{\text{вн}} + N_{\text{ср}} + N_{\text{ск}} + N_{\text{вал}} = 0. \quad (2.18)$$

Для определения составляющих мощности используются следующие выражения:

– для мощности внутренних сил

$$N_{\text{вн}} = \int_V \tau_s H dV, \quad (2.19)$$

где H – интенсивность скоростей деформации сдвига; τ_s – предел текучести металла на сдвиг;

– для мощности сил среза в плоскости входа металла в валки

$$N_{\text{ср}} = \sum_1^n \int_{F_{\text{ср}i}} \tau_s |V^+ - V^-| dF, \quad (2.20)$$

где V^+ и V^- – проекции скорости течения металла на касательную плоскость к поверхности среза $F_{\text{ср}i}$ с внутренней и внешней сторон поверхности;

– для мощности сил трения на скоростях скольжения

$$N_{\text{ск}} = - \int_{F_{\text{от}}} \bar{\tau}_{\text{тр.от}} U_{\text{ск}} dF - \int_{F_{\text{оп}}} \bar{\tau}_{\text{тр.оп}} U_{\text{ск}} dF; \quad (2.21)$$

– для мощности, подводимой валками

$$N_{\text{вал}} = \int_{F_{\text{от}}} \tau^*_{\text{тр.от}} U_{\text{в}} dF + \int_{F_{\text{оп}}} \tau^*_{\text{тр.оп}} U_{\text{в}} dF, \quad (2.22)$$

где

$$\tau^*_{\text{тр.от}} = -\bar{\tau}_{\text{тр.от}} \frac{U^*_{\text{ск}}}{U_{\text{ск}}}, \quad (2.23)$$

$$\tau^*_{\text{тр.оп}} = -\bar{\tau}_{\text{тр.оп}} \frac{U^*_{\text{ск}}}{U_{\text{ск}}}. \quad (2.24)$$

Мощность сил трения на скоростях скольжения и мощность, подводимая валками, определяются с учетом различия величин напряжения трения в зонах опережения и отставания.

Основную систему уравнений (2.17) и (2.18) решали численным методом на ЭВМ с применением программного комплекса MATHCAD при изменении исходных независимых параметров.

В результате получены аппроксимирующие формулы для расчета коэффициентов β и ν

$$\beta = 1 + 0,357 \cdot (1/\eta - 1)^{0,023} \cdot A^{-0,325} \cdot k_a^{-1,134} \cdot \psi^{0,095} \quad (2.29)$$

$$\nu = 1 + 0,087 \cdot (1/\eta - 1)^{0,954} \cdot A^{0,084} \cdot k_a^{0,148} \cdot \psi^{0,036}, \quad (2.30)$$

где $1/\eta$ – коэффициент обжатия, увеличение которого при прокатке в вытяжных калибрах приводит к повышению степени заполнения металлом очага деформации, что обеспечивает уменьшение доли поперечной деформации; A – приведенный диаметр валков; k_a – коэффициент, учитывающий форму восьмигранного калибра; ψ – показатель трения.

Безразмерные независимые величины равны

$$- \text{коэффициент обжатия } 1/\eta = \frac{h_{i-1}}{h_i}, \quad (2.31)$$

$$- \text{ приведенный диаметр валков } A = \frac{D_0 - H_i}{H_i}; \quad (2.32)$$

- коэффициент, учитывающий форму восьмигранного калибра:

$$- \text{ квадратный калибр } k_a = \frac{1,85 \cdot b'_{i-1}}{b'_i}, \quad (2.33)$$

$$- \text{ ромбический калибр } k_a = \frac{0,8 \cdot b'_{i-1}}{b'_i} \quad (2.34)$$

где h_i – высота калибра; H_i – геометрическая высота калибра; D_0 – диаметр валков; b'_i – ширина площадки калибра.

При решении задачи независимые безразмерные параметры и показатель трения изменяли на трех уровнях для применяющихся на практике диапазонов их изменения в следующих пределах:

- коэффициент обжатия $1/\eta = 1,0 \div 1,5$,
- приведенный диаметр валков $A = 10 - 80$,
- отношение сторон исходного раската $a = 0,92 \div 1,08$,
- коэффициент формы $k_a = 1,23 \div 1,37$,
- показатель трения $\psi = 0,1 \div 0,5$.

Для проверки результатов решения использовались данные экспериментальных исследований (см. главу 3).

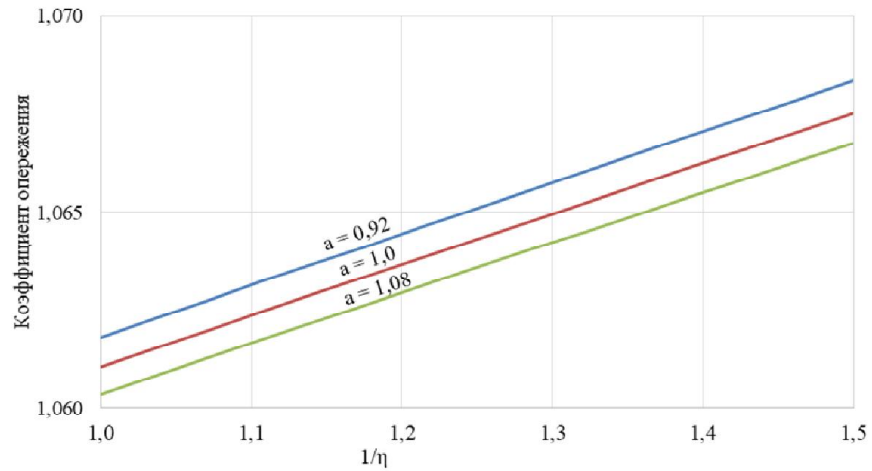
Точность аппроксимирующих формул определяли по формуле:

$$x = \frac{x_p - x_{оп.}}{x_{оп.}}, \quad (2.35)$$

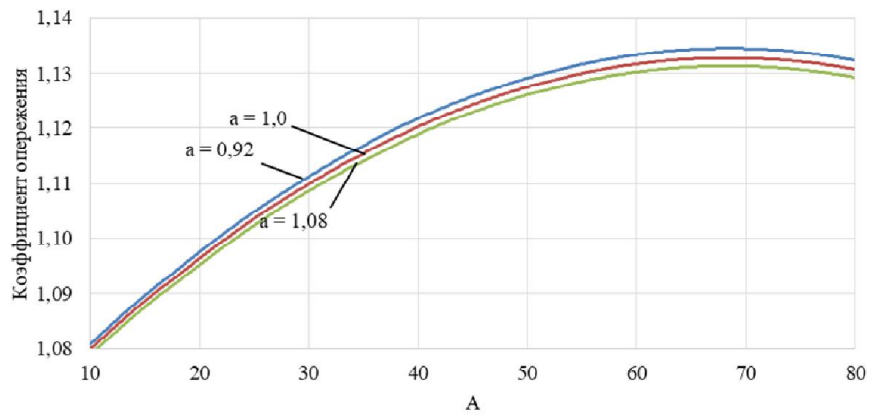
где x_p и $x_{оп.}$ – соответственно расчетное и опытные значения исследуемого параметра.

Результаты решения вариационной задачи приведены на рисунках 2.2 и 2.3. Для каждого сочетания безразмерных параметров рассчитывали коэффициенты β и ν . Погрешность не превышала 1 – 3%, что позволяет судить об адекватности полученной математической модели.

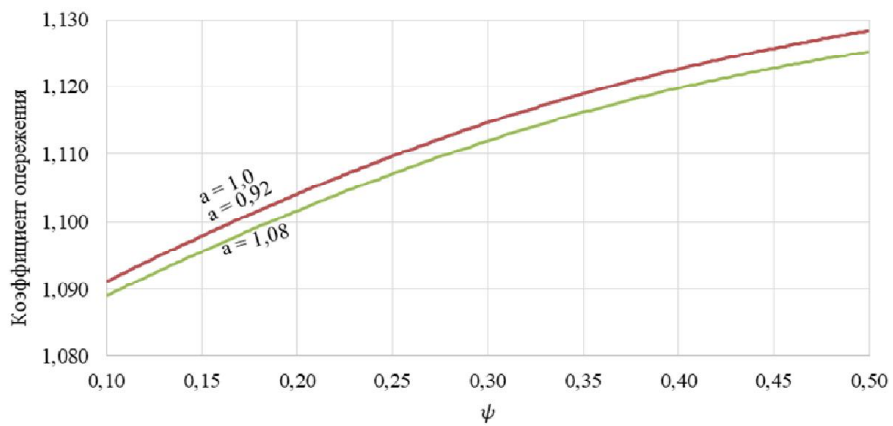
На рисунке 2.2 представлено распределение опытных и расчетных значений для коэффициента уширения. Расчет производился при фиксированных значениях показателя трения и приведенного диаметра валков ($\psi=0,4$, $A=45$), а отношение сторон исходного раската составляло $a = 1,0$.



а



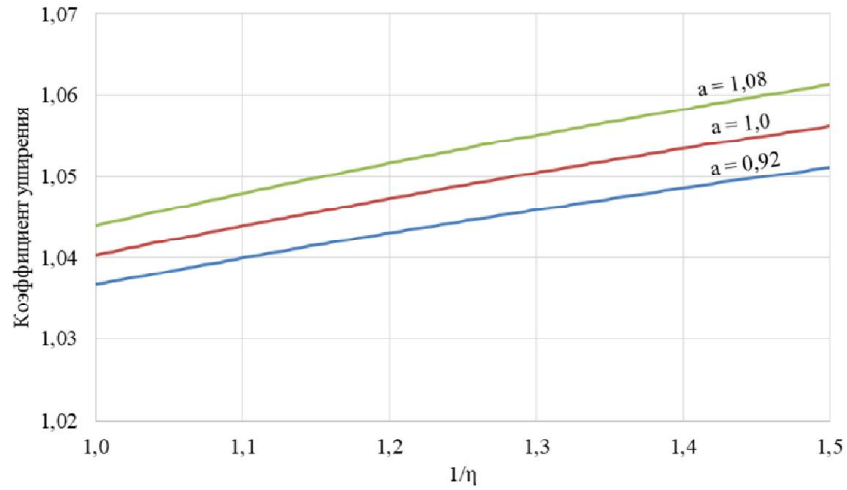
б



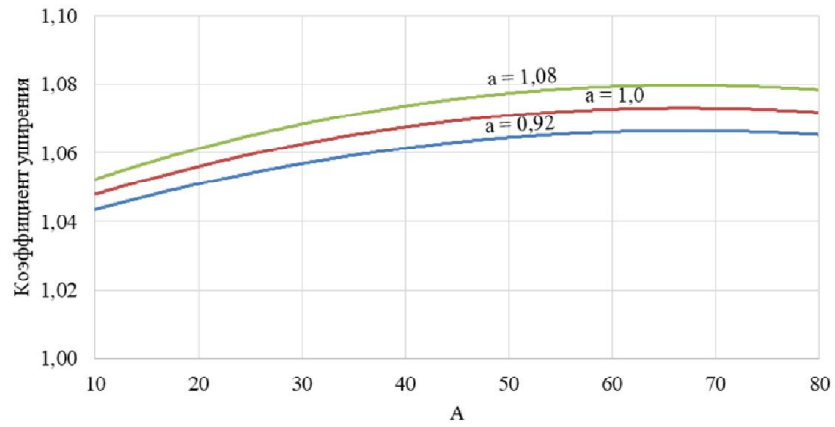
в

Рисунок 2.2 – Влияние безразмерных независимых параметров на коэффициент опережения при прокатке в восьмигранных калибрах: a – коэффициента обжатия (при $A=45$, $\psi = 0,4$); b – приведенного диаметра валков (при $1/\eta = 1,25$, $\psi = 0,4$); v – показателя трения (при $A=45$,

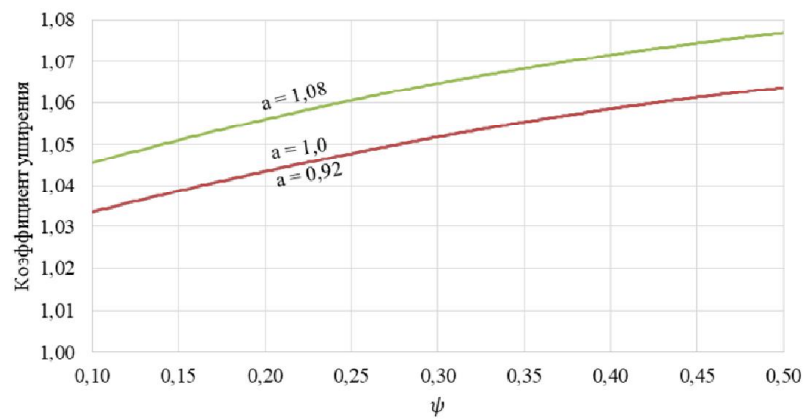
$$1/\eta = 1,5)$$



а



б



в

Рисунок 2.3 – Влияние безразмерных независимых параметров на коэффициент уширения при прокатке в восьмигранных калибрах: а – коэффициента обжатия (при $A=45$, $\psi = 0,4$); б – приведенного диаметра валков (при $1/\eta = 1,25$, $\psi = 0,4$); в – показателя трения (при $A=45$,

$$1/\eta = 1,5)$$

С увеличением коэффициента обжатия (рисунок 2.2, *a*) значения коэффициента опережения возрастают на 10 – 15% по зависимости, близкой к линейной. Это свидетельствует о том, что в единицу времени через плоскость выхода металла из валков проходит его больший объем, и это возможно только за счет увеличения скорости полосы на выходе. Зависимости коэффициента опережения от приведенного диаметра валков и показателя трения имеют нелинейный характер, причем значения этих параметров увеличиваются на 5 – 7% (рисунок 2.2, *б*, *в*). Увеличение приведенного диаметра валков ведет к уменьшению угла захвата и к увеличению протяженности зоны контакта металла с валками, благодаря чему увеличивается избыток сил трения и растет опережение, а рост показателя трения способствует увеличению сил трения. Повышение отношения сторон исходного раската *a* снижает значения коэффициента опережения на 1 – 5 %.

Влияние отношения сторон исходного раската *a* на коэффициент уширения имеет противоположный характер: с увеличением этого параметра коэффициент уширения снижается во всем диапазоне изменения остальных безразмерных параметров. Такая зависимость характерна и для других систем калибров простой формы [44]. С увеличением коэффициента обжатия коэффициент уширения возрастает на 5 – 15% (рисунок 2.3, *a*), поскольку увеличивается смещаемый объем металла в продольном и поперечном направлении, и растет длина очага деформации. Таким же образом влияет приведенный диаметр валков, при этом значения коэффициента уширения возрастают на 7 – 18% (рисунок 2.3, *б*), так как увеличивается протяженность зоны деформации, растут силы трения, и, следовательно, становится больше сопротивление деформации в продольном направлении. Повышение показателя трения (рисунок 2.3, *в*) увеличивает уширение так как появляется избыток сил трения в продольном направлении. Оно увеличилось вдвое по сравнению с опережением – его прирост составляет 7 – 18 %.

Полученные зависимости были использованы для расчета режимов обжатий при холодной прокатке прутков из исследуемых сплавов.

2.2 Разработка программного обеспечения и методики для проектирования технологии и инструмента для холодной сортовой прокатки длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов драгоценных металлов

Для проектирования технологии производства длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов цветных металлов, включая драгоценные, была разработана САПР “PROVOL” [95 – 98]. Она позволяет анализировать существующие и проектировать новые режимы холодной листовой и сортовой прокатки, волочения, моделировать и рассчитывать

калибровку валков и подготавливать программы для изготовления валкового инструмента. Программа «PROVOL», общая структурная схема которой представлена на рисунке 2.5, реализована в среде программирования Delphi, продукт корпорации Borland и на данный момент принадлежащий и разрабатываемый Embarcadero Technologies [80]. Листинг основного блока программы приведен в Приложении А.

Разработанная САПР состоит из трех основных модулей расчета – «Листовая прокатка», «Сортовая прокатка» и «Волочение», предназначенных для проектирования процессов, являющихся базовыми операциями в производстве ювелирных изделий (рисунок 2.4). Алгоритм каждого из модулей включает формирование исходных данных, расчет формоизменения обрабатываемого металла, определение энергосиловых параметров, визуализацию расчетных данных, формирование отчетов. Программа содержит блок построения калибровки валков в системе автоматизированного проектирования и черчения Autodesk AutoCAD [104], а также блок создания 3D-модели валкового инструмента и моделирования его обработки в системе FeatureCAM [85], разработанной компанией Delcam и приобретенной и разрабатываемой корпорацией Autodesk.

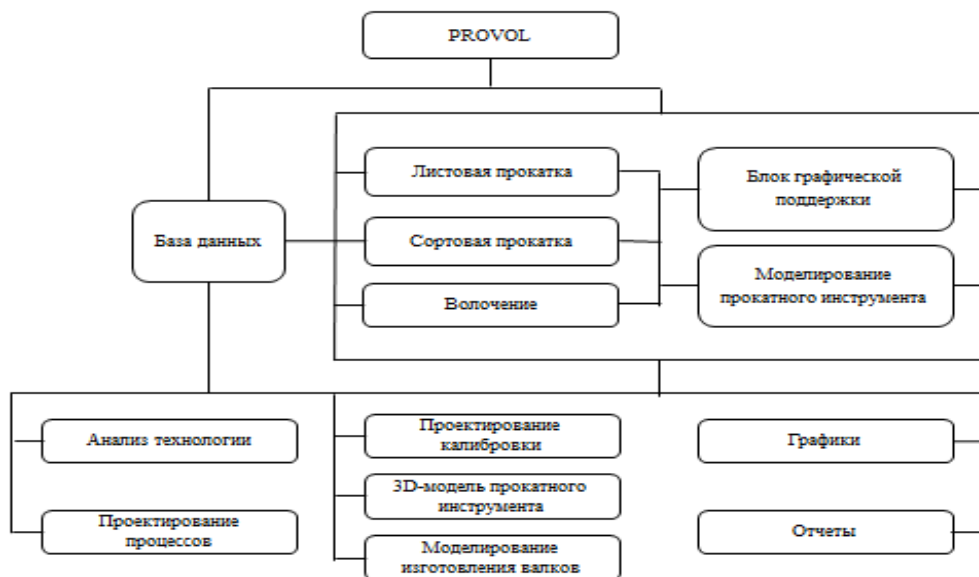


Рисунок 2.4 – Структурная схема программы “PROVOL”

Проектирование технологических процессов требует операций с большим объемом справочной информации по свойствам материалов и характеристикам оборудования. С помощью прикладной программы Microsoft Access все показатели сведены в таблицы, для управления базой данных разработана кнопочная форма, система форм, отчетов и макросов [96]. Структура базы данных разделена на два автономных блока: «Оборудование» и «Сплавы» (рисунок 2.5).

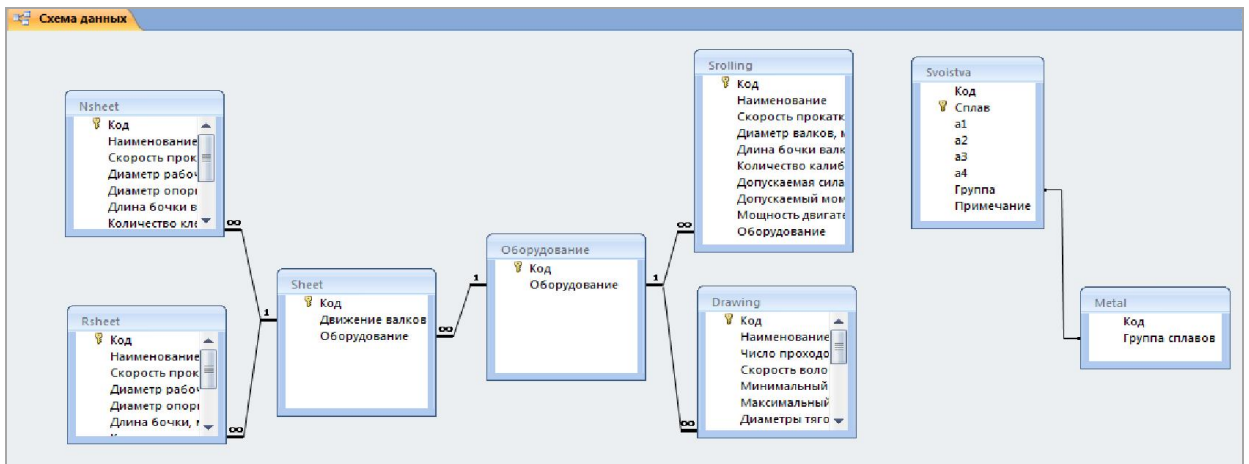


Рисунок 2.5 – Схема базы данных

Информация по техническим характеристикам оборудования структурирована по типу станов. Безразмерные коэффициенты для регрессионных зависимостей, полученных аппроксимацией экспериментальных данных исследований механических свойств материалов, введены в таблицу «Свойства». Сплавы структурированы по группам в соответствии с принятой классификацией цветных металлов (рисунок 2.6).

Разработанная база данных функционирует как самостоятельно, так и в связи с разработанной программой, являясь одним из ее элементов, так как возможно извлечение данных и редактирование в рамках предложенных алгоритмов для САПР “PROVOL” при проектировании технологических режимов прокатки и волочения.

Редактирование базы данных

Металлы и сплавы | Оборудование

Группа сплавов: Драгоценные

Создать новую | Удалить | Редактировать | Обновить | Сохранить

Свойства сплава

Сплав: ЭлСрМ-585-75-33,5 (Св)

Коэффициенты: $S = a_1 E^3 + a_2 E^2 + a_3 E + a_4$, МПа

Группа сплавов: Драгоценные

Примечание: Красное золото, Патент РФ № 2514898 (0,5%)

Создать | Удалить | Редактировать | Обновить | Сохранить

Рисунок 2.6 – Окно редактирования базы данных

Блок моделирования инструмента использует данные, полученные при проектировании калибровки валков. На основе расчетных параметров формируется макрос на языке программирования Visual Basic для дальнейшей передачи в систему FeatureCAM с целью

формирования 3D-модели валкового инструмента и моделирования его изготовления на токарно-фрезерном оборудовании [98].

На рисунке 2.7 представлена рабочая область системы FeatureCAM с построенной моделью прокатного инструмента и окном вывода NC-кода для станка с ЧПУ.

Экспорт макроса и его обработка в системе FeatureCAM позволяет построить 3D-модель прокатного вала, в автоматическом режиме выбрать режущий инструмент для обработки и смоделировать траектории его перемещения, получить код управляющей программы для станка с ЧПУ и, таким образом, подготовить всю информацию для изготовления валкового инструмента. Полученная модель инструмента в дальнейшем использовалась для моделирования процесса сортовой прокатки в программном комплексе DEFORM-3D.

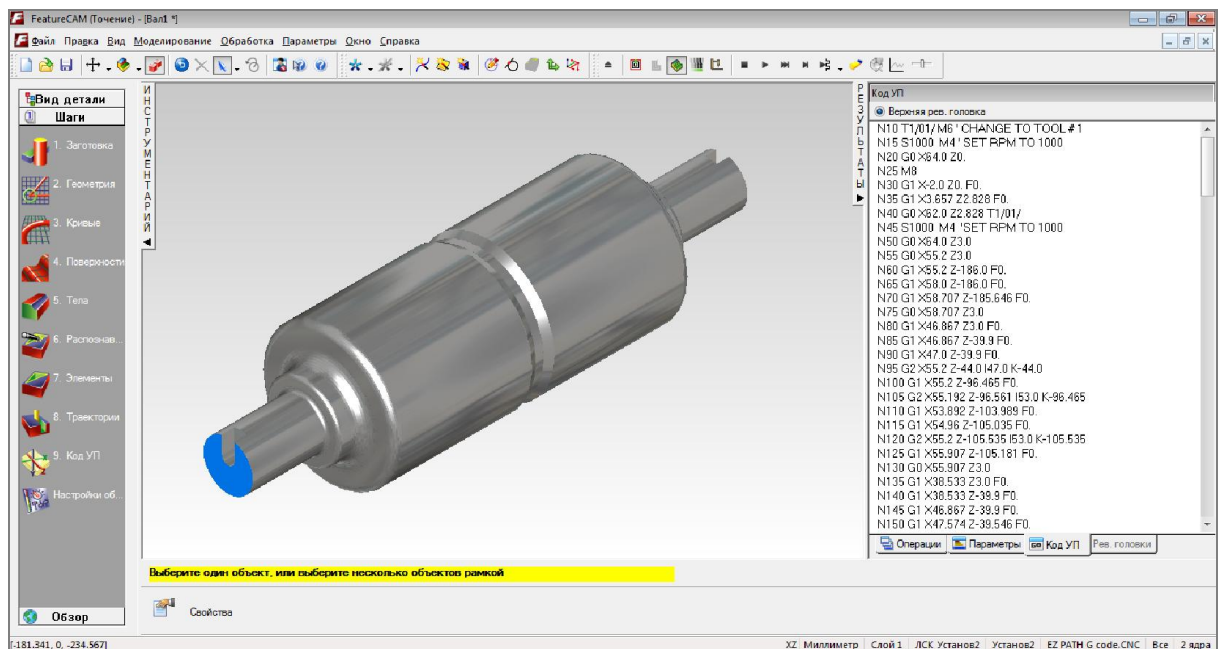


Рисунок 2.7 – 3D-модель валкового инструмента, созданная в системе FeatureCAM

Методика проектирования технологии холодной сортовой прокатки разработана на основе алгоритма расчета режимов обжатий и энергосиловых параметров [19], а также с использованием формул, полученных в результате теоретических исследований (раздел 2.1).

Алгоритм расчета параметров процесса холодной сортовой прокатки включает в себя ряд этапов [106].

1. Определение суммарного коэффициента вытяжки

$$\lambda_{\Sigma} = \frac{\omega_0}{\omega_k}, \quad (2.36)$$

где ω_0 и ω_k – начальная и конечная площадь поперечного сечения заготовки соответственно, мм².

2. Расчет величины средней вытяжки по формуле:

$$\ln \lambda_{\text{ср}} = \frac{\ln \lambda_{\Sigma}}{n_{\text{ср}}}, \quad (2.37)$$

где $n_{\text{ср}}$ – количество проходов, $\lambda_{\text{ср}}$ – средний коэффициент вытяжки.

3. Определение площадей поперечного сечения по проходам

$$\omega_i = \frac{\omega_{i-1}}{\lambda_i}, \quad (2.38)$$

где λ_i – единичные вытяжки по проходам.

4. Определение геометрических размеров калибров.

Расчет ширины и высоты:

- квадратный калибр

$$b_{\kappa} = 1,134 \cdot x_{\kappa} + 0,12;$$

$$h_{\kappa} = 1,02 \cdot x_{\kappa} - 0,02;$$

- ромбический калибр

$$b_p = 1,15 \cdot x_p;$$

$$h_p = 1,062 \cdot x_p;$$

где x_i – геометрический размер стороны калибра.

Расчет геометрической ширины и высоты:

- квадратный калибр

$$H_{\kappa} = 2 \cdot x_{\kappa} \cdot \sin 45 = 1,41 \cdot x_{\kappa};$$

$$B_{\kappa} = H_{\kappa};$$

- ромбический калибр

$$H_p = 2 \cdot x_p \cdot \sin 41 = 1,31 \cdot x_p;$$

$$B_p = 2 \cdot x_p \cdot \cos 41 = 1,51 \cdot x_p.$$

Определение величины разъема калибра по высоте и ширина дна ручья по калибру:

- квадратный калибр

$$b'_{\kappa} = 0,397 \cdot x_{\kappa} + 0,029;$$

$$h'_{\kappa} = 0,28 \cdot x_{\kappa} - 0,212;$$

- ромбический калибр

$$b'_p = 0,268 \cdot x_p + 0,01;$$

$$h'_p = 0,334 \cdot x_p.$$

5. Расчет безразмерных параметров прокатки:

– коэффициента обжатия $1/\eta$ (формула 2.31);

– величины отношения сторон исходного раската для равноосных (квадратных) калибров

$$a_0 = \frac{h_{i-1}}{b_{i-1}} \quad (2.39)$$

– величины отношения осей калибра для неравноосных (ромбических) калибров

$$a_k = \frac{b^*_i}{h_i}, \quad (2.40)$$

где b^*_i – расчетная ширина ромбического калибра без учета приращения ширины полосы,

$$b^*_i = 1,15 \cdot x_i$$

– коэффициента, учитывающего форму калибра k_a (формулы 2.33 и 2.34).

6. Расчет коэффициентов уширения и опережения по формулам 2.29 и 2.30 соответственно.

7. Определение ширины раската с учетом уширения и степени заполнения калибра

$$B_\beta = \frac{b^0_i}{B_i}, \quad (2.40)$$

где b^0_i – ширина раската с учетом коэффициента уширения, $b^0_i = \beta \cdot b_{i-1}$.

8. Расчет площади поперечного сечения раската, коэффициентов вытяжки и суммарных степеней деформации с учетом величины уширения.

9. Площадь контакта металла с валками при холодной сортовой прокатке в калибрах с учетом их геометрических особенностей определяют по формуле (раздел 3.3)

$$F_{\text{конт}} = -0,3062 \cdot x_i^2 + 21,708 \cdot x_i - 12,456, \quad (2.41)$$

где x_i – геометрический размер стороны калибра.

10. Давление прокатки вычисляют по выражению:

$$\bar{p} = \sigma^*_\tau \cdot n_\sigma. \quad (2.42)$$

Здесь σ^*_τ – средний предел текучести металла в очаге деформации, величина которого при холодной прокатке зависит от суммарного обжатия

$$\sigma^*_\tau = \frac{(\sigma_{\tau 0} + \sigma_{\tau 1})}{2}, \quad (2.43)$$

где $\sigma_{\tau 0}$ и $\sigma_{\tau 1}$ – предел текучести материала до и после прокатки соответственно.

11. Коэффициент напряженного состояния определяют по формуле М. Я. Бровмана:

если $0,35 \leq l_d/h_{cp} \leq 2,0$,

$$n_\sigma = 0,5 \cdot \left(\frac{l_d}{h_{cp}} + \frac{h_{cp}}{l_d} \right), \quad (2.44)$$

если $2,0 < l_d/h_{cp}, 0,35 > l_d/h_{cp}$,

$$n_\sigma = 0,75 \cdot 0,25 \frac{l_d}{h_{cp}}, \quad (2.45)$$

где l_d – длина зоны деформации, $l_d = \sqrt{R \cdot \Delta h}$, мм; h_{cp} – средняя толщина полосы в очаге деформации, $h_{cp} = \sqrt{h_0 \cdot h_1}$, мм.

12. Рассчитывают силу прокатки P_n по формуле:

$$P_n = \bar{p} \cdot F_{\text{конт}} \quad (2.46)$$

где \bar{p} – давление прокатки, МПа; $F_{\text{конт}}$ – площадь контакта металла с валками, мм².

13. Момент прокатки определяют по формуле

$$M_n = 2 \cdot P_n \cdot \psi \cdot \sqrt{\Delta h \cdot R} \quad (2.47)$$

14. Расчеты ведутся с учетом ограничений по силе и моменту прокатки

$$P_n < P_{\text{доп}}, M_n < M_{\text{доп}} \quad (2.48)$$

где $P_{\text{доп}}$ и $M_{\text{доп}}$ – допустимая сила и момент прокатки, регламентированные характеристиками оборудования.

15. Если хотя бы одно из этих ограничений не выполняется, расчеты повторяют, перераспределив коэффициенты вытяжки по проходам.

Блок-схема модуля «Сортовая прокатка» (С1), в котором реализован описанный выше алгоритм расчета параметров холодной сортовой прокатки, представлена на рисунке 2.8 и включает в себя ряд этапов.

В качестве исходных данных (С2) задаются исходные размеры заготовки и конечная сторона проката, а также среднее значение коэффициента вытяжки (рисунок 2.9). Из базы данных (С3) программы для расчета режимов обжатия справочные данные по механическим свойствам для выбранного сплава, а также характеристики оборудования. При необходимости информация, отсутствующая в базе, вводится пользователем вручную.

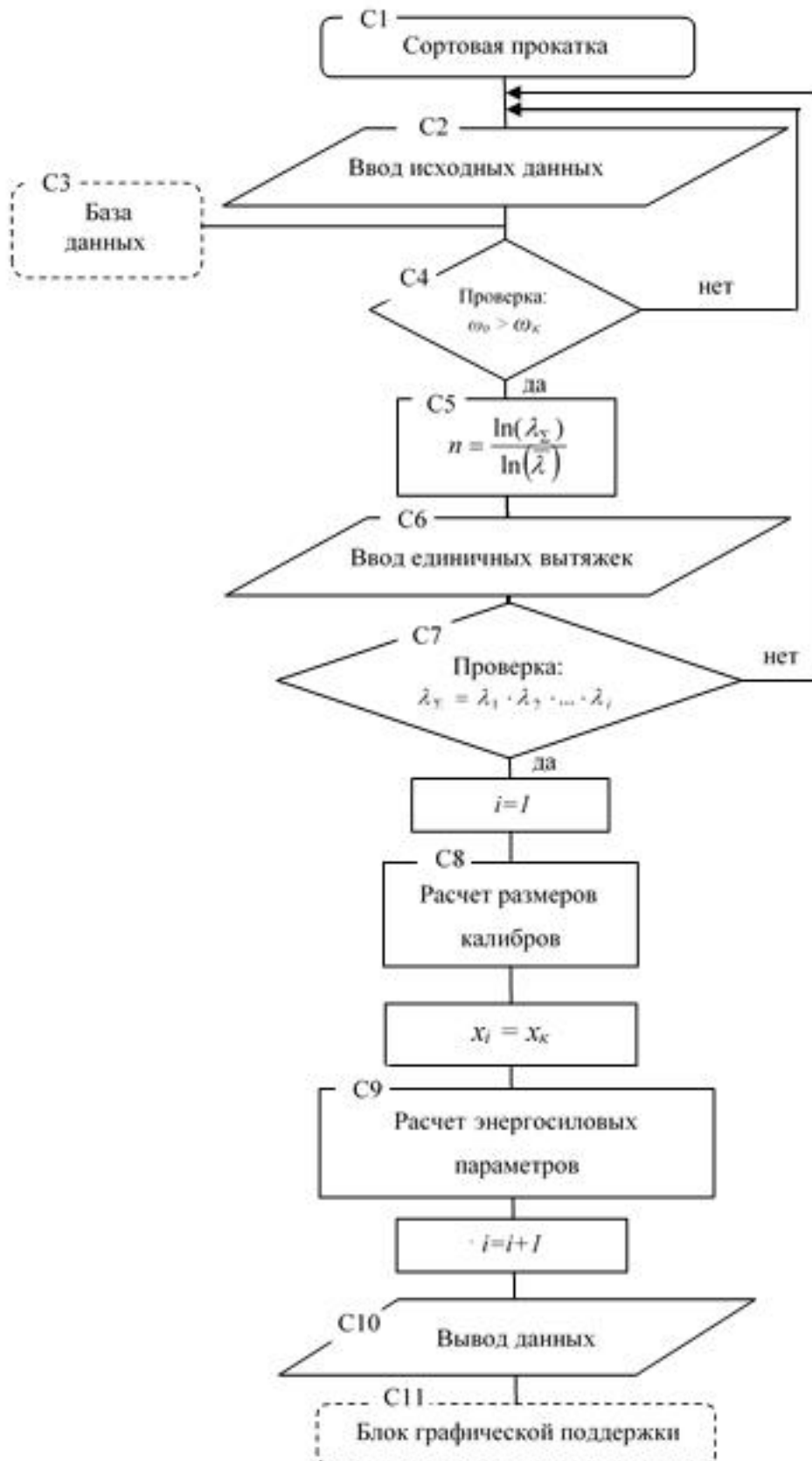


Рисунок 2.8 – Блок-схема модуля программы «Сортовая прокатка»

Первым этапом расчета является проверка корректности заданных исходных данных (С4), в соответствии с которым площадь поперечного сечения прутка после прокатки (w_k) не должна превышать площади поперечного сечения заготовки (w_0), в случае ошибки на экран выводится соответствующее сообщение. Затем производится расчет необходимого количества проходов (n), за которое будут достигнуты требуемые размеры прутка (С5). Программой открывается соответствующее число ячеек для ввода пользователем единичных коэффициентов вытяжки (С6). Коэффициент вытяжки в последнем проходе автоматически пересчитывается из условия, что суммарная вытяжка является произведением единичных коэффициентов (С7).

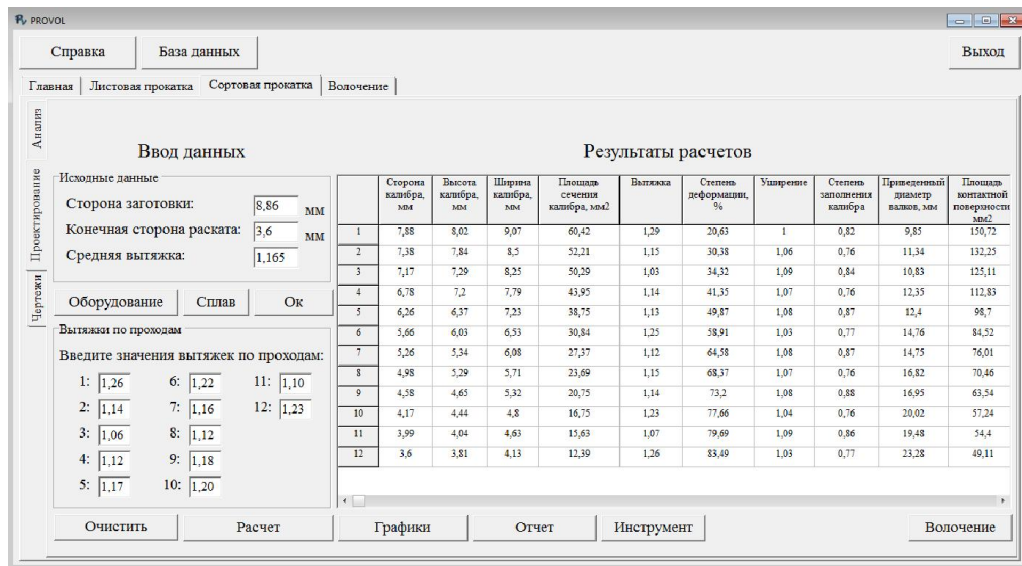


Рисунок 2.9 – Окно программы для проектирования технологии сортовой прокатки

Далее производится цикл расчетов от единицы до рассчитанного количества проходов n с проверкой условия равенства стороны проката в последнем проходе заданному значению конечной стороны. Расчет формоизменения ведется параллельно для клеток «квадрат-ромб» и «ромб-квадрат» с учетом их чередования и осуществления кантовки между проходами (С8). Расчет осуществляется по приведенному выше алгоритму. После определения уширения корректируется ширина раската с учетом коэффициента уширения и степень заполнения калибра, а далее вычисляются энергосиловые параметров процесса (С9) и проверяется условие по допустимым силе и моменту прокатки. Результаты проектирования выводятся на экран в виде таблицы (С10). Блок графической поддержки позволяет построить графики зависимостей (рисунок 2.11) параметров прокатки от номера прохода (С11).

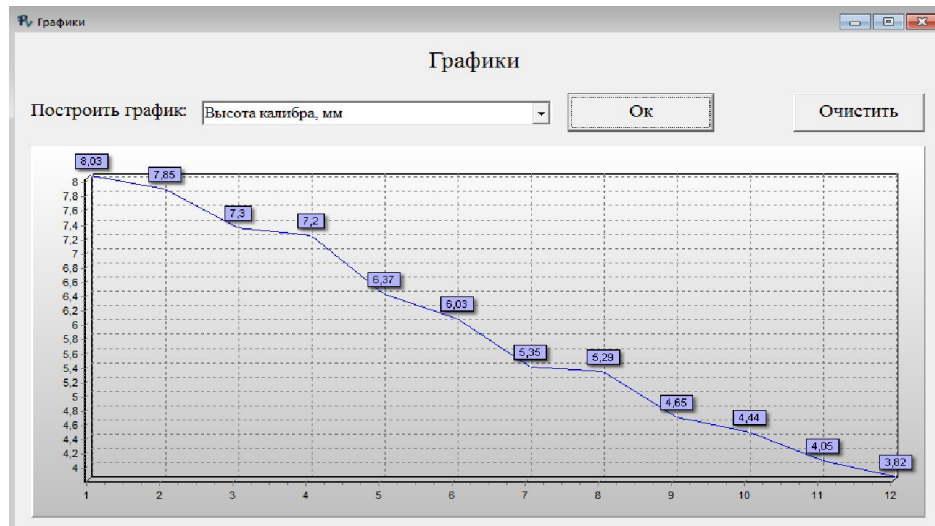


Рисунок 2.10 – Построение графика зависимости высоты калибра от номера прохода

Результаты проектирования, как и исходная информация, формируются программой в виде отчета в пакете MS Office Excel.

По результатам рассчитанных размеров калибров выполняется чертеж калибровки валков. Он выводится в окне графической поддержки программы (рисунок 2.11) или, по желанию пользователя, экспортируется в пакет AutoCAD для дальнейшей обработки и подготовки рабочих чертежей инструмента.

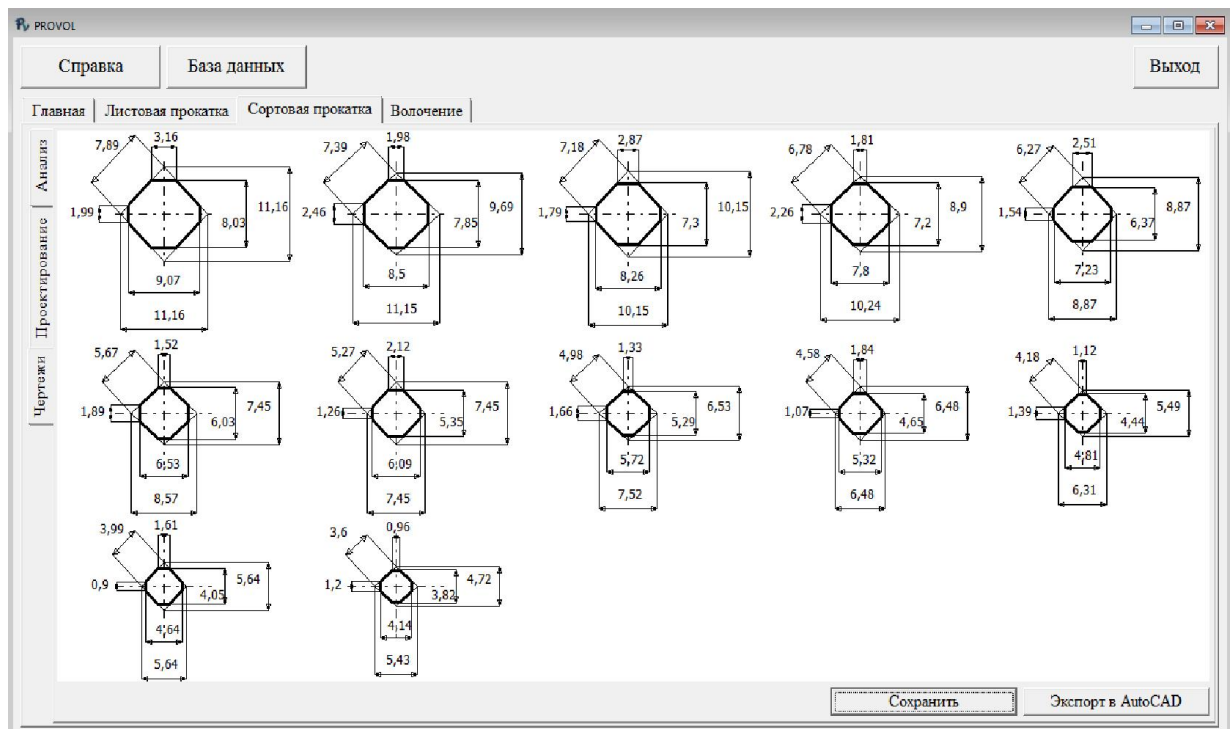


Рисунок 2.11 – Окно визуализации чертежей калибров

Таким образом, разработаны методика, алгоритмы и программное обеспечение для расчета параметров процессов холодной сортовой прокатки цветных металлов и их сплавов, которые можно использовать для анализа существующих и проектирования новых режимов деформации сплавов драгоценных металлов.

2.3 Проектирование технологических режимов прокатки прутков из новых безникелевых сплавов серебра и золота

Важным условием повышения эффективности производства деформированных полуфабрикатов в условиях действующего предприятия является рациональность применяемых режимов обработки, обусловленных принятой калибровкой инструмента и конструктивными особенностями оборудования. Особую актуальность это приобретает при внедрении в производство новых материалов, отличающихся повышенным уровнем механических свойств, а также на этапе исследования и усовершенствования существующих технологий.

Разработанная программа «PROVOL» применялась для анализа действующей в промышленном ювелирном производстве технологии изготовления длинномерных деформированных полуфабрикатов и создания рациональных режимов обработки новых безникелевых сплавов на основе золота и серебра (см. табл. 1.6).

Анализ существующей промышленной технологии (см. рис. 1.7) для производства прутков из сплавов драгоценных металлов, с учетом отжигов после 12 и 20 проходов, показал, что распределение коэффициентов вытяжки по проходам неравномерно, причем установлен их рост на заключительном этапе обработки, когда металл значительно упрочняется (рисунок 2.12).

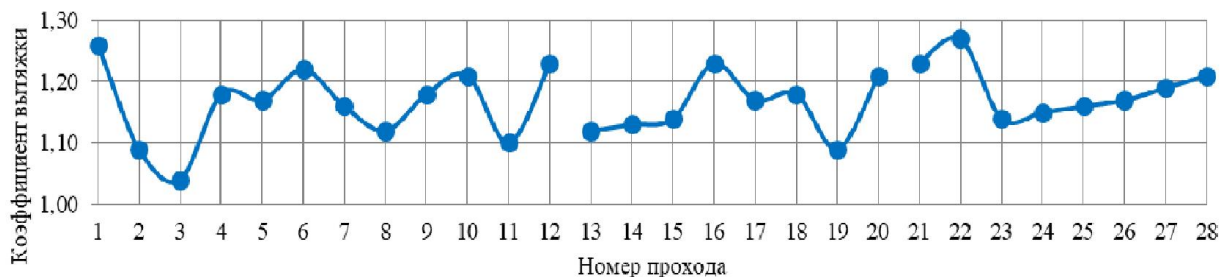


Рисунок 2.12 - Изменение коэффициента вытяжки по действующим маршрутам прокатки прутков из сплавов драгоценных металлов

Это ведет к повышению энергосиловой загрузки оборудования (рисунок 2.13) и является основной причиной появления брака в виде обрывов металла между клетями. Применение

единой технологии производства полуфабрикатов без учета свойств обрабатываемого материала также ведет к нерациональной энергосиловой загрузке оборудования. Так расчеты показали, что для обработки нового сплава золота (сплав №4) сила прокатки по существующим маршрутам превысила допустимое значение, регламентированное техническими характеристиками используемого оборудования (рисунок 2.13, *а*). Для нового сплава серебра (сплав №5), имеющего более низкие прочностные свойства, действующие режимы не приведут к превышению энергосиловых параметров (рисунок 2.13, *б*), поэтому для его обработки можно применять большие степени деформации, что приведет к сокращению количества проходов.

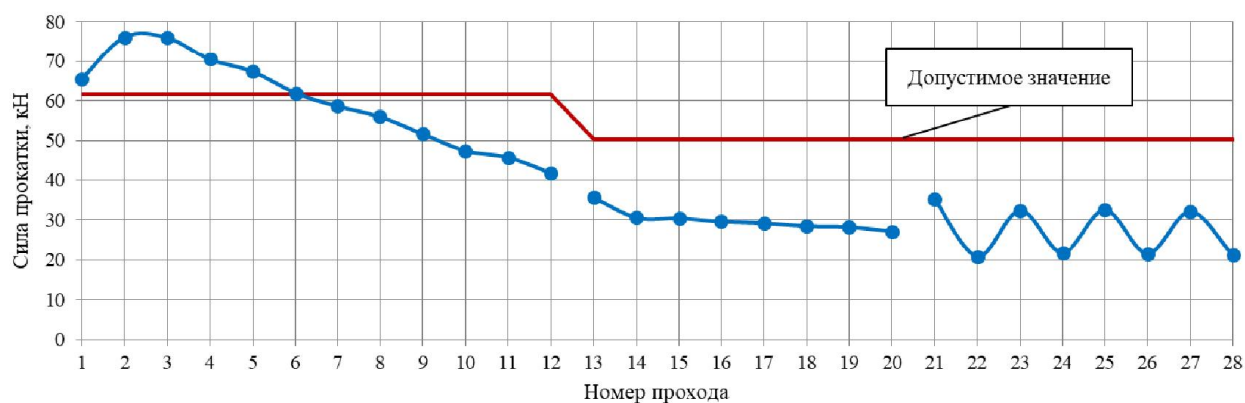
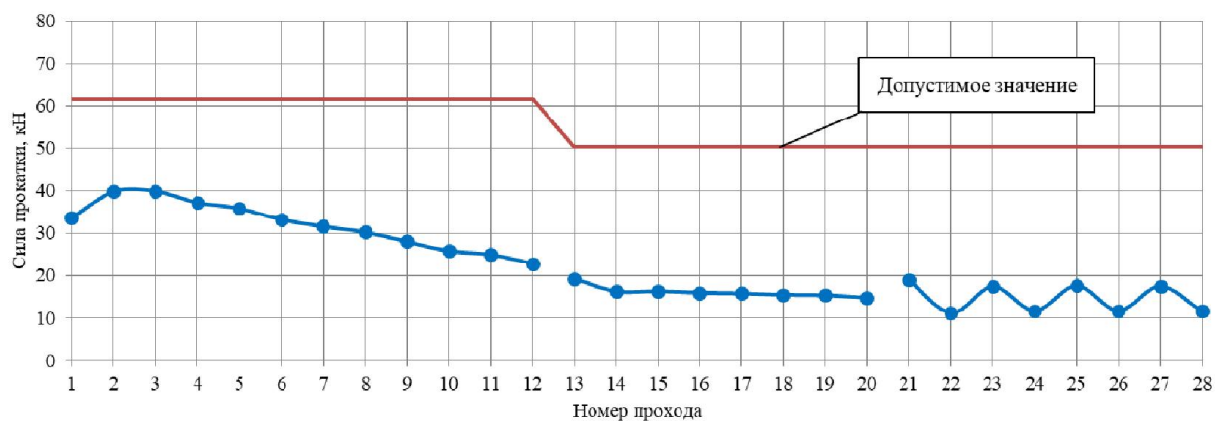
*а**б*

Рисунок 2.13 - Изменение силы прокатки при обработке новых сплавов по действующим маршрутам: *а* – сплав №4; *б* – сплав №5

Данный анализ с помощью разработанного программного обеспечения позволил предложить для новых сплавов золота рациональные маршруты обжатий при холодной сортовой прокатке (таблицы 2.1 и 2.2). Для сплавов №1 и №2 они представлены в графическом виде на рис. 2.14. Эти режимы дают возможность сократить цикл прокатки и существенно

снизить неравномерность деформации для применяемой в заводских условиях калибровки валков. Сокращение количества проходов для сплавов золота №1 и №2 составило 8 проходов (с 28 до 20), а для сплавов №3 и №4 – 10 проходов (с 28 до 18). Кроме того, предложенные режимы прокатки позволили сократить и количество промежуточных отжигов (рис. 2.14), что можно объяснить повышенным уровнем пластических свойств новых сплавов.

Результаты расчета силы прокатки для новых сплавов золота представлены графически на рис. 2.15 и 2.16. Значения силы прокатки для сплава №4, имеющего самые высокие прочностные свойства из исследуемых, не превысили допустимых значений, как при применении существующих режимов. В связи с этим для обработки сплавов с повышенными прочностными свойствами целесообразно перераспределение коэффициентов вытяжки и переточка калибров на валках.

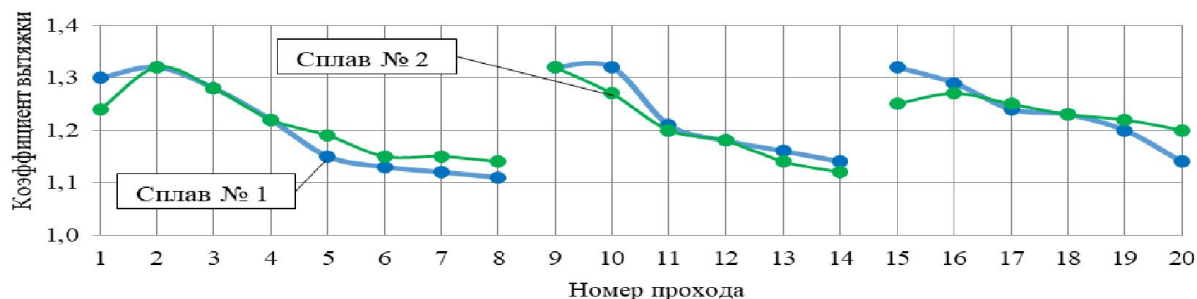


Рисунок 2.14 – Предложенные маршруты сортовой прокатки для сплавов №1 и №2 золота 585 пробы

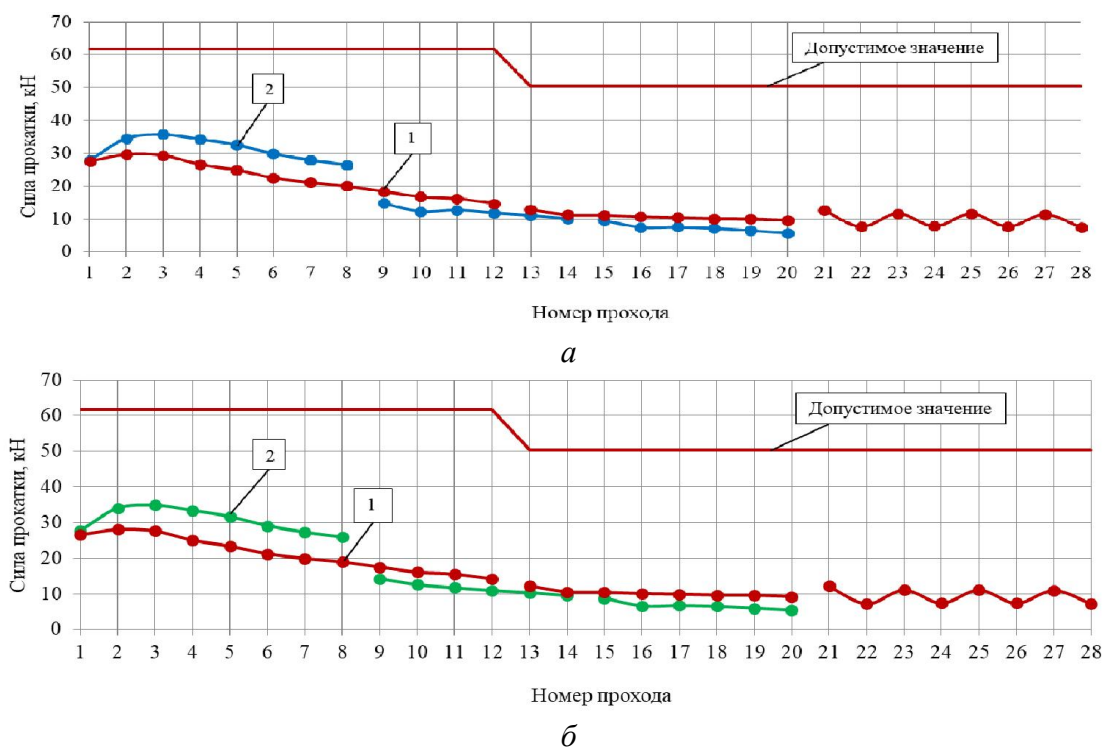


Рисунок 2.15 – Распределение сил при прокатке по действующим (режим 1) и предложенным (режим 2) маршрутам для сплавов золота 585 пробы: а – сплав №1; б – сплав №2

Таблица 2.1 – Предложенные деформационные режимы прокатки сплавов №1 и №2

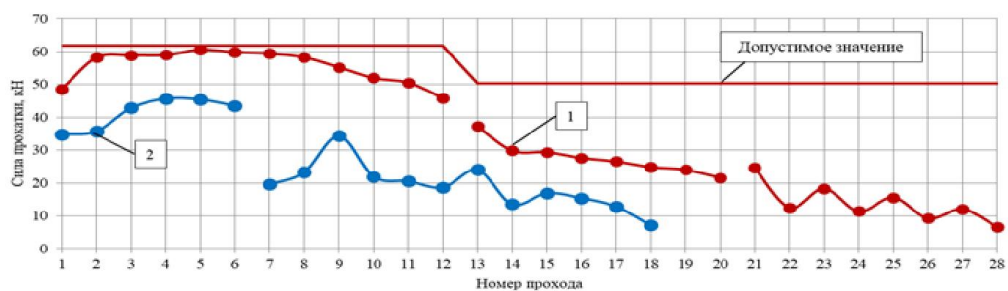
| № калибра | Сплав № 1 | | | Сплав № 2 | | |
|-----------|-------------|------------------|--------------|-------------|------------------|--------------|
| | λ_i | σ_T , МПа | $P_{п}$, кН | λ_i | σ_T , МПа | $P_{п}$, кН |
| 1 | 1,30 | 199 | 27,9 | 1,24 | 198 | 27,7 |
| 2 | 1,32 | 256 | 34,5 | 1,32 | 253 | 34,0 |
| 3 | 1,28 | 272 | 35,7 | 1,28 | 266 | 34,9 |
| 4 | 1,22 | 283 | 34,2 | 1,22 | 276 | 33,4 |
| 5 | 1,15 | 290 | 32,5 | 1,19 | 283 | 31,7 |
| 6 | 1,13 | 294 | 29,8 | 1,15 | 287 | 29,1 |
| 7 | 1,12 | 297 | 27,9 | 1,15 | 291 | 27,3 |
| 8* | 1,11 | 299 | 26,5 | 1,14 | 294 | 26,0 |
| 9 | 1,32 | 256 | 14,8 | 1,32 | 246 | 14,2 |
| 10 | 1,32 | 228 | 12,3 | 1,27 | 212 | 12,6 |
| 11 | 1,21 | 255 | 12,7 | 1,20 | 234 | 11,7 |
| 12 | 1,18 | 270 | 11,8 | 1,18 | 249 | 10,9 |
| 13 | 1,16 | 277 | 11,1 | 1,14 | 259 | 10,3 |
| 14* | 1,14 | 281 | 10,1 | 1,12 | 265 | 9,5 |
| 15 | 1,32 | 248 | 9,5 | 1,25 | 229 | 8,8 |
| 16 | 1,29 | 231 | 7,5 | 1,27 | 205 | 6,6 |
| 17 | 1,24 | 259 | 7,5 | 1,25 | 231 | 6,7 |
| 18 | 1,23 | 273 | 7,1 | 1,23 | 249 | 6,5 |
| 19 | 1,20 | 282 | 6,4 | 1,22 | 262 | 6,0 |
| 20 | 1,14 | 287 | 5,7 | 1,20 | 271 | 5,4 |

* - проход, после которого проводится промежуточный отжиг

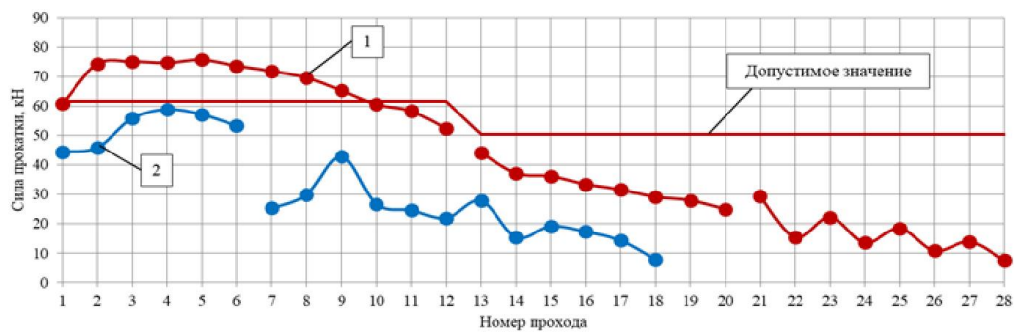
Таблица 2.2 – Предложенные деформационные режимы прокатки сплавов №3 и №4

| Номер калибра | Сплав №3 | | | Сплав №4 | | |
|---------------|----------------|--------------------|--------------|----------------|--------------------|--------------|
| | $\lambda_{ед}$ | σ^*_T , МПа | $P_{п}$, кН | $\lambda_{ед}$ | σ^*_T , МПа | $P_{п}$, кН |
| 1 | 1,28 | 287 | 34,8 | 1,08 | 365 | 44,3 |
| 2 | 1,32 | 314 | 35,7 | 1,23 | 402 | 45,8 |
| 3 | 1,28 | 411 | 42,9 | 1,35 | 535 | 55,8 |
| 4 | 1,22 | 487 | 45,7 | 1,23 | 627 | 58,8 |
| 5 | 1,19 | 562 | 45,5 | 1,32 | 706 | 57,2 |
| 6* | 1,15 | 630 | 43,6 | 1,34 | 771 | 53,2 |
| 7 | 1,11 | 343 | 19,7 | 1,39 | 440 | 25,3 |
| 8 | 1,11 | 481 | 23,3 | 1,34 | 619 | 29,9 |
| 9 | 1,34 | 576 | 34,3 | 1,38 | 720 | 42,9 |
| 10 | 1,31 | 641 | 21,9 | 1,26 | 780 | 26,7 |
| 11 | 1,25 | 678 | 20,6 | 1,20 | 810 | 24,6 |
| 12 | 1,18 | 705 | 18,7 | 1,22 | 830 | 21,9 |
| 13 | 1,09 | 731 | 24,0 | 1,29 | 847 | 27,8 |
| 14 | 1,10 | 753 | 13,5 | 1,28 | 861 | 15,5 |
| 15 | 1,36 | 771 | 16,9 | 1,27 | 871 | 19,1 |
| 16 | 1,35 | 781 | 15,4 | 1,12 | 877 | 17,3 |
| 17 | 1,26 | 788 | 12,8 | 1,21 | 881 | 14,3 |
| 18 | 1,22 | 796 | 7,1 | 1,19 | 884 | 7,9 |

* - проход, после которого проводится промежуточный отжиг



а



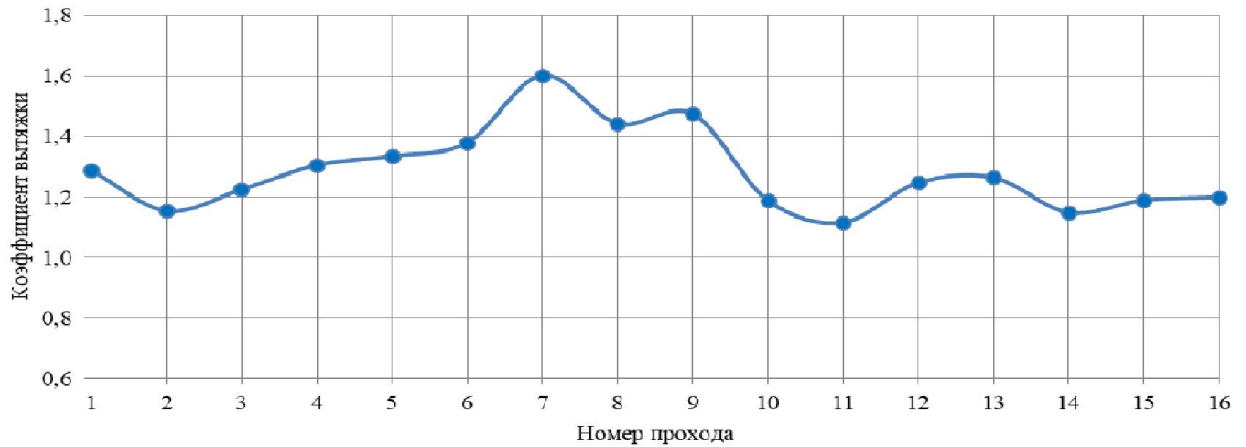
б

Рисунок 2.16 – Распределение сил по проходам при прокатке сплавов №3 и №4

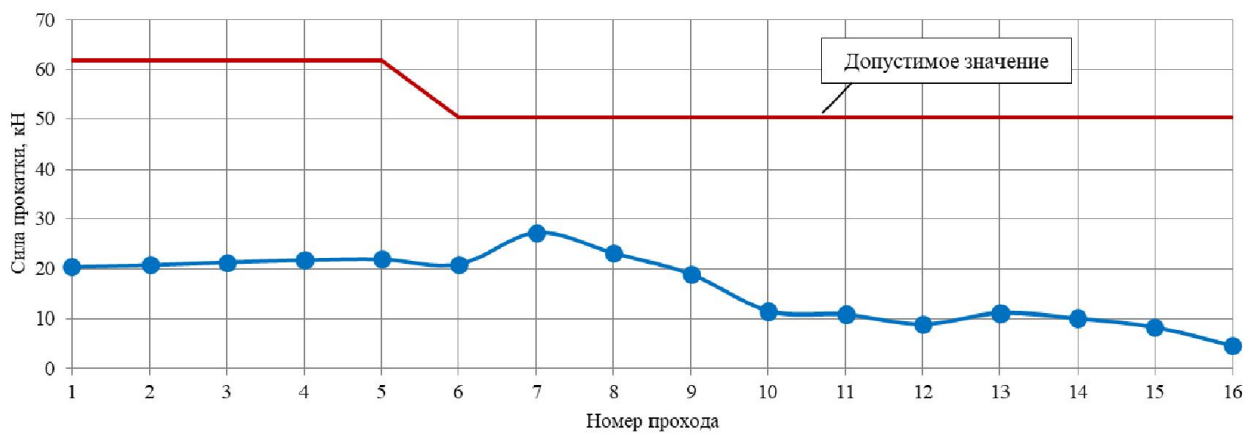
Результаты расчета рациональных режимов и силы прокатки для нового сплава серебра 925 пробы (сплав №5) приведены в табл. 2.3 и на рис. 2.17.

Таблица 2.3 – Предложенные деформационные режимы прокатки сплава серебра №5

| Номер калибра | $\lambda_{ед}$ | $\sigma^*_{т}$, МПа | $P_{п}$, кН |
|---------------|----------------|----------------------|--------------|
| 1 | 1,23 | 179 | 20,4 |
| 2 | 1,19 | 196 | 20,7 |
| 3 | 1,23 | 227 | 21,3 |
| 4 | 1,32 | 268 | 21,7 |
| 5 | 1,34 | 316 | 21,9 |
| 6 | 1,39 | 364 | 20,9 |
| 7 | 1,56 | 412 | 27,2 |
| 8 | 1,49 | 451 | 23,1 |
| 9 | 1,46 | 475 | 18,9 |
| 10 | 1,17 | 489 | 11,5 |
| 11 | 1,10 | 495 | 10,8 |
| 12 | 1,28 | 500 | 9,0 |
| 13 | 1,27 | 507 | 11,1 |
| 14 | 1,12 | 511 | 10,1 |
| 15 | 1,21 | 514 | 8,4 |
| 16 | 1,19 | 517 | 4,6 |



а



б

Рисунок 2.17 – Предложенный маршрут сортовой прокатки для сплава серебра №5:
 а – распределение коэффициента вытяжки; б – изменение силы прокатки по проходам

Анализ этих данных показывает, что предложенные деформационные режимы обеспечивают прокатку без применения промежуточного отжига за 16 проходов при выполнении ограничений по энергосиловой нагрузке.

Таким образом, новые режимы обработки металла учитывают энергосиловые ограничения, позволяют снизить вероятность возникновения брака и затраты на производство, повышают его эффективность.

Для исследования разработанных технологий для сплава золота №4 и сплава серебра №5 применялось компьютерное моделирование процесса холодной сортовой прокатки в программном пакете DEFORM-3D.

2.4 Компьютерное моделирование процесса сортовой прокатки полуфабрикатов из новых сплавов серебра и золота

Трехмерные модели заготовки и рабочего инструмента были созданы в программном комплексе SolidWorks [107] и соответствовали техническим характеристикам оборудования, применяемого в заводских условиях. Материал валка был принят абсолютно жестким, частота вращения валков в первом проходе составляла 33,3 об/мин, а в последующих рассчитывалась, исходя из закона постоянства секундных объемов и спроектированных маршрутов.

Материал заготовки был принят пластичным, реологические свойства сплавов задавали с применением данных экспериментальных исследований (см. раздел 3). Расчет велся с компенсацией потери объема, заготовка диаметром 8 мм и длиной 20 мм была разбита на 65000 конечных элементов. Трение учитывалось по закону Кулона (константа 0,8), температура металла была принята 20°C.

Полученные модели (рисунок 2.18) позволили оценить реализуемость сортовой прокатки по предложенным маршрутам, формоизменение металла в процессе обработки и энергосиловые параметры.

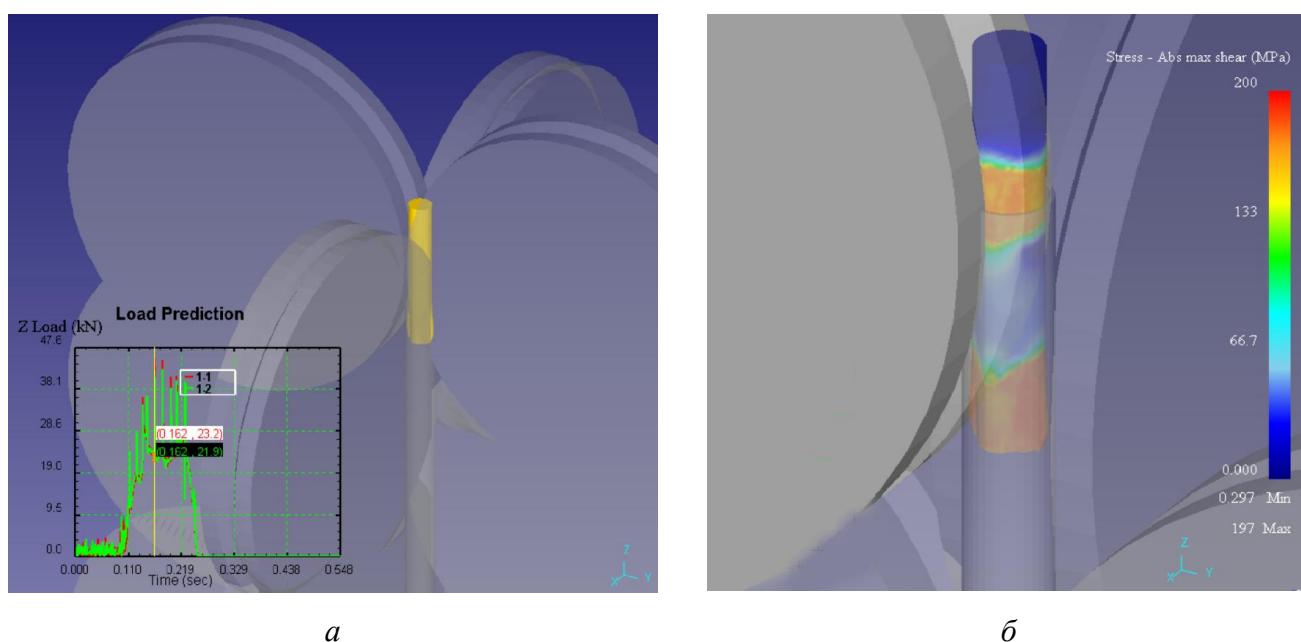


Рисунок 2.18 - Модели процесса сортовой прокатки новых сплавов: *а* – сплав №4; *б* – сплав №5

Некоторые результаты моделирования для сплава золота №4 и сплава серебра №5 приведены в таблицах 2.4 и 2.5.

Таблица 2.4 – Результаты моделирования процесса прокатки для сплава золота №4

| Номер калибра | Размер стороны, мм | $\lambda_{ед}$ | $P_{пр.м}$, кН | $P_{расч}$, кН | $P_{эксп}$, кН | Погрешность моделирование/ эксперимент |
|---------------|--------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--|
| диаметр 8 | | - | - | - | - | - |
| 1 | 6,82 | 1,08 | 45,1 | 44,3 | 45,2 | 0,04/1,9 |
| 2 | 6,40 | 1,23 | 45,8 | 45,8 | 47,5 | 3,24/3,5 |
| 3 | 5,86 | 1,35 | 54,4 | 55,8 | 56,4 | 3,69/1,1 |
| 4 | 5,29 | 1,23 | 55,9 | 58,8 | 57,0 | 4,28/-3,1 |
| 5 | 4,60 | 1,32 | 52,6 | 57,2 | 56,3 | 1,51/-1,5 |
| 6* | 3,98 | 1,34 | 47,6 | 53,2 | 55,7 | 2,68/4,4 |
| 7 | 3,38 | 1,39 | 22,0 | 25,3 | 24,6 | 1,88/-2,6 |
| 8 | 2,92 | 1,34 | 25,7 | 29,9 | 28,8 | 2,41/-4,0 |
| 9 | 2,49 | 1,38 | 36,5 | 42,9 | 44,4 | 3,63/3,5 |
| 10 | 2,22 | 1,26 | 22,7 | 26,7 | 27,1 | 3,48/1,6 |
| 11 | 2,03 | 1,20 | 21,1 | 24,6 | 24,4 | 2,86/-0,7 |
| 12 | 1,84 | 1,22 | 19,0 | 21,9 | 22,1 | 3,53/0,8 |
| 13 | 1,62 | 1,29 | 24,7 | 27,8 | 27,9 | 3,45/0,4 |
| 14 | 1,43 | 1,28 | 14,3 | 15,5 | 15,6 | 3,79/1,1 |
| 15 | 1,27 | 1,27 | 18,6 | 19,1 | 18,7 | 0,53/-2,0 |
| 16 | 1,20 | 1,12 | 17,4 | 17,3 | 16,9 | 2,35/-2,5 |
| 17 | 1,09 | 1,21 | 15,4 | 14,3 | 14,9 | 1,92/4,1 |
| 18 | 1,00 | 1,19 | 9,2 | 7,9 | 8,0 | 3,54/1,6 |

*- проход, после которого проводится отжиг

Таблица 2.5 – Результаты моделирования для сплава серебра №5

| Номер калибра | Размер стороны, мм | $\lambda_{ед}$ | $P_{пр.м}$, кН | $P_{расч}$, кН | $P_{эксп}$, кН | Погрешность моделирование/ эксперимент |
|---------------|--------------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|--|
| диаметр 8 | | - | - | - | - | - |
| 1 | 6,40 | 1,29 | 20,3 | 20,4 | 21,2 | 0,3/-4,2 |
| 2 | 5,86 | 1,15 | 20,17 | 20,7 | 20,9 | 2,6/-0,8 |
| 3 | 5,29 | 1,23 | 20,40 | 21,3 | 20,4 | 4,2/4,0 |
| 4 | 4,60 | 1,31 | 20,8 | 21,7 | 20,7 | 4,3/4,6 |
| 5 | 3,98 | 1,34 | 20,9 | 21,9 | 20,9 | 4,6/4,4 |
| 6 | 3,38 | 1,38 | 21,1 | 20,9 | 20,3 | 1,1/2,7 |
| 7 | 2,71 | 1,60 | 26,7 | 27,2 | 26,4 | 2,0/3,1 |
| 8 | 2,22 | 1,44 | 22,9 | 23,1 | 22,6 | 1,1/2,3 |
| 9 | 1,84 | 1,47 | 18,4 | 18,9 | 18,2 | 2,5/3,5 |
| 10 | 1,70 | 1,19 | 11,2 | 11,5 | 11,1 | 3,0/3,7 |
| 11 | 1,62 | 1,12 | 10,4 | 10,8 | 11,1 | 4,3/-2,4 |
| 12 | 1,43 | 1,25 | 8,7 | 9,0 | 8,8 | 3,3/2,1 |
| 13 | 1,27 | 1,26 | 10,7 | 11,1 | 10,9 | 3,9/1,9 |
| 14 | 1,20 | 1,15 | 10,1 | 10,1 | 9,8 | 0,1/2,8 |
| 15 | 1,09 | 1,19 | 8,7 | 8,4 | 8,7 | 3,9/-4,0 |
| 16 | 1,00 | 1,20 | 4,8 | 4,6 | 4,7 | 3,6/-1,6 |

Анализ данных моделирования показал, что значения силы прокатки постепенно снижаются по ходу процесса и не превышают допустимых. Анализ напряженного состояния (рис.2.19, б) показал, что максимальные растягивающие напряжения достигают величины 400 МПа для сплава №4 и 200 МПа для сплава №5. Максимальные напряжения реализуются в зоне максимального обжатия при прокатке, что соответствует традиционным представлениям теории прокатки. Так как эти напряжения не превышают критических значений, можно считать, что процессы прокатки будут протекать без образования брака (разрушения заготовки).

Сравнение результатов моделирования силы прокатки $P_{пр.м}$ с расчетными данными $P_{расч}$ (см. раздел 2.3) и экспериментальными $P_{эксп}$ (см. раздел 3) показало, что погрешность не превышает 5 %.

В ходе моделирования процесса по предложенным маршрутам в обоих случаях не наблюдалось превышения допустимых значений энергосиловых параметров, обусловленных техническими характеристиками применяемого оборудования и технико-экономическими показателями рациональности применения режимов производственного процесса.

2.5 Выводы по главе

По результатам математического и компьютерного моделирования процесса сортовой прокатки можно сделать следующие выводы.

1. Решена вариационная задача по определению формоизменения при холодной сортовой прокатке в восьмигранных калибрах и получены формулы для расчета уширения металла.

2. На основе результатов математического моделирования сортовой прокатки и методик расчета параметров прокатки и волочения разработано программное обеспечение для проектирования процессов получения прутков и проволоки из сплавов драгоценных металлов, калибровки валков, а также их моделирования и изготовления.

3. С применением программы «PROVOL» спроектированы рациональные маршруты сортовой прокатки новых сплавов, позволившие сократить количество проходов и снизить энергосиловую загрузку оборудования.

4. Так как проектирование велось для применяемого в условиях ОАО «Красцветмет» оборудования, внедрение разработанных режимов в производство не потребует дополнительных затрат на изготовление и замену валкового инструмента.

5. Выполнено компьютерное моделирование процесса сортовой прокатки новых сплавов драгоценных металлов в программном комплексе DEFORM-3D, подтвердившее реализуемость

процесса по предложенным режимам и выполнение ограничений по силовой нагрузке применяемого промышленного оборудования.

6. Анализ результатов математического и компьютерного моделирования показал, что погрешность расчетов силы прокатки по сравнению с данными экспериментальных исследований не превышает 3-5%, что позволяет сделать вывод об адекватности разработанных моделей и расчетных методик.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА СОРТОВОЙ ПРОКАТКИ НОВЫХ БЕЗНИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ СЕРЕБРА И ЗОЛОТА В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

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.

Основные результаты исследований приведены в публикациях [94, 103].

3.1 Материалы, оборудование и методика проведения исследований

Экспериментальные исследования проводили в лаборатории ювелирных технологий кафедры обработки металлов давлением института цветных металлов и материаловедения Сибирского федерального университета.

В качестве материалов для опытных исследований были выбраны три новых сплава (см. табл. 1.6):

- сплав золота 585 пробы, модифицированный родием (сплав №3);
- сплав золота 585 пробы, модифицированный родием и рутением (сплав №4);
- сплав серебра 925 пробы, модифицированный кремнием (сплав №5).

Приготовление опытных сплавов проводили в печи непрерывного литья Z50-23М, плавку шихты осуществляли в индукционной печи Z51-10 IECO.

В качестве оборудования использовали сортовой прокатный стан модели AMBIFILO VELOCE ROSEN 180+200xø130 фирмы Mario Di Maio (Италия) (рисунок 3.1) с системой восьмигранных калибров, используемой на производстве в условиях ОАО «Красцветмет». Технические характеристики стана приведены в таблице 3.1.

Литые заготовки сплава №5 подвергали сортовой прокатке на этом двухклетьевом сортовом прокатном стане без проведения промежуточного отжига, а сплавов №3 и №4 – с проведением отжига после первого этапа прокатки.

Образцы для металлографического анализа и исследования механических свойств отбирали по ходу сортовой прокатки при различных степенях накопленной деформации.



Рисунок 3.1 – Общий вид сортопрокатного стана

Таблица 3.1 – Технические характеристики прокатного стана AMBIFILO VELOCE ROSEN 180+200xø130

| Наименование параметра | Величина параметра |
|---------------------------------------|--------------------|
| Мощность двигателя, кВт | 4,8 |
| Напряжение питания сети трехфазное, В | 380 |
| Частота тока, Гц | 50 |
| Количество калибров | 38 |
| Длина бочки валков, мм | 200+180 |
| Диаметр валков, мм | 130 |
| Допустимая сила прокатки, кН | 60 |
| Скорость прокатки, м/мин | 12,5 – 26 |

Определение площади контакта металла с валками при прокатке в калибрах в значительной мере определяет точность расчета энергосиловых параметров процесса. В связи с этим было проведено экспериментальное уточнение зависимости, описывающей изменение контактной площади в процессе сортовой прокатки сплавов драгоценных металлов. Образцы - недокаты (рисунок 3.2) получали, останавливая валки прокатного стана на стадии установившегося процесса прокатки. Для аналитического расчета площади поверхности контакта металла с валками при сортовой прокатке в калибрах (рисунок 3.2) использовали систему автоматизированного проектирования AutoCAD.

Измерение силы прокатки проводили с помощью месдоз с датчиками силы CWW-50tf фирмы Dacell Co. LTD (Южная Корея) с максимально допустимым усилием сжатия 500 кН и тензометрической станции ZET 017-T8 (рисунок 3.3, а) производства отечественной фирмы ZetLab в комплексе с программным обеспечением компании. Технические характеристики тензостанции приведены в таблице 3.2. Тензодатчики устанавливали под нажимные винты

валков и фиксировали показания в процессе прокатки. Аналоговый сигнал с датчиков регистрировали тензостанцией и представляли в табличном и графическом виде (рисунок 3.3, б). Погрешность применяемого тензометрического комплекса не превышала 2%.

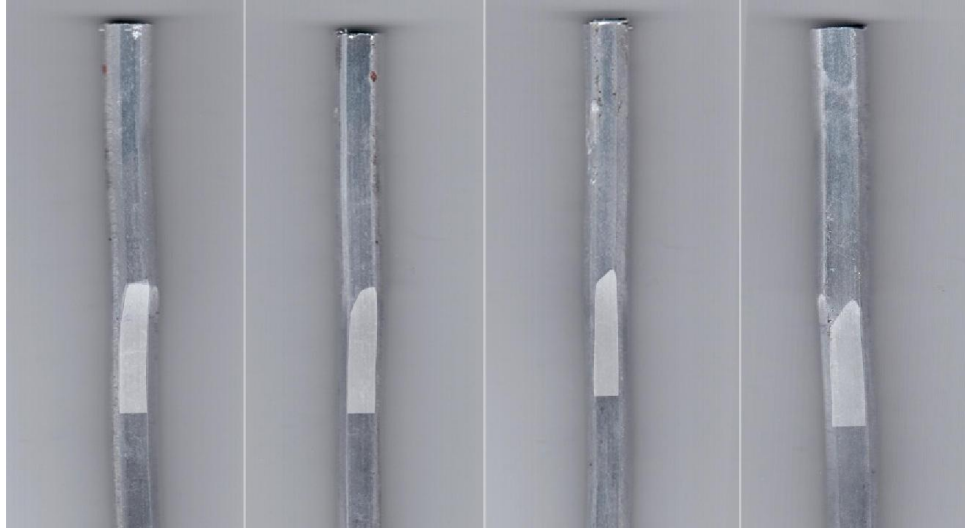
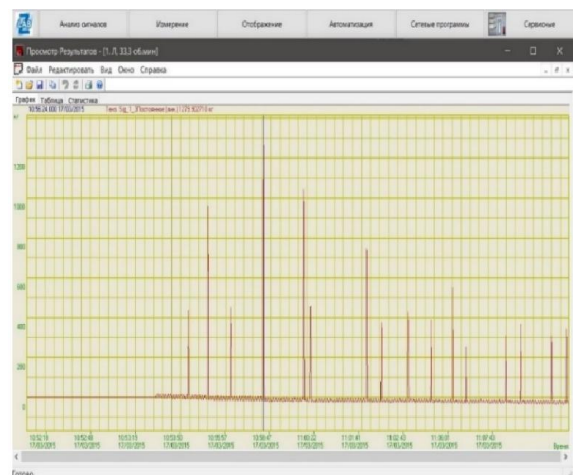


Рисунок 3.2 – Площадь контакта металла с валками на недокатах

Для испытаний механических свойств по ходу прокатки отбирали образцы полуфабрикатов сечением от $2,92 \times 2,92$ мм до $1,0 \times 1,0$ мм и рабочей длиной 50 мм. Измерения проводились в соответствии с ГОСТ 1497-84 [106] и ГОСТ 10446-80 [107] на разрывных машинах Walter+Baing testing machines LFM 400 и LFM 20 фирмы Walter Bai AG (Швейцария) с двухканальной мультимедийной системой контроля с развиваемым усилием 400 и 20 кН соответственно (рисунок 3.4).



а



б

Рисунок 3.3 – Тензометрическая станция ZET 017-T8 (а) и вид протокола замера энергосиловых параметров сортовой прокатки (б)

Таблица 3.2 – Характеристики тензометрической станции ZET 017-T8

| Наименование параметра | Величина параметра |
|--|--|
| Аналоговый вход (АЦП) | |
| Количество аналоговых входов по напряжению | 8 |
| Количество разрядов АЦП | 24 |
| Частотные диапазоны одновременно анализируемых сигналов | DC...2, DC...20, DC...200, DC...2 000, DC...20 000 Гц |
| Максимальная частота дискретизации | 400 кГц |
| Максимальное входное напряжение при единичном коэффициенте усиления | ± 10 В |
| Программируемые коэффициенты усиления | 1, 10, 100 |
| Диапазон для синфазного сигнала | $\pm 9,5$ В |
| Встроенный генератор | 8 синхронных генераторов выходное напряжение ± 10 В выходной ток 10 мА |
| Динамический диапазон | 130 дБ |
| Идентичность каналов в полосе пропускания | 0,1 % |
| Межканальная разность фаз | 1° на 10 кГц |
| Аналоговый выход (ЦАП) | |
| Количество аналоговых выходов | 1 |
| Диапазон частот генерируемого синусоидального сигнала | 0,03... 25 000 Гц |
| Выходное сопротивление | 50 Ом |
| Максимальный выходной ток | 10 мА |
| Количество разрядов ЦАП | 16 |
| Максимальное значение выходного напряжения | ± 10 В |
| Предел допускаемой относительной погрешности установки частоты для диапазона 3...25 000 Гц | $\pm 0,1$ % |
| Предел допускаемой относительной погрешности установки частоты для диапазона 0,03...3 Гц | ± 10 % |
| Пределы допускаемой погрешности установки выходного постоянного и переменного напряжения | $\pm (0,2 \% + 2 \text{ мВ})$ |
| Коэффициент гармоник генерируемого синусоидального сигнала | 0,1 % |



Рисунок 3.4 – Универсальная разрывная машина LFM 400

Микротвердость определяли на приготовленных металлографических шлифах при помощи цифрового микротвердомера DM8 (Affri, Италия), предназначенного для определения твердости очень малых (микроскопических) объемов материалов. В качестве индентора при измерении микротвердости применяли правильную четырехгранную алмазную пирамиду с углом при вершине 136° , которая плавно вдавливалась в образец при нагрузках 50 и 200 грамм (ГОСТ 9450-76 [108]). На каждый образец делали по 5 замеров при нагрузке 200 гс, при увеличении микроскопа $\times 400$.

Анализ микроструктуры исходных литых заготовок и деформированных образцов осуществлялся металлографическим методом на микрошлифах образцов. Изготовление микрошлифа проводили последовательным выполнением следующих операций: шлифование, полирование, травление.

Перед шлифованием образцы запаивали в органическое стекло с помощью паяльника с медным жалом и серебряным наконечником, выравнивали на шлифовальном круге и шлифовали в несколько переходов наждачной бумагой с последовательно уменьшающейся зернистостью. После шлифования производили полировку образцов на сукне круговыми движениями с применением алмазной пасты.

Выявление микроструктуры проводили методом химического травления, основанном на использовании различной скорости растворения отдельных участков металла, отличающихся по химическому составу и физическому строению. В качестве травителей использовали составы реактивов, приведенные в таблице 3.3. После операций химического травления образцы промывали в проточной воде.

Таблица 3.3 – Составы реактивов для травления шлифов из сплавов драгоценных металлов

| Состав реактива | Режим травления | Назначение реактивов |
|---|---|--|
| NH ₃ – 5 мл; H ₂ O ₂ (9% раствор) – 3 мл. | Время $\tau_{\text{травления}}$ до 1 мин. Травление проводили при комнатной температуре | Серебро и сплавы серебра. |
| HCl – 30 мл; HNO ₃ – 10 мл. | Время $\tau_{\text{травления}}$ до 30 сек. Температура реактива 70 °С. Удаление образующейся хлоридной пленки осуществляли 25 % водным раствором аммиака. | Золото, палладий, платина и их сплавы. |

Металлографический анализ сплавов осуществляли при помощи оптического микроскопа Axio Observer A1m фирмы Zeiss (рисунок 3.5), съемку вели цифровой видеокамерой, находящейся непосредственно на микроскопе. Изучение микроструктуры проводили при увеличении объектива 50 крат.

3.2 Планирование эксперимента и получение регрессионных зависимостей для исследуемых сплавов

Для оценки влияния величины накопленной степени деформации (ε_{Σ}) и скорости прокатки (v) на уровень механических свойств (предела текучести σ_{τ} и временного сопротивления разрыву σ_{ϵ}) исследуемого сплава серебра был спланирован и проведен полный факторный эксперимент [109]. Ниже представлен его план, полученные уравнения регрессии и результаты оценки адекватности полученных математических моделей результатам эксперимента для определения зависимостей вида $\sigma = \sigma(\varepsilon_{\Sigma}, v)$.

Уровни варьирования и параметры процесса деформации приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Условия эксперимента

| Уровень фактора | Накопленная степень деформации ε_{Σ} , % | Скорость вращения валков v , м/с |
|------------------------------------|---|------------------------------------|
| Основной $X_i = 0$ | 90 | 19,25 |
| Интервал варьирования Δx_i | 5 | 6,75 |
| Нижний $X_i = -1$ | 85 | 12,5 |
| Верхний $X_i = +1$ | 95 | 126 |
| Кодовые обозначения | X_1 | X_2 |

Деформированные образцы, полученные сортовой прокаткой при различной скорости вращения валков и различной накопленной степени деформации (см. раздел 3.3), подвергали растяжению на универсальных разрывных машинах LFM 400 и LFM 20 фирмы Walter Bai AG (Швейцария). Проводилось по три параллельных опыта с рандомизацией, где параметр σ

последовательно принимал значения предела текучести металла σ_T и временного сопротивления разрыву σ_b . План эксперимента приведен в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – План эксперимента

| Номер опыта j | X_1 | X_2 | X_1X_2 | Параллельные опыты σ , МПа | | | \bar{y}_j | σ_j^2 | \hat{y}_j | $(\hat{y}_j - \bar{y}_j)^2$ |
|--|-------|-------|----------|--------------------------------------|-------|-------|-------------|--------------|-------------|-----------------------------|
| | | | | y_1 | y_2 | y_3 | | | | |
| $\sigma_T = \sigma_T(\varepsilon_\Sigma, \nu)$ | | | | | | | | | | |
| 1 | + | + | + | 523,1 | 529,9 | 528,8 | 527,3 | 13,4 | 527,3 | 0 |
| 2 | - | + | - | 378,8 | 335,1 | 440,1 | 384,6 | 2784,8 | 384,6 | 0 |
| 3 | + | - | - | 624,7 | 522,3 | 521,6 | 556,2 | 3517,9 | 556,2 | 0 |
| 4 | - | - | + | 354,8 | 422,8 | 423,3 | 400,3 | 1554,1 | 400,3 | 0 |
| Σ | | | | | | | | 7870,3 | | 0 |
| $\sigma_b = \sigma_b(\varepsilon_\Sigma, \nu)$ | | | | | | | | | | |
| 1 | + | + | + | 559,9 | 608,3 | 603,2 | 590,5 | 707,7 | 590,5 | 0 |
| 2 | - | + | - | 514,5 | 533,4 | 539,6 | 529,2 | 170,0 | 529,2 | 0 |
| 3 | + | - | - | 638,4 | 590,6 | 589,0 | 606,0 | 788,4 | 606,0 | 0 |
| 4 | - | - | + | 548,7 | 544,4 | 551,3 | 548,1 | 11,9 | 548,1 | 0 |
| Σ | | | | | | | | 1678,0 | | 0 |

Проверка воспроизводимости опытов проводилась по критерию Кохрена при 5%-ном уровне значимости. Для обеих моделей была принята гипотеза об однородности дисперсий и был сделан вывод о воспроизводимости экспериментов.

В таблице 3.6 приведены рассчитанные значения независимых оценок коэффициентов, их значимость, а также уравнения регрессии.

Коэффициенты b_0 и b_1 были признаны значимыми, а b_2 и b_1b_2 – незначимыми, они были исключены из уравнения регрессии, как и влияние соответствующих им фактора X_1 и взаимодействие факторов X_1X_2 .

Таблица 3.6 – Независимые оценки коэффициентов уравнения регрессии и проверка адекватности модели

| Независимые оценки коэффициентов | $\sigma_T = \sigma_T(\varepsilon_\Sigma, w)$ | | $\sigma_b = \sigma_b(\varepsilon_\Sigma, w)$ | |
|----------------------------------|--|------------|--|------------|
| | Значение | Значимость | Значение | Значимость |
| b_0 | 467,09 | + | 568,44 | + |
| b_1 | 74,63 | + | 29,79 | + |
| b_2 | -11,135 | - | -8,627 | - |
| b_1b_2 | -3,313 | - | 0,8633 | - |
| Уравнение регрессии | $y = 467,09 + 74,63X_1$ | | $y = 568,44 + 29,79X_1$ | |

Для зависимостей $\sigma_T = \sigma_T(\varepsilon_\Sigma, \nu)$, и $\sigma_\sigma = \sigma_\sigma(\varepsilon_\Sigma, \nu)$ также была подтверждена адекватность полученных математических моделей результатам эксперимента (таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Проверка гипотезы об адекватности математической модели

| Показатель | $\sigma_T = \sigma_T(\varepsilon_\Sigma, w)$ | $\sigma_\sigma = \sigma_\sigma(\varepsilon_\Sigma, w)$ |
|--|--|--|
| Дисперсия воспроизводимости | 1967,57 | 419,50 |
| Дисперсия адекватности, $\cdot 10^{-27}$ | 14,54 | 6,46 |
| Критерий Фишера $F_0, \cdot 10^{27}$ | 135,32 | 64,92 |
| $F_{(0,05;8;2)}$ | 19,3 | |

После перехода от кодированных значений факторов к натуральным уравнения имеют вид:

$$\sigma_T = 14,93 \varepsilon_\Sigma - 876,25, \quad (3.1)$$

$$\sigma_\sigma = 5,36 \varepsilon_\Sigma + 32,22. \quad (3.2)$$

Таким образом, на основании проведенных исследований были получены регрессионные зависимости при 5%-ном уровне значимости для расчета механических свойств в зависимости от степени деформации для исследуемого сплава серебра. Было установлено, что скорость вращения валков прокатного стана является незначимым фактором, которым можно пренебречь при получении уравнения зависимостей для определения прочностных свойств.

Однако использование полученных линейных зависимостей не дает достаточной точности расчетов при анализе существующей и проектировании новой технологии. Для описания изменения прочностных свойств металла $\sigma_T = \sigma_T(\varepsilon_\Sigma)$ и $\sigma_\sigma = \sigma_\sigma(\varepsilon_\Sigma)$ удобнее применение полиномиальной функции второго порядка, имеющей вид:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2, \quad (3.3)$$

где x – значение фактора (ε_Σ); a_0, a_1, a_2 – коэффициенты регрессии.

Значения коэффициентов регрессии (a_i) находили из системы уравнений, полученных по способу наименьших квадратов [110], который является одним из наиболее распространенных, простых и эффективных методов оценки параметров криволинейных зависимостей.

В качестве исходных данных были приняты значения прочностных свойств, полученные в процессе экспериментальных исследований образцов и представленные в таблицах 3.8 и 3.9.

Таблица 3.8 – Парный корреляционный и регрессионный анализ зависимости $\sigma_{\tau} = \sigma_{\tau}(\varepsilon_{\Sigma})$ сплава №5

| № п/п | x | y | xy | x^2 | y^2 | x^2y | x^3 | x^4 | \hat{y} | $y - \hat{y}$ | $(y - \hat{y})^2$ |
|----------|-------|--------|----------|---------|-----------|------------|-----------|-------------|-----------|---------------|-------------------|
| 1 | 0,0 | 168,0 | 0 | 0 | 28,2 | 0 | 0 | 0 | 169,2 | -1,2 | 1,5 |
| 2 | 45,3 | 258,3 | 11708,7 | 2054,81 | 66718,9 | 530757,1 | 93144,5 | 4222239,6 | 253,1 | 5,2 | 27,3 |
| 3 | 85,5 | 422,8 | 36124,0 | 7301,70 | 178717,6 | 3086794,7 | 623930,5 | 53314859,4 | 439,7 | -16,9 | 286,2 |
| 4 | 90,3 | 466,4 | 42103,7 | 8148,67 | 217547,6 | 3800704,0 | 735580,7 | 66400870,0 | 469,2 | -2,8 | 7,6 |
| 5 | 94,9 | 522,3 | 49577,2 | 9011,70 | 272745,1 | 4706362,9 | 855481,1 | 81210825,2 | 499,2 | 23,1 | 532,7 |
| 6 | 96,0 | 521,6 | 50051,8 | 9208,32 | 272056,1 | 4802968,5 | 883630,5 | 84793186,7 | 506,0 | 15,6 | 243,3 |
| 7 | 96,8 | 492,4 | 47684,0 | 9377,99 | 242457,8 | 4617720,1 | 908164,1 | 87946613,9 | 511,9 | -19,5 | 379,2 |
| 8 | 98,0 | 516,4 | 50622,7 | 9609,88 | 266669,0 | 4962542,5 | 942056,6 | 92349810,9 | 519,9 | -3,5 | 12,3 |
| Σ | 606,8 | 3368,1 | 287872,1 | 54713,1 | 1516940,2 | 26507849,8 | 5041988,1 | 470238405,8 | 3368,1 | - | 1490,1 |

Таблица 3.9 – Парный корреляционный и регрессионный анализ зависимости $\sigma_{\varepsilon} = \sigma_{\varepsilon}(\varepsilon_{\Sigma})$ сплава №5

| № п/п | x | y | xy | x^2 | y^2 | x^2y | x^3 | x^4 | \hat{y} | $y - \hat{y}$ | $(y - \hat{y})^2$ |
|----------|-------|--------|----------|---------|-----------|------------|-----------|-------------|-----------|---------------|-------------------|
| 1 | 0,0 | 248,0 | 0 | 0 | 61,5 | 0 | 0 | 0 | 250,0 | -2,0 | 3,9 |
| 2 | 45,3 | 363,2 | 16463,9 | 2054,81 | 131914,2 | 746306,6 | 93144,5 | 4222239,6 | 355,5 | 7,7 | 59,6 |
| 3 | 85,5 | 544,4 | 46522,4 | 7301,70 | 296414,9 | 3975338,9 | 623930,5 | 53314859,4 | 557,4 | -12,9 | 167,3 |
| 4 | 90,3 | 580,2 | 52374,7 | 8148,67 | 336632,0 | 4727860,0 | 735580,7 | 66400870,0 | 588,5 | -8,3 | 68,7 |
| 5 | 94,9 | 638,4 | 60603,3 | 9011,70 | 407554,6 | 5753072,4 | 855481,1 | 81210825,2 | 620,0 | 18,4 | 339,9 |
| 6 | 96,0 | 603,2 | 57880,2 | 9208,32 | 363814,0 | 5554183,3 | 883630,5 | 84793186,7 | 627,1 | -23,9 | 572,9 |
| 7 | 96,8 | 638,4 | 61822,7 | 9377,99 | 407554,6 | 5986906,0 | 908164,1 | 87946613,9 | 633,3 | 5,1 | 26,4 |
| 8 | 98,0 | 657,5 | 64454,7 | 9609,88 | 432306,3 | 6318496,7 | 942056,6 | 92349810,9 | 641,7 | 15,8 | 250,8 |
| Σ | 606,8 | 4273,3 | 360121,8 | 54713,1 | 2376252,1 | 33062164,0 | 5041988,1 | 470238405,8 | 4273,3 | - | 1489,5 |

Для обеих моделей был сделан вывод о высокой степени значимости коэффициентов корреляции. Результаты статистической оценки показателей связи приведены в табл. 3.10, а адекватности полученных уравнений регрессии в табл. 3.11.

Таблица 3.10 – Проверка коэффициента корреляции

| Показатель | | $\sigma_T = \sigma_T(\varepsilon_\Sigma)$ | $\sigma_\varepsilon = \sigma_\varepsilon(\varepsilon_\Sigma)$ |
|-------------------------------|----------|---|---|
| Сумма квадратов | S_{xx} | 11885,78 | 11785,78 |
| | S_{yy} | 93604,82 | 93604,82 |
| | S_{xy} | 32785,89 | 32885,89 |
| Коэффициент корреляции, r_0 | | 0,905 | 0,983 |
| α | | 0,01 | |
| Φ | | 6 | |
| $\Gamma_{\Phi\alpha}$ | | 0,834 | |

Таблица 3.11 – Регрессионный анализ зависимостей механических свойств сплава №5

| Параметр | $\sigma_T = \sigma_T(\varepsilon_\Sigma)$ | $\sigma_\varepsilon = \sigma_\varepsilon(\varepsilon_\Sigma)$ |
|--|---|---|
| Общая дисперсия, σ_y^2 | 14131,4 | 13372,1 |
| Остаточная дисперсия, $\sigma_{ост}^2$ | 248,4 | 248,2 |
| Критерий Фишера F_0 | 56,90 | 53,87 |
| Критерий Фишера табличный $F_{7;6;0,05}$ | 4,3 | |

По аналогичной методике с использованием метода планирования эксперимента были получены уравнения для сплавов белого золота 585 пробы. Таким образом, уравнения зависимости механических свойств от накопленной степени деформации для исследуемых сплавов имеют вид:

$$\text{сплав №1: } \sigma_T = -0,0096 \varepsilon_\Sigma^2 + 2,60 \varepsilon_\Sigma + 150,96; \quad (3.4)$$

$$\sigma_\varepsilon = -0,0023 \varepsilon_\Sigma^2 + 2,55 \varepsilon_\Sigma + 333,91. \quad (3.5)$$

$$\text{сплав №2: } \sigma_T = -0,0041 \varepsilon_\Sigma^2 + 2,02 \varepsilon_\Sigma + 150,72; \quad (3.6)$$

$$\sigma_\varepsilon = -0,0017 \varepsilon_\Sigma^2 + 3,11 \varepsilon_\Sigma + 220,18. \quad (3.7)$$

$$\text{сплав №3: } \sigma_T = -0,0045 \varepsilon_\Sigma^2 + 6,20 \varepsilon_\Sigma + 265,84; \quad (3.8)$$

$$\sigma_\varepsilon = -0,0434 \varepsilon_\Sigma^2 + 9,44 \varepsilon_\Sigma + 336,25. \quad (3.9)$$

$$\text{сплав №4: } \sigma_T = -0,0036 \varepsilon_\Sigma^2 + 9,41 \varepsilon_\Sigma + 321,22; \quad (3.10)$$

$$\sigma_\varepsilon = -0,0074 \varepsilon_\Sigma^2 + 12,39 \varepsilon_\Sigma + 401,31. \quad (3.11)$$

$$\text{сплав №5: } \sigma_T = 0,0328 \varepsilon_\Sigma^2 + 0,36 \varepsilon_\Sigma + 169,24; \quad (3.12)$$

$$\sigma_\varepsilon = 0,0317 \varepsilon_\Sigma^2 + 0,89 \varepsilon_\Sigma + 249,97. \quad (3.13)$$

При этом погрешность расчетов не превышает 5 % при сравнении с экспериментальными данными.

Полученные зависимости использовали для компьютерного моделирования процесса сортовой прокатки и проектирования новых технологий производства деформированных полуфабрикатов из исследуемых сплавов с помощью разработанного программного обеспечения (см. главу 2).

3.3 Результаты экспериментальных исследований процесса сортовой прокатки нового сплава серебра 925 пробы и их анализ

Сортовая прокатка заготовки из исследуемого сплава серебра диаметром 8 мм велась в соответствии со спроектированным маршрутом (см. раздел 2.3) при скорости прокатки 13,6 м/мин. По ходу процесса отбирали образцы для исследования механических свойств и микроструктуры и фиксировали энергосиловые параметры процесса. Высокий уровень пластических свойств сплава позволил исключить операции промежуточного отжига.

В ходе анализа результатов измерений энергосиловых параметров процесса было установлено, что погрешность опытно установленных величин в сравнении с расчетными по методике, изложенной в работе [19], превышает 20%. Причем расхождение увеличивается с уменьшением площади поперечного сечения проката. В связи с этим появилась необходимость уточнения формулы для расчета площади контакта металла проката с валками. Для решения этой задачи по описанной выше методике были определены контактные площади полуфабрикатов по проходам для данной системы калибров (таблица 3.12). Аппроксимацию эмпирических данных проводили в программном продукте Microsoft Office Excel (рисунок 3.7). Коэффициент детерминации составил $R^2 = 0,998$.

Формула для определения площади контакта металла с валками имеет вид:

$$F_{\text{конт}} = -0,3062 \cdot x_i^2 + 21,708 \cdot x - 12,456, \quad (3.14)$$

где x – сторона калибра, мм.

Достоверность полученной формулы подтвердилась экспериментальными данными (таблица 3.12 и рисунок 3.5). Погрешность определения расчетной силы по формуле (2.64) с использованием формулы (3.14) в этом случае не превышает 5 % (таблица 3. 13).

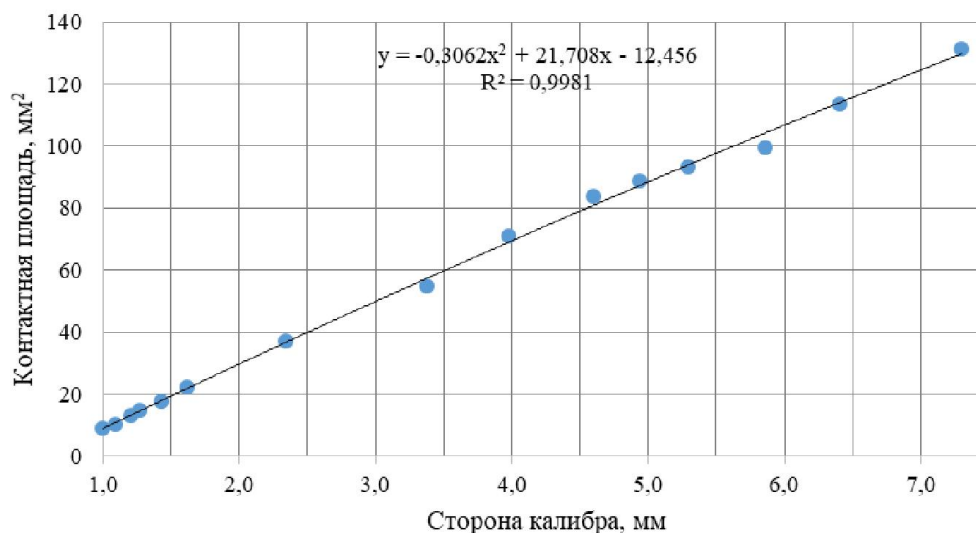


Рисунок 3.5 – Экспериментальные и расчетные значения контактной площади

Таблица 3.12 – Экспериментальное определение контактной площади при сортовой прокатке сплавов драгоценных металлов

| № калибра | Сторона калибра, мм | Контактная площадь, мм ² | № калибра | Сторона калибра, мм | Контактная площадь, мм ² |
|-----------|---------------------|-------------------------------------|-----------|---------------------|-------------------------------------|
| 1 | 7,3 | 131,43 | 9 | 2,34 | 37,10 |
| 2 | 6,4 | 113,72 | 10 | 1,62 | 22,21 |
| 3 | 5,86 | 99,38 | 11 | 1,43 | 17,67 |
| 4 | 5,29 | 93,14 | 12 | 1,27 | 14,79 |
| 5 | 4,94 | 88,85 | 13 | 1,20 | 13,18 |
| 6 | 4,60 | 83,68 | 14 | 1,09 | 10,42 |
| 7 | 3,98 | 71,18 | 15 | 1,00 | 8,95 |
| 8 | 3,38 | 54,81 | | | |

Таблица 3.13 – Сравнение экспериментальных и расчетных значений силы прокатки

| Степень деформации, % | Предел текучести, МПа | Сила прокатки, кН | | Погрешность, % |
|-----------------------|-----------------------|-------------------|-------|----------------|
| | | P_s | P_p | |
| 77,2 | 386 | 20,3 | 20,9 | 2,7 |
| 85,8 | 437 | 26,4 | 27,2 | 3,1 |
| 90,1 | 465 | 22,6 | 23,1 | 2,3 |
| 93,3 | 486 | 18,2 | 18,9 | 3,5 |
| 94,4 | 493 | 11,1 | 11,5 | 3,7 |
| 95,0 | 497 | 11,1 | 10,8 | -2,4 |
| 96,0 | 504 | 8,8 | 9,0 | 2,1 |
| 96,8 | 510 | 10,9 | 11,1 | 1,9 |
| 97,2 | 513 | 9,8 | 10,1 | 2,8 |
| 97,7 | 516 | 8,7 | 8,4 | -4,0 |
| 98,1 | 519 | 4,7 | 4,6 | -1,6 |

Результаты расчета коэффициента уширения по формуле 2.29 при значениях параметров $A=45$, $\alpha=0,4$, также были сопоставлены с экспериментальными данными (рис. 3.6), при этом установлено, что погрешность не превышает 2,5%.

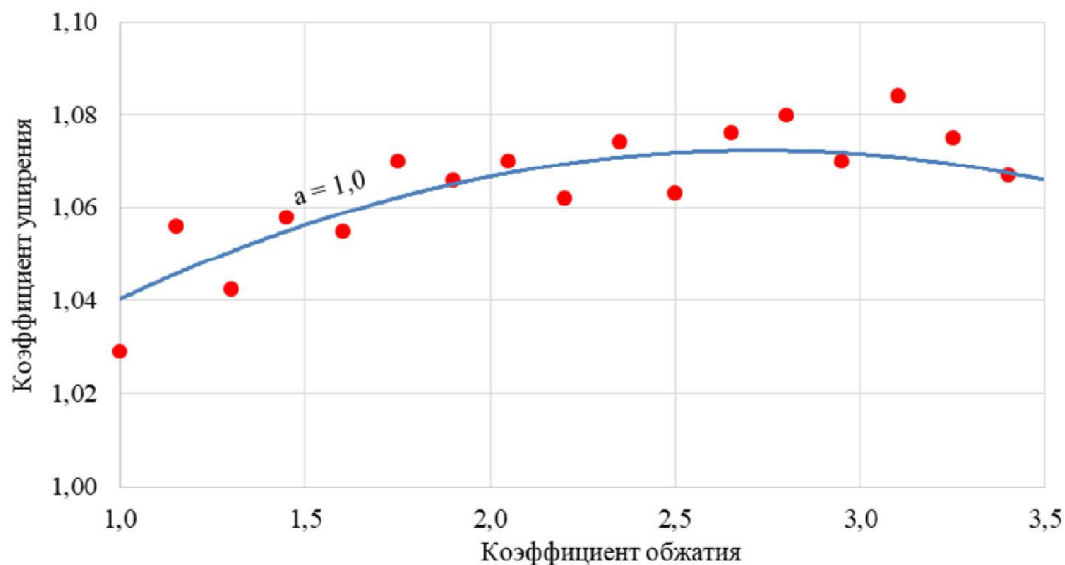


Рисунок 3.6 – Распределение опытных и расчетных значений коэффициента уширения

Прочностные и пластические свойства, а также значения микротвердости литых и деформированных образцов, отобранных по ходу сортовой прокатки при различной суммарной степени деформации, приведены в таблице 3.14.

Таблица 3.14 – Свойства литых и деформированных образцов из сплава №5

| Проход, после которого отбирался образец | Степень деформации, % | Предел текучести, МПа | Временное сопротивление разрыву, МПа | Относительное удлинение, % | Микротвердость, кгс/мм ² |
|--|-----------------------|-----------------------|--------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| 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 |

Металлографические исследования структуры литой заготовки (рис. 3.7) показали, что в периферийных зонах наблюдаются столбчатые кристаллы, а в центре образца формируются равноосные зерна различного размера (рисунок 3.7, а). Внутри равноосных зерен крупного

размера (от 260 мкм) видна дендритная ликвация (рисунок 3.7, б), тогда как в зернах меньшего размера она не наблюдается, поскольку успевают пройти процессы выравнивающей диффузии.

При исследовании металлургического качества слитка литейных дефектов обнаружено не было. Средний размер зерна исследуемой литой заготовки составил 216 мкм. Средний размер дендритной ячейки равен 7 мкм, что свидетельствует о большой степени переохлаждения при кристаллизации (высокой скорости охлаждения в кристаллизационном интервале температур).

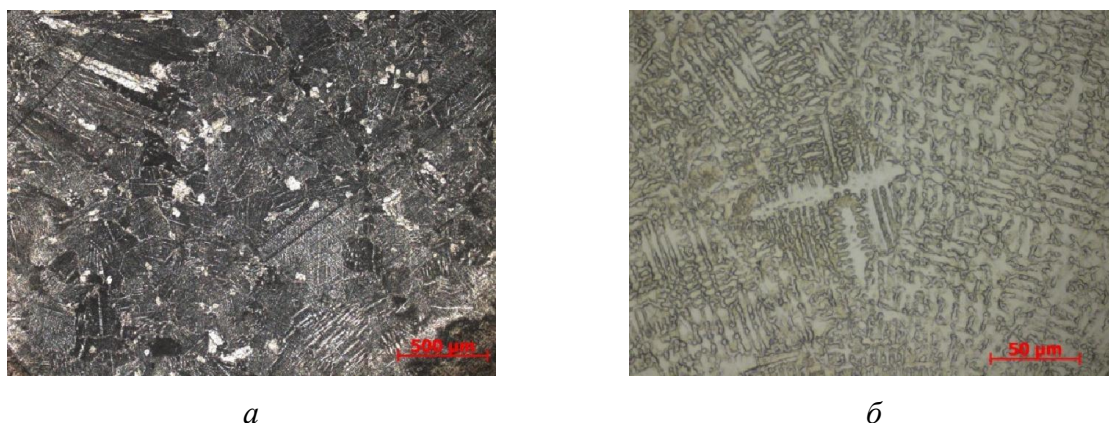


Рисунок 3.7 – Микроструктура исходной литой заготовки из сплава №5: а – $\times 50$; б – $\times 500$

Структура литой заготовки из исследуемого сплава характеризуется наличием дендритной ликвации, которая не была устранена, поскольку не проводился гомогенизационный отжиг. Она наследуется и при деформации, образуя строчечность, однако не ухудшает технологические свойства сплава.

Микроструктура деформированных образцов с различной степенью деформации приведена на рисунке 3.8. При степенях обжатия 85,5 % и 90,3 % (рисунок 3.8, а, б) литая дендритная структура сохраняется, наблюдается незначительное вытягивание зерен в направлении оси деформации.

При дальнейшей обработке литая дендритная структура и химическая неоднородность внутри зерен сохраняются, наблюдается их незначительное вытягивание в направлении оси деформации, структура образца становится волокнистой (рисунок 3.8, в, г). Хорошо просматривается строчечная структура деформированного материала. При пластической деформации происходит преобразование литой структуры от дендритной химически неоднородной до относительно однородной на конечном переделе в результате постепенного выравнивания химического состава в микрообъемах – образец со степенью деформации 98,1 % имеет волокнистое строение (рисунок 3.8, д). Структура образца представлена дисперсными

деформированными зернами и сложно разрешается даже при увеличении микроскопа в 100 крат.

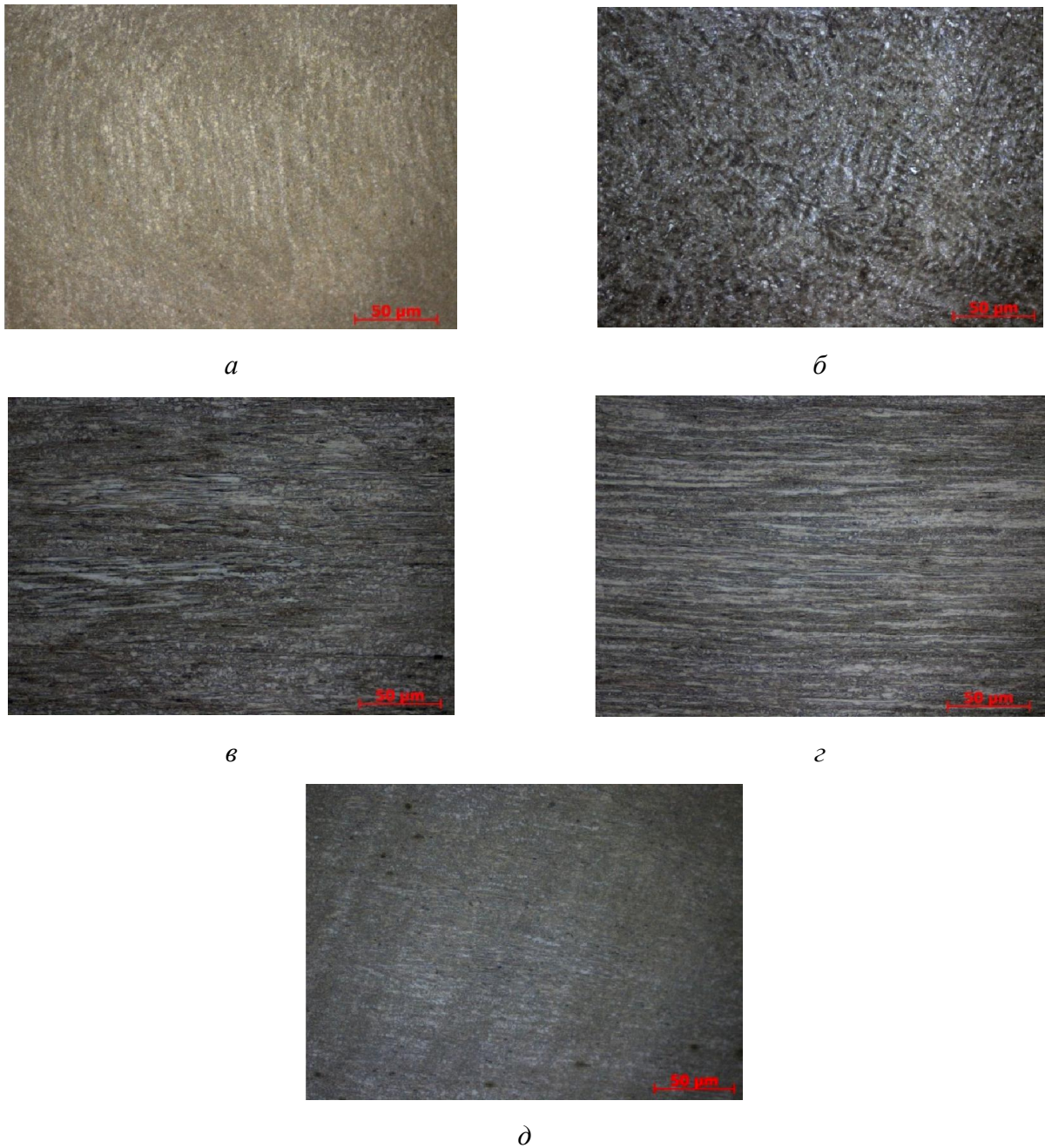


Рисунок 3.8 – Микроструктура образцов из сплава №5, прокатанных с различной степенью деформации, $\times 500$: *a* – 85,8 %; *б* – 90,1 %; *в* – 95,0 %; *г* – 96,8%; *д* – 98,1 %

Таким образом, исследования показали, что опытный сплав серебра можно подвергать холодной пластической деформации без промежуточной термической обработки, что приводит к значительному снижению энерго- и трудозатрат при производстве проволоки ювелирного назначения.

3.4 Результаты экспериментальных исследований процесса сортовой прокатки новых сплавов золота 585 пробы и их анализ

Сортовая прокатка опытных сплавов золота 585 пробы (№3 и №4) велась в соответствии со спроектированными маршрутами (см. главу 2) с применением уточненной формулы определения контактной площади (3.14).

Прокатка осуществлялась в два этапа с промежуточным отжигом (10 минут при температуре 675°C). Исследования велись при скорости прокатки 13,6 м/мин. По ходу процесса отбирались образцы для исследования механических свойств и микроструктуры и фиксировались энергосиловые параметры. По описанной ранее методике в процессе сортовой прокатки определялись энергосиловые параметры. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных величин приведены в таблицах 3.15 и 3.16. Как видно, погрешность определения расчетной силы сортовой прокатки по формуле (2.64) с использованием формулы (3.14) для сплавов № 3 и № 4 также не превышает 5 %.

Таблица 3.15 – Сравнение экспериментальных и расчетных значений силы прокатки для сплава №3

| Степень деформации, % | Предел текучести σ_T , МПа | $P_{п\text{эксп.}}$, кН | $P_{п\text{расч.}}$, кН | Погрешность, % |
|-----------------------|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------|
| 44,3 | 487 | 40,1 | 39,0 | 2,9 |
| 58,0 | 601 | 42,8 | 41,8 | 2,3 |
| 68,3 | 660 | 44,2 | 43,4 | 1,8 |
| 28,3* | 429 | 17,8 | 17,2 | 3,6 |
| 46,2 | 534 | 20,3 | 20,0 | 1,4 |
| 61,1 | 619 | 29,4 | 29,2 | 0,7 |
| 69,0 | 663 | 19,2 | 18,7 | 2,6 |
| 74,4 | 693 | 17,9 | 17,6 | 1,5 |
| 78,8 | 730 | 16,5 | 16,2 | 2,1 |
| 83,6 | 802 | 21,7 | 21,3 | 1,7 |
| 87,2 | 804 | 12,7 | 12,5 | 2,0 |
| 90,1 | 806 | 16,7 | 16,4 | 1,7 |
| 91,1 | 807 | 15,8 | 16,1 | 1,9 |
| 92,6 | 809 | 14,3 | 15,0 | 4,7 |
| 93,8 | 878 | 9,5 | 9,4 | 1,1 |

* - проведен отжиг

Прочностные и пластические свойства, а также значения микротвердости литых и деформированных образцов, отобранных по ходу сортовой прокатки при различной суммарной степени деформации, приведены в таблицах 3.17 и 3.18.

Таблица 3.16 – Сравнение экспериментальных и расчетных значений силы прокатки для сплава №4

| Степень деформации, % | Предел текучести σ_T , МПа | $R_{п\text{ эксп.}}$, кН | $R_{п\text{ расч.}}$, кН | Погрешность, % |
|-----------------------|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------|
| 44,3 | 667 | 56,0 | 55,9 | 0,3 |
| 58,0 | 746 | 54,3 | 52,6 | 3,2 |
| 68,3 | 780 | 49,7 | 47,6 | 4,2 |
| 28,3* | 559 | 21,0 | 21,5 | -2,5 |
| 46,2 | 679 | 24,8 | 25,7 | -3,7 |
| 61,1 | 762 | 35,4 | 36,5 | -3,0 |
| 69,0 | 799 | 22,1 | 22,7 | -2,8 |
| 74,4 | 809 | 20,4 | 21,1 | -3,1 |
| 78,8 | 838 | 18,1 | 19,0 | -3,7 |
| 83,6 | 855 | 25,9 | 24,7 | 4,8 |
| 87,2 | 867 | 14,6 | 14,3 | 2,6 |
| 90,1 | 875 | 17,7 | 18,3 | -4,8 |
| 91,1 | 879 | 16,9 | 17,4 | -3,0 |
| 92,6 | 883 | 16,1 | 15,4 | 4,4 |
| 93,8 | 907 | 9,3 | 9,4 | 1,0 |

* - проведен отжиг

Структура нового сплава №3 в литом состоянии (рисунок 3.9) характеризуется наличием дендритной ликвации, однако имеет тонкоразветвленные ветви дендритов с малым размером дендритной ячейки. Обеспечивается получение тонкоразветвленных дендритных кристаллов, размер дендритной ячейки составляет 4 мкм (рисунок 3.9, а). Химической неоднородности и грубого дендритного строения не наблюдалось.

Таблица 3.17 – Свойства литых и деформированных образцов из сплавов №3

| Проход, после которого отбирался образец | Степень деформации, % | Предел текучести, МПа | Временное сопротивление разрыву, МПа | Относительное удлинение, % | Микро-твердость, кгс/мм ² |
|--|-----------------------|-----------------------|--------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| 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 |

Таблица 3.18 – Свойства литых и деформированных образцов из сплавов №4

| Проход, после которого отбирался образец | Степень деформации, % | Предел текучести, МПа | Временное сопротивление разрыву, МПа | Относительное удлинение, % | Микротвердость, кгс/мм ² |
|--|-----------------------|-----------------------|--------------------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| 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 |

На первых этапах сортовой прокатки деформация протекала по механизму двойникования (рисунок 3.9, *б*), но далее деформация проходила по более благоприятному механизму скольжения (рисунок 3.9, *в*). К последним проходам прокатки (рисунок 3.9, *г*) была достигнута однородная по длине и сечению полуфабриката волокнистая структура.

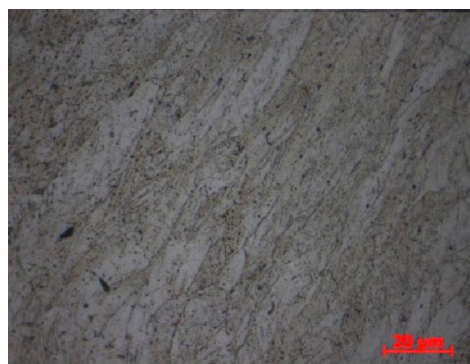
*a**б**в**г*

Рисунок 3.9 – Микроструктура сплава №4:

a – в литом состоянии, $\times 200$; *б* – степень деформации 44,3 %, $\times 500$;
в – степень деформации 68,9%, $\times 1000$; *г* – степень деформации 93,8 %, $\times 200$

Таким образом, в ходе экспериментальных исследований были опробованы спроектированные маршруты и определены силовые параметры сортовой прокатки новых сплавов золота 585 пробы (сплавы №3 и №4), из которых получены опытные образцы литых и деформированных полуфабрикатов, и изучены их структура и свойства.

3.5 Выводы по главе

Анализ результатов выполненных работ позволил сделать следующие выводы.

1. С применением промышленного оборудования проведены экспериментальные исследования формоизменения металла и энергосиловых параметров сортовой прокатки для новых сплавов серебра и золота с использованием спроектированных режимов деформации.

2. Уточнена формула определения контактной площади металла с валками, с помощью которой проведены расчеты силы прокатки и сравнение с опытными значениями, при этом погрешность не превышает 5%.

3. Замеры уширения при физическом моделировании процесса сортовой прокатки в восьмигранных калибрах подтвердили адекватность математической модели формоизменения, разработанной в главе 2, и позволили рекомендовать формулу для расчета коэффициента уширения применительно к промышленным условиям прокатки.

4. Проведены металлографические исследования структуры и получены данные по механическим свойствам новых сплавов серебра 925 пробы и золота 585 пробы, которые использовались для расчета силы прокатки и компьютерного моделирования процесса деформации металла.

5. Выполнено планирование полного факторного эксперимента, проведен регрессионный анализ и получены уравнения для расчета временного сопротивления разрыву и предела текучести металла для исследуемых сплавов.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И ИХ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ

Обзор патентно-технической литературы показал актуальность создания новых композиций сплавов драгоценных металлов на основе золота и серебра, не имеющих в своем составе никеля, и технологий их деформационной и термической обработки. В связи с этим учеными института цветных металлов и материаловедения Сибирского федерального университета был разработан ряд сплавов на основе золота белого цвета 585 пробы и сплав белого цвета на основе серебра 925 пробы [24 – 26, 31, 37]. Для двух из них проведена промышленная апробация разработанных технических и технологических решений для получения длинномерных деформированных полуфабрикатов. Приведены результаты исследований структуры и свойств этих полуфабрикатов из новых сплавов белого золота 585 пробы (сплавы №1 и 2) в условиях ОАО «Красцветмет».

Основные результаты исследований приведены в работе [111].

4.1 Новые технические решения по составам сплавов драгоценных металлов

С целью совершенствования материалов для изготовления ювелирных изделий был разработан и запатентован ряд безникелевых сплавов на основе золота 585 пробы. Их химические составы приведены в таблице 1.6.

Основной задачей являлось создание новых сплавов на основе золота 585 пробы белого цвета, обладающих высокой коррозионной стойкостью и имеющих повышенный уровень потребительских и механических свойств, а также их равномерным распределением по длине.

Содержание золота находилось в пределе 58,0-59,0 %, благодаря чему обеспечивалась пробность сплавов. Введение палладия являлось оптимальным для замещения никеля, повышения коррозионной стойкости, предотвращения охрупчивания и обеспечения цветовой гаммы сплавов. Медь понижает температуру плавления, обеспечивает необходимую пластичность и улучшает технологичность сплавов при литье. Цинк снижает температуру плавления, а серебро придает сплавам мягкость, ковкость и понижает температуру плавления. Добавка индия в пределах 0,4-0,6 мас. % обеспечивает необходимый интервал температуры плавления сплава – 950 ± 500 °С.

Рутений в пределах 0,01-0,10 мас. %, являясь модифицирующей добавкой, обеспечивает получение мелкозернистой структуры сплавов №1 [24] и 2 [25], обеспечивая

необходимый диапазон изменения размера зерен в пределах 5-10 мкм, повышает пластичность и выравнивает свойства по длине литой заготовки. Однако ограниченная растворимость рутения в золоте из-за высокой температуры плавления приводит к образованию крупных включений в структуре сплава, что становится причиной возникновения брака при обработке давлением и требует иного способа введения его в расплав.

В связи с этим был разработан модифицированный родием сплав №3 [26], обеспечивающий получение однородной мелкозернистой структуры изделия и значительное повышение прочностных свойств и пластичности. Однако применение родия при производстве ювелирных изделий удорожает их из-за его высокой рыночной стоимости. Для достижения повышенных технологических и эксплуатационных свойств сплава и снижения стоимости изделий из него был разработан состав сплава №4 [31]. Совместное применение родия и рутения в качестве модификаторов позволило обеспечить высокий модифицирующий эффект, поскольку введение рутения значительно влияет на структуру в литом состоянии, а родия – в деформированном. При этом снизилось количество вводимого родия, стоимость которого до десяти раз выше стоимости рутения.

Исследования показали, что разработанные сплавы по сравнению с известными обладают более равномерной структурой, высоким уровнем механических и технологических свойств.

Также был запатентован сплав белого цвета на основе серебра 925 пробы, модифицированного кремнием (сплав №5) [37]. Основной задачей изобретения являлось создание нового белого сплава на основе серебра 925 пробы, не содержащего никель, обладающего высокой коррозионной стойкостью и имеющего повышенный уровень потребительских и механических свойств.

Добавление цинка, олова и индия снижает температуру плавления сплава, придает хорошую пластичность и полируемость, уменьшает потускнение сплава на воздухе. Содержание легирующих компонентов в заявленных пределах обеспечивает равномерную мелкозернистую структуру по всей длине заготовки и необходимый уровень механических свойств. Введение в состав сплава кремния в качестве модификатора приводит к образованию структуры, имеющей равноосные зерна с четким очертанием границ, и одновременно повышает и прочностные, и пластические характеристики.

Таким образом, применение новых (№ 1 – 5) сплавов дает возможность повысить их технологические свойства и использовать в производстве ювелирных изделий, применяя режимы обработки с использованием повышенных степеней деформации.

Однако внедрение новых сплавов в производство требует совершенствования способов их приготовления. Так применение в качестве модифицирующей добавки в сплавах на основе золота рутения из-за его ограниченной растворимости требует поиска нового способа приготовления сплавов.

4.2 Новые технологические решения по обработке сплавов на основе золота 585 пробы

С целью повышения механических свойств и измельчения структуры новых сплавов белого и красного золота использовался рутений, однако применение этого металла потребовало поиска нового способа введения его в расплав, поэтому был разработан и запатентован новый способ модифицирования сплавов на основе золота 585 пробы [112].

Известен способ модифицирования сплавов цветных металлов, включающий подачу расплава металла в индуктор, обработку его переменным магнитным полем, охлаждение и последующую кристаллизацию. При этом модифицирование и удержание расплава металла осуществляется непосредственно в области кристаллизации путем воздействия на него переменным электромагнитным полем повышенной частоты, а охлаждение осуществляют подачей охлаждающей жидкости непосредственно на поверхность расплава [113]. Однако этот способ применим для сплавов цветных металлов, имеющих небольшой удельный вес (в основном алюминиевых), тогда как для сплавов золота необходимо значительное увеличение мощности генератора для удержания расплава в электромагнитном поле и на практике эта задача для сплавов тяжелых металлов еще не решена.

В соответствии с патентом [114] сплав на основе золота, получают следующим образом: сплавление цинка с серебром, расплавление золота, добавление лигатуры цинк-серебро в расплав, введение меди, введение рутения. Недостатком известного способа является неравномерное распределение рутения по объему сплава.

Таким образом, недостатком известных способов модифицирования сплавов на основе золота является плохая растворимость рутения в золоте из-за его высокой температуры плавления, в связи с чем, он распределяется по сплаву неравномерно, с образованиями крупных включений (рисунок 4.1, *a*), и снижается модифицирующий эффект.

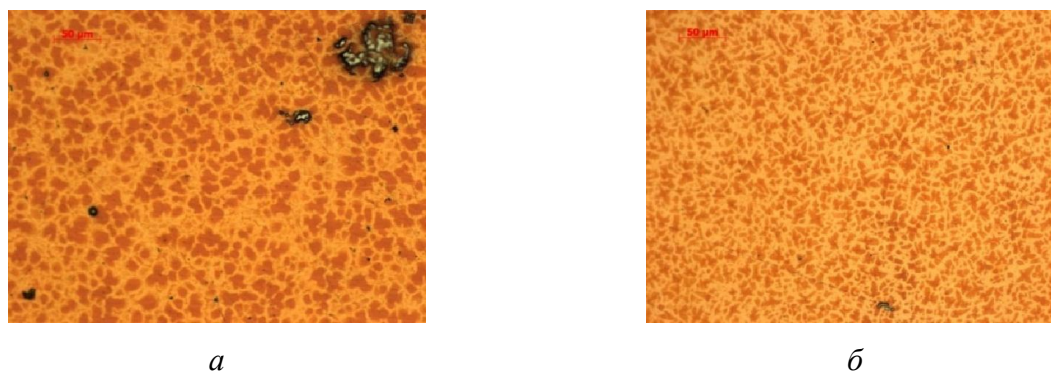


Рисунок 4.1 – Микроструктура сплавов золота 585 пробы в литом состоянии, модифицированных способами: *а* – известный; *б* – новый; $\times 500$

Для повышения качества и модифицирующей способности лигатурного материала, выражающейся в измельчении зеренного строения слитков сплавов золота, был разработан новый способ модифицирования сплавов. Согласно предлагаемому техническому решению 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.

Литые и деформированные полуфабрикаты из сплава, полученного заявляемым способом, обладают равномерной мелкозернистой структурой по всей длине и сечению слитка (рисунок 4.1, *б*), что характеризует высокое качество и эффективность модифицирования.

4.3 Опытно-промышленная апробация технологии получения проволоки из новых сплавов драгоценных металлов

Опытно-промышленную апробацию в условиях ОАО «Красцветмет» (Приложение Б) прошли сплавы золота белого цвета 585 пробы, модифицированные рутением (сплавы №1 и №2). Полученные данные по структуре и свойствам новых сплавов сравнивали с характеристиками никельсодержащего сплава белого золота ЗлНЦМ 585-12,5-4 [10], для чего произвели опытную промышленную плавку и получили непрерывнолитую заготовку из этого сплава диаметром 8 мм.

Сплавы №1 и №2 для исследований были получены в соответствии с предложенным техническим решением [114] прямым сплавлением основных

компонентов. Модифицирующие добавки лигатуры Ag-Ru вводились в расплав непосредственно перед литьем. В соответствии с промышленной технологией слитковая заготовка диаметром 8 мм была изготовлена с применением печи непрерывного литья Z50-26M IECO (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 (см. рисунок 1.7). Режимы деформации и термической обработки представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Режимы деформации и термической обработки прутка

| 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 |

Затем осуществлялось волочение проволоки на десятикратном волочильном стане до конечного диаметра 0,25 мм с последующим отжигом в протяжной печи при температуре 720 °С и скорости протяжки 120 м/мин. Установлено, что физико-технические характеристики изготовленной проволоки отвечают принятым на производстве стандартам.

Для определения механических свойств металла образцы исследуемых сплавов после литья и сортовой прокатки испытывали на разрыв с помощью универсальной электромеханической машины «LFM-400» (Walter + Bai AG, Швейцария), а после волочения - на универсальной разрывной машине «H5K-S» (HOUNSFIELD TEST EQUIPMENT LTD, Великобритания). Испытания проводились в соответствии с требованиями, регламентированными ГОСТ 1497-84 [106], ГОСТ 10446-80 [107] для методов растяжения. Предусматривались не менее трех образцов на точку исследуемого параметра. Механические свойства сплава ЗлНЦМ 585-12,5-4 приведены в таблице 4.2.

Исследования механических свойств полуфабрикатов из сплавов №1 и №2 в деформированном и отожженном состоянии (таблица 4.3) показали, что они имеют достаточно высокий уровень пластических и прочностных свойств, не уступающих никельсодержащему сплаву ЗлНЦМ 585-12,5-4, что обеспечивает получение проволоки для сцепывания с высокими потребительскими характеристиками.

Таблица 4.2 – Механические свойства полуфабрикатов из сплава ЗлНЦМ 585-12,5-4 опытно-промышленной плавки

| Операция | Размер стороны, мм | Деформированное состояние | | | Отожженное состояние | | |
|-----------------|--------------------|---------------------------|--------------|--------------------------------------|----------------------|--------------|--------------------------------------|
| | | σ_b , МПа | δ , % | Микро-твердость, кгс/мм ² | σ_b , МПа | δ , % | Микро-твердость, кгс/мм ² |
| 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 |

Таблица 4.3 – Механические свойства полуфабрикатов из сплавов №1 и №2 опытно-промышленной плавки

| Операция | Размер стороны, мм | Деформированное состояние | | | Отожженное состояние | | |
|-----------------|--------------------|---------------------------|--------------|--------------------------------------|----------------------|--------------|--------------------------------------|
| | | σ_b , МПа | δ , % | Микро-твердость, кгс/мм ² | σ_b , МПа | δ , % | Микро-твердость, 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 |

Анализ макроструктуры литых образцов из никельсодержащего сплава ЗлНЦМ 585-12,5-4 (рисунок 4.2 *а, б*) показывает, что для сплавов №1 и №2 применение модифицирования измельчает макростроение слитков (рисунок 4.2 *в, д*). Приведенные снимки поверхности образцов после разрыва констатируют, что степень измельчения зерен увеличивается при переходе от начала к концу литой заготовки (рисунок 4.2 *з, е*).

Микроструктура сплавов в литом состоянии характеризуется дендритным строением (рисунок 4.3, *а*). Внутреннее строение зерен связано с химической неоднородностью (дендритной ликвацией), разделяющей твердый раствор на области, обогащенные разными компонентами. Эти области твердого раствора контрастируют без применения травления полированных шлифов. Последующая деформация металла приводит к вытягиванию зеренной структуры в направлении деформации (рис. 4.3 *б, в*).



Рисунок 4.2 – Вид литых образцов опытно-промышленной плавки после испытаний на растяжение: *а, б* – сплав ЗлНЦМ 585-12,5-4; *в, з* – сплав № 1; *д, е* – сплав № 2

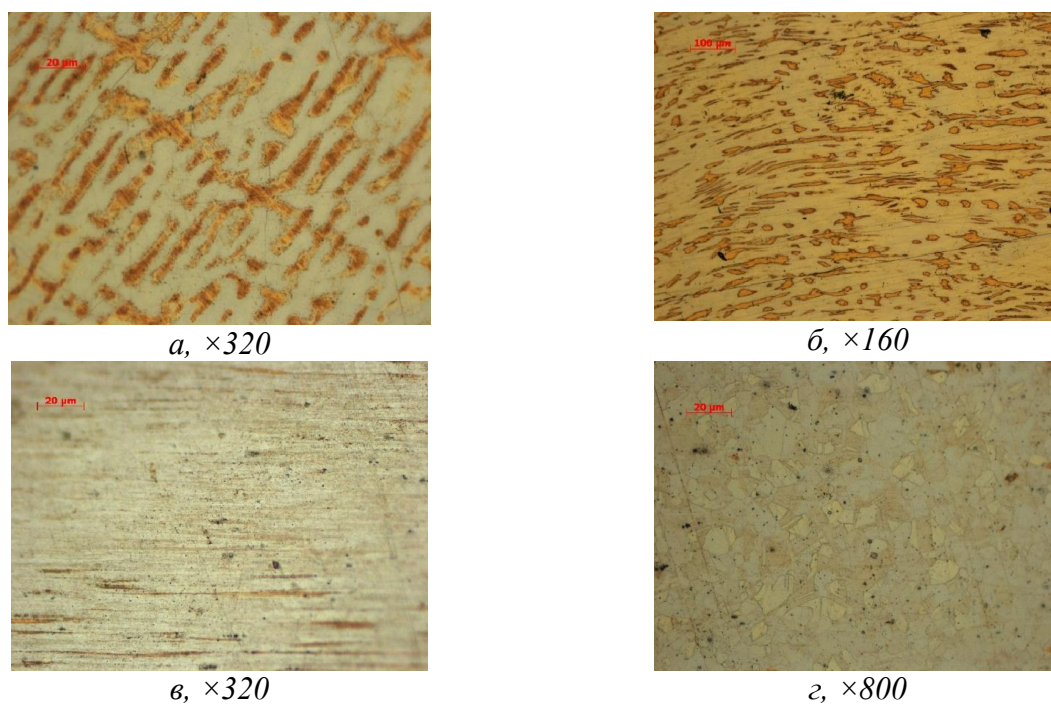


Рисунок 4.3 – Микроструктура полуфабрикатов из сплава ЗлНЦМ 585-12,5-4 в литом, деформированном и отожженном состояниях: *а* – литое состояние; *б* – после сортовой прокатки прутка размерами 3,7×3,7 мм; *в* – после волочения проволоки диаметром 0,25 мм; *з* – после отжига проволоки диаметром 0,25 мм

Анализ микроструктуры литых образцов из сплава №1 показывает, что значение параметра дендритной ячейки (рисунок 4.4, *а, 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 4.4, *в*), а при последующем волочении имеет вытянутое строение в направлении деформации. Установлено также, что деформированные полуфабрикаты имеют мелкозернистую структуру, равномерную по длине и сечению.

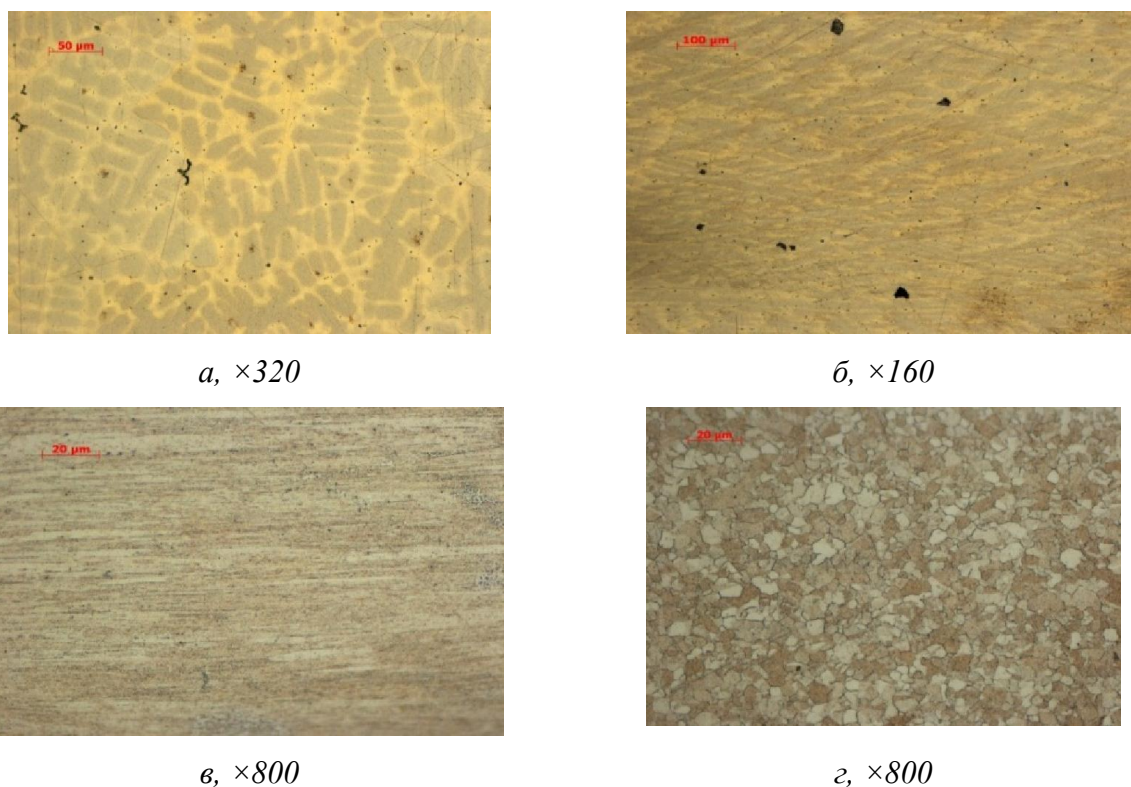


Рисунок 4.4 – Микроструктура полуфабрикатов из сплава №1 опытно-промышленной плавки в литом, деформированном и отожженном состояниях: *а* – литое состояние; *б* – после сортовой прокатки прутка размерами 3,7×3,7 мм; *в* – после волочения проволоки диаметром 0,25 мм; *г* – после отжига проволоки диаметром 0,25 мм

Микроструктура сплава №2 в литом состоянии характеризуется аналогичным дендритным строением в связи с химической неоднородностью. Шероховатость поверхности литых образцов на растяжение в начальной и конечной частях подобна (см. рисунок 4.2 *д, е*), что свидетельствует о равномерной зеренной структуре по длине литого прутка.

При пластической деформации, а также при промежуточных и окончательном отжигах (рисунок 4.5) происходит преобразование литой структуры от дендритной химически неоднородной до однородной на конечном переделе. 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.



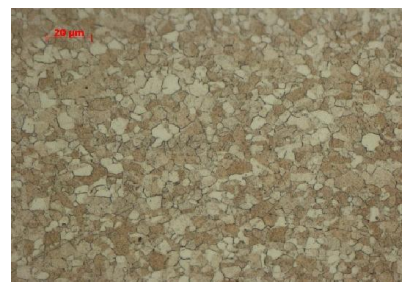
a, ×160



б, ×160



в, ×800



z, ×800

Рисунок 4.5 – Микроструктура полуфабрикатов из сплава №2 опытно-промышленной плавки в деформированном и отожженном состояниях: *a* – после первого прохода сортовой прокатки прутка размерами 3,7×3,7 мм; *б* – после отжига прокатанного прутка размерами 3,7×3,7 мм; *в* – после волочения проволоки диаметром 0,25 мм; *z* – после отжига проволоки диаметром 0,25 мм

Из полученной проволоки на цепевязальном автомате в условиях ОАО «Красцветмет» произвели опытные партии ювелирных цепей типа «Снейк» (рисунок 4.2). Процесс цепевязания прошел успешно, обрывов проволоки не наблюдалось.

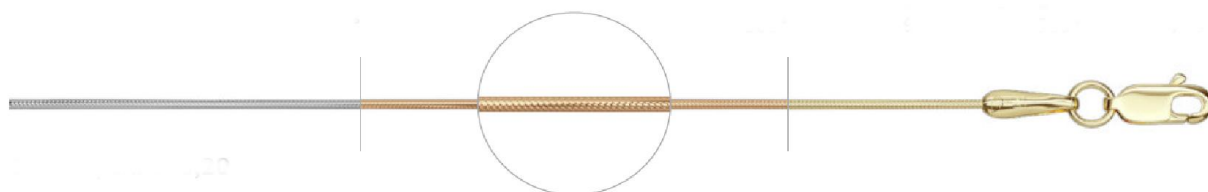


Рисунок 4.6 – Тип ювелирных цепочек «Снейк»

Таким образом, результаты промышленной апробации в условиях ОАО «Красцветмет» дали возможность рекомендовать сплавы № 1 и 2 для изготовления ювелирных изделий. Аналогичные выводы позволили сделать исследования в лабораторных условиях относительно сплавов №3, №4 и №5 (см. раздел 3).

4.4 Выводы по главе

1. Для промышленного применения разработаны и запатентованы новые безникелевые сплавы на основе белого золота 585 пробы, а также способ их модифицирования.

2. Предложены научно-технологические решения по термомеханической обработке новых сплавов № 1 и №2, модифицированных рутением и родием, а технологии производства из них литых, деформированных и отожженных полуфабрикатов прошли промышленную апробацию в условиях ОАО «Красцветмет».

3. Получены опытные партии проволоки из исследуемых сплавов, имеющей требуемый уровень механических свойств для изготовления ювелирных цепей.

4. Проведенные исследования структуры и свойств полученных полуфабрикатов, а также изготовление опытных партий ювелирных цепей типа «Снейк» из них с требуемыми эксплуатационными характеристиками, позволяют утверждать, что проволока ювелирного назначения из новых безникелевых сплавов золота 585 пробы может иметь промышленное применение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных исследований сделаны выводы и получены следующие результаты.

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 (Приложение А), с помощью которого рассчитаны режимы обжаты 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 (Приложение Б), 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 (Приложение В и Г).

ЛИТЕРАТУРА

1. Производство ювелирных изделий из драгоценных металлов и их сплавов: учеб. / С.Б. Сидельников, И.Л. Константинов, Н.Н. Довженко [и др.]. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. – 380 с.
2. Бреполь, Э. Теория и практика ювелирного дела / Э. Бреполь; под ред. Ю. Н. Баскакова и В. Ф. Каргина. 13-е изд. С.-Петербург: «Соло», 2000. – 528 с.
3. Европейский закон об использовании никеля в ювелирных изделиях / [Электронный ресурс]: ЮВЕЛИТех. Библиотека ювелирных технологий. – Режим доступа: <http://www.jewellerytech.ru/process/info.html?nid=47>.
4. С 2013 г по 2017 г. объем продаж ювелирных изделий в России вырос на 38% и по итогам 2017 г. достиг 87 млн шт. / [Электронный ресурс]: Официальный сайт ООО "БизнесСтат". – Режим доступа: https://businessstat.ru/news/s_2013_g_po_2017_g_obem_prodash_yuvelirnyh_izdelij_v_rossii_vyros_na_38_i_po_itogam_2017_g_dostig_87 mln_sht/.
5. Импорт возвращается / [Электронный ресурс]: Официальный сайт Ассоциации «Гильдия ювелиров России». – Режим доступа: <http://gjr.ru/press-center/news/2018/11/import-vozvrashhaetsya/import-eksport-yuvelirnyh-izdelij/rossiya/2014-2017-g>.
6. Лебсак-Клейманс А. Ювелирный рынок России: специфика, перспективные ниши, тенденции развития [Электронный ресурс] / А. Лебсак-Клейманс // Официальный сайт Интернет-журнала «New Retail». – Режим доступа: https://new-retail.ru/business/yuvelirnyy_rynok_rossii_spetsifika_perspektivnye_nishi_tendentsii_razvitiya1848/?sphrase_id=283418.
7. Россия: импорт/экспорт ювелирных изделий / [Электронный ресурс]: Официальный сайт Ассоциации «Гильдия ювелиров России». – Режим доступа: <http://gjr.ru/press-center/news/2019/02/import/eksport-ru-yuvelirnyh-izdelij>.
8. Рынок ювелирных изделий России в 2018 г. / [Электронный ресурс]: Официальный сайт Ассоциации «Гильдия ювелиров России». – Режим доступа: <http://gjr.ru/assets/files/analitika/prezentaciya-26.02.2019-statistika-yuvelirnogo-rynka-rossii.pdf>.
9. ЮВЕЛИРНАЯ ОТРАСЛЬ РОССИИ: проблемы и вызовы нового времени / [Электронный ресурс]: Официальный сайт журнала "Экспо-Ювелир". – Режим доступа: <https://expojeweller.ru/analytics/research2018/>.
10. ГОСТ 30 649-99 Сплавы на основе благородных металлов ювелирные. Марки. – Введ. 01.07.2000. – Москва: Стандартинформ, 2000. – 9 с.

11. Пат. 2115755 Российская Федерация, МПК C22C5/02. Сплав белого цвета на основе золота / Моисеев С.С., Калканов В.А., Ерусалимчик И.Г.; заявитель и патентообладатель ООО НТЦ "Техноком А С", Моисеев С.С. – №97112485/02; заявл. 31.07.1997; опубл. 20.07.1998. Бюл. №30 . – 3 с.
12. Пат. 2151211 Российская Федерация, МПК C22C5/02. Сплав на основе золота 585 пробы / Жданова Н.Н.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Лизингпромсервис". – №99125266/02; заявл. 07.12.1999; опубл. 20.06.2000, Бюл. № 4.– 4 с.
13. Пат. 2156824 Российская Федерация, МПК C22C5/02. Сплав на основе золота белого цвета 585 пробы / Ермаков А.В., Тимофеев Н.И., Сюткина В.И., [и др.]; заявитель и патентообладатель ОАО "Екатеринбургский завод по обработке цветных металлов". – № 99116702/02; заявл. 29.07.1999; опубл. 27.09.2000. – 6 с.
14. Пат. 2202644 Российская Федерация, МПК C22C5/02. Сплав белого золота системы золото – серебро – палладий – цинк – индий / Бошин С.Н., Муромцева А.В., Бошин С.В. [и др.]; заявитель и патентообладатель Костромской государственный технологический университет.– №2000120565/02; заявл. 31.07.2000; опубл. 06.10.2002 – 3 с.
15. Пат. 5919320 США, МПК C22C5/00, C22C5/02, C22C027/06, C22C005/02. Nickel-free white gold alloy with reversible hardness characteristics / Agarwal D. P., Raykhtsaum G.; заявитель и патентообладатель Leach & Garner Company. – № 08/968,813; заявл. 17.11.1997; опубл. 6.00.1999. – 4 с.
16. Пат. 1020030033344 Республики Корея, МПК C22C5/02. 18K White gold alloy for jewelry / Seong Rak Jang; Jun Gyo Jung; Eun U Lee; заявитель и патентообладатель REGOLD CO. – №1020010065081; заявл. 22.10.2001; опубл. 01.05.2003. – 2 с.
17. Пат. 6951588 США, МПК C22C5/00, C22C5/02, C22C005/00. White gold alloy compositions / Bernhard M, Menon A. B.; заявитель и патентообладатель United Precious Metal Refining, Inc. (Alden, NY). – №10/800,904; заявл. 15.03.2004; опубл. 4.10.2005. – 4 с.
18. Пат. 1020090105731 Республики Корея, МПК C22C 5/02. Nickel-free 18K white gold alloy for jewelry accessories, having deluxe white and improved luster of a surface / Ki Mun Kim; заявитель и патентообладатель ROMANSON WATCH CO, LTD. – №1020090105731; заявл. 03.04.2008; опубл. 07.10.2009. – 2 с.
19. Лебедева, О.С. Разработка и исследование технологии получения длинномерных полуфабрикатов для производства ювелирных цепей из сплавов красного золота 585 пробы: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05 / Лебедева Ольга Сергеевна. – Красноярск, 2013. – 234 с.

20. Пат. 2391425 Российская Федерация, МПК C22C5/02. Сплав на основе золота / Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Шубаков А.П., [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», ОАО «Красноярский завод цветных металлов им. В.Н. Гулидова». – № 2009105722/02; заявл. 18.02.2009; опубл. 10.06.2010, Бюл. № 28. – 6 с.: ил.

21. Пат. 2514898 Российская Федерация, МПК C22C5/02. Сплав красного цвета на основе золота 585 пробы / Довженко Н.Н., Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – № 2013116285/02; заявл. 09.04.2013; опубл. 10.05.2014, Бюл. № 13. – 7 с.: ил.

22. Мамонов С.Н. Влияние модифицирующей добавки на структуру золотого сплава / Мамонов С.Н., Павлов Е.А., Гурская В.Ю., Бабушкин О.В., Гущинский А.А. // Цветные металлы – 2008, №3. – С. 43-45.

23. Пат. 2405050 Российская Федерация, МПК C22C5/02. Ювелирный сплав на основе золота 585 пробы / Павлов Е.А., Гурская В.Ю., Гущинский А.А., [и др.]; заявитель и патентообладатель ОАО «Красноярский завод цветных металлов им. В.Н.Гулидова» (ОАО «Красцветмет»). – № 2009121768/02; заявл. 08.06.2009; опубл. 27.11.2010, Бюл. №33. – 6 с.: ил.

24. Пат. 2439179 Российская Федерация, МПК C22C5/02. Сплав на основе золота белого цвета 585 пробы / Сидельников С.Б., Мальцев Э.В., Довженко Н.Н. [и др.]; заявители и патентообладатели ОАО «Красноярский завод цветных металлов им. В.Н.Гулидова» (ОАО «Красцветмет»), ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – №2011101102; заявл. 12.01.2011; опубл. 10.01.2012, Бюл. №1. – 4 с.

25. Пат. 2430982 Российская Федерация, МПК C22C5/02. Сплав на основе золота белого цвета 585 пробы / Сидельников С.Б., Мальцев Э.В., Довженко Н.Н. [и др.]; заявители и патентообладатели ОАО «Красноярский завод цветных металлов им. В.Н.Гулидова» (ОАО «Красцветмет»), ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – №2010121640; заявл. 27.05.2010; опубл. 10.10.2011, Бюл. №28. – 4 с.

26. Пат. 2586175 Российская Федерация, МПК C22C 5/02. Сплав на основе золота белого цвета 585 пробы / Сидельников С.Б., Довженко Н.Н. Беляев С.В. [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». – № 2015121955/02; заявл. 08.06.2015; опубл. 10.06.2016, Бюл. №16. – 5 с.

27. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник: в 3 т. / под. общ. ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996. – Т. 1. – 992 с.

28. Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник: в 3 т. / под. общ. ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1997. – Т. 2. – 1024 с.

29. Материаловедение. Металловедение палладия и его сплавов: учебное пособие / В.С. Биронт, Н.Н. Довженко, С.Н. Мамонов, И.В. Тихов, Б.П. Ходюков // ГУЦМиЗ. – Красноярск, 2007. – 152 с.
30. Савицкий, Е.М. Благородные металлы: справочник / Савицкий Е.М. – М.: Металлургия, 1984. – 592 с.
31. 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 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет». – № 2018143190; заявл. 05.12.2018; опубл. 12.08.2019, Бюл. 23. – 6 с.
32. Пат. 2207394 Российская Федерация, МПК С22С5/08. Сплав на основе серебра / А.Н. Савченко, В.Н. Тилипалов; заявители и патентообладатели Калининградский государственный технический университет. – № 2001130081/02; заявл. 06.11.2001; опубл. 27.06.2003.
33. Пат. 2328541 Российская Федерация, МПК С22С5/08. Сплав на основе серебра / Ю.А. Щепочкина. – № 2006140491/02; заявл. 15.11.2006; опубл. 10.07.2008. – 3 с.
34. Пат. 2332477 Российская Федерация, МПК С22С5/08. Сплав на основе серебра / Ю.А. Щепочкина. – № 2006140461/02; заявл. 15.11.2006; опубл. 27.08.2008. – 3 с.
35. Пат. 2405052 Российская Федерация, МПК С22С5/08. Сплав на основе серебра / Ю.А. Щепочкина. – № 2009147571/02; заявл. 21.12.2009; опубл. 27.11.2010. – 3 с.
36. Пат. 2442836 Российская Федерация, МПК С22С5/08. Сплав на основе серебра 925 пробы / Савченко А.Н. – № 2010134297/02; заявл. 16.08.2010; опубл. 20.02.2012. – 4 с.
37. Пат. 2513502 Российская Федерация, МПК С22С5/08. Сплав белого цвета на основе серебра 925 пробы, модифицированный кремнием / С.Б. Сидельников, С.В. Беляев, А.В. Столяров [и др.]; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет». – № 2013117667/02; заявл. 16.04.2013; опубл. 20.04.2014, Бюл. №11. – 4с.
38. Gold: science and applications / editors Christopher Corti, Richard Holliday. – New-York: Taylor and Francis Group, LLC, 2009. – 444 p.
39. Марченков, В. И. Ювелирное дело: практ. пособие – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1992 – 256 с.

40. Производство ювелирных изделий из драгоценных металлов и их сплавов: учеб. / С.Б. Сидельников, И.Л. Константинов, Н.Н. Довженко [и др.]. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2015. – 380 с.
41. Логинов, Ю.Н. Процессы обработки металлов давлением в ювелирном деле: учеб. пособие / Ю.Н. Логинов. – Екатеринбург: УГТУ, 2005. – 54с.
42. Сидельников, С.Б. 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.
43. Сидельников, С.Б. 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.
44. Смирнов, В. К. Калибровка прокатных валков: Учебное пособие для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. / В. К. Смирнов, В. А. Шилов, Ю. В. Инатович. – Москва: Теплотехник, 2010. – 490 с.
45. Колмогоров, В. Л. Механика обработки металлов давлением: учебник для вузов / В. Л. Колмогоров. – Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного технического университета, УПИ, 2001. – 836 с.
46. Чекмарев, А.П. Калибровка прокатных валков: учебное пособие для вузов / Чекмарев А.П., Мутьев М.С., Машковцев Р.А. – М.: Металлургия, 1971. – 512 с.
47. Диомидов, Б.Б. Калибровка прокатных валков / Диомидов Б.Б., Литовченко Н.В. – М.: Металлургия, 1970. – 312 с.
48. Литовченко Н.В. Калибровка профилей и прокатных валков / Н.В. Литовченко. – М.: Металлургия, 1990. – 432 с.
49. Бахтинов, Б.П. Калибровка прокатных валков / Бахтинов Б.П., Штернов М.М. – М: Металургиздат, 1953. – 783 с.
50. Тарновский, И.Я. Формоизменение при пластической деформации металлов. – М.: Металургиздат, 1959. – 534 с.
51. Целиков, А.И. Теория продольной прокатки / Целиков А.И., Никитин Г.С., Рокотян С.В. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.
52. Теория прокатки: справочник / Целиков А.И., Томленов А.Д., Зюзин В.И. и др. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.

53. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. (Теория пластичности): Учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с.
54. Шварц, Д.Л. Исследование взаимодействия валковой арматуры и прокатных валков с целью совершенствования технологической подготовки процесса прокатки сортовых профилей: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05 / Шварц Данил Леонидович. – Екатеринбург, 2002. – 206 с.
55. Шилов, В.А. Расчет формоизменения металла при прокатке шестигранной стали / Шилов В.А., Инатович Ю.В., Шварц Д.Л., Даваасамбуу Ч. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2006, № 5. – С. 31-36.
56. Непряхин, С.О. Исследование процесса прокатки двуглавых профилей в универсальном калибре с применением вариационного принципа минимума полной мощности / Непряхин С.О., Шилов В.А., Шварц Д.Л. // Сталь. – 2014. – №6. – С. 54-58.
57. Шварц, Д.Л. Применение вариационного принципа минимума полной мощности для анализа процесса прокатки рельсового профиля в универсальном калибре / Шварц Д.Л. // «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении»: сборник трудов международной молодежной научно-практической конференции. – Екатеринбург: УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, 2013. – С. 237-242.
58. Шварц, Д.Л. Разработка теоретических основ и обоснование основных технологических решений процесса прокатки железнодорожных рельсов на универсальных рельсобалочных станах: дис. ... докт. техн. наук: 05.16.05 / Шварц Данил Леонидович. – Екатеринбург, 2019. – 301 с.
59. Тулупов С.А. Расчет средних коэффициентов при прокатке в вытяжных системах калибров / Тулупов С.А., Курдюмова В.А. // Изв. Вузов. Черная металлургия. – 1986. №11. – С. 63-65.
60. Тулупов, С.А. Эффективность деформации сортовых профилей / Тулупов С. А., Гун Г. С., Онискив В. Д. [и др.]. – М.: Металлургия, 1990. – 280 с.
61. Тулупов О.Н. Повышение эффективности процессов прокатки и точности сортовых профилей на основе совершенствования технологии с использованием структурно-матричных моделей: дис. ... докт. техн. наук: 05.16.05 / Тулупов Олег Николаевич. – Магнитогорск, 2001. – 404 с.
62. Тулупов, О.Н. Структурно-матричные модели для повышения эффективности процессов сортовой прокатки: Монография. – Магнитогорск: МГТУ, 2002. – 224 с.
63. Тулупов, О.Н. Пути развития и совершенствования матричного описания параметров калибровки валков / Тулупов О.Н., Моллер А.Б., Поляков М.Г. //

Моделирование и развитие технологических процессов. Сб. науч. трудов. – Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова, 2004. – С. 27-32.

64. Tulupov, O.N. Structural-matrix models for long product rolling processes: modeling production traceability and forming consumer properties of products / Tulupov O.N., Moller A.B., Kinzin D.I., Levandovskiy S.A., Ruchinskaya N.A., Nalivaiko A.V., Rychkov S.S., Ishmetyev E.N. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2013, № 5 (45). – С. 46-50.

65. Логинов, А.В. Применение структурно-матричных моделей для разработки инженерных методов обеспечения заданных свойств при термомеханической обработке сортового проката / Логинов А.В., Тулупов О.Н. // Фазовые и структурные превращения в сталях. – Вып. 4: в 2 т. – Магнитогорск, 2006. – С. 259-266.

66. Loginov, Yu.N. Evolution of surface defects in platinum alloy wire under drawing / Yu. N. Loginov, A. E. Pervukhin, N. A. Babailov // Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures, MRDMS 2017: Papers of the 11th International Conference. - American Institute of Physics Inc., 2017. – P. 040032.

67. Логинов, Ю.Н. Условия разупрочнения и сопротивление деформации платины / Ю.Н. Логинов, А.В. Ермаков, Л.Г. Гроховская // Цветные металлы. – 2006, №6. – С. 85-87.

68. Loginov, Yu.N. Annealing Characteristics and Strain Resistance of 99.93 wt.% Platinum / Yu. N. Loginov, A. V. Yermakov, L. G. Grohovskaya, G. I. Studenok // Platinum Metals Rev. – 2007, №51 (4). – P. 178-184.

69. Инатович, Ю.В. Исследование уширения меди при прокатке по системе калибров квадрат-квадрат / Инатович Ю.В. Логинов Ю.Н., Баланчук Л.Е. // Производство проката. – 2017, №3. – 20-24 с.

70. Мамонов, С.Н. Изучение закономерностей изменения содержания кислорода в Пл-Пд сплавах в зависимости от степени пластической деформации и развития процессов рекристаллизации / С.Н. Мамонов, В.С.Биронт, В.Ю. Гурская, Е.А. Волкова // Цветные металлы. – 2009, №6. – 85-88.

71. Пат. 2439181 Российская Федерация, МПК С22С 5/04. Ювелирный сплав на основе платины 960 пробы / Ефимов В.Н., Ельцин С.И., Мамонов С.Н., Павлов Е.А., Гурская В.Ю., Шульгин Д.Р.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество "Красноярский завод цветных металлов им. В.Н. Гулидова" (ОАО "Красцветмет"). – № 2011101103/02; заявл. 12.01.2011; опубл. 10.01.2012, Бюл. 1. – 5 с.

72. Сидельников, С. Б. Исследование технологии получения проволоки из сплавов на основе золота / С. Б. Сидельников, Н. Н. Довженко, В. С. Биронт, Е. С.

Лопатина и др. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова – № 3. – Магнитогорск, 2010. – С. 26–27.

73. Сидельников, С.Б. Моделирование и автоматизированное проектирование технологических процессов обработки металлов: учеб. пособие / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, И.Ю. Губанов [и др.]. – Красноярск: Сибирский федеральный ун-т; Ин-т цв. металлов и золота, 2007. – 120 с.

74. Шилов, В. А. Оптимизация технологических процессов сортовой прокатки на основе применения математических методов и ЭВМ с целью повышения эффективности производства: дис. ... докт. техн. наук: 05.16.05 / Шилов Владислав Александрович. – Свердловск: Уральск, политехн, ин-т, 1986. - 477 с.

75. Аксенов, С.А. Автоматизированная система проектирования и анализа технологических процессов прокатки в калибрах: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.12 / Аксенов Сергей Алексеевич. – Москва, 2010. – 113 с.

76. Сафонов, Е.В. Повышение эффективности технологии производства высокоуглеродистой проволоки волочением на основе математического моделирования: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.05 / Сафонов Евгений Владимирович. – Магнитогорск, 2005. – 110 с.

77. QForm. Quantor Form. [Электронный ресурс]: Официальный сайт компании «КванторФорм». – Режим доступа: <http://www.qform3d.ru>.

78. Дубинский, С. Программный комплекс ANSYS/LS-DYNA 8.0 [Электронный ресурс] / С. Дубинский // САПР и графика, 2004. - №3. –Режим доступа: <http://www.sapr.ru/article.aspx?id=7051&iid=288>.

79. Deform-3D [Электронный ресурс]: Официальный сайт Scientific Forming Technologies Corporation. – Режим доступа: <https://www.deform.com/products/deform-3d/>.

80. Delphi [Электронный ресурс]: официальный сайт Embarcadero Technologies, Inc. – Режим доступа: <https://www.embarcadero.com/products/delphi>.

81. Access – Продукты [Электронный ресурс]: официальный сайт Microsoft Corporation. – Режим доступа: <http://office.microsoft.com/ru-ru/access/>.

82. PowerMill [Электронный ресурс]: официальный сайт Autodesk Inc. – Режим доступа: <https://www.autodesk.com/products/powermill/overview>.

83. MasterCam [Электронный ресурс]: официальный сайт CNC Software, Inc. – Режим доступа: <https://www.mastercam.com/>.

84. SprutCAM [Электронный ресурс]: официальный сайт СПРУТ-Технология. – Режим доступа: <https://sprut.ru/products-and-solutions/products/SprutCAM>.

85. FeatureCAM features [Электронный ресурс]: официальный сайт Autodesk Inc. – Режим доступа: <https://www.autodesk.com/products/featurecam/overview>.
86. PTC Mathcad is Engineering Math Software That Allows You to Perform, Analyze, and Share Your Most Vital Calculations. [Электронный ресурс]: официальный сайт PTC. – Режим доступа: <https://www.ptc.com/en/products/mathcad/>.
87. MATLAB [Электронный ресурс]: официальный сайт The MathWorks, Inc. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
88. WOLFRAM MATHEMATICA [Электронный ресурс]: официальный сайт Wolfram. – Режим доступа: <http://www.wolfram.com/mathematica/>.
89. Maxima, a Computer Algebra System [Электронный ресурс]: официальный сайт программы Maxima. – Режим доступа: <http://maxima.sourceforge.net>.
90. Алексеев, П.Л. Основы автоматизированного проектирования. Применение Mathcad для инженерных расчетов: учеб. пособие. – Электросталь: ЭПИ МИСиС, 2010. – 72 с.
91. Сидельников, С.Б. Исследование технологии получения проволоки ювелирного назначения из сплавов золота и серебра с помощью физического и математического моделирования / Сидельников, С.Б., Дитковская Ю.Д., Лопатин В.А. // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: тезисы докладов 77-й международной научно-технической конференции. Т.1. – Магнитогорск, 2019. – С. 147 – 148.
92. Дитковская, Ю.Д. Физическое и математическое моделирование процесса сортовой прокатки для производства длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов драгоценных металлов / Дитковская Ю.Д., Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Лопатин В.А. // Цветные металлы и минералы: Сборник докладов XI Международного Конгресса «Цветные металлы и минералы». – Красноярск: 2019. – С. 542-549.
93. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612273 PROVOL / Сидельников С.Б., Беляев С.В., Лебедева О.С. [и др.]; заявитель и патентообладатель: ФГАОУ ВПО "Сибирский федеральный университет". - № 2014663306; заявл. 19.12.2014; опубл. 20.03.2015.
94. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620276 Металлы и оборудование / Довженко Н.Н., Сидельников С.Б., Лебедева О.С. [и др.]; заявитель и патентообладатель: ФГАОУ ВПО "Сибирский федеральный университет". - № 2014621827; заявл. 19.12.2014; опубл. 20.03.2015.
95. Сидельников, С.Б. Разработка подсистемы САПР технологических процессов производства ювелирных изделий / Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Гайлис Ю.Д.,

Лебедева О.С. // Известия МГТУ «МАМИ». Научный рецензируемый журнал. Серия 2. Технология машиностроения и материалы. – №2(16), 2013, т.2. – С. 216 – 220.

96. Gaylis, Y. D., Lepp, E.I. 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. - Cibunet Publishing: New York, 2013. – p.128 – 130.

97. Sidelnikov, S.B. 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 // Журнал Сибирского федерального университета, серия «Техника и технологии». 2012 (том 5, номер 6). – С. 615 – 623.

98. Сидельников, С.Б. Анализ и проектирование технологии получения проволоки ювелирного назначения из новых сплавов драгоценных металлов / Сидельников С.Б., Дитковская Ю.Д., Лебедева О.С., Лопатина Е.С., Рудницкий Э.А., Леонтьева Е.С. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Металлургия». т. 15, №4. 2015. – С. 108 – 115.

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

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

101. Ditkovskaia, Iu.D. 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 // Журнал Сибирского федерального университета, серия «Техника и технологии». Сентябрь 2016 (том 9, номер 5). – С. 632 – 642.

102. AutoCAD [Электронный ресурс]: официальный сайт Autodesk Inc. – Режим доступа: <https://www.autodesk.com/products/autocad/overview>.

103. Microsoft Excel [Электронный ресурс]: официальный сайт Microsoft. – Режим доступа: <https://products.office.com/ru-ru/excel>.
104. Сидельников, С. Б. Технология прокатки : учебник / С. Б. Сидельников, И. Л. Константинов, Д. С. Ворошилов. – 3-е изд., доп. и перераб. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2016. – 180 с.
105. SolidWorks [Электронный ресурс]: официальный сайт Dassault Systèmes SolidWorks Corporation. – Режим доступа: <https://www.solidworks.com>.
106. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Москва: Стандартинформ, 2008. – 26 с.
107. ГОСТ 10446-80. Проволока. Метод испытания на растяжение. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 6 с.
108. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 1977. – 34 с.
109. Белокопытов, В. И. Статистические методы управления качеством металлопродукции : учеб. пособие / В. И. Белокопытов. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2011. – 108 с.
110. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке : Методы планир. эксперимента / Н. Джонсон, Ф. Лион; Пер. с англ. под ред. Э. К. Лецкого, Е. В. Марковой. - М. : Мир, 1981. - 516 с.
111. Опытнo-промышленная апробация технология получения проволоки из сплавов белого золота / Сидельников С.Б., Лопатина Е.С., Лебедева О.С., Дитковская Ю.Д., Лопатин В.А.// Производство проката, 2018. №12. – С. 22-25.
112. 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. [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – №2012154131/02; заявл. 13.12.2012; опубл. 20.02.2014 Бюл. №5. – 5 с.
113. Пат. № 2477193 Российская федерация, МПК В22D 11/01 В22D 27/02 Способ получения слитка из сплавов цветных металлов / Хацаюк М.Ю., Первухин М.В., Сергеев Н.В. [и др.]; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – №2011106625/02; заявл. 22.02.2011; опубл. 27.08.2012, Бюл. №24 – 1 с.
114. Пат. №2391425 Российская федерация, МПК С1 С22С 5/02. Сплав на основе золота / Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Биронт В.С. [и др.]; заявители и патентообладатели ОАО «Красноярский завод цветных металлов им. В.Н.Гулидова» (ОАО «Красцветмет»), ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет». – №2009105722/02; заявл. 18.02.2009; опубл. 10.06.2010. Бюл. №16. – 6 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Листинг программы “PROVOL”

```

unit Unit1;
interface
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants,
  Classes, Graphics, Controls, Forms,
  Dialogs, StdCtrls, ExtCtrls, ShellAPI, Grids,
  ComCtrls, ComObj, AutoCAD_TLB,
  ExtDlgs, OleServer, ActiveX;
type
  TForm1 = class(TForm)
    Button2: TButton;
    OpenDialog1: TOpenDialog;
    Button3: TButton;
    PageControl1: TPageControl;
    TabSheet1: TTabSheet;
    TabSheet2: TTabSheet;
    TabSheet4: TTabSheet;
    TabSheet3: TTabSheet;
    PageControl2: TPageControl;
    TabSheet5: TTabSheet;
    TabSheet6: TTabSheet;
    PageControl3: TPageControl;
    TabSheet7: TTabSheet;
    TabSheet8: TTabSheet;
    Button13: TButton;
    Button10: TButton;
    Button5: TButton;
    StringGrid1: TStringGrid;
    GroupBox2: TGroupBox;
    Label8: TLabel;
    Label9: TLabel;
    Label10: TLabel;
    Label11: TLabel;
    Label12: TLabel;
    Label13: TLabel;
    Label14: TLabel;
    Label15: TLabel;
    Label16: TLabel;
    Label17: TLabel;
    Label18: TLabel;
    Label19: TLabel;
    Label20: TLabel;
    Label21: TLabel;
    Label22: TLabel;
    Label23: TLabel;
    Edit5: TEdit;
    Edit6: TEdit;
    Edit7: TEdit;
    Edit8: TEdit;
    Edit9: TEdit;
    Edit10: TEdit;
    Edit11: TEdit;
    Edit12: TEdit;
    Edit13: TEdit;
    Edit15: TEdit;
    Edit16: TEdit;
    Edit17: TEdit;
    Edit18: TEdit;
    Edit19: TEdit;
    Edit14: TEdit;
  end;

```

GroupBox1: TGroupBox;
Label2: TLabel;
Label4: TLabel;
Label5: TLabel;
Label6: TLabel;
Label7: TLabel;
Edit1: TEdit;
Edit2: TEdit;
Edit20: TEdit;
Label26: TLabel;
Button6: TButton;
Button1: TButton;
Button12: TButton;
Button14: TButton;
Button7: TButton;
Button9: TButton;
Button4: TButton;
PageControl4: TPageControl;
TabSheet9: TTabSheet;
TabSheet10: TTabSheet;
Label1: TLabel;
GroupBox3: TGroupBox;
Label3: TLabel;
Label24: TLabel;
Label25: TLabel;
Label27: TLabel;
Label28: TLabel;
Label29: TLabel;
Edit3: TEdit;
Edit4: TEdit;
Edit21: TEdit;
GroupBox4: TGroupBox;
Label30: TLabel;
Label31: TLabel;
Label32: TLabel;
Label33: TLabel;
Label34: TLabel;
Label35: TLabel;
Label36: TLabel;
Label37: TLabel;
Label38: TLabel;
Label39: TLabel;
Label40: TLabel;
Label41: TLabel;
Label42: TLabel;
Label43: TLabel;
Label44: TLabel;
Label45: TLabel;
Edit22: TEdit;
Edit23: TEdit;
Edit24: TEdit;
Edit25: TEdit;
Edit26: TEdit;
Edit27: TEdit;
Edit28: TEdit;
Edit29: TEdit;
Edit30: TEdit;
Edit31: TEdit;
Edit32: TEdit;
Edit33: TEdit;
Edit34: TEdit;
Edit35: TEdit;
Edit36: TEdit;
StringGrid2: TStringGrid;
Label46: TLabel;
Button11: TButton;
Button15: TButton;
Button16: TButton;
Button18: TButton;
Button19: TButton;

```

Button17: TButton;
Button20: TButton;
Label47: TLabel;
Label48: TLabel;
GroupBox5: TGroupBox;
RadioButton1: TRadioButton;
RadioButton2: TRadioButton;
RadioButton3: TRadioButton;
GroupBox6: TGroupBox;
Label49: TLabel;
Label50: TLabel;
Label51: TLabel;
Label52: TLabel;
Label53: TLabel;
Label54: TLabel;
Label55: TLabel;
Label56: TLabel;
Label57: TLabel;
Label58: TLabel;
Label59: TLabel;
Label60: TLabel;
Label61: TLabel;
Label62: TLabel;
Label63: TLabel;
Label64: TLabel;
Edit37: TEdit;
Edit38: TEdit;
Edit39: TEdit;
Edit40: TEdit;
Edit41: TEdit;
Edit42: TEdit;
Edit43: TEdit;
Edit44: TEdit;
Edit45: TEdit;
Edit46: TEdit;
Edit47: TEdit;
Edit48: TEdit;
Edit49: TEdit;
Edit50: TEdit;
Edit51: TEdit;
Label65: TLabel;
Edit52: TEdit;
Button21: TButton;
Button22: TButton;
Button23: TButton;
Label67: TLabel;
Button25: TButton;
Edit53: TEdit;
StringGrid3: TStringGrid;
Button24: TButton;
Label68: TLabel;
Label69: TLabel;
Edit54: TEdit;
Label66: TLabel;
Button26: TButton;
Чертежи: TTabSheet;
AcadDocument1: TAcadDocument;
SavePictureDialog1: TSavePictureDialog;
Button27: TButton;
Button28: TButton;
Image2: TImage;
procedure FormKeyDown(Sender:
TObject; var Key: Word;
Shift: TShiftState);
procedure Button1Click(Sender: TObject);
procedure Button2Click(Sender: TObject);
procedure Button3Click(Sender: TObject);
procedure Button4Click(Sender: TObject);
procedure Button5Click(Sender: TObject);
procedure Button6Click(Sender: TObject);

```

```

procedure Button7Click(Sender: TObject);
procedure Button9Click(Sender: TObject);
procedure Button10Click(Sender:
TObject);
procedure Button12Click(Sender:
TObject);
procedure Button13Click(Sender:
TObject);
procedure Button14Click(Sender:
TObject);
procedure StringGrid1DrawCell(Sender:
TObject; ACol, ARow: Integer;
Rect: TRect; State: TGridDrawState);
procedure Button11Click(Sender:
TObject);
procedure Button15Click(Sender:
TObject);
procedure Button16Click(Sender:
TObject);
procedure Button18Click(Sender:
TObject);
procedure StringGrid2DrawCell(Sender:
TObject; ACol, ARow: Integer;
Rect: TRect; State: TGridDrawState);
procedure Button19Click(Sender:
TObject);
procedure Button17Click(Sender:
TObject);
procedure Button20Click(Sender:
TObject);
procedure Button21Click(Sender:
TObject);
procedure Button22Click(Sender:
TObject);
procedure Button23Click(Sender:
TObject);
procedure Button25Click(Sender:
TObject);
procedure StringGrid3DrawCell(Sender:
TObject; ACol, ARow: Integer;
Rect: TRect; State: TGridDrawState);
procedure Button24Click(Sender:
TObject);
procedure Button26Click(Sender:
TObject);
procedure Button27Click(Sender:
TObject);
procedure Button28Click(Sender:
TObject);
private
{ Private declarations }
public
{ Public declarations }
Dv: real;
Pdop, Mom: real;
Dbp:array [0..15] of real;
C0,C1,C3,C4: real;
a1,a2,a3,a4:real;
Cr0,Cr1,Cr2,Cr3,Cr4,Cr5,Cr6,fr:real;
Expkv,Fcon,dpriv,dvol,Vol:real;
Ss,Sk,pk,ps,py,px,ls,ly,lx,ys,xs,Hs,Bs,ox,oy,O
si: array [0..15] of integer;
Masht: real;
Lzmod,Dzmod,Dvmod,Lvmod,Dshmod,Lshm
od,Dtrmod,Ltrmod: real;
end;
var
Form1: TForm1;

```

```

Csan,Fzsan,Musan,Musumsan,Esan,Esumsan:
array [0..15] of real;
Musrsan,Ugolsan: real;
sanz,sanz2 :integer;
sanz1: real;
Masht: real;
Lsr,Lsum,ns,Fsk,Ckk,Dv,sink: real;
Ck0,Ck1,Ck2,Ck3,Ck4,Pkdop:          real;
st,Ms,Mstab,Fs,mk,le,a0,ak,Ush,bu,del,Wk,es
umark: array [0..15] of real;
Ck,bkd,hkd,Bkk,Hkk,bks,hks,g,Uskdop:
array          [0..15]          of          real;
A,Nsort,Fcont,Mval,Nval,Pprs,pkk,psi,Msort,
ak0,Skk,ldk,Hsrk,lh,Skrs: array [0..15] of
real;
Ss,Sk,pk,ps,py,px,ls,ly,lx,ys,xs,Hs,Bs,ox,oy,O
si: array [0..15] of integer;
ik,kw,nom:integer;
dpriv,fr,Fcon:                      real;
lk,d0,dk,F0,Fk,Musum,Musr,avol,g0,gn,mp,tr
,Wt:                      real;
p,ep,esump,Lu,Nv,Kv,Nvol,Ks,Sv,Kuv,Kus,K
zv,Kzs,Vs,Vp,Dbp,Sab,Sot,Muk,Kop,Fp,Pv:
array [0..15] of real;
c,iw:integer;
Chislo,Skorost,Maxdiam: real;
Use:array[1..10]of Boolean;
nazv:array[1..10]of string;
AutoCAD:variant;
ws: integer;
wy:longint;
cOsi,cHs,cBs,cly,cpx,cSs,chsln,chcos: array
[0..15] of real;
cSk,cpk,cps,cpy,cls,clx,cys,cxs,cox,coy:
array [0..15] of real;
dwj,chertez: integer;
osx,osy: array [0..15] of integer;
implementation
uses
Unit9, Unit14, Unit13, Unit11, Unit12,
Unit15, Unit17, Unit18,
Unit19;
{$R *.dfm}
procedure TForm1.Button1Click(Sender:
TObject);
begin
form18.Show;
end;
procedure TForm1.Button2Click(Sender:
TObject);
var
buttonSelected : Integer;
Vol:real;
begin
buttonSelected := MessageDlg('Вы
действительно хотите
выйти?',mtConfirmation,
[mbYes,mbNo,mbCancel], 0);
if buttonSelected = mrYes then close;
end;
procedure TForm1.FormKeyDown(Sender:
TObject; var Key: Word; Shift: TShiftState);
begin
if (Key = VK_F1) then
ShellExecute(Handle, 'open',
'PROVOL.chm',nil, nil, SW_SHOW);
end;
procedure TForm1.Button3Click(Sender:
TObject);
begin

```



```

ShellExecute(Handle,      'open',
'PROVOL.chm',nil, nil, SW_SHOW);
end;
procedure   TForm1.Button7Click(Sender:
TObject);
begin
Button14.Enabled:=true;
form12.Show;
end;
procedure   TForm1.Button12Click(Sender:
TObject);
begin
Button14.Enabled:=true;
form13.Show;
end;
procedure   TForm1.Button14Click(Sender:
TObject);
var rez : TModalResult;
begin
Button6.Visible:=true;
Button9.Visible:=true;
Ck[0]:=strtofloat(edit1.Text);
Ckk:=strtofloat(edit2.Text);
Lsr:=strtofloat(edit20.Text);
Fs[0]:=Ck[0]*Ck[0];
Fsk:=Ckk*Ckk;
Lsum:=Fs[0]/Fsk;
ns:=ln(Lsum)/ln(Lsr);
ns:=ns+0.5;
ik:=round(ns);
begin
if edit1.text=" then
begin
rez:= MessageDlg('Некорректные исходные
данные'+#10#13+''+#10#13+'Задайте

```

```

значение начальной толщины заготовки',
mtError, [mbOk], 0);
end;
end;
begin
if edit2.text=" then
begin
rez:= MessageDlg('Некорректные исходные
данные'+#10#13+''+#10#13+'Задайте
значение конечной толщины проката',
mtError, [mbOk], 0);
end;
end;
begin
if Lsr < 1 then
begin
rez:= MessageDlg('Некорректные исходные
данные'+#10#13+''+#10#13+'Значение
коэффициента вытяжки не может быть
меньше единицы', mtError, [mbOk], 0);
end;
end;
begin
if Fsk > Fs[0] then
begin
rez:= MessageDlg('Некорректные исходные
данные'+#10#13+'Конечная площадь
поперечного сечения превышает
исходную', mtError, [mbOk], 0);
end;
end;
if ik>=1 then begin label8.Visible:=true;
label9.Visible:=true;
edit5.Visible:=true;
end;
end;

```

```

if ik>=2 then begin label10.Visible:=true;
edit6.Visible:=true;
end;
if ik>=3 then begin label11.visible:=true;
edit7.Visible:=true;
end;
if ik>=4 then begin label12.visible:=true;
edit8.Visible:=true;
end;
if ik>=5 then begin label13.visible:=true;
edit9.Visible:=true;
end;
if ik>=6 then begin label14.visible:=true;
edit10.Visible:=true;
end;
if ik>=7 then begin label15.visible:=true;
edit11.Visible:=true;
end;
if ik>=8 then begin label16.visible:=true;
edit12.Visible:=true;
end;
if ik>=9 then begin label17.visible:=true;
edit13.Visible:=true;
end;
if ik>=10 then begin label18.visible:=true;
edit14.Visible:=true;
end;
if ik>=11 then begin label19.visible:=true;
edit15.Visible:=true;
end;
if ik>=12 then begin label20.visible:=true;
edit16.Visible:=true;
end;
if ik>=13 then begin label21.visible:=true;
edit17.Visible:=true;
end;
end;
if ik>=14 then begin label22.visible:=true;
edit18.Visible:=true;
end;
if ik>=15 then begin label23.visible:=true;
edit19.Visible:=true;
end;
end;
procedure TForm1.Button6Click(Sender:
TObject);
var rez : TModalResult;
begin
Label47.Visible:=true;
Button5.Visible:=true;
Button5.Enabled:=true;
Button13.Visible:=true;
Button13.Enabled:=true;
Button10.Visible:=true;
Button10.Enabled:=true;
Button2.Visible:=true;
Button2.Enabled:=true;
Ck0:=C0;
Ck1:=C1;
Ck3:=C3;
Ck4:=C4;
Pkdop:=StrtoFloat(Form13.DBEdit5.Text);
ftr:=0.5;
a1:=StrtoFloat(Form12.DBEdit1.Text);
a2:=StrtoFloat(Form12.DBEdit2.Text);
a3:=StrtoFloat(Form12.DBEdit3.Text);
a4:=StrtoFloat(Form12.DBEdit4.Text);
Dv:=StrtoFloat(Form13.DBEdit2.Text);
if ik=1 then begin
Ms[1]:=strtoFloat(edit5.Text);
end;

```

```

if ik=2 then begin
Ms[1]:=strtofloat(edit5.Text);
Ms[2]:=Lsum/Ms[1];
end;
if ik=3 then begin
Ms[1]:=strtofloat(edit5.Text);
Ms[2]:=strtofloat(edit6.Text);
Ms[3]:=Lsum/(Ms[1]*Ms[2]);
end;
if ik=4 then begin
Ms[1]:=strtofloat(edit5.Text);
Ms[2]:=strtofloat(edit6.Text);
Ms[3]:=strtofloat(edit7.Text);
Ms[4]:=Lsum/(Ms[1]*Ms[2]*Ms[3]);
end;
if ik=5 then begin
Ms[1]:=strtofloat(edit5.Text);
Ms[2]:=strtofloat(edit6.Text);
Ms[3]:=strtofloat(edit7.Text);
Ms[4]:=strtofloat(edit8.Text);
Ms[5]:=Lsum/(Ms[1]*Ms[2]*Ms[3]*Ms[4]);
end;
if ik=6 then begin
Ms[1]:=strtofloat(edit5.Text);
Ms[2]:=strtofloat(edit6.Text);
Ms[3]:=strtofloat(edit7.Text);
Ms[4]:=strtofloat(edit8.Text);
Ms[5]:=strtofloat(edit9.Text);
Ms[6]:=Lsum/(Ms[1]*Ms[2]*Ms[3]*Ms[4]*
Ms[5]);
end;
if ik=7 then begin
Ms[1]:=strtofloat(edit5.Text);
Ms[2]:=strtofloat(edit6.Text);
Ms[3]:=strtofloat(edit7.Text);
Ms[4]:=strtofloat(edit8.Text);
Ms[5]:=strtofloat(edit9.Text);
Ms[6]:=strtofloat(edit10.Text);
Ms[7]:=Lsum/(Ms[1]*Ms[2]*Ms[3]*Ms[4]*
Ms[5]*Ms[6]);
end;
if ik=8 then begin
Ms[1]:=strtofloat(edit5.Text);
Ms[2]:=strtofloat(edit6.Text);
Ms[3]:=strtofloat(edit7.Text);
Ms[4]:=strtofloat(edit8.Text);
Ms[5]:=strtofloat(edit9.Text);
Ms[6]:=strtofloat(edit10.Text);
Ms[7]:=strtofloat(edit11.Text);
Ms[8]:=Lsum/(Ms[1]*Ms[2]*Ms[3]*Ms[4]*
Ms[5]*Ms[6]*Ms[7]);
end;
if ik=9 then begin
Ms[1]:=strtofloat(edit5.Text);
Ms[2]:=strtofloat(edit6.Text);
Ms[3]:=strtofloat(edit7.Text);
Ms[4]:=strtofloat(edit8.Text);
Ms[5]:=strtofloat(edit9.Text);
Ms[6]:=strtofloat(edit10.Text);
Ms[7]:=strtofloat(edit11.Text);
Ms[8]:=strtofloat(edit12.Text);
Ms[9]:=Lsum/(Ms[1]*Ms[2]*Ms[3]*Ms[4]*
Ms[5]*Ms[6]*Ms[7]*Ms[8]);
end;
if ik=10 then begin
Ms[1]:=strtofloat(edit5.Text);
Ms[2]:=strtofloat(edit6.Text);
Ms[3]:=strtofloat(edit7.Text);
Ms[4]:=strtofloat(edit8.Text);
Ms[5]:=strtofloat(edit9.Text);

```

```

Ms[6]:=strtofloat(edit10.Text);
Ms[7]:=strtofloat(edit11.Text);
Ms[8]:=strtofloat(edit12.Text);
Ms[9]:=strtofloat(edit13.Text);
Ms[10]:=Lsum/(Ms[1]*Ms[2]*Ms[3]*Ms[4]*
Ms[5]*Ms[6]*Ms[7]*Ms[8]*Ms[9]);
end;
if ik=11 then begin
Ms[1]:=strtofloat(edit5.Text);
Ms[2]:=strtofloat(edit6.Text);
Ms[3]:=strtofloat(edit7.Text);
Ms[4]:=strtofloat(edit8.Text);
Ms[5]:=strtofloat(edit9.Text);
Ms[6]:=strtofloat(edit10.Text);
Ms[7]:=strtofloat(edit11.Text);
Ms[8]:=strtofloat(edit12.Text);
Ms[9]:=strtofloat(edit13.Text);
Ms[10]:=strtofloat(edit14.Text);
Ms[11]:=Lsum/(Ms[1]*Ms[2]*Ms[3]*Ms[4]*
Ms[5]*Ms[6]*Ms[7]*Ms[8]*Ms[9]*Ms[10]);
end;
if ik=12 then begin
Ms[1]:=strtofloat(edit5.Text);
Ms[2]:=strtofloat(edit6.Text);
Ms[3]:=strtofloat(edit7.Text);
Ms[4]:=strtofloat(edit8.Text);
Ms[5]:=strtofloat(edit9.Text);
Ms[6]:=strtofloat(edit10.Text);
Ms[7]:=strtofloat(edit11.Text);
Ms[8]:=strtofloat(edit12.Text);
Ms[9]:=strtofloat(edit13.Text);
Ms[10]:=strtofloat(edit14.Text);
Ms[11]:=strtofloat(edit15.Text);
Ms[12]:=Lsum/(Ms[1]*Ms[2]*Ms[3]*Ms[4]*
Ms[5]*Ms[6]*Ms[7]*Ms[8]*Ms[9]*Ms[10]*
Ms[11]*Ms[12]);
end;
if ik=13 then begin
Ms[1]:=strtofloat(edit5.Text);
Ms[2]:=strtofloat(edit6.Text);
Ms[3]:=strtofloat(edit7.Text);
Ms[4]:=strtofloat(edit8.Text);
Ms[5]:=strtofloat(edit9.Text);
Ms[6]:=strtofloat(edit10.Text);
Ms[7]:=strtofloat(edit11.Text);
Ms[8]:=strtofloat(edit12.Text);
Ms[9]:=strtofloat(edit13.Text);
Ms[10]:=strtofloat(edit14.Text);
Ms[11]:=strtofloat(edit15.Text);
Ms[12]:=strtofloat(edit16.Text);
Ms[13]:=Lsum/(Ms[1]*Ms[2]*Ms[3]*Ms[4]*
Ms[5]*Ms[6]*Ms[7]*Ms[8]*Ms[9]*Ms[10]*
Ms[11]*Ms[12]);
end;
if ik=14 then begin
Ms[1]:=strtofloat(edit5.Text);
Ms[2]:=strtofloat(edit6.Text);
Ms[3]:=strtofloat(edit7.Text);
Ms[4]:=strtofloat(edit8.Text);
Ms[5]:=strtofloat(edit9.Text);
Ms[6]:=strtofloat(edit10.Text);
Ms[7]:=strtofloat(edit11.Text);
Ms[8]:=strtofloat(edit12.Text);
Ms[9]:=strtofloat(edit13.Text);
Ms[10]:=strtofloat(edit14.Text);
Ms[11]:=strtofloat(edit15.Text);
Ms[12]:=strtofloat(edit16.Text);
Ms[13]:=strtofloat(edit17.Text);

```

```

Ms[14]:=Lsum/(Ms[1]*Ms[2]*Ms[3]*Ms[4]*
Ms[5]*Ms[6]*Ms[7]*Ms[8]*Ms[9]*Ms[10]*
Ms[11]*Ms[12]*Ms[13]);
end;
if ik=15 then begin
Ms[1]:=strtofloat(edit5.Text);
Ms[2]:=strtofloat(edit6.Text);
Ms[3]:=strtofloat(edit7.Text);
Ms[4]:=strtofloat(edit8.Text);
Ms[5]:=strtofloat(edit9.Text);
Ms[6]:=strtofloat(edit10.Text);
Ms[7]:=strtofloat(edit11.Text);
Ms[8]:=strtofloat(edit12.Text);
Ms[9]:=strtofloat(edit13.Text);
Ms[10]:=strtofloat(edit14.Text);
Ms[11]:=strtofloat(edit15.Text);
Ms[12]:=strtofloat(edit16.Text);
Ms[13]:=strtofloat(edit17.Text);
Ms[14]:=strtofloat(edit18.Text);
Ms[15]:=Lsum/(Ms[1]*Ms[2]*Ms[3]*Ms[4]*
Ms[5]*Ms[6]*Ms[7]*Ms[8]*Ms[9]*Ms[10]*
Ms[11]*Ms[12]*Ms[13]*Ms[14]);
end;
begin
if Ms[ik]<1 then
begin
rez:= MessageDlg('Некорректно заданы
единичные коэффициенты вытяжек',
mtError, [mbOk], 0);
end;
end;
For kw:=1 to ik do begin
g[0]:=42*pi/180;
bkd[0]:=1.41*Ck[0];
hkd[0]:=bkd[0];
ak[1]:=1;
If odd(kw) then begin
g[kw]:=45*pi/180;
Fs[kw]:=Fs[kw-1]/Ms[kw];
Ck[kw]:=sqrt(Fs[kw]{/sin(pi-2*g[kw])});
bkd[kw]:=1.134*Ck[kw]+0.12;
hkd[kw]:=1.02*Ck[kw]-0.02;
Bkk[kw]:=2*Ck[kw]*sin(g[kw]);
Hkk[kw]:=2*Ck[kw]*sin(g[kw]);
bks[kw]:=0.397*Ck[kw]+0.029;
hks[kw]:=0.28*Ck[kw]-0.212;
le[kw]:=hkd[kw-1]/hkd[kw];
mk[kw]:=bkd[kw-1]/sqrt(hkd[kw-
1]*hkd[kw]);
ak[kw]:=hkd[kw]/bkd[kw];
Ush[1]:=1;
Ush[kw]:=1-1.23*le[kw]+1.925*mk[kw]-
0.846*ak[kw];
bu[kw]:=Ush[kw]*hkd[kw-1];
st[kw]:=bu[kw]/Hkk[kw];
Wk[kw]:=Ck[kw]*Ck[kw]*st[kw]*(2-
st[kw]);
end;
If not odd(kw) then begin
g[kw]:=41*pi/180;
Fs[kw]:=Fs[kw-1]/Ms[kw];
Ck[kw]:=sqrt(Fs[kw]{/sin(pi-2*g[kw])});
bkd[kw]:=1.15*Ck[kw];
hkd[kw]:=1.062*Ck[kw];
Bkk[kw]:=2*Ck[kw]*cos(g[kw]);
sink:=sin(g[kw]);
Hkk[kw]:=2*Ck[kw]*sink;
bks[kw]:=0.268*Ck[kw]+0.001;
hks[kw]:=0.334*Ck[kw];
le[kw]:=hkd[kw-1]/hkd[kw];

```

```

mk[kw]:=bkd[kw-1]/sqrt(hkd[kw-1]*hkd[kw]);
ak[kw]:=bkd[kw]/hkd[kw];
Ush[kw]:=1+0,357*exp(0.023*ln(le[kw]-1)*0.3250* A[kw]*ka[kw]+0.963*ak[kw]);
bu[kw]:=Ush[kw]*hkd[kw-1];
st[kw]:=bu[kw]/Bkk[kw];
Wk[kw]:=0.5*ak[kw]*ak[kw]*st[kw]*(2-st[kw])*Hkk[kw]*Hkk[kw];
end;
A[kw]:=Dv/Hkk[kw];
esumark[kw]:=(Fs[0]-Fs[kw])/Fs[0]*100;
Skk[kw]:=a1*esumark[kw]*esumark[kw]*esumark[kw]+a2*esumark[kw]*esumark[kw]+a3*esumark[kw]+a4;
Skk[0]:=a4;
sksr[kw]:=(Skk[kw-1]+Skk[kw])/2;
Fcont[kw]:=19.178*exp(0.2612*Ck[kw]);
Nval[kw]:=((Ms[kw]-1)*(1.6-0.36/ptr))/((0.674-0.540*st[kw-1])*A[kw]+1.6*st[kw-1]-1.11);
Mval[kw]:=0.287*Hkk[kw]*Hkk[kw]*Hkk[kw]*A[kw]*A[kw]*Nval[kw];
ldk[kw]:=sqrt(0.5*Dv*(Hkd[kw-1]-Hkd[kw]));
Hsrk[kw]:=sqrt(Hkd[kw-1]*Hkd[kw]);
lh[kw]:=ldk[kw]/Hsrk[kw];
If lh[kw]<0.35 then
begin
Nsort[kw]:=1;
end;
If lh[kw]>=0.35 then
begin
Nsort[kw]:=1;
end;
end;

If lh[kw]>2.0 then
begin
Nsort[kw]:=1.5;
end;
pkk[kw]:=Nsort[kw]*sksr[kw];
Pprs[kw]:=pkk[kw]*Fcont[kw]/1000;
Uskdop[kw]:=Pkdop;
end;
With Form1.Image2.Canvas do
begin
For nom:=1 to ik do begin
Ck[nom]:=(Trunc(Ck[nom]*100))/100;
hkd[nom]:=(Trunc(hkd[nom]*100))/100;
bkd[nom]:=(Trunc(bkd[nom]*100))/100;
Hkk[nom]:=(Trunc(Hkk[nom]*100))/100;
Bkk[nom]:=(Trunc(Bkk[nom]*100))/100;
hks[nom]:=(Trunc(hks[nom]*100))/100;
bks[nom]:=(Trunc(bks[nom]*100))/100;
For kw:=1 to ik do begin
If kw=1 then Fcon:=Fs[1];
If kw=2 then Fcon:=Fs[2];
If kw=3 then Fcon:=Fs[3];
If kw=4 then Fcon:=Fs[4];
If kw=5 then Fcon:=Fs[5];
If kw=6 then Fcon:=Fs[6];
If kw=7 then Fcon:=Fs[7];
If kw=8 then Fcon:=Fs[8];
If kw=9 then Fcon:=Fs[9];
If kw=10 then Fcon:=Fs[10];
If kw=11 then Fcon:=Fs[11];
If kw=12 then Fcon:=Fs[12];
If kw=13 then Fcon:=Fs[13];
If kw=14 then Fcon:=Fs[14];
If kw=15 then Fcon:=Fs[15];
wk[0]:=Fs[0];

```

```

Mstab[kw]:=wk[kw-1]/wk[kw];
esumark[kw]:=(Trunc(esumark[kw]*100))/10
0;
Ck[kw]:=(Trunc(Ck[kw]*100))/100;
hkd[kw]:=(Trunc(hkd[kw]*100))/100;
Mstab[kw]:=(Trunc(Mstab[kw]*100))/100;
Wk[kw]:=(Trunc(Wk[kw]*100))/100;
bkd[kw]:=(Trunc(bkd[kw]*100))/100;
A[kw]:=(Trunc(A[kw]*100))/100;
Ush[kw]:=(Trunc(Ush[kw]*100))/100;
st[kw]:=(Trunc(st[kw]*100))/100;
Fcont[kw]:=(Trunc(Fcont[kw]*100))/100;
skk[kw]:=(Trunc(skk[kw]*100))/100;
pkk[kw]:=(Trunc(pkk[kw]*100))/100;
Pprs[kw]:=(Trunc(Pprs[kw]*100))/100;
StringGrid1.Cells[1,0]:='Сторона калибра, мм';
StringGrid1.Cells[2,0]:='Высота калибра, мм';
StringGrid1.Cells[3,0]:='Ширина калибра, мм';
StringGrid1.Cells[4,0]:='Площадь сечения калибра, мм2';
StringGrid1.Cells[5,0]:='Вытяжка';
StringGrid1.Cells[6,0]:='Степень деформации, %';
StringGrid1.Cells[7,0]:='Уширение';
StringGrid1.Cells[8,0]:='Степень заполнения калибра';
StringGrid1.Cells[9,0]:='Приведенный диаметр валков, мм';
StringGrid1.Cells[10,0]:='Площадь контактной поверхности, мм2';
StringGrid1.Cells[11,0]:='Сопротивление деформации, МПа';
StringGrid1.Cells[12,0]:='Контактное давление МПа';
StringGrid1.Cells[13,0]:='Усилие прокатки, кН';
StringGrid1.Cells[14,0]:='Допустимое усилие прокатки, кН';
StringGrid1.Cells[0,1]:='1';
StringGrid1.Cells[0,2]:='2';
StringGrid1.Cells[0,3]:='3';
StringGrid1.Cells[0,4]:='4';
StringGrid1.Cells[0,5]:='5';
StringGrid1.Cells[0,6]:='6';
StringGrid1.Cells[0,7]:='7';
StringGrid1.Cells[0,8]:='8';
StringGrid1.Cells[0,9]:='9';
StringGrid1.Cells[0,10]:='10';
StringGrid1.Cells[0,11]:='11';
StringGrid1.Cells[0,12]:='12';
StringGrid1.Cells[0,13]:='13';
StringGrid1.Cells[0,14]:='14';
StringGrid1.Cells[0,15]:='15';
StringGrid1.Cells[1,kw]:=floattostr(Ck[kw]);
StringGrid1.Cells[2,kw]:=floattostr(hkd[kw]);
StringGrid1.Cells[3,kw]:=floattostr(bkd[kw]);
StringGrid1.Cells[4,kw]:=floattostr(wk[kw]);
StringGrid1.Cells[5,kw]:=floattostr(Mstab[kw]);
StringGrid1.Cells[6,kw]:=floattostr(esumark[kw]);
StringGrid1.Cells[7,kw]:=floattostr(Ush[kw]);
;
StringGrid1.Cells[8,kw]:=floattostr(st[kw]);
StringGrid1.Cells[9,kw]:=floattostr(A[kw]);
StringGrid1.Cells[10,kw]:=floattostr(Fcont[kw]);

```

```

StringGrid1.Cells[11,kw]:=floattostr(Skk[kw]
);
StringGrid1.Cells[12,kw]:=floattostr(pk[kw]
);
StringGrid1.Cells[13,kw]:=floattostr(Pprs[kw
]);
StringGrid1.Cells[14,kw]:=floattostr(Uskdop
[kw]);
StringGrid1.RowCount:=ik+1;
end;
end;
procedure
TForm1.StringGrid1DrawCell(Sender:
TObject; ACol, ARow: Integer;
  Rect: TRect; State: TGridDrawState);
  var s:string;
  Flag: Cardinal;
  H: integer;
  begin
  StringGrid1.Canvas.FillRect(Rect);
  s := StringGrid1.Cells[ACol,ARow];
  Case Acol mod 3 of
    0: Flag := DT_CENTER;
    1: Flag := DT_CENTER;
  else
    Flag := DT_CENTER;
  end;
  Flag := Flag or DT_WORDBREAK;
  Inc(Rect.Left,3);
  Dec(Rect.Right,3);
  H := DrawText(StringGrid1.Canvas.Handle,
PChar(s),length(s),Rect,Flag);
  if H > StringGrid1.RowHeights[ARow] then
    StringGrid1.RowHeights[ARow] := H;
  end;

```

```

procedure TForm1.Button9Click(Sender:
TObject);
begin
edit1.Clear;
edit2.Clear;
edit20.Clear;
edit5.Clear;
edit6.Clear;
edit7.Clear;
edit8.Clear;
edit9.Clear;
edit10.Clear;
edit11.Clear;
edit12.Clear;
edit13.Clear;
edit14.Clear;
edit15.Clear;
edit16.Clear;
edit17.Clear;
edit18.Clear;
edit19.Clear;
edit5.Visible:=False;
edit6.Visible:=False;
edit7.Visible:=False;
edit8.Visible:=False;
edit9.Visible:=False;
edit10.Visible:=False;
edit11.Visible:=False;
edit12.Visible:=False;
edit13.Visible:=False;
edit14.Visible:=False;
edit15.Visible:=False;
edit16.Visible:=False;
edit17.Visible:=False;
edit18.Visible:=False;

```



```
edit19.Visible:=False;
Label9.Visible:=False;
Label10.Visible:=False;
Label11.Visible:=False;
Label12.Visible:=False;
Label13.Visible:=False;
Label14.Visible:=False;
Label15.Visible:=False;
Label16.Visible:=False;
Label17.Visible:=False;
Label18.Visible:=False;
Label19.Visible:=False;
Label20.Visible:=False;
Label21.Visible:=False;
Label22.Visible:=False;
Label23.Enabled:=False;
Button6.Enabled:=false;
Button5.Enabled:=false;
Button10.Enabled:=false;
Button4.Enabled:=false;
Button13.Enabled:=false;
Label9.Visible:=False;
end;
end.
```

ОТЗЫВ

по результатам промышленного опробования технических решений по разработке новых сплавов и конструкций оборудования для получения слитков, припойных и ювелирных изделий из сплавов драгоценных металлов

В рамках выполнения совместных научно-исследовательских работ по хозяйственным договорам, выполненных в 2007-2012 г.г., на темы «Разработка состава и технологии серебряного порошкового припоя типа ПСр40, не содержащего кадмий», «Разработка технологии изготовления полос припоя серебряного ПСр72», «Разработка технологии изготовления золотого ювелирного сплава красного цвета 585 пробы и проволоки из него для производства цепей», «Разработка технологии изготовления слитков готовой продукции из платины и палладия», «Разработка технологии изготовления золотого ювелирного сплава белого цвета 585 пробы, не содержащего никель, и проволоки для изготовления цепей», «Разработка составов и технологии изготовления литейных ювелирных палладиевых сплавов белого цвета 900 и 950 пробы, не содержащих никель» и др. разработаны технические решения на новые сплавы и оборудование для производства слитков, припойных и ювелирных изделий из драгоценных металлов.

Данные технические решения защищены патентами:

1. Припой на основе серебра. Патент РФ №2335385, 2008 г.
2. Сплав на основе палладия. Патент РФ №2352660, 2009 г.
3. Припой на основе серебра. Патент РФ №2367552, 2009 г.
4. Припой на основе серебра. Патент РФ №2367553, 2009 г.
5. Сплав на основе палладия. Патент РФ № 2392339, 2010 г.
6. Сплав на основе золота. Патент РФ № 2391425, 2010 г.
7. Сплав на основе золота белого цвета 585 пробы. Патент РФ №2430982, 2011 г.
8. Установка для заливки металла в изложницы. Патент РФ №102314, 2011 г.
9. Припой для пайки ювелирных изделий из сплава палладия 850 пробы. Патент РФ №2447170, 2012 г.
10. Сплав на основе золота белого цвета 585 пробы. Патент РФ №2439179, 2012 г.

В настоящее время на базе этих технических решений проведены экспериментальные исследования и получены акты опытно-промышленной апробации, в которых указаны технико-экономические показатели технологии при использовании новых сплавов драгоценных металлов. Применение указанных технических решений позволяет повысить выход годного и эффективность технологии производства слитков, припойных и ювелирных изделий из сплавов драгоценных металлов и снизить их себестоимость.

Заместитель генерального директора
ОАО «Красцветмет»



Э.В. Мальцев
Э.В. Мальцев

ПРИЛОЖЕНИЕ В

УТВЕРЖДАЮ:

Ректор ФГАОУ ВПО

Сибирский федеральный
университет»

Е.А.Ваганов

2014 г.

**АКТ****внедрения в учебный процесс**

Настоящим актом подтверждается, что нижеперечисленные технические решения внедрены в учебный процесс института цветных металлов и материаловедения, применяются при обучении студентов специальности 150106 «Обработка металлов давлением», бакалавров и магистров направления «Металлургия» и аспирантов специальности 05.16.05 «Обработка металлов давлением» и используются при проведении занятий в рамках разработанных УМКД «Производство ювелирных изделий», а также при выполнении научно-исследовательских курсовых и дипломных работ, магистерских и кандидатских диссертаций, что позволяет существенно повысить эффективность обучения.

1. Способ модифицирования сплавов на основе золота, Патент РФ № 2507284.
2. Сплав красного цвета на основе золота 585 пробы, Патент РФ № 2514898.
3. Сплав белого цвета на основе серебра 925 пробы, модифицированный кремнием, Патент РФ № 2513502.

Директор ИЦМиМ

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "В.Н. Баранов".

В.Н.Баранов



П О Д Т В Е Р Ж Д А Ю:

И.о. ректора ФГАОУ ВО

«Сибирский федеральный
университет»

В.И. Колмаков

« 17 » июня 2019 г.

АКТ

внедрения в учебный процесс

Настоящим актом подтверждается, что нижеперечисленные технические решения внедрены в учебный процесс института цветных металлов и материаловедения, применяются при обучении бакалавров и магистров направления «Металлургия» и аспирантов специальности 05.16.05 «Обработка металлов давлением» и используются при проведении занятий в рамках разработанных УМКД «Производство ювелирных изделий», а также при выполнении научно-исследовательских курсовых и дипломных работ, магистерских и кандидатских диссертаций, что позволяет существенно повысить эффективность обучения.

1. Программа для ЭВМ «PROVOL». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612273.

2. База данных «Металлы и оборудование». Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2015620276.

3. Сплав на основе золота белого цвета 585 пробы. Патент РФ № 2586175.

Директор ИЦМиМ

В.Н.Баранов