

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

На правах рукописи



ЛОПАТИН ВЛАДИМИР АЛЕКСАНДРОВИЧ

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

Специальность 2.6.4 – Обработка металлов давлением

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
БЕЛЯЕВ Сергей Владимирович

Красноярск – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛУФАБРИКАТОВ И ИЗДЕЛИЙ ИЗ СПЛАВОВ ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ	11
1.1. Техничко-экономический анализ производства длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов драгоценных металлов	11
1.2. Свойства сплавов платины и палладия	18
1.3. Описание диаграмм состояния сплавов на основе платины и палладия	25
1.4. Анализ результатов научных исследований в области обработки сплавов на основе платины и палладия	28
1.5. Технологические схемы получения длинномерных полуфабрикатов из сплавов платины и палладия	31
1.6. Выводы и постановка задач исследования	35
2. МЕТОДИКИ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ	37
2.1. Методика проведения исследований технологии производства деформированных полуфабрикатов из новых сплавов на основе платины и палладия	37
2.2. Материалы, оборудование и методики исследований	46
2.3. Методика компьютерного моделирования процессов прокатки и волочения	51
3. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ДЛИННОМЕРНЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ СПЛАВОВ ПЛАТИНЫ	54
3.1. Разработка и совершенствование технологии производства проволоки ювелирного назначения из сплавов платины	54
3.2. Моделирование, исследование и совершенствование технологии	

производства листового проката из сплава платины ПЛРд20 для изделий технического назначения	64
3.3. Выводы по главе	80
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ДЛИННОМЕРНЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ СПЛАВОВ ПАЛЛАДИЯ	82
4.1. Разработка технологии производства проволоки ювелирного назначения из нового сплава палладия 850 пробы	82
4.2. Разработка и исследование технологии производства проволоки технического назначения из нового сплава палладия	94
4.3. Моделирование, исследование и совершенствование технологии производства проволоки технического назначения из сплава палладия ПдН-5	104
4.4. Выводы по главе	148
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	151
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	153
ПРИЛОЖЕНИЕ А	166
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	168
ПРИЛОЖЕНИЕ В	170

ВВЕДЕНИЕ

Производство литых и деформированных полуфабрикатов из сплавов золота, платины, палладия, серебра и других драгоценных металлов в настоящее время обеспечивает различные виды промышленности и имеет огромное значение для мировой и отечественной экономики. Основными являются два вида продукции: ювелирного назначения для производства цепей, колец, браслетов и т.п.; и технического назначения для изготовления катализаторных сеток, питателей, посуды, припоев и т.п. В этом многообразии изделий преобладающие позиции занимает изготовление длинномерных литых и деформированных полуфабрикатов из драгоценных металлов и их сплавов в виде прутков, проволоки, проката, труб и др.

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

В качестве продукции ювелирного назначения из драгоценных металлов и их сплавов можно выделить ювелирные цепи, объем производства которых достаточно велик. Производство ювелирных изделий [1, 2] развито наиболее широко и обеспечивает ими российский и мировой рынок. 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 [3]. Статистические исследования показывают, что среди потребителей ювелирной продукции особой популярностью пользуются сплавы на основе золота, платины, палладия и серебра. Вместе с тем растет спрос на изделия из этих металлов и их сплавов. В связи с

этим целесообразным является разработка новых сплавов на основе драгоценных металлов, соответствующих нормативным документам ЕС, и внедрение их в производство. Однако для этого необходимо проводить комплексные исследования, связанные с разработкой новых энергоэффективных технологических режимов производства литых и деформированных полуфабрикатов из этих сплавов, при этом их особенностью является использование имеющегося на специализированных металлургических предприятиях действующего литейного, прокатного и волочильного оборудования.

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

Анализ существующей технологии производства длинномерных деформированных полуфабрикатов, применяемых на этих предприятиях, показал, что она обладает рядом недостатков, снижающих качество продукции, увеличивающих ее стоимость и затраты на производство. Поэтому создание новых ювелирных сплавов и совершенствование технологий их обработки, а также проектирование технологических процессов и инструмента с применением методов математического и физического моделирования и специализированного программного обеспечения, является актуальной задачей.

В данной работе проведен ряд исследований применительно к получению длинномерных деформированных полуфабрикатов технического и ювелирного назначения из сплавов на основе платины и палладия, результаты которых частично приведены в монографии [2].

Актуальность этих исследований подчеркивается тем, что они велись в рамках программ Министерства образования и науки РФ по проектам «Разработка новых сплавов и припоев на основе драгоценных металлов и технологий производства из них слитков, полуфабрикатов и ювелирных изделий», «Исследование закономерностей формирования фазового состава и структуры новых сплавов

многокомпонентных систем из драгоценных металлов и изучение их свойств», «Создание новых сплавов драгоценных металлов с повышенными эксплуатационными характеристиками и исследование их свойств», «Исследование реологических характеристик деформированных полуфабрикатов из сплавов цветных металлов с использованием новых технологий совмещенной обработки и модифицирования». Практическую и научную ценность исследований представляют работы по хозяйственным договорам с ОАО «Красцветмет» по темам «Разработка технологии получения ювелирных палладиевых сплавов 850 пробы», «Разработка технологии получения ювелирных палладиевых припоев 850 пробы», «Разработка технологии изготовления слитков готовой продукции из платины и палладия», «Испытание на растяжение образцов сплавов на основе драгоценных металлов согласно ГОСТ 1497-84» и др. Их результативность подтверждается актами опытно-промышленной апробации новых технологий при внедрении на Красноярском заводе цветных металлов.

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

Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

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

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

Научная новизна полученных результатов исследований.

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

деформированному состоянию и возможности разрушения при заданных режимах деформации для исследуемых сплавов, позволившие усовершенствовать технологические режимы обработки.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Разработаны и запатентованы новые сплавы платины и палладия, которые применимы для производства длинномерных полуфабрикатов в виде проволоки ювелирного и технического назначения, имеющей высокий уровень механических и эксплуатационных свойств.
2. Реализованы численные расчеты с помощью программного комплекса DEFORM 3D процессов холодной сортовой, листовой прокатки и волочения для новых сплавов платины и палладия, позволяющие определить при различных условиях обработки формоизменение металла, характеристики напряженно-деформированного состояния, силовые параметры и возможность разрушения с использованием критерия Кокрофта-Латама.
3. Научно обоснованы и усовершенствованы технологии производства из новых сплавов платины и палладия:
 - проволоки для улавливающих сеток катализаторных систем диаметром 0,060-0,075 мм из сплава ПдН-5, и в производственных условиях ОАО «Красцветмет» проведена ее опытно-промышленная апробация, что позволило за счет стабилизации процесса волочения проволоки на последнем этапе ее обработки повысить производительность на 5-10% и увеличить выход годного на 1-3%.
 - полос толщиной до 1,0 мм из сплава ПЛРд-20, и в производственных условиях ОАО «Красцветмет» проведена ее опытно-промышленная апробация, что позволило уменьшить трудоемкость процесса за счет снижения количества проходов при прокатке в 1,5 раза.
4. Результаты исследований внедрены в учебный процесс СФУ и используются для подготовки магистров по направлению 22.04.02 Metallургия (программа 22.05.02.10 «Технологии ювелирной и художественной обработки металлов») и

аспирантов по направлению 22.06.01 «Технологии материалов» специальности 2.6.4 «Обработка металлов давлением».

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

На защиту выносятся:

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

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

Основные положения диссертационной работы изложены и обсуждены на национальных и международных конференциях и конгрессах, таких как «Цветные металлы и минералы» (г. Красноярск, 2018, 2019 г.); «Научное пространство России: генезис и трансформация в условиях реализации целей устойчивого разви-

тия» (г. Москва, 2020 г.); «Magnitogorsk Rolling Practice 2022» (г. Магнитогорск, 2022 г.), научно-технических конференциях СФУ (2019-2022 гг.).

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

Настоящая работа является продолжением комплекса научно-исследовательских работ, выполняемых на кафедре «Обработка металлов давлением» института цветных металлов (ИЦМ) ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (СФУ) и выполнена в рамках государственного задания на науку ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» (номер проекта FSRZ-2020-0013), госбюджетных НИР по программам Министерства образования и науки РФ, а также по договорам с ОАО «Красцветмет», грантам КГАУ «Красноярский краевой фонд поддержки научной и научно-технической деятельности» и грантам Сибирского федерального университета.

Включенные в диссертацию и выносимые на защиту результаты исследований представляют собой часть общих результатов научно-исследовательских работ по рассматриваемой проблеме, и выполнены непосредственно автором или в соавторстве.

1. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВА ПОЛУФАБРИКАТОВ И ИЗДЕЛИЙ ИЗ СПЛАВОВ ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ

1.1. Технико-экономический анализ производства длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов драгоценных металлов

Экономическая целесообразность производства изделий из драгоценных металлов и их сплавов не подвергается сомнению. Несмотря на экономический кризис 2014 – 2015 годов с 2017 года наблюдается ежегодный рост объемов производства, при этом объем продаж ювелирных изделий в России постоянно растет [4, 5].

По оценкам ООО "БизнесСтат" [6], в 2018-2022 гг. продажи ювелирных изделий в России сократились на 29%: с 92 до 65 млн. шт. В 2019-2020 гг. – еще на 15-25% в год вследствие снижения покупательской способности населения и роста цен на ювелирную продукцию.

В 2021 г. продажи ювелирных изделий на российском рынке возросли на 17%: с 68 до 68 млн шт., что было обусловлено восстановлением спроса после пандемии, однако в 2022 г. вследствие кризиса продажи вновь снизились на 4% и составили 65 млн. изделий.

В первом полугодии 2022 г. реализация ювелирных изделий росла, но рост безработицы и падение покупательской способности населения привели к ослаблению спроса.

В 2021 г экспорт ювелирных изделий из России восстановился после существенного падения предыдущего года и составил 17,3 млн шт. Но новый кризис в 2022 г. привел к очередному сокращению экспортных поставок ювелирной продукции из России на 24,8% до 13,0 млн шт. На фоне российско-украинского конфликта страны Евросоюза наложили запрет на импорт российских ювелирных изделий, а Великобритания повысила ввозную таможенную пошлину до 35%.

Экономическая обстановка повлияла и на динамику объемов экспорта и импорта ювелирной продукции (рис. 1.1) [7], которые к 2020 г. значительно сократились и в последующем начали возрастать, но цены стали выше из-за пошлин и санкций. В 2022 г. экспорт составил 97,5 млн. дол. США.

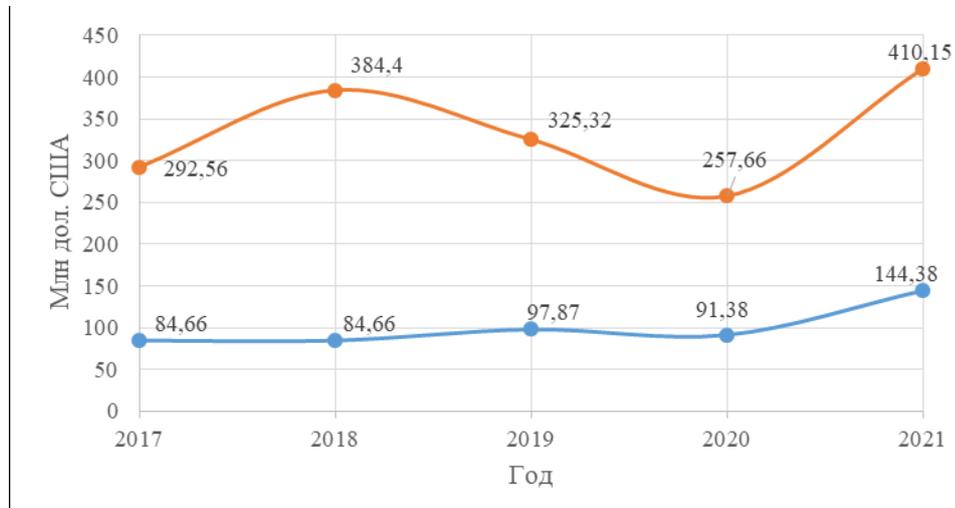


Рисунок 1.1. Динамика экспорта и импорта ювелирных изделий в России:

— импорт; — экспорт

Это при повышении экспорта повысило конкурентную борьбу отечественных производителей на внутреннем рынке на фоне повышения объемов импорта.

Особенностью рынка драгоценных металлов всегда являлась зависимость от цен на сырье. Также драгоценные металлы давно нашли применение в качестве твердой валюты для инвестирования, поэтому цены на них реагируют на изменение мировой экономики, как курс валют или цены на нефть. Нужно выделить еще один фактор, оказывающий влияние на состояние рынка драгоценных металлов и их сплавов: их производство и обращение контролируется законодательством.

Превышение объемов импорта говорит о неэффективном импортозамещении, низкой конкурентоспособности отечественной продукции и снижении спроса на нее на мировом рынке. Здесь необходимо учитывать следующие особенности отечественного рынка:

- рынок был сформирован крупными «историческими» брендами, использующими репутацию и традиции заводов-производителей советских времен в дизайне украшений;

- медленная динамика развития рынка;
- ювелирные украшения не воспринимаются как уникальные предметы роскоши, а качественная и дорогая бижутерия не считается адекватной их заменой.

В случае экспорта весомым сдерживающим фактором является законодательство страны-рынка сбыта, регламентирующее химический состав материалов, устанавливающее пошлины, а значит и влияющее на цену продукции, и т.д. В первую очередь, это нормы безопасности для здоровья человека и экологии. Так, например, Директива Европейского Сообщества 76/769/ЕЕС [3] запрещает производить и продавать ювелирные изделия и бижутерию, содержащие более 0,05% никеля. Лидерами-экспортерами изделий из драгоценных металлов и их сплавов являются Казахстан, Киргизия, Беларусь, Эстония, Гонконг и Германия, тогда как значительный объем экспортируемой продукции до кризиса поставлялся в Италию, Швейцарию и другие страны ЕС [6-8]. Особо следует выделить изделия из палладия, цены на которые существенно возросли [9-12].

Таким образом, в настоящее время очевидна тенденция роста спроса и цен на драгоценные металлы и сплавы, а также изделий из них.

Наиболее широко в промышленности используются серебро, золото, палладий и платина и их сплавы [13, 14], обладающие достаточными эксплуатационными свойствами, например, высокой коррозионной стойкостью против действия кислот, щелочей, солей и газов и оптическими характеристиками [15, 16]. Они имеют привлекательный вид и сочетаются с драгоценными, полудрагоценными камнями и эмалями. Однако существует и ряд особенностей, ограничивающих область их применения, в том числе, высокая стоимость, низкие прочностные свойства, поэтому драгоценные металлы служат основой для создания различных сплавов [11]. В этом ряду особое место занимают сплавы на основе платины и палладия и полуфабрикаты из них, которые используются для изготовления как ювелирных, так и технических изделий (рис. 1.2).

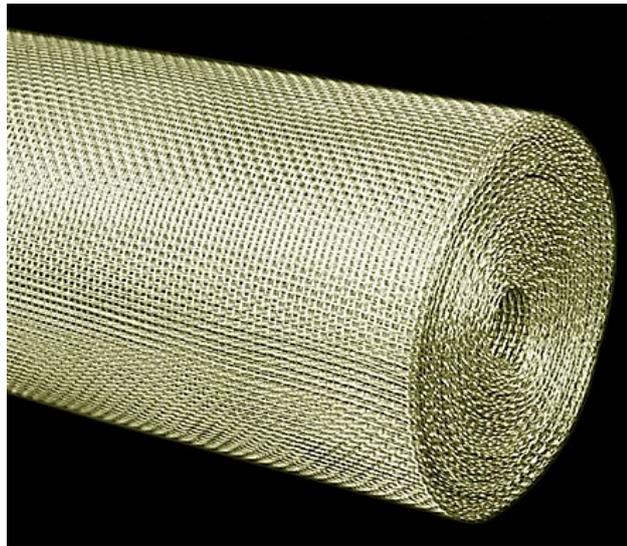


НЦ-41 (платина 950°)

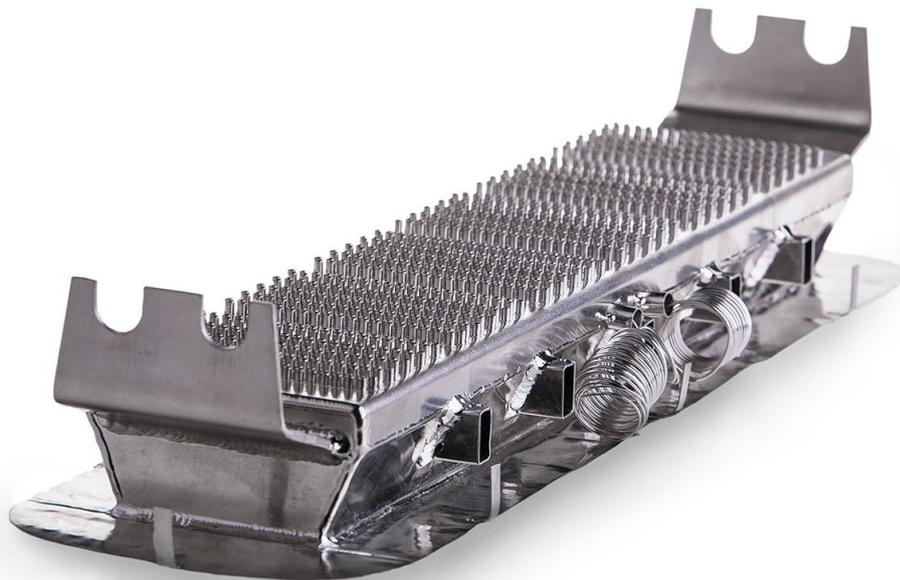


НЦ-61 (палладий 850°)

а



б



в

Рисунок 1.2 – Ювелирные и технические изделия из сплавов платины и палладия: *а* – ювелирные цепи; *б* – тканая сетка; *в* – фильерный питатель

Большой объем изделий ювелирного назначения изготавливается из проволоки, используемой для производства ювелирных цепей, имеющих разнообразную форму и размеры (рис. 1.2, *а*). Для этих изделий необходимо предварительно получить промежуточные длинномерные полуфабрикаты в виде прутков и окончательно произвести проволоку диаметром 0,25-0,35 мм, из которой затем на цепевязальных станках изготавливают цепочки.

Изделия технического назначения также широко представлены листовым прокатом и проволокой. Так, например, из проволоки сплавов платины и палладия изготавливают катализаторные сетки. Они используются в производстве азотной кислоты для работы в агрессивной среде при температурах 800–900 °С. К материалам относятся сплавы на основе платины, химический состав которых регламентирует ГОСТ Р54151-2010 [17]. В процессе эксплуатации катализаторные сетки теряют платину, поэтому при окислении аммиака, являющейся одной из основных операций при получении азотной кислоты, для извлечения платины применяют тканые улавливающие сетки (рис. 1.2, *б*) из палладиевых сплавов [19].

Тканые улавливающие сетки [18] изготавливают из проволоки диаметром 0,15 мм и меньше (обычно в диапазоне диаметров от 0,06 до 0,1 мм) на волочильных машинах для наитончайшего и микронного волочения [19]. Чем меньше диаметр проволоки, тем сложнее технология ее получения, а из-за опасности обрывов проволоки, особенно при упрочнении металла на последних переходах волочения, может возрасти объем брака, что снизит выход готовой продукции. Кроме того, важно учитывать высокую стоимость проволоки из сплава драгоценного металла палладия, поэтому все технологические приемы, направленные на снижение количества отходов при производстве такой проволоки, следует считать актуальными. Освоение технологий производства изделий из сплавов драгоценных металлов в промышленных условиях требует больших материальных затрат, поэтому перед промышленными испытаниями целесообразно проводить моделирование процессов обработки металла. Сведения об обработке давлением палладиевых сплавов практически отсутствуют, а имеющиеся в основном посвящены получению полу-

фабрикатов для ювелирного производства. Из листовых материалов платино-родиевых сплавов изготавливают фильерные питатели (рис. 1.2 в), которые используются при одностадийном методе получения стеклянных волокон, когда стекло, сваренное в стекловаренной печи, по специальным каналам фидерной системы подводится непосредственно к ним для формирования волокон.

Одним из основных производителей проволоки и листового проката из драгоценных металлов и их сплавов России является Красноярский завод цветных металлов им. В.Н. Гулидова (ОАО «Красцветмет»). По данным маркетингового исследования, проведенного журналом «Экспо-Ювелир» [12], ОАО «Красцветмет» является и лидером по продажам таких изделий на отечественном рынке (табл. 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 однообразный ассортимент продукции.

Таблица 1.1 - Доли лидеров рынка по товарным группам ювелирных цепочек

Предприятие	Доля рынка по группе изделий, %
ОАО «Красцветмет»	33,4
SOKOLOV	15,4
ЮЗ «Эстет»	10,1
Адамас (ООО «АДАМАС-ЮВЕЛИРТОРГ»)	10,1

Однако при этом следует отметить, что для производства изделий из драгоценных металлов и сплавов используются технологии и оборудование, внедренные еще в прошлом веке. Новые научные разработки, в том числе по новым сплавам, пока не используются в производстве по ряду объективных и субъективных причин. Так, например, за последние 10 лет учеными Красноярского института цветных металлов запатентовано более 20 новых сплавов палладия, платины, золота и серебра, в том числе вместе с сотрудниками Красноярского завода цветных

металлов, и проведена опытно-промышленная апробация технологий получения из нескольких новых сплавов изделий ювелирного и технического назначения [2].

Для производства изделий ювелирного и технического назначения из сплавов драгоценных металлов можно сформулировать ряд следующих требований:

- сплавы, используемые для производства цепей, должны быть гипоаллергенны, что достигается отсутствием в них никеля, кобальта и др. элементов;
- 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 оборудовании, предназначенном для отделки и изготовления конечных изделий, например, цепевязальных станках.

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

- отечественная продукция из сплавов драгоценных металлов обладает низкой конкурентоспособностью, в том числе из-за несоответствия качества изделий требованиям мирового рынка из-за отсутствия научных разработок по созданию новых сплавов и технологий их термомодеформационной обработки;
- произошла реструктуризация рынка, и возрос спрос на изделия из этих сплавов;
- основными требованиями при создании новых ювелирных изделий являются повышение технологических и механических свойств литых и деформированных полуфабрикатов из них за счет модифицирования, снижение их стоимости и обеспечение соответствия европейским нормам безопасности.

1.2. Свойства сплавов платины и палладия

К металлам платиновой группы относят платину, палладий, иридий, родий, рутений и осмий. Свойства этих металлов зависят от их атомного строения. Периодическая система элементов Д.И. Менделеева относит платину и палладий к переходным металлам группы VIII с ГЦК решеткой.

Механические свойства служат исходными параметрами при разработке технологического процесса изготовления изделий из сплавов драгоценных металлов. Основными характеристиками механических свойств металлов являются твердость – HV (НВ), временное сопротивление σ_b , условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, относительное удлинение δ , относительное сужение ψ . Механические свойства платины и палладия приведены в табл. 1.2, из которой следует, что они характеризуются сравнительно высокими показателями пластичности и прочности, а легирование этих металлов обеспечивает повышенный уровень этих свойств, что является необходимым для применения значительных степеней при холодной деформации в таких видах обработки металлов давлением, как прокатка, волочение и др. [16].

Таблица 1.2 - Механические свойства драгоценных металлов платиновой группы технической чистоты в отожженном состоянии

Металл	HV(НВ), МПа	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %
Pt	390–420	120–160	60–80	40–50	95–100
Pd	380–460	180–200	50–70	25–35	80–85
Ru	2 000–3 000	500–600	350–400	3–10	2–3
Rh	1 000–1 300	400–560	70–100	8–15	20–25
Ir	1 700–2 200	400–500	90–120	6–10	10–15
Os	3 000–4 000	–	–	0	0

Так, например, в ювелирном производстве полуфабрикаты для изготовления цепочек должны обладать не только высокой прочностью и твердостью, чтобы не происходил износ звеньев, но и должны быть достаточно пластичными, чтобы ис-

ключить обрывность при волочении. При этом их твердость и износостойкость после обработки не должны быть низкими, чтобы цепочки не рвались при носке.

К основным факторам, обеспечивающим прочность драгоценных металлов, относят:

- легирование, т.к. добавка к чистым металлам легирующих компонентов повышает прочность;
- пластическую деформацию, которая в случае холодной деформации повышает прочность;
- размер зерна, т.к. мелкозернистая структура придает металлу большую прочность, по сравнению с крупнозернистой;
- температуру, с повышением которой прочность понижается.

Пластическая деформация оказывает существенное влияние на свойства сплавов из драгоценных металлов [20]. Для обработки металлов обычно используют холодную, а реже горячую пластическую деформацию. Горячую деформацию металлов проводят при нагреве выше температуры рекристаллизации. Этот вид обработки для сплавов палладия используется редко (например, при прессовании) и предшествует холодной деформации. При холодной деформации заготовок из платины и палладия обеспечивается высокое качество поверхности, точность геометрических размеров, сопровождаемая возможностью получения различных по величине и форме сечения изделий.

Сведений о свойствах сплавов на основе платины и палладия немного [21-27], а имеющиеся разрознены и являются неполными по следующим причинам:

- высокая стоимость, которая ограничивает расход металлов на изготовление образцов для испытания свойств;
- высокая пластичность, что создало ошибочное представление об отсутствии необходимости в подробном исследовании их свойств;
- редкость металлов и небольшой их объем, предназначенный для обработки, что исключает использование в технологиях крупногабаритных заготовок. Так как основной задачей данной работы являлся анализ и совершенствование техно-

логии изготовления длинномерных полуфабрикатов из платины и палладия и их сплавов, ниже приведены имеющиеся в научно-технической литературе данные по их свойствам.

Основными характеристиками платины, химического элемента, имеющего символ Pt и порядковый номер 78, являются: плотность 21,45 г/см³, температура плавления 1769 °С, твердость по Бринеллю в отожженном состоянии около 500 МПа [16]. Металл имеет бело-серую окраску, схожую по цвету со сталью, встречается в природе в самородном виде. В чистом виде платину не используют из-за низких механических свойств, но металл склонен к упрочнению при холодной деформации, как это показано на рис. 1.3. В отечественных сплавах содержится от 85 до 95 % платины, а в качестве легирующих компонентов в нее добавляют иридий, палладий, родий, медь, рений, кремний, галлий и вольфрам. Указанные добавки обеспечивают повышение прочности, твердости и износостойкости. Данные по твердости платиновых сплавов приведены в табл. 1.3.

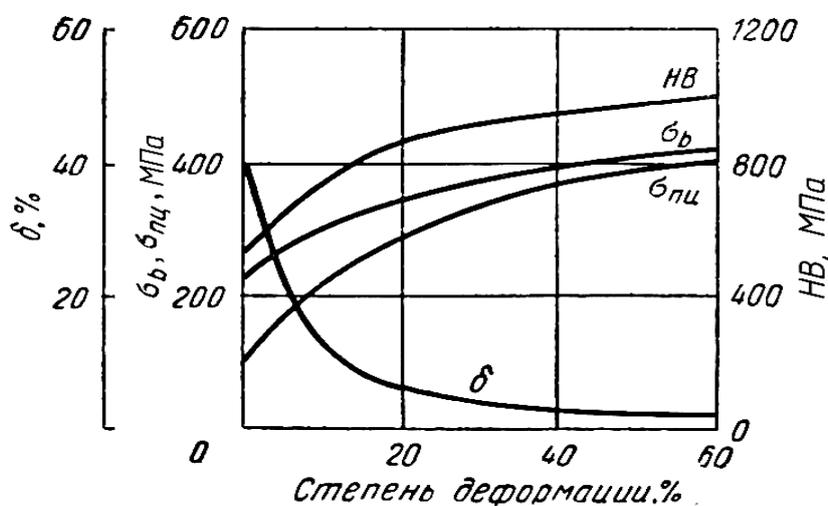


Рисунок 1.3 - Механические свойства платины в зависимости от степени деформации

В настоящее время большая часть платины используется в технических целях в виде проволоки для изготовления катализаторных сеток, применяемых в процессе получения минеральных удобрений. Для разработки технологии волочения такой проволоки требуется достоверная информация о ее механических свойствах

Таблица 1.3 - Твердость сплавов на основе платины

Марка	Твердость HV*, МПа	
	Твердый	Мягкий
ПлИ850-150	2100	1550
ПлПд850-150	1200	600
ПлРд850-150	2400	1050
Пл850	3400	1600
ПлПдКр850-120	–	3000
ПлПдГа850-140	1600	1350
ПлИ900-100	1450	800
ПлПд900-100	1400	80
ПлРд900-100	2000	900
ПлМ900	3350	1550
ПлПдРе900-80	–	–
ПлПдКр900-70	–	3000
ПлИ950-50	1450	750
ПлПд950-50	1500	650
ПлРд950-50	1950	800
ПлМ950	2750	1220
ПлПдРе950-25	1500	800
ПлПдКр950-30	–	3000
ПлВ950	1350	–

*Твердость определялась на образцах со степенью деформации 75–95 %.

В табл. 1.4 приведены данные по влиянию температуры на механические свойства платины разной степени чистоты [21,22]. В этой таблице представлена платина технической чистоты (содержание чистой платины составляет 99,5), химически чистая платина (чистой платины - 99,9 %) и физически чистой платины (чистой платины - 99,95 %). Повышение чистоты платины сопровождается снижением прочностных свойств, тогда как пластичность ее остается на одном уровне при небольшом ее превышении над остальными видами у платины химической чистоты. С повышением температуры испытания значения σ_B и

$\sigma_{0,2}$ закономерно понижаются, однако при этом снижается и δ , что обычно не является характерным для чистых металлов, что связано с процессами, проходящими при старении.

Таблица 1.4 - Влияние температуры на механические свойства платины

t, C	$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\delta, \%$
20	168/142/136	105/91/75	40/43/40
200	157/142/90	103/90/62	35/40/35
400	142/109/94	92/70/54	34/40/35
500	138/117/96	87/59/50	32/35/35
600	109/84/90	66/51/60	30/33/30
700	93/77/80	64/49/40	30/38/30
800	91/73/76	47/30/39	28/35/28
900	78/60/63	46/31/30	28/33/28

Примечание. Первая цифра в свойствах — платина технической чистоты, вторая — платина химической чистоты, третья — платина физической чистоты.

На рис. 1.4 и 1.5 представлены данные по свойствам сплавов ПлПдРдРу 81-15-3,5-0,5, ПлРд-10 и ПлРд-10ДУ, полученные авторами работ [22].

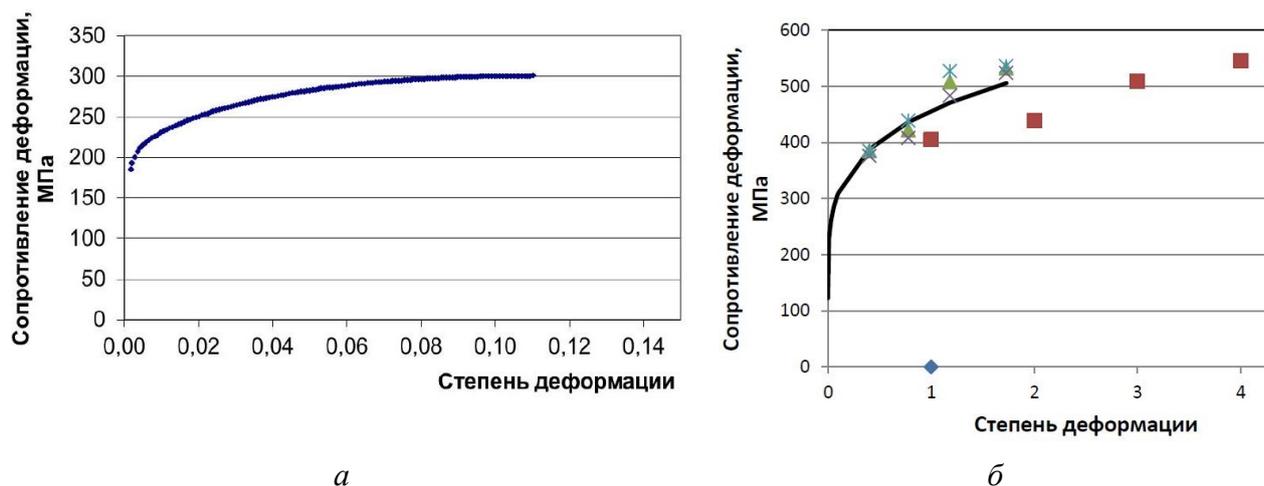


Рисунок 1.4. - Кривые упрочнения сплава ПлПдРдРу 81-15-3,5-0,5 при малых (а) и при больших (б) деформациях: точки – опытные данные; линия – по уравнению регрессии

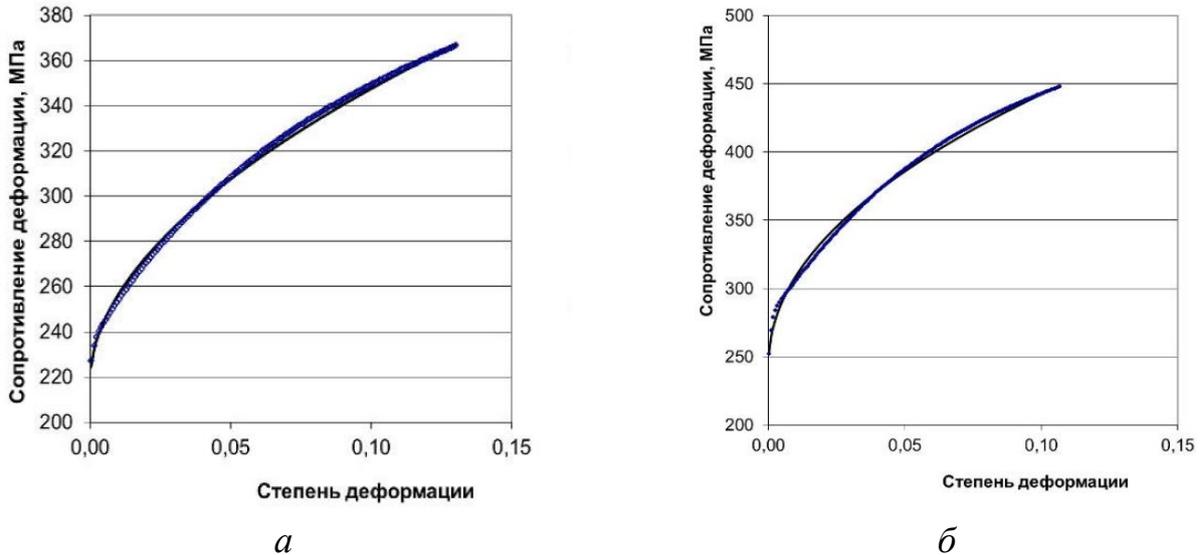


Рисунок 1.5 - Кривые упрочнения для сплавов ПЛРД-10 (а) и ПЛРД-10ДУ (б)

Основными характеристиками палладия, химического элемента, имеющего символ Pd и порядковый номер 46, являются: плотность $12,0 \text{ г/см}^3$, температура плавления $1554,5 \text{ }^\circ\text{C}$, твердость по Бринеллю в отожженном состоянии 520 МПа.

Из шести платиновых металлов, кроме самой платины, только палладий встречается в самородном состоянии, но самородный палладий крайне редок. Серебристо-белый палладий внешне больше похож на серебро, чем на платину, он ближе к этому металлу и по плотности. Палладий легко прокатывается в фольгу и протягивается в тонкую проволоку. На рис. 1.6 представлена зависимость механических свойств палладия от степени холодной деформации [16].

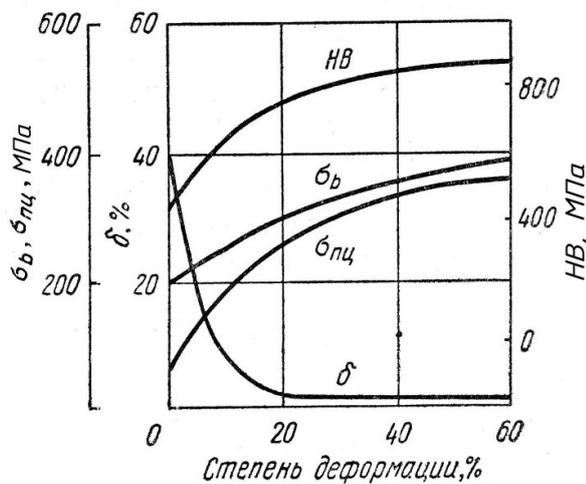


Рисунок 1.6 - Механические свойства палладия в зависимости от степени деформации

Таким образом, сплавы палладия имеют высокие механические свойства, пригодны для всех видов обработки давлением и резанием и обладают интенсивным белым цветом, особенно сплавы с серебром и никелем. Для получения сплавов на основе палладия с повышенными механическими свойствами в него в качестве легирующих элементов обычно добавляют золото, серебро, никель и медь. Значения твердости российских палладиевых сплавов представлены в табл. 1.5 [1]. В табл. 1.6 приведены механические свойства проволоки из сплавов палладия [24].

Таблица 1.5 - Твердость сплавов на основе палладия

Марка	Твердость HV*, кгс/мм ²	
	Твердый	Мягкий
ПдСрН500-450	330	160
ПдСрН850-130	235	125
ПдМ850	220	155

*Твердость определялась на образцах со степенью деформации 75–95 %.

Таблица 1.6 - Сопротивление разрыву проволоки из палладия и его сплавов

Марка	Сопротивление разрыву σ_b , МПа	
	мягкий	твердый
Пд	120-200	250-500
ПдИ-10	300-400	800-1000
ПдИ-18	500-650	850-1300
ПдСр-20	350-450	600-900
ПдСр-30	300-450	700-1000
ПдСр-40	350-450	750-1000
ПдСрК-35-5	600-700	1100-1300
ПдСрМ-36-4	500-600	800-1100

Для создания новых сплавов необходимо знать не только свойства сплавов, подвергнутых обработке давлением, но и диаграммы состояния этих сплавов.

1.3. Описание диаграмм состояния сплавов на основе платины и палладия

В качестве легирующих элементов для сплавов на основе платины и палладия используется серебро, медь, платина, иридий, никель и др. В качестве модифицирующих добавок целесообразно использовать рутений, родий и др. элементы.

Анализ диаграмм состояния на основе платины и палладия проведен по литературным данным справочников [28, 29].

Система никель-палладий (рис. 1.7) характеризуется полной растворимостью элементов в твердом и жидком состоянии и отсутствием выделений интерметаллидов. Но при этом в ней наблюдается снижение температур ликвидуса и солидуса с минимумом, соответствующим температуре 1237 °С и концентрации палладия 45,4 % (ат.).

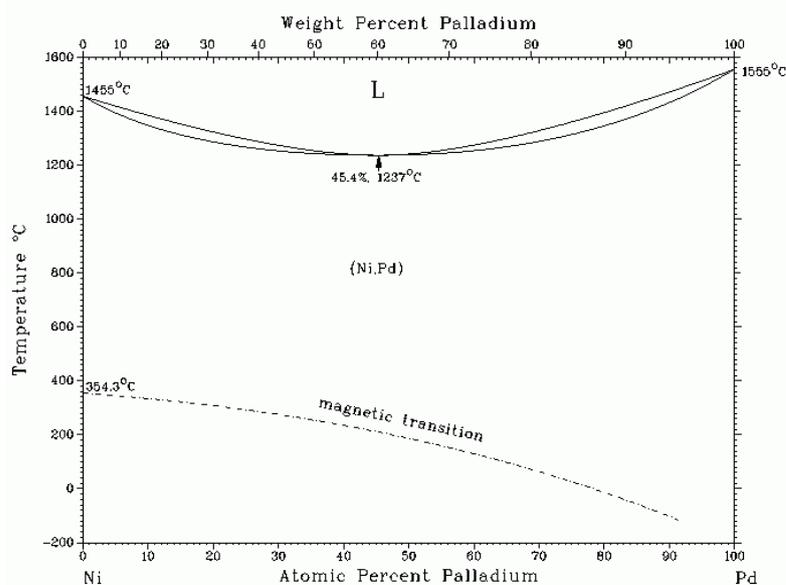


Рисунок 1.7 – Диаграмма состояния Ni-Pd

В системе медь-палладий, также характеризующейся неограниченной растворимостью компонентов в жидком и твердом состоянии, в области твердого раствора наблюдается образование упорядоченных фаз CuPd и Cu₃Pd (рис. 1.8).

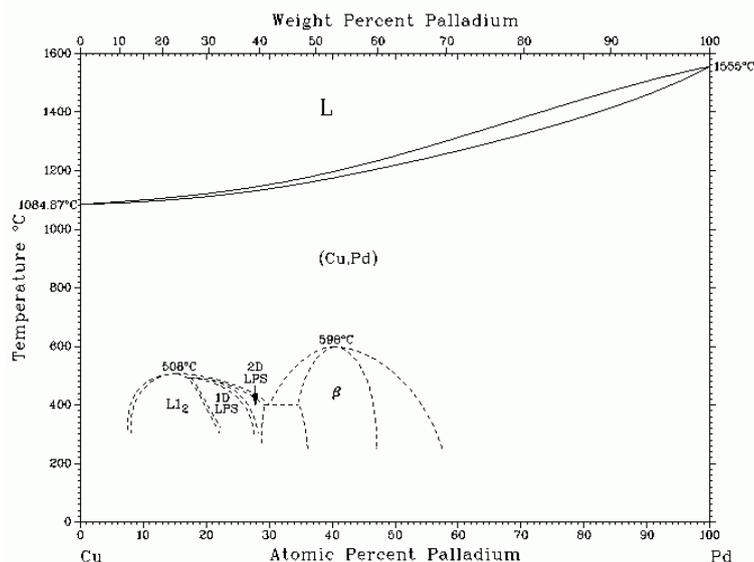


Рисунок 1.8 - Диаграмма состояния Cu-Pd

Диаграмма состояния платина-иридий (рис. 1.9) представляет собой систему с непрерывной взаимной растворимостью исходных компонентов. Согласно этой диаграмме при кристаллизации образуется непрерывный ряд твердых растворов на основе Pt и Ir. С понижением температуры наблюдается распад твердых растворов с образованием двухфазной области большой протяженности. Максимальная критическая температура распада твердого раствора отвечает 975°C при содержании 50% (ат.) Ir. Пределы двухфазной области в области от 7% (ат.) до 99% (ат.) Ir. Установлено, что равновесное состояние в системе Pt-Ir в области существования двух фаз не достигается даже при выдержке в течение одного года. Сплавы платины с 5 и 10 % иридия при холодной прокатке допускают суммарное обжатие в 75 % между промежуточными отжигами, а сплав с 25 % Ir – только 50 %. Холодная деформация заметно повышает прочностные характеристики, но резко снижает (от 20–32 % до 2–2,5 %) относительное удлинение сплавов. Интервал кристаллизации всех платино-иридиевых сплавов сравнительно узок. Например, сплав ПЛИ-10, содержащий 10 % Ir, начинает кристаллизоваться при температуре 1790°C , заканчивает при 1769°C , а сама кристаллизация происходит очень быстро. В системе платина-палладий образуется непрерывный ряд твердых растворов (рис. 1.10). Свойства этих сплавов исследованы также в работах И.И. Нови-

кова и Е.И. Рывина с сотрудниками [30], которые изучали микротвердость при комнатной температуре и кратковременную прочность при 1100, 1200, 1300 и 1400°C сплавов Pt с 10 и 15 % Pd.

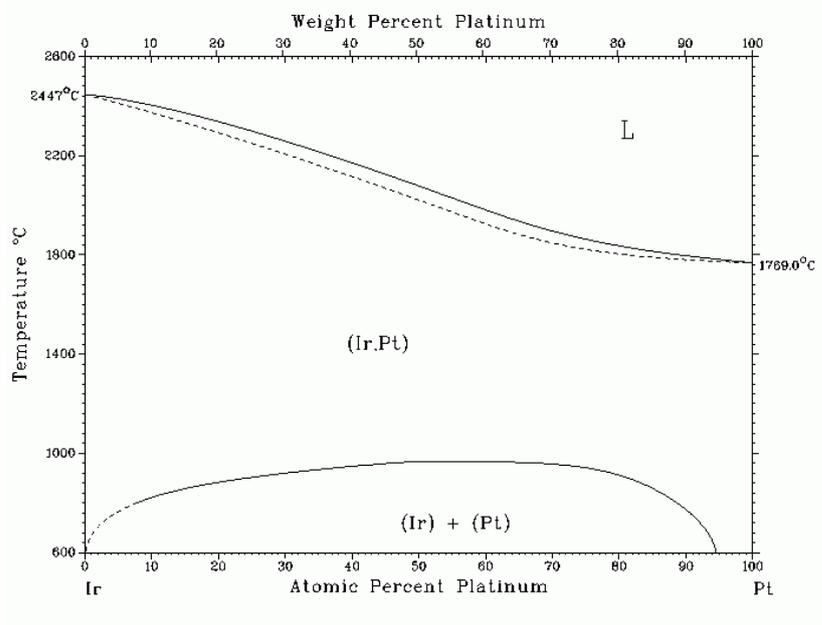


Рисунок 1.9 - Диаграмма состояния Pt – Ir

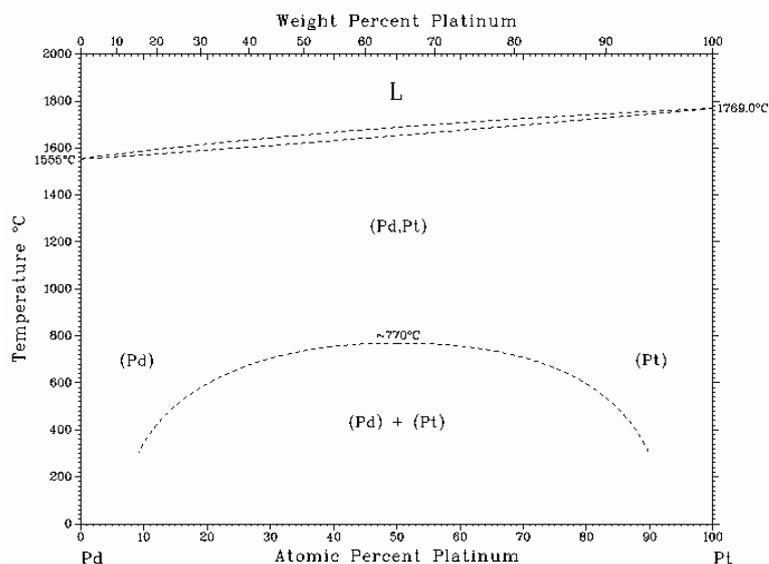


Рисунок 1.10 - Диаграмма состояния Pd-Pt

Таким образом, анализ приведенных диаграмм состояния различных систем позволяет выявить особенности легирования сплавов платины и палладия и установить их влияние на физико-механические свойства производимых из них полуфабрикатов и изделий.

1.4. Анализ результатов научных исследований в области обработки сплавов на основе платины и палладия

Исследованиям в области обработки сплавов на основе платины и палладия посвящены немногочисленные работы, изложенные в диссертациях [31-33], публикациях зарубежных [34-43] и отечественных ученых [35-72].

В работах уральских ученых под руководством профессора Ю.Н. Логинова [22,23, 32, 33, 46-49 и др.] достаточно подробно изучены свойства, особенности деформации и напряженно-деформированного состояния металла для сплавов платины и палладия.

Так, например, работа [31] посвящена изучению неоднородности пластической деформации в процессах волочения проволоки из сплава платины ПлПдРд92,5-4-3,5. Автором проведены исследования процесса получения проволоки тонкого и тончайшего волочения и поведения дефектов в металле. Получены значения сопротивления деформации для этого сплава при скорости деформации $0,008...0,01 \text{ с}^{-1}$ в диапазоне степеней деформации $0...2,644$ (рис. 1.11). Автором установлено, что метод растяжения образцов позволяет получить данные по сопротивлению деформации при достижении обжатия не выше 12 %. Метод определения сопротивления деформации измерением условного предела текучести позволил получить данные при обжатии до 95 %. Выявлено, что кривые упрочнения для указанного сплава имеют вид монотонно возрастающих зависимостей. Полученные зависимости представлены в графическом и аналитическом виде, что позволяет использовать их для моделирования процесса волочения проволоки и расчета силовых параметров.

Автором работы [32] проведены исследования формоизменения при штамповке платиновых сплавов и влияния на него сопротивления деформации металла. Для платинового сплава ПлПдРдРу 81-15-3,5-0,5 были получены зависимости сопротивления деформации от степени холодной деформации в диапазонах малых и больших степеней деформации (рис. 1.4).

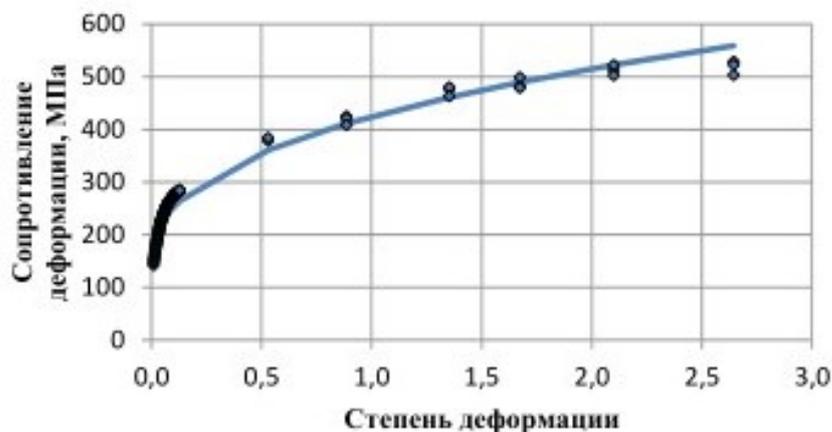


Рисунок 1.11 – Кривая упрочнения сплава ПлПдРд92,5-4-3,5 при больших деформациях:
 точки – опытные данные в трех сериях опытов, линия – по уравнению регрессии

Предложено полученные значения сопротивления деформации для исследуемых сплавов в интервале степеней деформации от 0 до 1,7 описывать уравнениями регрессии вида

$$\text{для сплава ПлПдРдРу } 81-15-3,5-0,5 \quad \sigma_s = 123 + 333\varepsilon^{0,251}. \quad (1.1)$$

$$\text{для сплава ПлРд-10} \quad \sigma_s = 203 + 380\varepsilon^{0,448}; \quad (1.2)$$

$$\text{для сплава ПлРд-10ДУ} \quad \sigma_s = 243 + 602\varepsilon^{0,480}. \quad (1.3)$$

По данным автора сопоставление опытных и расчетных данных показало, что максимальные отклонения не превышают 2 %, что подтверждает их хорошую сходимость.

Практическая ценность результатов этих исследований заключается в возможности использования полученных зависимостей и аппроксимированных данных для постановки и решения конкретных краевых задач обработки металлов давлением, а также при компьютерном моделировании в программных комплексах, использующих метод конечных элементов (Deform, QForm и др.).

В работе [33] изложены результаты исследований процессов сортовой прокатки и волочения проволоки ювелирного назначения из новых сплавов на основе палладия. Разработанные сплавы характеризуются высокой технологичностью и запасом пластичности, поскольку они без промежуточных отжигов претерпевают суммарную деформацию более 90% и не показывают склонность к образованию

трещин. На основании изученных закономерностей изменения механических свойств автором были получены эмпирические зависимости для определения временного сопротивления и условного предела текучести для разработанных сплавов при максимальной степени деформации. Установлено, что показатели прочности сплава ПдЗлМ-2-13 зависят от интервала степени деформации, что обусловлено более интенсивным упрочнением данного материала выше суммарной деформации 81%.

$$\sigma_b = a \varepsilon_\Sigma^2 + b \varepsilon_\Sigma + c \text{ и } \sigma_{0,2} = a \varepsilon_\Sigma^2 + b \varepsilon_\Sigma + c, \quad (1.4)$$

где a , b , c – безразмерные коэффициенты, зависящие от свойств разработанных сплавов [33].

Исследования кривых деформационного упрочнения количественно показали влияние температуры термической обработки на свойства проволочных полуфабрикатов из новых палладиевых сплавов. Было установлено, что повышение температуры и времени отжига для сплава ПдСр-15 приводит к существенному снижению его сопротивления деформации.

Общим научно-обоснованным подходом к расчету формоизменения металла в калибрах является матричная оценка, методика применения которой изложена в работах О.Н. Тулупова [67-72]. Она позволяет установить влияние геометрических размеров, технологических и деформационных параметров на формоизменение металла при сортовой прокатке на основании решения матрицы, все компоненты которой связаны через характеристическое уравнение с ее инвариантом. Это дает возможность получить статистическую модель формоизменения металла, на основании которой формируется калибровка валков прокатного стана и производится моделирование процесса прокатки. Результаты этих исследований по созданию математических моделей на основе структурно-матричного подхода к моделированию технологических схем сортовой прокатки и формоизменения в калибрах позволяют обеспечить требуемый уровень качества сортовых профилей за счет универсальности и доступности хранения, обработки и анализа данных в электронном виде.

1.5. Технологические схемы получения длинномерных полуфабрикатов из сплавов платины и палладия

При изготовлении изделий из платины и палладия, которое характеризуется рядом особенностей при реализации технологического процесса, применяют плавку, литье, а для получения деформируемых полуфабрикатов сортовую и листовую прокатку, волочение и термообработку [2].

Анализ научно-технической литературы показал, что для плавки легирующих компонентов наибольшее применение получили индукционные установки, которые предназначены для непосредственного нагрева до заданной температуры и плавки драгоценных металлов, помещаемых в графитовый тигель.

Для получения литых заготовок используют методы литья, различающиеся по соотношению скоростей литья и кристаллизации, материалу и типу изложниц, способам дозировки расплавов и другим признакам технологического и конструктивного оформления. Наибольшее применение для изготовления заготовок для последующей сортовой прокатки и волочения получил метод непрерывного литья на универсальных машинах вертикального типа. При этом технологические параметры литья зависят в первую очередь от марки сплава. К литым заготовкам для обработки давлением предъявляются особо высокие требования. Они должны иметь определенную форму и размеры, быть плотными, без шлаковых и окисных включений, расслоений, плен, грубых неслитин и трещин, иметь мелкозернистую структуру, равномерное распределение основных и легирующих компонентов по сечению и длине, однородные механические свойства, выдерживать пластическую деформацию и обладать другими качественными характеристиками.

Типовые технологические схемы, используемые при промышленном изготовлении литых и деформированных полуфабрикатов для производства изделий технического и ювелирного назначения из сплавов платины и палладия приведены на рис. 1.12, 1.13.

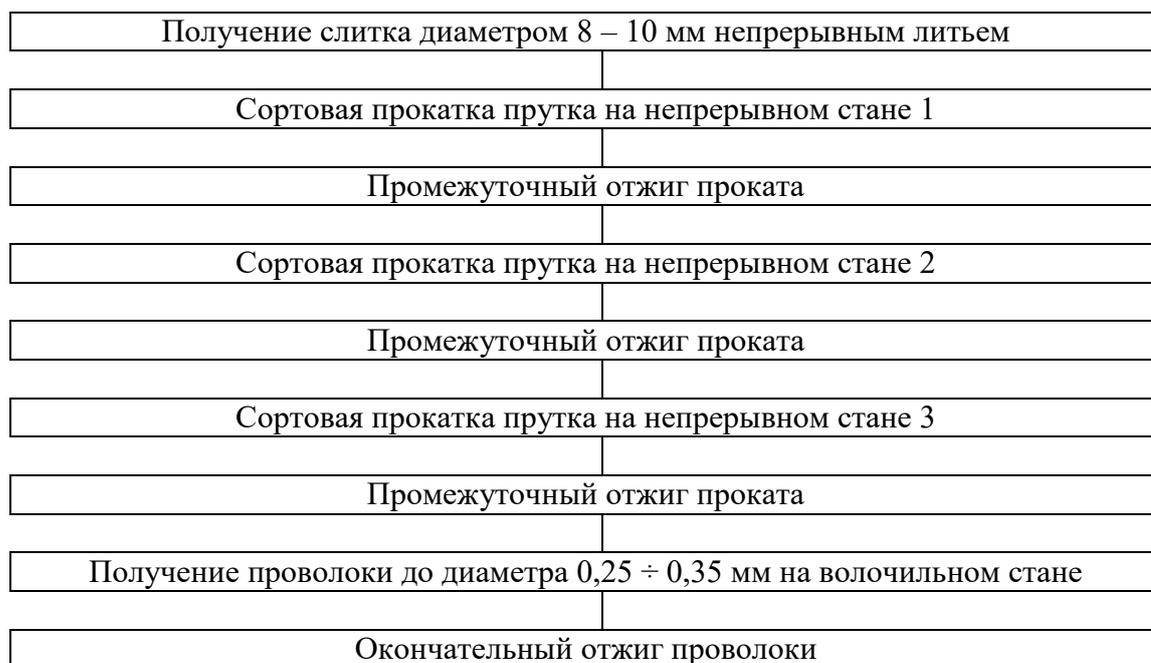


Рисунок 1.12 - Типовая технологическая схема изготовления проволоки из палладиевого сплава

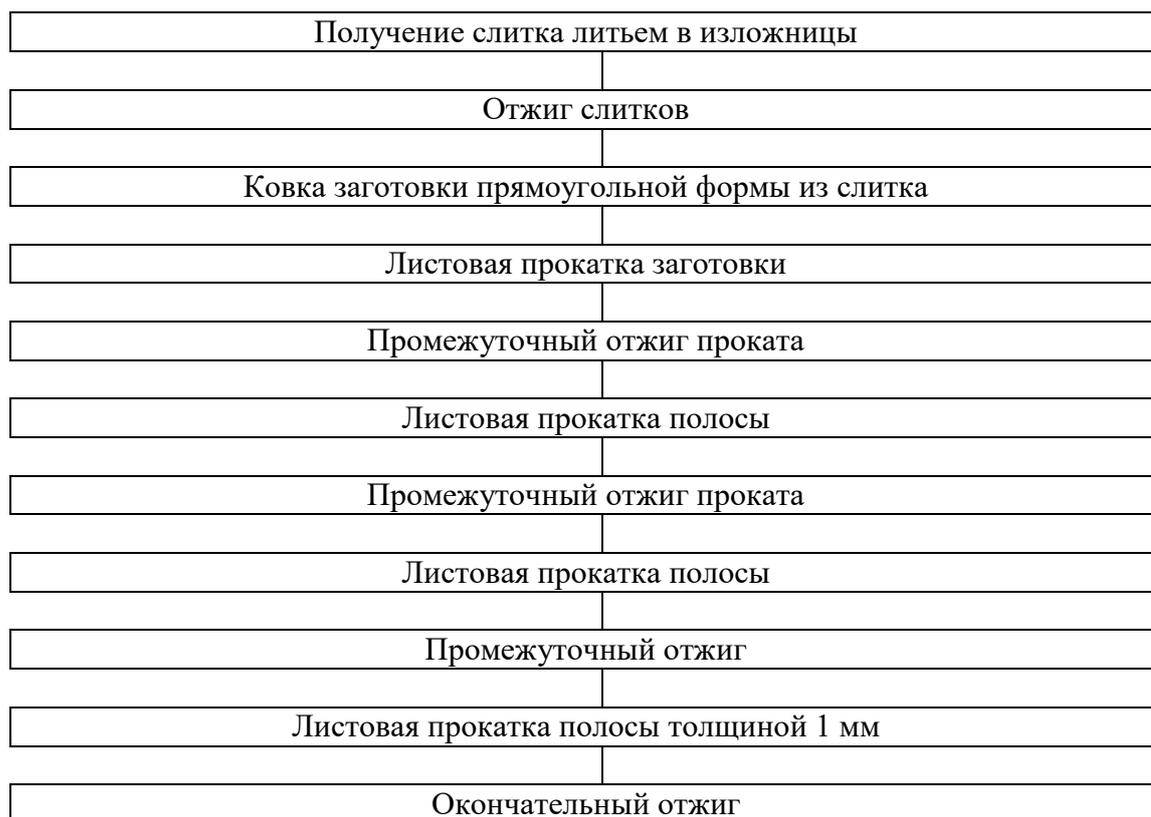


Рисунок 1.13 - Технологическая схема изготовления листового проката из сплава платины

Холодная сортовая и листовая прокатка, а также волочение, используемые в этих схемах, являются основными операциями при изготовлении изделий ювелирного и технического назначения.

По первой схеме прутки диаметром 8 – 10 мм, полученный методом непрерывного литья на универсальных машинах вертикального типа, подвергается холодной сортовой прокатке на сортовых станах различного типа (рис. 1.14). Для производства деформированных полуфабрикатов применяют сортопрокатные станы типа Fator TL 12T и BILER марки INVIMES или станы типа AMBIFILO VELOCE ROSEN 180+200x130 фирмы Марио ди Майо. Прокатка ведется в три этапа (всего 28 проходов) с промежуточными отжигами. Далее заготовка подвергается волочению до получения проволоки диаметром 0,25 – 0,35 мм.

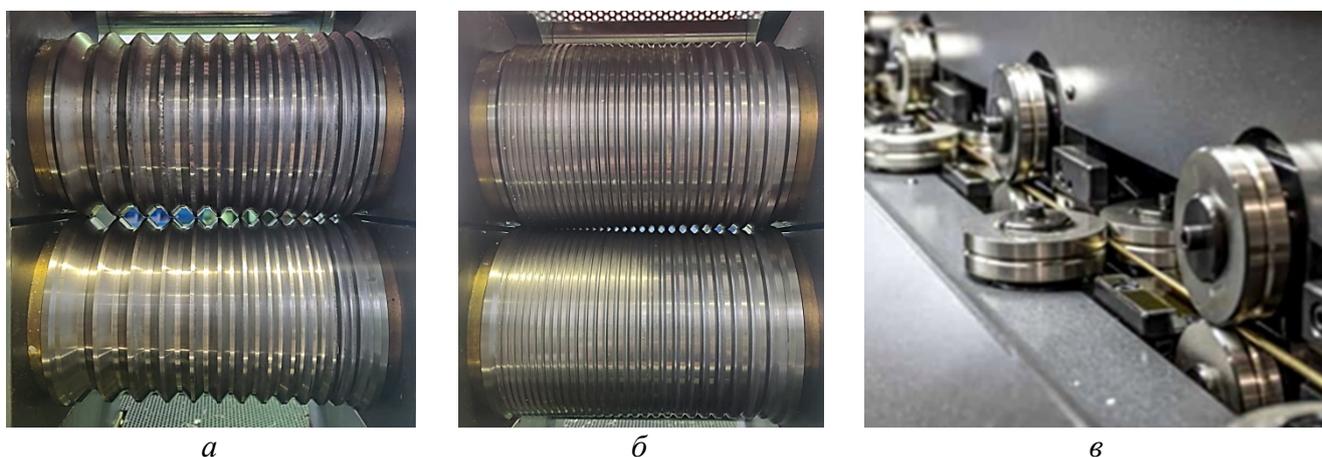


Рисунок 1.14 - Рабочие клетки сортопрокатных станов для получения прутков:

а, б – одноклетьевые станы ДУО, *в* – непрерывный стан

Особенностью сортовой прокатки сплавов драгоценных металлов является применение калибровки близкой к системе «ромб-квадрат» со срезанными угловыми элементами (рис. 1.15). Данная схема калибров позволяет добиться большей точности геометрии и размеров получаемого прутка, обеспечивает равномерность деформации в процессе прокатки по проходам, а также является более близкой к кругу – поперечному сечению получаемой волочением проволоки. Применение данной системы калибров увеличивает прочность и стойкость инструмента, поскольку уменьшается разница между рабочими диаметрами валков.

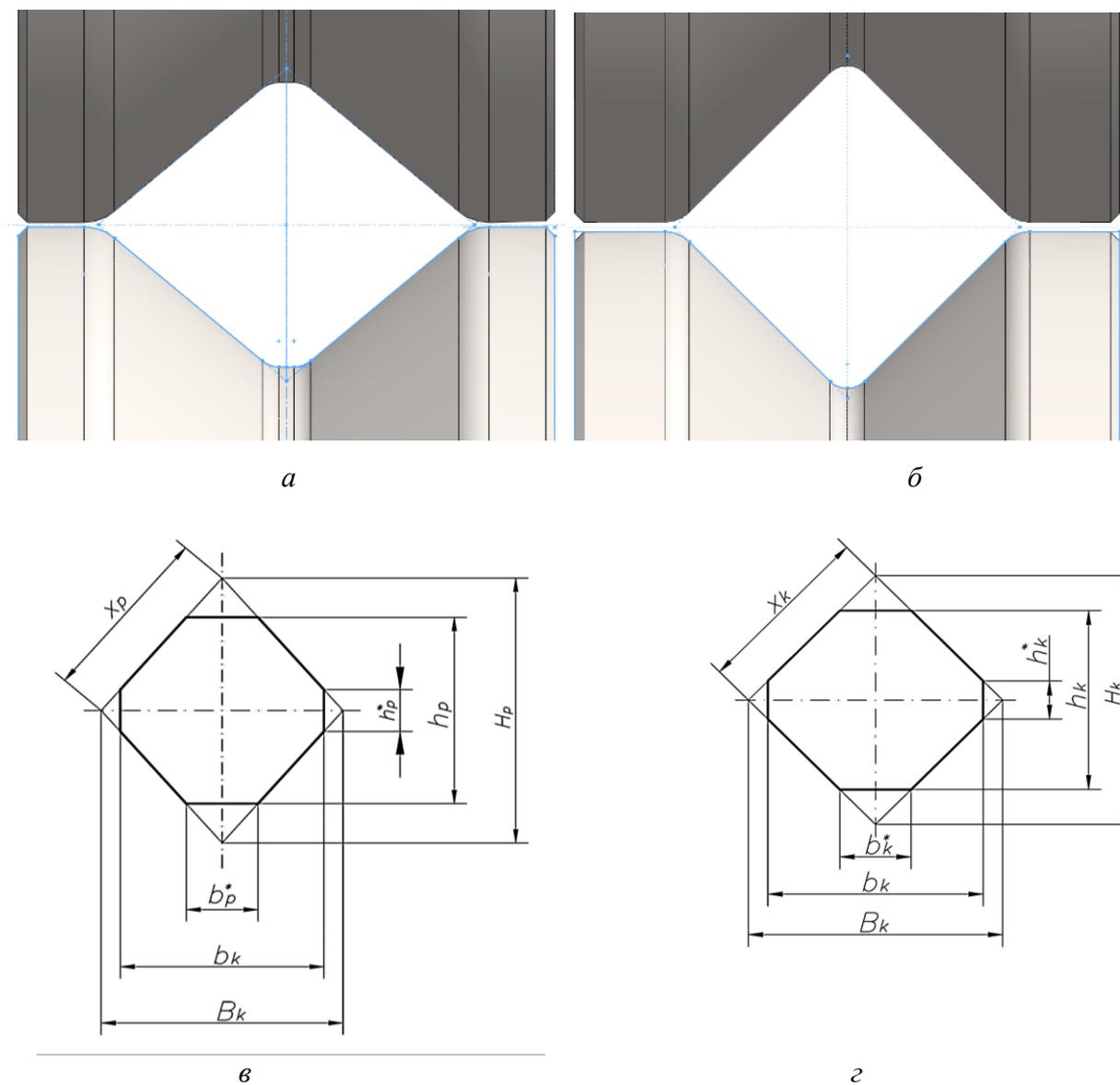


Рисунок 1.15 - Калибры, применяемые для производства сортового проката из драгоценных металлов и их сплавов: а, в – ромбический; б, г – квадратный

Существует ряд задач для повышения технико-экономических показателей технологии производства деформированных полуфабрикатов для изготовления изделий из сплавов на основе платины и палладия: 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 не обеспечивает однозначного повышения эффективности технологии, если и новое оборудование используется нера-

ционально. Тем более, если речь идет о современном оборудовании, обеспечивающем высокий уровень производительности и степень автоматизации.

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. Так как свойства последних недостаточно изучены, это приводит к применению нерациональных маршрутов деформации металла и режимов термической обработки, что, в свою очередь, влечет повышение процента брака и снижение качества продукции.

Для решения этих задач в данной работе предложена и реализована методика разработки технологий производства длинномерных деформированных полуфабрикатов из новых сплавов на основе драгоценных металлов и с ее применением проведены комплексные исследования по изучению формоизменения и силовых параметров процессов листовой, сортовой прокатки и волочения длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов платины и палладия для производства изделий ювелирного и технического назначения, их моделирование и опытно-промышленная апробация в производственных условиях ОАО «Красцветмет».

1.6 Выводы и постановка задач исследования

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

- одной из основных тенденций развития производства длинномерных литых и деформированных полуфабрикатов является внедрение в производство более совершенных технологий обработки, особенно для получения длинномерных изделий из новых сплавов драгоценных металлов, обладающих повышенными эксплуатационными характеристиками и имеющих более низкую себестоимость при изготовлении из них готовой продукции;

- в литературных источниках ограничено представлена информация о механических свойствах сплавов драгоценных металлов в зависимости от степени и скорости деформации, они разрознены и не систематизированы;
- выявлено, что наиболее распространенными методами получения длинномерных полуфабрикатов небольшого поперечного сечения из сплавов драгоценных металлов являются процессы холодной листовой и сортовой прокатки и волочения, при этом сведения об особенностях технологии их производства с использованием существующего оборудования малочисленны и не всегда доступны для изучения и анализа;
- с целью снижения брака и повышения производительности производства необходимо провести анализ существующих в настоящее время технологий получения проката и проволоки из сплавов на основе палладия и платины и подготовить технические и технологические решения для совершенствования многопереходных режимов деформации металла;
- в научно-технической литературе отсутствуют данные по расчету деформационных режимов, технологических и энергосиловых параметров процессов прокатки и волочения для производства длинномерных ювелирных изделий из как известных, так и новых сплавов на основе палладия и платины;
- существующие программные средства для моделирования и проектирования технологических режимов обработки металлов давлением применительно к получению деформированных полуфабрикатов из сплавов драгоценных металлов имеют достаточно узкую область применения и ограничения по их использованию, что диктует необходимость расширения возможности работы с новыми сплавами и оборудованием (создание базы данных по механическим свойствам сплавов и техническим характеристикам оборудования) и создание компьютерных моделей этих процессов.

На основании сделанных выводов сформулированы цель и задачи данного диссертационного исследования, представленные во введении.

2. МЕТОДИКИ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ, МАТЕРИАЛЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

2.1. Методика проведения исследований технологии производства деформированных полуфабрикатов из новых сплавов на основе платины и палладия

Так как в настоящее время особое внимание уделяется поиску новых сплавов из драгоценных металлов и получению из них длинномерных деформированных полуфабрикатов предложена методика проведения последовательных этапов исследований, необходимых для промышленной апробации и внедрения в производство энергоэффективных технологий их термомодеформационной обработки [2].

В соответствии с предложенной методикой необходимо выполнить следующие этапы исследований.

1. Патентный поиск на составы сплавов драгоценных металлов.
2. Анализ фазового и структурного состояния сплавов заданной системы.
3. Выбор легирующих элементов с помощью диаграмм состояния и требований экологической безопасности.
4. Выбор количественного соотношения основного металла и легирующих элементов.
5. Определение расчетным или опытным путем температуры начала и окончания кристаллизации расплава.
6. Выбор способа и технологических параметров литья.
7. Получение опытного сплава и изучение свойств литых полуфабрикатов.
8. Корректировка количества легирующих элементов в сплаве и их соотношения.
9. Расчет деформационных режимов обработки нового сплава.
10. Назначение режимов термообработки деформированных полуфабрикатов.
11. Изучение влияния особенностей технологии получения деформированных полуфабрикатов на свойства готовых изделий.
12. Корректировка режимов обработки с целью получения заданных свойств.

В данной работе использование этой методики показано на примере создания новых сплавов на основе платины и палладия и технологий их обработки.

Для поиска имеющихся технических решений был проведен анализ патентной литературы, который выявил, что в последнее время для наиболее применяемых в промышленном производстве длинномерных изделий ювелирного и технического назначения известны различные составы сплавов палладия и платины. Потребность в разработках новых составов сплавов на основе драгоценных металлов в ряде стран, в том числе и в России, объясняется постоянным стремлением к увеличению выхода годного готовой продукции, полученной с применением сложных технологий, к которым предъявляются повышенные требования при производстве. Интерес к разнообразию сплавов вызван не только задачей повышения уровня механических свойств и их равномерного распределения по длине слитка, но и множеством различных технологических приемов для изготовления промышленной продукции. На свойства полуфабрикатов из сплавов драгоценных металлов и готовых изделий из них, определяющее влияние оказывают технологические свойства металла, зависящие от химического состава, структуры, величины зерна, термообработки и степени наклепа. Поэтому изучение данных характеристик при разработке новых сплавов имеет одно из определяющих значений

Патентный поиск выявил многочисленные варианты составов палладиевых сплавов, область применения которых распространяется на химическую промышленность (для диффузионной очистки и выделению водорода), стоматологию и ювелирную промышленность. В таблице 2.1 приведены некоторые данные по патентам за последние 20 лет [73-83], на основании которых были предложены новые сплавы палладия ювелирного и технического назначения.

Сплавы на основе палладия 850 пробы регламентированы ГОСТ 30649-99, который устанавливает марки сплавов на основе благородных металлов: золота, серебра, платины и палладия, применяемых для изготовления ювелирных, технических изделий, полуфабрикатов для их производства в виде листов, лент, полос, проволоки, профилей, литых заготовок.

Таблица 2.1 - Химический состав известных сплавов на основе палладия

Номер патента	Содержание компонентов в сплаве, мас.%												
	Pd	Ag	Au	Cu	Si	Ti	Co	B	Mo	Zn	Ga	Rh	Ni
2220218	60-94	-	-	2-15		-	2-15				1-3	-	-
2244762	85,0-90,0	-	-	1,5-2,0		-	-				-	-	5,5-12
2352660	85,0-85,5	0,01-15	0,01-2,0	0,01-13					0,01-1,0			0,01-1,0	
2392339	85,0-85,5		0,01-2,0	11-13		0,01-0,5						0,01-1,0	
2479655	50,0-50,5	38-40		Ост.	0,1-0,2								
2479656	85,0-90,0	ост			0,1-0,3								
2574936	85,0-85,5	ост	2-2,5									0,01-0,5	
GB861646A	16-90		5-64						2,5-20				
US005484569A	32,2	47,6		14				0,08		1			5

Сплав на основе палладия по ГОСТ 30649-99 [13] содержит по массе, в %: палладий – 85, серебро – 12,5-13,5 и никель – остальное. Высокая температура плавления этого сплава затрудняет получение литых полуфабрикатов методами литья и предъявляет повышенные требования к формомассе, а из-за неоптимального соотношения компонентов палладий-никель, он имеет низкий коэффициент отражения. Кроме того, никель по директивам ЕЭС [3] не рекомендуется для использования в изделиях, имеющих долговременный контакт с кожей человека.

Одним из известных сплавов [74] является сплав, содержащий палладий, кобальт, медь, галлий. Этот сплав обладает следующими характеристиками: тер-

мическое расширение 0,66-0,72 % при 500 °С, температура плавления 1400 °С, твердость по Виккерсу более 150, деформация растяжения более 6%. Однако такой сплав при высоких прочностных характеристиках имеет высокую температуру плавления, а также содержит кобальт. Кобальт, как и никель, является веществом, характеризующимся токсичностью, и не рекомендуется для использования в ювелирных сплавах. Повышенное содержание индия приводит к увеличению твердости и хрупкости сплава.

Таким образом, проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что необходим поиск композиций основных элементов и модифицирующих добавок для создания новых сплавов на основе палладия, обладающих повышенным уровнем механических свойств и не содержащих никель и кобальт.

Некоторые результаты патентного поиска известных сплавов платины [84-88] ювелирного назначения приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2 - Химический состав известных сплавов на основе платины

Номер патента	Содержание компонентов в сплаве, мас. %								
	Pt	Co	Cu	Ir	Pd	Rh	Ag	Zn	Другие
2561562	58,0 - 59,0	4,8 - 5,0	35,5 - 36,0	0,01 - 0,1	0,1 - 29	0,5 - 0,7	-	-	
2650220	58,0 - 59,0	-	ост.	-	25,0 - 35,0	-	-	1,0 - 2,0	
2645624	58,0 - 59,0	-	ост.	-	2,9 - 3,1	-	14,6 - 15,6	6,5 - 7,5	
WO2005075690	55,0 - 63,0	2,0 - 10,0	27,0 - 43,0	-	-	-	-	-	
US2020131603	20,0 - 70,0	0,0 - 50,0	-	-	0,0 - 70,0	-	-	-	Ni 0,0 - 50,0, Cr 0,0 - 50,0 или Fe 0,0 - 50,0

В качестве сплавов платины 585 пробы, применяемых для изготовления изделий ювелирного назначения, можно выделить сплав по патенту [85], обладающий высоким уровнем пластических свойств. Однако содержание в его составе палладия в пределах 25,0-35,0 мас. % из-за его высокой стоимости ведет к значительному повышению себестоимости производимых из него ювелирных изделий.

У сплава платины 585 пробы по патенту [86], содержащего следующие компоненты, мас. %: платина 58,5-59,0; палладий 2,9-3,1; цинк 6,5-7,5; серебро 14,6-15,6; медь остальное, существенно снижено содержание дорогостоящего палладия. Сплав пригоден для микролитья, обладает хорошей пластичностью при достаточно высокой твердости. Однако его применение также ведет к значительному удорожанию ювелирных изделий.

В связи с этим одной из задач создания новых сплавов платины является поиск вариантов замены палладия на другие легирующие элементы без снижения механических свойств металла и сохранением цвета.

На основании проведенного патентного анализа были разработаны новые сплавы на основе платины и палладия [89-92], имеющие высокий уровень механических и эксплуатационных свойств.

Так, например, сплавы платины 585 пробы [88, 89] были предложены в связи со значительным ростом спроса и уровня цен на ювелирные изделия из сплавов на основе палладия и снижением стоимости платины. Поскольку никель при прямом и долговременном контакте с кожей человека вызывает аллергию, и Директива ЕС 76/769/ЕЕС [3] запрещает его использование в ювелирных изделиях, никель был исключен из состава этих сплавов.

Патентный поиск показал, что известен сплав [87], обладающий высоким уровнем пластических свойств. Однако содержание в его составе палладия в пределах 25,0-35,0 мас. % из-за его высокой стоимости ведет к значительному повышению себестоимости производимых из него ювелирных изделий. Другой сплав платины 585 пробы [88] пригоден для микролитья, обладает хорошей пластично-

стью при достаточно высокой твердости. Однако его применение также ведет к значительному удорожанию ювелирных изделий.

Поэтому были предложены безникелевые сплавы на основе платины 585 пробы, имеющие повышенный уровень механических свойств, расширяющих область применения при изготовлении ювелирных изделий, и обладающих более низкой стоимостью. Химический состав этих сплавов приведен в табл. 2.3.

Таблица 2.3 -Химический состав новых сплавов на основе платины

Номер патента	Содержание компонентов в сплаве, мас. %							
	Pt	Au	Cu	Zn	Rh	Ru	Ti	Ag
2751063	58,0 - 59,0	-	14-16	-	0,001-0,01	-	0,005	ост.
2751061	58,0 - 59,0	10-14,5	-	3,1-6,4	-	0,001-0,01	0,005	ост.

Содержание платины в сплаве обусловлено обеспечением пробы 585 пробы. Введение золота в сплав повышает пластичность. Введение от 1,0 до 2,0 % цинка в сплав повышает его жидкотекучесть, что благоприятно влияет на характер пластической деформации. При содержании цинка в сплаве выше 2% повышается порог хрупкости, что отрицательно сказывается при деформации сплава. Введение меди в сплав повышает твердость сплава. Серебро снижает температуру плавления сплава и повышает его пластичность. Рутений и родий являются модификаторами, снижают размер зерна, значительно повышают прочность твердость. С введением рутения сплав обладает меньшей склонностью к свариванию и образованию игл, а введение родия позволяет добиться требуемых чистоты белого цвета и блеска сплава. Добавка титана при его значительной растворимости в платине повышает твердость. Совместное введение титана, серебра и рутения повышает коррозионную стойкость сплава.

Предложенные ювелирные сплавы платины соответствует 585 пробе, имеют красивый цветовой оттенок и достаточную для изготовления ювелирных изделий микротвердость в пределах 1500-1550 МПа.

Сплавы получали прямым сплавлением основных компонентов в индукционной печи в атмосфере инертного газа (аргона). Введение рутения осуществляли перед кристаллизацией сплава в виде лигатуры серебро-рутений, полученной осаждением рутения из электролита гальваническим способом на серебро [93]. Температурный интервал сплавов определяли методом дифференциально-термического анализа. Составы сплавов контролировали с помощью количественного химического анализа.

Таким образом, применение новых сплавов платины за счет введения легирующих элементов и модификаторов позволяет повысить механические и технологические свойства, снизить их стоимость и использовать их для производства ювелирных изделий с применением методов обработки металлов давлением и литья.

Химический состав новых сплавов палладия представлен в табл. 2.4.

Таблица 2.4 - Химический состав новых сплавов палладия

Номер патента	Содержание компонентов, масс. %						
	Pd	Pt	Au	Cu	Zn	Rh	Ag
2574936	85,0-85,5	-	2,0-2,5	-	-	0,01-0,5	Ост
2788879	33,6-54,0	5,0-8,7	5,0-10,5	15-17	1,0-1,8	0,001-0,01	20,0-28,4

Предложенный сплав по патенту [92] предназначен для изготовления элементов высокоточных электрических приборов и устройств, в частности проводочных контактов для плат передачи видеосигналов. Сплавы драгоценных металлов распространены для применения в приборах электронных устройств, где желательна низкое контактное сопротивление. С этой целью используются составы сплавов, содержащих золото, серебро и платину, а также медь и цинк. Для них требуется высокая проводимость в данном диапазоне частот, определенный уровень пластических свойств (возможность гибки контакта под определенную форму) и высокая износостойкость.

Патентный поиск показал, что известен сплав на основе палладия, содержащий, мас. %: палладий – 16,0-90,0; золото – 5,0-64,0 и молибден – 2,5-20,0 [82]. Компоненты данного сплава в обозначенных пределах обеспечивают хорошую стойкость к окислению и его относительную мягкость, физические свойства на неплохом уровне. Он имеет стабильную пластичность, однако обладает достаточно высоким электрическим сопротивлением.

Другой сплав на основе палладия содержит, мас. %: палладий – 20,0-44,0; серебро – 35,0-60,0; медь – 5,0-20,0; цинк – 0,1-5,0, никель – 1,0-7,0, бор до 0,18 мас. %, рений до 0,005 мас. % и модифицирующие элементы до 1,0 мас. % [83]. Этот сплав также обладает высокой стойкостью к окислению и потускнению, а модифицирующие элементы, в частности рутений, предназначены для измельчения зерна. Однако присутствие в сплаве достаточно большого количества никеля приводит к повышению сопротивления деформации металла и сильному упрочнению во время деформации. Поэтому изготовление проволоки достаточно малых диаметров для электроконтактов связано с увеличением трудоемкости ее обработки за счет увеличения количества проходов при волочении и промежуточных отжигов.

Поэтому был предложен сплав на основе палладия [92], химический состав которого представлен в табл. 2.4

Палладий является основным элементом сплава и обеспечивает в заданных пределах получение требуемых физико-механических свойств изделий из него. Серебро при сплавлении с палладием образует систему с непрерывной взаимной растворимостью компонентов и снижает электрическое сопротивление. Медь в качестве легирующего компонента выбрана в связи с образованием с палладием непрерывной системы твердых и жидких растворов. Ее содержание является оптимальным для замещения в сплаве палладия и обеспечивает повышенные прочностные свойства, твердость и износостойкость. Золото повышает пластичность и антикоррозионные свойства, а также уменьшает склонность к газопоглощению при литье. Кроме того, наличие в сплаве серебра, золота и меди в указанных ко-

личествах обеспечивает снижение температуры литья на 50-100°C. Платина при сплавлении с палладием также образует систему с непрерывной взаимной растворимостью компонентов и придает сплаву блестящий белый цвет. Добавление цинка снижает температуру плавления сплава и обеспечивает хорошую пластичность. Родий, наряду с модифицирующим действием для измельчения зеренной структуры литой заготовки, является упрочняющей добавкой, повышающей антикоррозионные свойства.

Исследования показали, что проволока диаметром 0,7 мм в нагартованном состоянии из полученного сплава палладия обладает достаточным электрическим сопротивлением и оптимальным сочетанием физико-механических свойств, которые в сравнении с известными сплавами приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5 – Свойства сплавов на основе палладия

№	Номер патента	Удельное сопротивление, мкОм/см	Микротвердость HV, кг/мм ²
1	2788879	20,0	249-300
2	US005484569A	22,0	200-250
3	GB861646A	92,2	125-380

Таким образом, предложенный сплав обладает всеми необходимыми эксплуатационными и технологическими свойствами, требуемыми при изготовлении элементов высокоточных электрических приборов и устройств, в частности проволочных контактов для передачи видеосигналов. Так удельное электросопротивление проволоки малых диаметров из него не превышает 20 мкОм/см, что ниже этого параметра, чем у сплавов-аналогов. Кроме того, из таблицы также видно, что при высоких прочностных свойствах (временное сопротивление до 1250 МПа) проволока имеет сравнительно высокую пластичность (относительное удлинение до 11 %), позволяющую проводить гибку контактов, и высокую износостойкость (микротвердость HV до 300 кг/мм²).

2.2. Материалы, оборудование и методики исследований

В качестве материалов для исследований применялись известные и новые сплавы на основе платины и палладия, химический состав которых приведен в табл. 2.6.

Таблица 2.6 - Химический состав исследуемых сплавов

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

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

В качестве оборудования использовали листовые, сортовые прокатные и волочильные станы фирмы «Марио ди Майо» (рис. 2.1, 2.2). В табл. 2.7 приведены данные для основного оборудования, применяемого для исследований. Для многократного волочения проволоки применяли волочильные машины типа 10 NFS TRONIC (см. рис. 2.2), техническая характеристика которой приведена в табл. 2.8.

Таблица 2.7 – Параметры прокатных станов, применяемых для исследований

Наименование параметра	Величина параметра			
	AF 200+180R	LG 200	LS 400 x 240	LS 500 x 280
Длина бочки валков, мм	200+180	200	400	500
Диаметр валков, мм	130	110	240	280
Скорость прокатки, м/мин	12,5-26	25	13,2	12
Допустимая сила прокатки, кН	640	500	1140	2520
Максимальный момент прокатки, кНм	13,6	10,3	80,8	318
Максимальная мощность электродвигателя, кВт	7,5	7,5	18,5	30



Рисунок 2.1 – Общий вид сортопрокатного AF 200+180R (а) и листопркатного стана LS 400 x 240 (б)

Металлографический анализ структуры получаемых полуфабрикатов проводили на световом микроскопе Axio Observer.A1m, Carl Zeiss и растровом электронном сканирующем микроскопе «EVO 50», Carl Zeiss с энергодисперсионным микроанализатором Inca Energy 350. Замеры твердости образцов проводили на цифровых твердомерах типа M4U G3 (рис. 2.3, а) в лабораторных условиях и Zwick/Roell ZHU250 в промышленных условиях.

Таблица 2.8 – Параметры волочильного стана, применяемого для исследований

Наименование параметра	Величина параметра
Число проходов	10
Диаметр проволоки, мм	0,12 ÷ 2
Скорость волочения, м/мин	0 ÷ 300
Максимальная мощность электродвигателя, кВт	8
Допустимая сила волочения, кН	5



Рисунок 2.2 - Общий вид волочильного стана 10 NFS TRONIC

При определении твердости применяли следующую методику:

- выбирали необходимый метод измерения твердости, например, для НВ 5–750–40.9х (твердость по Бринеллю) и параметры: диаметр индентора 5 мм, нагрузка 750 кгс, увеличение объектива $\times 40,9$;
- устанавливали необходимый индентор и объектив (для твердости по Бринеллю и Виккерсу);
- помещали образец на предметном столике, поднимали его и фиксировали образец под упорным конусом;
- на экране прибора получали сфокусированное изображение отпечатка:

- проводили измерение отпечатка с помощью измерительной линейки и ползунков с измерительными линиями;
 - полученные данные измерений, преобразованные электронной системой твердомера в значения твердости, выводили на экран и фиксировали;
- выбирали другое место измерения, передвинув образец, и повторяли процедуру измерения твердости.

Для определения механических свойств литых, кованных и прокатанных образцов использовали универсальную машину LFM 400 kN (рис. 2.3, б), имеющую технические характеристики, приведенные в табл. 2.9.



а



б

Рисунок 2.3 – Общий вид твердомера M4U G3 (а) и универсальной разрывной машины LFM 400 kN (б)

Таблица 2.9 – Характеристики универсальной разрывной машины LFM 400 kN

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

Для измерения механических свойств проволоки малых диаметров применяли универсальную машину Inspect table 5 kN (Германия).

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

- анализ действующих режимов деформации металла для известных сплавов на основе платины и палладия при изготовлении длинномерных деформированных полуфабрикатов в виде прутков, проволоки и листового проката;
- расчет технологических режимов деформации металла с помощью программы «PROVOL» и базы данных «Металлы и оборудование» [94, 95] и разработка новых рациональных режимов прокатки и волочения;
- определение реологических характеристик сплава;
- расчет энергосиловых параметров процессов прокатки и волочения по известным формулам [2, 19];
- экспериментальная апробация предложенных технологий в лабораторных и промышленных условиях с замерами силовых параметров деформации;
- проверка условий реализации процессов прокатки и волочения и загрузки оборудования по допустимым значениям силовых параметров;
- анализ структуры и свойств полученных длинномерных полуфабрикатов и установление закономерностей их изменения в зависимости от режимов деформации металла;
- разработка рекомендаций для внедрения полученных результатов исследований в промышленное производство.

2.3. Методика компьютерного моделирования процессов прокатки и волочения

Моделирование процессов прокатки и волочения деформированных полуфабрикатов из сплавов на основе платины и палладия проводили в программном комплексе DEFORM 3D, использующим метод конечных элементов и включающим модуль для расчета критерия разрушения Кокрофта-Латама (C_{C-L}) [96].

DEFORM является эффективным средством для математического моделирования операций обработки металлов давлением. При наличии соответствующего вычислительного комплекса и подготовленной базы данных по механическим и физическим свойствам деформированных материалов и материала инструмента, а также физических свойств смазочных материалов, данный программный продукт может служить основой для проектирования и разработки технологических процессов. Данный программный комплекс успешно применяется для анализа операций прокатки и волочения [97-101]. Причем с его применением можно не только промоделировать формоизменение металла, но и получить данные по температурно-скоростным условиям процесса обработки, напряженно-деформированному состоянию, а также оценить возможность разрушения деформируемого полуфабриката по одному из критериев, имеющихся в этом комплексе.

Процедура компьютерного моделирования в программных средах SolidWorks и DEFORM 3D включала следующие этапы.

На первом этапе в среде трехмерного проектирования создавали объекты моделирования. После построения геометрических трехмерных моделей инструмента и заготовки они импортируются в программный комплекс DEFORM-3D.

В качестве условий и параметров моделирования принимали следующие:

- форма и размеры поперечного сечения заготовки;
- тип материала (вязко-пластичный, жестко-пластичный, однородный изотропный и др.);

- свойства материала (кривые упрочнения сплавов, коэффициент трения в соответствии с принятым законом трения, модуль упругости, коэффициент Пуассона и др.);
- тип инструмента (абсолютно жесткий или др.);
- параметры оборудования (листовых и сортовых прокатных станов, волочильных станов);
- технологические параметры (начальная температура 20 °С, отсутствие теплообмена, схема прокатки и др.);
- параметры модели (количество элементов сетки, длина стороны ячейки, коэффициент масштаба сетки, количество шагов и т.п.);
- условия симметрии модели (для валков - по линии прокатки, для заготовки - по диагоналям поперечного сечения и др.).

С помощью критерия разрушения Кокрофта-Латама оценивали напряженно-деформированное состояние металла при его обработке и прогнозировали разрушение заготовок, что особенно актуально при моделировании процесса холодной деформации.

Условием сохранения целостности материальной точки по модели Кокрофта-Латама является соблюдение неравенства

$$\int_0^{\varepsilon_i} \frac{\sigma_1}{\sigma_i} d\varepsilon_i \leq c_{np} \quad (2.1)$$

где σ_1 – главное положительное нормальное напряжение; ε_i – интенсивность деформации; σ_i – интенсивность напряжений; c_{np} – предельное значение показателя Кокрофта-Латама, отвечающее моменту разрушения металла. Левая часть неравенства представляет собой энергетический показатель, описывающий удельную работу элементарных растягивающих сил, и обозначается как C_{C-L} . Разрушение металла в соответствии с этой моделью происходит при условии

$$C_{C-L} > c_{np}. \quad (2.2)$$

Для предотвращения разрушения металла используется условие, по которому критерий Кокрофта-Латама (C_{C-L}) не должен достигать 1. Подобный подход авторы работы [101] использовали для моделирования процесса холодной прокатки листов из алюминиевого сплава 1580, что позволило им оценить вероятность разрушения металла при прокатке на промышленном стане.

На основе заданных условий процессор пошагово рассчитывает динамику состояния каждого элемента сетки заготовки методом конечных элементов. При моделировании данных видов деформации задается вариант однонаправленной деформации без теплообмена, а для решателя выбран метод сопряженных градиентов с прямыми итерациями. При нарушении целостности какого-либо элемента сетки инициируется автоматическое локальное перестроение с интерполяцией значений по соседним элементам. В ходе расчетов предусмотрена возможность визуализации динамики напряженно-деформированного состояния, что позволяет следить за ходом моделирования в реальном времени.

База данных с результатами расчетов автоматически загружается в пост-процессор комплекса DEFORM 3D, где можно проводить анализ работы модели по ряду ключевых характеристик, включая визуализацию объектов моделирования и отображение параметров напряженно-деформированного состояния заготовки на сохраненных шагах расчета.

На основании результатов расчета строятся графические зависимости параметров процесса деформации металла, таких как напряжения, энергосиловые характеристики, критерий разрушения, по которым ведется оценка принятых режимов обжатий и, если потребуется, проводится их корректировка и пересчет.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ДЛИННОМЕРНЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ СПЛАВОВ ПЛАТИНЫ

3.1. Разработка и совершенствование технологии производства проволоки ювелирного назначения из сплавов платины

В настоящее время для изготовления ювелирных изделий применяются сплавы платины с содержанием чистого металла не менее 85 %, содержащие также в своем составе легирующие компоненты, такие как палладий, рутений и иридий, медь, цинк и кобальт, необходимые для улучшения обрабатываемости и износостойкости. Основным преимуществом применения сплавов платины в ювелирной отрасли является высокий комплекс прочностных характеристик, а также устойчивость блеска и цвета при многократных нагревах и охлаждении без признаков окисления и потери свойств. Следует отметить, что исследованиям в области обработки платиновых сплавов посвящено незначительное количество научных работ (см. главу 1). Наиболее применяемым из этих сплавов для изготовления ювелирных цепей является сплав ПлПдРд 92,5–4–3,5 (сплав №1), химический состав которого по ГОСТ 13498–2010 приведен в табл. 2.6.

В последнее время для этих целей востребованы сплавы платины 585 пробы, стоимость которых значительно ниже. Химический состав таких сплавов (сплавы №2 и №3), выбранных для исследований, приведен в табл. 2.6.

Технология получения проволоки для изготовления ювелирных цепей из этих сплавов (рис. 3.1) включает следующие основные операции: непрерывное литье заготовки диаметром 8-10 мм, сортовая прокатка прутка в три этапа до размера 1,14x1,14 мм с применением промежуточных отжигов; волочение на конечный диаметр проволоки 0,25-0,30 мм. Далее полученная проволока передается на отжиг в непрерывной печи, режимы термической обработки которого выбираются в зависимости от диаметра проволоки.

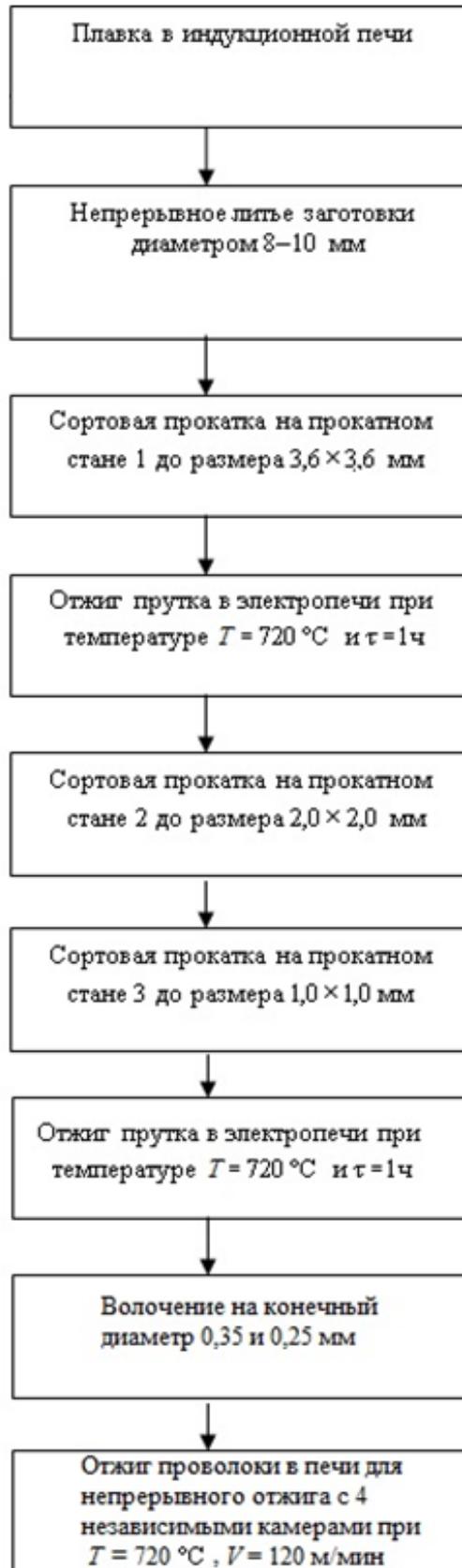


Рисунок 3.1 - Технологическая схема получения проволоки ювелирного назначения из сплавов платины

Согласно технологической схеме первым этапом производства является получение заготовки в виде прутка непрерывным литьем. Сплав выплавляется в индукционной печи. Вначале загружаются драгоценные металлы, после их расплавления вводится лигатура и индий, при этом платина и металлы её группы выплавляются вместе с медью и никелем. Готовится сплав под защитой газовой пропан-бутановой горелки.

После приготовления расплав переливается в тигель печи машины непрерывного литья и задаются следующие параметры литья:

- скорость вытяжки слитка 0,15 м/мин;
- мощность индуктора 25-26 кВт;
- температура фильеры 491-492 °С;

После литья прутки поступают на сортовую прокатку, которая проводится в три этапа на сортовых станах. Первый стан с диаметром валков 130 мм и допустимой силой прокатки 620 кН служит для получения промежуточной заготовки сечением 3,6×3,6 мм, получение требуемого сечения осуществляется за 12 проходов. Далее по технологии осуществляется рекристаллизационный отжиг, после которого полученная заготовка передается на второй стан с диаметром валков 130 мм и допустимой силой прокатки 620 кН, где прокатывается за 8 проходов до размера 2,0×2,0 мм. На третьем стане с диаметром валков 110 мм и допустимой силой прокатки 500 кН прокатку осуществляют на конечный размер 1,0×1,0 мм за 8 проходов. Завершающей операцией получения проволоки является волочение. Заготовка для волочения после сортовой прокатки подвергается термической обработке, для этого прокатанный прутки сматывают в бухту и отжигают в электропечи сопротивления. Для волочения со смазкой используется многократный стан со скольжением. Маршрут волочения зависит от конечного диаметра проволоки и наличия волочильного инструмента. Так для проволоки диаметром 0,25 мм используется следующий маршрут: 1,13–0,90–0,80–0,70–0,60–0,55–0,50–0,45–0,40–0,35–0,30–0,25 мм.

Далее полученная проволока передается на отжиг в непрерывную печь, режимы термической обработки, скорость и температура которой выбираются в зависимости от диаметра проволоки. Для диаметра проволоки 0,30 мм эти параметры составили: скорость 120 м/мин, температура 720 °С.

Анализ режимов сортовой прокатки прутков из исследуемых сплавов платины (табл. 3.1), выполненный с применением программ [94, 95] и использованием известных методик [102, 103], показал, что деформационные параметры по проходам (рис. 3.2), независимо от этапа сортовой прокатки, распределены неравномерно, скачкообразно, что с учетом упрочнения металла, увеличивающегося с каждым обжатием, может привести к обрывам в процессе прокатки.

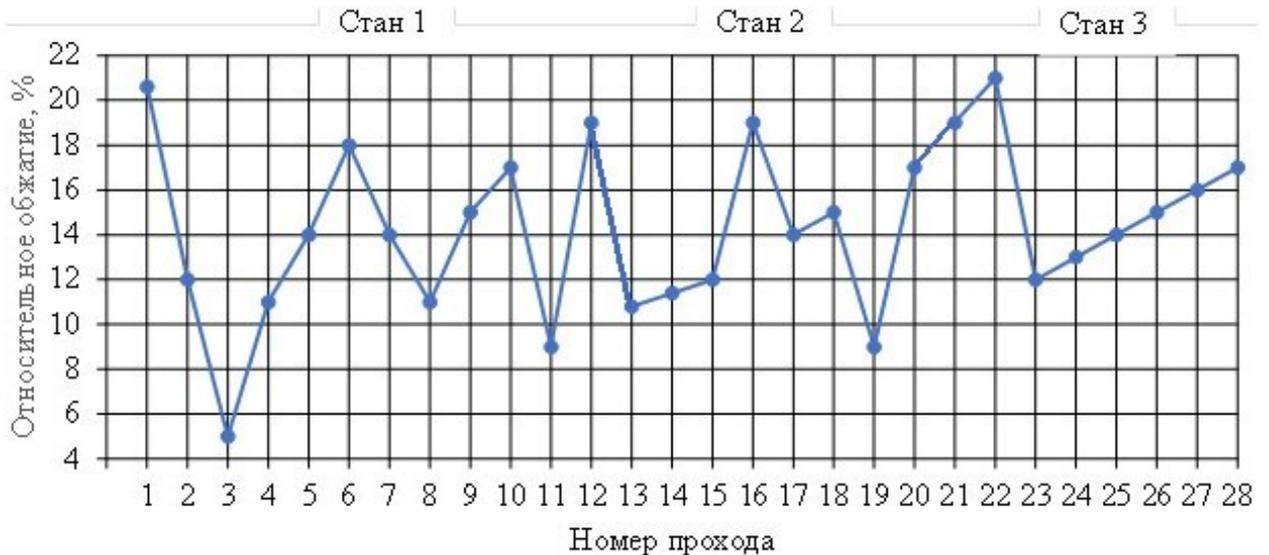


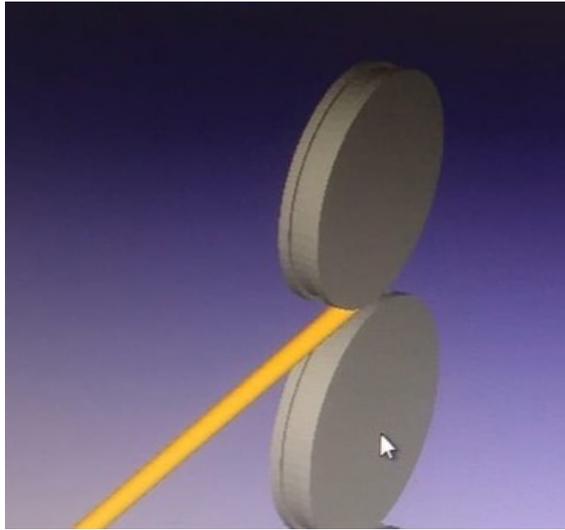
Рисунок 3.2 - Распределение единичных обжатий $\epsilon_{ед}$ по проходам для действующего режима прокатки прутков из ювелирных сплавов платины

Для моделирования процесса сортовой прокатки была разработана компьютерная модель с использованием программных комплексов SolidWorks и DEFORM-3D (рис. 3.3) [2]. Геометрия объекта, созданная в SolidWorks, импортировалась в формате *.stl в DEFORM-3D, где генерировалась конечно-элементная сетка объекта в параметрах расчета предпроцессора с количеством элементов 32000 и более.

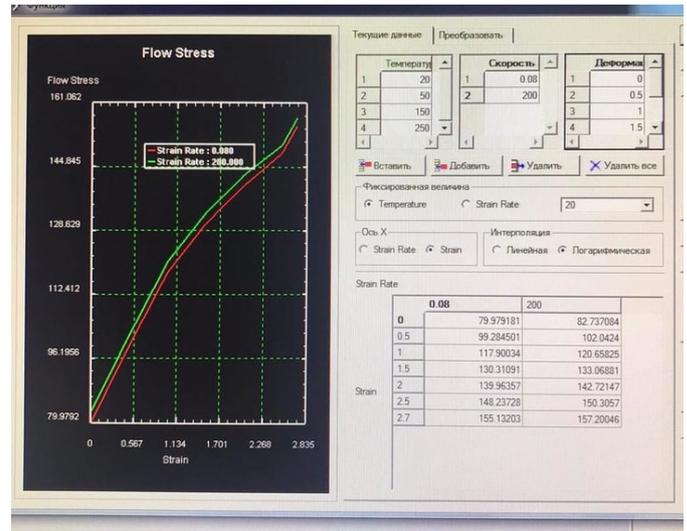
Таблица 3.1 - Расчет параметров действующего режима сортовой прокатки прутков из сплавов платины

Номер калибра i	x_i , мм	F_i , мм ²	$\varepsilon_{ед}$, %	ε_{Σ} , %	$\lambda_{ед}$	λ_{Σ}
Прокатный стан 1						
1	7,9	62,41	20,6	20,6	1,26	1,26
2	7,4	54,76	12	30	1,14	1,43
3	7,2	51,84	5	34	1,06	1,51
4	6,8	46,24	11	41	1,12	1,70
5	6,3	39,69	14	49	1,17	1,98
6	5,7	32,49	18	59	1,22	2,42
7	5,3	28,09	14	64	1,16	2,79
8	5,0	25,00	11	68	1,12	3,14
9	4,6	21,16	15	73	1,18	3,71
10	4,2	17,64	17	78	1,20	4,45
11	4,0	16,00	9	80	1,10	4,91
12*	3,6	12,96	19	83	1,23	6,06
Прокатный стан 2						
13	3,4	11,56	10,8	10,8	1,12	6,79
14	3,2	10,24	11,4	21,2	1,13	7,67
15	3,0	9,00	12	30,8	1,14	8,72
16	2,7	7,29	19	43,9	1,23	10,77
17	2,5	6,25	14	45,9	1,17	12,56
18	2,3	5,29	15	51,9	1,18	14,84
19	2,2	4,84	9	62,8	1,09	16,22
20	2,0	4,00	17	69,2	1,21	19,63
Прокатный стан 3						
21	1,8	3,24	19	75,1	1,23	24,23
22	1,6	2,56	21	77,8	1,56	36,0
23	1,5	2,25	12	82,7	1,14	34,89
24	1,4	1,96	13	84,9	1,15	40,05
25	1,3	1,69	14	87,0	1,16	46,45
26	1,2	1,44	15	88,9	1,17	54,51
27	1,1	1,21	16	90,7	1,19	64,88
28	1,0	1,00	17	92,3	1,21	78,60

* - проход, после которого проводится промежуточный отжиг



а



б

Рисунок 3.3 - 3D-модель валков с заготовкой (а) и данные для моделирования (б)

При создании модели были приняты следующие условия:

- рабочий инструмент рассматривался как абсолютно жесткое тело с постоянной температурой, равной 20 °С;
- прокатываемый материал считался однородным, изотропным;
- деформируемая среда – вязко-пластическая;
- температура заготовки постоянная, равная 20 °С;
- контактное трение задавалось по закону Амантона-Кулона, коэффициент трения принимался равным 0,08;
- количество элементов 32 000 и более.

Временное сопротивление рассчитывали по эмпирическим формулам, полученным аппроксимацией экспериментальных данных [2, 31, 32], имеющих вид:

$$\text{для сплава №1} \quad \sigma_B = -0,00295 \varepsilon_{\Sigma}^2 + 6,8494 \varepsilon_{\Sigma} + 136,98; \quad (3.1)$$

$$\text{для сплава №2} \quad \sigma_B = 0,0161 \varepsilon_{\Sigma}^2 + 0,6431 \varepsilon_{\Sigma} + 249,79; \quad (3.2)$$

$$\text{для сплава №3} \quad \sigma_B = 0,0175 \varepsilon_{\Sigma}^2 + 0,6827 \varepsilon_{\Sigma} + 250,37. \quad (3.3)$$

Моделирование нового режима сортовой прокатки для исследуемых сплавов (табл. 3.2, рис. 3.4, 3.5) показывает, что предлагаемый режим отличается более равномерным распределением единичных обжатий по сравнению с действующим (заводским) и позволяет за счет перераспределения степеней деформации

значительно сократить количество проходов при прокатке и снизить силовую загрузку оборудования.

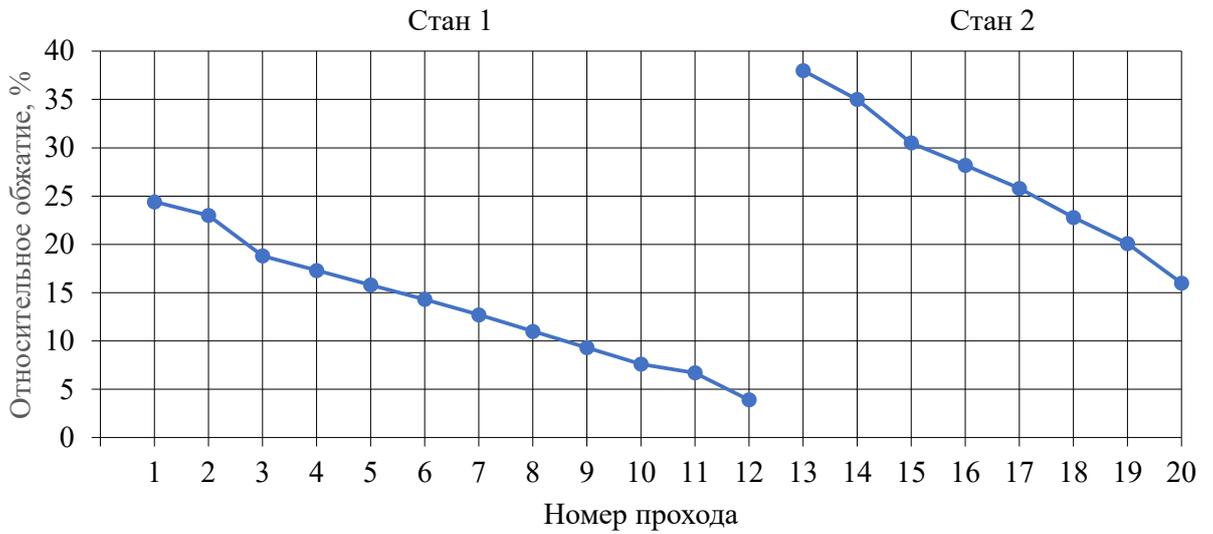


Рисунок 3.4 - Принятое распределение единичных обжатий $\epsilon_{ед}$ по проходам для предлагаемого режима прокатки прутков из ювелирных сплавов платины

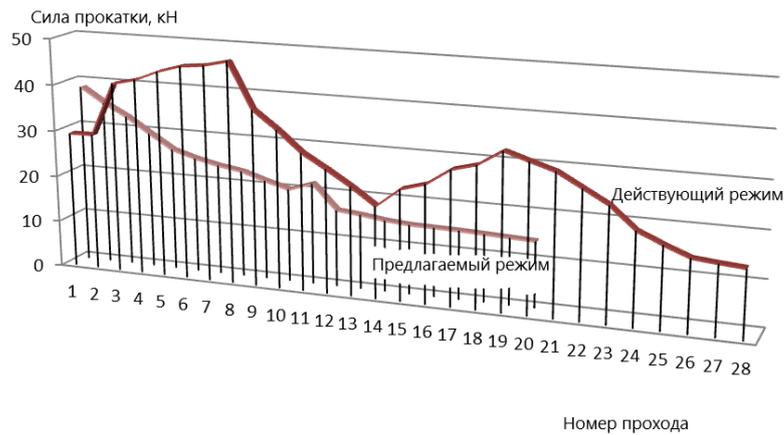


Рисунок 3.5 - Изменение силы по действующему и предлагаемому режимам прокатки прутков из сплава платины №1 по результатам моделирования

В соответствии с ним для получения прутков со стороной $x = 1,0$ мм достаточно двух прокатных станов, а количество проходов сокращается с 28 до 20 по сравнению с действующим (см. табл. 3.1). Расчет силовых параметров прокатки для сплава №1 (см. рис. 3.5) показывает что, несмотря на увеличение степеней деформации в некоторых проходах, ограничения по допустимой силе прокатки выполняются на всех проходах. Кроме того видно, что на кривой изменения силы по проходам нет пиковых значений, характерных для действующего режима.

Аналогичные расчеты были выполнены и для новых сплавов №2 и №3. В табл. 3.2 приведены результаты этих расчетов для этих сплавов в соответствии с предложенным режимом сортовой прокатки.

Таблица 3.2 – Предлагаемый режим сортовой прокатки для сплавов платины

Номер прохода i	x_i , мм	$\varepsilon_{ед.}$, %	ε_{Σ} , %	$\lambda_{ед.}$	λ_{Σ}	P_n , кН		
						1	2	3
1	7,70	24,4	24,4	1,32	1,32	38,6	34,9	35,0
2	6,76	23,0	41,8	1,30	1,72	34,6	27,5	27,6
3	6,09	18,8	52,8	1,23	2,12	31,3	22,6	22,7
4	5,53	17,3	61,0	1,21	2,60	28,6	20,1	20,2
5	5,08	15,8	67,2	1,19	3,04	26,4	17,6	17,7
6	4,70	14,3	71,8	1,17	3,55	24,7	16,4	16,5
7	4,39	12,7	75,4	1,14	4,07	23,4	15,2	15,3
8	4,15	11,0	78,1	1,12	4,57	22,4	14,4	14,5
9	3,95	9,3	80,1	1,10	5,04	21,6	13,4	13,5
10	3,80	7,6	81,6	1,08	5,45	21,0	13,2	13,3
11	3,67	6,7	82,9	1,07	5,84	20,6	12,7	12,8
12*	3,60	3,9	83,5	1,04	6,08	20,3	12,4	12,5
13	2,83	38,0	38,0	1,61	9,80	12,1	10,3	10,4
14	2,28	35,0	59,7	1,54	15,10	12,0	9,2	9,3
15	1,90	30,5	72,0	1,44	21,70	11,9	8,7	8,8
16	1,61	28,2	79,9	1,39	30,20	11,7	8,2	8,3
17	1,39	25,8	85,1	1,35	40,70	11,7	8,5	8,6
18	1,22	22,8	88,5	1,30	52,80	11,8	8,6	8,7
19	1,09	20,1	90,8	1,25	66,05	11,9	9,4	9,7
20	1,00	16,0	92,3	1,19	78,5	12,0	10,0	10,3

* - проход, после которого проводится отжиг

Анализ действующих режимов волочения проволоки из сплавов платины, выполненный с применением программы PROVOL и базы данных «Металлы и оборудование» [94, 95] и использованием известных методик [102, 104], показал, что единичные обжатия, также как и при прокатке, распределены неравномерно

(рис. 3.6). Особенно это опасно для последнего перехода, так как металл сильно упрочняется, а суммарная степень обжатия достигает 95% (табл. 3.3).

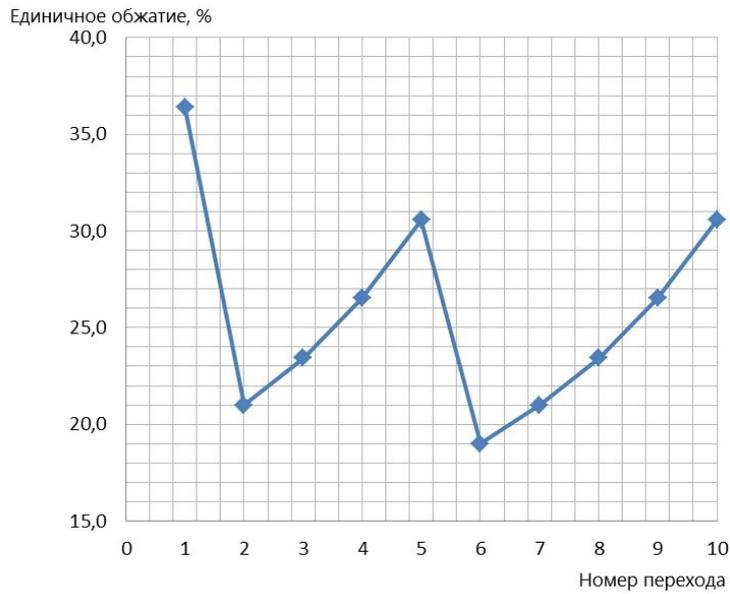


Рисунок 3.6 - Распределение единичных обжатий по действующему режиму при многократном волочении проволоки из ювелирных сплавов платины

Таблица 3.3 – Предлагаемый режим волочения проволоки из сплавов платины

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

Для исследования процесса многократного волочения с использованием программных комплексов SolidWorks и DEFORM-3D была разработана компьютерная модель, реализованная для волочильной машины модели 10 NFS TRONIC (см. табл. 2.8), для которой условия моделирования соответствовали указанным выше для сортовой прокатки, а скорость линейного движения захвата была принята равной 120 м/мин.

С применением разработанной компьютерной модели выполнен анализ формоизменения и напряженно–деформированного состояния предлагаемого маршрута волочения (см. табл. 3.3). Он показал, что при увеличении единичного обжатия очаг деформации увеличивается, что приводит к росту протяженности зон максимальных значений напряжений. Изменение напряжений для сплава №1 показано на рис. 3.7, а. Критерий разрушения Кокрофта-Латама (рис. 3.8) при этом не превышает критического значения, равного 1.

Анализ сил волочения (см. табл. 3.3 и рис. 3.7, б) показывает, что максимальные значения этого параметра, как и при сортовой прокатке, реализуются для сплава №1, а для сплавов №2 и №3 они ниже и практически совпадают. При этом они не превышают допустимых значений, указанных в технической характеристике применяемой волочильной машины (см. табл. 2.8).

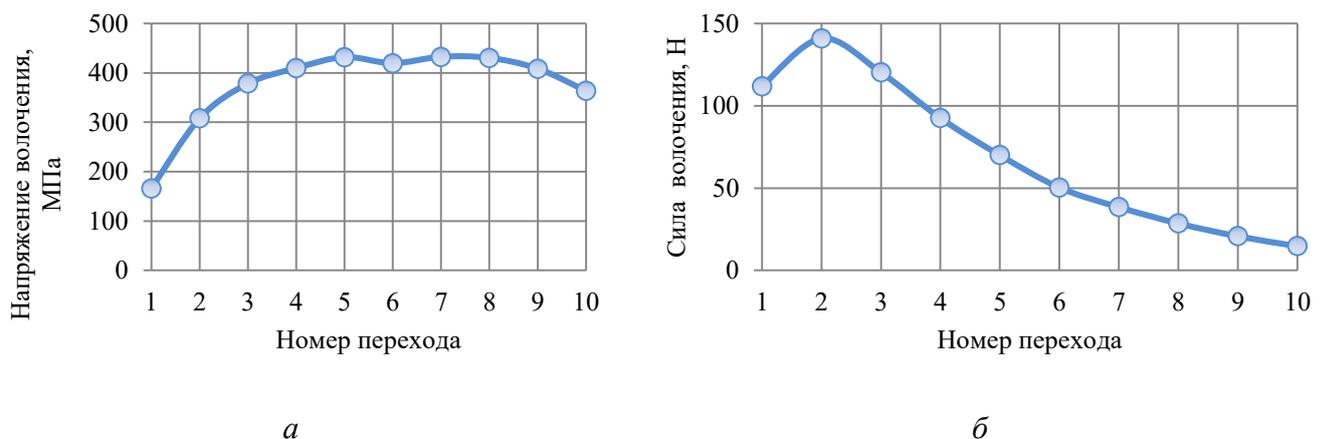


Рисунок 3.7 - Распределение напряжений и силы волочения проволоки из сплава платины №1 по переходам

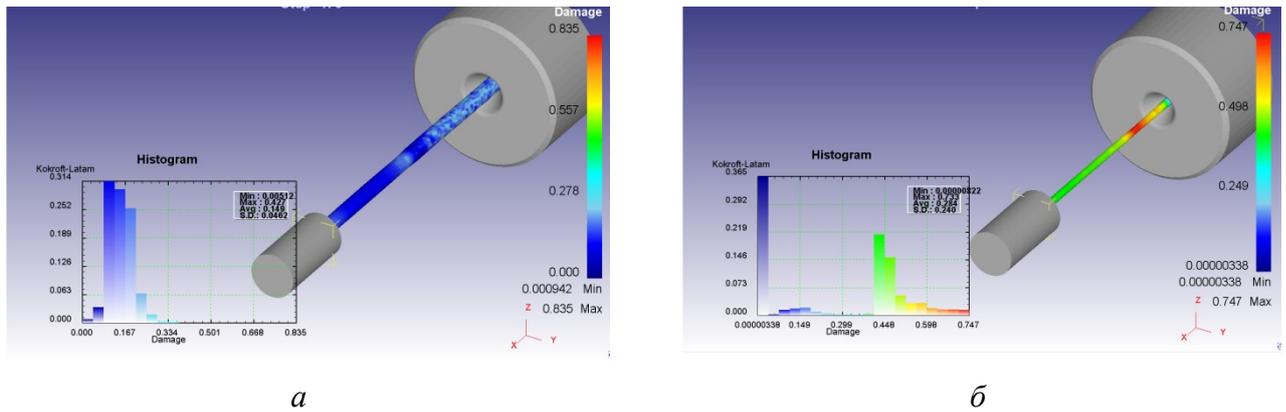


Рисунок 3.8 - Распределение критерия Кокрофта-Латама при многократном волочении проволоки из сплава платины №1: *а* - диаметр проволоки 0,9 мм; *б* - диаметр проволоки 0,25 мм

Результаты расчета деформационных и силовых параметров волочения проволоки для опытных сплавов платины после перераспределения деформаций (см. табл. 3.3) показывают, что предлагаемый режим волочения характеризуется достаточно высоким коэффициентом запаса и сравнительно низкими значениями силы волочения, что дает возможность рекомендовать его для промышленной апробации.

3.2. Моделирование, исследование и совершенствование технологии производства листового проката из сплава платины ПЛРд-20 для изделий технического назначения

Для изготовления фильтрных питателей (см. рис. 1.2, *в*) в настоящее время широко используется листовый прокат из сплавов платины с родием. Химический состав одного из таких сплавов ПЛРд-20 по ГОСТ 13498-79 (сплав № 4) приведен в табл. 2.6. Технологический процесс изготовления полос из сплава ПЛРд-20 приведен на рис. 1.13.

Плавку платинородиевых сплавов ведут в окислительной атмосфере без применения флюса в тигельных индукционных высокочастотных печах с набивной футеровкой из оксида кальция, магнезита или оксида циркония, из тех же огнеупоров изготавливали тигли. В качестве шихтовых материалов используют

губчатую платину, спрессованную в брикеты. Легирующие компоненты вводят в расплавленную платину при 1830–1850 °С. Раскисление расплава перед заливкой не производят из-за риска загрязнения сплавов избытком раскислителя. Заливку платиновых сплавов ведут с небольшим перегревом расплава в подогретые стальные или медные изложницы.

После изготовления слитка проводят его отжиг и ковку для получения заготовки шириной до 100 мм и толщиной 27,5–28,0 мм. Ковка с заданной степенью укова обеспечивает получение из литой дендритной структуры мелкозернистой структуры с повышенными пластическими свойствами для дальнейшей холодной деформации металла. Окончательные размеры полосы с заданной толщиной 1 мм получают многопроходной листовой прокаткой с абсолютными обжатиями за проход 0,1–0,2 мм, при этом суммарная степень деформации достигает 96 %.

Анализ промышленной технологии показал, что ее основным недостатком являются высокая трудо- и энергоемкость процесса, так как количество проходов при прокатке может достигать 138 и более, а количество промежуточных отжигов составлять 3–4.

Поэтому для совершенствования технологии листовой прокатки за счет снижения трудо- и энергозатрат и повышения выхода годного металла, предусматривалось решение следующих задач:

- анализ деформационных и энергосиловых параметров холодной листовой прокатки заготовки заданных размеров из платинородиевого сплава ПЛРд-20;
- исследование структуры и свойств металла после деформации и их анализ;
- экспериментальное исследование влияния параметров холодной прокатки опытного сплава на физико-механические свойства деформированных полуфабрикатов;
- определение максимальных суммарных обжатий, при которых достигаются предельные значения твердости проката, и назначение отжигов;
- выбор и опробование более эффективного режима прокатки.

Для анализа деформационных и силовых параметров процесса прокатки (табл. 3.4), который был реализован в промышленных условиях, рассчитали обжатие, единичную вытяжку, силу и момент прокатки по известным методикам [102, 105, 106]. Расчеты показали, что при таких малых обжатиях (0,2 мм) количество проходов составило 138, при этом величины сил и моментов прокатки сравнительно низкие и не превышают допустимых значений (см. табл. 2.7).

Таблица 3.4 - Результаты расчета параметров прокатки полос из сплава №4

Номер прохода	Толщина, мм		Обжатие, мм	Единичная вытяжка	Сила прокатки, кН	Момент прокатки, кНм
	до прокатки	после прокатки				
i	h_{i-1}	h_i	Δh_i	$\lambda_{ед}$	P_i	M_i
1	27,5	27,3	0,2	1,007	199,8	28
2	27,3	27,1	0,2	1,007	247,5	35
3	27,1	26,9	0,2	1,007	261,0	37
4	26,9	26,7	0,2	1,007	270,0	38
70	13,7	13,5	0,2	1,015	279,1	39
Отжиг						
105	6,8	6,6	0,2	1,030	311,1	44
Отжиг						
127	3,3	3,1	0,2	1,060	312,2	44
Отжиг						
135	1,7	1,5	0,2	1,130	316,2	44
Отжиг						
138	1,2	1,0	0,2	1,200	318,5	45

Анализ расчетных данных показал, что по энергосиловым параметрам (см. табл. 2.7) имеется достаточно большой запас для увеличения обжатия за проход. Поэтому в качестве рекомендаций было предложено увеличить величину обжатия за проход и проверить возможность реализации таких режимов прокатки экспериментально. Однако, ограничения по величине обжатия, связанные с появлением

трещин и разрушением металла при его холодной деформации и упрочнении, вызвали необходимость проведения исследований твердости раската по проходам с целью определения ее предельных величин.

Для проведения экспериментальных исследований в промышленных условиях ОАО «Красцветмет» были выплавлены слитки из платинородиевого сплава ПЛРд-20 с содержанием родия 20 % (сплав №4). Плавку осуществляли в индукционной печи в атмосфере аргона при температуре 1830 °С, а расплав сливали в медную изложницу. После плавки производили отжиг слитков при температуре $T = 1200^{\circ}\text{C}$ в течение 1 часа в защитной атмосфере аргона и ковку, получив плоские заготовки шириной 150 мм и толщиной 28 мм (рис. 3.9 *а*). После фрезеровки полосы толщиной 27,5 мм подвергали листовой прокатке на промышленном листопрокатном стане ОАО «Красцветмет» LS 500x280 фирмы Mario Di Maio с различным обжатием за проход.

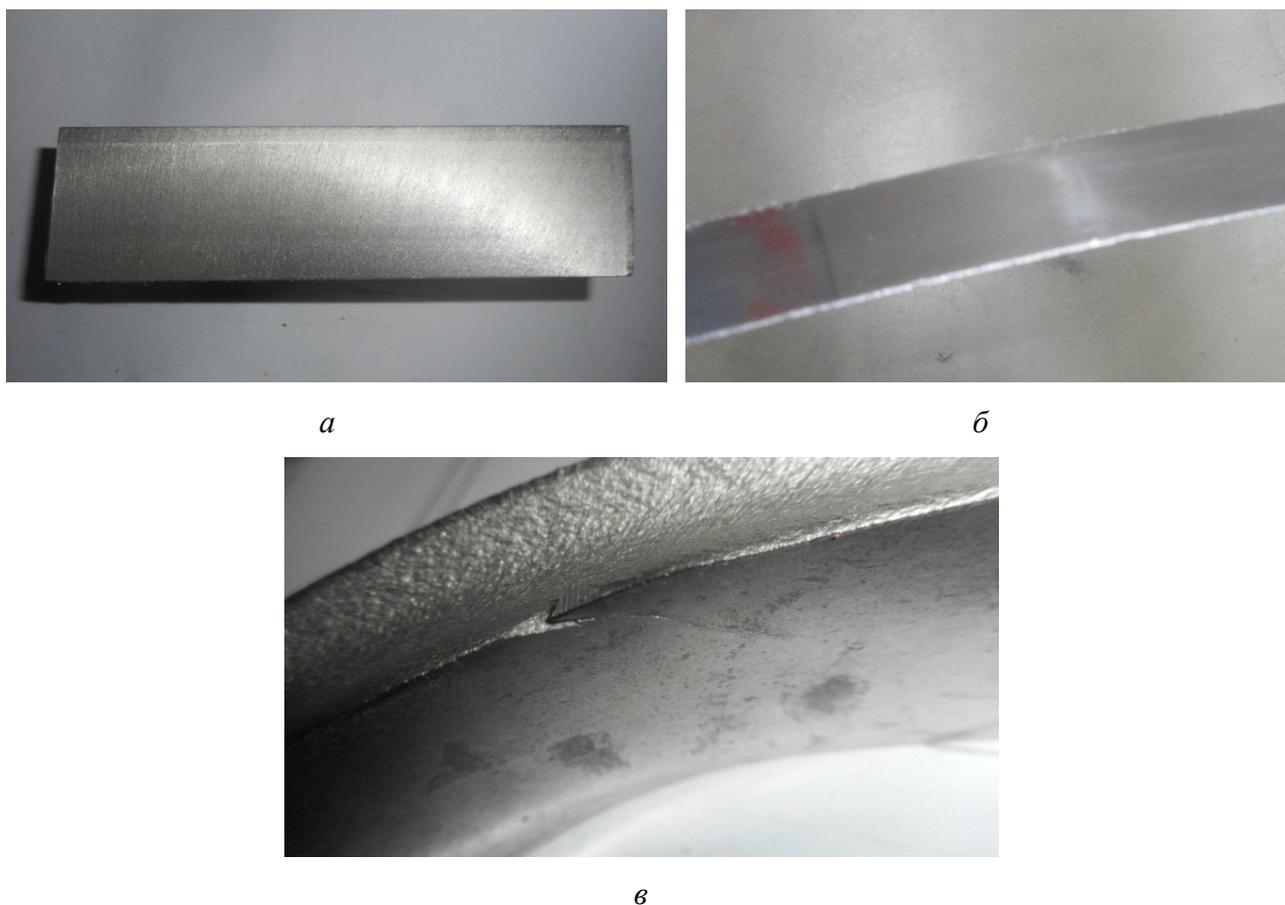


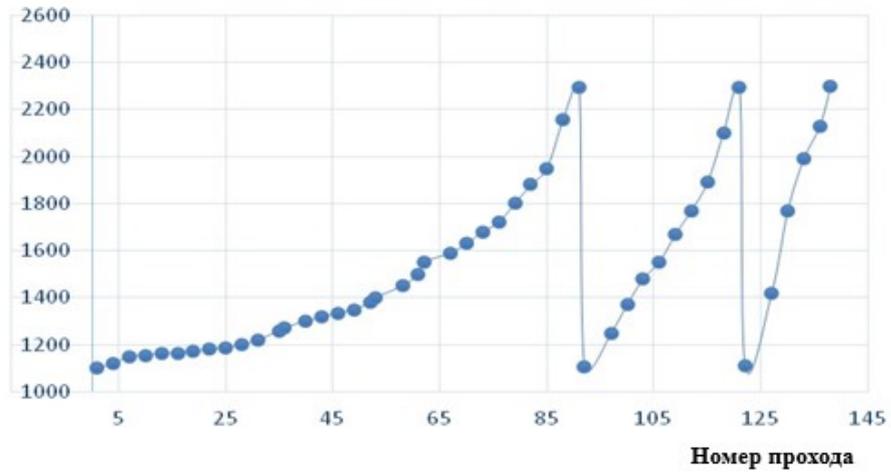
Рисунок 3.9 - Вид заготовки для прокатки (*а*), полосы (*б*) толщиной 1 мм из сплава №4 и дефекты (*в*) при прокатке полосы при единичном обжатии 0,5 мм

При моделировании действующего режима прокатки с абсолютным обжатием за проход, равным 0,2 мм, проводили прокатку отожженной заготовки до увеличения ее исходной длины в два раза, после чего отжигали полосу в течение одного часа при температуре 1200 °С. Далее прокатывали полосу до увеличения исходной длины в четыре раза, после чего отжигали в третий раз в течение 40 минут при температуре 1200 °С. После окончательной прокатки получали полосу толщиной 1 мм (рис. 3.9 б).

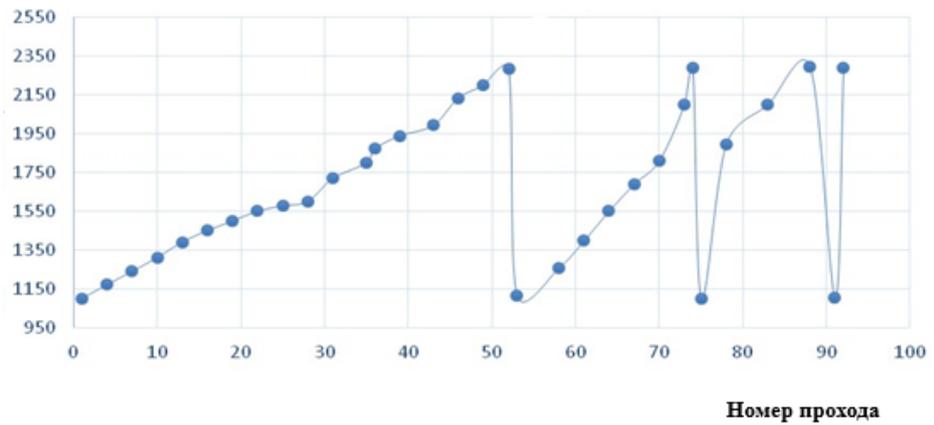
Для проведения испытаний на максимально допустимую твердость сплава до разрушения образцы подвергали холодной прокатке по выбранному режиму. В процессе прокатки фиксировали изменение твердости (рис. 3.10) и определяли влияние обжатия на степень упрочнения сплавов в процессе их обработки, а также контролировали качество раската и определяли оптимальные режимы деформации и количество промежуточных отжигов, чтобы снизить вероятность возникновения микротрещин в изделии при прокатке. Замеры твердости литых, деформированных и отожженных полуфабрикатов проводили после плавки,ковки и прокатки. Для проведения испытаний на максимально допустимую твердость сплава до разрушения слитки подвергали холодной прокатке по выбранному режиму. В процессе прокатки фиксировали изменение твердости (табл. 3.5) и определяли влияние обжатия на степень упрочнения сплавов в процессе их обработки, а также контролировали качество раската и определяли оптимальные режимы деформации и количество промежуточных отжигов, чтобы снизить вероятность возникновения микротрещин в изделии при прокатке.

Таблица 3.5 - Твердость (Н/мм²) полуфабрикатов из сплава №4 по Виккерсу

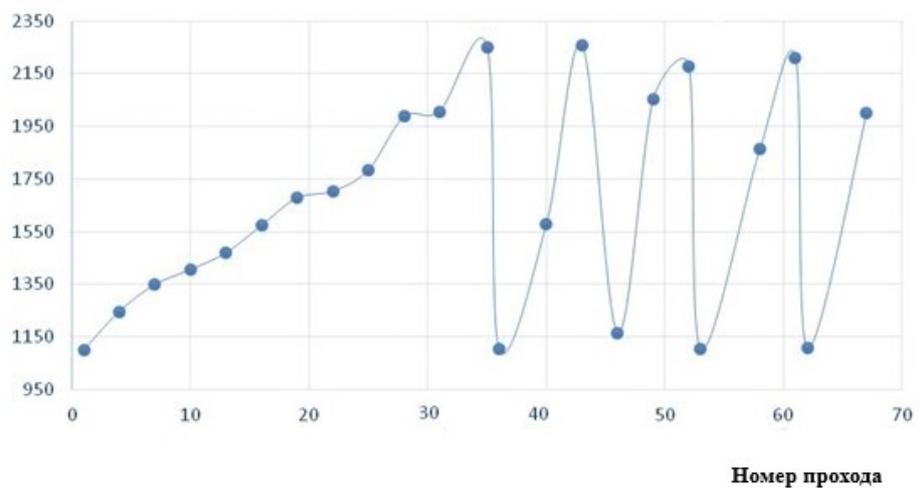
Операции	Номер слитка	
	1	2
После литья	1110	1120
Послековки,	1800	1890
После отжига	1100	1150
После прокатки максимальная	2400	2350

Твердость HV, Н/мм²

а

Твердость HV, Н/мм²

б

Твердость HV, Н/мм²

в

Рисунок 3.10 - Изменение твердости для режимов прокатки полос из сплава ПЛРД-20 с различным единичным обжатием за проход: а – 0,2 мм; б – 0,3 мм; в – 0,4 мм

Исследования показали, что для опытного сплава №4 верхняя граница твердости, при которой нет разрушения при прокатке, равна 2350-2400 Н/мм² по Виккерсу. При превышении данного предела при прокатке наблюдалось возникновение трещин на деформированных полуфабрикатах (рис. 3.9, в).

Так как при заводском режиме прокатки используется единичное обжатие 0,1-0,2 мм, для увеличения его эффективности было принято решение провести серию экспериментов с увеличением обжатия за проход до значений 0,3-0,5 мм.

Анализ результатов исследований показал, что максимальная твердость при прокатке с единичным обжатием 0,2 мм (рис. 3.10, а) достигается при степени деформации 67%. При этом можно применить 3 отжига вместо 4.

Конечную толщину изделия 1 мм при увеличении обжатия до 0,3 мм (рис. 3.10, б) удалось получить за 92 прохода с использованием 3 промежуточных отжигов, притом, что при реализации заводского режима требуется 138 проходов и 3 отжига. Максимальная твердость вследствие более быстрого упрочнения металла увеличилась и была достигнута при степени деформации 56%.

Увеличение единичного обжатия за проход до 0,4 мм сократило количество проходов до 69 (рис. 3.10 в), при этом растрескивания или разрушения полосы не наблюдалось. Максимальная твердость была достигнута при степени деформации 50%. Так как при увеличении обжатия за проход до 0,4 мм деформационное упрочнение металла растет быстрее, количество промежуточных отжигов увеличилось до 4.

При проведении эксперимента с обжатием 0,5 мм образец достаточно быстро упрочнился, достигнув максимума твердости уже при степени деформации 38% , при этом на поверхности полосы появились трещины (см. рис. 3.9 в).

На основании проведенных исследований был предложен режим прокатки полос из исследуемого сплава, представленный в табл. 3.6. Режим насчитывал 90 проходов с единичным обжатием в первых двух проходах 0,4 мм, в последних двух проходах – 0,2 мм, в остальных проходах - 0,3 мм. Было предусмотрено 2 промежуточных отжига и 1 окончательный отжиг.

Таблица 3.6 – Предлагаемый режим прокатки для полос из сплава №4

Номера проходов	Толщина заготовки, мм	Толщина полосы после последнего прохода, мм	Суммарное абсолютное обжатие за проходы, мм	Единичное абсолютное обжатие за проход, мм
-	28,0 (поковка)	-	-	-
1-11 (11 проходов)	-	24,5	3,5	Первые 2 прохода по 0,4 мм + 9 проходов по 0,3 мм
12-21 (10 проходов)	-	21,5	3,0	10 проходов по 0,3 мм
22-31 (10 проходов)	-	18,5	3,0	10 проходов по 0,3 мм
32-41 (10 проходов)	-	15,5	3,0	10 проходов по 0,3 мм
42-51 (10 проходов)	-	12,5	3,0	10 проходов по 0,3 мм
52-61 (10 проходов)	-	9,5	3,0	10 проходов по 0,3 мм
отжиг	-	9,5	-	-
62-71 (10 проходов)	-	6,5	3,0	10 проходов по 0,3 мм
72-81 (10 проходов)	-	3,5	3,0	10 проходов по 0,3 мм
82-86 (5 проходов)	-	2,0	1,5	10 проходов по 0,3 мм
отжиг	-	2,0	-	-
87-90 (4 прохода)	-	1,0	1,0	Первые 2 прохода по 0,3 мм + 2 прохода по 0,2 мм
отжиг	-	-	-	-

Для изучения микроструктуры после прокатки и отжига (рис. 3.11) отбирали образцы полуфабрикатов, из которых готовили шлифы и проводили металлографические исследования по стандартной методике. Образцы отбирали после отжига и первого прохода прокатки при степени деформации 1,1% (рис. 3.11 *а*), при достижении суммарной степени деформации при прокатке 30% (рис. 3.11 *б*), 50% (рис. 3.11 *в*), после отжига в течение 60 минут при температуре 1200 °С (рис. 3.13 *з*), а также при достижении суммарной степени деформации 74% (рис. 3.11 *д*) и 96% (рис. 3.13 *е*).

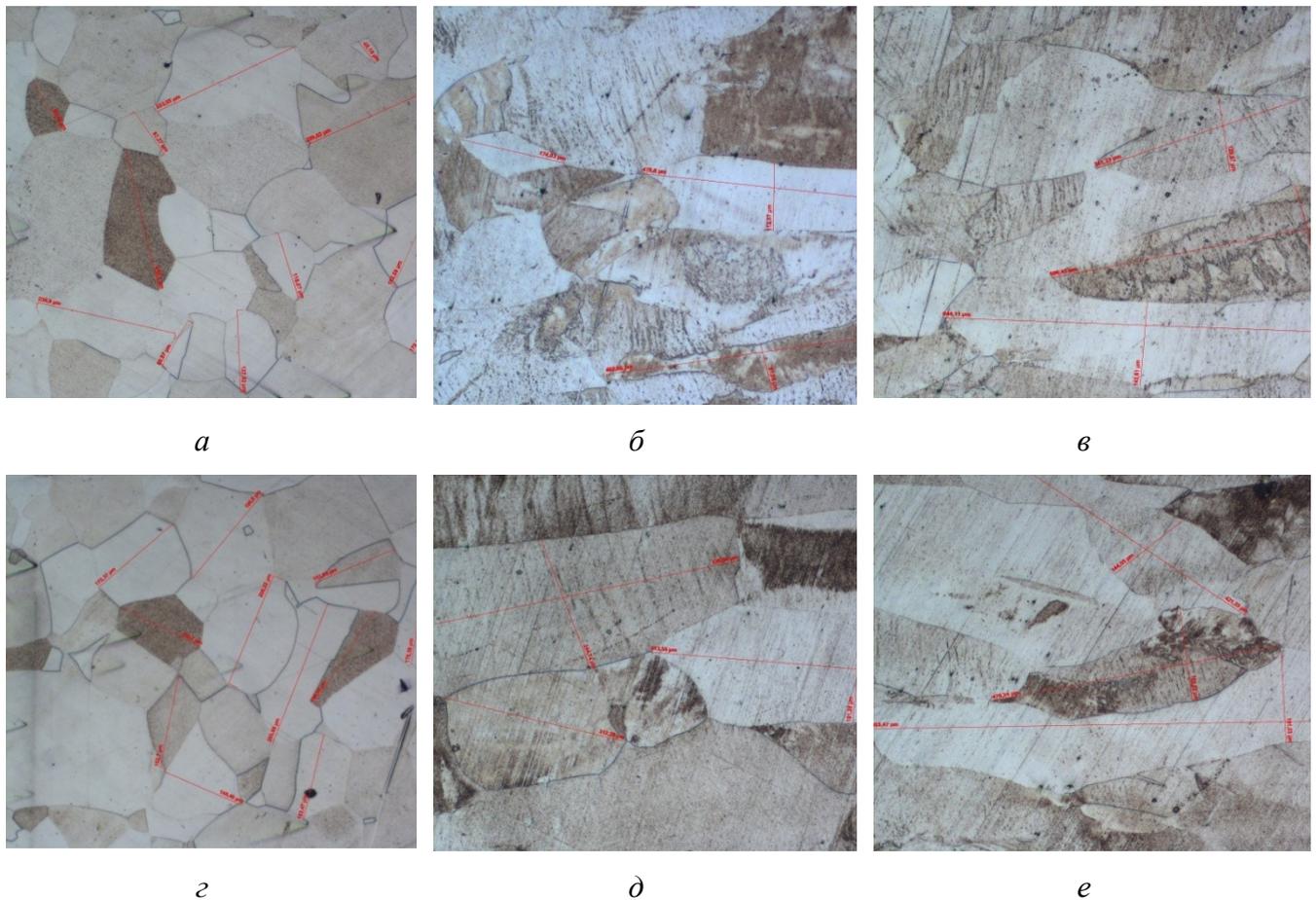


Рисунок 3.11 - Микроструктура образцов полос из сплава №4, полученных с различной степенью деформации при прокатке: *а* – 1,1 %; *б* -30 %; *в* -50 %; *г* -50 % и отжиг; *д* - 74 %; *е* - 96 %, x200

Установлено, что при прокатке в микроструктуре видны зерна, которые до деформации имеют округлую форму. При увеличении степени деформации они постепенно вытягиваются в направлении прокатки. Одновременно с изменением

формы зерен в процессе пластической деформации оси зерен получают определенную преимущественную ориентировку вдоль направления деформации. Такая последовательность обработки с применением отжига приводит к увеличению пластичности металла и позволяет деформировать его неоднократно с увеличением величины единичных обжатий при прокатке.

По результатам исследований были сделаны следующие выводы:

- максимальное обжатие, которое возможно при прокатке полос из сплава №4 составило 0,4 мм, при этом количество проходов сокращается до 69, а количество отжигов равняется 4;
- если критерием эффективности процесса прокатки является снижение трудоемкости за счет сокращения времени деформационной и термической обработки, тогда следует применять режим с единичным обжатием за проход 0,3 мм, что дает уменьшение количества проходов до 92 и отжигов до 2;
- единичное обжатие за проход 0,5 мм приводит по достижении суммарной степени деформации при прокатке 38% к появлению брака в виде трещин.

Для моделирования процесса листовой прокатки по предлагаемому режиму была разработана компьютерная модель с использованием программных комплексов SolidWorks и DEFORM 3D. Параметры объектов моделирования приведены в табл. 3.7.

Таблица 3.7 – Данные для создания объектов моделирования прокатки заготовки из сплава №4 в ПК DEFORM-3D

Размеры заготовки, мм	109×85×28
Параметры стана	
- диаметр валков, мм;	280
- длина бочки валков, мм:	580
- максимальная скорость прокатки, м/мин;	12
- допустимая сила прокатки, кН.	252
- допустимый момент прокатки, кНм	31,8

Процедура компьютерного моделирования с применением комплекса DEFORM 3D выполнялась поэтапно. На первом этапе были созданы объекты моделирования, такие как рабочий инструмент и заготовка под прокатку. Создание объектов моделирования было осуществлено при помощи среды трехмерного моделирования SolidWorks, откуда модели в дальнейшем были импортированы в DEFORM 3D в формате *.stl.

Модель процесса прокатки заготовки из сплава ПЛРД-20 в DEFORM 3D и заготовка с нанесенной сеткой конечных элементов представлены на рис. 3.12.

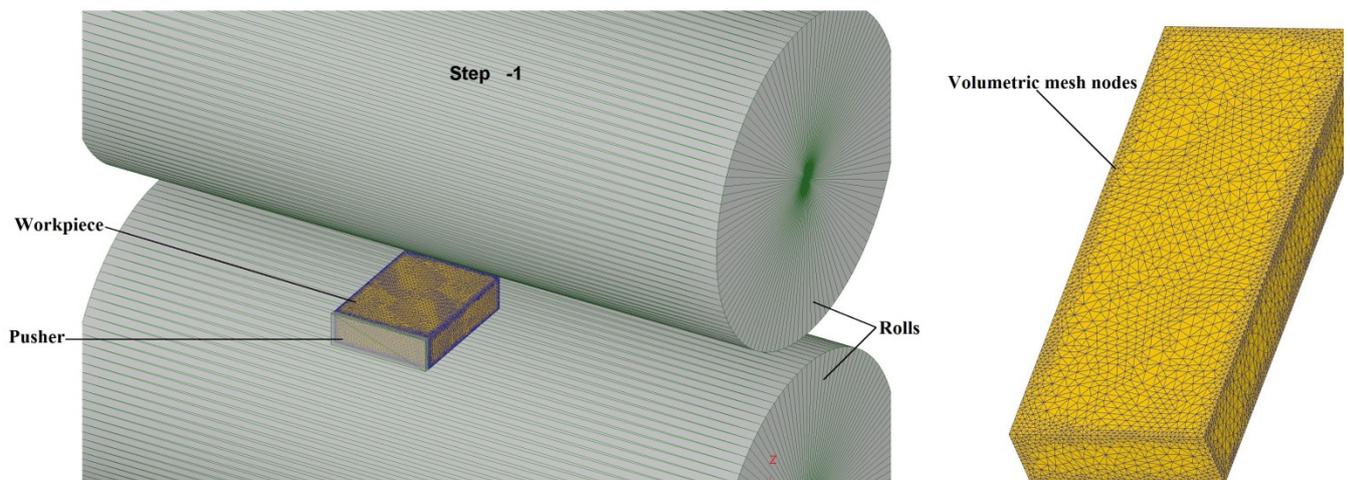


Рисунок 3.12 - Объекты моделирования в DEFORM 3D: *a* – модель заготовки в клети прокатного стана; *б* – заготовка с нанесенной сеткой конечных элементов

Для импортированной в препроцессор DEFORM 3D геометрии моделей задавались параметры их взаимного расположения, включая область контакта, посредством встроенного модуля позиционирования объектов. После позиционирования геометрии модели были заданы параметры для расчета (табл. 3.8).

Для снижения вычислительной нагрузки модель учитывала симметрию заготовки в двух плоскостях, перпендикулярных линии прокатки и толщине заготовки. Процесс прокатки заготовки был смоделирован в соответствии с планируемым промышленным маршрутом (см. табл. 3.6).

Таблица 3.8 – Параметры для модели прокатки заготовки из сплава ПЛРд-20

Параметры заготовки	Исходное количество элементов сетки - 60000. Минимальная длина стороны ячейки – 0,8 мм. Начальная температура 20 °С. Моделирование без теплообмена.
Решатель	Разрешение хода 1/3 минимального элемента сетки. Количество шагов на первом проходе 300. Тип решателя метод сопряженных градиентов с прямыми итерациями. Итераций решения не более 200 на шаг.
Условия симуляции	Тип материала: - заготовка: вязко-пластичный; - инструмент: абсолютно жесткий. Коэффициент трения заготовки по инструменту: 0,3 (по закону Амонтона-Кулона) Интерференция объектов: не более 0,001 мм.
Условия симметрии	Валки – по линии прокатки. Заготовка – по линии прокатки, по толщине заготовки.
Свойства материала	Кривая упрочнения сплава ПЛРд-20 при 20 °С. Модуль Юнга $16,8 \cdot 10^{11}$ дин/см ² . Коэффициент Пуассона 0,377

Реологические свойства сплава ПЛРд-20 (сплав №4), необходимые для его моделирования, вводили в базу данных программы DEFORM 3D в ручном режиме в виде зависимостей временного сопротивления деформации от суммарной степени холодной деформации, полученных по результатам испытаний в условиях промышленного предприятия ОАО «Красцветмет» рис. 3.13). Указанную графическую для исследуемого сплава аппроксимировали функцией

$$\sigma_B = 0,0124 \varepsilon_{\Sigma}^2 + 3,4751 \varepsilon_{\Sigma} + 444,89; \quad (3.4)$$

Проведение расчетов осуществлялось процессором DEFORM 3D, который использовал МКЭ и на основе заданных граничных условий рассчитывал динамику состояния каждого элемента сетки заготовки. В ходе расчетов была предусмотрена возможность визуализации динамики напряженно-деформированного состояния, что позволило следить за ходом моделирования в реальном времени.

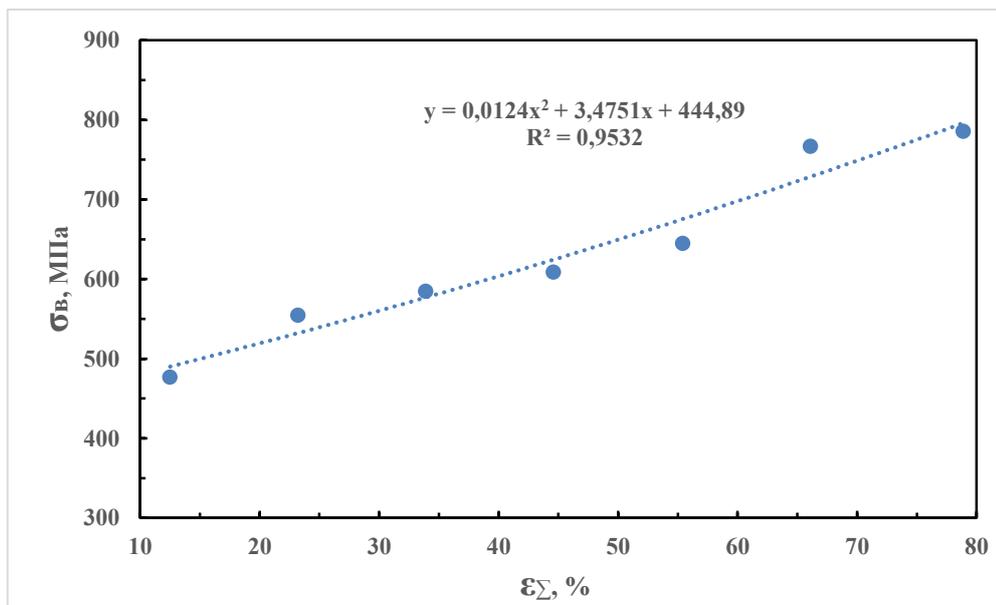


Рисунок 3.13 – Кривая упрочнения сплава ПЛРД-20

База данных модели, дополненная результатами расчетов, загружалась в постпроцессор DEFORM 3D, где проводился комплексный анализ процесса по ряду ключевых характеристик, включая визуализацию объекта моделирования и отображение параметров напряженно-деформированного состояния заготовки на каждом шаге моделирования с параметрами ее деформации.

На рис. 3.14, а представлена визуализация напряженного состояния заготовки при прокатке исследуемого сплава, а на рис. 3.14 б показано изменение силы прокатки P_R с ростом суммарной степени обжатия ϵ_{Σ} .

Результаты расчета по модели силовых параметров позволяют заключить, что значения силы прокатки растут при упрочнении металла в результате накопленной деформации. При этом максимальные значения силы прокатки P_R не превышают допустимых значений (см. табл. 2.9).

Анализ распределения напряжений показывает, что максимальные напряжения наблюдаются в центральной зоне заготовки, а их величина в последнем проходе прокатки не превышает 400 МПа. Это дает основание предполагать, что при заданных режимах обжатия критерий разрушения не должен превышать критических значений.

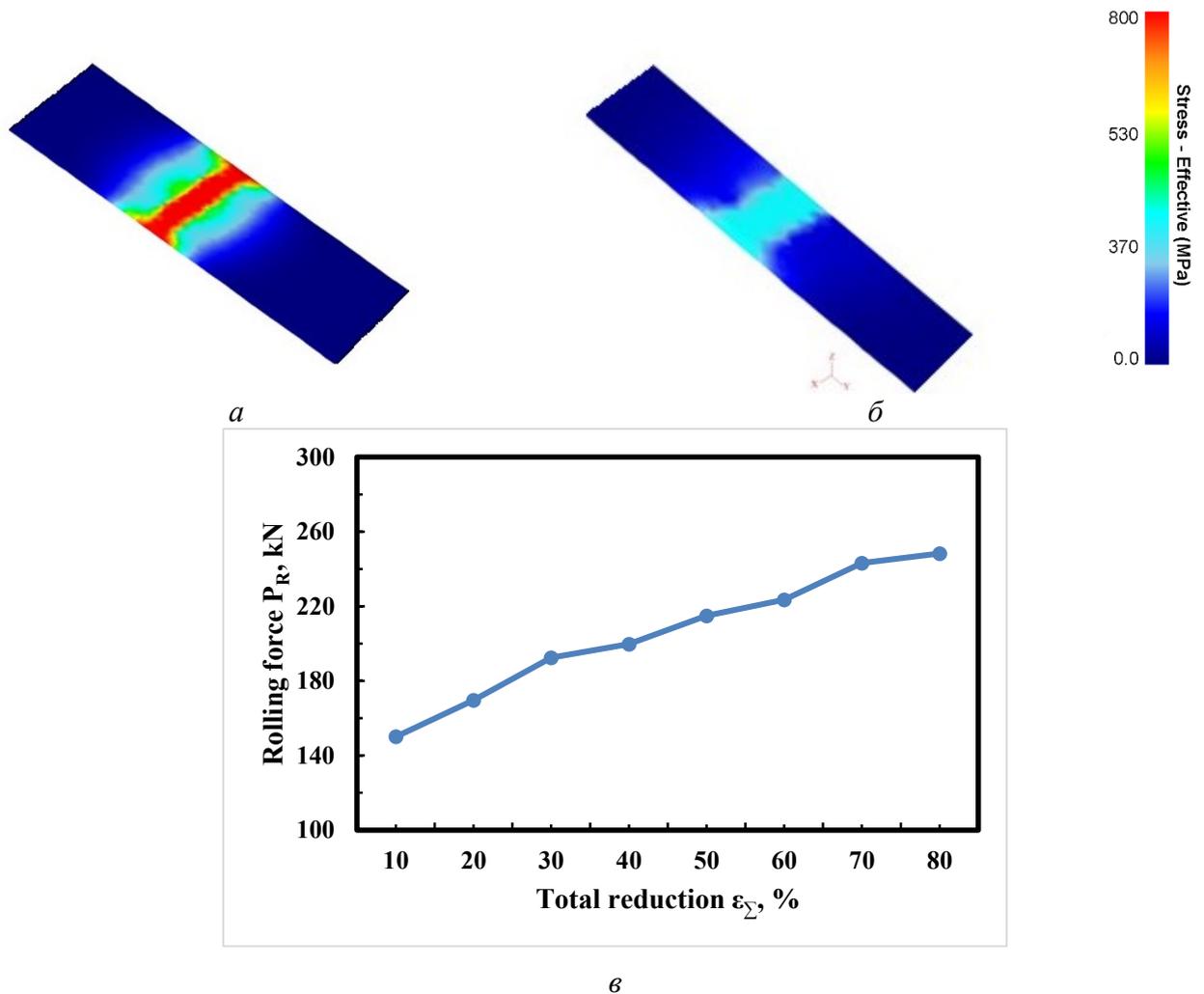


Рисунок 3.14 - Результаты моделирования в DEFORM 3D процесса листовой прокатки заготовки из сплава ПЛРД-20: *a* – визуализация распределения напряжений в очаге деформации на проходе прокатки перед первым отжигом; *б* – визуализация распределения напряжений в очаге деформации на последнем проходе прокатки; *в* – зависимость силы прокатки P_R от суммарной степени обжатия ϵ_{Σ}

Для проверки сделанных выводов анализировали распределение критерия Кокрофта-Латама в тех проходах, когда твердость достигала критических значений, и требовался отжиг (рис. 3.15). Из гистограммы (рис. 3.15, *a*) видно, что перед первым отжигом накопленное значение критерия разрушения S_{C-L} близко к критическому значению 1. Однако доля этих значений невелика и находится в пределах погрешности, что позволяет судить о получении бездефектного полуфабриката на данном этапе. После проведенного отжига происходит снятие внутренних напряжений, вызванных деформированием заготовки, вследствие чего

критерий разрушения возвращается к нулевым значениям. Перед вторым отжигом (рис. 3.15, б) C_{C-L} также не достигал единицы, а его предельное значение находилось в районе 0,8, что позволяет сделать заключение об имеющемся запасе пластичности. Гистограмма (рис. 3.15, в) показывает, что предложенный режим прокатки (см. табл. 3.6) заготовки из сплава ПЛРД-20 обеспечивает получение листа толщиной 1 мм без дефектов, что подтверждают результаты расчета критерия разрушения Кокрофта-Латама, который не превышает значений 0,4.

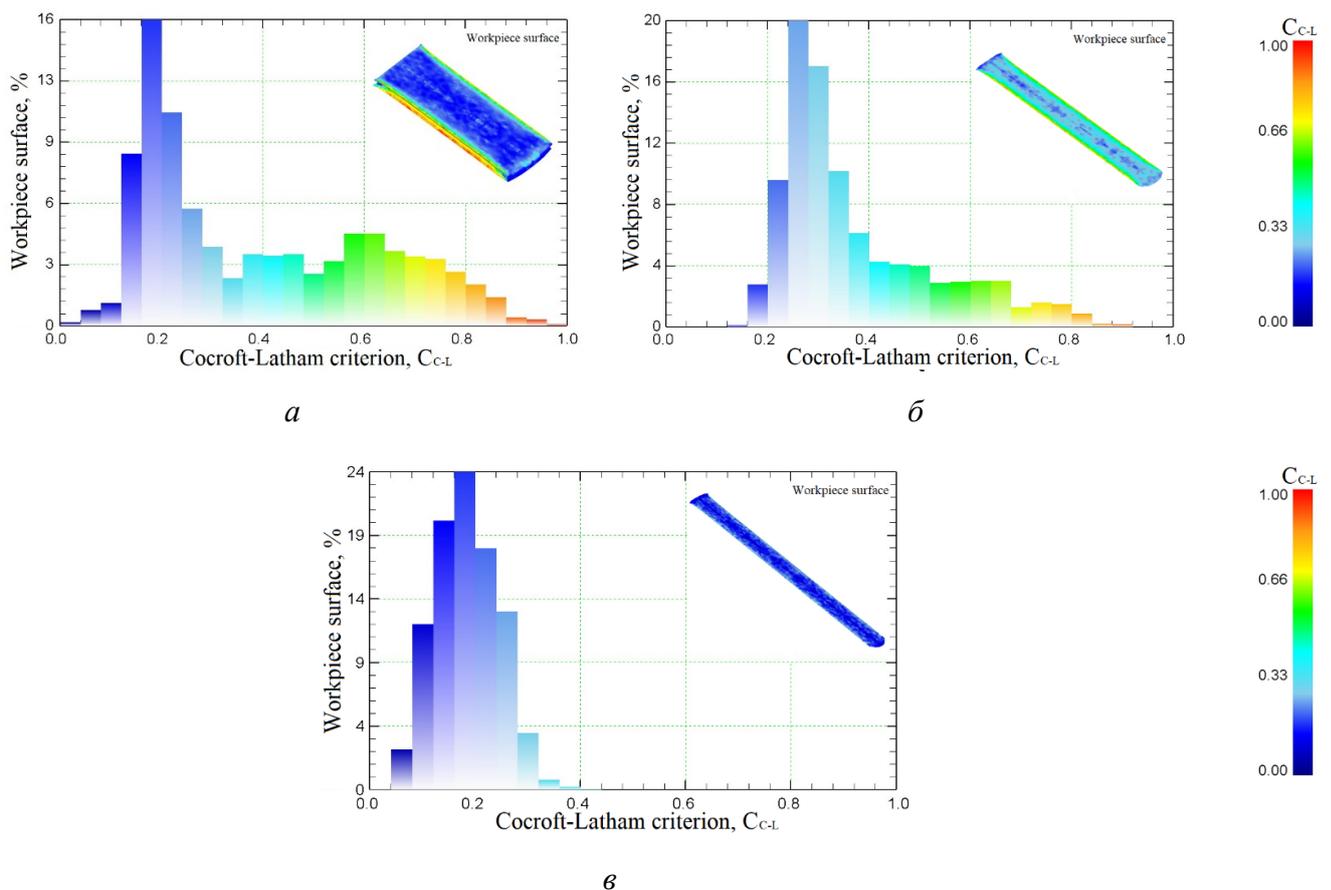


Рисунок 3.15 - Гистограмма распределения по поверхности проката критерия разрушения Кокрофта-Латама: *a* – перед первым отжигом; *б* – перед вторым отжигом; *в* – в конце прокатки

Таким образом, в результате моделирования выявлено, что формоизменение заготовки из сплава №4 по заданному режиму обжатий не приводит к разрушению проката. Определена зависимость силы прокатки от суммарной степени обжатия при прокатке данного сплава, а также получены количественные данные по силовым параметрам и критерию разрушения Кокрофта-Латама. Используя эти

данные, можно прогнозировать опасность разрушения металла, определять критическую степень обжатия, необходимую для назначения промежуточных отжигов, а также оценивать силовую загрузку станов по допустимой силе прокатки.

Результаты моделирования показали, что предлагаемый режим со средним обжатием за проход 0,3 мм обеспечивает получение качественных полуфабрикатов во всех проходах, при этом критерий Кокрофта-Латама не превышает критических значений.

Для проверки результатов компьютерного моделирования провели опытную прокатку по предлагаемому режиму в промышленных условиях ОАО «Красцветмет» с замером физико-механических свойств на различных этапах обработки (табл. 3.9).

Таблица 3.9 - Физико-механические свойства образцов из сплава №4

Состояние	Толщина заготовки, мм	Толщина полосы, мм	Временное сопротивление, МПа	Условный предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Твердость HV, Н/мм ²
Отожженное	28,0	-	418	135	37	1060
Деформированное	12,5	9,5	767	752	10	2400
Отожженное	-	9,5	424	199	41	1030
Деформированное	3,5	2,0	786	772	6	2400
Отожженное	-	2,0	393	119	39	1010
Деформированное	2,0	1,0	700	675	7	2320

Их анализ показал, что прокатка с обжатием за проход в среднем 0,3 мм возможна без разрушения полуфабрикатов, а использование предлагаемого режима прокатки, по сравнению с действующим, приводит к снижению количества проходов при прокатке в 1,5 раза, и, соответственно, к значительному увеличению производительности.

3.3. Выводы по главе

После проведенных исследований получены следующие результаты:

- для 4-х исследуемых сплавов платины № 1, 2, 3 и 4 (см. табл. 2.6) ювелирного и технического назначения получены аппроксимационные формулы для расчета временного сопротивления в зависимости от суммарной степени деформации;
- с помощью разработанного программного обеспечения и компьютерной модели проведен анализ сортовой прокатки ювелирных сплавов № 1-3 на основе платины 850 и 585 пробы, который позволил предложить более эффективный режим обжатий, как с позиций снижения трудоемкости процесса прокатки (уменьшения количества проходов), так и с позиций снижения его силовых параметров;
- проведен расчет параметров волочения тонкой проволоки из этих сплавов (до 0,25 мм), который дал возможность оценить деформационные и силовые параметры процесса при реализации предлагаемого режима обжатий;
- впервые разработаны рациональные режимы деформации и рассчитаны силовые параметры процессов сортовой прокатки и волочения для новых ювелирных сплавов платины 585 пробы (сплавы №2 и №3), которые позволяют проектировать технологию получения прутков и проволоки для цепевязания.
- проведен анализ заводского режима прокатки полос из сплава ПЛРд-20 (сплав №4), который показал, что при его реализации с применением малых единичных обжатий 0,2 мм для получения полосы толщиной 1 мм из заготовки толщиной 28 мм в промышленных условиях ОАО «Красцветмет» используют 138 проходов и 3 отжига, при этом имеется запас по силовой нагрузке оборудования;
- для этого сплава получены экспериментальные данные по механическим свойствам и твердости деформированных и отожженных полуфабрикатов;
- установлено, что ковкая заготовка толщиной 28,0 мм, используемая для прокатки, после отжига при температуре 1100 °С и времени выдержки 1 ч имеет необходимый для интенсивной деформации уровень механических свойств;

- экспериментальным путем для исследуемого сплава установлено значение критической твердости металла HV при заданной величине обжатия при прокатке, равное 2400 Н/мм^2 по Виккерсу, при превышении которого происходит разрушение металла;
- реализация процесса прокатки по предлагаемому режиму в промышленных условиях позволила снизить дробность деформации и установить, что процесс прокатки протекает стабильно, поэтому возможно применение больших единичных степеней деформации и уменьшение количества проходов в 1,5 раза;
- промежуточные и окончательные отжиги при температуре $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ и времени выдержки 1 ч дают повышение пластичности в 4-6 раз, что позволяет применять большие степени деформации;
- изучена микроструктура металла при различных степенях деформации и отжиге и установлено, что при прокатке зерна, которые до деформации имели округлую форму, постепенно вытягиваются в направлении прокатки, при этом их оси получают преимущественную ориентировку вдоль оси деформации;
- расчет энергосиловых параметров при использовании предлагаемого режима показал, что сила и момент прокатки не превышают допустимых значений применяемого оборудования, что подтвердили результаты промышленной прокатки на стане LS 500x280;
- рассчитанный с помощью программных средств режим обжатий при листовой прокатке заготовки толщиной 28,0 мм в полосу толщиной 1,0 мм со средним абсолютным обжатием за проход 0,3 мм с использованием двух промежуточных и одного окончательного отжигов опробован в промышленных условиях и позволяет получать качественные полуфабрикаты с требуемым уровнем механических свойств для последующей обработки;
- результаты исследований, представленные в данной работе, могут быть рекомендованы для совершенствования технологии изготовления полос из сплава ПЛРд80-20 в условиях ОАО «Красцветмет», что подтверждается актом опытно-промышленной апробации (Приложение А).

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ДЛИННОМЕРНЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ СПЛАВОВ ПАЛЛАДИЯ

4.1. Разработка технологии производства проволоки ювелирного назначения из нового сплава палладия 850 пробы

В качестве объекта для исследований выбран новый сплав палладия 850 пробы (сплав №5) ювелирного назначения [91], содержащий (масс. %) палладий в количестве 85,0, золото 2,0, родий 0,01, остальное серебро (см. табл. 2.6).

Анализ технологии получения проволоки в промышленных условиях (рис. 4.1) показал, что в отличие от обработки ювелирных сплавов платины в качестве заготовки используется кованный отожженный пруток размерами 15x15 мм.



Рисунок 4.1 - Схема действующей технологии получения проволоки из сплавов палладия

Прокатку на размер $10,5 \times 10,5$ мм проводят за 8 проходов на прокатном стане с диаметром рабочих валков 130 мм и допустимой силой прокатки 620 кН. Полуфабрикат размерами $1,05 \times 1,05$ мм получают за 37 проходов на стане с диаметром валков 110 мм и допустимой силой прокатки 500 кН. Проволоку диаметром 0,3 мм производят на волочильном стане со скольжением за 10 переходов [2].

Анализ действующего режима обжатий при сортовой прокатке и волочении показал, что также, как и при обработке сплавов на основе платины (см. рис. 3.2, 3.8), единичные обжатия распределены неравномерно. Это можно объяснить тем, что для деформации в производственных условиях используется то же самое оборудование и калиброванный валковый инструмент. Отличием является первый этап прокатки для получения прутков размером $10,5 \times 10,5$ мм из ковanej заготовки размерами 15×15 мм. Выявлено, что при действующей схеме обжатия их распределение неравномерно (рис. 4.2), что приводит к большой вероятности обрыва в 4, 5 и 6 проходах при прокатке вследствие быстрого упрочнения металла и увеличению силовой загрузки оборудования.

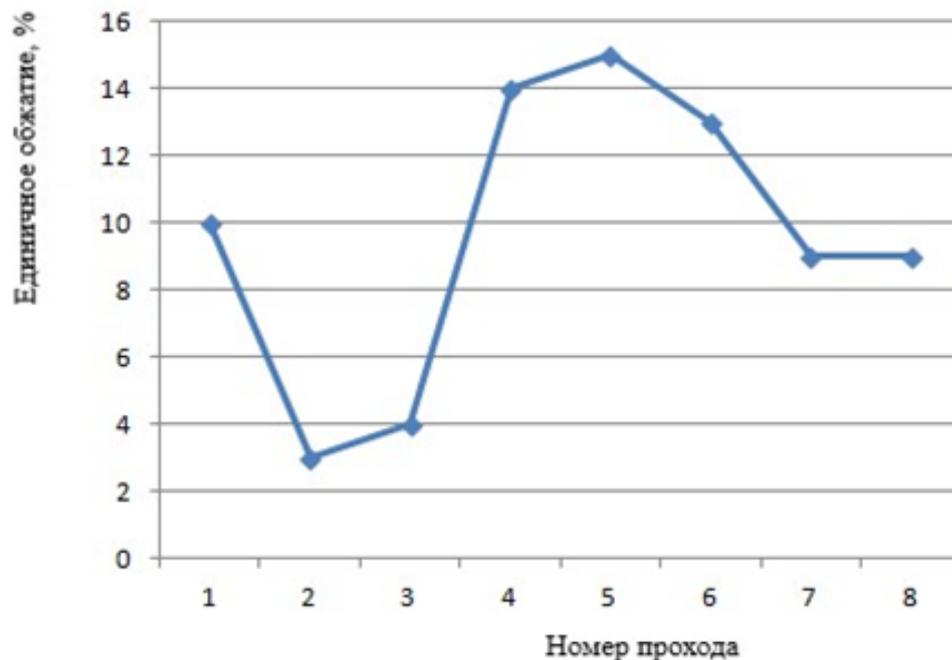


Рисунок 4.2 – Изменение обжатий по проходам для действующего режима прокатки прутков из сплавов палладия размером $10,5 \times 10,5$ мм из ковanej заготовки размером 15×15 мм

Для расчета силы прокатки использовали эмпирические зависимости для определения временного сопротивления в зависимости от суммарной степени обжатия [2]. Уточненная формула для расчета этого показателя применительно к сплаву №5 имеет следующий вид:

$$\sigma_b = 0,0337 \varepsilon_{\Sigma}^2 + 0,2507 \varepsilon_{\Sigma} + 474,5. \quad (4.1)$$

Для проверки результатов расчета по данной формуле провели экспериментальные исследования [2] и определили физико-механические свойства деформированных полуфабрикатов из опытного сплава №5 палладия 850 пробы при различных степенях суммарного обжатия. В табл. 4.1 представлены расчетные и экспериментальные значения временного сопротивления и погрешность оценки точности расчетов, которая не превышает 10 %.

Таблица 4.1 – Значения прочностных свойств прутков из сплава №5

Суммарное обжатие ε_{Σ} , %	0	21,5	74	87	94	97
Экспериментальные значения временного сопротивления σ_b , МПа	437	487	634	702	829	847
Расчетные значения временного сопротивления σ_b , МПа	474,5	495	677	751	796	815
Погрешность, %	8,6	1,7	6,5	6,8	4,0	3,8

На основании проведенного анализа действующей технологии предложено перераспределить единичные обжатия на первом этапе сортовой прокатки прутков в этих проходах и за 8 проходов получать пруток размерами 9,0x9,0 мм (табл. 4.2).

Компьютерное моделирование режимов сортовой прокатки прутка из сплава палладия №5 проводили в программе DEFORM-3D, которая позволила оптимизировать маршрут обработки путем анализа напряженно-деформированного состояния заготовки с прогнозированием вероятности ее разрушения.

Таблица 4.2 – Предложенный режим первого этапа прокатки для прутков из сплава №5

Номер прохода i	x_i , мм	F_i , мм ²	$\varepsilon_{ед}$, %	ε_{Σ} , %	σ_B , МПа	$P_{п}$, кН
-	15,0	225,0	-	-	-	-
1	14,0	196,0	12,9	12,9	483	59,5
2	13,1	171,6	11,9	23,7	499	54,5
3	12,4	153,8	10,4	31,6	516	46,4
4	11,6	134,6	12,1	40,2	539	49,1
5	11,0	121,0	10,1	46,2	558	41,2
6	10,5	110,25	8,9	51,0	575	36,7
7	9,7	94,1	14,6	58,2	603	43,0
8	9,0	81,0	13,9	64,0	628	38,8

Модель включала спроектированные в среде SolidWorks заготовку, рабочий инструмент (рис. 4.3) и задаваемые для них в препроцессоре DEFORM-3D граничные условия в соответствии с особенностями используемой технологии холодной прокатки (табл. 4.3).

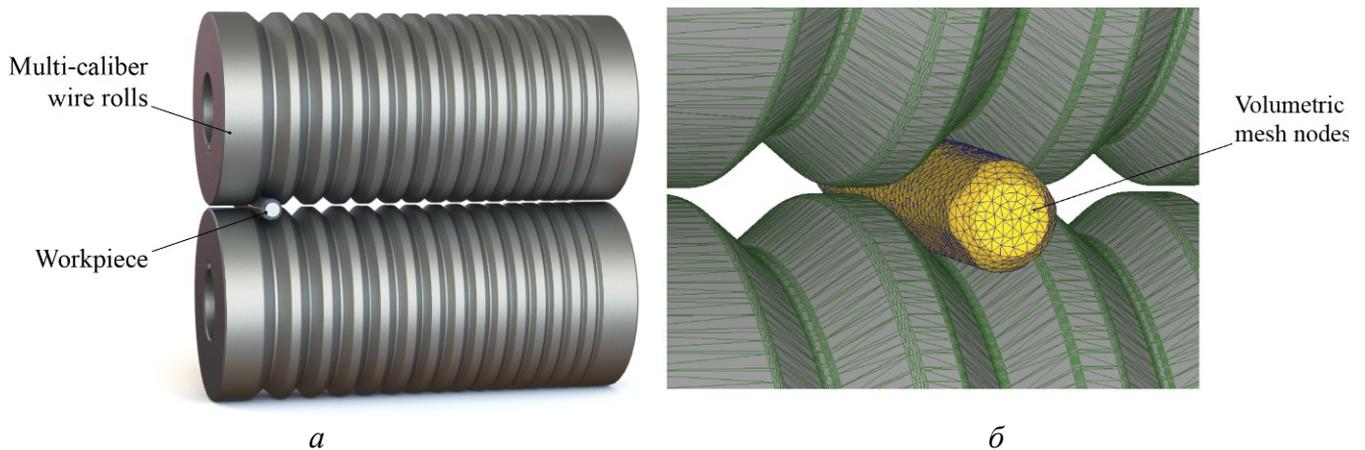


Рисунок 4.3 – Общий вид модели сортовой прокатки прутков из сплава №5:
a – объекты модели в сборке в SolidWorks; *б* – модель процесса прокатки заготовки с конечно-элементной сеткой в DEFORM-3D

Таблица 4.3 – Параметры модели сортовой прокатки прутков из сплава №5

Параметр	Значение (характеристика)
Прокатный стан: - диаметр валков, мм; - калибровка валков; - максимальная скорость прокатки, м/мин; - допустимая сила прокатки, кН; - максимальный момент прокатки, кНм.	AF 200+180R 130 ромб-квадрат 12,5 640 13,6
Заготовка: -размеры, мм - данные о прочностных свойствах материала; - модуль упругости, МПа; - коэффициент Пуассона.	пруток из сплава №5 15x15 формула (4.1) 70000 0,3897
Модель прокатки: - разрешение сетки, не менее; - разрешение хода решателя; - материал инструмента; - материал заготовки; - коэффициент трения заготовки по инструменту.	1/5 ширины сечения заготовки 1/3 мин. элемента сетки абсолютно жесткий вязко-пластичный 0,25

Моделирование процесса холодной прокатки проводили последовательной подачей сегмента прутка из сплава №5 в калибры валков сортового прокатного стана AF 200+180R (см. табл. 2.7) при среднем значении единичной вытяжки по проходам $\lambda_{\text{ед}} = 1,19$. После каждого прохода заготовку кантовали на 90° , что ограничивало применение условий симметрии к инструменту.

Реологические свойства сплава вводили в базу данных DEFORM-3D в виде зависимостей временного сопротивления от суммарной степени холодной деформации, полученных по результатам испытаний в промышленных и лабораторных условиях и рассчитанных по формуле (4.1) .

Для построения модели использовали встроенный в DEFORM-3D метод сопряженных градиентов с прямыми итерациями при максимуме 200 итераций на шаг решателя. Данный метод рекомендован компанией-производителем

DEFORM-3D как наиболее надежный при моделировании однонаправленной деформации без теплообмена.

Между проходами производили регенерацию конечноэлементной сетки с поправкой крупности зерна на деформационное уменьшение сечения заготовки (от 1,44 мм в первом проходе до 0,98 в последнем). Повреждение элементов сетки на любом шаге расчета устранялось автоматическим локальным перестроением с интерполяцией по соседним элементам. Для оценки и прогнозирования степени поврежденности металла заготовки использовали нормализованный критерий Кокрофта-Латама C_{C-L} .

При разработке модели были приняты граничные условия, учитывающие силовые возможности промышленного прокатного оборудования:

- максимальная суммарная степень обжатия ε_{Σ} не должна превышать 98 %;
- сила прокатки P_{II} не должна превышать 90 % допустимой для используемого прокатного стана;
- критерий Кокрофта-Латама не должен превышать значение $C_{C-L} = 1$ во избежание разрушения металла.

Моделирование процесса сортовой прокатки прутков из нового сплава №5 палладия 850 пробы позволило проанализировать предлагаемый маршрут обработки с учетом требований к свойствам материала и калибровки валков. На основании результатов расчета в постпроцессоре DEFORM-3D проведен анализ работы модели по ряду ключевых характеристик, включая визуализацию объекта моделирования и отображение параметров напряженно-деформированного состояния заготовки на сохраненных шагах расчета.

На рис. 4.4 представлена визуализация напряженно-деформированного состояния заготовки при прокатке в различных проходах. Анализ значений критерия разрушения Кокрофта-Латама по поверхности и в сечениях заготовки в рассматриваемых проходах позволяет заключить, что металл обладает достаточным запасом пластичности на большей части маршрута без использования промежуточной термообработки. Как видно из гистограмм, после 2-го прохода средняя степень поврежденности металла не превышает 0,14, к окончанию 5-го возрастает до 0,32, а на 8-м – до 0,53.

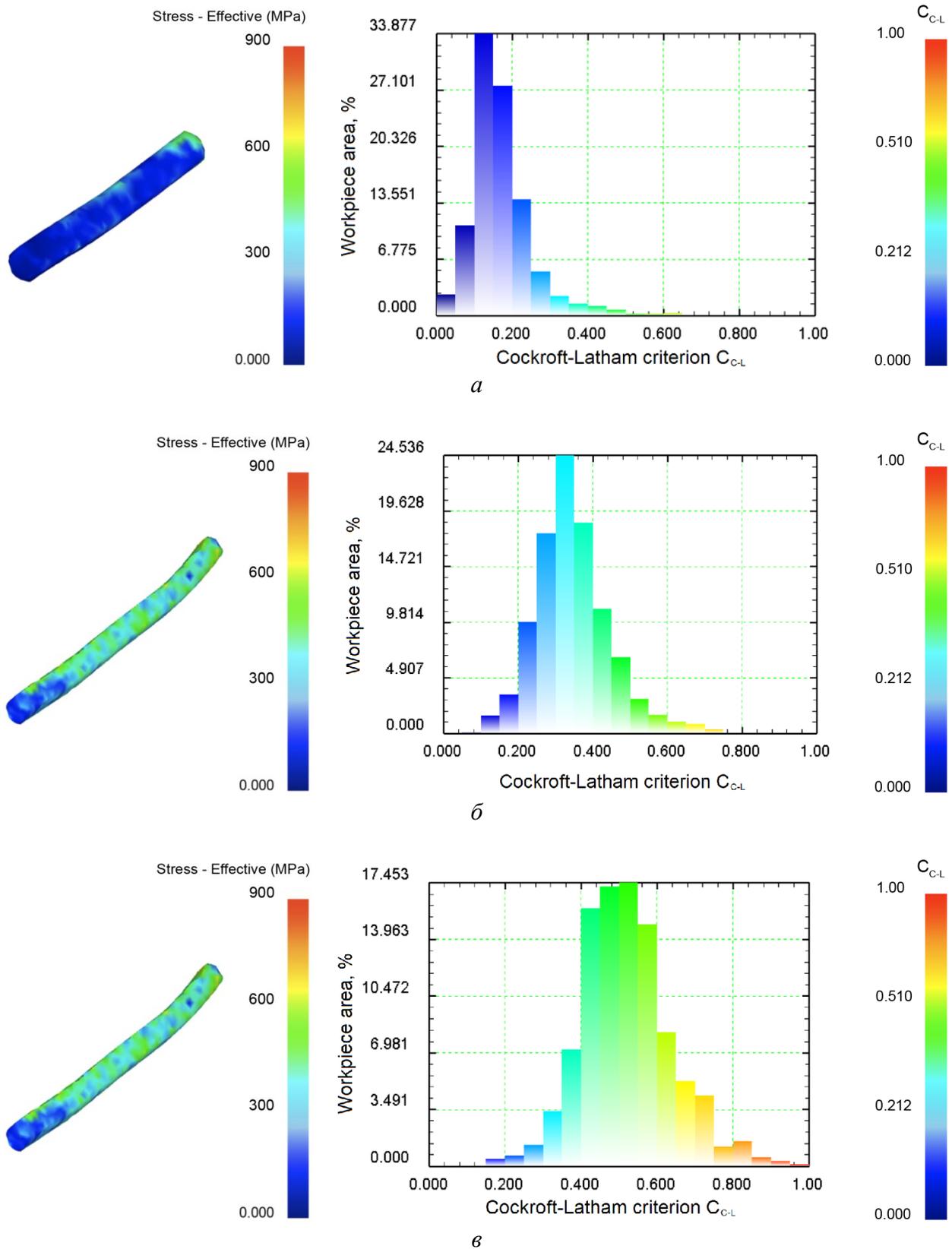


Рисунок 4.4 – Визуализация распределения напряжений и критерия разрушения Кокрофта-Латама по поверхности раската при прокатке: *a* – 2 проход, *b* – 5 проход, *v* – 8 проход

Последние проходы прокатки характеризуются локальными зонами концентрации напряжений на формируемых калибрами гранях прутка, что приводит к возрастанию значения критерия S_{C-L} до значений, превышающих среднее. Это отражено на правой части гистограммы и оранжево-красным зонам на заготовке. Возникновение зон со степенью разрушения выше 0,8 свидетельствует о вероятности разрушения металла в их окрестности при дальнейшей деформации. Данные моделирования в целом согласуются с известными представлениями о концентрации напряжений в металле при сортовой прокатке, и, поскольку в исследуемом процессе суммарная доля значений S_{C-L} , находящихся в «зоне риска», не превышает 1,5 % по объему заготовки, в рамках моделирования этой величиной можно пренебречь как статистически незначимой. Умеренная в целом расчетная степень поврежденности металла на протяжении всего маршрута прокатки, определенная по критерию Кокрофта –Латтама свидетельствует о рациональном выборе режима обжатий.

Расчеты силы прокатки для такого режима обжатий (см. табл. 4.2) показали, что загрузка оборудования удовлетворяет допустимым значениям этой величины для применяемых сортопрокатных станов (см. табл. 2.7).

На втором этапе прокатки использовали режим обжатий, представленный в табл. 4.4. Результаты расчета параметров процесса прокатки на сортовом стане с диаметром валков 180 мм по предложенному режиму обжатий силы прокатки показал, что ограничения по допустимой силе прокатки для применяемого оборудования выполняются во всех проходах (см. табл. 2.7).

С применением разработанной ранее компьютерной модели процесса волочения [2] проведено моделирование этого процесса для исследуемого сплава по предлагаемому режиму обжатий (табл. 4.5), позволившее учесть влияние угла волоки и степени единичных обжатий на интенсивность касательных напряжений, уровень остаточных напряжений, возникающих на поверхности деформированной проволоки, и силовые характеристики [2].

Таблица 4.4 – Предложенный режим обжатий для второго этапа прокатки прутков из сплава №5

Номер прохода i	x_i , мм	$\lambda_{ед.}$	$\varepsilon_{ед.}$, %	ε_{Σ} , %	$P_{п.}$ кН
1	7,90	1,26	20,5	20,5	38,8
2	7,20	1,20	16,94	34,0	29,8
3	6,42	1,26	20,49	47,5	30,2
4	5,92	1,18	14,97	55,3	23,5
5	5,29	1,25	20,17	64,3	25,1
6	4,60	1,32	24,37	72,7	24,3
7	3,98	1,33	25,14	79,8	21,0
8*	3,38	1,39	27,90	85,4	18,4
9	2,92	1,34	25,30	25,3	9,4
10	2,49	1,38	27,32	45,7	8,6
11	2,22	1,26	20,48	56,8	6,5
12	2,03	1,19	16,43	63,9	5,3
13	1,92	1,20	10,44	67,6	3,9
14	1,82	1,12	10,30	71,0	3,6
15	1,45	1,58	36,56	81,6	6,0
16	1,20	1,46	31,43	87,4	4,3
17	1,00	1,44	30,56	91,2	3,3

* - проход, после которого проводится промежуточный отжиг

Результаты моделирования учитывали при выборе параметров технологического процесса и инструмента, а для их проверки были проведены экспериментальные исследования технологии получения литых и деформированных полуфабрикатов из опытного палладиевого сплава №5 в лабораторных условиях кафедры «Обработка металлов давлением» института цветных металлов СФУ на прокатных станах AF 200+180R и LG 200, а также волочильном стане 10 NFS TRONIC (см. табл. 2.7, 2.8).

Анализ результатов экспериментальных исследований подтвердил данные моделирования и показал, что для получения из кованой заготовки размерами 15x15 мм прутка из исследуемого сплава с размерами 9x9 мм достаточно 8 прохо-

дов, при этом обжатия по проходам распределены равномерно, а сила прокатки (см. табл. 4.2) не превышает допустимых значений, указанных в табл. 2.7.

Таблица 4.5 – Предложенный режим волочения для проволоки из сплава №5

Номер перехода	Диаметр, мм	Площадь, мм ²	$\lambda_{ед.}$	$\varepsilon_{ед.}$, %	ε_{Σ} , %	$\eta_{в}$	$P_{в}$, Н
1	1,00	0,785	1,27	21,5	21,5	1,39	251,7
2	0,90	0,636	1,23	19,1	36,4	1,44	187,2
3	0,80	0,502	1,27	21,1	49,8	1,50	137,5
4	0,70	0,385	1,30	23,3	61,5	1,56	100,6
5	0,60	0,283	1,36	26,5	71,7	1,59	74,8
6	0,50	0,196	1,44	30,7	80,4	1,70	53,3
7	0,45	0,159	1,23	18,8	84,1	1,70	40,6
8	0,40	0,126	1,26	20,8	87,4	1,74	30,2
9	0,35	0,096	1,31	23,8	90,4	1,86	21,9
10	0,30	0,071	1,17	26,0	92,9	2,11	15,6

Дальнейшую прокатку вели на стане LG 200 до размера $x=1,0$ мм (см. табл. 4.4). Опыты показали, что для получения прутка такого размера с суммарной степенью деформации более 90 % достаточно 17 проходов и 1 промежуточного отжига. Расчет силы прокатки показал, что ее максимальное значение в первых проходах не превышает 40 кН, а в последних проходах снижается до 4 кН, то есть силовая загрузка оборудования позволяет осуществить прокатку с заданными единичными обжатиями в пределах допустимых значений этого параметра.

Анализ результатов исследований показал высокую склонность полуфабрикатов из исследуемого сплава к деформационному упрочнению. В литом состоянии сплав, содержащий в своем составе до 13 % серебра и модифицированный родием, имеет высокие значения твердости до 135 HV и временного сопротивления порядка 437 МПа (см. табл. 4.1).

При сортовой прокатке с увеличением степени суммарной деформации до 90 % и более прочностные характеристики сплава повышаются и достигают зна-

чений порядка 777,8 МПа, а пластические снижаются до 3 %, что соответствует общим представлениям и закономерностям теории обработки металлов давлением. Модифицирование родием за счет измельчения зеренной структуры металла также приводит к увеличению прочностных и пластических свойств, составляющим в среднем 10-15 % [2].

Таким образом, анализ физико-механических свойств деформированных полуфабрикатов из нового сплава палладия №5, легированного серебром и золотом, и модифицированного родием, показал, что обработка данного сплава характеризуется высокой технологичностью и запасом пластичности. Это позволяет получать качественные деформированные полуфабрикаты в виде прутков и проволоки при больших суммарных обжатиях без образования трещин и обрывов.

Экспериментальные исследования процесса волочения проволоки из прутка с размером стороны $x=1,0$ мм из исследуемого сплава проводили в лабораторных условиях на десятикратном волочильном стане (см. табл. 2.7) по режиму, представленному в табл. 4.4.

После волочения прутков, полученных на втором этапе сортовой прокатки, физико-механические свойства проволоки по переходам для исследуемых сплавов изменяются в соответствии с известными закономерностями: прочностные характеристики из-за наклепа металла растут до значений порядка 800 кН, а пластические падают до значений порядка 2,5% .

Установлено также, что увеличение температуры отжига с 950 до 1000 °С для сплава, модифицированного родием, приводит к повышению уровня прочностных свойств и выравниванию свойств по сечению полуфабрикатов. После отжига при температуре 1000 °С и времени выдержки 1 час относительное удлинение δ возрастает, а временное сопротивление σ_b уменьшается, при этом твердость HV находится в пределах 1200-1400 Н/мм².

Структура металла в литом состоянии характеризуется дендритным строением твердого раствора, обусловленным условиями неравновесной кристаллизации, и наличием химической неоднородности. При пластической деформации

ветви дендритных кристаллов вытягиваются вместе с междендритными пространствами.

Химическая неоднородность при этом полностью не устраняется, а в заготовках сохраняется неоднородное распределение серебра и связанного с ним кислорода. То есть по мере роста степени пластической деформации постепенно формируется волокнистое строение. Одинаковый характер структурных изменений при увеличении степени пластической деформации подтверждается снимками микроструктуры прутков и проволоки различного размера (см. рис. 4.5).

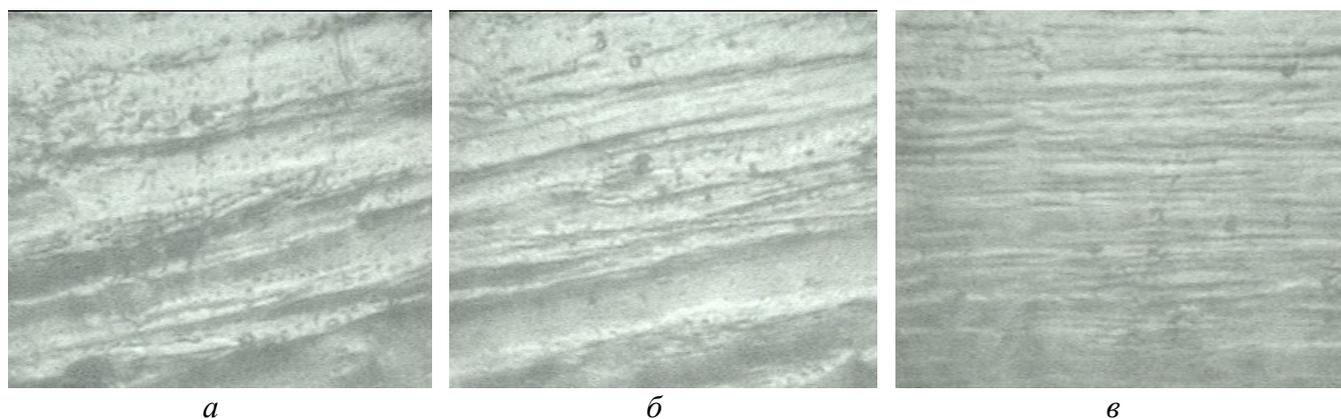


Рисунок 4.5 – Микроструктура деформированных полуфабрикатов из сплава №5: *а* – 2,2x2,2 мм; *б* - 1,8x1,8 мм; *в* - диаметр 1,0 мм, $\times 200$

Таким образом, для нового сплава палладия 850 пробы проведены комплексные исследования физико-механических свойств и структуры металла, результаты которых были использованы для разработки рациональных технологических режимов сортовой прокатки и волочения проволоки ювелирного назначения, предназначенной для изготовления ювелирных цепочек.

4.2. Разработка и исследование технологии производства проволоки технического назначения из нового сплава палладия

Для исследования процесса изготовления проволочных контактов (рис. 4.6, *a*) из сплава №6 (см. табл. 2.8) провели анализ технологии получения проволоки, применяемой в настоящее время в промышленных условиях для сплавов на основе палладия. Он показал, что в качестве заготовки используется кованный отожженный пруток с размерами 15x15 мм (размер стороны $x_i = 15$ мм). Далее из этой заготовки ведут прокатку прутков на размер $x_i = 10,5$ мм за 8 проходов на сортовом прокатном стане AF 200+180R с диаметром рабочих валков 130 мм и допустимой силой прокатки 620 кН, а затем получают прутки размерами $x_i = 1,05$ мм за 37 проходов на стане LG 200 с диаметром валков 110 мм и допустимой силой прокатки 500 кН. Окончательно проволоку диаметром в диапазоне 0,50-0,70 мм производят на многократном волочильном стане со скольжением с допустимой силой волочения 5 кН за 10 переходов.

Выявлено, что при действующей схеме обжатия по проходам распределены неравномерно (рис. 4.6, *б*), что приводит к большой вероятности обрыва в 4, 5 и 6 проходах при прокатке вследствие быстрого упрочнения металла и увеличению силовой загрузки оборудования.

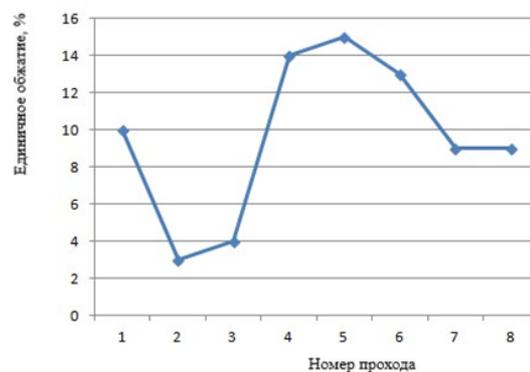
*a**б*

Рисунок 4.6 - Вид проволочного контакта (*a*) из сплавов палладия и изменение единичных обжатий $\varepsilon_{ед}$ (*б*) по проходам для действующего режима прокатки прутков размером $x_i = 10,5$ мм из заготовки размером $x_i = 15$ мм

При прокатке прутков из драгоценных металлов и их сплавов на промышленных сортовых станах традиционно используется калибровка ромб-квадрат со срезанными угловыми элементами (см. рис. 1.15). Данная схема калибров позволяет добиться большей точности геометрии и размеров получаемого прутка, обеспечивает равномерность деформации в процессе прокатки по проходам, а также является более близкой к кругу – поперечному сечению получаемой затем волочением проволоки. Применение данной системы калибров увеличивает прочность и стойкость инструмента, поскольку уменьшается разница между рабочими диаметрами валков.

На основании проведенного анализа промышленной технологии предложено перераспределить единичные обжатия $\varepsilon_{ед}$ на первом этапе при прокатке на сортовом стане AF 200+180R с диаметром рабочих валков 130 мм и допустимой силой прокатки 620 кН и за 8 проходов получать прутки размерами $x_i = 9$ мм (табл. 4.6). Суммарное обжатие ε_{Σ} при этом за 8 проходов не превышает 64 %, что дает возможность прогнозировать прокатку без промежуточного отжига и разрушения металла.

Таблица 4.6 - Предложенный режим первого этапа прокатки прутков из сплава №6

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

Компьютерное моделирование режимов сортовой прокатки прутка из исследуемого сплава палладия проводили в программе DEFORM-3D, которая позволила оптимизировать маршрут обработки заготовки путем анализа распределения напряжений и прогнозированием вероятности ее разрушения. Модель включала спроектированные в среде SolidWorks заготовку, рабочий инструмент (см. рис. 4.3) и задаваемые для них в препроцессоре DEFORM-3D граничные условия и параметры модели (табл. 4.7) в соответствии с используемой технологией.

Таблица 4.7 - Параметры модели для сортовой прокатки прутков и волочения

Параметр	Значение	
	прокатка	волочение
разрешение сетки	1/5 ширины сечения заготовки	
разрешение хода решателя	1/3 мин. элемента сетки	
материал инструмента	абсолютно жесткий	
материал заготовки	вязко-пластичный	
коэффициент Пуассона	0,3897	
температура, °С	20	
скорость, м/мин	9,7	20
угол волоки, градусов	-	7
коэффициент трения заготовки по инструменту	0,25	0,08
количество элементов	32000	10000

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

$$\sigma_{\text{в}} = 0,1302 \varepsilon_{\Sigma}^2 - 7,7913 \varepsilon_{\Sigma} + 260. \quad (4.2)$$

Для проверки результатов расчета по данной формуле провели экспериментальные исследования и определили физико-механические свойства деформированных полуфабрикатов из опытного сплава №6 палладия при различных степенях суммарного обжатия. В табл. 4.8 представлены расчетные и эксперименталь-

ные значения временного сопротивления и погрешность оценки точности расчетов, которая не превышает 10 %.

Таблица 4.8 – Значения прочностных свойств для сплава №6

Суммарное обжатие ε_{Σ} , %	0	59,2	72,8	76,8	80,6	92	96
Экспериментальные значения временного сопротивления σ_B , МПа	260	278	337	399	470	632	777
Расчетные значения временного сопротивления σ_B , МПа	260	255,1	382,8	429,6	477,8	645,2	728,5
Погрешность, %	0	8,2	2,4	7,7	1,6	2,0	6,2

На рис. 4.7 представлено распределение напряжений (рис. 4.7, а) и критерия разрушения Кокрофта-Латама (рис. 4.7, б), которое позволяет заключить, что металл в конце прокатки обладает достаточным запасом пластичности при его обработке с принятой степенью деформации без использования промежуточных отжигов, при этом значение критерия разрушения не превышает 1.

Расчеты показали также (см. табл. 4.6), что сила прокатки не превышает допустимой для действующего оборудования.

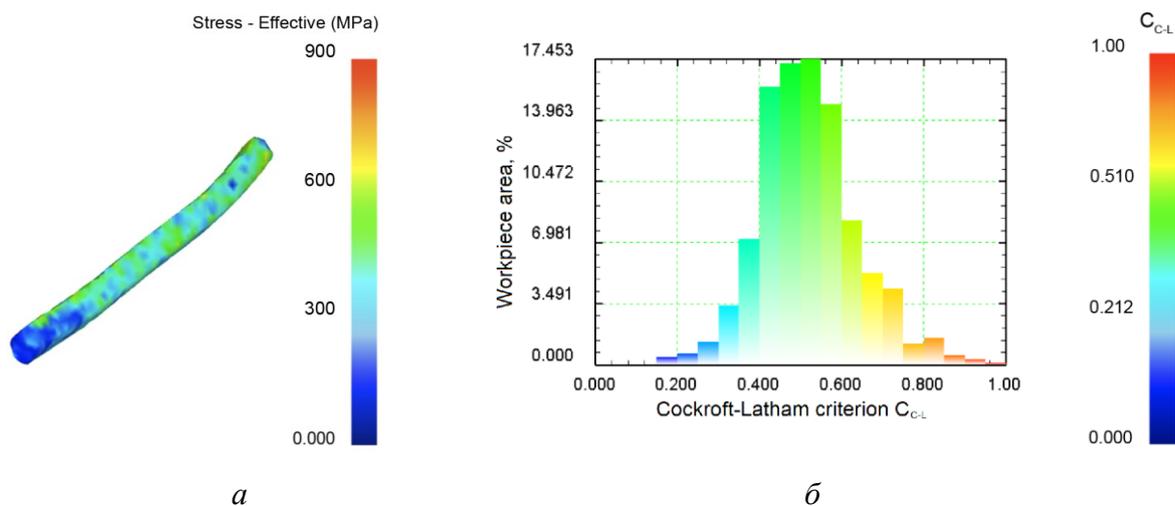


Рисунок 4.7 - Визуализация распределения напряжений (а) и распределения критерия разрушения Кокрофта-Латама по поверхности полуфабриката (б)

На втором этапе прокатки использовали режим обжатий, представленный в табл. 4.9. Результаты моделирования процесса прокатки представлены на рис. 4.8. Анализ напряженного состояния и расчеты силы прокатки для предлагаемых режимов обжатий показали, что загрузка оборудования удовлетворяет допустимым значениям этой величины для применяемых сортов прокатных станов.

Таблица 4.9 - Режим обжатий для второго этапа прокатки прутков из сплава №6

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

* - проход, после которого проводится промежуточный отжиг

С применением разработанной в программе DEFORM-3D компьютерной модели процесса волочения [1] (см. табл. 4.7) проведено его моделирование по предлагаемому режиму обжатий (табл. 4.10), позволившее учесть влияние параметров волочения на напряжения и силовые характеристики процесса (рис. 4.9).

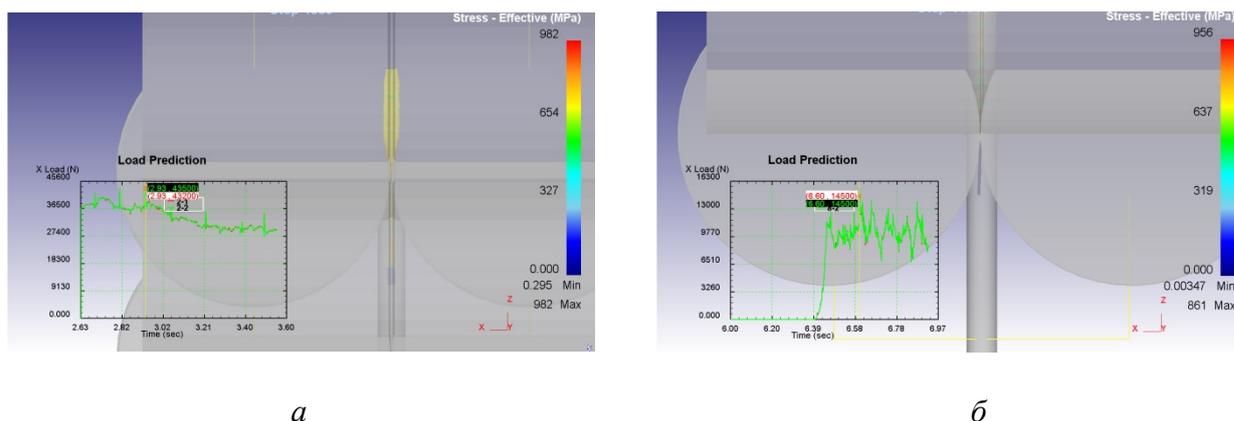


Рисунок 4.8 - Распределение напряжений в очаге деформации и сила прокатки по проходам:
(*a* – первый проход; *б* – последний проход)

Анализ представленных данных показывает, что коэффициент запаса η_B по переходам для получения проволоки диаметром до 0,5 мм составляет 1,69 (см. табл. 4.10), что свидетельствует о высокой стабильности процесса деформации металла при волочении. Величины силы волочения P_B невелики, поэтому силовая загрузка оборудования находится в допустимых пределах.

Таблица 4.10 - Предложенный режим волочения для сплава палладия №6

Номер перехода	Диаметр, мм	$\lambda_{ед.}$	$\varepsilon_{ед.}$, %	ε_{Σ} , %	η_B
1	1,00	1,27	21,5	21,5	1,77
2	0,90	1,23	19,1	36,4	1,50
3	0,80	1,27	21,1	49,8	1,52
4	0,70	1,30	23,3	61,5	1,58
5	0,60	1,36	26,5	71,7	1,58
6	0,50	1,44	30,7	80,4	1,69

Анализ распределения напряжений, полученного путем моделирования (см. рис. 4.9), показывает, что максимальные напряжения наблюдаются в калибрующей зоне волокна и их значения не превышают допустимых значений. Полученное распределение значений критерия Кокрофта-Латама по поверхности заготовки (рис. 4.10) подтвердило достаточно высокий запас пластичности проволоки из сплава №6, при этом критерий разрушения не превышает 0,4.

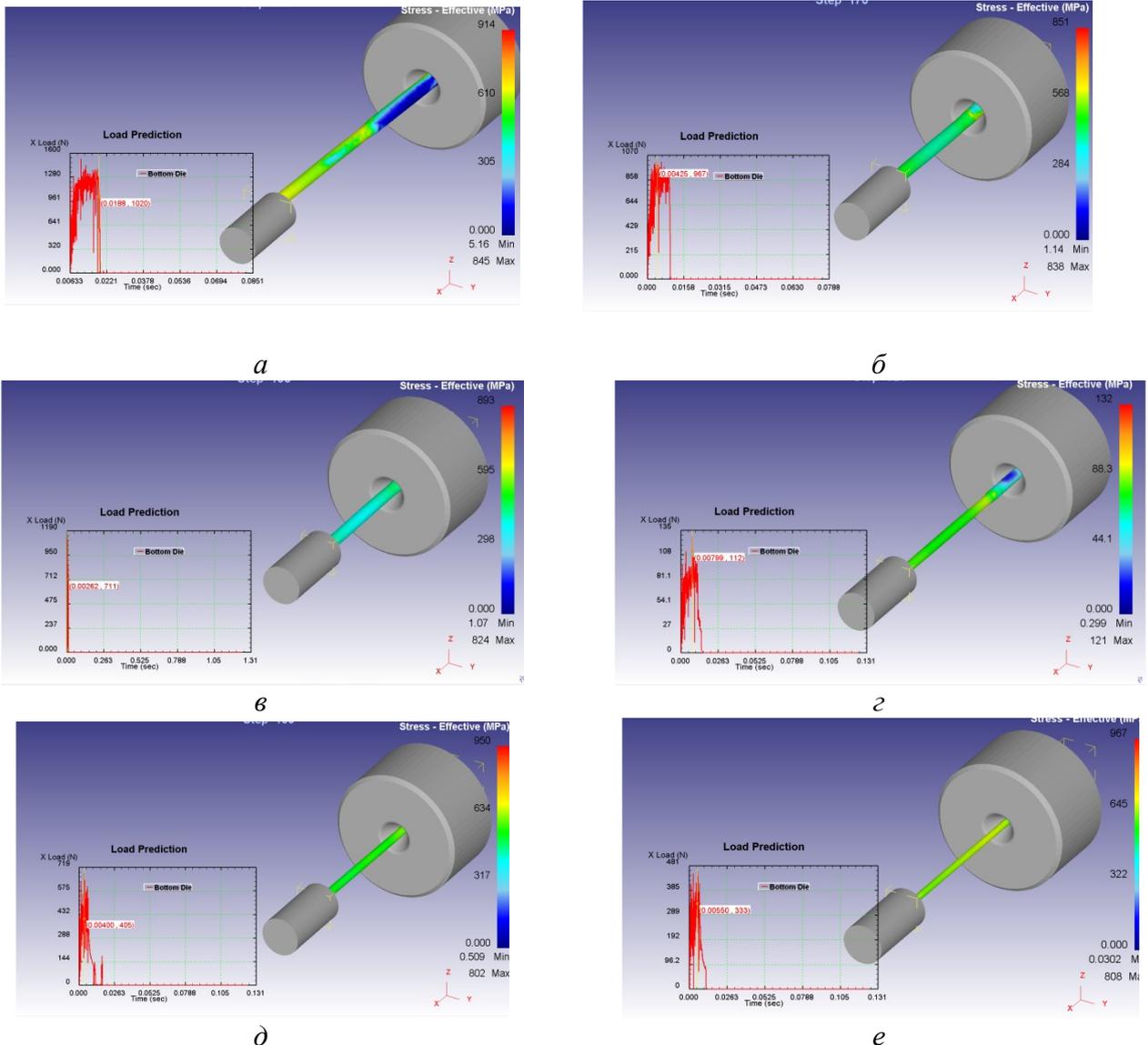


Рисунок 4.9 - Результаты распределения напряжений волочения проволоки из сплава палладия №6: *a* – первый переход; *б* – второй переход; *в* – третий переход; *г* – четвертый переход; *д* – пятый переход; *е* – шестой переход

Результаты моделирования учитывали при выборе параметров технологического процесса и инструмента, а для их проверки были проведены экспериментальные исследования технологии получения литых и деформированных полуфабрикатов из опытных сплавов в лабораторных условиях на прокатных станах AF 200+180R и LG 200, а также волочильном стане 10 NFS TRONIC.

Анализ результатов экспериментальных исследований подтвердил данные моделирования и показал, что для получения из кованой заготовки размером

$x_i = 15$ мм проволоки диаметром 0,5 мм из нового сплава палладия возможно использование предлагаемых режимов обжатий при прокатке и волочении.

Физико-механические свойства определяли на образцах в деформированном и отожженном при температуре 900 °С и выдержке 8 час состояниях, полученных путем прокатки и волочения (табл. 4.11) в лабораторных условиях. Для образцов диаметром 0,5 и 0,7 мм определяли удельное электросопротивление, которое находилось в пределах 20-22 мкОм/см, и микротвердость HV - в диапазоне 296-350 кгс/мм².

Таблица 4.11 - Физико-механические свойства полуфабрикатов из сплава №6

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

Металлографические исследования показали, что для литой заготовки характерно дендритное строение, формируемое при кристаллизации. Компоненты, входящие в состав исследуемого сплава, образуют твердые растворы с неограниченной растворимостью в твердом и жидком состоянии. В связи с этим легирующие элементы при литье и кристаллизации заготовки распределяются неоднородно, формируя дендритную структуру. Для снижения неоднородности литой заготовки проводился отжиг при температуре 900 °С в течение 8 ч, при этом дендритное строение становится менее выраженным и уменьшается размер дендритных ячеек. В структуре полуфабрикатов, полученных при прокатке при небольших степенях деформации, сохраняется дендритное строение. С ее увеличением происходит искажение дендритных кристаллов и их вытягивание в направлении

деформации (рис. 4.11). Изменения, происходящие в структуре (рис. 4.11 *а, б*), приводят к увеличению значений микротвердости (см. табл. 4.11).

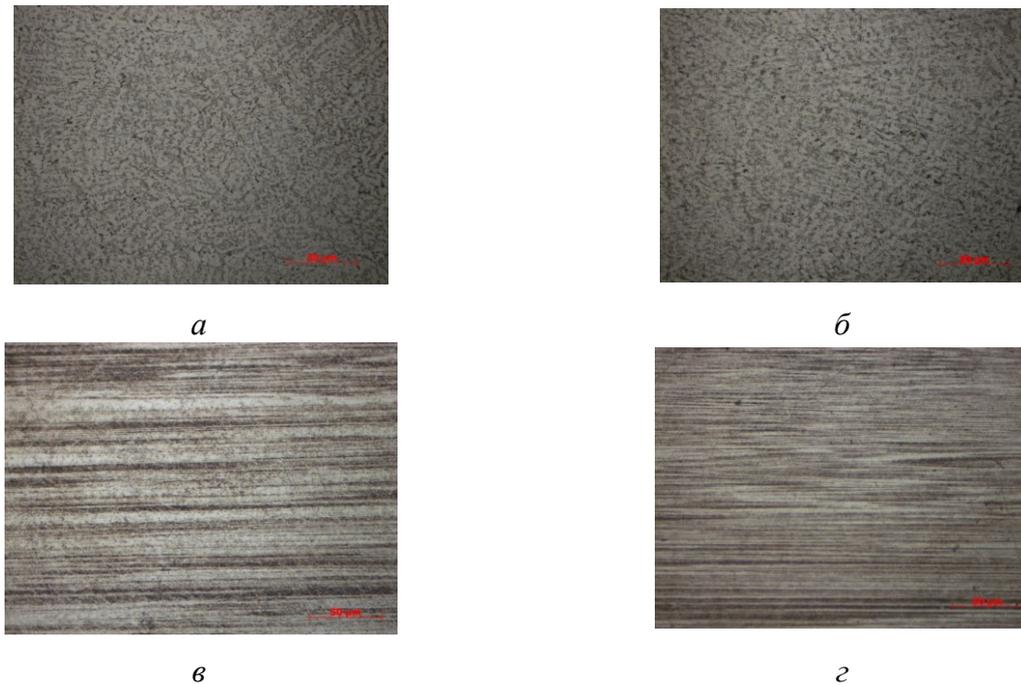
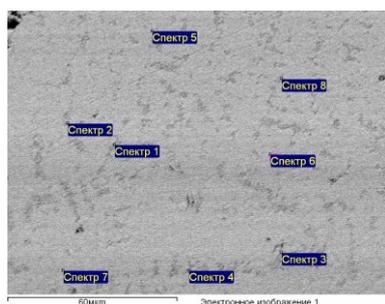


Рисунок 4.11 - Микроструктура прутков и проволоки из исследуемого сплава палладия: *а* – размер $x_i=3,4$ мм; *б* – размер $x_i= 2,2$ мм; *в* - диаметр 0,7 мм; *г* – диаметр 0,5 мм, $\times 500$

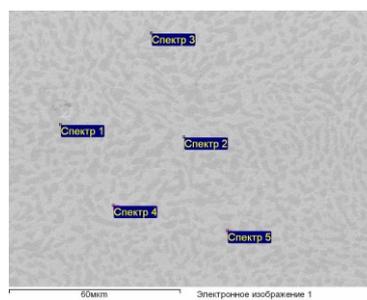
Деформация заготовок волочением на более значительные степени приводит к формированию волокнистого строения в проволоке. С уменьшением диаметра проволоки зерна в структуре становятся более тонкими и вытянутыми (рис. 4.11 *в, г*). Формирование тонкого волокнистого строения проволоки сопровождается деформационным упрочнением сплава и повышением микротвердости до 350 кгс/мм^2 (см. табл. 9).

Микрорентгеноспектральный анализ фаз в структуре исследуемых образцов (рис. 4.12) показал, что в структуре сплава наблюдается неоднородный твердый раствор на основе палладия. В микроструктуре присутствуют светлые и темные участки в различной степени обогащенные медью, серебром, золотом и платиной.



Все результаты в весовых %

Спектр	Cu	Pd	Ag	Au
Спектр 1	35.24	33.82	30.94	0.00
Спектр 2	0.00	35.35	35.22	29.44
Спектр 3	22.15	26.27	29.01	22.57
Спектр 4	17.12	37.51	28.28	17.09
Спектр 5	22.47	38.27	39.26	0.00
Спектр 6	0.00	49.92	50.08	0.00
Спектр 7	46.40	53.60	0.00	0.00
Спектр 8	17.18	26.72	35.04	21.06

a

Все результаты в весовых %

Спектр	Cu	Pd	Ag	Pt	Au
Спектр 1	22.93	35.78	41.29	0.00	0.00
Спектр 2	0.00	34.35	44.89	0.00	20.76
Спектр 3	0.00	80.00	0.00	20.00	0.00
Спектр 4	0.00	0.00	61.80	0.00	38.20
Спектр 5	25.08	55.98	0.00	18.94	0.00

b

Рисунок 4.12 - Микрорентгеноспектральный анализ образцов сплава палладия в литом (*a*) и отожженном (*b*) состояниях

Анализ образца в отожженном состоянии выявил, что неоднородность в распределении легирующих элементов по сечению твердого раствора сохраняется.

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

4.3. Моделирование, исследование и совершенствование технологии производства проволоки технического назначения из сплава палладия ПдН-5

Целью исследований являлся анализ недостатков промышленной технологии производства проволоки из сплава ПдН-5 (сплав №7) и ее совершенствование, а также изучение влияния параметров обработки давлением на структуру и свойства деформированных полуфабрикатов. Достижение поставленной цели проводилось с помощью компьютерного и физического моделирования с использованием производственного оборудования путем решения следующих задач:

- анализ действующих режимов сортовой прокатки и волочения деформированных полуфабрикатов из сплава №7 и разработка новых рациональных режимов обработки;
- компьютерное моделирование технологии сортовой прокатки прутков из сплава №7;
- компьютерное моделирование процесса волочения проволоки из сплава ПдН-5 и усовершенствование технологии ее получения;
- физическое моделирование предлагаемых режимов обработки путем проведения экспериментальных исследований в промышленных условиях;
- промышленное опробование усовершенствованной технологии получения проволоки из сплава №7;
- исследование структуры и свойств деформированных полуфабрикатов из сплава №7;
- подготовка рекомендаций по усовершенствованию технологии получения деформированных полуфабрикатов из сплава №7.

Для изготовления улавливающих сеток из тонкой проволоки диаметром 0,060, 0,075 и 0,090 мм, имеющих тканую структуру, применяют известный сплав палладия с никелем ПдН-5 (сплав №7)[2].

Следует отметить, что механические свойства литых и деформированных полуфабрикатов из сплава №7 плохо изучены. В имеющейся научно-технической

литературе сведения о них очень скудны. Наиболее полной информацией можно считать данные, приведенные в источнике [106]. Анализ научно-технической литературы [38] показал, что оптимальными условиями при отжиге сплава являются параметры: температура отжига 850 °С и время 60 мин, при котором значения для твердости ($HV = 89,94$), временное сопротивление ($\sigma_b = 308$ МПа) и предел текучести ($\sigma_{0,2} = 134$ МПа) достигались при максимальном относительном удлинении ($\delta = 49$ %), при этом образцы подвергались сортовой прокатке прутка от размера поперечного сечения 200x120 мм до 1,7x1,7мм.

При изготовлении длинномерных деформированных полуфабрикатов из этого сплава вследствие неправильного распределения степеней деформации (вытяжек) по переходам и упрочнения металла возникают значительные растягивающие напряжения, которые могут привести к обрывам. Особенно данная проблема характерна для тонкого волочения проволоки диаметром до 0,075 мм. Это приводит к появлению брака, вследствие чего снижается производительность и выход годного металла, увеличивается срок изготовления улавливающих сеток.

Для получения проволоки в промышленных условиях применяют операции литья, обработки давлением и термообработки с использованием имеющегося оборудования (рис. 4.13).

Для плавки легирующих компонентов использовали вакуумную индукционную установку, которая предназначена для нагрева до заданной температуры и плавки металлов, помещаемых в тигель из диоксида циркония размерами 140x155 мм. На воздухе палладий устойчив до температуры 300-350 °С, после чего начинает окисляться кислородом, образуя на поверхности тусклую пленку оксида палладия. Поэтому для создания инертной и защитной атмосферы в печи использовали аргон. Для палладиевого сплава, содержащего 5 % никеля, оптимальной температурой считается 1520-1560 °С, которая обеспечивает необходимые свойства полученного прутка. Имеющаяся технология изготовления длинномерных полуфабрикатов из сплава №7 была усовершенствована на стадии литья научными сотрудниками ОАО «Красцветмет» [50].

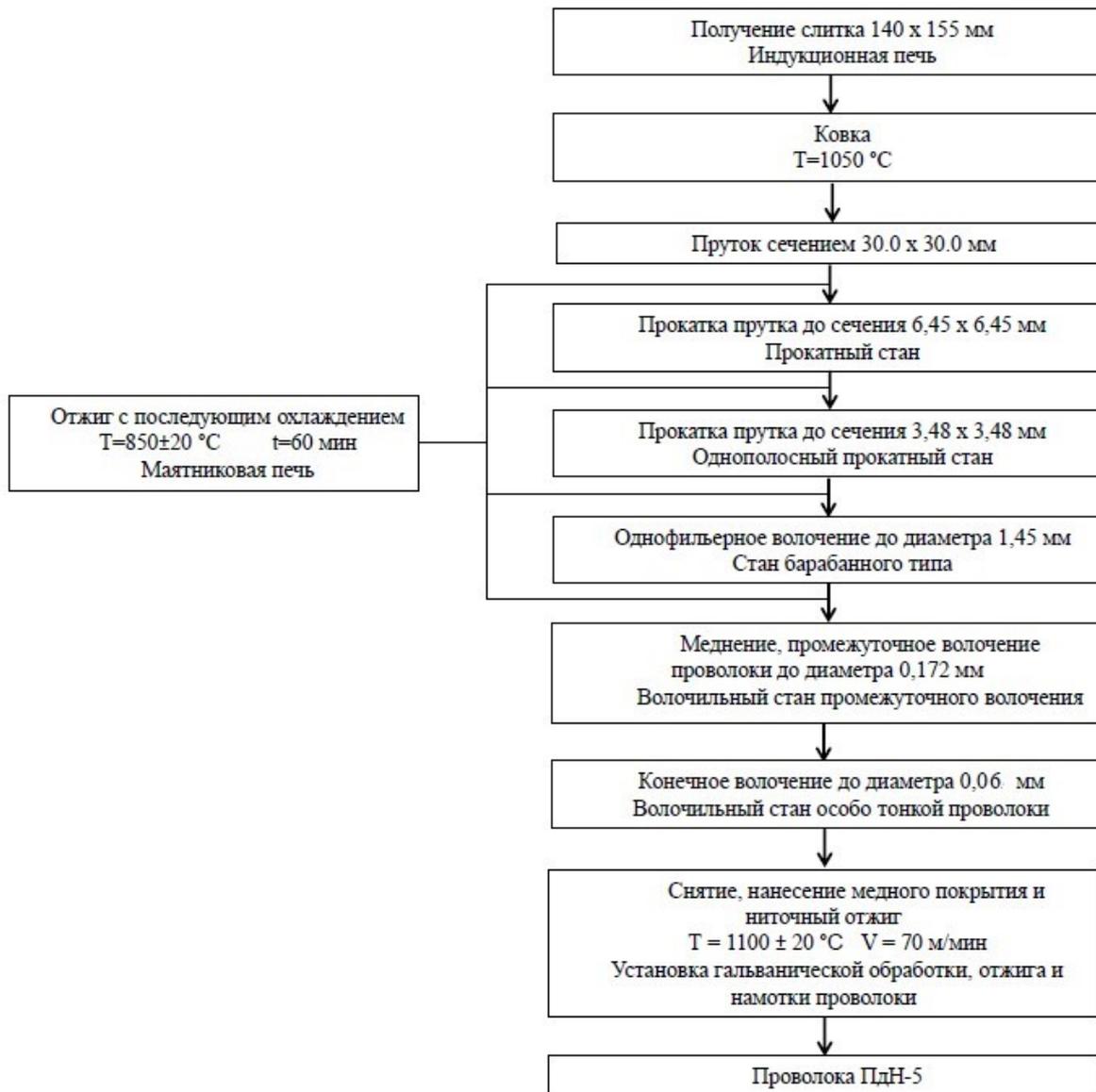


Рис. 4.13. Технологическая схема изготовления проволоки из сплава №7

Далее нагретый в индукционной печи в течение пяти минут до температуры 1050 °C слиток подвергли протяжке с кантовками на 90 градусов (ковке) до получения прутка с размерами 30x30 мм.

Для производства тонкой проволоки диаметром до 0,060 мм использовали сортовую прокатку и волочение металла в холодном состоянии. При этом полученные прутки с размерами поперечного сечения 30x30 мм подвергали холодной прокатке на сортовом прокатном стане с диаметром валков 210 мм до размеров поперечного сечения 14,5x14,5 мм. Последующую прокатку прутка сортовом прокатном стане с диаметром валков 130 мм проводили в два этапа до размера

6,45x6,45 мм, а затем до размера 3,48x3,48 мм. В качестве операции термообработки сортового проката применяли рекристаллизационный отжиг для снятия упрочнения деформированных заготовок, который осуществляли в электропечах с защитно-восстановительной средой с охлаждением в воду. Для операции отжига проволоки использовали проходные четырехкамерные печи сопротивления. Такие печи обеспечивали одновременный отжиг до четырех катушек с проволокой, что повышает выход годного продукции и обеспечивает наиболее тонкую регулировку цикла нагрева и охлаждения по всему сечению заготовок. Отжиг бунтов и прутков квадратного сечения 30x30 мм, 6,45x6,45 мм, 3,48x3,48 мм из сплава №7 производили в маятниковой печи с гидравлическим подъемником и закалочной ванной с последующим охлаждением в воду при температуре отжига не более 1300 °С.

В качестве типового оборудования для волочения проволоки диаметром до 1,75 мм применяли однократный волочильный стан барабанного типа. Далее проводили омеднение и последующее волочение проволоки до диаметра 0,172 мм на стане многократного волочения. Для волочения проволоки на окончательный размер (0,060-0,075 мм) использовали многократный волочильный стан для особо тонкой проволоки. Процесс волочения проволоки из сплава №7 до диаметра 0,075 мм осуществляли за 13 переходов. Для снятия медного покрытия и ниточного отжига использовали специальную установку, а отжиг проволоки в четырехканальной печи осуществляли при температуре 1150 °С и скорости 60 м/мин.

Анализ параметров сортовой прокатки (табл. 4.12) показал неравномерный характер изменения коэффициента вытяжки при прокатке на стане 1 (рис. 4.14).

В результате анализа режимов обработки заготовок из сплава ПдН-5, обладающих повышенным комплексом механических свойств, установлено, что неравномерный характер распределения коэффициентов деформации на первых двух этапах прокатки приводит к вероятности получения брака. Быстрое упрочнение металла при холодной деформации может еще более усугубить условия обработки и привести к появлению обрывов при прокатке.

Таблица 4.12 - Параметры сортовой прокатки прутков из сплава №7

Номер прохода i	Размер стороны x_i , мм	$\lambda_{ед}$	λ_{Σ}	$\varepsilon_{ед}$, %	ε_{Σ} , %	$P_{п}$, кН
Прокатный стан 1						
	30,0					
1	28,9	1,08	1,08	8,77	8,77	309,5
2	26,9	1,16	1,24	14,20	21,73	288,2
3	24,8	1,17	1,46	13,26	32,10	293,0
4	21,4	1,35	1,97	26,16	49,86	271,6
5	20,0	1,13	2,23	11,26	55,51	272,0
6	18,8	1,14	2,55	13,89	61,69	258,1
7	17,0	1,22	3,10	16,50	68,01	233,9
8	16,6	1,05	3,25	6,41	70,06	231,2
9	14,5	1,31	4,25	21,95	76,63	197,2
Прокатный стан 2						
1	13,3	1,19	1,19	18,74	80,91	153,4
2	12,4	1,15	1,37	12,61	83,32	164,2
3	11,5	1,16	1,59	12,49	85,40	149,6
4	10,5	1,20	1,91	17,74	87,99	133,5
5	9,9	1,12	2,14	9,95	89,19	124,0
6	9,1	1,18	2,54	16,69	90,99	111,4
7	8,5	1,15	2,81	11,49	92,03	102,1
8	7,9	1,16	3,37	15,03	93,23	93,0
9	7,5	1,12	3,74	9,30	93,86	86,5
10	7,0	1,14	4,29	12,05	94,60	79,6
11	6,45	1,18	5,05	14,89	95,40	71,6
Прокатный стан 3						
1	5,95	1,18	1,18	17,17	96,07	42,7
2	5,51	1,17	1,37	13,88	96,63	40,7
3	5,11	1,16	1,59	12,62	97,10	40,6
4	4,73	1,17	1,86	15,66	97,51	39,6
5	4,38	1,17	2,17	12,89	97,87	37,9
6	4,06	1,16	2,52	15,45	98,17	35,8
7	3,76	1,17	2,94	12,85	98,43	33,4
8	3,48	1,17	3,44	14,87	98,65	30,9

В связи с этим предлагается усовершенствовать существующий технологический процесс сортовой прокатки прутков на первых двух станах для промышленных условий ОАО «Красцветмет». Для этого с помощью программного обеспечения PROVOL [131] рассчитаны рациональные технологические режимы деформации металла (табл. 4.13). При этом учитывались геометрические параметры очага деформации при прокатке и особенности оборудования.

Анализ предлагаемых режимов прокатки показывает, что новое распределение единичных вытяжек по проходам дает возможность существенно снизить неравномерность деформации, опасность получения брака, при этом сила прокатки не превышает допустимых значений.

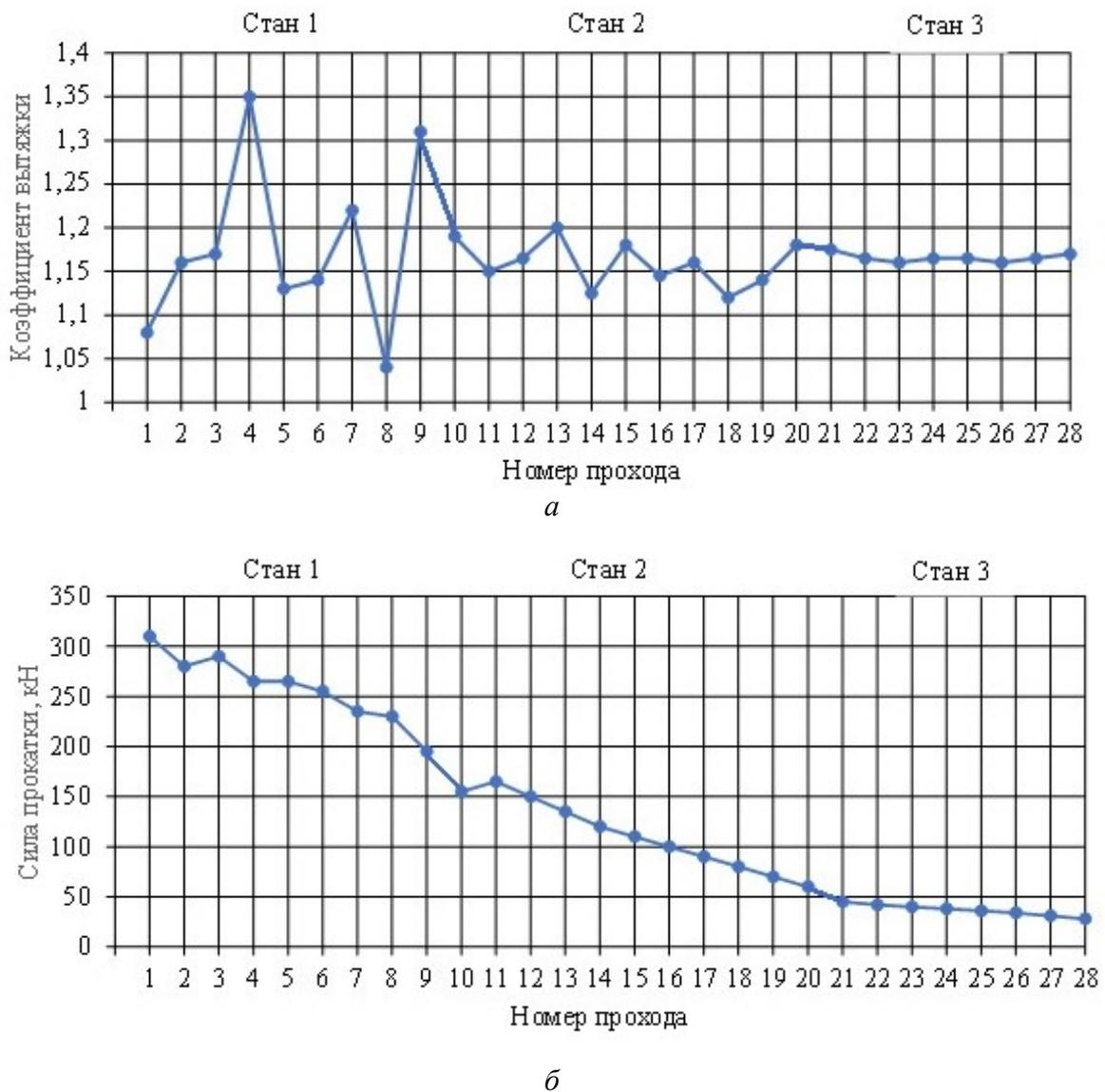


Рисунок 4.14 - Изменение коэффициента вытяжки $\lambda_{ед}$ (а) и силы прокатки $P_{пр}$ (б) по проходам

Таблица 4.13 -Предлагаемый режим сортовой прокатки прутков из сплава №7
на станах 1 и 2

Номер прохода, i	Размер стороны x_i , мм	$\lambda_{ед}$	λ_{Σ}	$\varepsilon_{ед}$, %	ε_{Σ} , %	$P_{пр}$, кН
Прокатный стан 1						
	30,0					
1	28,1	1,17	1,17	12,26	12,26	320,7
2	26,2	1,15	1,34	12,88	25,27	293,7
3	24,4	1,14	1,53	12,42	34,55	294,2
4	22,4	1,20	1,84	16,88	45,60	286,7
5	20,6	1,16	2,14	14,04	53,24	275,1
6	18,8	1,21	2,60	17,68	61,51	256,4
7	17,1	1,19	3,08	16,12	67,71	235,1
8	15,6	1,21	3,65	17,44	73,34	213,8
9	14,5	1,16	4,28	12,41	76,63	198,2
Прокатный стан 2						
1	13,5	1,15	1,15	13,74	79,86	201,6
2	12,4	1,20	1,36	16,94	83,27	164,0
3	11,4	1,16	1,62	14,09	85,63	148,1
4	10,5	1,20	1,91	16,57	88,01	133,5
5	9,7	1,15	2,23	13,38	89,61	120,8
6	9,0	1,18	2,60	15,31	91,20	109,8
7	8,4	1,14	2,98	12,51	92,31	99,8
8	7,8	1,18	3,45	15,25	93,48	90,7
9	7,2	1,12	4,06	11,10	94,20	83,3
10	6,8	1,14	4,55	12,02	94,90	76,7
11	6,45	1,11	5,05	10,13	95,40	71,6

Для получения проволоки на последнем этапе обработки деформированных полуфабрикатов используют волочение, которое проводят в три этапа. На первом этапе осуществляют волочение с диаметра 3,82 мм до диаметра 1,45 мм. На втором этапе – волочение с диаметра 1,45 мм до диаметра 0,172 мм. Далее проволока подвергается омеднению и на третьем этапе проводят волочение с диаметра 0,172 мм до диаметра 0,060–0,075 мм.

Результаты расчетов деформационных и силовых параметров волочения действующего режима по приведенной выше методике представлены в табл. 4.14–4.16. Анализ этих режимов (рис. 4.15–4.17) показал, что характер распределения коэффициентов вытяжки по переходам имеет скачкообразный характер на первом

и третьем этапах, что приводит к неравномерности деформации и возможности обрыва проволоки на этих этапах.

Таблица 4.14 - Расчетные характеристики процесса волочения проволоки из сплава №7 в промышленных условиях для действующего режима обработки на стане № 1

Номер перехода	Диаметр, мм	$\lambda_{ед.}$	λ_{Σ}	$\varepsilon_{ед.}, \%$	$\varepsilon_{\Sigma}, \%$	$\eta_{в}$	$P_{в}, Н$
	3,82						
1	3,53	1,17	1,17	14,6	14,61	2,84	1035,4
2	3,16	1,25	1,46	19,9	31,57	2,00	1263,4
3	2,82	1,26	1,83	20,4	45,5	1,93	1286,6
4	2,53	1,24	2,28	19,5	56,14	2,07	1044,3
5	2,26	1,25	2,86	20,2	65	2,00	964,2
6	2,02	1,25	3,58	20,1	72,04	1,93	848,3
7	1,81	1,25	4,45	19,7	77,55	1,93	733,9
8	1,61	1,26	5,63	20,9	82,24	1,90	627,8
9	1,45	1,23	6,94	18,9	85,59	2,13	487,5

Анализ изменения силы волочения показывает, что из-за неравномерного распределения коэффициента вытяжки на первом этапе обработки наблюдается ее рост, что еще раз подчеркивает тот факт, что режимы деформации выбраны нерационально. Коэффициент запаса минимален также на первом этапе волочения, а его величина превышает значение 2.

На основе проведенного анализа деформационных режимов обработки сплава №7 предлагается изменить коэффициенты вытяжки, режимы обжатий и количество переходов по сравнению с действующим режимом (табл. 4.16).

Таблица 4.15- Расчетные характеристики процесса волочения проволоки из сплава №7 в промышленных условиях для действующего режима обработки на стане №2

Номер перехода	Диаметр, мм	$\lambda_{ед.}$	λ_{Σ}	$\epsilon_{ед.}, \%$	$\epsilon_{\Sigma}, \%$	$\eta_{в}$	$P_{в}, Н$
	1,45						
1	1,310	1,23	1,23	18,4	18,38	2,55	219,2
2	1,184	1,22	1,50	18,3	33,32	2,46	214,0
3	1,069	1,23	1,84	18,5	45,65	2,38	198,0
4	0,966	1,22	2,25	18,3	55,62	2,35	173,9
5	0,873	1,22	2,76	18,3	63,75	2,33	149,5
6	0,788	1,23	3,39	18,5	70,47	2,29	127,1
7	0,712	1,22	4,15	18,4	75,89	2,30	105,3
8	0,643	1,23	5,09	18,4	80,34	2,28	87,4
9	0,581	1,22	6,23	18,4	83,94	2,28	71,7
10	0,525	1,22	7,63	18,3	86,89	2,28	58,9
11	0,474	1,23	9,36	18,5	89,31	2,27	48,4
12	0,429	1,22	11,42	18,1	91,25	2,30	39,1
13	0,387	1,23	14,04	18,6	92,88	2,25	32,6
14	0,350	1,22	17,16	18,2	94,17	2,29	26,2
15	0,316	1,23	21,06	18,5	95,25	2,26	21,6
16	0,286	1,22	25,70	18,1	96,11	2,30	17,4
17	0,258	1,23	31,59	18,6	96,83	2,25	14,5
18	0,233	1,23	38,73	18,4	97,42	2,27	11,7
19	0,211	1,22	47,22	18,0	97,88	2,31	9,4
20	0,190	1,23	58,24	18,9	98,28	2,22	7,9
21	0,172	1,22	71,07	18,0	98,59	2,30	6,3

Таблица 4.16 - Расчетные характеристики процесса волочения проволоки из сплава №7 в промышленных условиях для действующего режима обработки на стане №3

Номер перехода	Диаметр, мм	$\lambda_{ед.}$	λ_{Σ}	$\varepsilon_{ед.}, \%$	$\varepsilon_{\Sigma}, \%$	$\eta_{в}$	$P_{в}, Н$
1	0,169	1,04	1,04	3,5	98,64	5,23	2,7
2	0,159	1,13	1,17	11,5	98,80	3,15	3,9
3	0,149	1,14	1,33	12,2	98,94	3,03	3,6
4	0,140	1,13	1,51	11,7	99,07	3,11	3,1
5	0,131	1,14	1,72	12,4	99,18	2,99	2,8
6	0,123	1,13	1,95	11,8	99,28	3,09	2,4
7	0,115	1,14	2,24	12,6	99,37	2,97	2,2
8	0,108	1,13	2,54	11,8	99,45	3,09	1,8
9	0,102	1,12	2,84	10,8	99,51	3,26	1,6
10	0,096	1,13	3,21	11,4	99,56	3,16	1,4
11	0,090	1,14	3,65	12,1	99,61	3,05	1,3
12	0,084	1,15	4,19	12,9	99,66	2,93	1,2
13	0,075	1,25	5,26	20,3	99,73	2,10	1,3

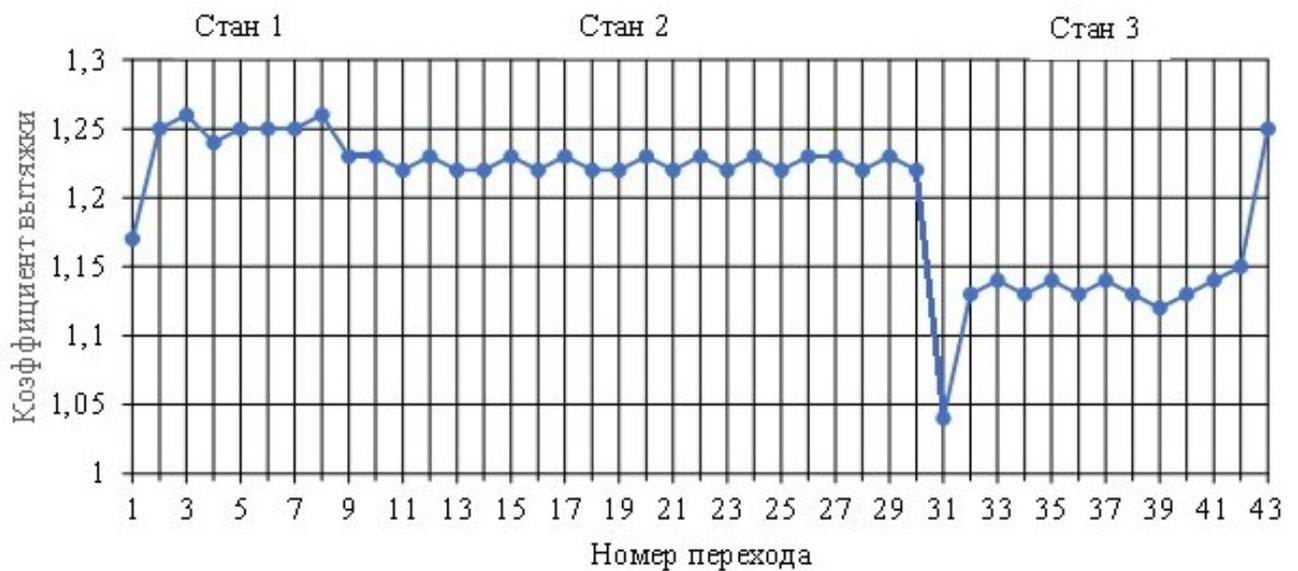


Рисунок 4.15 - Значения единичного коэффициента вытяжки $\lambda_{ед.}$ для действующего режима волочения проволоки из сплава №7

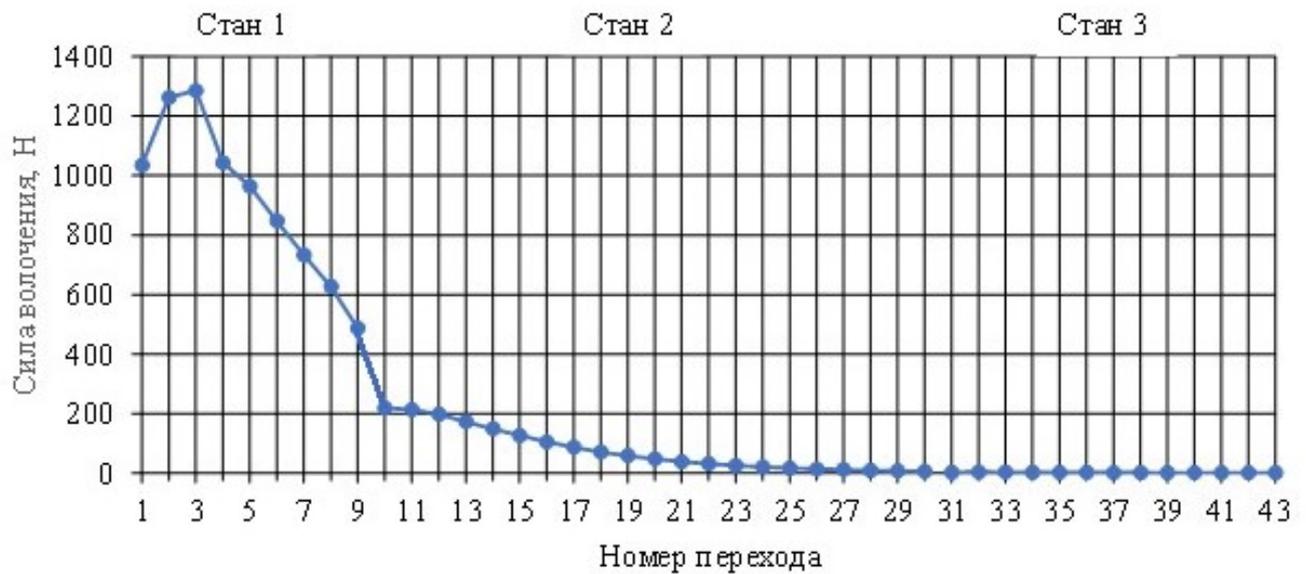


Рисунок 4.16 - Значения силы волочения P_v по переходам для действующего режима волочения проволоки из сплава №7

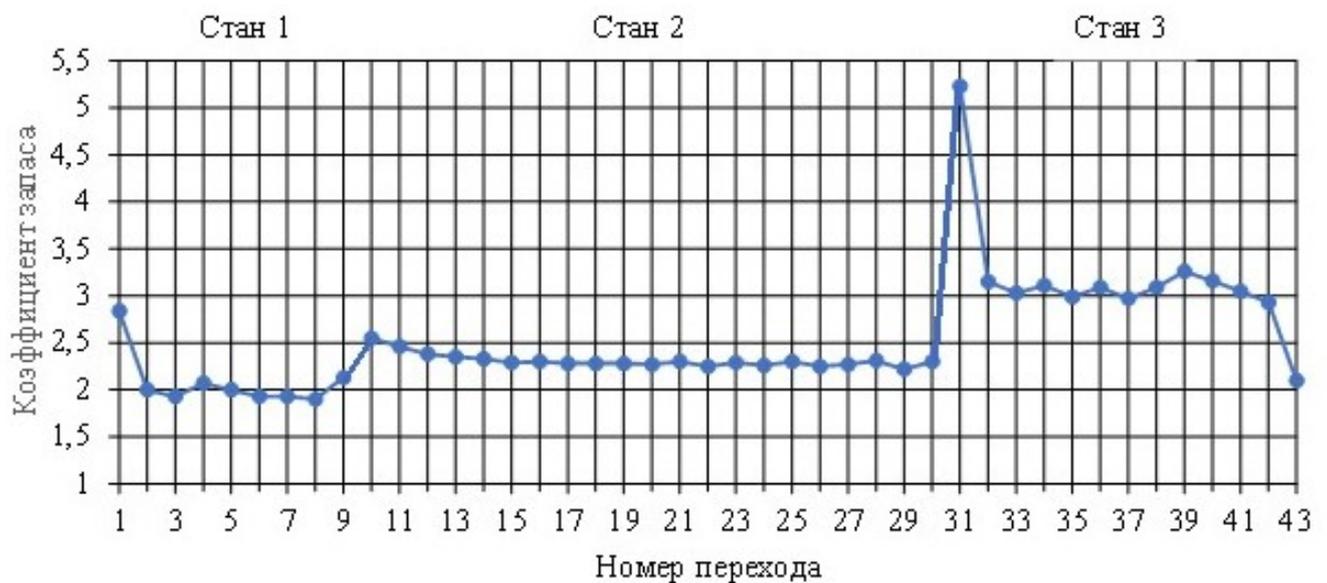


Рисунок 4.17 - Значения коэффициента запаса η_v по переходам для действующего режима волочения проволоки из сплава №7

Предложено усовершенствовать режим обжатий путем перераспределения вытяжек на первом этапе волочения, добавив два дополнительных перехода (табл. 4.17). В этом случае при волочении на втором и третьем волочильных станах уменьшится суммарная степень деформации, что приведет к снижению вероятности обрывов проволоки. Рациональность данного метода также заключается в том, что не нужно менять имеющийся волочильный инструмент.

Разработанные режимы волочения характеризуются более равномерным распределением деформационных характеристик (рис. 4.18), что положительно сказывается на реализации технологического процесса волочения проволоки малых диаметров. Так как коэффициенты запаса по сравнению с режимами действующей технологии увеличились (рис. 4.19), можно ожидать, что процесс волочения проволоки будет стабильным и без обрывов.

Таблица 4.17 - Предлагаемый режим волочения проволоки из сплава №7

Номер перехода	Диаметр, мм	$\lambda_{ед.}$	λ_{Σ}	$\varepsilon_{ед.}, \%$	$\varepsilon_{\Sigma}, \%$	$\eta_{в}$	$P_{в}, Н$
Стан 1							
1	3,46	1,22	1,22	17,96	17,96	2,25	1254,2
2	3,13	1,22	1,49	18,17	32,86	2,22	1113,6
3	2,82	1,23	1,83	18,83	45,50	2,14	1161,2
4	2,53	1,24	2,28	19,51	56,14	2,05	1053,6
5	2,26	1,25	2,86	20,20	65,00	1,98	975,3
6	2,02	1,25	3,58	20,11	72,04	1,92	853,6
7	1,81	1,25	4,45	19,71	77,55	1,96	722,0
8	1,62	1,25	5,56	19,89	82,02	1,98	610,0
9	1,45	1,25	6,94	19,89	85,59	1,99	522,2
10	1,31	1,23	8,50	18,38	88,24	2,20	397,8
11	1,184	1,22	10,41	18,31	90,39	2,20	350,2
Стан 2							
12	1,069	1,23	1,23	18,48	18,48	2,38	198
13	0,966	1,22	1,50	18,34	33,43	2,35	173,9
14	0,873	1,22	1,84	18,33	45,63	2,33	149,5
15	0,788	1,23	2,26	18,53	55,71	2,29	127,1
16	0,712	1,22	2,77	18,36	63,84	2,30	105,3
17	0,643	1,23	3,39	18,44	70,51	2,28	87,4
18	0,581	1,22	4,15	18,35	75,92	2,28	71,7
19	0,525	1,22	5,09	18,35	80,34	2,28	58,9
20	0,474	1,23	6,24	18,48	83,97	2,27	48,4
21	0,429	1,22	7,62	18,09	86,87	2,30	39,1
22	0,387	1,23	9,36	18,62	89,32	2,25	32,6
23	0,35	1,22	11,44	18,21	91,26	2,29	26,2
24	0,316	1,23	14,04	18,48	92,88	2,26	21,6
25	0,286	1,22	17,14	18,09	94,17	2,30	17,4
26	0,258	1,23	21,06	18,62	95,25	2,25	14,5
27	0,233	1,23	25,82	18,44	96,13	2,27	11,7
28	0,211	1,22	31,49	17,99	96,82	2,31	9,4
29	0,19	1,23	38,83	18,91	97,42	2,22	7,9
30	0,172	1,22	47,39	18,05	97,89	2,30	6,3



Рисунок 4.18 - Изменение единичного коэффициента вытяжки $\lambda_{ед.}$ по предлагаемому режиму волочения проволоки из сплава №7

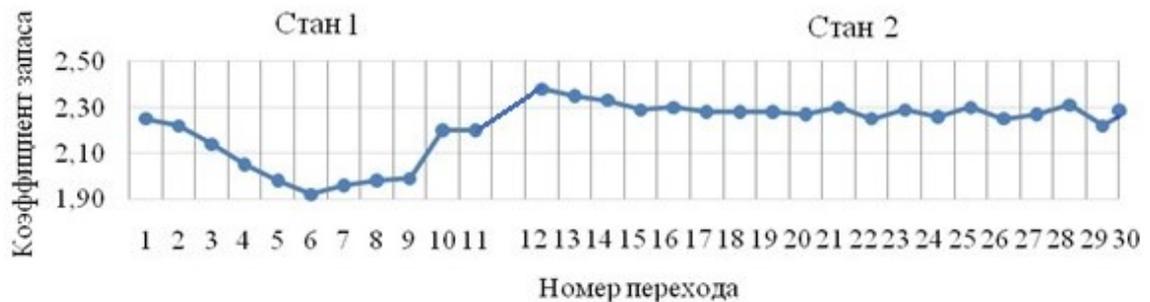


Рисунок 4.19 - Изменение коэффициента запаса η_v по предлагаемому режиму волочения проволоки из сплава №7

Для более подробного изучения влияния предлагаемых режимов обработки были проведены экспериментальные исследования и компьютерное моделирование процессов сортовой прокатки и волочения с использованием программного комплекса DEFORM-3D.

Объектом исследований была технология получения в промышленных условиях проволоки технического назначения диаметром до 0,060 мм из сплава ПдН-5 (см. табл. 2.6), которая включает операции литья, сортовой прокатки, волочения и термообработки.

Исходными материалами для приготовления сплава №7 служили палладий марки ПдА-1 по ГОСТ Р52244-2004 и никель марки Н0 по ГОСТ 849-2018. Для плавки легирующих компонентов использовали вакуумную индукционную уста-

новку с тиглем из диоксида циркония, в которой для создания инертной и защитной атмосферы применяли аргон. Температура литья составляла 1520-1560 °С. Полученный слиток имел размеры 140×155×200 мм. После литья, нагретый в индукционной печи до температуры 1050 °С слиток, протягивали на пневматическом молоте с кантовками на 90 градусов до получения прутка квадратного сечения с размером стороны 30 мм. После ковки прутки последовательно подвергали холодной прокатке на трех прокатных станах:

- сортопрокатном стане с диаметром валков 130 мм и допустимой силой прокатки 620 кН (стан 1);
- сортопрокатном стане с диаметром валков 110 мм и допустимой силой прокатки 500 кН (стан 2);
- непрерывном сортопрокатном стане с диаметром валков 130 мм и допустимой силой прокатки 500 кН (стан 3).

Все станы имели систему калибров «ромб-квадрат».

На станах 1 и 2 прокатку вели последовательным перемещением заготовки по калибрам, а на стане 3 процесс прокатки осуществляли в непрерывном режиме.

Отжиг прутков и катанки проводили в электропечи с гидравлическим подъемником и закалочной ванной с последующим охлаждением в воду.

После отжига для получения проволоки прутки подвергали волочению на трех промышленных волочильных станах барабанного типа. Перед волочением на втором стане выполняли меднение ее поверхности.

Для операции отжига проволоки после волочения использовали проходные четырехкамерные печи сопротивления. Такие печи позволяют проводить одновременный отжиг до четырех катушек с проволокой, что повышает производительность процесса и обеспечивает наиболее тонкую регулировку цикла нагрева и охлаждения по всему сечению заготовок.

Для снятия медного покрытия и одностороннего отжига использовали установку, включающую операции гальванической обработки, отжига и намотки проволоки.

В качестве основных операций и параметров технологического процесса получения проволоки диаметром до 0,075 мм из сплава №7 выделим следующие:

- литье заготовки проводилось при температуре 1540 ± 20 °С в защитной атмосфере аргона;
- ковка осуществлялась при температуре нагрева заготовки 1050 °С с суммарной степенью деформации 96%;
- холодная сортовая прокатка осуществлялась в три этапа со степенями деформации 78,2%; 96,5 %; 76,7 %; соответственно
- холодное волочение осуществлялось в три этапа со степенями деформации 86,3 %, 97,7%; 79,2 % соответственно;
- ниточный отжиг готовой проволоки проводился при температуре 1150 °С и скорости намотки 70 м/мин с последующим охлаждением до температуры 20 °С в четырехкамерной печи.

Для определения механических свойств образцов литых и деформированных полуфабрикатов, полученных на разных этапах обработки, использовали универсальную машину LFM 400 kN (см. табл. 2.9). Испытания проволоки на разрыв проводили на универсальной машине Inspect Table с усилием 5 кН (Германия). На одну экспериментальную точку испытаниям подвергали не менее трех образцов. Результаты испытаний подвергали стандартной статистической обработке.

Помимо получения данных по механическим свойствам полуфабрикатов из сплава ПдН-5 по заказу предприятия решалась задача определения влияния степени чистоты исходного материала на механические свойства прутков и проволоки. Поэтому для экспериментальных исследований была подготовлена шихта, в которой варьировалось количество лома, при этом степень чистоты исходных материалов γ определялась следующим образом:

- $\gamma = 0$ % принималось при отсутствии в шихте лома (высокая степень чистоты);
- $\gamma = 25$ % при содержании лома в шихте 25 %;
- $\gamma = 50$ % при содержании лома в шихте 50 % (низкая степень чистоты).

Исследования проводили с использованием заводской технологической схемы получения проволоки. Исходным сырьем служила шихта с различной степенью чистоты. Результаты испытаний для литых и кованных образцов приведены в табл. 4.18.

Таблица 4.18

Механические свойства литых и кованных полуфабрикатов из сплава №7

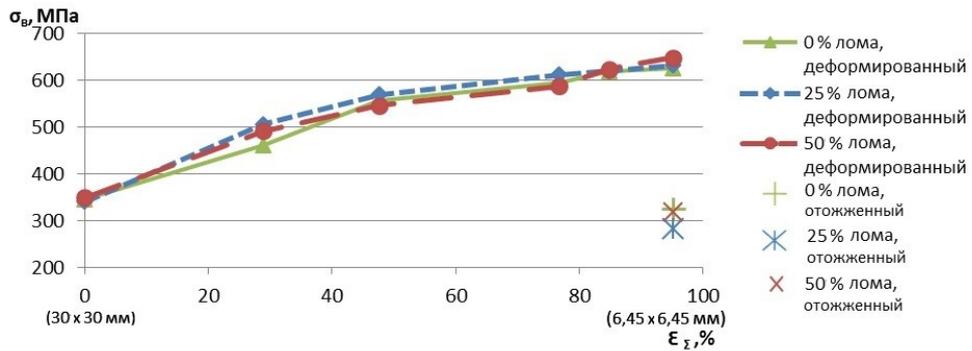
Состояние	Временное сопротивление σ_b , МПа			Относительное удлинение δ , %		
	Степень чистоты γ , %					
	0	25	50	0	25	50
Литое	324	321	335	11,3	10,3	11,1
Кованое	356	340	354	12,0	10,9	11,2

На рис. 4.20–4.23 приведены данные по механическим свойствам прутков после сортовой прокатки с размерами от 30 x 30 мм до 6,45 x 6,45 мм и проволоки после волочения с размерами от 3,5 x 3,5 мм до диаметра 0,0175 мм в деформированном и отожженном состояниях.

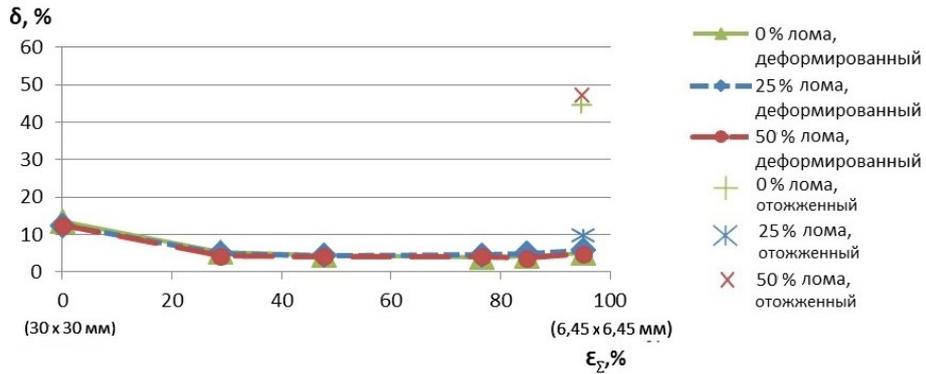
Зеренная структура образцов, полученных из слитков со степенью чистоты 0 %, 25%, 50 %, подобна и имеет дендритный характер (табл. 4.19).

По сечению литых кристаллов неравновесной формы проявляется химическая неоднородность в виде областей различной травимости. На формирование зеренной структуры и процессы рекристаллизации при ковке полуфабрикатов оказывает влияние температураковки. В прутках, полученных из первичного сырья, сформирована микроструктура с наименьшим размером зерна.

Для исследования структуры слитка были вырезаны образцы с края и из центра слитка. Микроструктура подготовленных для анализа шлифов приведена в табл. 4.19.

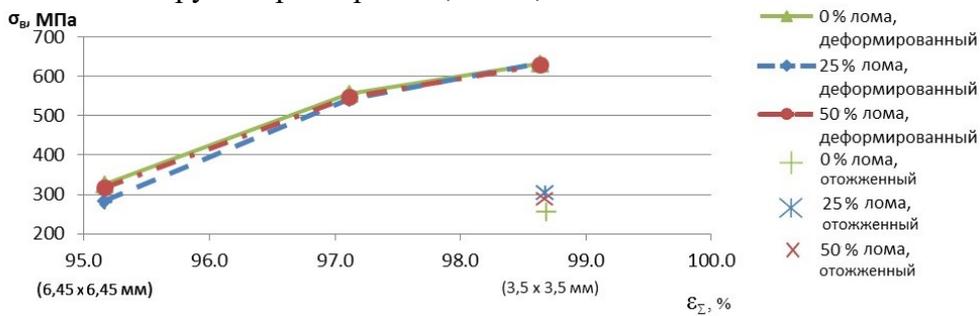


a

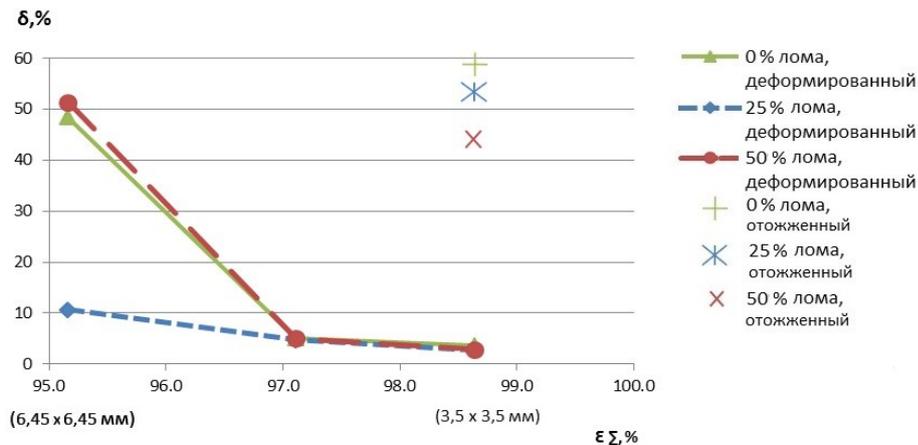


б

Рисунок 4.20 - Зависимости временного сопротивления σ_v (a) и относительного удлинения δ (б) металла от суммарной степени деформации и степени чистоты при сортовой прокатке прутков размерами 6,45 x 6,45 мм из сплава №7



a



б

Рисунок 4.21 - Зависимости временного сопротивления σ_v (a) и относительного удлинения δ (б) металла от суммарной степени деформации и степени чистоты при сортовой прокатке прутков размерами 3,48 x 3,48 мм из сплава №7

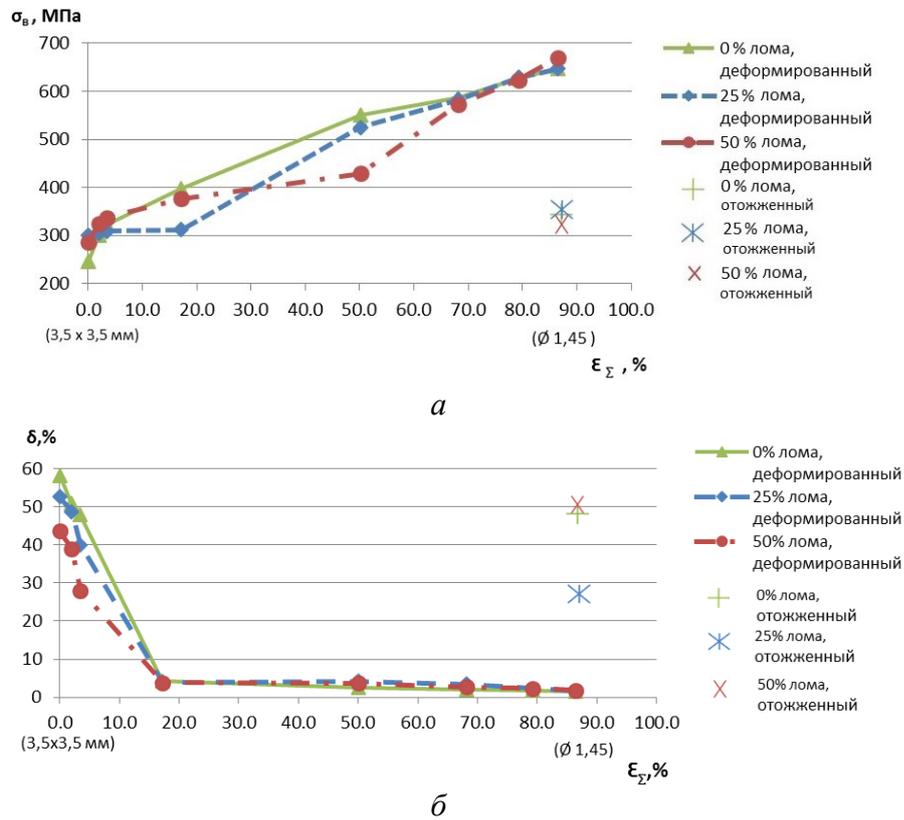


Рисунок 4.22 - Зависимости временного сопротивления σ_b (а) и относительного удлинения δ (б) металла от суммарной степени деформации и степени чистоты при волочении проволоки диаметром 1,45 мм из сплава №7

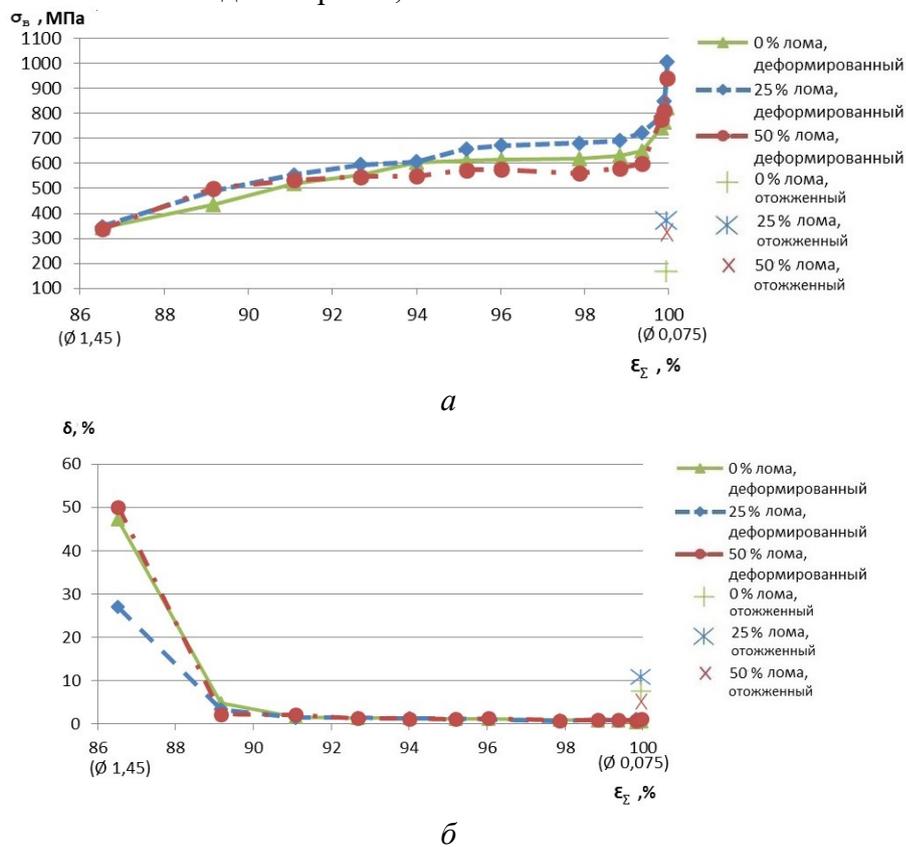
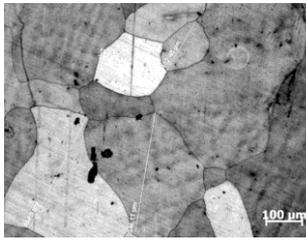
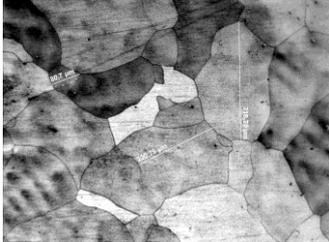
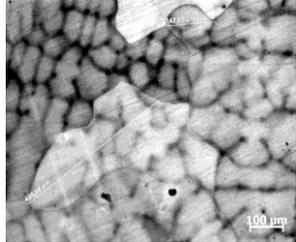
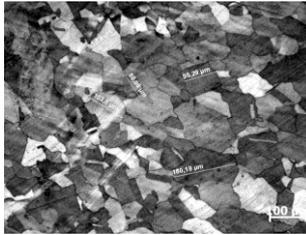
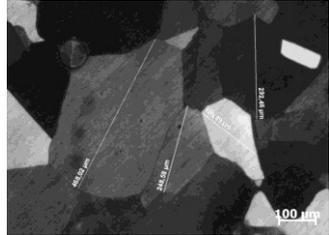
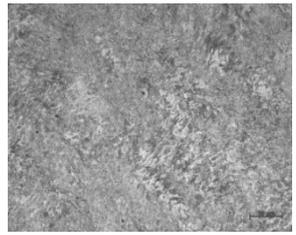
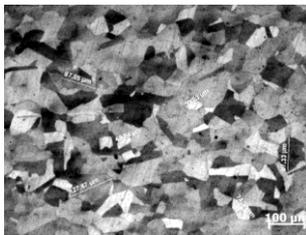
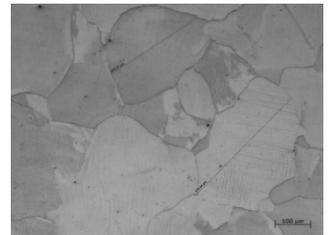
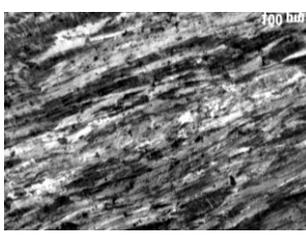
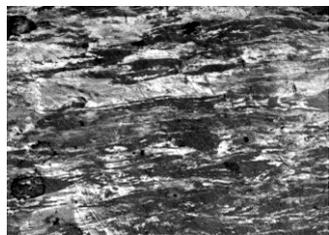
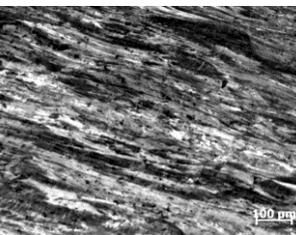
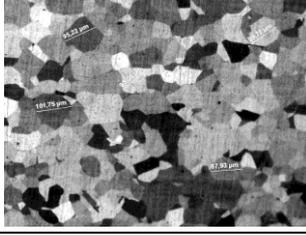
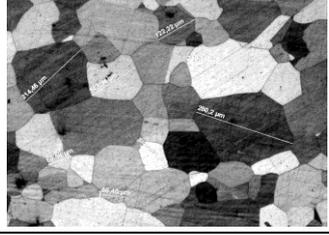
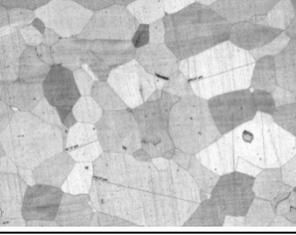
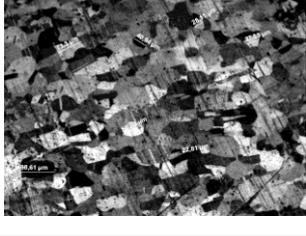
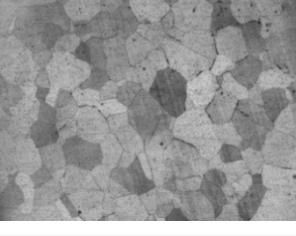


Рисунок 4.23 - Зависимости временного сопротивления σ_b (а) и относительного удлинения δ (б) металла от суммарной степени деформации и степени чистоты при волочении проволоки диаметром 0,075 мм из сплава №7

Таблица 4.19 - Микроструктура полуфабрикатов из сплава №7 в зависимости от степени чистоты

Операция	Степень чистоты		
	$\gamma = 0 \%$	$\gamma = 25 \%$	$\gamma = 50\%$
Литье			
Ковка заготовок размерами 30 x 30 мм			
Отжиг послековки			
Сортовая прокатка прутка размером 3,5 x 3,5 мм			
Отжиг прутка после прокатки размером 3,5 x 3,5 мм			
Отжиг проволоки диаметром 1,45 мм			

На образцах, отобранных в поперечном сечении, укрупнение зерна произошло при введении 25 % оборотных отходов, что можно объяснить дополнительным нагревом слитка при ковке. Использование 50 % отходов производства существенно затрудняет процессы динамической рекристаллизации в образцах полуфабрикатов послековки, что возможно связано с меньшей температурой. После отжига прутков с использованием 25 % оборотных отходов в микроструктуре формируется аналогичная ковке укрупненная зеренная структура.

Холодная деформация металла осуществляется движением дислокаций и характеризуется формированием волокнистости и кристаллографической текстуры. Увеличение степени деформации прутков с ростом количества обжатий приводит к уменьшению сечения деформированных зерен, увеличению протяженности зерен и существенному росту дефектов кристаллического строения.

Размер зерна полуфабрикатов изменяется в зависимости от количества использования оборотных отходов. Мелкое рекристаллизованное зерно было сформировано в полуфабрикатах с использованием степени чистоты $\gamma=0\%$ и составляет 76 ± 13 мкм для прутков 3,5 x 3,5 мм и 73 ± 14 мкм для проволоки диаметром 1,45 мм. Увеличение размера зерна выявлено в прутке 3,5 x 3,5 мм и проволоке диаметром 1,45 мм, полученных с использованием $\gamma = 50 \%$.

Анализируя полученные результаты исследований, можно сделать следующие выводы:

- получены данные по механическим свойствам литых и деформированных полуфабрикатов из сплава №7 на всех этапах технологического процесса производства проволоки технического назначения диаметром 0,075 мм;
- установлено, что степень чистоты незначительно влияет на механические свойства полуфабрикатов из сплава №7;
- выявлено, что в слитках сплава №7 с увеличением количества оборотных отходов размер зерна имеет тенденцию к уменьшению, что возможно связано с дополнительными центрами кристаллизации при затвердевании расплава;

- установлено, что сопротивление разрыву литого металла со степенью чистоты 50 % соответствует 335 МПа и выше примерно на 5 % по сравнению со слитками, полученными без лома и с 25 % оборотных отходов, что связано с уменьшением размера зерна;
- сопротивление разрыву и относительное удлинение кованных полуфабрикатов слабо зависят от количества оборотных отходов и определяются размером зерна, однако предел текучести прутков послековки при использовании 50 % оборотных отходов имеет наибольшее значение из-за частичной рекристаллизации в структуре;
- механические свойства кованных полуфабрикатов после отжига так же, как и послековки, зависят от размера зерна и слабо зависят от количества оборотных отходов;
- рекомендуется производить отжиг после 21 перехода на многократном стане волочения;
- экспериментально установлено, что при волочении проволоки малых диаметров на механические свойства металла в большей мере влияет подготовка калибровочной поверхности волочильного инструмента, применяемой смазки и подсмазочного слоя, полученного при омеднении.

Полученные данные по механическим свойствам использовали при моделировании процессов деформации металла из сплава №7.

Моделирование процесса сортовой прокатки прутков из сплава №7 проводили по представленной выше методике (см. раздел 2.3) в программном комплексе DEFORM 3D, использующим метод конечных элементов и включающим модуль для расчета критерия разрушения Кокрофта-Латама (C_{C-L}).

Реологические свойства сплава №7, необходимые для его моделирования, вводили в базу данных программы DEFORM 3D в ручном режиме в виде зависимостей временного сопротивления от суммарной степени холодной деформации (рис. 4.24), полученных по результатам испытаний в промышленных и лабораторных условиях [8-11, 22], и аппроксимированных формулой

$$\sigma_B = -0,0178 \varepsilon_\Sigma^2 + 4,7689\varepsilon_\Sigma + 340,64. \quad (4.3)$$

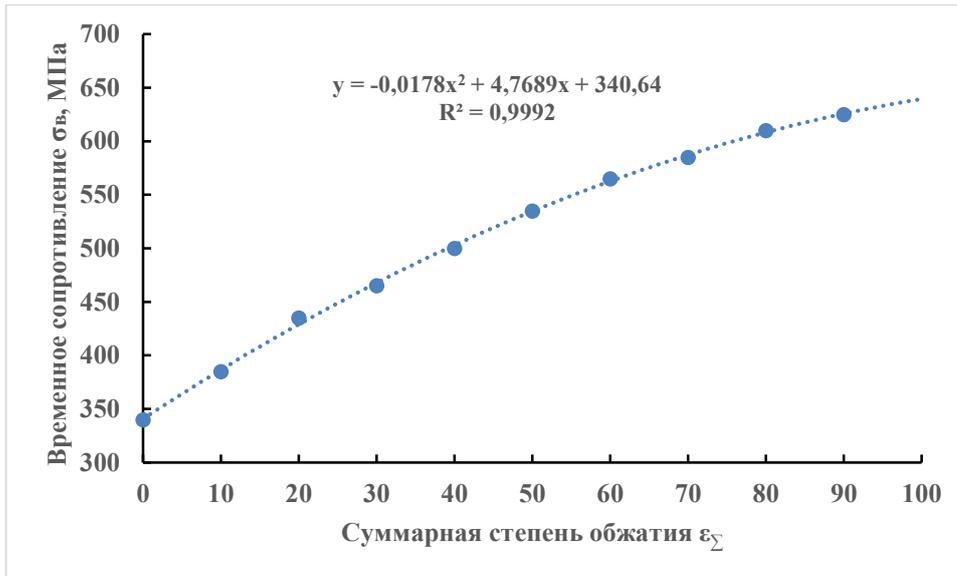


Рисунок 4.24 - Зависимость временного сопротивления прутков из сплава ПдН-5 от суммарного обжатия

В соответствии с методикой процедура компьютерного моделирования в программном комплексе DEFORM 3D включала следующие этапы. На первом этапе в среде трехмерного проектирования SolidWorks создавали объекты моделирования с параметрами, приведенными в табл. 4.20.

Таблица 4.20 – Данные для создания объектов моделирования сортовой прокатки прутков из сплава №7 в программном комплексе DEFORM 3D

Параметр	Величина параметра
Размеры сечения заготовки, мм	30x30
Параметры станов (стан 1 / стан 2 / стан 3):	
- диаметр валков, мм;	135/110/130
- сторона калибра в последнем проходе, мм;	14,50/6,45/3,48
- максимальная скорость прокатки, м/мин;	9,7/24,5/70
- допустимая сила прокатки, кН.	620/500/500

Затем данные о геометрии объектов с учетом их взаимного позиционирования загружали в препроцессор DEFORM 3D, после чего задавали скоростные и силовые характеристики прокатных станов, а также условия моделирования, которые представлены в табл. 4.21. Для снижения вычислительной нагрузки модель учитывала симметрию заготовки в двух плоскостях, перпендикулярных диагоналям ее поперечного сечения.

Таблица 4.21 – Параметры и условия моделирования сортовой прокатки прутков из сплава №7 в программе DEFORM 3D

Параметр	Содержание
Параметры заготовки	Исходное количество элементов сетки 13000. Коэффициент масштаба сетки 4. Исходная длина стороны ячейки 3,04 мм. Начальная температура 20 °С. Моделирование без теплообмена.
Решатель	Разрешение хода 1/3 минимального элемента сетки. Количество шагов 7500. Тип решателя метод сопряженных градиентов с прямыми итерациями. Итераций решения не более 200 на шаг.
Условия симуляции	Тип материала: - заготовка: вязко-пластичный; - инструмент: абсолютно жесткий. Коэффициент трения заготовки по инструменту: 0,12. Интерференция объектов: не более 0,015 мм.
Условия симметрии	Валки – по линии прокатки. Заготовка – по диагоналям поперечного сечения.
Свойства материала	Кривая упрочнения сплава ПдН-5 при суммарной деформации до 90 % при 20 °С. Модуль упругости 117000 МПа. Коэффициент Пуассона 0,39.

Дополнительно с учетом изотропности металла вдоль линии прокатки модель заготовки была ограничена по длине. Процесс прокатки прутка моделировали последовательно в соответствии с планируемым промышленным маршрутом.

При разработке модели учитывались силовые возможности промышленного прокатного оборудования и сочетание следующих условий:

- максимальная суммарная степень обжатия при холодной прокатке не должна превышать 98,6 %;
- сила прокатки $P_{п}$ должна составлять не более 90 % от максимально допустимой для используемых прокатных станов;
- критерий Кокрофта-Латама не должен превышать значение $C_{C-L} = 1$, чтобы не происходило разрушение металла.

Маршрут прокатки на всех станах назначался в соответствии с имеющимися калибрами и предложенным режимом обжатий (см. табл. 4.20). В качестве параметров, характеризующих деформацию металла, были использованы следующие: $\lambda_{ед}$ – единичный коэффициент вытяжки; λ_{Σ} – суммарный коэффициент вытяжки; ε_{Σ} – суммарное обжатие (%).

На рис. 4.25 представлен общий вид объектов моделей сортовой прокатки на станах 1 и 2 в программе SolidWorks (рис. 4.25, а), и в программе DEFORM 3D с конечно-элементной сеткой (рис. 4.25, б). Изменение геометрии сечения заготовки и параметры ее деформации при моделировании процесса прокатки на стане 1 приведены в табл. 4.22, а результаты моделирования на рис.4.26.

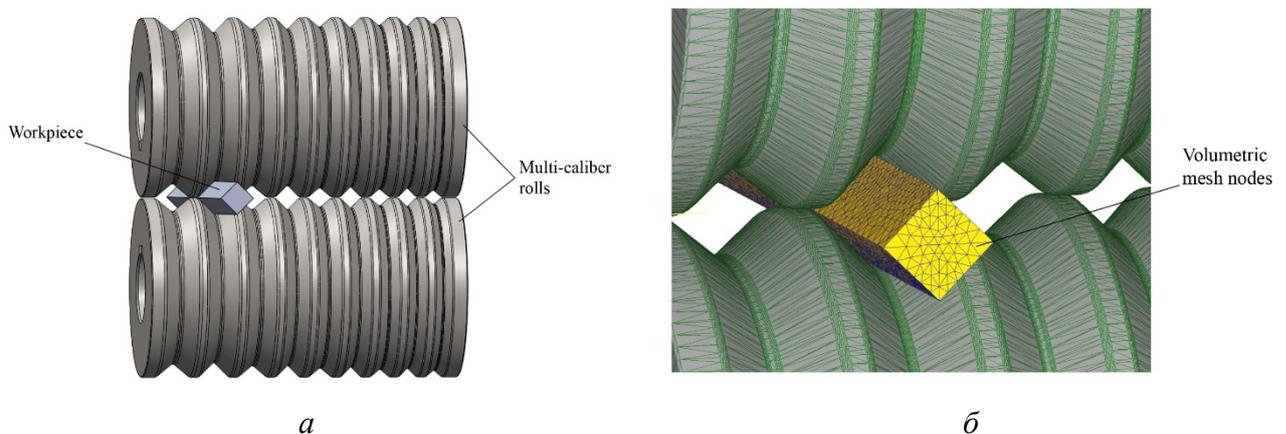


Рисунок 4.25 - Модели процесса сортовой прокатки прутков из сплава ПдН-5 на станах 1 и 2:

а – в программе SolidWorks; б – в программе DEFORM 3D

Таблица 4.22 – Параметры сортовой прокатки прутков из сплава №7 на стане 1

Номер прохода	Размер стороны, мм	$\lambda_{\text{ед}}$	λ_{Σ}	ε_{Σ} , %
1	28,9	1,1	1,1	9,1
2	26,9	1,2	1,3	23,1
3	24,8	1,2	1,6	37,5
4	21,4	1,4	2,2	54,5
5	20,0	1,1	2,4	58,3
6	18,8	1,1	2,7	63,0
7	17,0	1,2	3,2	68,8
8	16,6	1,1	3,5	71,4
9	14,5	1,3	4,6	78,3

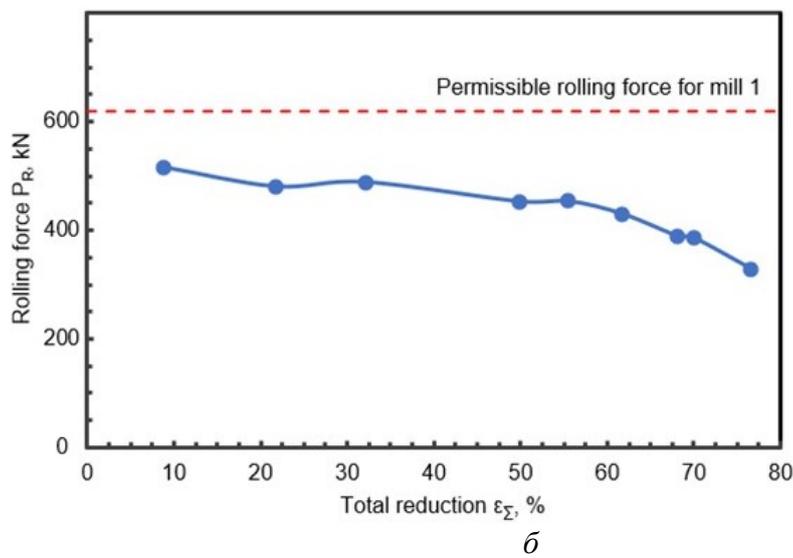
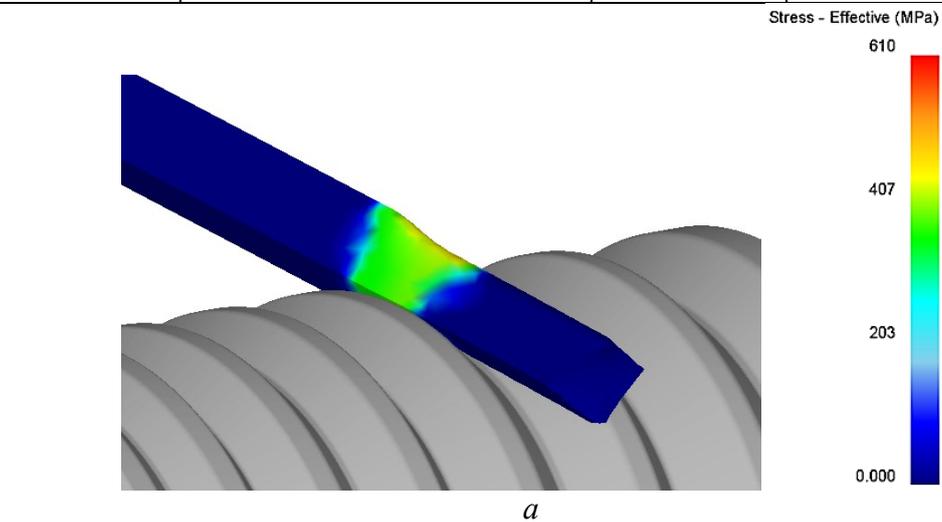


Рисунок 4.26 - Результаты моделирования в DEFORM 3D процесса прокатки на стане 1:
a – визуализация распределения интенсивности напряжений в очаге деформации; *б* – зависимость силы прокатки P_R от суммарной степени обжатия ε_{Σ}

На рис. 4.26, *a* представлена визуализация напряженно-деформированного состояния заготовки при прокатке на стане 1, на котором для удобства отображен только нижний валок и участок заготовки, контактирующей с ним. На рис. 4.26, *б* показано изменение силы прокатки P_R с ростом суммарной степени обжатия ε_{Σ} .

Анализ результатов расчета силовых параметров по модели показал, что значения силы прокатки по проходам в основном зависят от действия двух факторов: упрочнение металла в результате накопления холодной деформации способствует росту силы прокатки, а уменьшение сечения заготовки, а, следовательно, и площади контакта заготовки со стенками калибра, приводит к ее уменьшению. Плавное снижение силы по ходу прокатки показывает, что действие второго фактора превышает влияние первого фактора. При этом во всем диапазоне степеней деформации значения P_R не превышают 85 % от допустимой силы прокатки.

Из гистограммы, представленной на рис. 4.27, следует, что среднее значение C_{C-L} заготовки после прокатки на стане 1 не превышает 0.2, а максимальное значение этого параметра не более 0.4. Это свидетельствует о том, металл обладает достаточным запасом пластичности для продолжения прокатки на стане 2 без использования промежуточной термообработки.

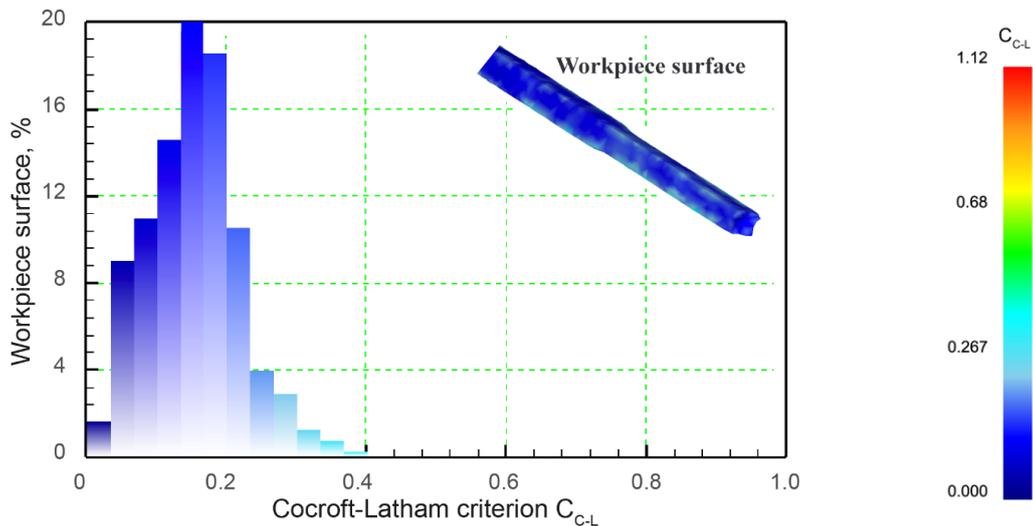


Рисунок 4.27 - Гистограмма распределения по поверхности раската критерия разрушения Кокрофта-Латама при прокатке на выходе из стана 1

После этого аналогичным образом из табл. 4.23 задавали данные для моделирования процесса прокатки на стане 2.

Таблица 4.23 – Параметры сортовой прокатки прутков из сплава ПдН-5 на стане 2

Номер прохода	Размер стороны, мм	$\lambda_{ед}$	λ_{Σ}	ε_{Σ} , %
1	13,3	1,2	5,5	81,8
2	12,4	1,2	6,6	84,8
3	11,5	1,2	7,9	87,3
4	10,5	1,2	9,5	89,5
5	9,9	1,1	10,5	90,5
6	9,1	1,2	12,6	92,1
7	8,5	1,2	15,1	93,4
8	7,9	1,2	18,1	94,5
9	7,5	1,2	21,7	95,4
10	7,0	1,1	23,9	95,8
11	6,5	1,2	28,7	96,5

Напряженно-деформированное состояние заготовки и силовые условия данного процесса представлены на рис. 4.28.

Анализ результатов моделирования показал, что в последних проходах на стане 2 металл достигает максимальных значений интенсивности напряжений (см. рис. 4.28, *a*) Суммарная степень обжатия к этому времени составила 96,5 %, при этом сила прокатки P_R на стане 2 не превышала 80 % от допустимой.

Полученные данные согласуются с моделью поврежденности металла (рис. 4.29), показывающей, что к концу 11-го прохода по граням заготовки возникают участки с риском возникновения и развития трещин. При этом статистически значимое предельное значение $S_{к-л}$ в данном случае близко к 1, но не достигает его, что вызывает необходимость проведения отжига перед прокаткой на стане 3.

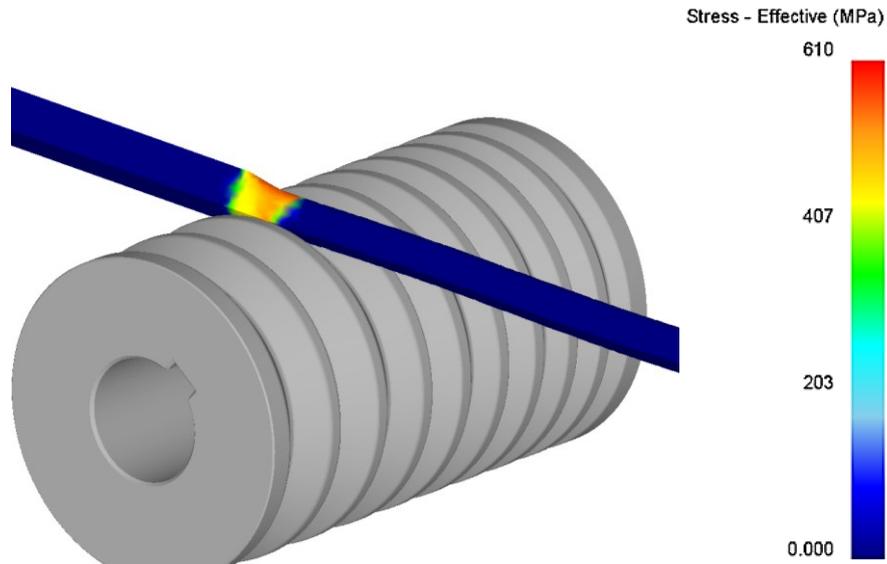
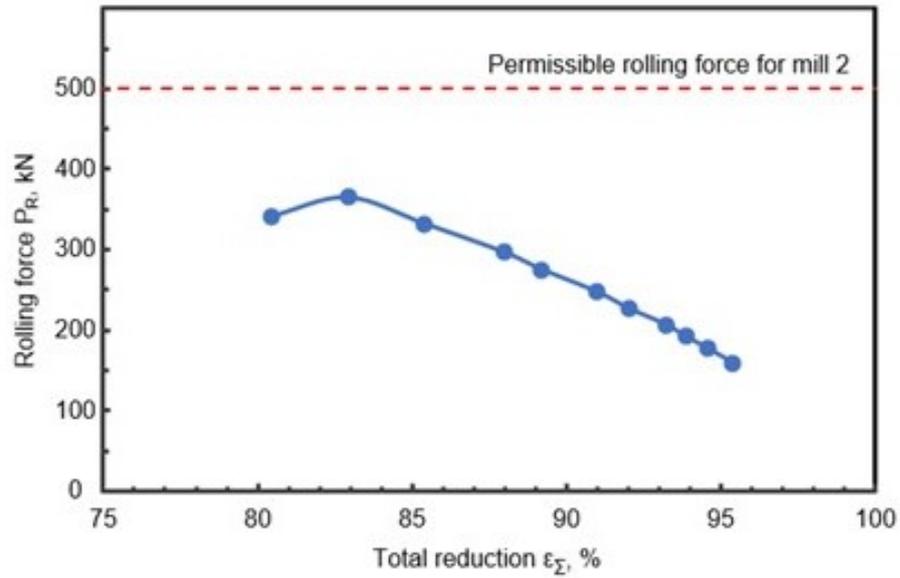
*a**б*

Рисунок 4.28 - Результаты моделирования в DEFORM 3D процесса прокатки на стане 2:

a – визуализация распределения интенсивности напряжений в очаге деформации;

б – зависимость силы прокатки P_R от суммарной степени обжатия ϵ_{Σ}

Проведение расчетов для непрерывного стана 3 осуществлялось процессором DEFORM 3D по заданному маршруту прокатки (табл. 4.24) с учетом условия равенства секундных объемов, согласно которому

$$V_1 F_1 = V_2 F_2 = \dots = V_n F_n = \text{const}, \quad (4.4)$$

где V_1, V_2, \dots, V_n – линейные скорости прокатки, соответственно, в 1-й, 2-й, ..., n -й клетях прокатного стана; F_1, F_2, \dots, F_n – площади поперечного сечения заготовки, соответственно, после прокатки в 1-й, 2-й, ..., n -й клетях прокатного стана; n – количество клетей прокатного стана.

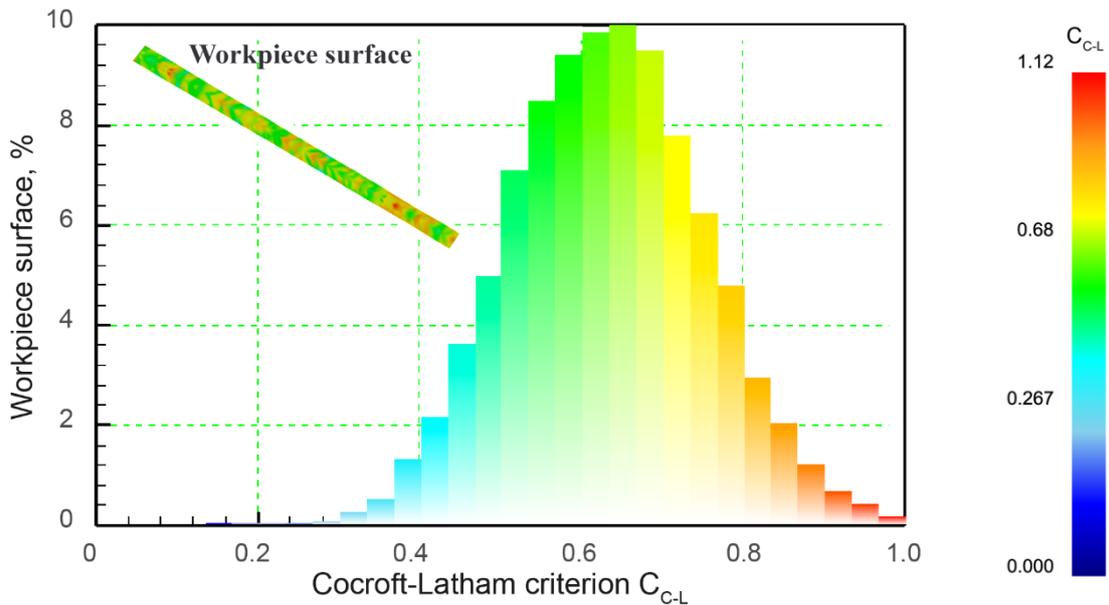
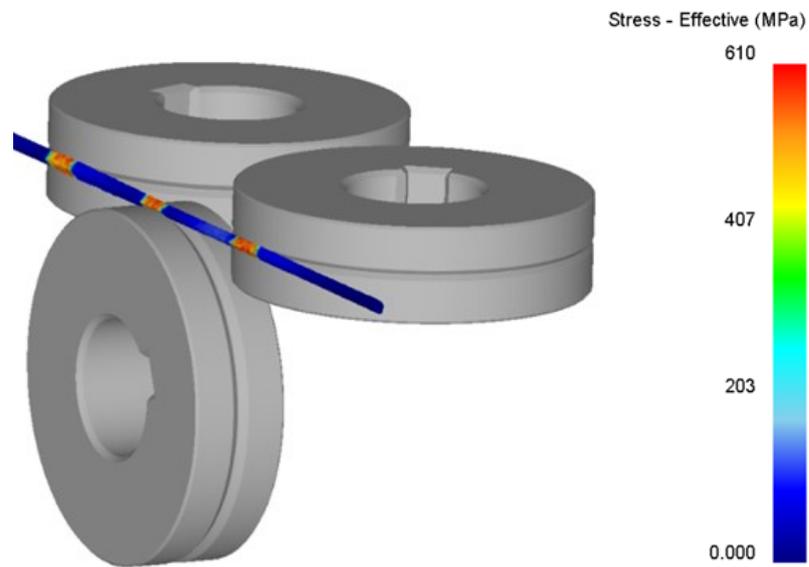


Рисунок 4.29 - Гистограмма распределения по поверхности раската критерия разрушения Кокрофта-Латама при прокатке на выходе из стана 2

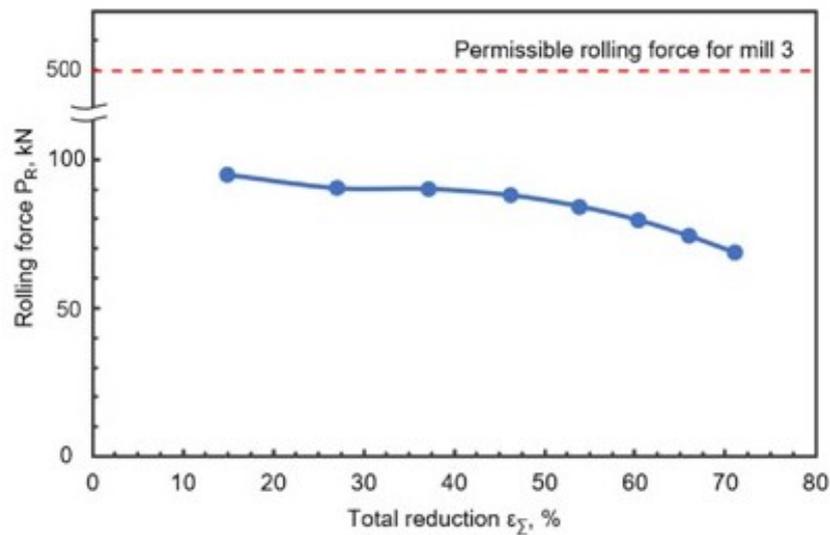
Таблица 4.24 – Параметры сортовой прокатки прутков из сплава №7 на непрерывном прокатном стане 3

Номер прохода	Размер стороны, мм	$\lambda_{\text{ед}}$	λ_{Σ}	$\varepsilon_{\Sigma}, \%$
1	5,95	1,2	1,2	16,7
2	5,51	1,2	1,4	28,6
3	5,11	1,2	1,7	41,2
4	4,73	1,2	2,1	52,4
5	4,38	1,2	2,5	60,0
6	4,06	1,2	3,0	66,7
7	3,76	1,2	3,6	72,2
8	3,50	1,2	4,3	76,7

Напряженно-деформированное состояние заготовки и силовые условия прокатки на непрерывном стане 3 представлены на рис. 4.30, на котором в каждой клетке изображен валок и участок заготовки, контактирующей с ним.



a



б

Рис. 4.30 - Результаты моделирования в DEFORM 3D процесса прокатки на стане 3:

a – визуализация распределения интенсивности напряжений в очаге деформации;

б – зависимость силы прокатки P_R от суммарной степени обжатия ϵ_{Σ}

После прокатки заготовки на третьем стане максимум распределения критерия разрушения на гистограмме смещается вправо с преобладанием значений S_{K-L}

выше среднего (0,7-0,95), что свидетельствует о практически полном исчерпании материалом своего запаса пластичности (рис. 4.31) и необходимости проведения отжига перед волочением.

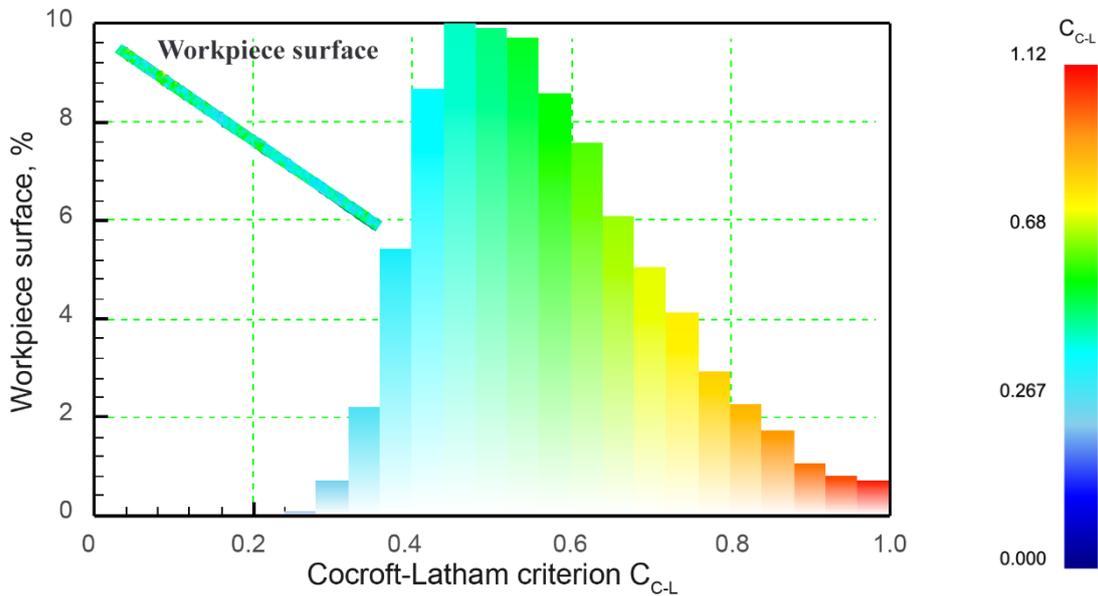
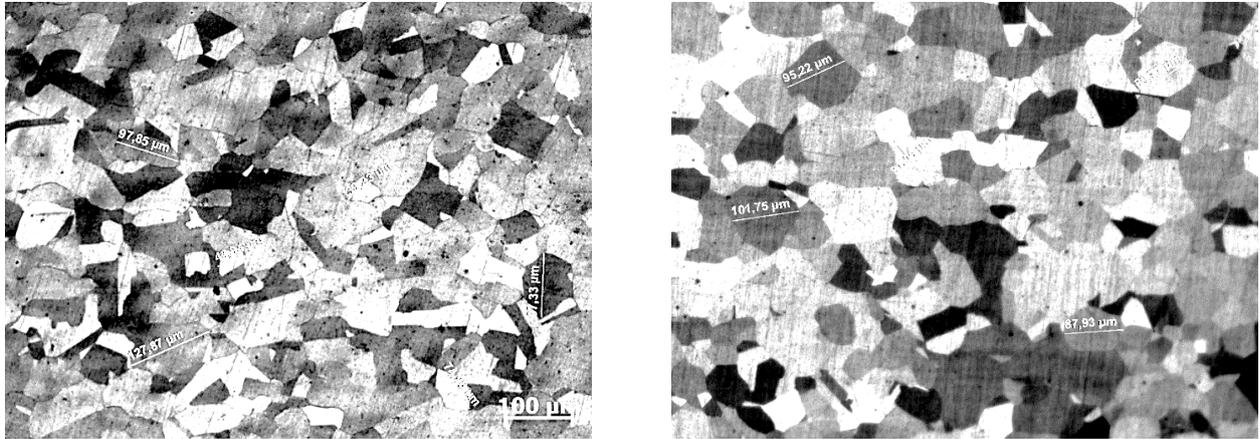


Рисунок 4.31 - Гистограмма распределения по поверхности раската критерия разрушения Кокрофта-Латама на выходе из стана 3

Таким образом, в результате моделирования оценено формоизменение металла на всех трех этапах прокатки, найдено распределение интенсивности напряжений в очаге деформации, а также получены количественные данные по силовым параметрам и критерию разрушения Кокрофта-Латама. Используя эти данные, можно прогнозировать опасность разрушения металла, определять критическую степень обжатия, необходимую для назначения промежуточных отжигов, а также оценивать силовую загрузку станов по допустимой силе прокатки.

По разработанным режимам обжатий в промышленных условиях была проведена сортовая прокатка кованой заготовки квадратного сечения размерами 30 x 30 мм. После прокатки на стане 2 проводили отжиг при температуре 900 °С и выдержке 1 час. В процессе прокатки отбирали образцы для испытания механических свойств на растяжение, которые были использованы для построения графика зависимости временного сопротивления сплава №7 от суммарного обжатия при холодной сортовой прокатке (см. рис. 4.24). Из него следует, что упрочнение при

прокатке отожженного кованого прутка и отожженной катанки после прокатки на стане 2, имеют аналогичный характер и практически совпадают. Это можно объяснить тем, что после отжига в обоих случаях прошла полная рекристаллизация структуры сплава (рис. 4.32).



а

б

Рисунок 4.32 – Микроструктуры кованого прутка (а) и катанки (б) из сплава №7 после отжига, выполненные в поляризованном свете x200

Для получения проволоки диаметром 0,075 мм из катанки квадратного сечения размерами 3,5x3,5 мм провели исследования технологических режимов волочения и анализ появления обрывов при деформации металла. Руководствуясь опытом промышленного производства такой проволоки из сплавов металлов платиновой группы, а также с учетом имеющегося на данном предприятии волочильного оборудования, весь процесс волочения был разбит на три этапа с использованием трех волочильных станков барабанного типа. На первом стане выполнялось волочение проволоки с диаметра 3,50 до диаметра 1,45. Затем после отжига проволоку подвергали меднению и на втором стане проводили волочение с диаметра 1,45 до диаметра 0,175 мм. Далее на третьем этапе получали проволоку диаметром 0,075 мм. Данная проволока должна была удовлетворять действующим на производстве техническим условиям.

Предлагаемый режим волочения с учетом имеющегося на предприятии инструмента на станах 1 и 2 представлен в табл. 4.25.

Таблица 4.25 – Предлагаемый режим волочения проволоки из сплава ПдН-5

Номер перехода	Диаметр, мм	$\lambda_{ед.}$	λ_{Σ}	$\varepsilon_{ед.}, \%$	$\varepsilon_{\Sigma}, \%$	$\eta_{в}$	$P_{в}, Н$
Стан 1							
1	3,46	1,22	1,22	17,96	17,96	2,25	1254,2
2	3,13	1,22	1,49	18,17	32,86	2,22	1113,6
3	2,82	1,23	1,83	18,83	45,50	2,14	1161,2
4	2,53	1,24	2,28	19,51	56,14	2,05	1053,6
5	2,26	1,25	2,86	20,20	65,00	1,98	975,3
6	2,02	1,25	3,58	20,11	72,04	1,92	853,6
7	1,81	1,25	4,45	19,71	77,55	1,96	722,0
8	1,62	1,25	5,56	19,89	82,02	1,98	610,0
9	1,45	1,25	6,94	19,89	85,59	1,99	522,2
10	1,31	1,23	8,50	18,38	88,24	2,20	397,8
11	1,18	1,22	10,41	18,31	90,39	2,20	350,2
Стан 2							
12	1,069	1,23	1,23	18,48	18,48	2,38	198
13	0,966	1,22	1,50	18,34	33,43	2,35	173,9
14	0,873	1,22	1,84	18,33	45,63	2,33	149,5
15	0,788	1,23	2,26	18,53	55,71	2,29	127,1
16	0,712	1,22	2,77	18,36	63,84	2,30	105,3
17	0,643	1,23	3,39	18,44	70,51	2,28	87,4
18	0,581	1,22	4,15	18,35	75,92	2,28	71,7
19	0,525	1,22	5,09	18,35	80,34	2,28	58,9
20	0,474	1,23	6,24	18,48	83,97	2,27	48,4
21	0,429	1,22	7,62	18,09	86,87	2,30	39,1
22	0,387	1,23	9,36	18,62	89,32	2,25	32,6
23	0,35	1,22	11,44	18,21	91,26	2,29	26,2
24	0,316	1,23	14,04	18,48	92,88	2,26	21,6
25	0,286	1,22	17,14	18,09	94,17	2,30	17,4
26	0,258	1,23	21,06	18,62	95,25	2,25	14,5
27	0,233	1,23	25,82	18,44	96,13	2,27	11,7
28	0,211	1,22	31,49	17,99	96,82	2,31	9,4
29	0,19	1,23	38,83	18,91	97,42	2,22	7,9
30	0,172	1,22	47,39	18,05	97,89	2,30	6,3

Технология волочения на первых двух станах с получением проволоки диаметром 0,172 мм является хорошо отработанным процессом и не требует дополнительных исследований. При этом, согласно [38], для устойчивого волочения без обрывов следует соблюдать условие, чтобы при волочении проволоки диаметром не менее 0,1 мм коэффициент запаса при волочении был не ниже 1,6. После каждого цикла волочения проводился отжиг при температуре 850 ± 20 °С и выдержке 60 мин.

Из-за опасности обрывов волочение проволоки диаметром менее 0,1 мм обычно вызывает трудности. Поэтому далее были проведены исследования режимов волочения с диаметра проволоки 0,172 до конечного диаметра 0,075 мм.

Для расчета параметров волочения проволоки диаметром 0,075 мм было проведено компьютерное моделирование в программном комплексе Deform-3D и изучены формоизменение, напряженно-деформированное состояние металла и температурные условия обработки. Параметры и граничные условия моделирования процесса волочения представлены в табл. 4.26.

Режим волочения на стане 3 с учетом имеющегося на предприятии инструмента (волока), выбранный для моделирования, представлен в табл. 4.27.

При разработке модели учитывались размеры инструмента (волоки) и сочетание следующих условий:

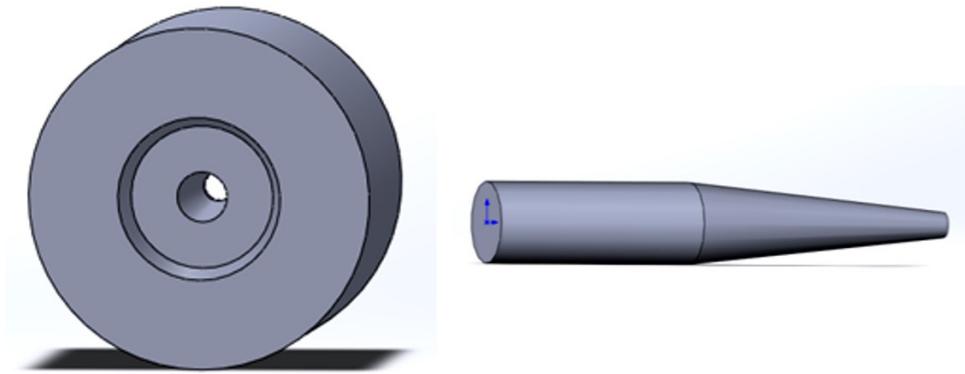
- рабочий инструмент – волоки с калибрующей зоной диаметром от 0,163 мм до 0,075 мм при угле волоки 7° ;
- заготовка – проволока диаметром 0,175 мм из сплава ПдН-5;
- критерий Кокрофта-Латама не должен достигать 1, чтобы не происходило разрушение металла (обрыв проволоки).
- коэффициент запаса при волочении не менее 1,6.

В среде программы SolidWorks были созданы объекты моделирования (рис. 4.33), которые затем были импортированы в программный комплекс DEFORM-3D.

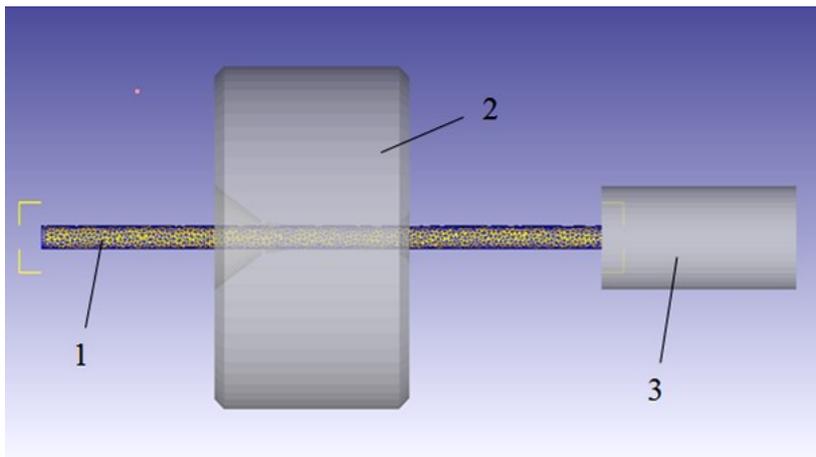
Таблица 4.26 – Параметры модели волочения сплава №7 в программе DEFORM

Режим волочения	Максимальная скорость волочения 10^4 мм/с
Параметры заготовки	Исходное количество элементов сетки: 10000 Коэффициент масштаба сетки: 4 Исходная длина стороны ячейки: 0,02 мм Начальная температура: 20 °С
Решатель	Разрешение хода: 1/3 минимального элемента сетки Количество шагов: от 400 до 4200 с шагом 0,006–0,012 мм Тип решателя: метод сопряженных градиентов с прямыми итерациями Итераций решения: не более 200 на шаг
Условия симуляции	Тип материала: - заготовка: вязко-пластичный; - инструмент: абсолютно жесткий. Коэффициент трения заготовки по инструменту: 0,08 Интерференция объектов: не более 0,001 мм
Условия симметрии	Волока – по оси волочения Заготовка – по оси волочения
Свойства материала	Пластические свойства: кривая упрочнения при суммарной деформации до 90 % при 20 °С Модуль упругости: 117000 МПа Коэффициент Пуассона: 0,39 Критерий разрушения: Кокрофта-Латама нормализованный

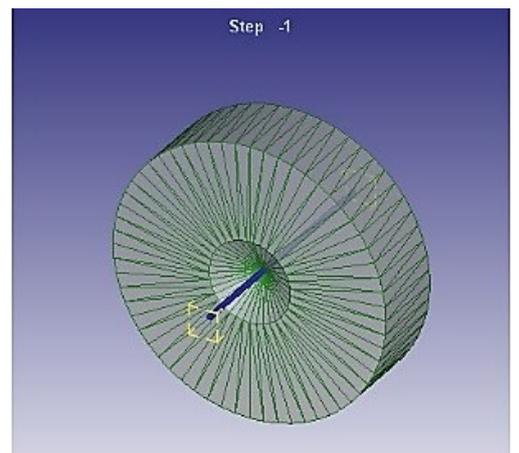
Результаты моделирования волочения проволоки на стане 3 в DEFORM 3D представлены визуализацией распределения напряжений волочения по длине очага деформации на первом (рис. 4.33, а) и девятом (рис. 4.33, б) переходах. Распределение напряжений в очаге деформации для действующего и предлагаемого режимов показано на рис. 4.34, 4.35. Анализ распределения напряжений показывает, что максимальные напряжения наблюдаются в калибрующей зоне волокна. Режим волочения соответствует диапазону коэффициента запаса при волочении 2,3–2,4.



а

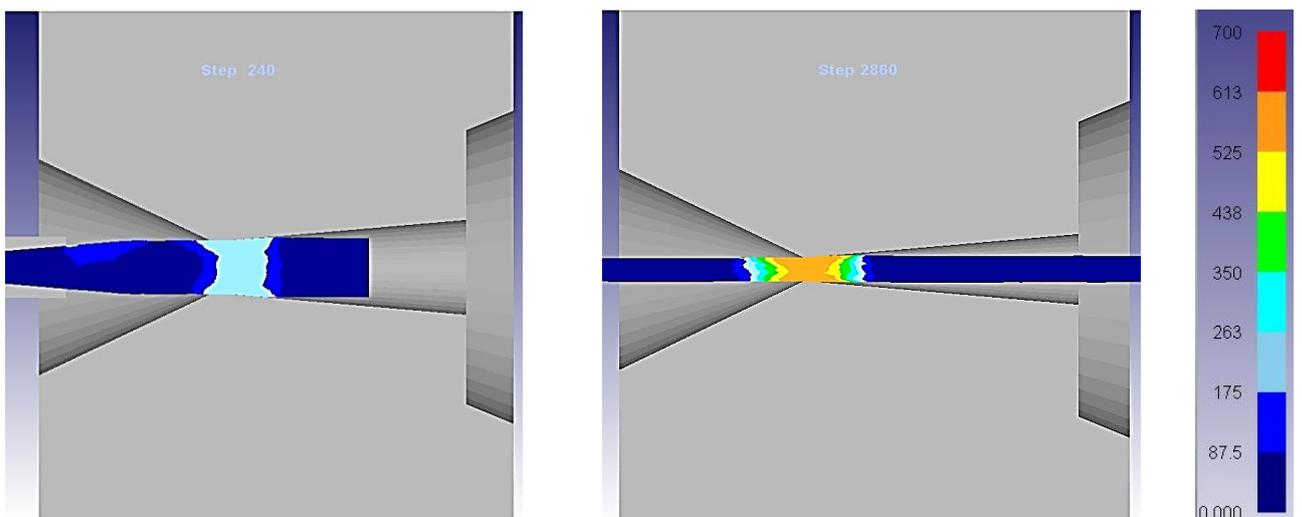


б



в

Рисунок 4.33 – Модель процесса волочения проволоки из сплава ПдН-5: а - общий вид геометрических объектов модели в SolidWorks: волока (слева) и заготовка (справа); б, в - сборка модели в DEFORM 3D в разных проекциях; 1 – заготовка с КЭ-сеткой; 2 – волока; 3 - держатель



а

б

Рисунок 4.34 - Результаты моделирования процесса волочения на стане 3: визуализация распределения напряжений волочения по длине очага деформации на первом (а) и последнем (б) переходах

Таблица 4.27 – Режим волочения проволоки из сплава №7 на стане 3

Номер перехода	Диаметр, мм	$\lambda_{ед}$	λ_{Σ}	$\varepsilon_{ед}, \%$	$\varepsilon_{\Sigma}, \%$
1	0,169	1,10	1,1	9,0	9,0
2	0,159	1,13	1,2	11,5	16,7
3	0,149	1,14	1,4	12,2	28,6
4	0,140	1,13	1,5	11,5	33,3
5	0,131	1,14	1,6	12,2	37,5
6	0,123	1,13	1,8	11,5	44,4
7	0,115	1,14	2,1	12,2	52,4
8	0,108	1,13	2,3	11,5	56,5
9	0,102	1,12	2,6	10,7	61,5
10	0,096	1,13	2,9	11,5	65,5
11	0,090	1,14	3,3	12,2	69,7
12	0,084	1,15	3,9	13,0	74,4
13	0,075	1,25	4,8	20,0	79,2

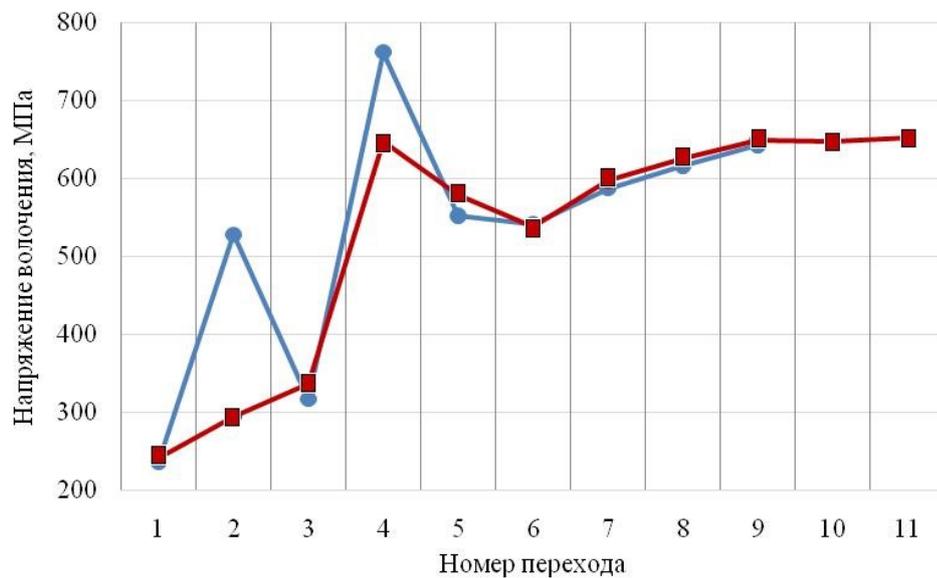


Рисунок 4.35 - Распределение напряжений волочения по переходам:

● – для действующего режима обработки; ■ – для предлагаемого режима обработки

Поэтому можно утверждать, что предложенные деформационные режимы обработки не приведут к обрывам проволоки во время волочения.

Полученное распределение значений критерия Кокрофта-Латама по поверхности заготовки в первом и заключительном переходах (рис. 4.36, 4.37) показало достаточно высокий ресурс пластичности проволоки, что позволяет рекомендовать данный маршрут волочения для промышленного опробования.

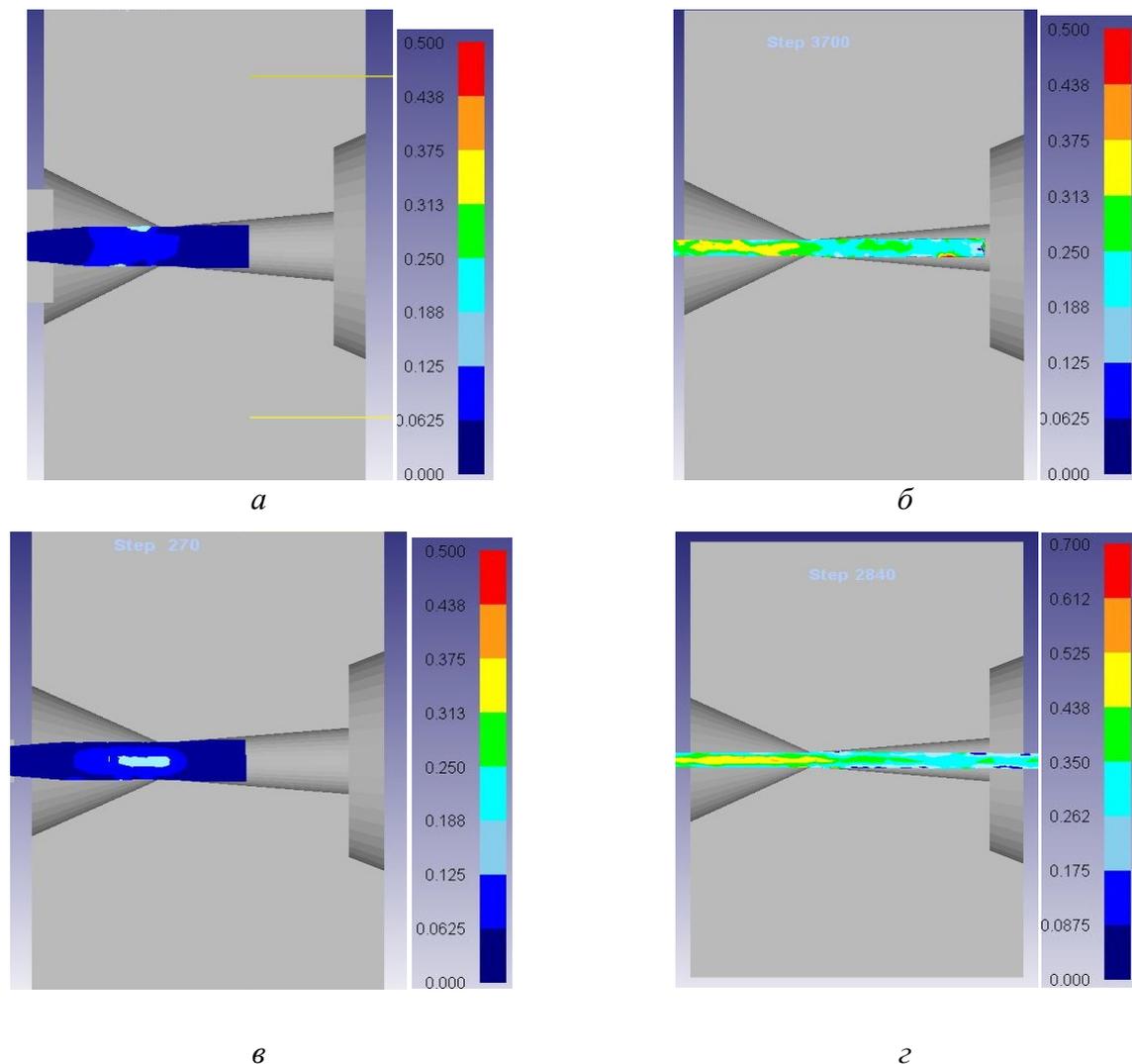


Рисунок 4.36 - Распределение критерия Кокрофта–Латама на первом (*а*, *в*) и последнем (*б*, *г*) переходах для действующего (*а*, *б*) и предлагаемого (*в*, *г*) режимов

Для проверки данных, полученных моделированием, в промышленных условиях были проведены экспериментальные исследования по волочению проволоки из сплава ПдН-5 и получены опытные партии проволоки диаметром 0,075 мм.

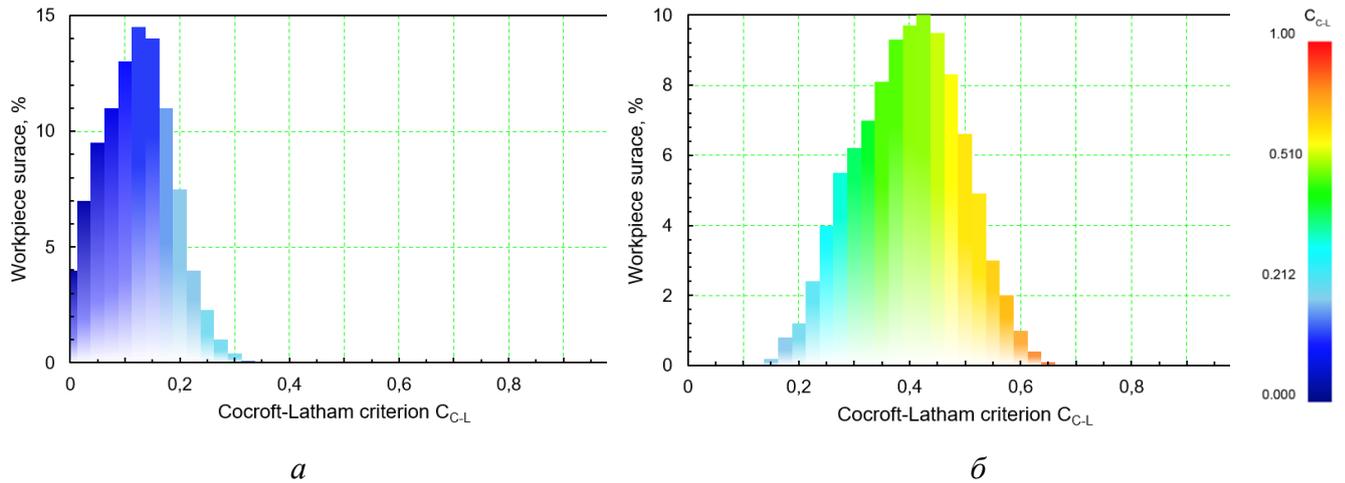


Рисунок 4.37 - Гистограмма распределения критерия разрушения Кокрофта-Латама по поверхности заготовки в первом (а) и последнем (б) переходах для предлагаемого режима обжатий

В процессе экспериментальных исследований определяли механические свойства проволоки в диапазоне диаметров от 3,54 до 0,075 мм в деформированном и отожженном состояниях.

При реализации исследований была получена проволока из сплава №7 после каждого перехода однократного волочения для действующего и предлагаемого режимов и определены механические свойства методом испытаний на растяжение. Результаты испытаний механических свойств представлены в табл. 4.28. Анализ изменения механических свойств (рис. 4.38) показывает, что использование предлагаемого режима волочения приводит к незначительному повышению прочностных свойств металла, при этом пластические свойства практически не изменяются. Более равномерное распределение вытяжек и увеличение степени деформации в некоторых переходах при реализации предлагаемого режима волочения приводит к увеличению значений временного сопротивления и предела текучести и их более плавному росту.

Применение предлагаемого режима волочения обеспечивает получение более высоких значений прочностных характеристик при аналогичном уровне пластичности по сравнению с использованием действующего режима для получения проволоки из сплава №7. Полученные после однократного волочения образцы

проволоки диаметром 1,45 мм (действующий режим) и 1,18 мм (предлагаемый режим) были подвергнуты рекристаллизационному отжигу, а затем многократному волочению в два этапа.

Таблица 4.28

Механические свойства проволоки из сплава №7, полученной по действующему и предлагаемому режимам путем однократного волочения

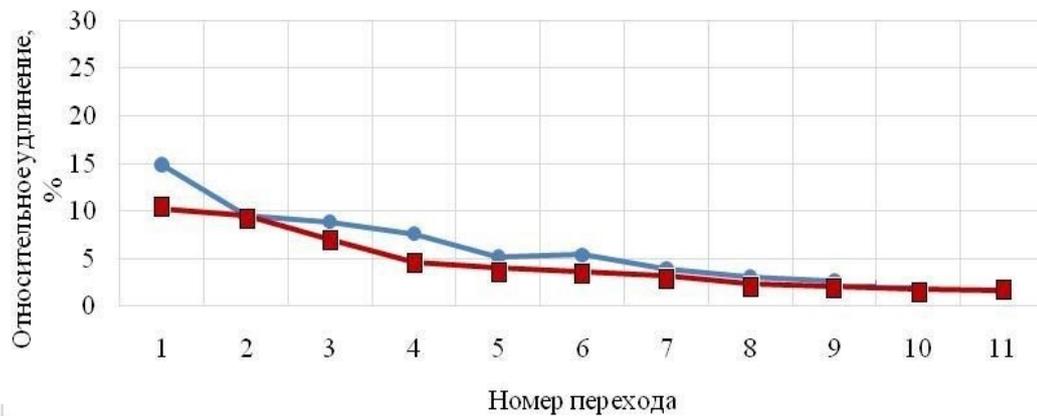
Номер перехода	Размер, мм	σ_b , МПа	δ , %	Номер перехода	Размер, мм	σ_b , МПа	δ , %
Действующий режим				Предлагаемый режим			
	3,45 × 3,45	313	43,0		3,45 × 3,45	313	43,0
1	3,54	419	9,6	1	3,46	433	10,3
2	3,16	483	8,9	2	3,13	486	9,5
3	2,82	521	7,6	3	2,82	518	7,0
4	2,53	559	5,2	4	2,53	552	4,6
5	2,26	573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

Конечный диаметр проволоки после первого этапа многократного волочения 0,172 мм был получен на стане промежуточного волочения. Далее на стане волочения особо тонкой проволоки изготовлены образцы проволоки диаметрами 0,150, 0,120, 0,090, 0,085, 0,075 и 0,060 мм в деформированном и отожженном состояниях, которые были подвергнуты испытаниям на растяжение для определения их механических свойств (табл. 4.29).

На основании полученных результатов построены графики изменения этих свойств для действующего и предлагаемого режимов обработки (рис. 4.39)



а



б

Рисунок 4.38 - Графики изменения механических свойств проволоки из сплава №7 после однократного волочения: а – временное сопротивление; б – относительное удлинение;

● – действующий режим обработки; ■ – предлагаемый режим обработки

Таблица 4.29 - Механические свойства проволоки малых диаметров из сплава №7, полученной многократным волочением по действующему и предлагаемому режимам обработки

D, мм	σ _в , МПа	δ, %	σ _в , МПа	δ, %
	Действующий режим		Предлагаемый режим	
0,172	758	0,85	721	0,95
0,150	766	0,87	689	0,95
0,120	837	0,79	759	0,87
0,090	871	0,78	740	0,84
0,085	830	0,77	749	0,85
0,075	825	0,85	765	0,92
0,060	928	0,73	812	0,77

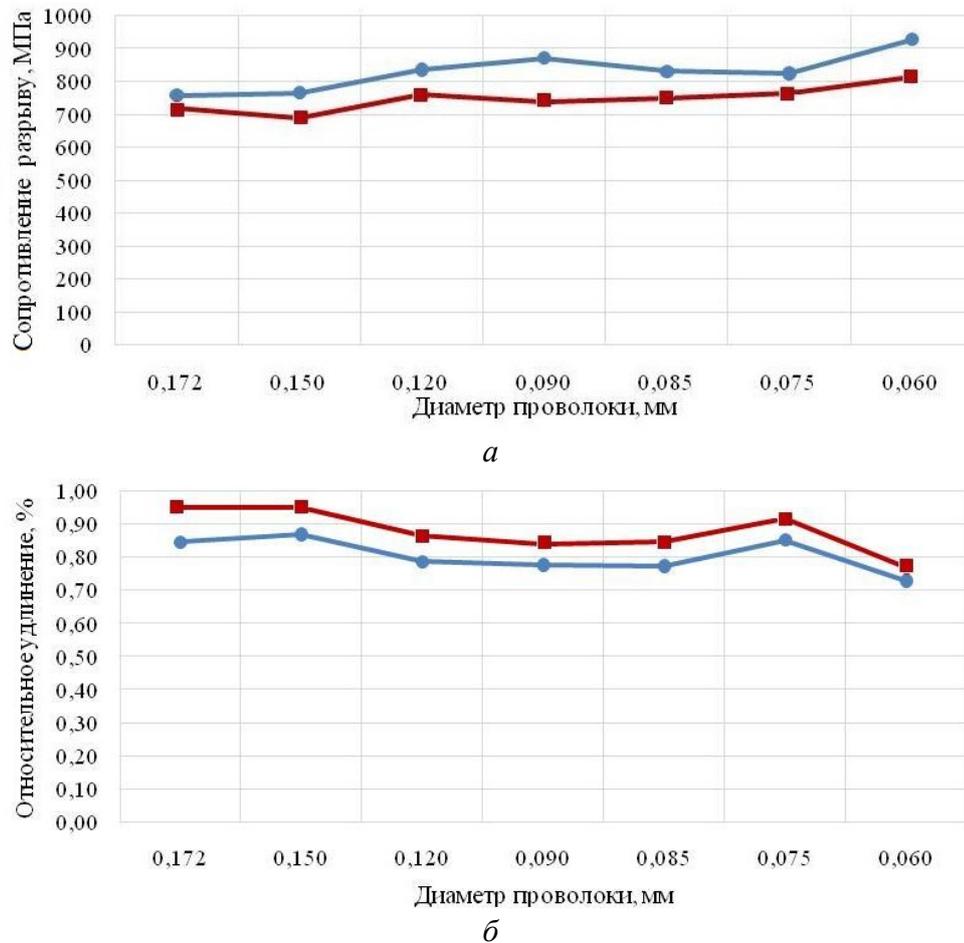


Рисунок 4.39 - Изменение механических свойств проволоки малых диаметров из сплава №7 после многократного волочения: *а* – временное сопротивление; *б* – относительное удлинение; ● – действующий режим обработки; ■ – предлагаемый режим обработки

Анализ изменения механических свойств металла после отжига показал, что проволока, полученная по предлагаемому режиму, обладает повышенными пластическими свойствами, о чем свидетельствует увеличение величины относительного удлинения.

Результаты испытания механических свойств особо тонкой проволоки малых диаметров 0,060-0,175 мм из сплава ПдН-5 приведены в табл. 4.30.

Приведенные в табл. 4.30 результаты исследований, представленные в графическом виде на рис. 4.40 и 4.41, показывают, что использование предлагаемого режима волочения позволяет получать проволоку, механические свойства которой удовлетворяют требованиям стандартов, предъявляемым к проволоке из палладия и его сплавов, предназначенной для изготовления сеток.

Таблица 4.30 - Механические свойства проволоки из сплава №7 в отожженном состоянии, полученной многократным волочением по действующему и предлагаемому режимам обработки

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

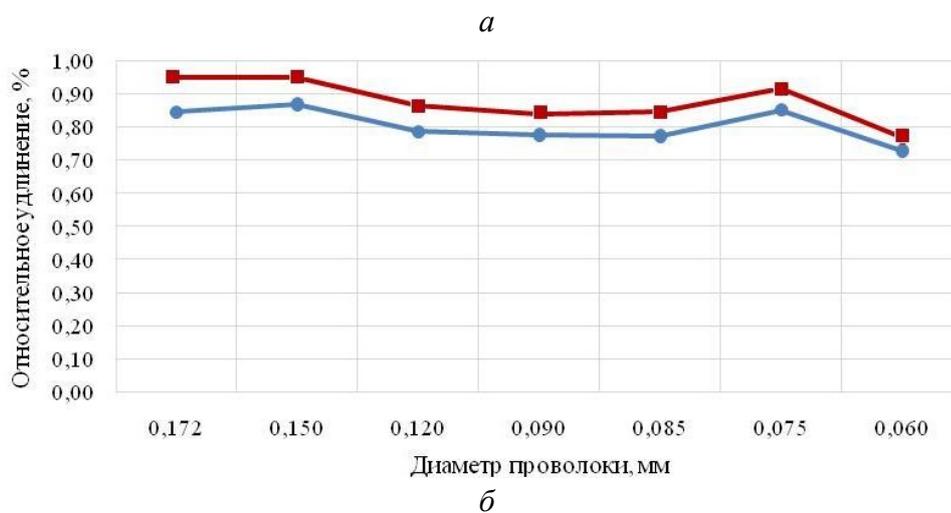
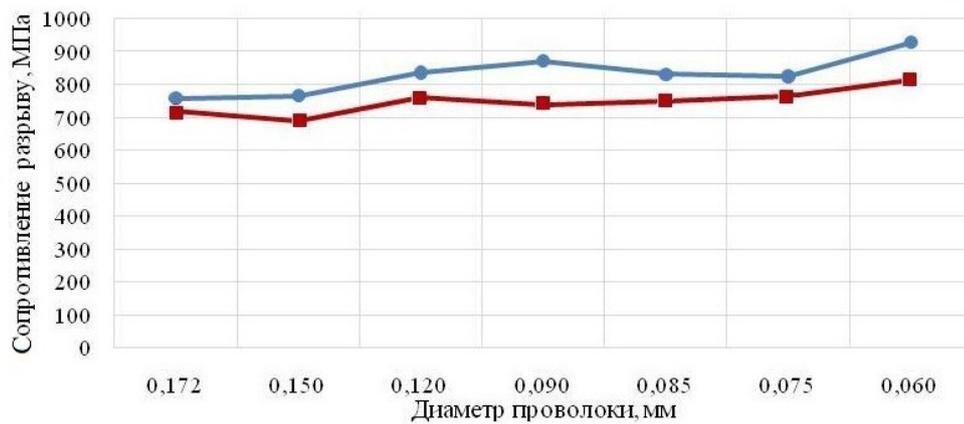
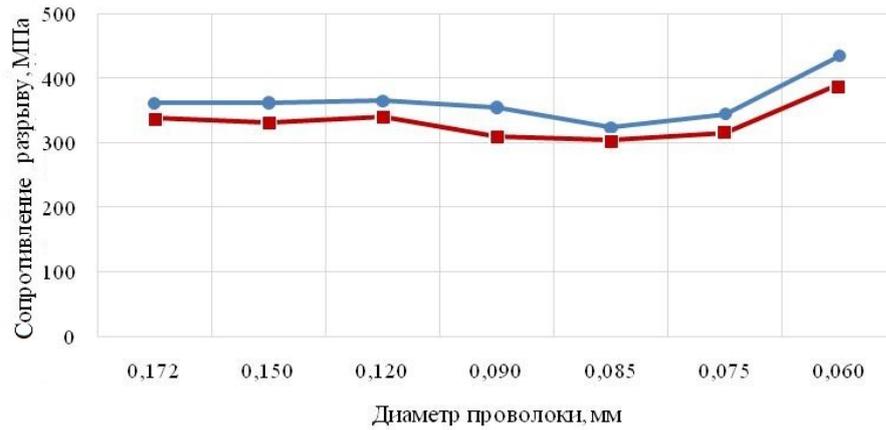
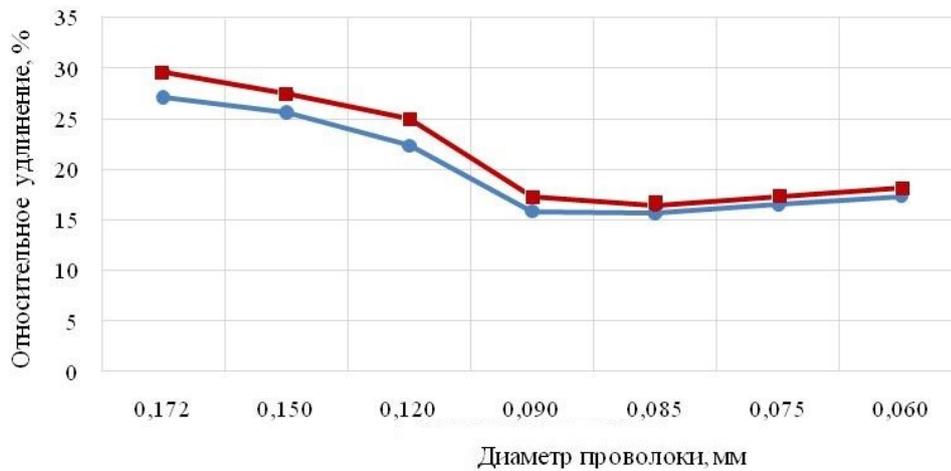


Рисунок 4.40 - Изменение механических свойств проволоки малых диаметров из сплава №7 после многократного волочения: *а* – временное сопротивление; *б* – относительное удлинение; ● – действующий режим обработки; ■ – предлагаемый режим обработки



а



б

Рисунок 4.41 - Изменение механических свойств проволоки из сплава №7 в отожженном состоянии: *а* – временное сопротивление; *б* – относительное удлинение:

● – действующий режим обработки; ■ – предлагаемый режим обработки

Полученные при этом значения относительного удлинения для проволоки в отожженном состоянии находятся на уровне 17 ± 2 %, что соответствует требованиям по пластическим свойствам, предъявляемым к готовой проволоке для изготовления улавливающих сеток каталитических систем. При этом сам процесс волочения тонкой проволоки был проведен без обрывов.

4.4. Выводы по главе

Таким образом, после выполнения исследований получены следующие основные результаты:

- для 3 исследуемых сплавов палладия № 5, 6 и 7 (см. табл. 2.6) получены аппроксимационные формулы для расчета временного сопротивления в зависимости от суммарной степени деформации;
- на основании анализа промышленной технологии предложены рациональные режимы обжатий для получения прутков сортовой прокаткой из нового ювелирного сплава №5, при этом количество проходов снижается в 1,5-2 раза;
- проведено компьютерное моделирование первого этапа сортовой прокатки для получения прутков размером 10,5x10,5 мм, характерного только для обработки сплавов на основе палладия, и с использованием этих результатов изучены закономерности формоизменения металла, энергосиловые параметры и возможность разрушения заготовок при прокатке;
- металлографические исследования литых и деформированных полуфабрикатов из сплава №5 показали, что модифицирование родием измельчает структуру металла, что способствует повышению пластических и прочностных характеристик, при этом отжиг приводит к выравниванию свойств по сечению полуфабрикатов;
- исследования влияния режима термической обработки на механические свойства исследуемого сплава показали, что повышение температуры и времени отжига приводит к снижению прочностных и пластических характеристик сплава №5, при этом модифицирование родием повышает их уровень;
- моделирование и исследование процесса получения проволоки технического назначения из нового сплава палладия №6 показали, что предложенный режим обжатий позволяет получать длинномерные деформированные полуфабрикаты диаметром до 0,5 мм с требуемым уровнем механических и электрических характеристик;

- использование компьютерного моделирования в программном комплексе DEFORM 3D дало возможность провести для процесса получения проволоки из сплава №7 (ПдН-5) анализ формоизменения заготовки, напряженно-деформированного состояния и силовых параметров при холодной сортовой прокатке и волочении, при этом установлено, что максимальное обжатие при прокатке может достигать значений до 96,7 %, доказана также необходимость проведения промежуточного отжига после второго этапа прокатки;
- для разработки рациональных режимов сортовой прокатки прутков из этого сплава рекомендуется с помощью предложенной компьютерной модели определять критическую степень обжатия и силовую загрузку станов с учетом ограничений по допустимой силе прокатки, а также оценивать вероятность разрушения с помощью рассчитанного критерия Кокрофта-Латама;
- у прокатных станов, применяемых для деформации металла из сплава №7 в промышленных условиях, имеется запас по силовым параметрам, при этом сила прокатки не превышает 90% от максимально допустимой нагрузки;
- анализ распределения критерия Кокрофта-Латама при прокатке прутков из этого сплава показал, что разрушения металла при заданных режимах прокатки не будет происходить, так как он не достигал значений, равных 1;
- при моделировании волочения были получены данные, позволившие оценить напряженно-деформированное состояние металла при волочении проволоки из сплава №7, а также спрогнозировать вероятность разрушения металла с использованием рассчитанных значений критерия Кокрофта-Латама;
- для исключения обрывов при волочении проволоки диаметром до 0,060 мм из сплава №7 необходимо использовать полученный с помощью компьютерной модели режим обжатий при волочении, который позволяет за счет перераспределения вытяжек по переходам получать качественную проволоку из сплава №7, механические свойства которой удовлетворяют требованиям действующих стандартов на производстве;

- для получения заданного комплекса механических свойств проволоки из сплава №7 диаметром до 0,060 мм рекомендуется проводить ниточный отжиг, который позволяет значительно увеличить пластические свойства металла и, тем самым, обеспечить безобрывную технологию изготовления улавливающих сеток каталитических систем;
- промышленное опробование усовершенствованной технологии с использованием операцийковки, сортовой прокатки и волочения позволило получить проволоку из сплава №7 (ПдН-5) диаметром 0,006 мм без обрывов, свойства которой удовлетворяют требованиям нормативных документов и делают пригодной для изготовления тканых улавливающих сеток (Приложение Б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных исследований сделаны выводы и получены следующие результаты.

1. Разработаны и запатентованы новые сплавы на основе платины и палладия для производства изделий ювелирного и технического назначения с улучшенным комплексом механических свойств и эксплуатационных характеристик.
2. Предложена методика проведения исследований технологии производства деформированных полуфабрикатов, применение которой позволило установить деформационные и силовые параметры прокатки и волочения для производства длинномерных изделий технического и ювелирного назначения из 7 сплавов платины и палладия.
3. С применением существующего программного обеспечения проведен анализ технологии получения прутков и проволоки из исследуемых сплавов и предложены более эффективные режимы обжатий при реализации операций прокатки и волочения.
4. Для процессов холодной листовой, сортовой прокатки и волочения длинномерных полуфабрикатов из исследуемых сплавов в программных комплексах SolidWorks и DEFORM 3D созданы компьютерные модели, позволившие с использованием предложенных режимов обжатий получить новые научные данные по формоизменению металла, оценить его напряженно-деформированное состояние и возможность разрушения с помощью критерия Кокрофта-Латама.
5. В лабораторных и промышленных условиях с использованием разработанных режимов обжатий проведены экспериментальные исследования процессов прокатки и волочения для получения прутков и проволоки из исследуемых сплавов, которые подтвердили адекватность разработанных моделей, позволили выбрать оборудование и проверить ограничения по его силовой загрузке.
6. Проведены исследования механических свойств и структуры полуфабрикатов из сплавов платины и палладия в зависимости от их химического состава, ре-

жимов деформации и вида термической обработки, при этом получены формулы для расчета временного сопротивления в зависимости от суммарного обжатия для всех исследуемых сплавов.

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.
2. Технологические основы производства длинномерных литых и деформированных полуфабрикатов из сплавов драгоценных металлов: монография / С. Б. Сидельников, Е. С. Лопатина, Н. Н. Довженко [и др.]. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2021.
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. Лебсак-Клейманс А. Ювелирный рынок России: специфика, перспективные ниши, тенденции развития [Электронный ресурс]: Официальный сайт интернет-журнала «New Retail». – Режим доступа: https://newreail.ru/business/yuvelirnyy_rynok_rossii_spetsifika_perspektivnye_nishi_tendentsii_razvitiya1848/?sphrase_id=283418.
5. Анализ рынка ювелирных изделий в России в 2018-2022 гг, прогноз на 2023-2027 гг. в условиях санкций / [Электронный ресурс]: Официальный сайт ООО "БизнесСтат". – Режим доступа: <https://businessstat.ru/catalog/id8965/>.
6. Будущее ювелирной отрасли России—экспорт или внутренний рынок?/ [Электронный ресурс]: Официальный сайт Ассоциации «Гильдия ювелиров России». – Режим доступа: <https://agjr.ru/assets/files/documents/2022/budushhee-yuvelirnoj-otrasli-rossii.pdf>.
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-rf-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. Липскеров В. Изменение динамики цен на палладий [Электронный ресурс]: Сайт Golden-inform.ru. – Режим доступа: <http://golden-inform.ru/kotirovki/dinamika-sen-na-palladij/>.
10. Платина и палладий. Причины падения и перспективы роста. [Электронный ресурс] / И. Галактионов // Официальный сайт ООО «Компания БКС». Режим доступа: <https://bcs-express.ru/novosti-i-analitika/platina-i-palladii-prichiny-padeniia-i-perspektivy-rosta>.
11. Будут ли расти цены на платину и палладий в 2023 году и стоит ли в них инвестировать / [Электронный ресурс] / А. Милькина // Подробнее на сайте Banki.ru <https://www.banki.ru/news/daytheme/?id=10978312> Официальный сайт Банки.ру - финансовый маркетплейс. Режим доступа: <https://www.banki.ru/news/daytheme/?id=10978312>.
12. Ювелирная отрасль России: проблемы и вызовы нового времени [Электронный ресурс]: Официальный сайт журнала «Экспо-Ювелир». – Режим доступа: <https://expojeweller.ru/analytics/research2018/>.
13. ГОСТ 30 649–99. Сплавы на основе благородных металлов ювелирные. Марки. – М.: Стандартиформ, 2000.
14. ГОСТ Р 52793–2007. Металлы драгоценные. Термины и определения. – М.: Стандартиформ, 2019.
15. Теория и практика ювелирного дела / Э. Бреполь; под ред. Ю. Н. Баскакова и В. Ф. Каргина. 13-е изд. С.-Петербург: «Соло», 2000.
16. Благородные металлы: справоч. изд. / под ред. Е. М. Савицкого – М.: Металлургия, 1984.
17. ГОСТ Р54151-2010 Сетки катализаторные из сплавов на основе платины. Технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 2004.
18. ТУ 1995-091-00196533-2006 Сетки улавливающие тканые из палладиевых сплавов, 2006.

19. Прокатно-прессово-волочильное производство / И.Л. Константинов, С.Б. Сидельников, Е.В. Иванов, 2-е изд. – М.:ИНФРА-М; Красноярск: СФУ, 2022.
20. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / П. И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин.– М.: Металлургия, 1983.
21. Платина, ее сплавы и композиционные материалы / Е. В. Васильева, Р. М. Волкова, М. И. Захарова [и др.]. – М.: Металлургия, 1980.
22. Сопротивление деформации платинового сплава ПлПдРдРу 81-15-3,5-0,5 / Логинов Ю. Н., Фомин А. А. // Цветные металлы. – 2015. – № 12 (876). – С. 80–83.
23. Сопротивление деформации проволочных образцов из платинового сплава / Логинов Ю. Н., Первухин А. Е. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – № 12. – С. 57–60.
24. Материаловедение. Металловедение палладия и его сплавов: учеб. пособие / В.С. Биронт, Н.Н. Довженко, С.Н. Мамонов [и др.]– Красноярск, ГУЦМиЗ, 2007.
25. Исследование свойств новых палладиевых сплавов и совершенствование технологии их обработки / Рудницкий Э. А., Довженко Н. Н., Ходюков Б. П. // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – 2009, – №3, – С. 41–44.
26. Исследование механических свойств проволоки из сплавов палладия 850-й пробы / Н. Н. Довженко, Н. А. Грищенко, И. С. Гоголь [и др.] // Обработка сплошных и слоистых материалов: Вып. 34: меж. вуз. сб. науч. тр. / под ред. Г. С. Гуна. – Магнитогорск: МГТУ, 2006. – С. 146–148.
27. Экспериментальные исследования механических свойств изделий из сплавов палладия / Н. Н. Довженко, С. Б. Сидельников, Н. А. Грищенко [и др.] // Современные технологии в машиностроении: сб.ст. – Пенза: Знание, 2005. – С. 48–51.
28. Binary Alloy Phase Diagrams, 2nd Edn., eds / Т. В. Massalski, Н. Okamoto, Р. R. Subramanian and L. Касрзак, in 3 volumes, ASM International, Ohio, USA, 1990.
29. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник. В 3 т. Т. 1 / под общ. ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1996.
30. Влияние величины зерна на ползучесть платинородиевых сплавов/ И.И. Новиков, Ф.С. Новик [и др.] // Цветная металлургия, 1970, № 3, С. 110–113.

31. Первухин А. Е. Проявления неоднородности пластической деформации в процессах волочения проволоки из благородных металлов: дисс. канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2018.
32. Фомин А. А. Влияние сопротивления деформации иридия и сплавов платины на формоизменение этих материалов в процессах штамповки: дисс. канд. техн. наук. – Екатеринбург, 2015.
33. Рудницкий Э.А. Совершенствование технологии производства проволоки из палладиевых ювелирных сплавов: дисс. канд. техн. наук. – Красноярск, 2009.
34. Fjellvåg A.S., Waller D., Skjelstad J., Sjøstad A.O. Grain reconstruction of palladium and palladium-nickel alloys for platinum catchment. *Johnson Matthey Technology Review*, 2019, 63(4), 236–246.
35. Guo M., Wang H., Cui L., Zhang J., Xiang Y., Lu S., Nickel Promoted Palladium Nanoparticles for Electrocatalysis of Carbohydrazide Oxidation Reaction. *Small*, 2019, 15(28), 1900929.
36. Kang Z., Zhao M., Wu Y., Xia T., Cao J.-P., Cai W., Chen L., Facial fabrication of yolk-shell Pd-Ni-P alloy with mesoporous structure as an advanced catalyst for methanol electro-oxidation. *Applied Surface Science*, 2019, 484, 441–445.
37. Flanagan T.B., Noh H., Wang D., Hydrogen isotherms for compositionally homogeneous and inhomogeneous Pd_{1-x}Ni_x alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 750, 599–606.
38. Ivanović T. A., Trumić B. T., Ivanov S. Lj [et al.]. Optimisation of the Recrystallisation Annealing Regime of Pd-5Ni Alloy // *Journal Johnson Matthey Technol. Rev.* – 60(1), 2016. – P. 31–38.
39. Gang C., Peng Z., Hongwei L. Molecular dynamics simulation of solidification of Pd-Ni clusters with different nickel content. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, 926206.
40. Pura J., Kwaśniak P., Jakubowska D. [et al.]. Investigation of degradation mechanism of palladium-nickel wires during oxidation of ammonia. *Catalysis Today*, 2013, 208, 48–55.

41. Bagmut A.G., Shipkova I.G., Zhuchkov V.A. Formation, structure, and magnetic changes at annealing of films deposited by laser sputtering of Ni and Pd. *Journal of Surface Investigation*. 2011, 5(3), 460–464.
42. Rdzawski Z., Ciura L., Nikiel B. Metallographic examination of catalyst gauzes and catchment gauzes from platinum and palladium alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995, 53(1-2), 319–329.
43. Fierro J.L.G., Palacios J.M., Tomas F. Characterization of catalyst and catchment gauzes used in medium- and low-pressure ammonia oxidation plants. *J Mater Sci*, 1992, 27, 685–691.
44. Investigation modes for production technology of wire from the Pd5Ni alloy for catchment gauzes of the chemical industry / Konstantinov I.L., Sidelnikov S.B., Lopatina E.S. [et al] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2022. Т. 121. № 11-12. С. 7229-7246.
45. Study of the Stress-Strain State of the Process of Drawing Wire from an Alloy of Palladium with Nickel / S. Sidelnikov, V. Lopatin, M. Dobrovenko [et al] // *Materials Science Forum*. – 2020, – Vol. 992, – P. 504–510.
46. Скальпирование как операция для устранения дефектов сортового проката из благородных металлов / Логинов Ю. Н., Первухин А. Е // *Производство проката*. – 2018. – № 4. – С. 14–17.
47. Evolution of surface defects in platinum alloy wire under drawing / Loginov Y. N., Pervukhin A. E., Babailov N. A. // *2017 AIP Conference Proceedings*. – V. 1915, No 040032.
48. Перераспределение деформации в операциях многопроходного волочения / Логинов Ю. Н., Первухин А. Е., Бабайлов Н. А. // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. – 2016. – № 5. – С. 26–30.
49. Deformation resistance of platinum alloy Pt81Pd15Rh3.5Ru0.5 / Loginov Yu. N., Fomin A. A. // *Tsvetnye Metally*. – 2015(12), – P. 80–83.

50. Обоснование и выбор режима охлаждения сплава ПдН-5 при затвердевании слитка / Е. А. Павлов, В. Ю. Гурская, А. А. Гуцинский [и др.] // Цветные металлы. – 2010. – № 11. – С. 46–49.
51. Физическое и математическое моделирование процесса сортовой прокатки для производства длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов драгоценных металлов / Ю. Д. Дитковская, С. Б. Сидельников, Е. С. Лопатина, В. А. Лопатин // Цветные металлы и минералы: сб. докладов XI Междунар. конгресса. Красноярск, 2019. – С. 542–549.
52. Создание новых сплавов ювелирного назначения из многокомпонентных систем драгоценных металлов и технологий их обработки / Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Дитковская Ю.Д. [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. № 4 (52). С. 38-44.
53. Изучение трения при листовой прокатке платины и ее сплавов / Логинов Ю. Н., Студенок Г. И. // Производство проката. – 2010. – № 7. – С. 14–16.
54. Физическое и математическое моделирование процесса сортовой прокатки для производства длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов драгоценных металлов / Ю. Д. Дитковская, С. Б. Сидельников, Е. С. Лопатина, В. А. Лопатин // Цветные металлы и минералы: сб. докладов XI Междунар. конгресса. Красноярск, 2019. – С. 542–549.
55. Проектирование технологии и моделирование инструмента для производства длинномерных ювелирных изделий / Ю.Д. Гайлис // Научный потенциал мира-2013: сб. материалов IX междунар. науч.-практ. конф. – София: Бял ГРАД-БГ ООД, 2013. – С. 86–90.
56. Разработка подсистемы САПР технологических процессов производства ювелирных изделий / С. Б. Сидельников, Н. Н. Довженко, Ю. Д. Гайлис, О. С. Лебедева // Известия МГТУ «МАМИ». Научный рецензируемый журнал. Сер. 2. Технология машиностроения и материалы. – М.: МГТУ «МАМИ», №2(16), 2013, Т. 2. – С. 216–220.

57. Анализ и проектирование технологии получения проволоки ювелирного назначения из новых сплавов драгоценных металлов / С. Б. Сидельников, Ю. Д. Дитковская, О. С. Лебедева [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер. Metallurgy, Т. 15, – № 4. – 2015. – С. 108–115.
58. 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.
59. 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 [et al] // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2016, – 9(5) – P. 632–642.
60. Совершенствование технологических режимов изготовления проволоки ювелирного назначения из новых сплавов драгоценных металлов / С. Б. Сидельников, Ю. Д. Дитковская, В. А. Лопатин. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Вып. 11: в 3 ч. Ч. 1, – 2017. – С. 27–33.
61. Особенности получения и обработки ювелирных сплавов на основе палладия / Довженко Н.Н., Сидельников С.Б., Биронт В.С., [и др.] // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова, 2008, №1. С. 63-67.
62. Разработка технологии производства ювелирных изделий из бессеребряных палладиевых сплавов / Довженко Н.Н., Сидельников С.Б., Биронт [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2008. № 3 (23). С. 64-66.
63. Annealing Characteristics and Strain Resistance of 99.93 wt.% Platinum / Yu.N. Loginov, A.V.Ermakov, L.G. Grohovskaya, G.I. Studenok // Platinum Metals Review. – 2007 51(4), –P. 178–184.

64. Conditions of weakening and deformation resistance for platinum / Yu. N. Loginov, A. V. Ermakov, L. G. Grokhovskaya, G. I. Studenok // Цветные металлы. –2006. – № 6. – С. 85–87.
65. Разработка новых составов и технологий пластической обработки сплавов на основе палладия / Н. Н. Довженко, В. С. Биронт, С. Б. Сидельников [и др.] // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: межрегион. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2007. – С. 263–266.
66. К расчету параметров волочения проволоки из палладия на 21-кратной машине со скольжением / Н. Н. Довженко, С. Б. Сидельников, И. С. Гоголь [и др.] // Современные технологии в машиностроении: сб. ст. – Пенза: Знание, 2005. – С. 69–71.
67. Структурно-матричные модели для повышения эффективности процессов сортовой прокатки: Монография / Тулупов О. Н.. – Магнитогорск: МГТУ, 2002. Концепция построения современных моделей прокатки на сортовых станах / Моллер А. Б., Тулупов О. Н., Лимарев А. С., Назаров Д. В. // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – 2007. - № 1. – С. 64–67.
68. Разработка и применение баз данных технологических параметров с целью освоения и совершенствования современных сортопрокатных станов / Левандовский, С. А., Назаров Д. В., Лимарев А. С., Моллер А. Б., Тулупов О. Н. // Вестник МГТУ им. Г. И. Носова. – 2005. - № 4. – С. 36–40.
69. 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 О. Н.. – Магнитогорск, 2001. – 404 с.
70. 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.

71. 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. 46-52.
72. Пат. 2220218 Российская Федерация, МПК С22С 5/04. Сплав на основе палладия / Закстельская О. А., Колтыгин В. М. [и др]; опубл. 27.12.03.
73. Пат. 2244762. Российская Федерация, МПК С22С 5/04. Сплав на основе палладия белого цвета / Ермаков А. В., Горских Т. С., Сюткина В. И.; опубл. 01.20.05.
74. Пат. 2352660 Российская Федерация. МПК С22С 5/04. Сплав на основе палладия / Сидельников С. Б., Тихов И. В., Довженко Н. Н. [и др.]; опубл. 20.04.2009, Бюл. № 11.
75. Пат 2392339 Российская Федерация. МПК С22С 5/04. Сплав на основе палладия / Довженко Н. Н., Сидельников С. Б., Биронт В. С. [и др.] опубл. 20.06.2010, Бюл. № 17.
76. Пат. 2479655 Российская Федерация. МПК С22С 5/04. Сплав на основе палладия 500-й пробы / Усков И. В., Беляев С. В., Сидельников С. Б. [и др.]; опубл. 20.04.2013, Бюл. № 11.
77. Пат. 2479656. Российская Федерация. МПК С22С 5/04. Литейный ювелирный сплав белого цвета на основе палладия / Усков И. В., Беляев С. В., Сидельников С. Б. [и др.]; опубл. 20.04.2013, Бюл. № 11.
78. Пат. 2568406 Российская Федерация. МПК С22С 5/04 В23К 35/26. Сплав припойный на основе палладия 850-й пробы / Довженко Н. Н., Сидельников С. Б., Беляев С. В. [и др.]; опубл. 20.11.2015, Бюл. № 32.
79. Пат. 2479655 Российская Федерация. МПК С22С 5/04. Сплав на основе палладия 500-й пробы / Усков И. В., Беляев С. В., Сидельников С. Б. [и др.]; опубл. 20.04.2013, Бюл. № 11.

80. Пат. 2591900. Российская Федерация. МПК С22С 5/04 В23К 35/26. Сплав припойный на основе палладия 850-й пробы / Довженко Н. Н., Сидельников С. Б., Беляев С. В. [и др.]; опубл. 20.07.2016, Бюл. № 20.
81. Пат. GB861646А, Великобритания, МПК С22С. An improved electrical resistance alloy / Alan Sydney Darling, опубл. 28.07.1959.
82. Пат. US005484569А США, МПК С22С 5/06. Silver palladium alloy / Arthur S. Klein, Orange; Edward F. Smith, III, Madison, опубл. 16.01.1996.
83. Пат. 2561562 Российская Федерация, МПК С22С 5/04, С22! 1/02. Платиновый сплав для ювелирных изделий и способ изготовления сплава / Гумеров Ф. Ф.; опубл. 27.08.2015, Бюл. № 24.
84. Пат. 2650220 Российская Федерация, МПК С22С 5/04. Ювелирный сплав платины 585-й пробы / Чупров И. В., Гурская В. Ю., Павлов Е. А. [и др.]; опубл. 11.04.2018, Бюл. № 11.
85. Пат. 2645624 Российская Федерация, МПК С22 С5/04. Ювелирный сплав платины 585-й пробы для микролитья / Гурская В. Ю., Чупров И. В., Пузин Е. Н., Овчинников С. В.; опубл. 26.02.2018, Бюл. № 6.
86. Пат. WO2005075690 США, МПК С22С 5/04. Platinum alloy and method of production thereof / Tews P.; опубл. 18.08.2005.
87. Пат. США US2020131603 США, МПК А44С27/00. Metal alloys including platinum are disclosed/ Kaye L., Aron-Dine Sh., Lim A. [et al.]; опубл. 30.04.2020.
88. Пат. 2751061 Российская Федерация. МПК С22С 5/04. Сплав на основе платины 585-й пробы / Лопатина Е. С., Сидельников С. Б., Дитковская Ю. Д. [и др.]; опубл. 07.07.2021, Бюл. № 19.
89. Пат. 2751063 Российская Федерация. МПК С22С 5/04. Сплав на основе платины 585-й пробы / Лопатина Е. С., Сидельников С. Б., Дитковская Ю. Д. [и др.]; опубл. 07.07.2021, Бюл. № 19.
90. Пат. 2574936. Сплав на основе палладия 850 пробы / Довженко Н.Н., Сидельников С. Б., Беляев С.В. [и др.]; опубл. 10.06.2014.

91. Пат. 2788879. Сплав на основе палладия / Сидельников С. Б., Лопатина Е. С., Лопатин В.А. [и др.]; опубл. 25.01.2023, Бюл. № 3.
92. 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.]; опубл. 20.02.2014, Бюл. № 5.
93. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015612273. PROVOL / С. Б. Сидельников, С. В. Беляев, О. С. Лебедева [и др.]; зарегистр. 16.02.2015; опубл. 20.03.2015, Бюл. № 3.
94. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620276. Металлы и оборудование / Н. Н. Довженко, С. Б. Сидельников, О. С. Лебедева [и др.]; зарегистр. 13.02.2015; опубл. 20.03.2015, Бюл № 3.
95. Cockcroft M.G., Latham D.J. Ductility and the Workability of Metals // Journal of the Institute of Metals.1968.Vol. 96. P. 33–39.
96. Оценка поврежденности металла при холодной пластической деформации с использованием модели разрушения Кокрофта–Латама / Боткин А.В., Валиев Р.З., Степин П.С., Баймухаметов А.Х. // Деформация и разрушение материалов. 2011. №7. С. 17–22.
97. Numerical estimation of the probability of metal failure under hot plastic deformation by means of the Cockroft-Latham criterion / Matveev M. A. // Scientific-technical Bulletin of SPbSPU. Natural and engineering Sciences. 2017. Vol. 23. No. 2. P. 109-126.
98. Development of non-destructive modes of warm rolling of nanocrystalline beryllium by mathematical modeling methods / Kolbasnikov N. G., Mishin V. V., Shishov I. A. [et al.] // Deformatsiya i razrushenie materialov. 2013. No. 9. pp. 14–24.
99. Computer simulation, analysis of force and temperature-speed parameters of the process of combined machining of Al-Mg-Sc alloys / Sidelnikov S.B., Yakivyyuk O.V., Baranov V.N. [et al.] // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 544 (2019) 012018.

100. Разработка, моделирование и исследование технологии получения длинномерных деформированных полуфабрикатов из алюминиево-магниевого сплава с низким содержанием скандия / С. Б. Сидельников, Якивбюк О.В., Баранов В.Н. [и др.] // Цветная металлургия. Известия высших учебных заведений. – 2019. – №6. – с. 51 – 59.
101. Технология прокатки / Сидельников С.Б., Константинов ИЛ Ворошилов Д.С. - 3 изд. Москва: НИЦ ИНФРА-М, СФУ, 2021.
102. Калибровка прокатных валков / Смирнов В.К., Шилов В.А., Инатович Ю.В. Учебное пособие для вузов. Издание 2-е переработанное и дополненное. М.: Теплотехник, 2010. - 490 с.
103. Перлин И. Л., Ерманок М. З. Теория волочения: учеб. для вузов /– М.: Металлургия, 1971.
104. Теория продольной прокатки / Целиков А. И., Никитин Г. С., Рокотян С. Е. – М. : Металлургия, 1980
105. Теория прокатки. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Грудев А.П. – М.: Интернет Инжиниринг, 2001. – 280 с.
106. Металловедение: учеб. В 2т. Т.1. Основы металловедения / И. И. Новиков, В. С. Золоторевский, В. К. Портной [и др.]; под общ. ред. В. С. Золоторевского. – М.: Издат. дом МИСиС, 2014.
107. Ювелирное дело / Марченков В. И.. – М.: Высш. шк., 1992.
108. Совершенствование технологических режимов изготовления проволоки ювелирного назначения из новых сплавов драгоценных металлов / С. Б. Сидельников, Ю.Д. Дитковская, В.А. Лопатин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – Вып. 11: в 3 ч. Ч. 1. – Тула: Издательство ТулГУ, 2017. – С. 27-33.
109. Computer simulation and analysis of the parameters of the drawing process of thin wire from the alloy PD-5Ni / Sidelnikov S., Bindareva K., Lopatina E., // Key Engineering Materials, 2019, 805, 13–18.
110. Study of the stress-strain state of the process of drawing wire from an alloy of

palladium with nickel / Sidelnikov S., Lopatin V., Dobrovenko M., // Materials Science Forum, 2020, 992, 504–510.

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

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

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

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

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

Утверждаю
 Руководитель производства
 технических изделий ОАО «Красцветмет»
 Д.А. Тепляшкин

АКТ

опытно-промышленной апробации усовершенствованной технологии изготовления полос из сплава ПЛРд80-20

В 2023 году в цехе по производству технических изделий ОАО «Красноярский завод цветных металлов им. В.Н. Гулидова» проведены исследования технологии получения и свойств листового проката из сплава ПЛРд80-20 толщиной 1,0 мм для изготовления фильерных питателей с применением усовершенствованного режима обжатий при прокатке и была произведена экспериментальная партия полос из этого сплава.

Исследования проведены сотрудником ОАО «Красцветмет» Лопатиным Владимиром Александровичем, выполняющими диссертационную работу по данной научной тематике при обучении в аспирантуре института цветных металлов Сибирского федерального университета (научный руководитель – д.т.н., проф. С.Б. Сидельников, научный консультант - к.т.н. доц. Лопатина Е.С.).

В результате проведенных промышленных экспериментальных исследований на ОАО «Красцветмет» при варьировании обжатий при прокатке были определены критические значения твердости металла, превышение которых сопровождалось разрушением прокатываемых полос. Путем моделирования прокатки в пакете DEFORM 3D были установлены рациональные режимы обжатий при листовой прокатке заготовки (поковки) толщиной 28,0 мм в полосу толщиной 1,0 мм с средним единичным обжатием 0,3 мм за проход с использованием двух промежуточных и одного окончательного отжигов (таблица).

Таблица

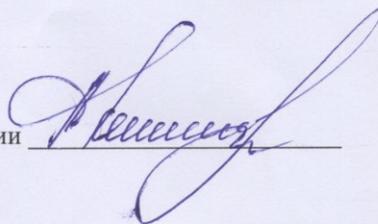
Опера-ция	Толщи-на полу-фабри-ката мм	Сумма-ное обжа-тие, мм	Едини-чное обжатие, мм	Твер-дость HV, кг/мм ²	Временное сопротивление, МПа	Предел теку-чести, МПа	Относи-тельное удлине-ние, %
ковка	28,0	-	-	106	418	-	37
прокатка	24,5	3,5	0,3	159	477	-	-
прокатка	21,5	3,0	0,3	185	555	-	-
прокатка	18,5	3,0	0,3	195	585	-	-
прокатка	15,5	3,0	0,3	203	609	-	-
прокатка	12,5	3,0	0,3	215	645	-	-
прокатка	9,5	3,0	0,3	240	767	752	10
отжиг	9,5	-	-	103	424	199	41
прокатка	6,5	3,0	0,3	195	585	-	-
прокатка	3,5	3,0	0,3	223	669	-	-
прокатка	2,0	1,5	0,3	240	786	772	6
отжиг	2,0	-	-	101	393	119	39
прокатка	1,0	1,0	0,2	232	700	675	7
отжиг	-	-	-	102	423	127	36

Эти режимы затем были опробованы экспериментально при получении полос из сплава ПлРд80-20 на промышленном стане ОАО «Красцветмет» LS 500x280 фирмы MARIO Di MAIO. Анализ результатов их применения и изменения механических свойств (см. табл.) показывает, что использование предлагаемого режима прокатки, по сравнению с действующим, приводит к снижению количества проходов при прокатке и, соответственно, к значительному увеличению производительности.

После проведенных исследований получены следующие основные результаты:

- для сплава ПлРд80-20 получены экспериментальные данные по механическим свойствам и твердости деформированных и отожженных полуфабрикатов, которые необходимы для анализа энергосиловых параметров прокатки и оценки возможности разрушения полос в процессе деформационной обработки;
- ковровая заготовка толщиной 28,0 мм, используемая для прокатки, после отжига при температуре 1100 °С и времени выдержки 1 ч имеет необходимый для интенсивной деформации уровень механических свойств;
- экспериментальным путем для исследуемого сплава установлено значение критической твердости металла HV при заданной величине обжатия при прокатке, равное 240 кг/мм² по Виккерсу, при превышении которого происходит разрушение металла;
- физическое и компьютерное моделирование процесса прокатки по предлагаемому режиму позволило снизить дробность деформации и установить, что процесс прокатки протекает стабильно, поэтому возможно применение больших единичных степеней деформации и уменьшение количества проходов в 1,5 раза;
- рассчитанный с использованием программных средств режим обжатий при листовой прокатке заготовки толщиной 28,0 мм в полосу толщиной 1,0 мм с суммарным обжатием 96,4 % с использованием двух промежуточных и одного окончательного отжигов опробован в промышленных условиях и позволяет получать качественные полуфабрикаты с требуемым уровнем механических свойств для последующей обработки;
- промежуточные и окончательные отжиги при температуре 1100 °С и времени выдержки 1 ч дают повышение пластичности в 4-6 раз, что позволяет применять большие степени деформации после достижения критической твердости проката;
- расчет энергосиловых параметров при использовании предлагаемого режима показал, что сила и момент прокатки не превышают допустимых значений применяемого оборудования, что подтвердили результаты промышленной прокатки на стане LS 500x280;
- результаты исследований, представленные в данной работе, могут быть рекомендованы для совершенствования технологии изготовления полос из сплава ПлРд80-20 в условиях ОАО «Красцветмет».

Руководитель по изготовлению продукции



А.А. Роговой



Утверждаю
 Руководитель производства
 технических изделий
 Д.А. Тепляшкин

АКТ

опытно-промышленной апробации усовершенствованной технологии изготовления проволоки для катализаторных сеток из сплава ПдН-5

В 2021 году в цехе по производству технических изделий ОАО «Красноярский завод цветных металлов им. В.Н. Гулидова» проведены исследования технологии получения проволоки из сплава ПдН-5 диаметром 0,060-0,075 мм с применением усовершенствованного режима волочения и была произведена экспериментальная партия проволоки из этого сплава.

Исследования выполнены сотрудниками ОАО «Красцветмет» Лопатиным Владимиром Александровичем и Добровенко Михаилом Петровичем, выполняющими диссертационные работы по данной научной тематике при обучении в аспирантуре института цветных металлов и материаловедения Сибирского федерального университета (научный руководитель – д.т.н., проф. С.Б. Сидельников).

Анализ изменения механических свойств (таблица) показывает, что использование предлагаемого режима волочения по сравнению с действующим приводит к повышению пластических свойств металла и стабильности процесса волочения, а также соответствует требованиям к готовой проволоке для изготовления улавливающих сеток каталитических систем. Выравнивание единичных вытяжек путем перераспределения степени деформации в некоторых переходах при реализации предлагаемого режима волочения приводит к снижению упрочнения металла, и, как следствие, снижению количества обрывов при получении проволоки малых диаметров из сплава ПдН-5.

Таблица
 Механические свойства проволоки из сплава ПдН-5 в отожженном состоянии, полученной многократным волочением по действующему и предлагаемому режимам обработки

Диаметр D, мм	Сопротивлени е срезу σ_b , МПа	Относительно е удлинение δ , %	Диаметр p D, мм	Сопротивлени е срезу σ_b , МПа	Относительно е удлинение δ , %
Действующий режим			Предлагаемый режим		
0,172	361	27,1	0,172	338	29,6
0,150	362	25,7	0,150	331	27,5
0,120	365	22,3	0,120	340	25,0
0,090	354	15,8	0,090	310	17,2
0,085	324	15,7	0,085	304	16,5
0,075	345	16,5	0,075	316	17,3
0,060	434	17,3	0,060	390	18,1

После проведенных исследований получены следующие основные результаты:

- получены экспериментальные данные по механическим свойствам полуфабрикатов на всех этапах технологического процесса (литья,ковки, прокатки, волочения), которые необходимы для анализа энергосиловых параметров и оценки возможности их разрушения в процессе термомеханической обработки;
- рассчитанный с использованием авторских программных средств режим волочения проволоки диаметром 0,060-0,075 мм опробован в промышленных условиях и позволяет получать качественные полуфабрикаты для изготовления улавливающих сеток каталитических систем;
- моделирование процесса волочения по действующему и предлагаемому режимам позволило установить, что деформация металла протекает стабильно с повышением температуры металла в очаге деформации, что ведет к снижению сопротивления деформации металла, снижению прочностных и повышению пластических свойств, поэтому возможно применение больших единичных степеней деформации при волочении и уменьшение количества переходов;
- величина рассчитанных напряжений при моделировании процесса волочения по предлагаемому режиму не превышает сопротивления разрыву для проволоки данных размеров, поэтому возможно получение тонкой проволоки из сплава ПдН-5 без обрывов, что подтвердили результаты экспериментальных исследований в производственных условиях;
- установлено, что коэффициент запаса при волочении по предлагаемому режиму обеспечивает стабильный процесс деформации металла без обрывов и, как следствие, увеличение производительности на 5-10% и выхода годного металла на 1-3%;
- обработка металла по предлагаемому режиму дает возможность получить полуфабрикаты различного диаметра, уровень свойств которых соответствуют требованиям по пластическим свойствам, предъявляемым к готовой проволоке для изготовления улавливающих сеток каталитических систем.
- результаты исследований, представленные в данной работе, могут быть рекомендованы для совершенствования технологии изготовления проволоки из сплава ПдН-5 в условиях ОАО «Красцветмет».

Для окончательного заключения о пригодности усовершенствованной технологии изготовления проволоки для каталитических сеток из сплава ПдН-5 и внедрения ее в производство необходимо проведение серии дополнительных испытаний и исследований.

Главный технолог



П.А. Хориков

