

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

На правах рукописи



Первухин Александр Евгеньевич

ПРОЯВЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В
ПРОЦЕССАХ ВОЛОЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ ИЗ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

05.16.05 - Обработка металлов давлением

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Логинов Юрий Николаевич
доктор технических наук,
профессор

Екатеринбург – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ПАТЕНТНО-ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ	7
1.1. Свойства и роль сплавов платины в промышленности	7
1.2. Эффекты, возникающие при термомеханической обработке чистого золота	9
1.3. Специфика процесса волочения.....	19
1.4. Варианты поверхностной обработки проволоки	26
1.5. Программное обеспечение для анализа напряженно-деформированного состояния в операциях обработки проволоки	28
1.6. Выводы по разделу и постановка задачи исследования	34
2. ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОВОЛОКИ ИЗ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ И ИХ СПЛАВОВ	36
2.1. Исследование сопротивления деформации сплава Pt _{92,5} Pd ₄ Rh _{3,5}	36
2.2. Исследование сопротивления деформации золота марки Зл99,99	43
2.3. Выводы по разделу.....	48
3. ПОВЕДЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ ПРОВОЛОКИ ИЗ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ	49
3.1. Поведение дефектов при волочении тончайшей проволоки из платины.....	49
3.2. Расчет деформированного состояния при волочении с наличием в металле посторонней частицы.....	55
3.3. Последствия волочения проволоки при наличии локальных пережимов.....	60
3.4. Перераспределение деформации в операциях многопроходного волочения.....	66
3.5. Выводы по разделу.....	72
4. ЭФФЕКТЫ СОВМЕСТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ОПЕРАЦИЙ ВОЛОЧЕНИЯ И СКАЛЬПИРОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПРОВОЛОКИ ИЗ ЦВЕТНЫХ И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ.....	74
4.1. Экспериментальный анализ процесса скальпирования проволоки.....	74
4.2. Теоретический анализ процесса скальпирования проволоки.....	82
4.3. Аналитическое описание поля скоростей в зоне поверхностного упрочнения при скальпировании	90
4.4. Сравнение полученного решения с известными данными.....	94
4.5. Анализ результатов применения операции скальпирования для последующей обработки давлением	95

4.6. Практическое применение результатов исследования	105
4.7. Выводы по разделу	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	113
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	115
ПРИЛОЖЕНИЕ П1.....	131

ВВЕДЕНИЕ

Благородные металлы, такие как золото и платина, нашли широкое применение не только в ювелирном деле, но и в промышленности благодаря своим уникальным свойствам, в том числе химической стойкости. Сплавы платины, кроме того, отличаются повышенными жаропрочностью и тугоплавкостью, сопротивлением высокотемпературной коррозии. Значительный процент полуфабрикатов из благородных металлов выпускается в виде проволоки.

Проволока из сплавов платины часто применяется для изготовления химически стойких фильтров, каталитических сеток, применяемых в химической промышленности. Создание и совершенствование биокаталитических, биосинтетических и биосенсорных технологий входит в перечень критических технологий Российской Федерации.

Проволока из чистого золота применяется для изготовления токосъемной аппаратуры высокой степени надежности. Последнее применение касается выполнения задач, сформулированных в области разработки информационно-телекоммуникационных систем, эти задачи входят в перечень приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации.

Вместе с тем, технологические процессы обработки золота, платины и их сплавов являются недостаточно изученными, в том числе по причине отсутствия сведений о реологических свойствах обрабатываемых материалов и дороговизне самих материалов. В связи с этим, исследования, направленные на изучение реологии указанных благородных металлов и на совершенствование приемов их обработки следует **считать актуальными**.

Степень разработанности темы включает в себя изучение такой важной величины для выполнения расчетов как сопротивление деформации. На основе полученных данных выполнены расчеты напряженно-деформированного состояния в процессах волочения и скальпирования указанных материалов в производственных условиях.

Целью работы является выработка рекомендаций по совершенствованию процесса производства тонкой и тончайшей проволоки из благородных металлов.

Для достижения данной цели сформулированы **следующие задачи**:

- изучить сопротивление деформации сплава платины Pt92,5Pd4Rh3,5 и чистого золота в холодном состоянии;
- поставить и решить краевые задачи поведения дефектов в процессах тонкого и тончайшего волочения;
- поставить и решить краевые задачи, описывающие напряженно-деформированное состояние в процессе скальпирования
- определить взаимное влияние процессов волочения и скальпирования друга на друга, а также на изменение свойств деформируемого материала.

Научная новизна работы заключается в получении новых данных о реологических свойствах золота и сплава платины, определении напряженно-деформированного состояния этих материалов в процессах волочения и скальпирования.

Теоретическая значимость работы заключается в результатах математического моделирования процессов волочения и скальпирования, которые расширяют знания об этих видах обработки металлов.

Практическая значимость работы состоит в формулировке рекомендаций по рационализации процессов холодной обработки указанных материалов.

Методология исследования построена на основных концепциях механики деформируемого тела, в том числе на применении основных гипотез (изотропности, несжимаемости и др.) и соответствующего математического аппарата.

Методы исследования включают:

- определение сопротивления деформации при испытаниях на растяжение проволочных образцов в холодном состоянии при комбинации с измерением условного предела текучести на образцах из многопроходного процесса волочения;

- применение сканирующей электронной микроскопии для выявления дефектов с определением химического состава включений;
- приближенное решение краевых задач методом конечных элементов в программных модулях РАПИД, ABAQUS с целью определения напряженно-деформированного состояния в процессах волочения и скальпирования.

Степень достоверности результатов подтверждена статистической обработкой полученных данных, сравнением с известными аналогами из технической литературы.

Апробация результатов работы выполнена путем докладов итогов исследований на конференциях и публикацией в рецензируемых изданиях, в том числе, зарубежных и из перечня ВАК.

- Работа выполнена в рамках исследований, включенных в следующие научные программы.
- Перечень приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации, утверждёнными приказом Президента России от 7 июля 2011 года № 899.
- Федеральный образовательный стандарт высшего образования по направлению 22.06.01 Технология материалов, утвержденная приказом Минобрнауки России от 30 июля 2014 № 888.
- Проект N3 «Разработка технологии изготовления «легких» катализаторных сеток», утвержденный приказом №15-4 от 21.04.2016 генерального директора ООО «ЕЗОЦМ-Инжиниринг» Гроховского С.В. и генерального директора ОАО «ЕЗОЦМ» Боровкова Д.А. и плану Научно-исследовательских работ по совершенствованию технологии изготовления продукции из драгметаллов Отдела главного технолога на 2016 г.

1. ПАТЕНТНО-ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1.1. *Свойства и роль сплавов платины в промышленности*

Широкое использование платины в промышленности обусловлено ее физико-химическими свойствами в сочетании с высокими технологическими характеристиками – пластичностью, свариваемостью и др. Основными областями применения платины и ее сплавов являются [1, 2]:

- химическая промышленность (катализаторные сетки для производства азотной кислоты, лабораторная посуда, химические соединения и порошки);
- электроника и электротехника (контакты разрывные и скользящие, контакт-детали, термоэлектродная проволока);
- медицинская промышленность (стоматологические материалы, электроды для стимуляции сердца);
- ювелирная промышленность (полуфабрикаты для ювелирных изделий);
- металлургическая промышленность (термопреобразователи, стандартные образцы, пробирные иглы, припои);
- стекольная промышленность (стеклоплавильные аппараты и фильерные питатели для производства стекловолокна и базальтовых нитей; тигли, котлы, сливные устройства и мешалки для производства оптического волокна).

Свойства платины часто описываются применительно к ее ювелирному применению, где она выступает как основа сплавов [3, 4].

В последнее время определенный объем исследований в области деформации платины и ее сплавов выполнен в Уральском Федеральном университете совместно с АО «Екатеринбургский завод ОЦМ» [5 - 7].

Так, в работе [8] приведены новые данные о реологических свойствах сплава ПлПдРдРу 81-15-3,5-0,5, используемого для применения в каталитических системах химической промышленности. В опытах методом волочения ступенчато уменьшали диаметр проволоки с отбором образцов на диаметрах 1,21, 0,99, 0,82, 0,67 и 0,51 мм при значениях степени деформации

0,401, 0,778, 1,182, 1,728, что отвечает относительным удлинениям 33, 54, 69 и 82 % соответственно. Практическая ценность полученных результатов состоит в возможности использования полученных зависимостей и аппроксимированных данных для постановки и решения конкретных краевых задач обработки металлов давлением, например, методом конечных элементов.

Последующие исследования, в основном, были направлены на изучение особенностей деформации листовой прокаткой [9] и штамповкой элементов стеклоплавильных сосудов из сплавов платины [10 - 13].

Приходится мириться с относительно низкой прочностью платины при повышенных температурах. Этот недостаток установил жесткие ограничения на конструкцию оборудования из платины и обозначил необходимость создания новых материалов на основе платины, которые были бы более устойчивы к деформации ползучести и разрушению при температурах значительно выше половины их абсолютной температуры плавления.

В таблице 1.1 приведены основные свойства ZGS-Pt, обычной плавленной платины и сплава Pt - 10% Rh. Низкотемпературные свойства дисперсно-упрочненной платины находятся примерно посередине между свойствами чистой платины и сплава платины с 10% родия. Рисунок 1.1, а показывает, что дисперсно-упрочненная платина обрабатывается легче, чем сплав Pt - 10% Rh. Процесс разупрочнения в ней также происходит быстрее (рисунок 1.1, б).

Таблица 1.1 – Свойства плавленной платины, ZGS-Pt и сплава Pt - 10% Rh

Материал	Плотность, кг/м ³	$\rho \cdot 10^{-8}$, Ом·м	σ_B , МПа*	δ , %*	HV*
ZGS-Pt	21380	11,12	182	42	60
Плавленная платина	21450	10,6	124	40	40,4
Pt - 10% Rh	20000	18,4	331	35	75
*После отжига					

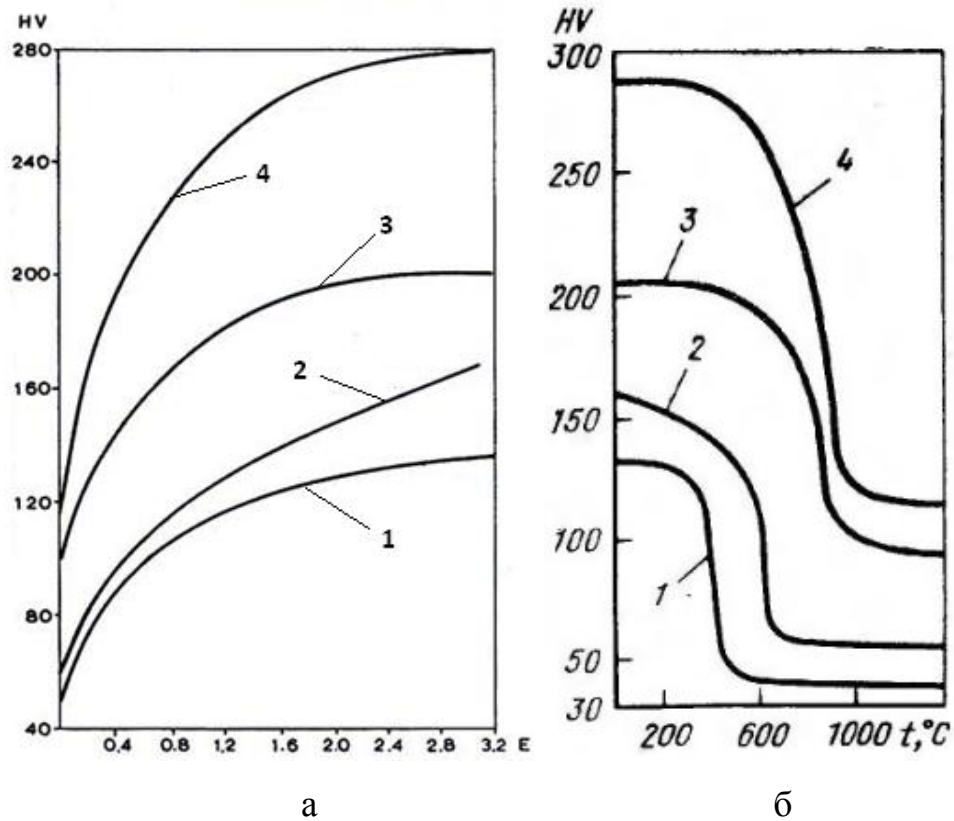


Рисунок 1.1 – Зависимости увеличения твердости от степени деформации (а) и снижения (б) платины, ZGS-Pt и сплавов с родием ($\varepsilon = \ln(1 + \delta)$): 1 – Pt; 2 – ZGS-Pt; 3 – Pt - 10% Rh; 4 – Pt - 20% Rh

Применение сплавов платины для изготовления проволоки связано, в большей степени с изготовлением катализаторных сеток для получения минеральных удобрений [14 - 16].

1.2. Эффекты, возникающие при термомодеформационной обработке чистого золота

Получение золота высокой чистоты на уровне содержания 99,99 и 99,999 % в свое время стало большим достижением в аффинажном производстве. Как правило, из такого материала изготавливают тонкую и особо тонкую проволоку методом волочения. Из-за ограничений по частным вытяжкам за проход процесс волочения оказывается многопроходным и связан с накоплением деформации. От накопленной деформации зависит температура начала рекристаллизации [17]. После достижения относительного обжатия свыше 99% температура начала

рекристаллизации может оказаться ниже комнатной и проволоку не удастся выпустить в нагартованном состоянии. Поэтому такой объект как золотая проволока должен рассматриваться в совокупности влияния деформации и структурного состояния.

Повышенная чистота золота приводит к уменьшению прочностных свойств изготавливаемых изделий. Для их восстановления некоторые авторы стали предлагать применение методов равноканального углового прессования РКУП [18, 19]. Отмечено, что прием особенно эффективен для нагартовки чистого золота и сплавов Au-Ag, где прочность может быть увеличена в 3 или 4 раза.

В статье [20] приведены данные по испытаниям на растяжение проволоки из золота 99,99% при различных диаметрах 12,5...60 мкм и скоростях испытаний 0,001...0,1 мм/с. Базовая длина образца составляла 30 мм, поэтому скорость деформации составила около 10^{-5} ... 10^{-3} 1/с. На рисунке 1.2 видно, что для малых диаметров проволоки характерно появление пилообразных колебаний кривой упрочнения, что обычно соотносят с проявлением эффекта Портевена-ле Шателье [21, 22]. Условием для появления колебаний является наличие высоких напряжений, при которых создается необходимая степень структурной микронеоднородности кристаллической решетки, связанной с появлением в ней больших амплитуд локальных внутренних напряжений. Обычно эффект соотносят с материалом, получившим высокий уровень накопленных деформаций. Действительно, на графике он активно проявляется для проволоки диаметром 12,5...15 мкм.

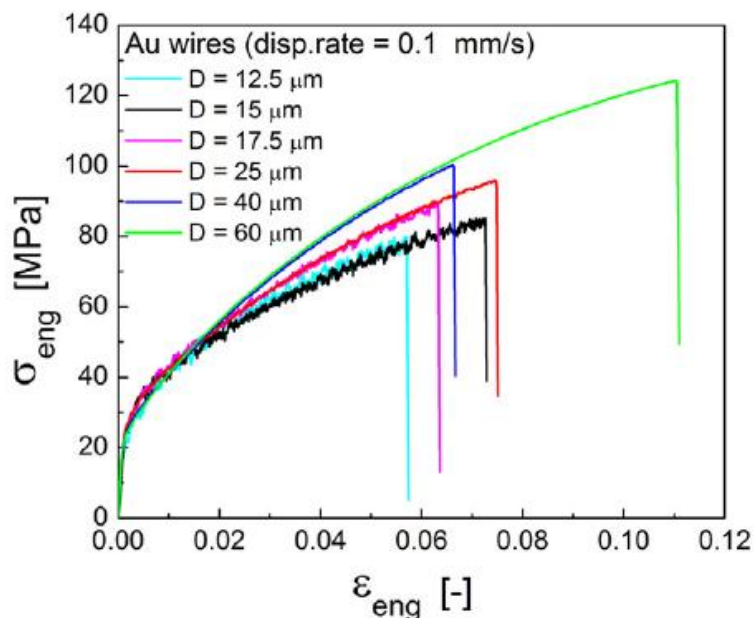


Рисунок 1.2 – Зависимость условного напряжения σ_{eng} от условной деформации ϵ_{eng} при испытании проволоки различных диаметром D из золота 99,99% со скоростью 0,1 мм/с

Определение механических свойств микропроволоки из золота 99,99 % показало, что при уменьшении диаметра предел текучести сначала возрастает, а затем уменьшается. Это уменьшение происходит при диаметре 17,5 мкм. Его можно связать с наступлением процесса рекристаллизации вследствие накопления высокого уровня деформации. Примерно к этому же размеру относится начало проявления эффекта Портевена-ле Шателье в виде пилообразных колебаний функции. Как показывают ориентационные карты поперечного сечения, показанные на рисунке 1.3, в проволоке практически полностью отсутствуют зерна с ориентацией $\langle 101 \rangle$, а по мере утонения на фоне ориентации $\langle 111 \rangle$ усиливается ориентация $\langle 001 \rangle$. Подобные явления описаны применительно к деформации проволоки из чистой меди [23].

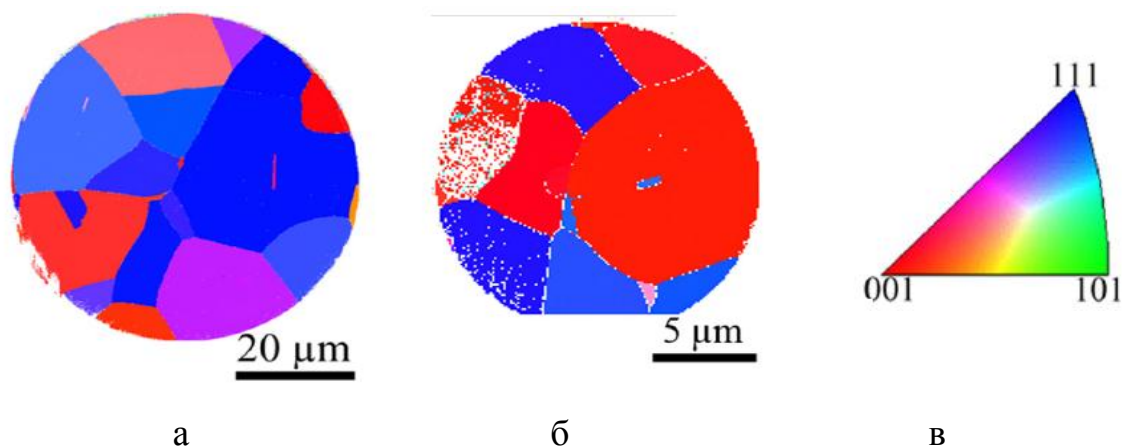


Рисунок 1.3 – Ориентационные карты для проволоки из золота 99,99% диаметром 60 мкм (а), 15 мкм (б) и цветовой ключ (в)

Следует отметить, что влияние немонотонности кривой упрочнения может проявляться в изменении характера напряженно-деформированного состояния в процессах обработки металлов давлением [24, 25].

Обширное исследование физических и механических свойств золотой проволоки приведено в статье [26]. Проволочную заготовку диаметром 7 мм изготавливали методом вакуумного литья и волочением до диаметра 24 мкм.

Общий процент примесей составил не более 100 ppm, что соответствует степени чистоты металла 99,99%. Как видно из графика зависимости относительного удлинения от температуры отжига на рисунке 1.4, пластичность стала увеличиваться при достижении температуры 400°C. Это говорит о довольно высокой температуре начала рекристаллизации.

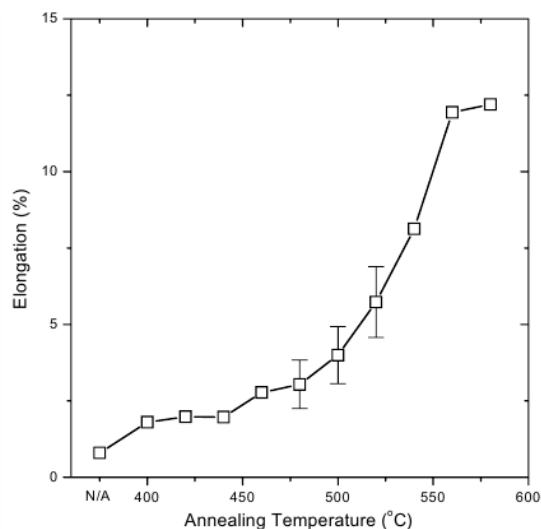


Рисунок 1.4 – Зависимость относительного удлинения от температуры отжига при испытаниях золотой проволоки 99,99%

Однако следует отметить, что примесный состав металла оказался не случайным. Судя, по приведенным сведениям, речь шла о принудительном микролегировании кальцием (10...50 ppm) и германием (10...40 ppm). Как известно, кальций часто используется для искусственного повышения температуры начала рекристаллизации для золота, что позволяет выпускать продукцию в твердом состоянии без опасности самоотжига.

В работе [27] приведены результаты исследования по определению влияния концентрации кальция (Ca) в диапазоне 20...60 ppm на механические свойства проволоки из золота (Au), имеющей сверхмелкое зерно (ultra-fine grain UFG). Было замечено, что микролегирование Ca одновременно повышает прочность и удлинение до разрушения (увеличивается пластичность) проволоки UFG Au (рисунок 1.5), в то время как средний размер и ориентация зерна остаются неизменными. Обсуждаются возможные механизмы, которые могли бы объяснить эффект.

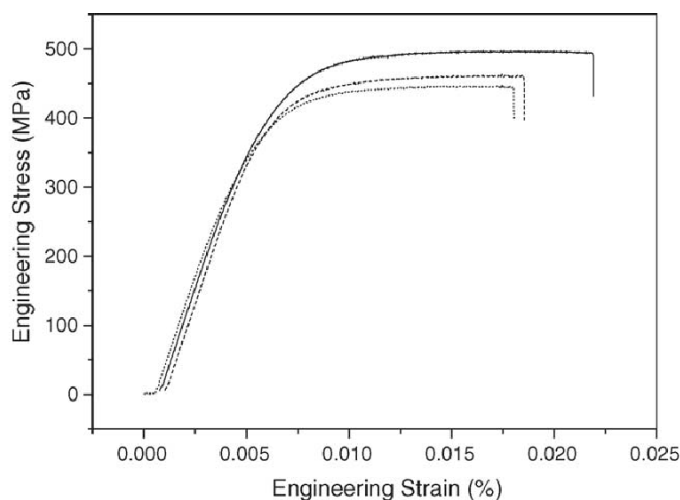


Рисунок 1.5 – Кривые растяжения в условных напряжениях и деформациях для золота, микролегированного кальцием (линии графика снизу-вверх, соответственно 20, 40 и 60 ppm)

Эффект упрочнения чистого золота описан при добавлении в него циркония, церия и кремния [28]. Авторы статьи [29] подвергли испытанию высокочистое золото, состоящее из крупных зерен ($d = 1,7$ мкм). Они многократно подвергли его термомеханической обработке методом всестороннейковки при комнатной температуре и теплomu отжигу. Исследованы эффекты небольшого добавления Ca (180 ат. ppm) в Au при поведении статической рекристаллизации (SRX) и ультратонкой эволюции зерна. Эффект SRX наблюдался в образце Au до кумулятивной деформации $\Sigma\Delta = 1,2$ даже при 180 °C. После 2 цикловковки в образце Au получали мелкие зерна около 10 мкм. Вместе с тем сплав Au-Ca деформированный до $\Sigma\Delta\epsilon = 1,2$ не был подвержен SRX даже при отжиге при 270 C. Затем мелкозернистые сплавы Au и Au-Ca далее доводили до $\Sigma\Delta\epsilon = 8,0$ при комнатной температуре. Был достигнут средний (суб) размер зерна около 200 нм. Твердость увеличивалась с увеличением суммарной степени деформации. Хотя прочность на растяжение также повышалась с накопленной деформацией, потеря пластичности не проявлялась.

В работе [30] основное внимание уделяется влиянию скорости деформации на типичные микромеханические свойства, такие как прочность, твердость, модуль упругости и предел текучести 4N (чистота 99,99%) золота (Au).

Проводили серию испытаний с различными значениями скорости деформации $10^{-10} \dots 10$ мин⁻¹ золотой проволоки диаметром 25,4 мкм. Полученные данные показали, что микромеханические свойства проволоки 4N золота варьировались с различной скоростью деформации. Чем выше скорость деформации, тем выше прочность на растяжение, твердость, предел текучести и модуль упругости. Подобный же вывод был сделан в работе [31], касающейся деформации меди.

В исследовании [32] изучено поведение трех типов золотой проволоки: тип GL-2, 25 мкм, тип FA, 25 мкм и тип SR, 40 мкм) при температурах от комнатной до 250 °С и скорости порядка 1 мм/мин и 10 мм/мин. Результаты испытаний показали (рисунок 1.6), что предел прочности при растяжении всех трех типов проволоки уменьшался с температурой, особенно типа SR. Скорость деформации оказывает значительное влияние на проволоку типа SR, но мало влияет на проволоку типа GL-2 и FA.

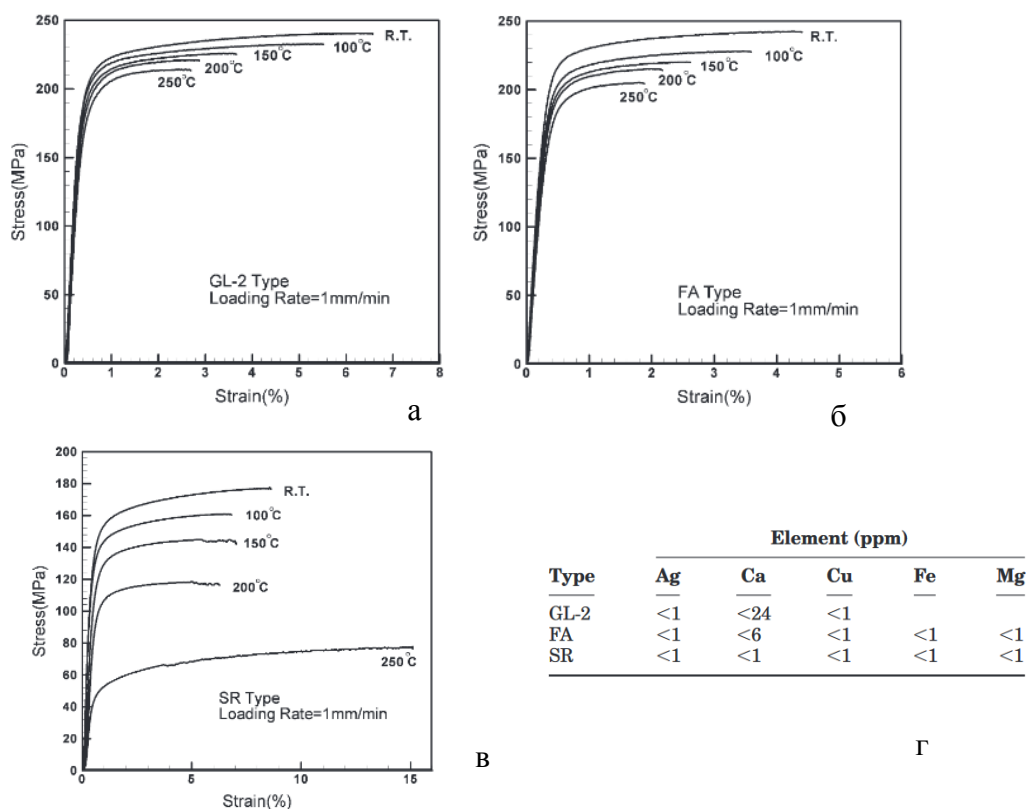


Рисунок 1.6 – Кривые упрочнения золота разного химического состава (а - в) и расшифровка состава по примесям (г)

В работе [33] была оценена чувствительность к скорости деформации сверхмелкозернистой золотой проволоки. Результаты показали, что чувствительность к скорости деформации мелкозернистого металла выше чем для крупнозернистого. Мелкозернистая Au-проволока отличается коэффициентом скоростной чувствительности на уровне $m = \frac{\partial(\ln\sigma)}{\partial(\ln\xi)} = 0,02$, где σ – напряжение, ξ – скорость деформации. Отмечается, что добавление кальция в металл проволоки не меняет m .

В статье [34] рассмотрены свойства проволоки из холоднотянутого золота, которая широко применяется для соединения микроэлектронных компонентов. Механическая стойкость проводов является залогом надежного функционирования электронных устройств. При надлежащем управлении процессами деформации и термообработки механические свойства конечных продуктов, такие как прочность на растяжение и удлинение, могут быть улучшены. В этом исследовании были рассмотрены изменения микроструктуры с приложением деформации закручивания и волочения.

В России исследования в области термомодеформационной обработки золота и его сплавов в последнее время активизированы в Сибирском Федеральном университете. Так, в работе [35] выполнен расчет показателей напряженного состояния и кинематических характеристик процесса волочения проволоки из сплавов золота 585 пробы.

В статье [36] изложены результаты экспериментальных исследований процесса получения проволоки из новых сплавов на основе золота 585 пробы. Приведены режимы сортовой прокатки и волочения, а также структура и свойства литых и деформированных полуфабрикатов из этих сплавов. Показана эффективность применения новых сплавов и технологий их обработки с позиций повышения показателя выхода годного продукции.

В работе [37] приведены результаты исследований структуры и свойств никельсодержащего сплава белого золота, который широко используется в производстве при изготовлении ювелирных цепей. Показано, что сплав имеет высокие прочностные, пластические свойства, равномерность их по длине и

технологичность, что позволяет при изготовлении длинномерных полуфабрикатов из него достигать значений степени деформации свыше 90% без промежуточных отжигов. С использованием результатов исследований скорректированы технологические режимы плавки, непрерывного литья и изготовления деформированных полуфабрикатов, применение которых обеспечило высокие потребительские свойства ювелирной продукции.

В работе [38] приведена технология изготовления длинномерных деформированных полуфабрикатов для изготовления ювелирных цепей из сплавов на основе золота, серебра и палладия. С применением авторских методик расчета деформационных и энергосиловых параметров холодной сортовой прокатки и волочения проведен анализ и спроектированы новые технологические режимы обработки для ряда новых сплавов драгоценных металлов, прошедшие опытно-промышленную апробацию на ОАО «Красноярский завод цветных металлов им. В.Н. Гулидова» и позволившие повысить эффективность производства ювелирных изделий. Разработанные маршруты позволяют обеспечить равномерное распределение вытяжек по проходам, тем самым создавая благоприятные условия для обработки металла и снижения вероятности возникновения брака готовой продукции.

Процесс дорнования заготовки из сплава золота исследован в работе [39]. Проблемами сплавообразования, структурных и фазовых превращений в сплавах, содержащих золото, активно занимался Институт физики металлов УрО РАН [40 - 43]. Как правило, эти исследования направлены на изучение процессов физики и механики деформации именно сплавов золота, а не чистого металла. Вместе с тем, термодиформационная обработка чистого золота отличается своими особенностями, что отмечено в работе [44].

В публикации [45] рассмотрены технологические особенности получения золота высокой чистоты (99,9 %). Приведены режимы гальванического золочения корпусов полупроводниковых изделий. Проанализированы свойства микросварных контактов алюминиевой проволоки с золотым покрытием корпусов изделий. Рассмотрена стойкость контактов Al-Au к температурным воздействиям и к коррозии.

В статье [46] приведены данные о влиянии включений, находящихся в золотой проволоке, на напряженно-деформированное состояние материала при волочении. На рисунке 1.7, а показан такой тип включения на основе оксида алюминия. На рисунке 1.7, б показано поле деформаций, окружающих такой дефект, при прохождении его через канал волоки. Видно, что уровень деформаций оказывается высоким, что может привести к обрыву проволоки.

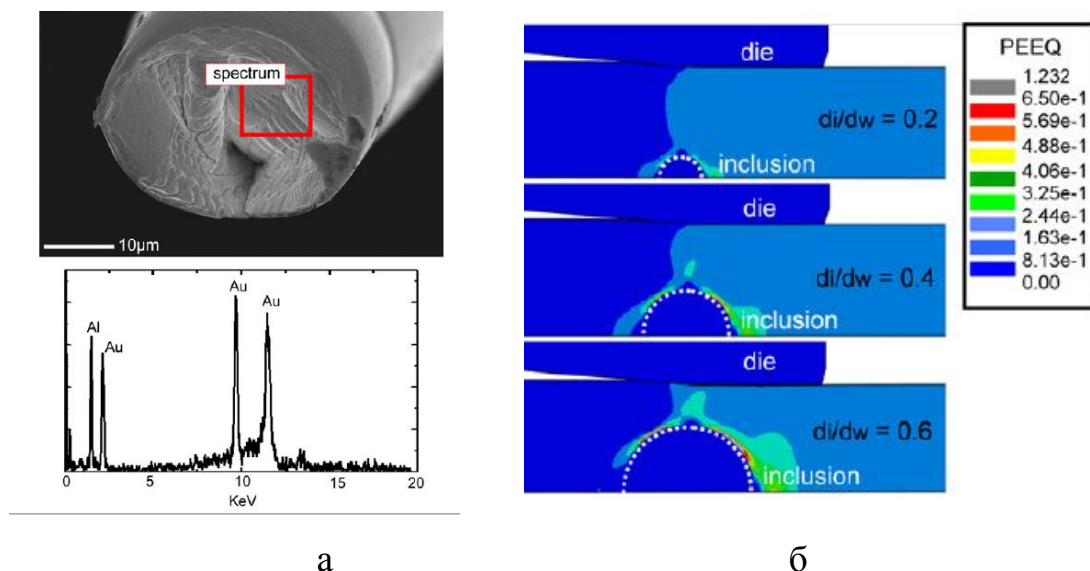


Рисунок 1.7 – Дефект в золотой проволоке со спектрограммой (а) и решение задачи волочения с дефектом различного сечения с полем распределения РЕЕQ (equivalent plastic strain – эквивалентная пластическая деформация)

При волочении тонкой проволоки из золота часто ограничивают частные обжатия из-за опасности повышенной обрывности. Так, патентом Японии JP2003053418 [47] предлагается при производстве золотой проволоки диаметром 25...50 мкм ограничивать частные обжатия до величин 8...15%. Патентом Японии JP2005297037 [48] специально для тонкой проволоки из золота 99,99% предложено применять тянущие шайбы волочильного стана из керамики, полученной методом горячего изостатического прессования.

1.3. Специфика процесса волочения

Процесс волочения имеет свою специфику по отношению к другим процессам обработки металлов давлением. Для моделирования процесса деформации золота часто применяют такой материал как чистая медь. Поэтому далее будут приведены материалы, касающиеся специфики обработки этого модельного материала. Методом верхней оценки получено распределение накопленных деформаций при волочении прутка, приведенное на рисунке 1.8, с относительным обжатием 21 % [49]. Здесь видно, что при увеличении полуугла волоки возможно повышение степени деформации на периферии проволоки в два раза по отношению к центру проволоки. Соответственно этому правилу изменяется и прочностные свойства материала.

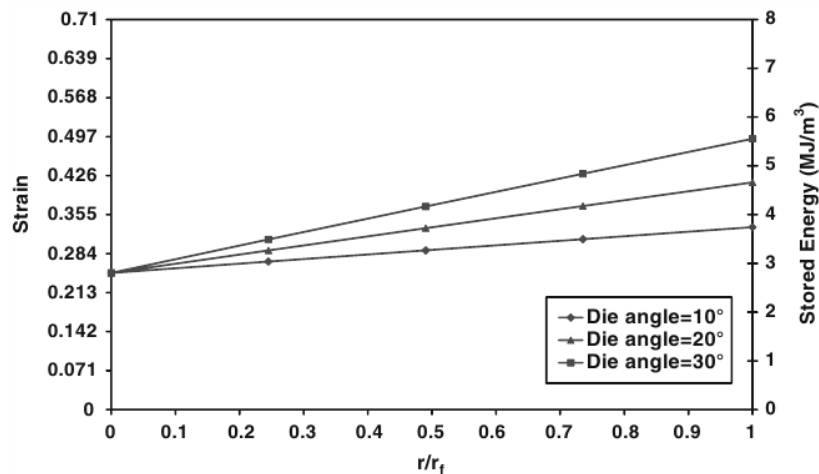


Рисунок 1.8 – Распределение степени деформации ε и накопленной энергии деформации при волочении вдоль относительной безразмерной координаты r/r_1 при различных полууглах волоки [50], относительное обжатие 40%

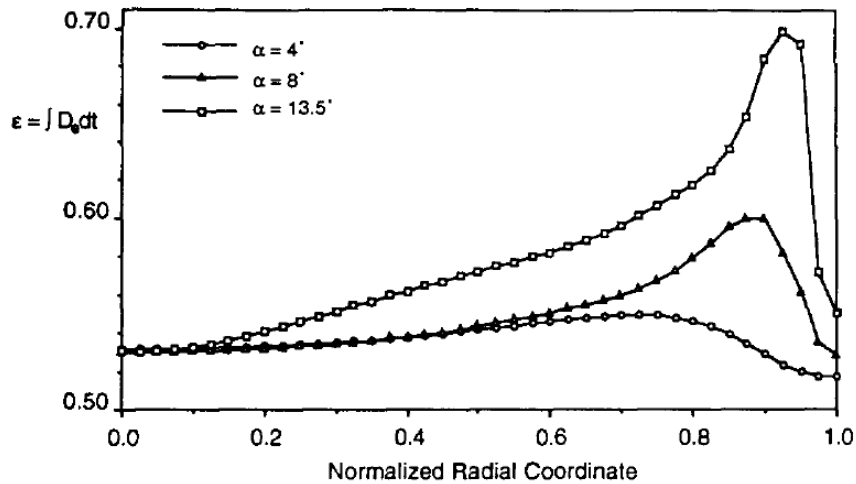


Рисунок 1.9 – Распределение степени деформации ε вдоль относительной безразмерной координаты r при различных полууглах волокна α [50] при относительном обжатии 40%

Решение задачи волочения в работе [50], полученное конечно-разностным методом, позволило оценить распределение степени деформации ε вдоль относительной безразмерной координаты r при различных полууглах волокна α (рисунок 1.9). Из графика, в частности, следует, что наибольшая деформация достигается в зонах заготовки, расположенных на расстоянии 0,8...0,9 радиуса. На самой поверхности деформации оказываются соизмеримыми с деформациями в центре (при $r = 0$). При этом наибольшие степени деформации могут превышать общий уровень 0,51 в 1,4 раза. Уровень этого превышения зависит от полуугла волокна: с увеличением конусности степень деформации возрастает.

В работе [51] выполнены расчеты распределения деформации при волочении проволоки из меди с учетом скоростного упрочнения. На рисунке 1.10 отображено поле распределения степени деформации при волочении с коэффициентом трения 0,06 при полуугле волокна 17° и при малой скорости волочения 0,042 мм/с. Экспериментальная процедура показала, что при увеличении скорости волочения до 140 мм/с усилие волочения могло увеличиться почти в два раза. Как видно из рисунка, степень деформации на периферии заготовки оказывается больше, чем в ее центре.

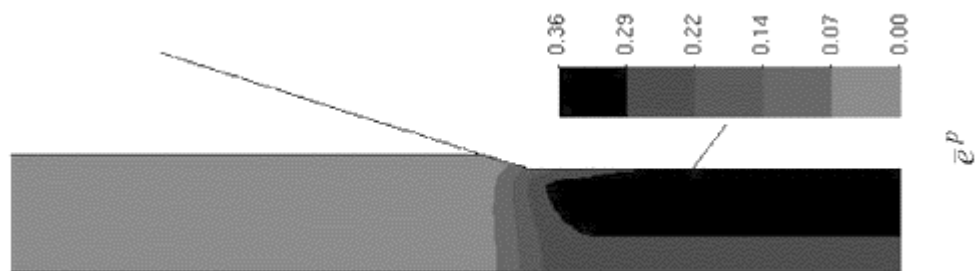


Рисунок 1.10 – Поле распределения степени деформации при волочении медной заготовки с коэффициентом трения 0,06

Последствия неоднородного распределения деформации в холоднотянутых заготовках из меди оценены в статье [52]. Проволоку протягивали в промышленных условиях через волоку с полууглом конусности 4° при накопленном относительном обжатии 97%. Здесь видно, что промышленно тянутую проволоку удалось отжечь при температуре 158°C с достижением низкой твердости на поверхности. Однако срединные слои остались не отожженными. Сравнение результатов замера твердости в поперечном сечении проволоки, протянутой в лабораторных и промышленных условиях, показано на рисунке 1.11. Это обусловлено тем, что поверхностные слои получили при волочении большой уровень деформации, за счет чего температура начала рекристаллизации оказалась пониженной и процессы рекристаллизации пройти успели. Для центральных слоев температура начала рекристаллизации оказалась повышенной, и рекристаллизация не прошла. Несмотря на повышенную температуру отжига твердость проволоки, протянутой в лабораторных условиях, снизить не удалось, что говорит о высокой температуре начала рекристаллизации. Разницу обеспечила различная скорость осуществления процессов деформации промышленного и лабораторного вариантов [17].

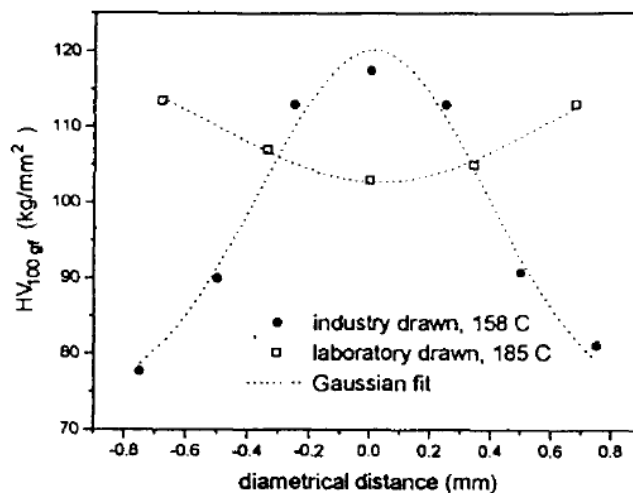


Рисунок 1.11 – Распределение твердости по Виккерсу в поперечном сечении медной проволоки, протянутой на промышленном и лабораторном оборудовании и подвергнутой отжигу при умеренных температурах

В статье [53] предложена методика определения условий контактного разогрева из критериев предотвращения образования остаточных напряжений при волочении. На основании уравнений термоупругости установлены температурные режимы, приводящие к появлению термопластических деформаций. Рассчитаны критические значения разности температур поверхности и центра протягиваемой проволоки, при которых происходит переход поверхностных слоев проволоки в пластическое состояние с последующим формированием остаточных напряжений. Определены предельные скорости волочения для ряда цветных металлов, превышение которых приведет к нежелательным остаточным напряжениям в протягиваемом изделии. Для повышения критических скоростей в качестве рекомендаций предлагается реализация условий гидродинамического (жидкостного) режима трения при производстве металлоизделий.

В работе [54] предложена методика оптимизации технологического волочильного инструмента из условия обеспечения минимального напряжения при волочении. Рассмотрен производственный эксперимент волочения алюминиевой проволоки с использованием оптимальной геометрии волочильного инструмента, показана эффективность предлагаемой оптимизации.

Сопоставлены напряжения волочения с использованием инструмента оптимальной геометрии и инструмента неоптимальной геометрии. Показано влияние противонапряжения на величину оптимальных углов волочильного инструмента. Как видно из рисунка 1.12 оптимальные углы волочения уменьшаются с увеличением противонапряжения.

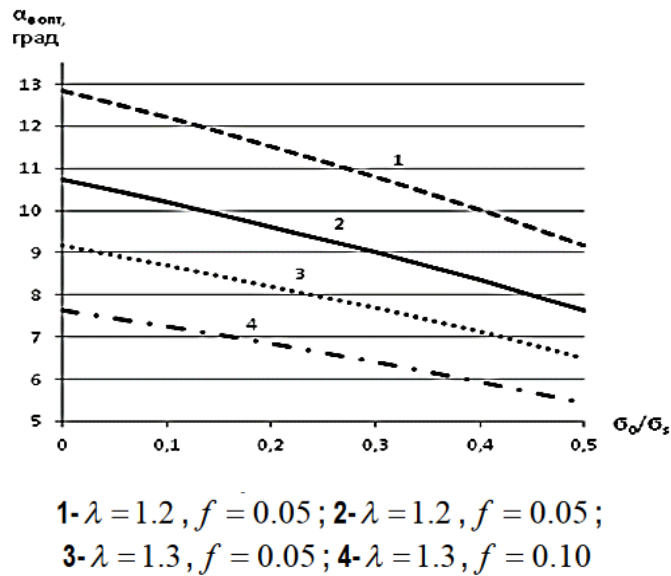


Рисунок 1.12 – Зависимость оптимальных углов от коэффициента вытяжки и относительного противонапряжения σ_0/σ_s

Наличие противонапряжения при волочении может быть связано со способом организации многократного волочения проволоки [55, 56]. Отмечаются положительные стороны приложения противонапряжения: снижение трения и износа инструмента, уменьшение тепловыделения и т.д. В технологиях трубного волочения противонапряжение используется реже, что связано с большими размерами заготовок и широким использованием машин однократного волочения, в том числе с прямолинейным перемещением заготовки [57]. Вместе с тем, противонапряжение может возникать незапланированным образом при постоянном или внезапном торможении заготовки на входе в волоку. Эффект противонапряжения анализировался многими исследователями. Так, в статье исследователей из индийского института Indian Institute of Technology [58] приведены результаты расчетов процесса волочения, выполненных аналитическими методами и сделан вывод об

уменьшении нормального давления на волоку при применении противонатяжения и об увеличении в этом случае напряжения волочения. В статье испанских исследователей [59] из университета National Distance University of Spain приводятся результаты исследования влияния противонатяжения на структуру очага деформации при волочении. В частности, после решения задачи методом конечных элементов в пакете ABAQUS отмечается, что приложение противонатяжения смещает пик нормальных давлений на волоку ближе к входу в очаг деформации.

В статье [60] утверждается, что при приложении противонатяжения величиной, не превышающей некоторого критического значения, величина усилия волочения уменьшается, и как следствие при условии его полезного использования повышается КПД процесса волочения в целом. Сформулирован критерий энергоэффективного управления процессом волочения, приведено описание системы автоматизированного электропривода. Не стационарность процесса волочения исследована в статье [61].

Особую ситуацию на контактной поверхности заготовки с инструментом может создавать наличие режима гидродинамического трения [62 - 66].

В статье [67] разработана методика математического моделирования совместного течения вязкого смазочного слоя и деформирования многослойного изделия при волочении. Для описания поведения твердого деформируемого тела применяются теория пластического течения с линейным анизотропным упрочнением. Решены задачи упругопластического деформирования ряда изделий в режиме гидродинамического трения. На рисунке 1.13 показано распределение скорости в слое смазки при волочении в режиме гидродинамического трения. Видно, что по мере приближения к поверхности инструмента, скорости уменьшаются.

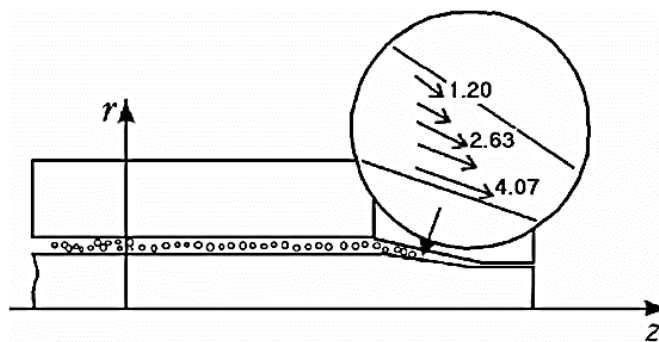


Рисунок 1.13 – Распределение скорости в слое смазки при волочении в режиме гидродинамического трения

Определенное внимание в практике волочения уделяется деформации тонкомерных заготовок, которые легко могут быть разрушены чрезмерным напряжением волочения. В статье [68] предложено решение проблемы производства сверхтонкой (50 мкм) проволоки из магниевого сплава MgCa0,8 с улучшенной биосовместимостью. Начальный диаметр заготовки составлял 1 мм. Технология состоит из двух этапов: процесс волочения в нагретой волоке с переходом на холодный процесс волочения. Горячее волочение позволяет повысить технологическую пластичность материала. Однако оно не может быть использовано для получения проволоки диаметром менее 0,1 мм из-за неустойчивых результатов и, следовательно, высокого риска повреждения проволоки. В соответствии с вышеизложенным в качестве второй стадии процесса было предложено холодное волочение конечного диаметра 0,05 мм с восстановлением пластичности между проходами. Модель восстановления пластичности основана на гипотезе о том, что степень восстановления пластичности пропорциональна степени рекристаллизации деформированного материала. Предложена модель статической рекристаллизации сплава и проверена на основе релаксационных испытаний, проведенных на установке GLEEBLE 3800.

1.4. Варианты поверхностной обработки проволоки

Заготовка, предназначенная для операции волочения, может быть получена различными методами: непосредственно литьем, прокаткой или прокаткой с предварительной ковкой. Каждый из этих процессов создает определенный уровень дефектности. При холодной обработке могут возникать свои дефекты из-за исчерпания ресурса пластичности [69, 70]. Поведение этих дефектов при волочении является объектом пристального изучения [71, 72], поскольку они определяют качество продукции.

Для литья тонкомерных заготовок характерным видом поверхностных дефектов является образование пошаговых трещин [73, 74], расстояние между которыми равно шагу вытягивания металла из расплава. Даже при их отсутствии на поверхности может наблюдаться кольцеватый профиль, при расстоянии между кольцами тоже равным величине шага выдавливания. Как было показано в работах [75, 76], такие дефекты плохо разглаживаются на стадии холодной деформации либо дают вторичные дефекты.

Дефекты с поверхности заготовок могут удаляться химическими или механическими методами [77]. Одним из вариантов механических методов является шлифование. Однако его использование в области обработки благородных металлов приводит к образованию мелкодисперсной металлической пыли в смеси с абразивом. Улавливание и разделение этой пыли связано с потерями дорогих компонентов. Поэтому предпочтительным процессом является скальпирование поверхности заготовки специальными волоками, при этом дефектный слой превращается не в пыль, а в облой, который можно утилизировать с меньшими потерями. Этот процесс относительно нов в практике обработки металлов. Поэтому практически нет сведений о последствиях применения скальпирования применительно к описанию состояния поверхности обработанной заготовки. За аналоги скальпирования можно принять процессы резания.

Большинство публикаций в теории резания металлов касаются вопросов отделения стружки [78]. При резании создается поверхностный слой металла,

который получает нагартовку при отделении стружки. Однако в большей части работ по теории резания процессом нагартовки поверхности пренебрегают. Поэтому, часто остается не известной глубина проникновения деформации.

Другим направлением изучения является определение величины остаточных напряжений после различных режимов резания [79].

В статье [80] приведено решение задачи обработки резанием с целью определения степени поврежденности металла. Выбрана форма резца, имеющего радиальную притупленную рабочую кромку (рисунок 1.14). Как видно из рисунка, резец снимает стружку с образованием пластической зоны, примыкающей к кромке резца. Вопрос о глубине проникновения пластической деформации h_0 здесь, однако, не ставился. Со ссылкой на источник [81] приведены данные, из которых следует, что глубина h_0 может составлять около 10% от толщины съема.

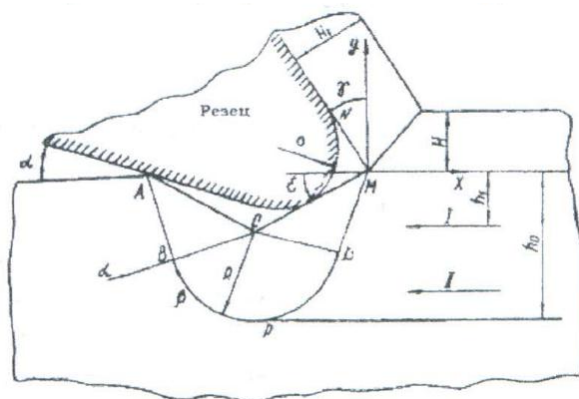


Рисунок 1.14 – Очаг деформации при резании с сеткой характеристик

Однако в последующем были выполнены работы, в которых доказывалось, что глубина проникновения пластической деформации может оказаться значительно больше. В качестве иллюстрации на рисунке 1.15 приведено решение задачи резания, выполненное методом конечных элементов [82].

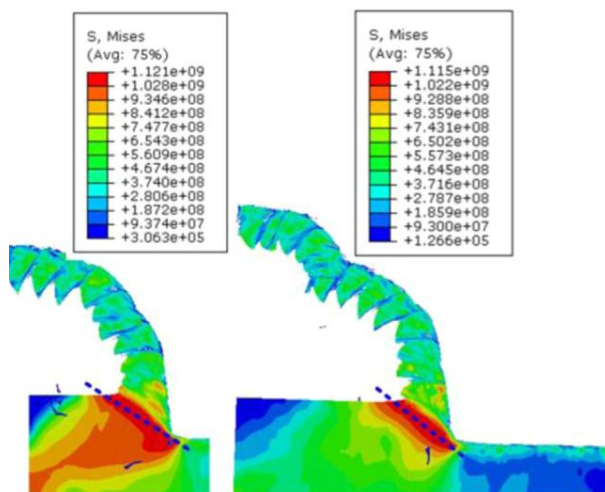


Рисунок 1.15 – Очаг резания с распределением эквивалентных напряжений по Мизесу

Из этих данных видно, что при снятии стружки фронт высоких напряжений проникает на глубину более 100% от величины съема. Кроме того, после прохождения резца в приповерхностном слое остается определенный уровень остаточных напряжений. Величина этого слоя также оказалась более 100% от величины съема. Даже из этих данных видно, что сведения об эффектах проникновения пластических деформаций в операциях стружкообразования остаются противоречивы.

1.5. Программное обеспечение для анализа напряженно-деформированного состояния в операциях обработки проволоки

Анализ напряженно-деформированного состояния в большинстве процессов ОМД аналитическими методами представляет собой трудную, а иногда даже неразрешимую задачу. Это объясняется тем, что во время деформации могут меняться физические условия протекания процесса (температура, скорость и др.), состояние деформируемого материала (физико-механические свойства, фазовый и структурный составы и пр.), конфигурация очага деформации. Однако использование процедур дискретизации материала и электронно-вычислительной техники позволило создать программные продукты, способные описать НДС даже в очень сложных процессах обработки металлов

давлением. Далее будут приведены некоторые программные продукты, использованные в данной работе для моделирования процесса штамповки.

Система анализа процессов пластического деформирования РАПИД разработана сотрудниками Уральского Федерального университета Е.Г.Полищуком и Д.С.Жировым [83, 84] и предназначена для моделирования, анализа, разработки и оптимизации технологических процессов горячей объемной штамповки. Система РАПИД позволяет провести индивидуальный анализ, исследование и корректировку каждого технологического процесса до изготовления оснастки и его окончательной отладки, что дает возможность проектировать оптимальные технологические процессы и обеспечить снижение себестоимости и повышение производительности труда.

Система позволяет:

- исследовать формоизменение и схему напряженного состояния;
- рассчитать энергосиловые параметры процесса;
- прогнозировать образование дефектов (незаполнение штампов, зажимов, утяжин, образование трещин).
- Система обеспечивает моделирование многопереходных процессов и реализует основные функции, перечисленные ниже.

В системе осуществляется подготовка информации о геометрии инструмента, подбор исходной заготовки и задание технологических условий. Пользователь формирует данные о геометрии инструмента и заготовки, механических и тепловых граничных условиях (рисунок 1.16).

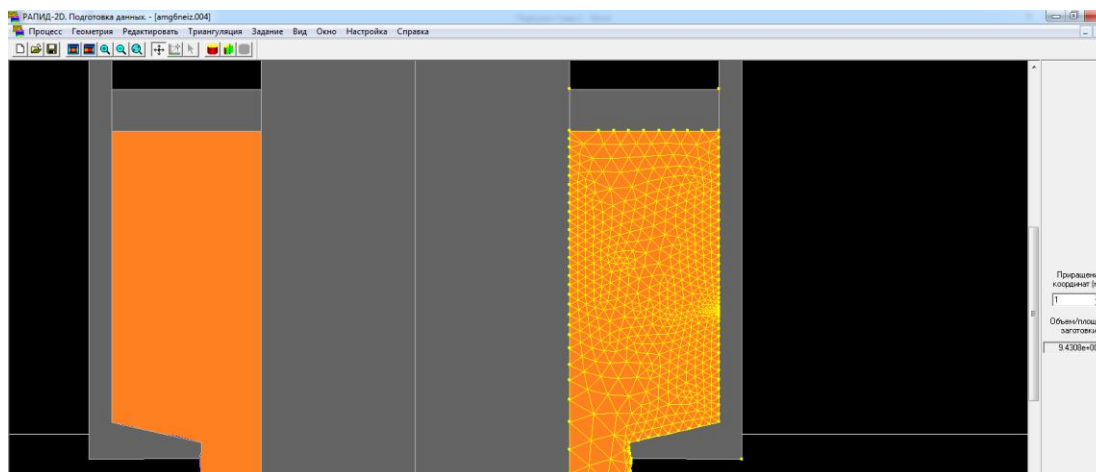


Рисунок 1.16 – Отображение очага деформации при прессовании в системе РАПИД

Рассчитываются напряженно-деформированное состояние, формоизменение, температурное поле в процессе деформации, усилия на инструмент и накопленная деформация. Дополнительно рассчитывается остывание или нагрев заготовки между переходами. Пользователь имеет возможность просмотреть на экране дисплея поля скоростей, напряжений, скоростей деформации, накопленных деформаций, температуры деформируемого материала и других величин на разных стадиях процесса. Имеется режим просмотра, позволяющий проследить изменение этих величин в течение процесса. Система позволяет просматривать процесс формоизменения заготовки в режиме мультипликации. Система имеет базу данных со справочной информацией о механических и тепловых свойствах материалов, энергосиловых и скоростных характеристиках оборудования и позволяет пользователю дополнять ее. Обмен данными о геометрии инструмента между системой РАПИД и САД системами осуществляется через файлы в стандартных форматах. Процесс деформирования разбивается на малые временные шаги (формируемые автоматически), и на каждом шаге рассчитываются поле скоростей, новая форма заготовки и новое положение инструмента, распределение температуры, накопленная деформация, измененные механические свойства материалов. Для каждого момента времени – начала временного шага – решается краевая задача расчета полей скоростей и

напряжений для несжимаемой вязко-жестко-пластической среды. Она расщепляется на вариационную задачу нахождения поля скоростей и последующее вычисление тензора напряжений. Задача нахождения скоростей решается в классе непрерывных функций.

Система РАПИД прошла апробацию при решении ряда краевых задач [85, 86], в том числе, волочения [87].

ABAQUS – программный комплекс в области конечно-элементных прочностных расчетов, с помощью которого можно получать решения для сложных линейных и нелинейных инженерных проблем [88]. Семейство продуктов Abaqus разрабатывается и поддерживается компанией Abaqus Inc. (USA). Компания поддерживает распространение университетской версии программного продукта с ограничением до 1000 штук количества конечных элементов. Комплекс Abaqus применим при решении задач из различных областей знаний.

Работа с программным комплексом начинается с запуска модуля Abaqus CAE, в результате чего появляется окно Start Session (рисунок 1.17). Возможны три варианта запуска:

- Create Model DataBase – создание новой базы данных для модели;
- Open DataBase – открытие существующей базы данных;
- Run Script – запуск сценария с заранее записанными командами;
- Start Tutorial – запуск программы с документацией по обучению и создание новой базы данных.

Рассмотрим вариант запуска при отсутствии базы данных и для начала работы выберем опцию Create Model DataBase.

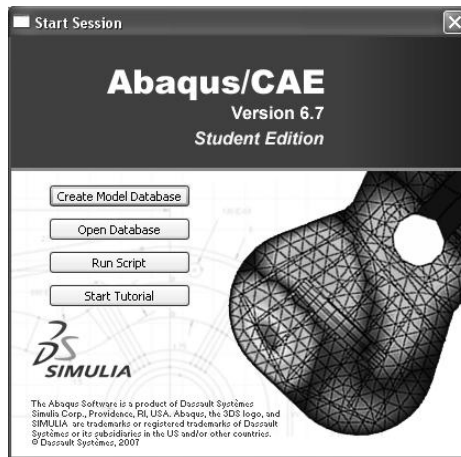


Рисунок 1.17 – Стартовая страница комплекса Abaqus

Как видно из рисунка 1.18, начальная страница диалога выглядит довольно сложным образом и допускает большое количество вариантов дальнейших процедур. Выберем одну из возможных последовательностей действий.

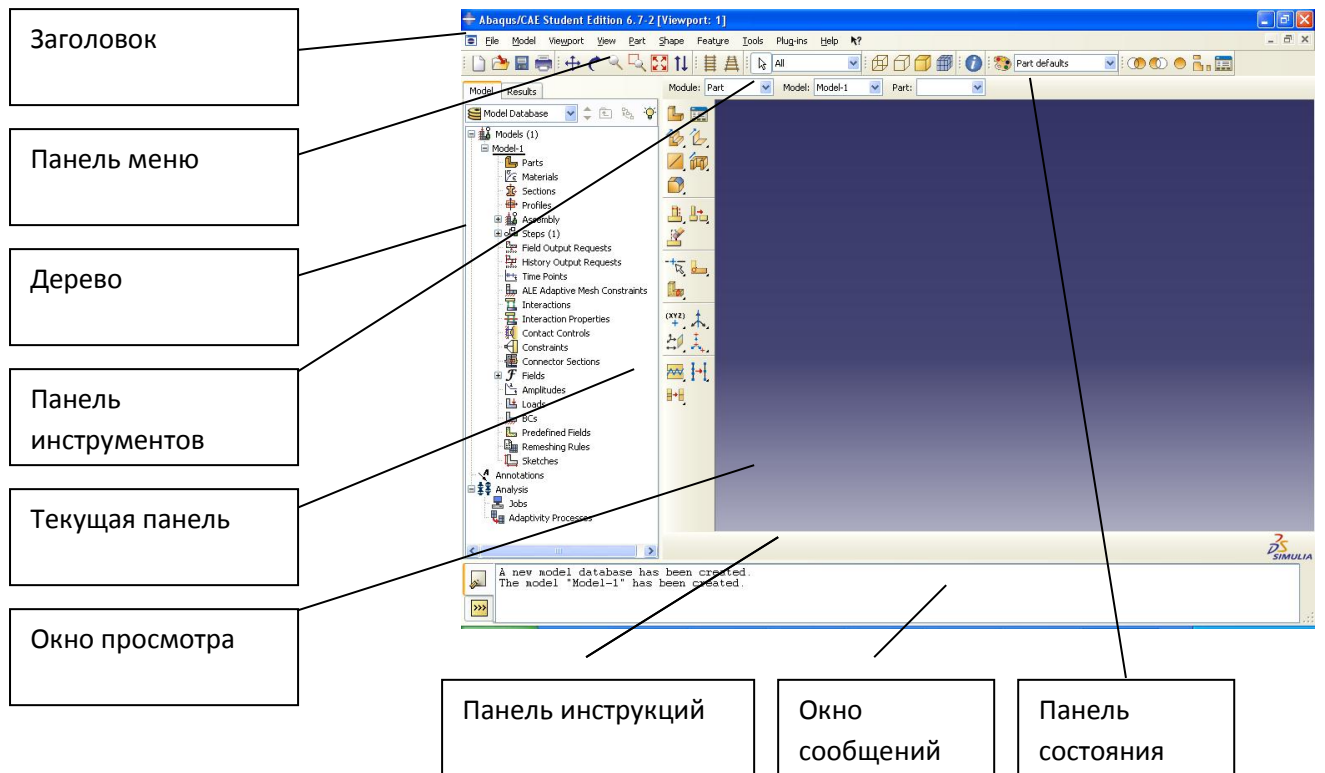


Рисунок 1.18 – Представление окна постановки задачи

Программный комплекс ABAQUS для решения задач использует понятие модулей, каждый из которых содержит некоторый набор действий, близких по

значению и необходимых для построения конечно-элементной модели и дальнейших операций с ней. Это упрощает и делает более наглядной работу в ABAQUS.

Представление о модульном построении постановки задачи дает набор компонент, представленный в окне Module:

- PART – модуль, предназначенный для создания деталей, задания их геометрии, опорных точек и систем координат;
- PROPERTY – модуль, предназначенный для определения материалов и сечений, применяемых в модели, а также для задания их физических характеристик;
- ASSEMBLY – модуль, предназначенный для задания взаимного расположения деталей и сборки их в единую модель;
- STEP – модуль, предназначенный для создания шагов расчета и определения выходных данных по результатам;
- INTERACTION – модуль, предназначенный для определения взаимодействий между деталями, контактными участками и их свойств;
- LOAD – модуль, предназначенный для создания нагрузок, прикладываемых к модели, а также начальных и граничных условий для нее;
- MESH – модуль, предназначенный для построения сетки, фактически, в нем происходит преобразование геометрической модели в конечно-элементную;
- JOB – модуль, предназначенный для создания файла выходных данных, проверки построенной модели, запуска вычислительного процесса и контроля над ним;
- VISUALIZATION – модуль, предназначенный для просмотра результатов расчета и обработки полученных данных;
- SKETCH – модуль, предназначенный для сохранения эскизов и чертежей полученной модели.

Программный комплекс ABAQUS применен для решения разнообразных задач обработки металлов давлением, в том числе задач волочения [89].

1.6. Выводы по разделу и постановка задачи исследования

На основе приведенного выше литературного обзора можно сделать следующие выводы:

1. Для многих платиновых сплавов отсутствует информация о зависимости сопротивления деформации от степени деформации. Эта зависимость необходима для анализа процессов волочения с помощью конечно-элементного моделирования

2. В практике обработки давлением проволоки из сплавов благородных металлов применяется многопроходный процесс волочения. Одна из особенностей обработки состоит в том, что волочению может подвергаться проволока, не прошедшая стадию прокатки. В результате на ее поверхности могут наблюдаться поверхностные дефекты, характерные для метода непрерывного вытягивания из расплава с наличием пережимов. Необходимо оценить влияние такого типа дефектов на процесс последующего волочения.

3. Другая особенность состоит в том, что проходы волочения могут чередоваться с проходами скальпирования. Необходимо выявить взаимное влияние процессов волочения и скальпирования друг на друга, а также на деформированное состояние готовой проволоки. Последнее может являться причиной нестабильности прочностных свойств проволоки из-за неконтролируемого снижения температуры начала рекристаллизации.

В связи с вышеизложенной информацией, целью данной работы является выработка рекомендаций по назначению рациональных режимов обработки проволоки их благородных металлов.

Для достижения данной цели сформулированы следующие задачи:

- изучить сопротивление деформации сплавов платины в холодном состоянии;

- с помощью метода конечных элементов описать напряженно-деформированное состояние при волочении и наличии на поверхности проволоки кольцевых дефектов;
- определить напряженно-деформированное состояние в операции скальпирования; при многопроходном волочении с наличием на поверхности проволоки кольцевых дефектов;
- описать напряженно-деформированное состояние в технологической схеме многопроходного волочения с чередованием операций волочения и скальпирования;
- связать полученные данные с параметрами термомодеформационной обработки.

2. ИЗУЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОВОЛОКИ ИЗ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ И ИХ СПЛАВОВ

2.1. Исследование сопротивления деформации сплава Pt92,5Pd4Rh3,5

Сплавы благородных металлов на основе платиноидов отличаются высокой коррозионной стойкостью, в том числе при повышенной температуре. Сплав Pt92,5Pd4Rh3,5 используется, в основном, для применения в каталитических системах химической промышленности. Следует отметить, что сопротивление металлов сплавов платины изучено недостаточно. В широко известном справочнике [90] при наличии сплавов серебра и золота сплавы платины не представлены. Сопротивление деформации чистой платины в виде графиков и аппроксимирующих зависимостей отображено в статьях [91, 92], для платинородиевого сплава – в публикации [93]. В технической литературе механические свойства платины и ее сплавов чаще всего представлены в упрощенном виде, например, в виде значений твердости [94, 95]. Вместе с тем, в связи с разработкой и повсеместным внедрением современных методов моделирования процессов обработки давлением, в том числе штамповки [96], прокатки или волочения [97] необходимо знание механических свойств конкретных материалов.

В качестве базового метода испытаний применено растяжение проволоки по ГОСТ 10446-80 [98] на разрывной испытательной машине Instron - 3365, но в отличие от стандарта для обработки результатов испытаний применяли методику пересчета условных напряжений и деформаций в истинные значения. Содержание элементов в сплаве (таблица 2.1) соответствовало ГОСТ 13498-2010 [99], мас. %: платина 92,2...92,8; палладий 3,8...4,2; родий 3,3...3,7.

Таблица 2.1 – Химический состав сплава ПлПдРд 92,5-4-3,5 с содержанием основных компонентов

Элемент	Pt	Pd	Rh
Содержание, %	92,4233	4,07	3,49

Исследование выполняли в лаборатории физико-механических испытаний АО «Екатеринбургский завод ОЦМ», для последующего волочения применяли маршруты обработки этого же предприятия. Как было выявлено в первичных опытах, исследуемый сплав ПлПдРд 92,5-4-3,5 обладает невысоким уровнем пластических свойств, а сопротивление деформации желательно описать в широком диапазоне деформаций. Поэтому ход исследования разбили на два этапа (рисунок 2.1). На первом этапе обрабатывали диаграмму нагружения, которая была записана системой специализированного программного обеспечения Bluehill Lite с установлением связи между истинными напряжениями и деформациями. Это позволяло получить информацию в диапазоне относительных удлинений, предшествующих началу образования шейки, т.е. до окончания режима одноосного нагружения.



Рисунок 2.1 – Графическое отображение методики испытаний

В качестве исходных образцов для первого этапа испытаний отобрали отрезки проволоки в отожженном состоянии (отжиг в воздушной среде в течение

30 минут при температуре 900 °С) диаметром $d_0 = 1,20$ мм с рабочей длиной образцов $l_0 = 100$ мм. Скорость перемещения захватов на испытательной машине установили 50 мм/мин, что соответствует скорости деформации $0,008 \text{ с}^{-1}$ в начале испытания и $0,010 \text{ с}^{-1}$ в момент разрыва образца.

Запись параметров испытания предусматривает фиксацию удлинения образца Δl_i , с помощью которой из условия постоянства объемов можно определить текущий диаметр по формуле $d_i = d_0 \sqrt{l_0 / (l_0 + \Delta l)}$. По зафиксированной силе деформации P можно определить условное напряжение $\sigma_y = 4P / (\pi d_0^2)$. После растяжения обрабатывали записанную диаграмму с введением следующих обозначений: степень деформации

$$\varepsilon = 2 \ln(d_0 / d_i) \quad (2.1)$$

и истинное напряжение

$$\sigma_{\text{и}} = 4P / (\pi d_i^2). \quad (2.2)$$

Второй этап исследования из схемы на рисунке 2.1 основан на определении условного предела текучести $\sigma_{0,2}$, как напряжения, переводящего металл из состояния упругости в состояние пластичности в схеме одноосного нагружения, тем самым приближенному к понятию сопротивления деформации. В опытах методом волочения ступенчато уменьшали диаметр проволоки с отбором образцов на диаметрах 1,20 – 0,92 – 0,77 – 0,61 – 0,53 – 0,42 – 0,32 мм. Полученную степень деформации оценивали по формуле (2.1), тем самым получили следующие значения степени деформации: 0 – 0,531 – 0,887 – 1,353 – 1,673 – 2,10 – 2,644, что соответствует относительным обжатиям соответственно 41, 59, 74, 80, 87 и 93%.

На завершающем этапе объединяли данные, полученные двумя методами, пользуясь гипотезой единой кривой: сопротивление деформации не зависит от метода его определения.

Диаграмма условных напряжений представлена на рисунке 2.2. Ее отличает наличие участка упругого нагружения в начальной стадии испытания,

участка развитой однородной пластической деформации в виде нелинейно возрастающей функции, участка неоднородной пластической деформации в виде нелинейно убывающей функции.

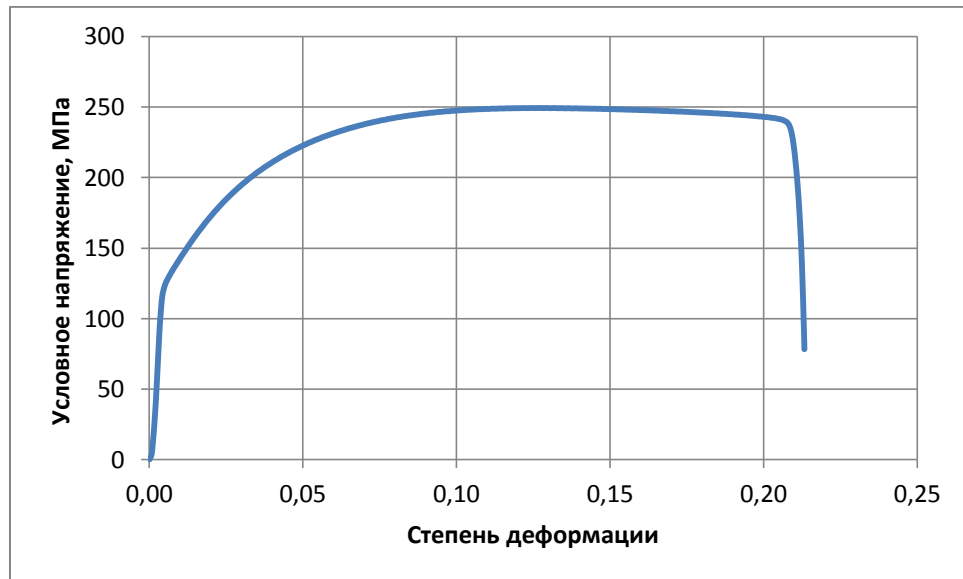


Рисунок 2.2 – Диаграмма растяжения образцов проволоки ПлПдРд92,5-4-3,5 диаметром 1,19 мм после термической обработки

Из графика также следует, что степень деформации до наступления разрыва составила величину $\varepsilon = 0,21$, что соответствует относительному удлинению до разрушения $\delta = 100 * (\exp \varepsilon^{-1}) = 23\%$. Такое относительное удлинение максимально для сплава в состоянии отжига, при последующем волочении оно резко снижается, поэтому строить графики на основе диаграммы растяжения становится нецелесообразным.

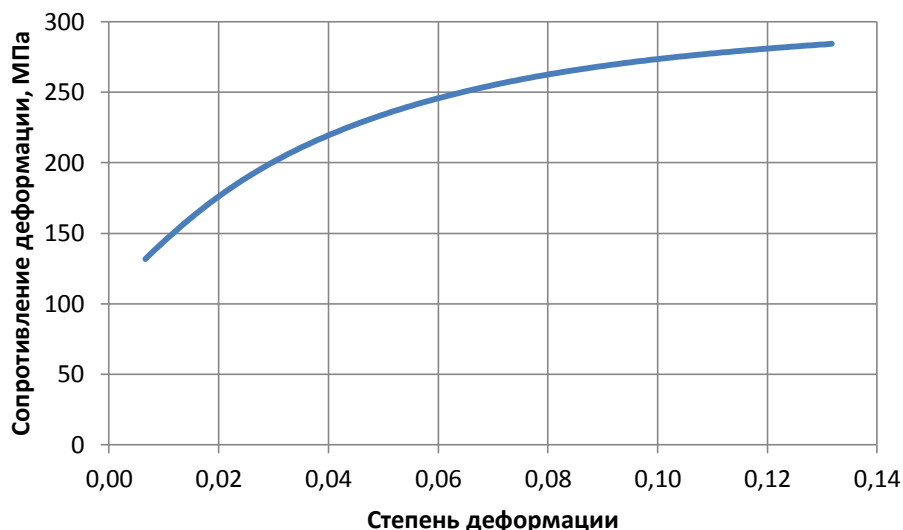


Рисунок 2.3 – Кривая упрочнения сплава ПЛПДРД92,5-4-3,5 при малых деформациях

Из приведенной диаграммы, в частности видно, что временное сопротивление сплава составило 250 МПа. В дальнейшем исключали из рассмотрения участок неоднородной деформации (более относительного удлинения 12%), участок упругого нагружения, а также напряжения приводили к истинным значениям, из деформаций вычитали упругую составляющую, в результате получили кривую упрочнения сплава при малых деформациях, отображенную на рисунке 2.3. Аналогичные данные при разбросе до 5% получили при проведении трех испытаний.

При проведении второго этапа испытаний применяли волочение проволочных образцов и измерение условного предела текучести. Последнюю величину приравнивали к сопротивлению деформации, поскольку именно в этом случае металл переходил в пластическое состояние. Такой подход характерен при использовании методики Третьякова А.В.- Зюзина В.И. [100].

Волочением удалось получить значительно более высокие степени упрочнения, чем при растяжении, что позволяет расширить диапазон деформаций. При каждой степени деформации 0; 0,531; 0,887; 1,353; 1,673; 2,10; 2,644 было отобрано по 5 образцов, для которых измерены значения условного предела текучести.

Полученные данные обобщены на рисунке 2.4 нанесением на график результатов первого и второго этапов испытаний. Здесь начальная ветвь кривой соответствует первому этапу, а продолжение линии графика выше степени деформации 0,5 – второму этапу исследований.

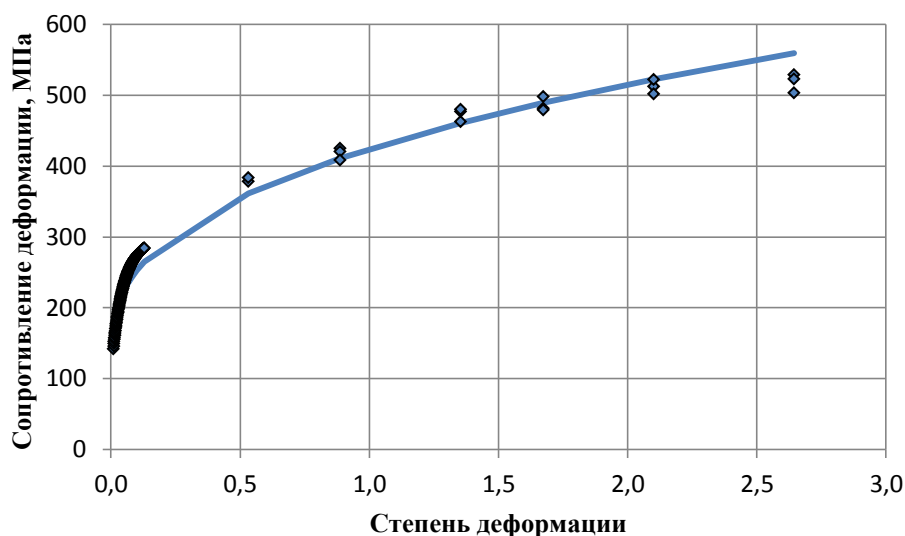


Рисунок 2.4 – Кривая упрочнения сплава ПлПдРд92,5-4-3,5 при больших деформациях: точки – опытные данные в трех сериях опытов, линия – по уравнению регрессии

Можно отметить, что при больших деформациях кривая упрочнения имеет возрастающий характер, достигая значения 530 МПа.

Полученные значения сопротивления деформации σ_s аппроксимированы методом наименьших квадратов по всей совокупности степеней деформации (0...2,644) уравнением регрессии вида

$$\sigma_s = 135 + 290\epsilon^{0,392}. \quad (2.3)$$

Здесь первое слагаемое является условным пределом текучести для материала в мягком (полностью отожженном) состоянии. Максимальное отклонение опытных и расчетных данных составило 8 % в области степени деформации 2,644.

При наличии кривой упрочнения создается возможность сравнения платиновых сплавов по прочностным свойствам в зависимости от степени нагартовки. Для платинового сплава ПлПдРдRu81-15-3,5-0,5 сопротивление деформации при степени деформации 1,5 составляет 495 МПа, а для исследованного сплава ПлПдРд92,5-4-3,5 при той же степени деформации оно равно 480 МПа, что можно объяснить меньшей степенью легирования.

Выявлено, что при наибольшем упрочнении сопротивление деформации исследованного сплава достигает 520 МПа. Наличие определенного уровня рассева экспериментальных точек вокруг линии регрессии можно объяснить следующими явлениями. В примененной методике скорости статических испытаний образцов на разрыв соответствовали требованиям ГОСТ, но не было уделено внимание поддержанию постоянных диапазонов скоростей деформации, характерных для процесса волочения. Последние процессы, по существу, переводили металл из одного состояния нагартовки в другое. Для анализа ситуации можно привлечь формулу для расчета скорости деформации

$$\xi = \frac{6 \ln(\lambda) \operatorname{tg}(\alpha)}{(\lambda\sqrt{\lambda} - 1)d_1} v_1, \quad (2.4)$$

где λ – коэффициент вытяжки; α – угол волокна; d_1 – диаметр проволоки после прохода; v_1 – скорость выхода металла из инструмента.

Из формул, в частности, следует, что по мере уменьшения диаметра проволоки по проходам волочения, скорость деформации нарастает по гиперболическому закону. Кроме того, при использовании машин многократного волочения из закона постоянства секундных объемов следует, что сама линейная скорость тоже возрастает пропорционально коэффициенту вытяжки. Совместное влияние этих факторов приводит к непропорционально большому нарастанию скорости деформации. Обычно влияние скорости деформации на прочностные свойства получаемого изделия либо отрицается, либо им пренебрегают. Однако последние исследования этого вопроса [101, 102], выполненные в области деформации меди, показали, что скорость деформации является ощутимым фактором в формировании прочностных

свойств, в том числе, сопротивления деформации. Объяснение этому явлению пока лежит в области механизмов текстурирования металла.

Практическая ценность полученных результатов состоит в возможности использования полученных зависимостей в виде графиков и аппроксимированных данных для постановки и решения конкретных краевых задач обработки металлов давлением, например, методом конечных элементов.

Таким образом, при использовании комбинированной методики испытаний получены зависимости сопротивления деформации сплава ПлПдРд92,5-4-3,5 при скорости деформации $0,008 \dots 0,010 \text{ с}^{-1}$ в диапазоне степеней деформации $0 \dots 2,644$. Установлено, что метод растяжения образцов позволяет получить данные по сопротивлению деформации при достижении относительного удлинения не выше 12%. Метод определения сопротивления деформации измерением условного предела текучести позволил получить данные при относительном обжатии 93%. Полученные зависимости представлены в графическом и аналитическом виде. Выявлено, что при наибольшем упрочнении сопротивление деформации сплава достигает 530 МПа. Изложенные выше результаты более широко представлены в работе [103].

2.2. Исследование сопротивления деформации золота марки Зл99,99

Особенность механических свойств золота марки Зл99,99 заключается в возможной их нестабильности вследствие проявления разупрочнения либо на стадии холодной деформации, либо после вылеживания.

Для изучения механических свойств была отобрана проволока из золота марки Зл99,99 с химическим составом по ГОСТ 6835-2002, приведенным в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Химический состав золота Зл99,99

Элемент	Au	Ag	Sb	Fe	Cu	Pb	Bi
Содержание, мас. %	99,9933	0,0039	0,0001	0,0003	0,0022	0,0001	0,0001

В качестве базового метода испытаний применено растяжение проволоки по ГОСТ 10446-80 на испытательной машине Instron – 3365. Исследование проводили в лаборатории физико-механических испытаний АО «Екатеринбургский завод ОЦМ», для последующего волочения применяли маршруты обработки этого же предприятия. Испытания были разделены на два этапа.

На первом этапе выполняли растяжение проволочных образцов и обрабатывали соответствующим образом диаграмму нагружения, которая была записана системой специализированного программного обеспечения Bluehill Lite с целью перевода условных величин деформаций и напряжений в истинные значения. Это позволяло получить информацию в диапазоне относительных удлинений, предшествующих началу образования шейки, т.е. до окончания режима одноосного растяжения.

В качестве исходных образцов для первого этапа испытаний отобрали отрезки проволоки в отожженном состоянии (отжиг в воздушной среде в течение 30 минут при температуре 550 °С, охлаждение на воздухе) фактическим диаметром $d_0 = 1,19$ мм с рабочей длиной образцов $l_0 = 100$ мм. Диаметр измеряли микрометром МК-0-25-1 ГОСТ 6507-90. Скорость перемещения захватов на испытательной машине назначили 50 мм/мин, что соответствует скорости деформации $0,008 \text{ с}^{-1}$ в начале испытания и $0,010 \text{ с}^{-1}$ в момент разрыва образца. На рисунке 2.5 показан вид диаграммы растяжения до разрыва.

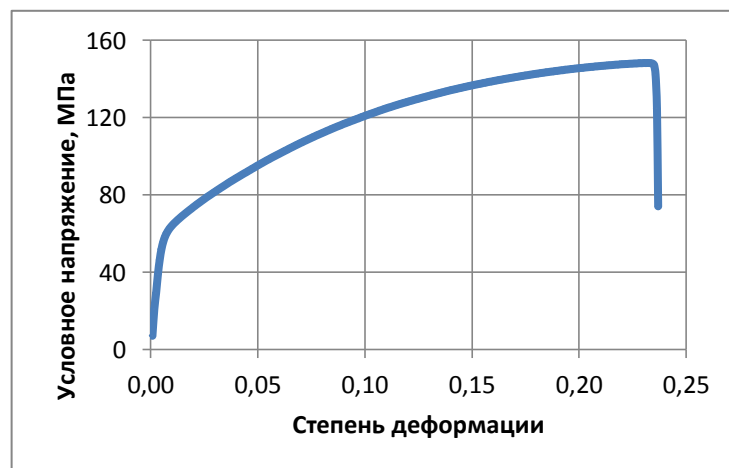


Рисунок 2.5 – Диаграмма растяжения образцов проволоки Зл99,99 диаметром 1,19 мм после термической обработки

После получения диаграмм растяжения были построены кривые деформационного упрочнения при малых значениях деформации (рисунок 2.6).

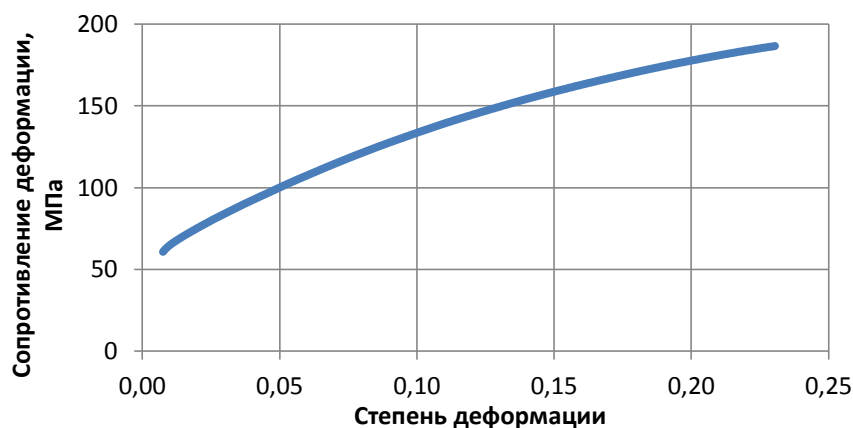


Рисунок 2.6 – Кривая упрочнения Зл99,99 при малых деформациях

В таблице 2.3 приведены значения параметров, определяемых при растяжении отожженных образцов диаметром 1,19 мм.

Таблица 2.3 – Параметры, определенные при растяжении отожженных образцов диаметром 1,19 мм

№ образца	Условный предел текучести, МПа	Нагрузка при разрыве, г	Временное сопротивление разрыву, МПа	Относительное удлинение, %
1	50,96	17016,50	149,94	28,3
2	59,78	16867,05	148,96	25,6
3	55,86	16974,72	149,94	30,0
4	58,80	16808,87	147,98	27,6
Среднее	56,25		149	27,9

Второй этап исследования основан на определении условного предела текучести $\sigma_{0,2}$, как напряжения, переводящего металл из состояния упругости в состояние пластичности в схеме одноосного нагружения, тем самым приближенному к понятию сопротивления деформации.

В опытах методом волочения ступенчато уменьшали диаметр проволоки с отбором образцов при величине диаметров 1,19 – 0,97 – 0,81 – 0,67 – 0,61 – 0,50 – 0,42 мм. Полученную степень деформации оценили как: 0,409; 0,76; 1,149; 1,337; 1,734; 2,083.

Полученные данные обобщены на рисунке 2.7 нанесением на график результатов первого и второго этапов испытаний (точками обозначены опытные данные).

Как видно из рисунка 2.7, кривая упрочнения имеет локальное снижение сопротивления деформации при степени деформации около значения 1,7. Возможны следующие гипотезы относительно происхождения такого экстремума. Семейство точек, характеризующее процесс упрочнения, создано за счет сочетания двух методик испытания, каждая из которых основана на своих предположениях. Однако эта гипотеза не подтверждается, так как локализация экстремум произошла не в месте стыка данных двух видов измерений.

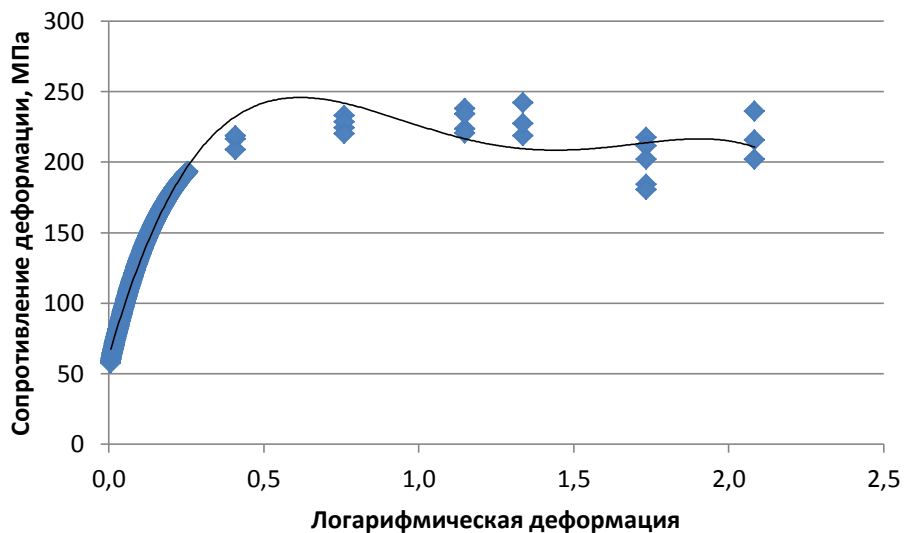


Рисунок 2.7 – Кривая упрочнения золота 99,99% при больших деформациях

Похожий результат был получен в исследовании [104]. Определение авторами (Ying Chen и др.) механических свойств микропроволоки из золота 99,99 % показало, что при уменьшении диаметра предел текучести сначала возрастает, а затем уменьшается. Это уменьшение происходит при диаметре 17,5 мкм при достижении суммарной степени деформации 2,46 (рисунок 2.8).

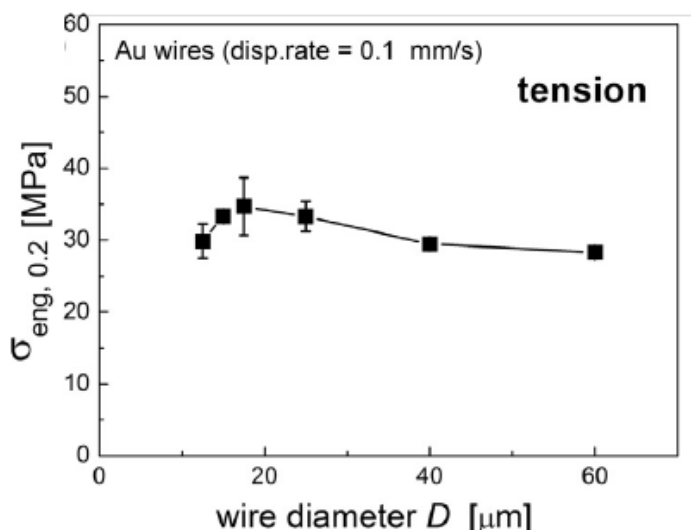


Рисунок 2.8 – Зависимость условного предела текучести $\sigma_{eng,0.2}$ от диаметра D из золота 99,99% при скорости 0,1 мм/с (Ying Chen и др.)

Его можно связать с наступлением процесса рекристаллизации вследствие накопления высокого уровня деформации. По другой гипотезе снижение прочностной характеристики при накоплении деформации происходит вследствие текстурных изменений в металле. Примерно к этому же размеру относится начало проявления эффекта Портевена - ле Шателье. Одновременно со снижением условного предела текучести выявлено также уменьшение и модуля упругости от 73 ГПа до 55 ГПа.

Таким образом, полученное в опытах понижение условного предела текучести при увеличении степени деформации вряд ли можно считать случайным.

Практическая значимость выявления экстремума на кривых упрочнения золота 99,99 % заключается в том, что становится более понятной причина повышенной обрывности проволоки при достижении критической величины степени деформации. Волочение как технологический процесс отличается от других процессов обработки давлением тем, что усилие на заготовку передается после прохождения ею рабочего канала волокна. Металл на уровне очага деформации может быть достаточно нагартован и для его формоизменения требуется повышенный уровень энергии, в то время как металл после прохождения очага деформации оказывается менее прочным и не способен

выдержать больших нагрузок, вследствие чего может наступить обрыв проволоки.

2.3. Выводы по разделу

1. При использовании комбинированного метода измерения сопротивления деформации по результатам растяжения отожженного образца и определения условного предела текучести для предварительно нагартованных образцов определены кривые упрочнения для сплава Pt92,5Pd4Rh3,5, ранее не известные в технической литературе.

2. Выявлено, что кривые упрочнения для сплава Pt92,5Pd4Rh3,5 имеют вид монотонно возрастающих зависимостей, т.е. материал относится к классу упрочняющихся сред.

3. С помощью упомянутой выше методики определены кривые упрочнения для золота марки Зл 99,99. Выявлено, что кривые упрочнения имеют вид немонотонных зависимостей, обладающих экстремальными свойствами. Сравнение с известными из литературы сведениями подтвердило возможность такого описания свойств металла.

4. Золото марки Зл 99,99 можно отнести к классу сред, обладающих степенным упрочнением с наступлением разупрочнения при достижении критической степени деформации, что следует учитывать при назначении режимов обжатий при волочении.

3. ПОВЕДЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ ПРОВОЛОКИ ИЗ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Анализ современных нормативно технических документов на продукцию, производимую методами обработки давлением, в том числе и проволоку, показывает тенденцию неуклонного роста требований к повышению качества изделий. Особенно это актуально для производства проволоки из благородных металлов, стоимость которых достаточно велика. С другой стороны, наличие дефектов может провоцировать обрывность по маршрутам волочения, что приводит к снижению производительности на волочильном участке.

Целью выполнения этой части работы является описание дефектов при волочении проволоки из драгметаллов, механизмы их возникновения и их влияние на процесс волочения.

3.1. Поведение дефектов при волочении тончайшей проволоки из платины

В волочильном производстве введена терминология, подразделяющая проволоку на следующие виды в зависимости от ее диаметра: толстую 1,4...6 мм; среднюю 0,40...1,39 мм, тонкую 0,10...0,39 мм, тончайшую 0,03...0,09 мм. В данном исследовании будет обсужден вопрос о проблемах, возникающих при производстве проволоки из платины и платиновых сплавов диаметром около 0,05 мм. В соответствии с упомянутой выше терминологией проволоку следует отнести к тончайшей. Проблемы производства тончайшей проволоки состоят, в основном, в том, что дефекты, имеющие размеры намного меньшие, чем толщина толстой, средней или тонкой проволоки становятся соизмеримыми с толщиной тончайшей проволоки. Тем самым из-за наличия дефекта сечение проволоки локально может значительно уменьшиться. При передаче усилия от тянущего устройства волочильного стана, на уровне уменьшенного (опасного) сечения напряжения оказываются выше допустимых и наступает обрыв проволоки. Проблема обрывности проволоки малых сечений существует как в черной, так и в цветной металлургии [105 - 109]. Можно разделить типы

обрывности на две категории. Обрывность, возникающая из-за появления дефектов внутри проволоки при появлении центральной пористости и разрывов (central bursts) из-за локализации растягивающих напряжений [110] и обрывность из-за проявления поверхностных дефектов, обусловленных, в том числе контактным взаимодействием проволоки и инструмента.

Целью работы является изучение характера дефектов, в том числе, унаследованных от обработки, предшествующей волочению и сопровождающих волочение, а также анализ возможных последствий от их проявления.

Проволоку из платины марки Пл0, Пл2 (ГОСТ 21007-2014) и платинового сплава ПлПдРд 92,5-4-3,5 (ГОСТ 18389-2014) получали по следующей технологической схеме: составление шихты, плавка в тигле из оксида магния, отливка пластины в стальную изложницу, строжка, ковка прутка, холодная сортовая прокатка на заготовку диаметром 8,0 мм, волочение до достижения готового размера с промежуточными отжигами.

В работе использовали методы электронной микроскопии и микроспектрального анализа, для чего применили электронный растровый микроскоп Philips XL-30 с микрорентгеноспектральным анализатором.

После проведения операции волочения проволоки диаметром 1,2 мм из платинового сплава ПлПдРд 92,5-4-3,5 отбирали образцы в виде отрезков, содержащих дефекты. Поверхность проволоки подвергли очистке бензином и этиловым спиртом. Электронной микроскопией получали снимки поверхности. На рисунке 3.1 показан один из вариантов дефекта в виде поверхностного включения сферической формы. Приведенная рядом спектрограмма показывает, что это включение на основе железа. Повышенное содержание углерода говорит о том, что, скорее всего это сталь. Дополнительно выявленные элементы: родий и платина входят в состав деформируемого сплава. Судя по сферической форме включения, которая не подверглась вытягиванию при волочении, оно обладает повышенной прочностью относительно деформируемого сплава. Причина появления такого дефекта состоит, скорее всего, в загрязнении волочильной смазки продуктами износа стального инструмента с обкатыванием частицы до круглого состояния.

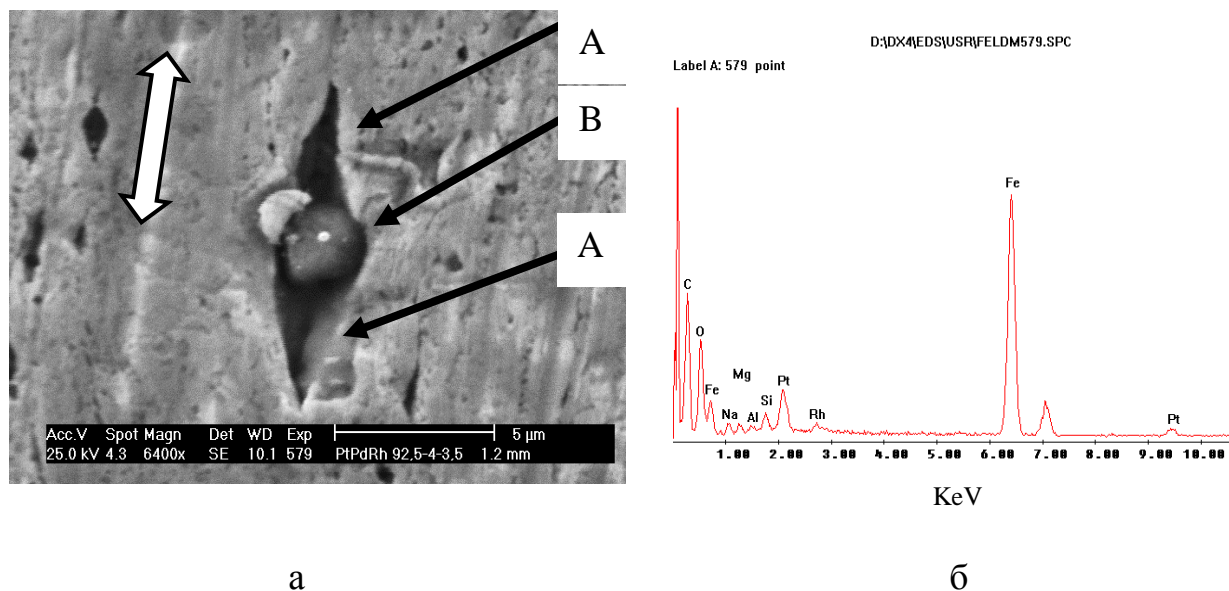


Рисунок 3.1 – Частица сплава на основе железа на поверхности проволоки диаметром 1,2 мм из платинового сплава ПлПдРд 92,5-4-3,5; белая стрелка показывает направление волочения (а); спектрограмма дефекта (б)

Важным аспектом является наличие пор, примыкающих к частице включения. Эти поры вытягиваются вдоль направления волочения, что было показано в исследовании [111], выполненного в области деформации электротехнической меди. Дополнительно этот эффект был выявлен методами электронно-ионной микроскопии с созданием объемного 3D-изображения [112].

Для обозначения поверхностной поры можно использовать термин «раковина». В металлургии раковина трактуется как «дефект поверхности в виде углубления, имеющий вытянутую или точечную форму и беспорядочное расположение» [113].

На фоне выявленной картины расположения поверхностных пор (раковин) при включении создан алгоритм их возникновения, схема которого приведена на рисунке 3.2



Рисунок 3.2 – Алгоритм образования раковины вокруг частицы включения

В дальнейшем перешли к исследованию тончайшей проволоки диаметром 50 мкм из платины марки Пл0. На ней было обнаружено наличие вдавленных частиц поверхностной поры. Для поверхностной поры присуща характерная треугольная форма с вытянутостью вершины треугольника в направлении волочения. В отличие от выявленной ранее частицы стали, вдавленные частицы имеют контур поверхности, совпадающий с контуром проволоки, т.е. эти частицы деформированы в процессе волочения. Они представляют собой отслоившиеся частицы самого сплава, попавшие в слой смазки и втянутые в очаг деформации при волочении. Поскольку в очаге деформации действуют радиальные напряжения сжатия, то они вдавили в поверхность эти частицы. Вид описанного дефекта показан на рисунке 3.3.

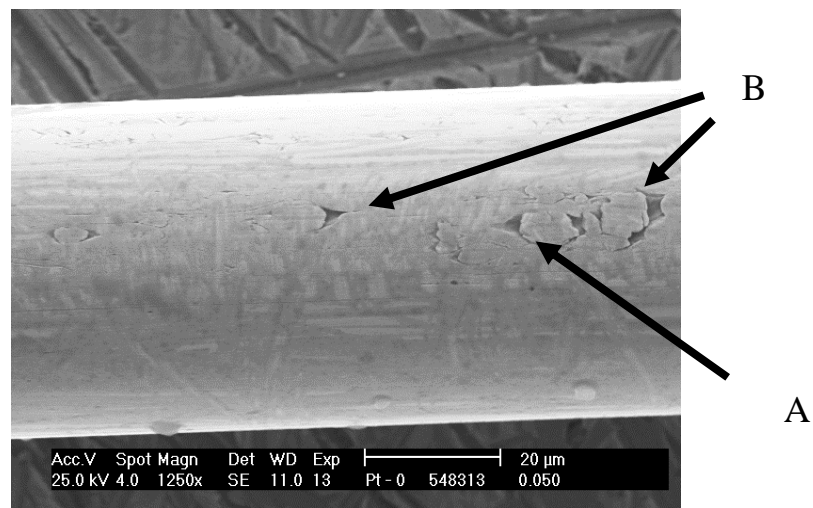


Рисунок 3.3 – Поверхность проволоки диаметром 50 мкм из платины Пл0: наличие вдавленных частиц самого деформируемого металла (А) и раковин (В)

Последний вид дефектности несколько отличается от предыдущего тем, что при его образовании участвуют частицы отслоившегося металла, а не посторонние частицы. На рисунке 3.4 отражен алгоритм развития событий для этого случая.

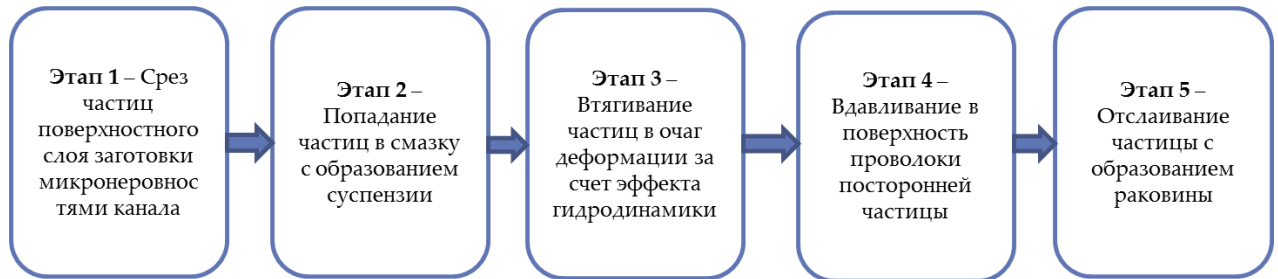


Рисунок 3.4 – Последовательность образования раковины при выпавшей частице на поверхности проволоки

Правомерность действия такого алгоритма показана на примере раковины с разглаженным рельефом (масштаб увеличения около $\times 1000$), эта проволока выполнена из платины марки Пл2 и имеет диаметр 60 мкм (рисунок 3.5). История происхождения такого дефекта состоит в том, что в определенном проходе волочения в поверхность проволоки была вдавлена частица, скорее всего, это отслоившийся деформируемый металл. Как это было показано выше, в последующих проходах на периферии частицы возникли поры. Они получали удлинение при следующих проходах. В результате поры превратились в риски. В следующих проходах волочения были созданы условия для отслаивания частицы. Тем самым возникло уже два типа дефекта: раковина с разглаженным контуром и примыкающая к ней риска.

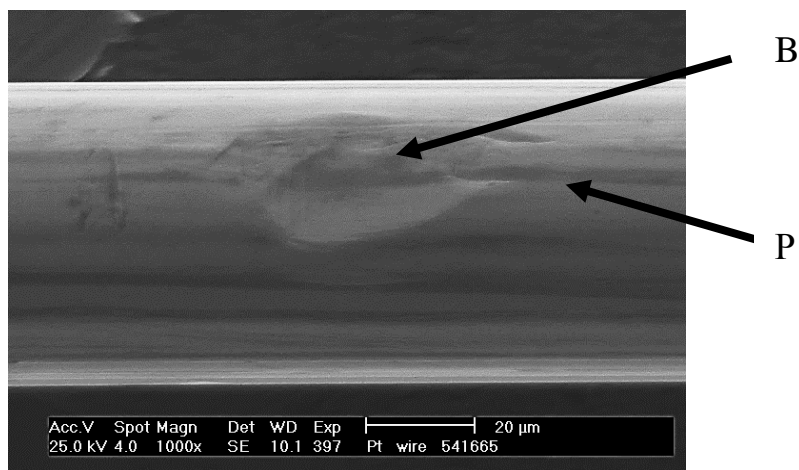


Рисунок 3.5 – Поверхность проволоки диаметром 60 мкм из платины ПЛ2: наличие раковины (В) и риски при ней (Р)

Как видно из последнего рисунка, несмотря на малые размеры раковины (около 20 мкм) на фоне малого диаметра самой проволоки (60 мкм) эффект влияния этого дефекта на прочность значителен. Его можно было бы не учитывать, если бы речь шла о проволоке больших сечений.

Можно отметить, что описанный выше механизм возникновения дефектов касается волочения платины и ее сплавов. Известно, что в отличие от обработки черных или тяжелых цветных металлов при термообработке благородных металлов окалина не возникает. Поэтому трактовка возникновения раковин на поверхности из-за вдавленных частиц окалина здесь не подходит. Раковины образуются из-за вдавливания частиц самого металла, отслоившихся в процессе волочения.

Дополнительно к изложенному могут развиваться иные сценарии развития событий при образовании поверхностных дефектов. Так, для материалов типа меди и медных сплавов из-за развития водородной болезни могут образовываться поры, содержащие воду. При проведении термической обработки вода превращается в пар, который при большом давлении разрывает поверхностный слой заготовки с образованием кратеров [114].

Кроме механизмов возникновения раковин действуют механизмы их разглаживания. Их эффективность зависит, в частности, от формы дефектов и механических свойств деформируемого материала [115].

Мерами борьбы с описанными явлениями являются устранение посторонних включений на всех стадиях обработки, включая выплавку, разливку, ковку, прокатку и волочение, а также борьба с отслоившимися частицами металла на стадии волочения. Для этого предпочтительно применять волочильные машины, работающие с применением не твердой, а жидкой смазки и снабженные системами ее фильтрации и регенерации. Эти рекомендации могут быть рассмотрены в качестве практической значимости выполненной работы.

Таким образом, тончайшее волочение платиновой проволоки сопровождается появлением и видоизменением поверхностных дефектов. Видоизменение заключается в возникновении вторичных дефектов в виде раковин, примыкающих к частицам включений, которые представляют собой либо частицы посторонних веществ, либо частицы самой платины. Раковины могут вытягиваться при волочении с образованием рисок. Более широко описанные выше результаты представлены в работе [116].

3.2. Расчет деформированного состояния при волочении с наличием в металле посторонней частицы

Выявленный выше феномен появления дополнительных дефектов при наличии в металле первичных включений может быть обоснован решением краевой задачи. Исходным условием для постановки является наличие участка металла, подвергаемого действию осевых напряжений растяжения σ_{zc} в направлении волочения (горизонтальная ось) и радиальных напряжений сжатия σ_{yc} (вертикальная ось) со стороны стенок волоки. Для упрощения постановки выбрана схема плоской деформации. На заданном участке имеется включение круглой формы. Включение представляет собой абсолютно твердое тело, металл не может внедряться в него, но может отрываться от его поверхности. Схема процесса волочения с включением показана на рисунке 3.6.

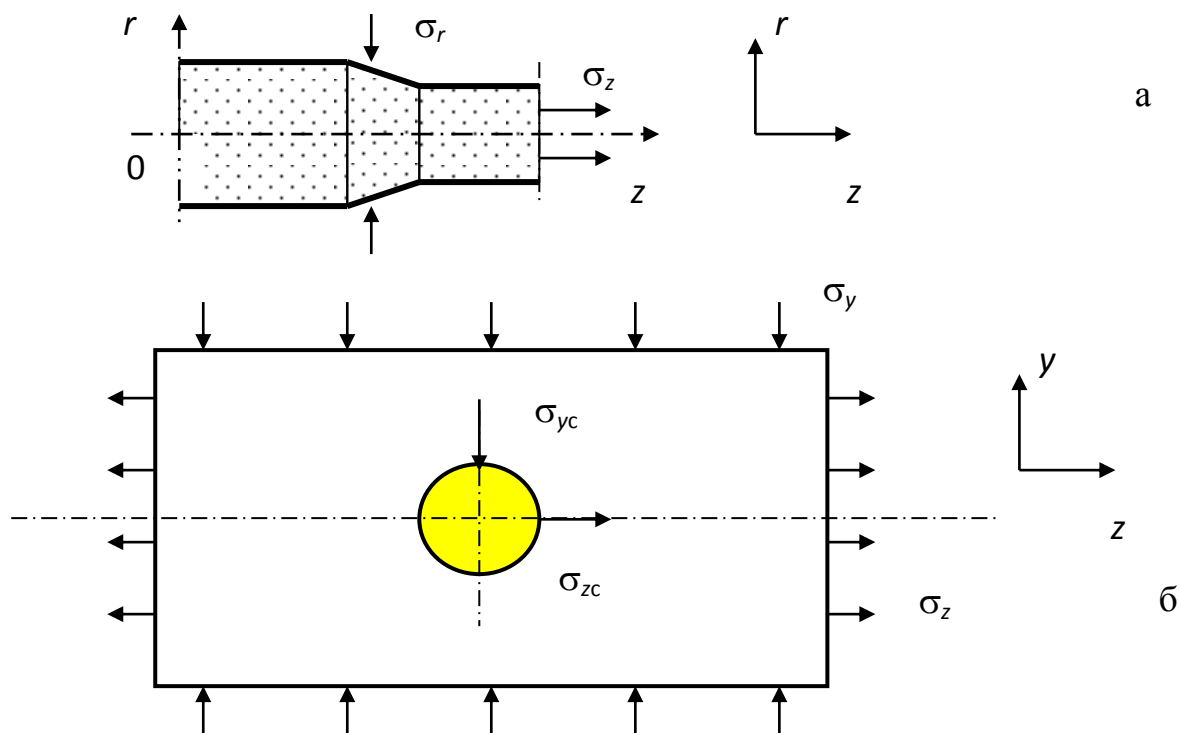


Рисунок 3.6 – Упрощенная схема волочения проволоки с расположением в цилиндрической системе координат (а), схема деформированного состояния вокруг частицы включения (б) при плоской деформации

Модельным материалом выступает медь с соответствующей кривой упрочнения. Для определения формоизменения металла вблизи расположения частицы включения применен программный комплекс ABAQUS/CAE Student Edition 6.7-2 (© Dassault Systemes, ABAQUS, Inc.). Использована версия программного обеспечения при количестве конечных элементов до 1000.

Для повышения точности расчетов использован принцип симметричности: очаг деформации представлен в виде одной четвертой его площади, расположенной в первом квадранте, наличие остальных фрагментов задано через граничные условия симметрии. После решения задачи полный очаг деформации восстановлен за счет отражения относительно горизонтальной и вертикальной осей. Программный модуль ABAQUS позволяет задавать сложные варианты взаимодействия материалов на контактной границе, но в настоящее время не изучены условия отрыва меди от оксида меди, поэтому от задания таких условий пришлось отказаться. На упомянутой границе заданы условия типа (surface-to-

surface contact), т.е. контактное взаимодействие с возможностью отрыва деформируемого материала от поверхности инструмента.

На рисунке 3.7 показана сетка конечных элементов в упругопластическом материале и включение из абсолютно жесткого материала. В качестве граничных условий на вертикальных краях пластической зоны задано напряжение растяжения на уровне 400 МПа, а на горизонтальных краях пластической зоны задано напряжение сжатия на уровне -300 МПа.

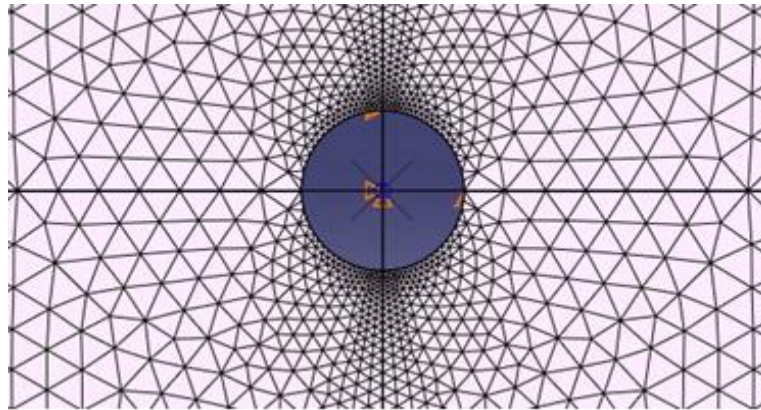
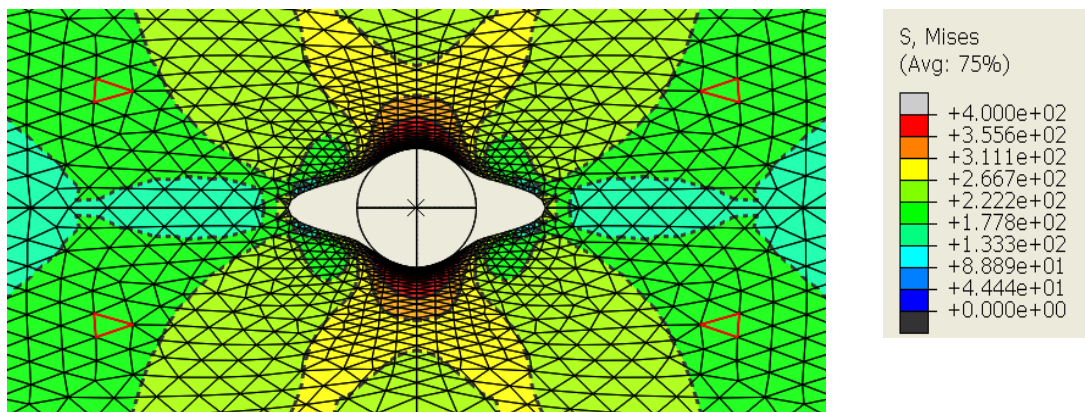


Рисунок 3.7 – Сетка конечных элементов в деформируемом материале и круглое включение

Ниже приведено сравнение результатов решения задачи и съемки дефекта методами электронной микроскопии. На рисунке 3.8 показано решение, полученное в программе ABAQUS



а

б

Рисунок 3.8 – Решение задачи (а) методом конечных элементов с полем распределения эквивалентных напряжений по Мизесу; б – цветовой ключ

На рисунке 3.9 показано включение на основе магния в проволоке из платинового сплава ПлПдРд 92,5-4-3,5 и приведена спектрограмма дефекта. Из нее следует, что частица содержит, в основном материал на основе магния. Она является продуктом износа жаростойкой керамики и может попадать в заготовку, например, вследствие разрушения плавильной оснастки под действием высоких температур.

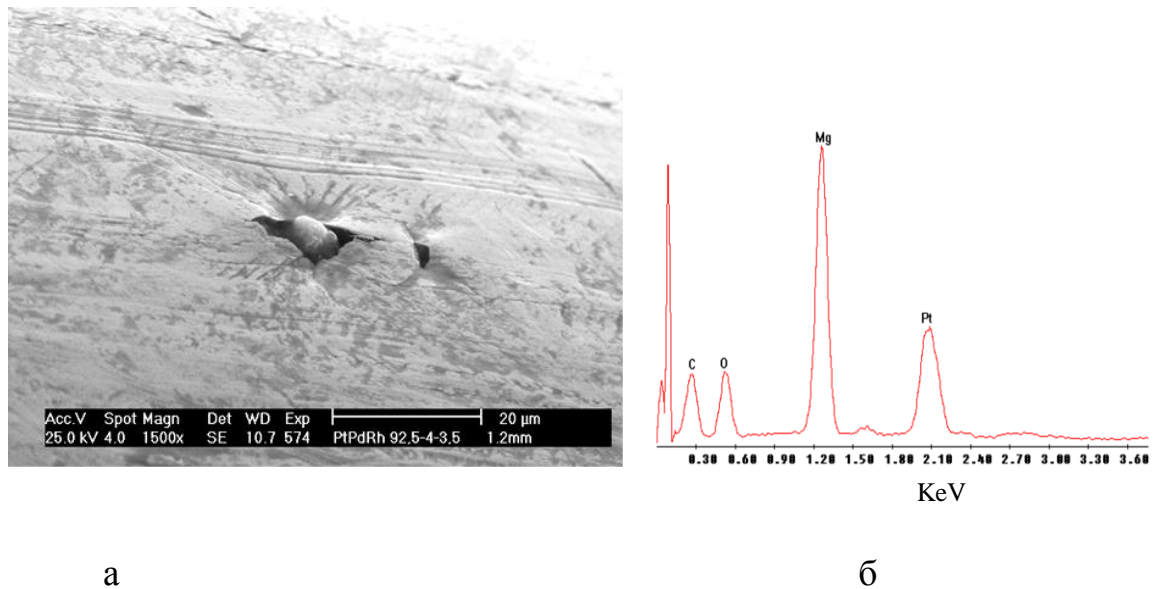


Рисунок 3.9 – Включение на основе магния в проволоке из платинового сплава ПлПдРд 92,5-4-3,5 (а); спектрограмма дефекта (б)

На рисунках 3.8 и 3.9 видно, что вокруг включения возникают поры, вытянутые вдоль оси волочения (приложения нагрузки). Из них видно, что результаты моделирования и анализа производственных образцов показали, что вокруг включения образуется дополнительный дефект в виде поры.

На рисунке 3.10 показано поле распределения интенсивности скорости деформации в сечении проволоки.

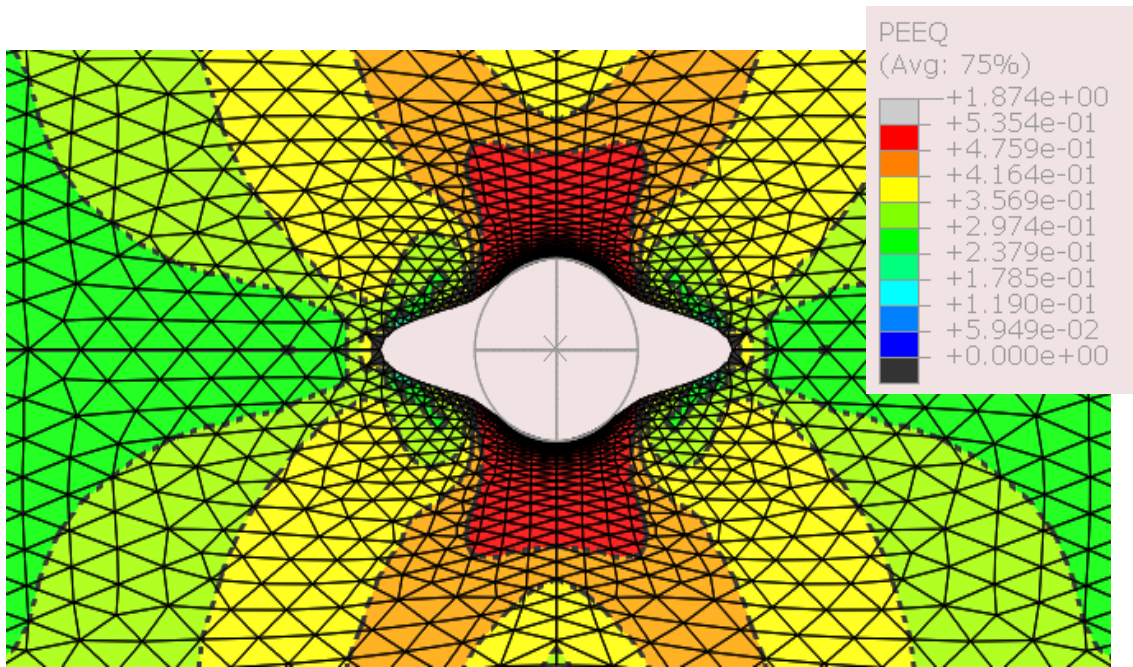


Рисунок 3.10 – Области равного уровня интенсивности пластической деформации PEEQ вокруг круглого дефекта и цветовой ключ

Из графика (цветового ключа) в частности следует, что степень деформации вокруг дефекта может достигать величины 1,87 на фоне средних значений 0,2...0,3. Тем самым созданы условия для очень сильной нагартовки металла в месте контакта частицы с металлом. В результате металл может потерять пластичность, особенно если показатель напряженного состояния окажется слишком велик.

В теории пластичности сплошных сред принято применять условие неразрывности. Оно говорит о том, что в решении любой краевой задачи не должно возникать разрывов нормальных компонент скорости или перемещений. В описанном случае становятся возможными нормальные перемещения металла относительно границы за счет того, что металл может оторваться от границы и образовать пустоту.

Наблюдение за обрывностью в технологическом процессе волочения проволоки из платино-родиевых сплавов показывает, что с уменьшением диаметра проволоки частота обрывов возрастает. На рисунке 3.11 показаны результаты распределения числа обрывов при волочении проволоки на 21

кратной волочильной машине Schmidt тип 20-2. Как видно из графика, частота обрывов возрастает и является максимальной в диапазоне диаметров (0,105 – 0,080) мм. Анализ образцов после обрывов дает основание предполагать, что именно на этих размерах величина дефектов достигает критического размера по отношению к диаметру проволоки.



Рисунок 3.11 – диаграмма распределения частоты обрывов по маршруту волочения проволоки из платино-родиевых сплавов

Практической ценностью данной части работы является установление возможности преобразования дефектов типа «включение» в дефект вида «включение + 2 поры». Тем самым появляется возможность объяснения причин нарастания обрывности тонкой и тончайшей проволоки по маршруту волочения. Более широко результаты были обсуждены в работе [117].

3.3. Последствия волочения проволоки при наличии локальных пережимов

Состояние поверхности проволочной заготовки, предназначенной для волочения, может оказаться различным. Проволочная заготовка в виде катанки может обладать поверхностными дефектами в виде закатов, продольных и поперечных трещин, раковин. Если проволочная заготовка получается методом

непрерывной отливки или вытягивания из расплава, то для нее характерно наличие кольцевых дефектов в виде локальных пережимов, возникающих из-за наличия шага вытягивания. В качестве примера на рисунке 3.12 показано состояние поверхности проволочной заготовки диаметром 10 мм из серебра марки Sr99,99 , полученной полунепрерывным вытягиванием на установке фирмы ИКОИ. Если в таком состоянии протягивать заготовку через волоку, то пластическая деформация выступов приведет к перетеканию металла во впадины с образованием плен, что ухудшит качество поверхности в готовом изделии.

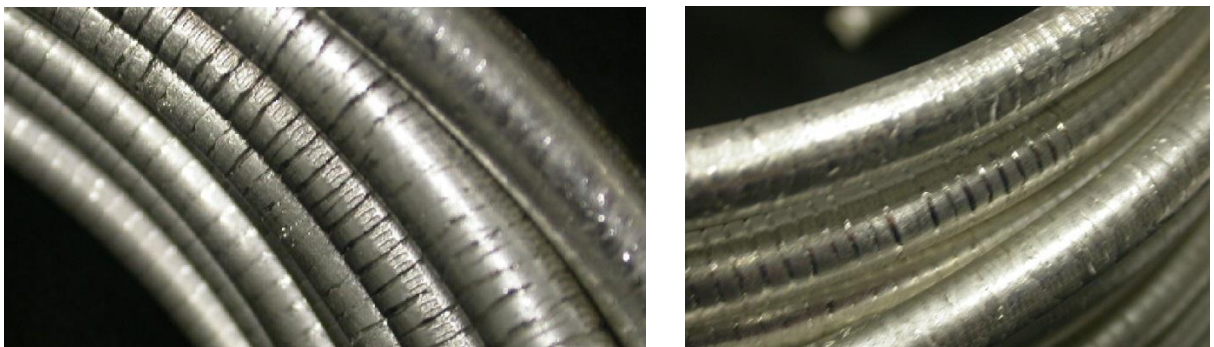


Рисунок 3.12 – Поверхность литой проволоки диаметром 10 мм из серебра марки Sr99,99 с дефектами в виде кольцевых пережимов

Для оценки последствий наличия таких дефектов в программном комплексе РАПИД поставлена задача волочения проволоки с кольцевой выемкой. Показатель трения равен 0,1. На рисунке 3.13, а показана проволочная заготовка диаметром $d = 8$ мм с кольцевой выемкой глубиной $h_d = 300$ мкм. Таким образом безразмерный параметр h_d/d равен 0,0375. Протяженность дефекта l_d равна 600 мкм, а в безразмерном виде $l_d/d = 0,075$. При прохождении проволоки через волоку диаметром 7,3 мм и при отсутствии дефекта (рисунок 3.13, б) показатель напряженного состояния K на конической контактной поверхности оказался на уровне -1,5, что говорит о наличии существенных напряжений сжатия.

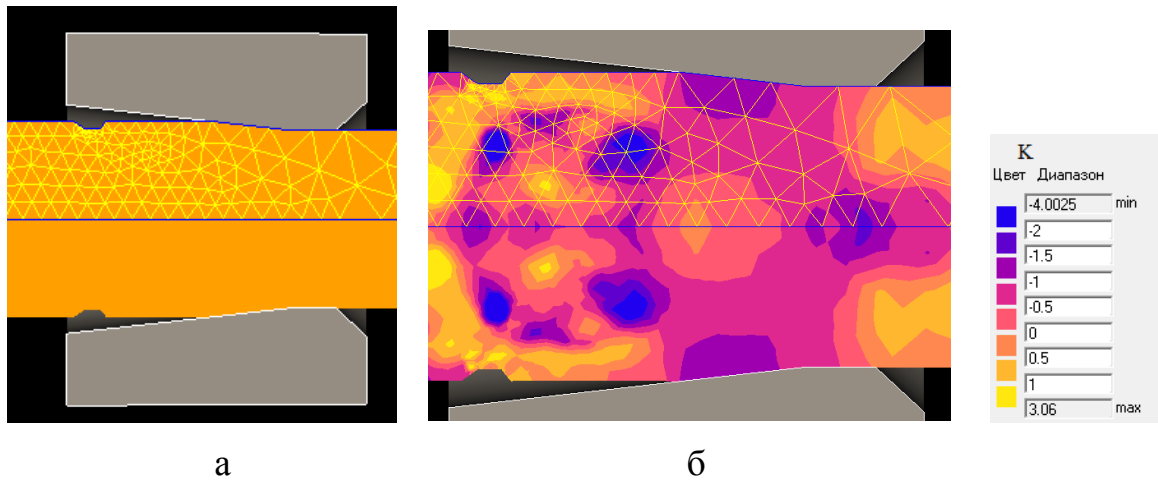


Рисунок 3.13 – Заготовка с кольцевым пережимом и сеткой конечных элементов (а) и поле показателя напряженного состояния (б)

На рисунке 3.14, а показано поле показателя напряженного состояния в различные моменты времени при прохождении дефекта через канал волокна. На входе в очаг деформации наличие дефекта вызвало появление растягивающих напряжений, поскольку вместо контактной поверхности появилась свободная поверхность, на которой инструмент не препятствует пластическому течению металла.

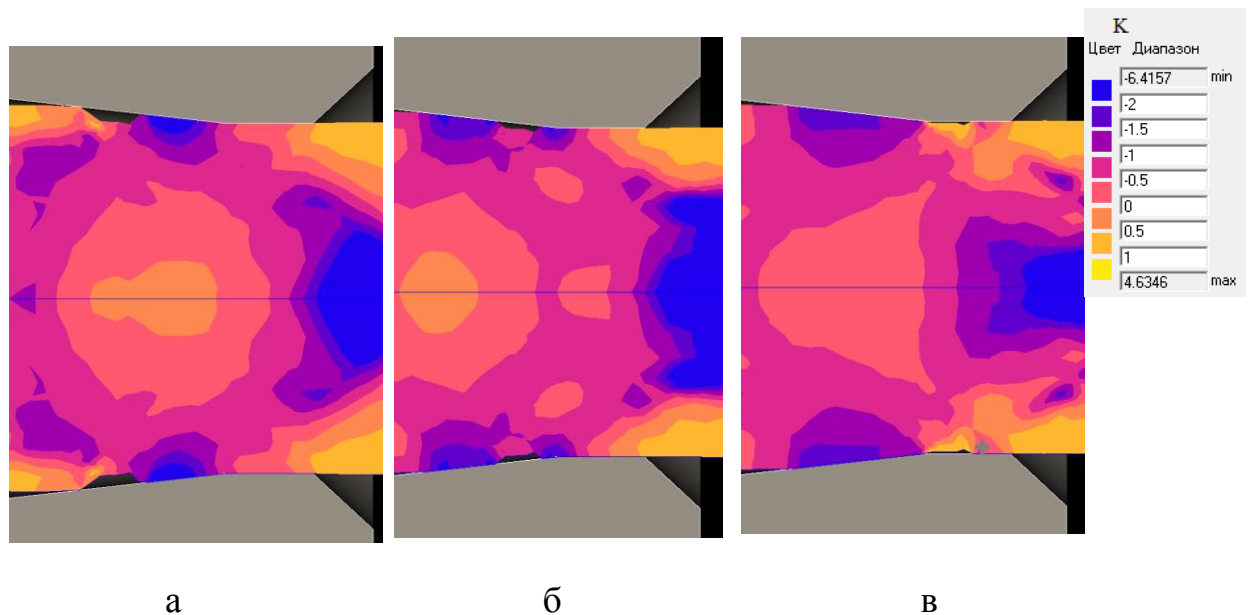


Рисунок 3.14 – Изменение показателя напряженного состояния при прохождении кольцевого дефекта: а – на входе в коническую зону; б – на выходе из конической зоны; в – на уровне калибрующего пояса

При продвижении через коническую зону волокна дефект такого типа уменьшается по высоте (рисунок 3.14, б). Можно было бы предполагать, что длина дефекта будет увеличиваться пропорционально коэффициенту вытяжки. Однако этого не происходит. Скорее всего, это связано с тем, что в сторону входа и в сторону выхода из волокна относительно дефекта создаются две зоны с повышенным (по модулю) показателем напряженного состояния, на уровне -2. Тем самым начинают превалировать напряжения сжатия, которые не позволяют дефекту вытягиваться по длине. На выходе из конической зоны (уровень калибрующего пояска) глубина дефекта равна 50 мкм при длине 800 мкм вместо 920 мкм, что следовало бы при учете коэффициента вытяжки 1,2. Подобное несоответствие коэффициентов деформации для деформируемого материала и для расположенной в нем полости обсуждалось в работах [118, 119].

На рисунке 3.15 приведен график изменения относительной глубины дефекта h_d по мере прохождения его вдоль образующей волокна при осевой координате z с началом пути в точке соприкосновения дефекта с внутренним контуром волокна. Если аппроксимировать полученную функцию прямой линией, то ее уравнение имеет вид

$$h_d = -67,146 \cdot z + 271,29$$

при достоверности аппроксимации $R^2 = 0,9578$.

Как видно из графика величина достоверности аппроксимации могла быть выше, если совокупность расчетных точек разбить на три группы: на входе в очаг деформации, при прохождении точки конического участка волокна и на выходе из очага деформации. На входе и выходе из очага деформации градиент изменения глубины дефекта оказался бы выше, чем это показано линией регрессии. Это говорит о том, что при наличии дополнительных сдвигов глубину дефекта можно уменьшать более эффективно.

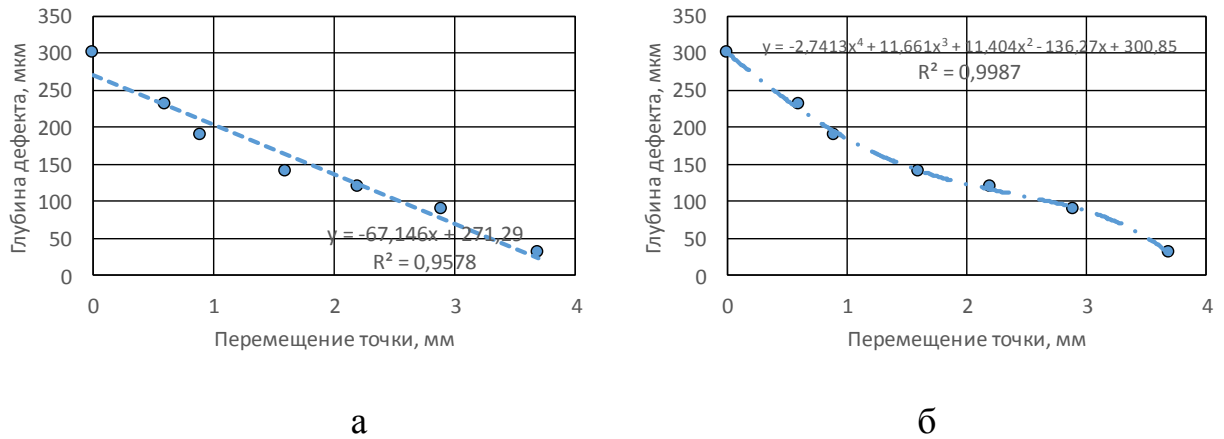


Рисунок 3.15 – Изменение глубины дефекта по мере прохождения его через канал волокна при аппроксимации прямой линией (а) и полиномом четвертого порядка (б)

Последний подход реализован при аппроксимации данных полиномом четвертого порядка вида

$$h_d = -2,7413z^4 + 11,661z^3 + 11,404z^2 - 136,27z + 300,85 .$$

Линия, описываемая такой функцией, характеризуется наличием двух точек перегиба, что больше соответствует наличию разных градиентов изменения размера дефекта. Действительно, в этом случае величина достоверности аппроксимации составила значение 0,9987, что выше ранее рассмотренного варианта описания.

Можно отметить, что в данной постановке обжатие проволоки по радиусу составило 350 мкм, при этом дефект глубиной 300 мкм не разгладился полностью. Разглаживание неровных поверхностей при холодной деформации затруднено из-за нагартовки металла вблизи поверхности. В результате деформация может передаваться на глубину заготовки, при отсутствии выравнивания. Этот эффект описывался в работах [115, 120]. Лучший результат по разглаживанию достигался бы в условиях горячей деформации, где эффект нагартовки смягчался бы эффектом рекристаллизации [121, 122].

На рисунке 3.15, а показано влияние дефекта на форму очага деформации, что иллюстрировано полем интенсивности скорости деформации сдвига N .

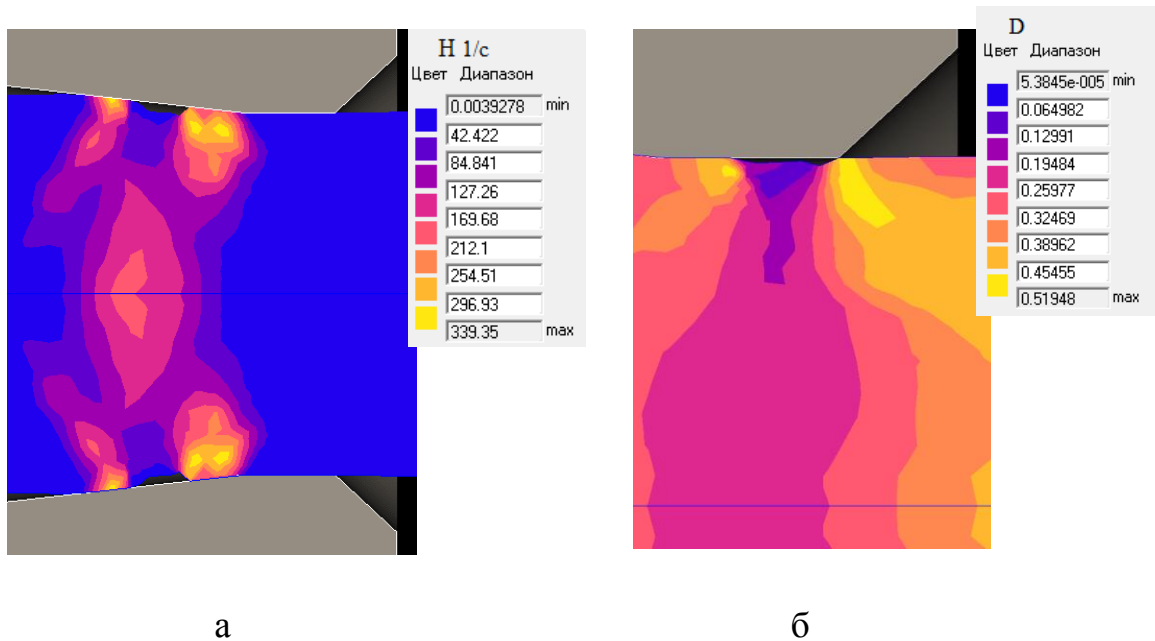


Рисунок 3.15 – Появление дополнительных максимумов интенсивности скорости деформации сдвига H (а) и резкое снижение степени деформации сдвига Λ вблизи дефекта при выходе из волоки (б)

Обычно при волочении наблюдается локализация сдвигов в месте входа в очаг деформации и в месте выхода из него, что связано с изменением траектории перемещения материальной частицы и что отмечается во многих работах [123]. Как видно из рисунка 3.15, появился третий максимум скорости, который примыкает к дефекту. При этом на уровне середины дефекта скорости могут быть близки к нулю. Это приводит к тому, что вокруг дефекта деформации не накапливаются и возникает зона пониженной степени деформации сдвига (рисунок 3.15, б). Эта зона впоследствии так и остается в окрестностях дефекта. В этой зоне металл слабо нагартован. Поскольку передача усилия при волочении осуществляется через сечение проволоки на выходе из волоки, то наличие такого участка может привести к обрыву.

Таким образом, наличие поверхностных дефектов приводит к ухудшению условий безобрывного волочения. Поэтому следует стремиться к получению заготовки, не обладающей этими дефектами, либо необходимо использовать в производственной практике приемы ликвидации этих дефектов, например, операцию скальпирования.

3.4. Перераспределение деформации в операциях многопроходного волочения

Процесс волочения является обычно калибрующей операцией, с помощью которой достигается необходимая точность изготовления полуфабриката и повышенная чистота поверхности. В теории процессов обработки металлов давлением описанию формы очага деформации уделяется повышенное внимание, поскольку от этого зависит точность математических операций, например, интегрирования по объему показателей напряжений и деформаций, от которых зависит определение внутренней энергии, а значит и в целом энергосиловых параметров, например, с целью их минимизации [124].

В базовых решениях задач из теории волочения принято представлять форму очага деформации в продольном сечении в виде сегмента, ограниченного дугами окружностей радиусами R_1 и R_2 (рисунок 3.16).

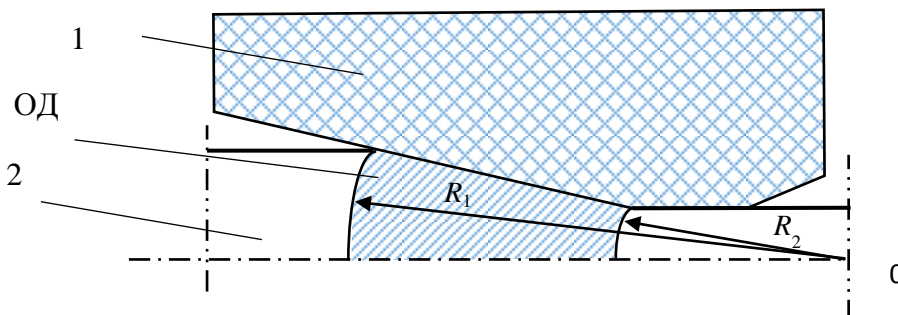


Рисунок 3.16 – Отображение границ очага деформации ОД (верхняя половина) при волочении дугами окружностей: 1 – волокна; 2 – заготовка

Такой прием позволяет описать поле кинематически возможных скоростей в сферической системе, использующей радиус в качестве одной из координат [125].

Переход от аналитических решений задач к конечно-разностным решениям позволяет оценить точность допущений, принятых в теории волочения.

Для оценки справедливости допущения о радиальной форме границы очага деформации при волочении осуществлена постановка задачи с применением расчетного модуля РАПИД-2D, некоторые варианты расчетов представлены в работах [84, 126, 127].

Исходные данные для расчета: угол наклона образующей волокни $\alpha = 10^\circ$. Использован реальный маршрут волочения (диаметры) одного из производств медной проволоки следующего вида: 8 - 6,53 - 5,37 - 4,48 - 3,76 мм. В соответствии с этим маршрутом рассчитаны коэффициенты вытяжки $\lambda_i = d_{i-1}^2/d_i^2$, где d_i – текущий диаметр в i –том проходе. Одновременно подсчитывали накопленный коэффициент вытяжки по формуле $\lambda_{\Sigma i} = \prod \lambda_i$ и накопленное относительное обжатие по площади к данному проходу вытяжки

$$\varepsilon_{\Sigma i} = 100 * \frac{\lambda_{\Sigma i} - 1}{\lambda_{\Sigma i}}, \quad (3.1)$$

что отражено на рисунке 3.18.

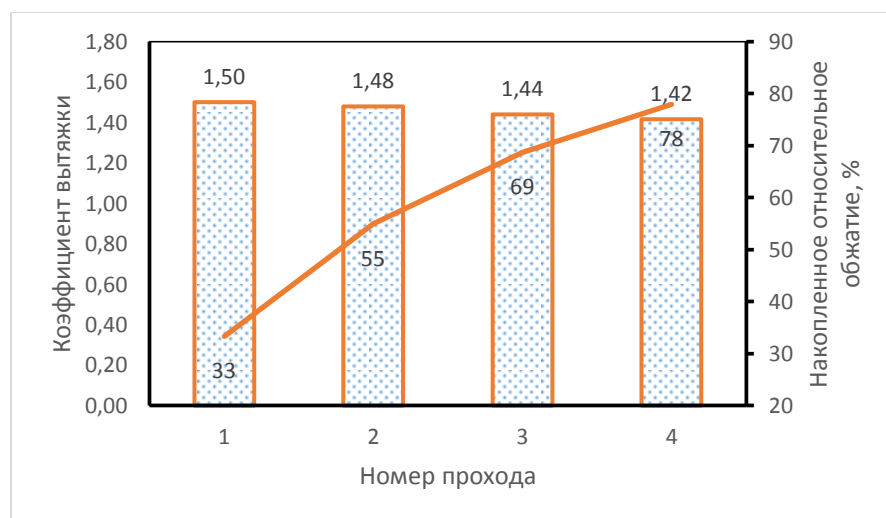


Рисунок 3.18 – Коэффициенты вытяжки и накопленное относительное обжатие по проходам волочения

Как видно из рисунка, коэффициент вытяжки по проходам снижается на небольшую величину, накопленное относительное обжатие по проходам составляет 78%. В ходе решения задачи по проходам волочения учитывался характер нагартовки заготовки в предыдущих проходах волочения. Для этого

рассчитывали напряженно-деформированное состояние в первом проходе волочения, определяли распределение деформации по объему заготовки, заготовку с унаследованной неравномерностью деформации «переносили» в следующий этап расчета с другой конфигурацией волочильного инструмента, характерной для второго прохода волочения, вновь производили расчет и т.д.

Деформированное состояние при известных компонентах тензора скорости ξ_{ij} описывали интенсивностью скоростей деформации сдвига H и скоростью деформации ξ , определяемыми формулами [128]

$$H = \sqrt{2\xi_{ij}\xi_{ij}}, \quad \xi = H/\sqrt{3}, \quad (3.2)$$

а также степенью деформации сдвига

$$\Lambda = \int_0^t H d\tau, \quad (3.3)$$

рассчитываемой вдоль траектории движения частицы по очагу деформации в течение времени t .

Инструмент для деформации – волока, изготовленная из искусственного алмаза, в решении задачи она представлена как абсолютно жесткое тело. Кинематические граничные условия для пластического тела заданы перемещениями переднего торца заготовки, а для инструмента – фиксированием положения волоки в волокодержателе. Взаимодействие деформируемого материала и инструмента задано с применением закона трения по Зибелю при показателе трения 0,1 и использованием условия равенства нулю нормальных составляющих перемещения на контактной границе. Свойства материала заданы в табличном виде как зависимость сопротивления деформации или напряжения пластического течения технически чистой меди от степени и скорости деформации [129] (нелинейно упрочняемая среда).

При решении задачи учитывалось не только степенное, но и скоростное упрочнение. Предполагалось, что волочение ведется на многократном стане, для которого выполняется постоянство секундных объемов, поэтому линейные скорости нарастают пропорционально коэффициентам вытяжки. Для входа в первую по ходу маршрута волоку линейная скорость составляет 1,3 м/с.

Если целью исследования является изучение формы очага деформации, то наиболее корректно его границы описываются полем скоростей деформации. Это поле для четырех проходов волочения представлено на рисунке 3.19.

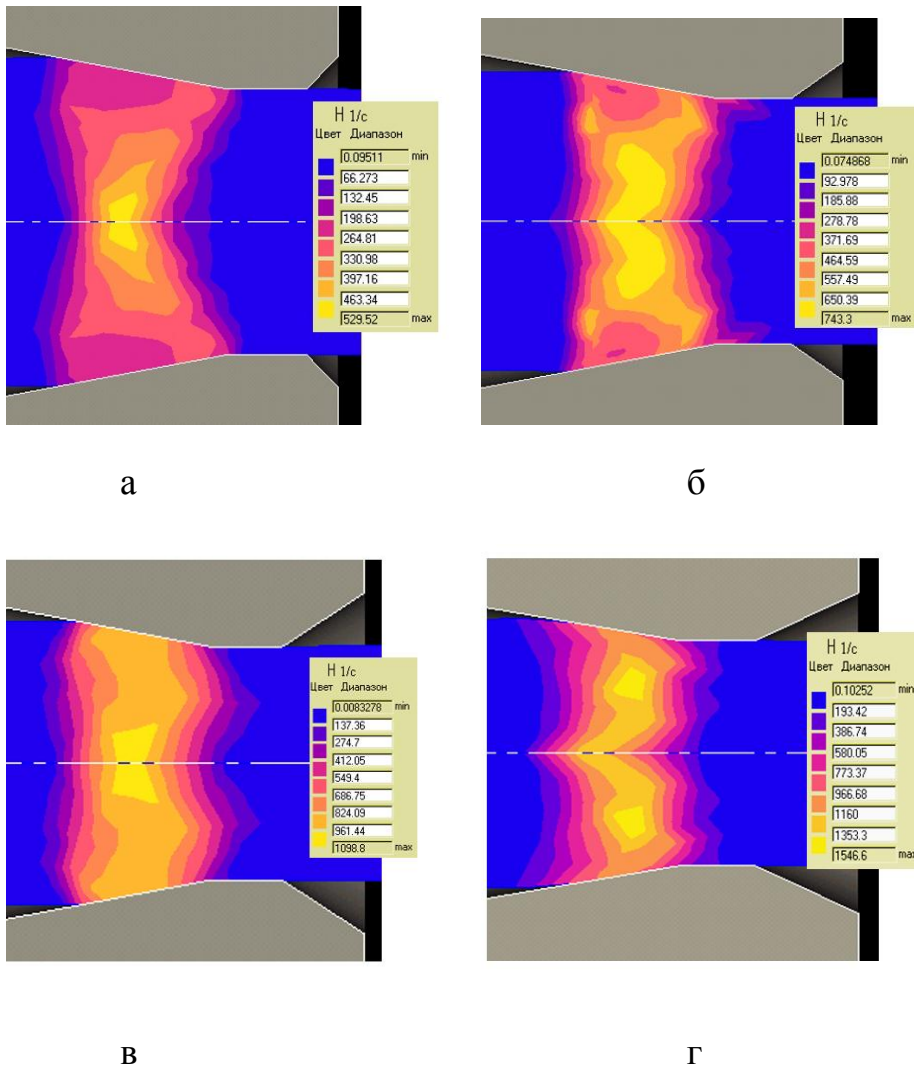


Рисунок 3.19 – Поле интенсивности скорости деформации сдвига H от первого к четвертому проходу (а...г)

В отличие от аналитического решения краевой задачи в первом и втором проходах волочения (рисунок 3.19, а, б) форма правой границы близка к радиальной, а левая граница не только не выпуклая относительно центра кривизны O на рисунке 3.16, но имеет обратную кривизну. В третьем и четвертом проходах волочения (рисунок 3.19, в, г) ни правая, ни левая границы не имеют радиальных очертаний, а состоят из чередующихся участков выпуклости и вогнутости.

Таким образом, здесь показано, что радиальное строение очага деформации, принятое за основу при построении кинематически возможных скоростей при описанных выше условиях, реализуется, и то частично, только для первого прохода волочения. В последующих проходах это условие нарушается.

Для сравнения полученных результатов с аналитическим подходом определена средняя по очагу деформации скорость деформации $\xi_{\text{ср}}$ и средняя интенсивность скорости деформации сдвига H по формулам

$$\xi_{\text{ср}} = \frac{6 \ln \lambda_i \cdot \operatorname{tg} \alpha}{(\lambda_i \sqrt{\lambda_i - 1}) d_i} v_{1i}, \quad H_{\text{ср}} = \sqrt{3} \xi_{\text{ср}}, \quad (3.4)$$

где v_{1i} – линейная скорость выхода проволоки из волоки в i – том проходе.

На рисунке 3.20 показаны средние значения H и максимальные значения H , определенные по рисунку 3.19.

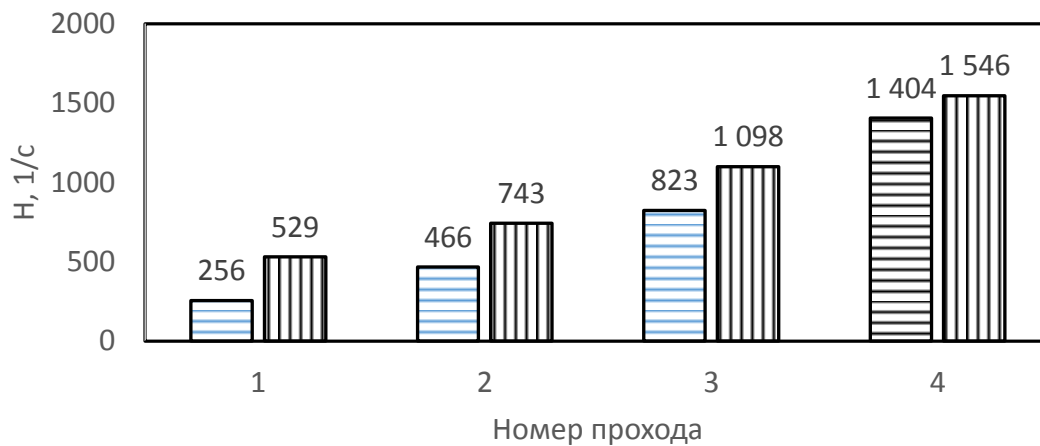


Рисунок 3.20 – Интенсивность скорости деформации сдвига по проходам: средняя (горизонтальная штриховка) и максимальная (вертикальная штриховка)

Рисунок 3.20 показывает, что средние значения параметра ниже максимальных, при этом их разница уменьшается по проходам, что говорит о сближении величин, т.е. деформация по мере обжатия заготовки становится менее локализованной. Действительно, на рисунке 3.19 видно, что область высоких скоростей деформации занимает в первом проходе малую площадь. В следующих проходах эта площадь увеличивается.

Кроме того, к четвертому проходу волочения вместо одного максимума величины N появляется два максимума. Это можно объяснить различной интенсивностью изменения сопротивления деформации σ_s по мере нагартовки со степенью деформации ε (рисунок 3.21).

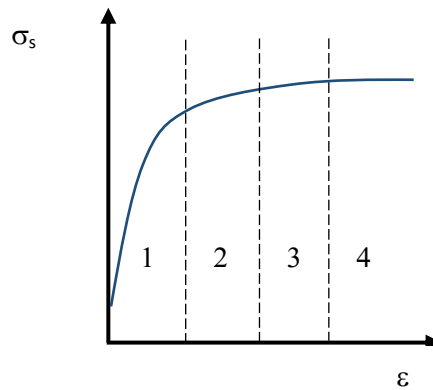


Рисунок 3.21 – Стилизованная кривая упрочнения металла с разделением на зоны по проходам волочения 1-4

В соответствии с изображенной кривой в первом проходе волочения градиент сопротивления деформации относительно степени деформации оказывается большим. Поэтому в участках металла, сильно подверженных деформации, происходит резкое повышение прочностных свойств и, в соответствии с принципом наименьшего сопротивления, пластическое течение переходит в соседнюю область, чем уменьшается общий уровень неравномерности деформации.

Однако при малой интенсивности упрочнения описанный выше эффект не проявляется, чем провоцируется локализация деформации в областях с повышенным уровнем эквивалентных напряжений.

Разделение очага деформации на зоны с двумя максимумами опасно появлением макропор [130, 131], которые способствуют повышенной обрывности проволоки. Специально выполненные исследования показали, что могут существовать такие чередования обжатий и углов наклона образующей волоки, при которых условия для образования макропор оказываются наименее выгодными. Например, экспериментально было установлено [132], что в первом проходе волочения целесообразно применять большие обжатия и малые углы

волоки, а в следующем проходе - малые обжатия и большие углы волоки. Вместе с тем, такие решения не являются достаточно универсальными, поскольку они зависят от вида кривой упрочнения, а также от степени текстурированности материала [133].

Практическая ценность этой части исследования заключается в установлении факта возможного появления двух максимумов распределения скоростей деформации уже к четвертому проходу многократного волочения, что приводит к риску появления макропор и последующей повышенной обрывности. При этом обрывность может не проявляться сразу же после возникновения макропоры, а по мере накопления дефектности, обрыв может наступить через несколько проходов или даже после перехода от режима грубого волочения к среднему, тонкому или тончайшему волочению.

Более широко представленные выше результаты рассмотрены в работах [134 - 136].

Таким образом, с применением метода конечных элементов выявлены различия в форме очага деформации по проходам многократного волочения. В отличие от гипотезы радиального строения, применяемой в теории волочения, форма очага претерпевает изменения по проходам волочения, приобретая выпукло-вогнутую конфигурацию. Выявлено, что в первых проходах волочения наблюдается один максимум скорости деформации, расположенный на оси заготовки. К четвертому проходу в очаге деформации могут наблюдаться два максимума, что говорит о возможности зарождения макропор. Указанное явление объяснено с позиции изменения интенсивности упрочнения металла по проходам.

3.5. Выводы по разделу

На основании изучения методами электронной микроскопии поверхности проволоки из благородных металлов выявлены дефекты типа включений и кольцевых пережимов.

1. Решение краевой задачи волочения проволоки с кольцевыми пережимами методом конечных элементов показало возможность возникновения на поверхности проволоки локальных зон с неблагоприятным для стабильного волочения деформированным и напряженным состоянием.

2. Решение краевой задачи плоской деформации ограниченной области материала с наличием посторонней частицы при нагружении этой области напряжениями, характерными для волочения, показало возможность развития вторичных дефектов в виде пор, примыкающих к частице.

3. Следует стремиться к получению заготовки, не обладающей поверхностными дефектами, либо необходимо использовать в производственной практике приемы ликвидации этих дефектов, например, скальпирование.

4. При многопроходном волочении следует учитывать вид кривой упрочнения при назначении режимов обжатий, иначе возникает риск возникновения дефектов типа центральных разрывов.

4. ЭФФЕКТЫ СОВМЕСТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ОПЕРАЦИЙ ВОЛОЧЕНИЯ И СКАЛЬПИРОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ПРОВОЛОКИ ИЗ ЦВЕТНЫХ И БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Скальпирование поверхности проволоки применяется в производстве прутков и проволоки, обычно круглого поперечного сечения для удаления поверхностных дефектов. Анализ явлений, сопровождающих процесс скальпирования, находится на стыке разделов механики обработки давлением и обработки резанием, поэтому трудно найти научные работы, описывающие процесс во всей его полноте. В этой области приходится опираться на два этих раздела и, дополнительно привлекать для объяснения явлений основные положения материаловедения.

Целью выполнения этой части работы является описание процесса скальпирования с позиции механики пластической деформации и оценка последствий этой операции в производственных условиях.

4.1. Экспериментальный анализ процесса скальпирования проволоки

Проволока, производимая из благородных металлов, в первую очередь, таких как золото и серебро, применяется в приборостроении и электропромышленности. К таким материалам предъявляются ответственные требования по механическим свойствам, а также к качеству поверхности изделий. Возможным технологическим вариантом по повышению качества протягиваемых изделий может являться операция скальпирования.

Для анализа влияния операции скальпирования на повышение качества производимой проволоки и на дальнейшее волочение было проведено исследование существующих режимов скальпирования в рамках технологического режима производства проволоки из драгметаллов. Такую операцию применяют для среза поверхностного слоя проволочной заготовки, поступающей с предыдущих переделов, например заготовки, полученной на установке непрерывной разливки. В результате получают стружку, внешний вид

которой показан на рисунке 4.1. Тип стружки, возникший в данном случае – вьющийся, что говорит о высокой степени пластичности металла на этой стадии обработки.



Рисунок 4.1 – Стружка, полученная в результате скальпирования проволоки Ср 99,99

Для скальпирования в режиме протягивания заготовки применяется инструмент, размещающийся в волокодержателе волочильного стана. Заготовка 1 (рисунок 4.2) перемещается тянущим устройством стана через отверстие скальпирующей волоки 2, более узкое, чем поперечный размер заготовки, в результате чего режущей кромкой волоки срезается тонкий слой металла 3. Основным параметром скальпирующей волоки – угол наклона острой кромки γ , который отсчитывается от нормали к оси волочения.

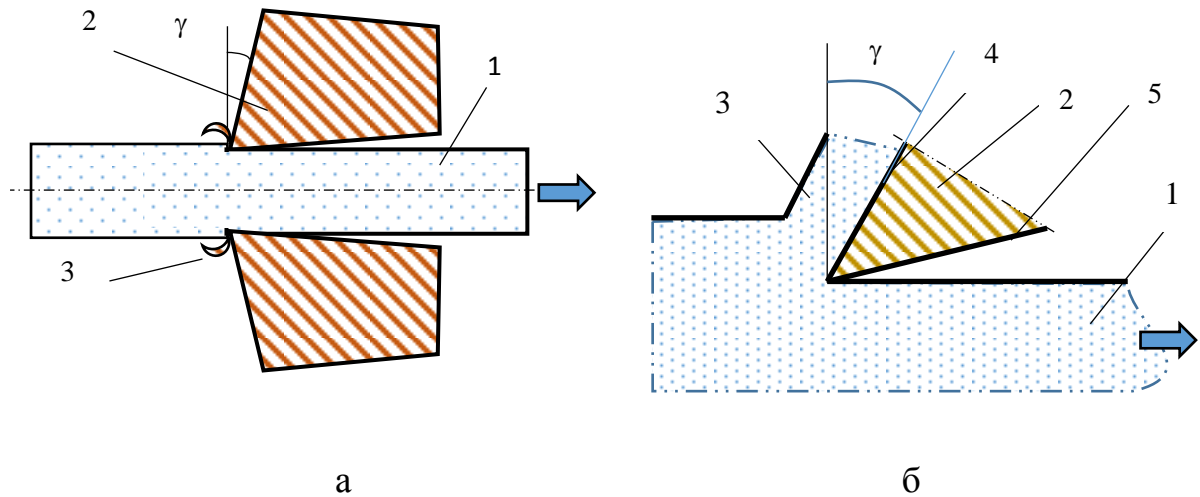
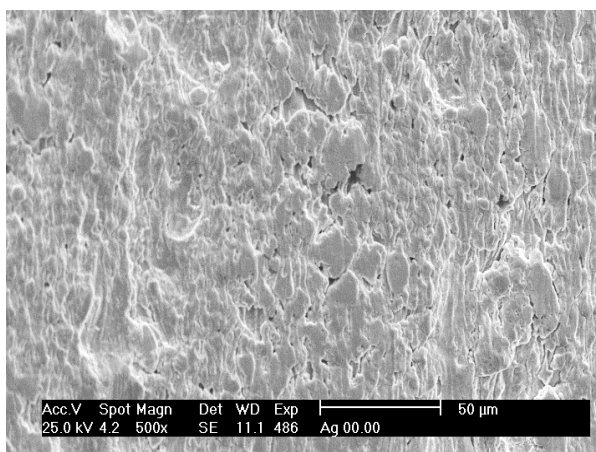


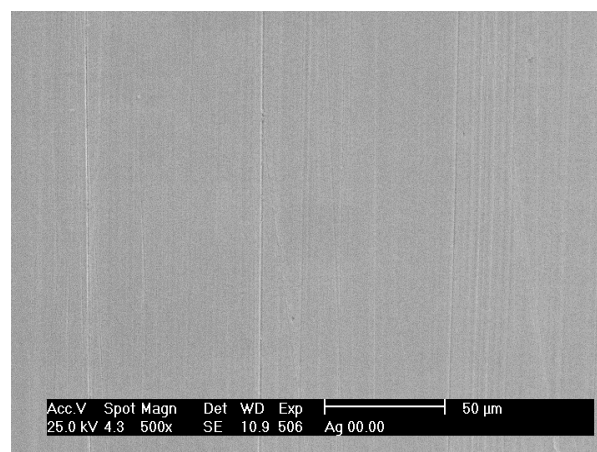
Рисунок 4.2 – Схема скальпирования прутковой заготовки (а) и увеличенное изображение места съема стружки (б): 1 – заготовка; 2 – скальпирующая волока; 3 – стружка, 4 и 5 – передняя и задняя кромки резца соответственно, стрелка показывает направление перемещения заготовки

Материалом для исследования была выбрана проволока диаметром 5,3 мм из серебра марки Sr99,99 производимая по ГОСТ 7222-2014 перед проведением операции скальпирования и после выполнения этой операции. Применение такого материала для анализа можно связать, во-первых со схожей технологией обработки с золотом, включающей одинаковые режимы скальпирования, а во-вторых, с гораздо меньшей стоимостью подготовки образцов для анализа. Поверхность образцов перед исследованием подвергли очистке бензином и этиловым спиртом.

На рисунке 4.3 представлено фото электронной микроскопии, выполненное при одинаковом увеличении, поверхности проволоки до скальпирования (а) и после (б). Из сравнения изображений видно, что качество поверхности после скальпирования резко улучшилось. Далее будут рассмотрены иные последствия применения этой операции.



а



б

Рисунок 4.3 – Фото электронной микроскопии поверхности проволоки из серебра марки Ср 99,99 до скальпирования (а) и после скальпирования (б)

В теории резания угол острой кромки γ на рисунке 4.2 соответствует понятию переднего угла реза. Основное количество работ, связывающих пластическую деформацию металла в процессе резки с конфигурацией инструмента и свойствами обрабатываемого металла посвящено оценке степени деформации, сообщенной стружке. Это объясняется тем, что пластическая деформация позволяет изменить свойства в месте резания и перевести металл в охрупченное состояние, в результате удастся изменить конфигурацию стружки от витой до сыпучей, что предпочтительнее.

После анализа многих работ в области резания удалось установить, что общее строение очага деформации при резании включает в себя зону интенсивной деформации в стружке *A*, зону умеренной деформации вблизи поверхности заготовки *B*; и зону интенсивного сдвига на границе стружки и заготовки *C* (рисунок 4.4).

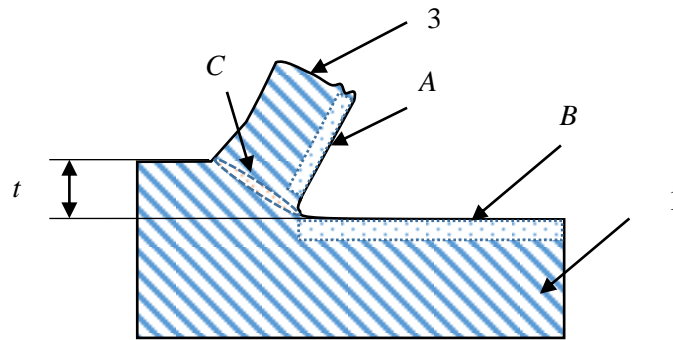


Рисунок 4.4 – Схема образования зон пластической деформации при срезе стружки: *A* – зона интенсивной деформации в стружке, *B* – зона умеренной деформации вблизи поверхности заготовки; *C* – зона интенсивного сдвига на границе стружки и заготовки, цифровые обозначения соответствуют рисунку 4.2

Наличие зоны *B* дает основание предполагать, что в заготовке, подвергнутой скальпированию, появляется поверхностный слой, нагартованный в результате осуществления пластической деформации. Некоторым авторам исследований удалось выполнить измерения степени деформации, сообщенной материалу стружки передней кромкой резца либо рассчитать эту величину. Большинство авторов склоняется к тому, что степень деформации самой стружки ощутимо превышает степень деформации поверхностного слоя обрабатываемой заготовки [137]. Однако, например, в работе [138] указывается, что степень деформации поверхностного слоя оказывается больше степени деформации, унаследованной стружкой. Степени деформации могут изменяться от 6,1 до 1 при срезе стружки толщиной $t = 150$ мкм в зависимости от марки материала и угла наклона острой кромки γ (в пределах от -30 до $+50^\circ$). При этом рассчитанные скорости деформации в поверхностном слое оказываются выше скорости деформации в стружке при одинаковой скорости перемещения инструмента. Можно отметить, что при больших скоростях холодной деформации достигается большее упрочнение, что выявлено, например, в работе [31].

Для оценки степени нагартованности поверхностного слоя выполнен опыт по скальпированию проволоки из серебра марки Sr99,99 при ее обработке с

уменьшением диаметра по маршруту (мм): 6,40 – 6,32 – 6,12 – 5,47. Угол острой кромки скальпирующей волоки составил $+10^\circ$. По проходам глубина скальпирования составила соответственно 40, 100 и 325 мкм. Для исходного состояния, а также после каждого прохода измеряли микротвердость по Виккерсу. По результатам трех измерений рассчитывали среднюю величину и получили диаграмму, приведенную на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5 – Микротвердость поверхности серебряной проволоки по проходам скальпирования

Как видно из диаграммы, микротвердость поверхности проволоки увеличивается от прохода к проходу. Можно отметить, что вследствие повышения толщины скальпируемого слоя, предыдущий, уже нагартованный слой срезался в последующем проходе. Поэтому накопления деформации по проходам вряд ли можно было ожидать. Вследствие этого, эффект увеличения микротвердости по проходам можно объяснить исключительно увеличением глубины съема стружки. Зависимость уровня нагартовки поверхностного слоя от толщины стружки в операциях резания отмечалась в предыдущих работах, например, [85], а сам эффект объяснялся большей глубиной проникновения напряжений, вызывающих пластическую деформацию. Таким образом, выявленный эффект, достигнутый при скальпировании, не противоречит положениям теории резания.

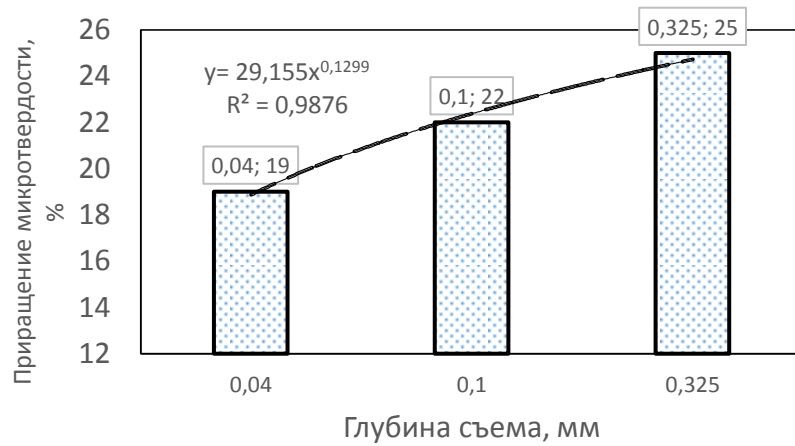


Рисунок 4.6 – Приращение микротвердости поверхности серебряной проволоки в зависимости от глубины съема: столбцы – опытные данные; линия – регрессионная зависимость

На рисунке 4.6 представлен график приращения микротвердости в зависимости от глубины съема. Видно, что приращение нелинейно зависит от глубины съема: эффект повышения микротвердости при увеличении глубины съема уменьшается. Это можно связать с тем, что глубина проникновения напряжений, приводящих к пластической деформации, не может оказаться бесконечно большой.

Выполнена статистическая обработка, которая показала, что при величине достоверности аппроксимации $R^2=0,9876$ приращение микротвердости DHV в функции от глубины съема t может быть описано формулой

$$DHV = 29,155 t^{0,1299}.$$

Практическая значимость выполненного исследования заключается в том, что явление поверхностного упрочнения, выявленное вследствие применения скальпирования, необходимо учитывать при анализе напряженно-деформированного состояния при последующей обработке волочением. Действительно, непосредственно уже в первом проходе волочения следует принять во внимание неравномерное распределение прочностных свойств, в том числе сопротивления деформации, по радиальной координате. В работах [135, 139] было показано, что, если учитывать неравномерность распределения свойств, создаваемую в каждом проходе волочения, и ее влияние на каждый

последующий проход волочения, то картина деформированного состояния к концу обработки довольно сильно изменится по отношению к существующим представлениям. Это решение было получено при условии равномерного распределения свойств в первом проходе волочения. Однако, если перед первым проходом волочения провести операцию скальпирования, то она создаст картину неравномерного распределения свойств теперь уже и в первом проходе. Это должно быть учтено при последующей постановке краевой задачи волочения.

Учет повышенной степени деформации, накопленной заготовкой в результате скальпирования, мог бы объяснить явление нестабильной прочности полуфабрикатов из чистых металлов, которые получают методом волочения. Как известно, температура начала рекристаллизации зависит от степени накопленной деформации и от степени чистоты металла. Для некоторых металлов, например, золота с содержанием чистого металла на уровне 99,99 % или 99,999 % температура рекристаллизации может снизиться до комнатной при накоплении значительной пластической деформации, что подтверждается производственной практикой. Это делает невозможным применение изделий, если требуется их повышенная прочность и жесткость. В результате вынужденно прибегают к микролегированию, т.е. по существу искусственному загрязнению чистого металла кальцием или палладием [140]. Это решает вопрос с повышением температуры начала рекристаллизации. Но такой прием приводит к ухудшению эксплуатационных свойств, например, такой характеристики, как электропроводность.

Таким образом, выполненные эксперименты показали резкое повышение качества поверхности проволоки из серебра марки Sr99,99 после применения операции скальпирования. Вместе с тем при применении этой операции выявлено значительное повышение микротвердости поверхностного слоя. Предложено учитывать это явление при анализе напряженно-деформированного состояния при волочении, а также при прогнозировании рекристаллизационных процессов.

4.2. Теоретический анализ процесса скальпирования проволоки

Для скальпирования в режиме протягивания заготовки применяется инструмент, размещающийся в волокодержателе волочильного стана. Заготовка 1 (рисунок 4.2) перемещается тянущим устройством стана через отверстие скальпирующей волоки 2, боё 74лее узкое, чем поперечный размер заготовки, в результате чего режущей кромкой волоки срезается тонкий слой металла 3. Основной параметр скальпирующей волоки – угол наклона острой кромки γ , который отсчитывается от нормали к оси волочения. В теории резания угол острой кромки γ соответствует понятию переднего угла резца. Основное количество работ, связывающих пластическую деформацию металла в процессе резки с конфигурацией инструмента и свойствами обрабатываемого металла посвящено оценке степени деформации, сообщенной стружке. Это объясняется тем, что пластическая деформация позволяет изменить свойства в месте резания и перевести металл в охрупченное состояние, в результате удастся изменить конфигурацию стружки от витой до сыпучей, что предпочтительнее.

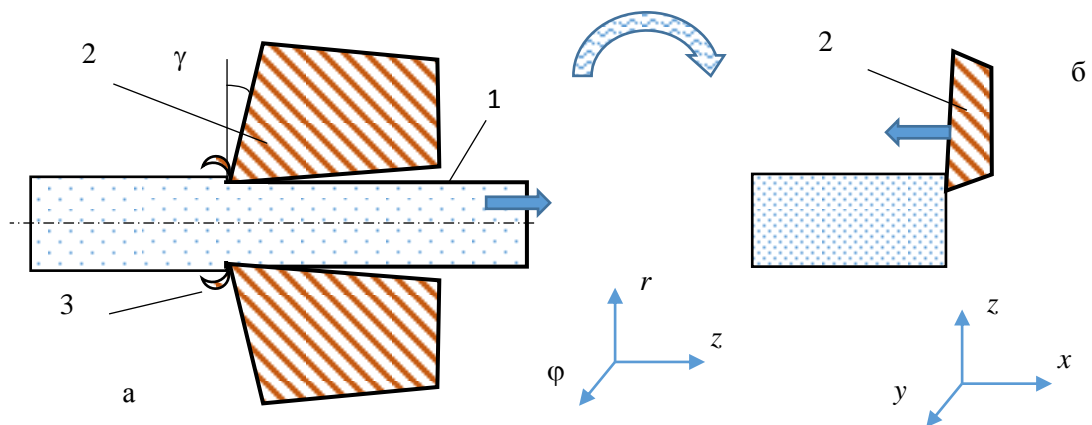


Рисунок 4.8 – Отображение схемы скальпирования в осесимметричной постановке при использовании цилиндрической системы координат (а) и в плоской постановке (б): 1 – заготовка; 2 – скальпирующая волока; 3 – стружка, прямые стрелки – направление перемещения

Проблема постановки задачи в данном случае заключается в том, что деформации подвергается тонкий поверхностный слой. Если включить в постановку весь объем металла, большая часть которого не охвачена пластической деформацией, то решение окажется ошибочным из-за накопленной ошибки вычислений. Поэтому вместо осесимметричной постановки (рисунок 4.8, а) применена плоская постановка (рисунок 4.8, б), в которой выделен приповерхностный слой металла, подвергающийся пластической деформации. Влияние отброшенной части металла заменено граничным условием: нижний контур пластической зоны не перемещается ни по одной из координат. В производственных условиях перемещается заготовка относительно неподвижного инструмента. Эта ситуация изменена на обратную, но эквивалентную: перемещается инструмент относительно неподвижной заготовки. Цилиндрическую систему координат $r\varphi z$ заменили на обычную декартову систему xuz . При этом ось x направили вдоль направления перемещения, ось z вдоль бывшей радиальной координаты, а ось y в ортогональном направлении.

Для оценки напряженно-деформированного состояния металла в процессе скальпирования применен метод конечных элементов, реализованный в системе анализа процессов пластического деформирования РАПИД 2D.

Постановка задачи в системе анализа процессов пластического деформирования РАПИД 2D представляла собой создание начальной формы очага деформации и конфигурации инструмента (рисунок 4.9, а). Схема деформированного состояния – плоская. Тем самым выделяется только приповерхностный слой материала, который подлежит скальпированию. Практика решения таких типов задач показала, что если использовать весь объем области в осесимметричной постановке, то из-за неоправданно большого количества конечных элементов, участвующих в расчете, происходит накопление ошибок вычислений.

Взаимное перемещение инструмента и деформируемого материала задано с помощью соответствующих граничных условий. Деформируемая среда – вязко-пластическая со степенным упрочнением. Скорость перемещения

заготовки относительно инструмента 2000 мм/с, что с точностью до порядка соответствует скоростному параметру при скальпировании. Показатель трения на поверхностях скольжения принят равным 0,1. Рассмотрен слой металла толщиной 25 мм. Толщина съема металла назначена на трех уровнях: 3; 2 и 1 мм. Размеры выбраны условно, важно соотношение между ними. Например, полученные расчетные могут распространяться на толщину съема металла 0,3, 0,2 и 0,1 мм при соответствующей коррекции других размерных величин. Сетка конечных элементов в местах предполагаемых повышенных градиентов деформаций выполнена с меньшим шагом.

Для лучшего восприятия на рисунке 4.9, б показан профиль скальпирующей волоки из чертежа.

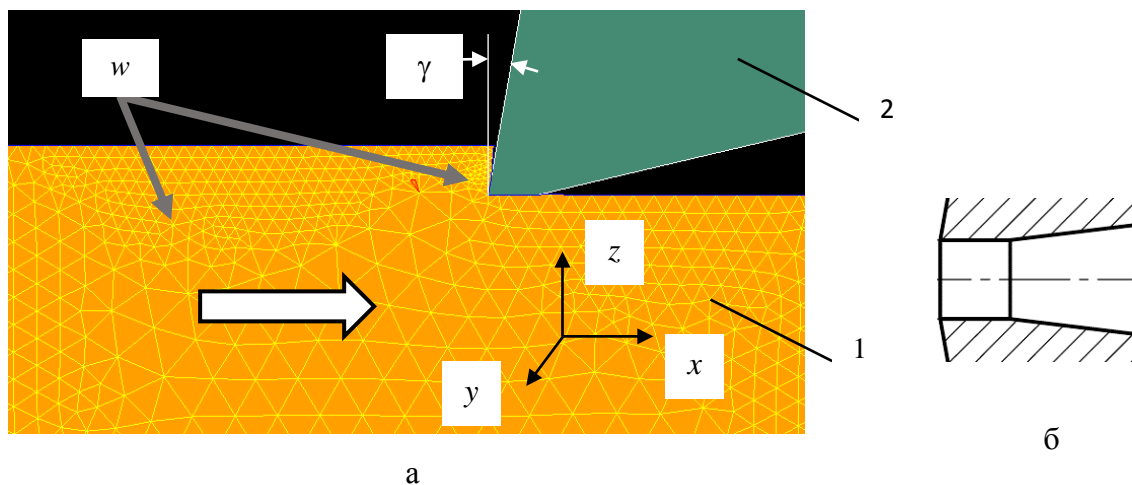


Рисунок 4.9 – Графическая постановка задачи в системе координат x, y, z с сеткой конечных элементов (а): 1 – деформируемый материал, 2 – скальпирующая волока; белая стрелка – направление перемещения проволоки; w – области сгущения сетки конечных элементов; γ - угол острой кромки; б - профиль острой кромки скальпирующей волоки в осесимметричном отображении из реального чертежа

Главным вопросом, который часто не рассматривается в теории резания, является определение зоны пластической деформации, возникающей при прохождении режущей кромки по металлу. Следует выяснить, вследствие чего

может возникнуть такой тип деформации. Для этого из всей совокупности показателей напряженно-деформированного состояния выбрана компонента тензора скоростей деформации ξ_{xx} . Очевидно, что при использовании условия несжимаемости при плоской постановке деформации $\xi_{xx} = -\xi_{zz}$, т.е. при известном значении одной из компонент можно определить другую, причем знаки у компонент окажутся противоположными. На рисунке 4.10 отображены области равного уровня компоненты ξ_{xx} . Видно, что компонента ξ_{xx} имеет зоны максимума и минимума. Зона *A* минимума расположена перед режущей кромкой волокна. Отрицательные значения компоненты ξ_{xx} говорят о том, что здесь действуют деформации сжатия, что отражено также на соответствующей грани элементарного кубика. Действительно, режущая кромка сжимает металл, выдавливая стружку вверх. При этом скорость перемещения металла вблизи режущей кромки оказывается выше скорости перемещения удаленных слоев, поэтому стружка изгибается, а на внутренней стороне возникают разрывы и трещины.

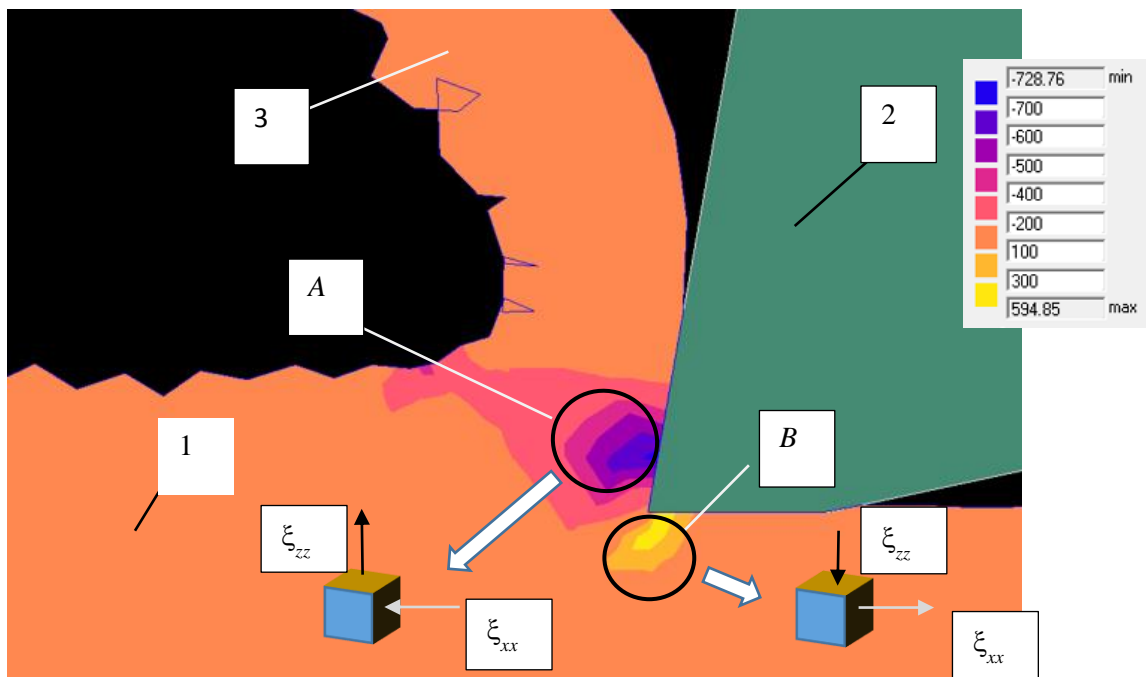


Рисунок 4.10 – Отделение стружки 3 от заготовки 1 скальпирующей волокой 2 с отображением поля компоненты тензора ξ_{xx} (1/с) при условной глубине реза 2 мм

Второй эффект от сжатия режущей кромки металла заключается в том, что срезаемый пласт пытается увлечь за собой поверхностный слой металла, находящийся под режущей кромкой. Вследствие этого создается зона B , в которой знаки компонент тензора меняются на противоположные. Наличие зоны B обуславливает появление дополнительных пластических деформаций в поверхностном слое заготовки.

На рисунке 4.11, а показано формоизменение металла и распределение степени деформации сдвига Λ . Последняя величина связана со степенью деформации (или эквивалентной деформацией) ε соотношением $\Lambda = \sqrt{3}\varepsilon$.

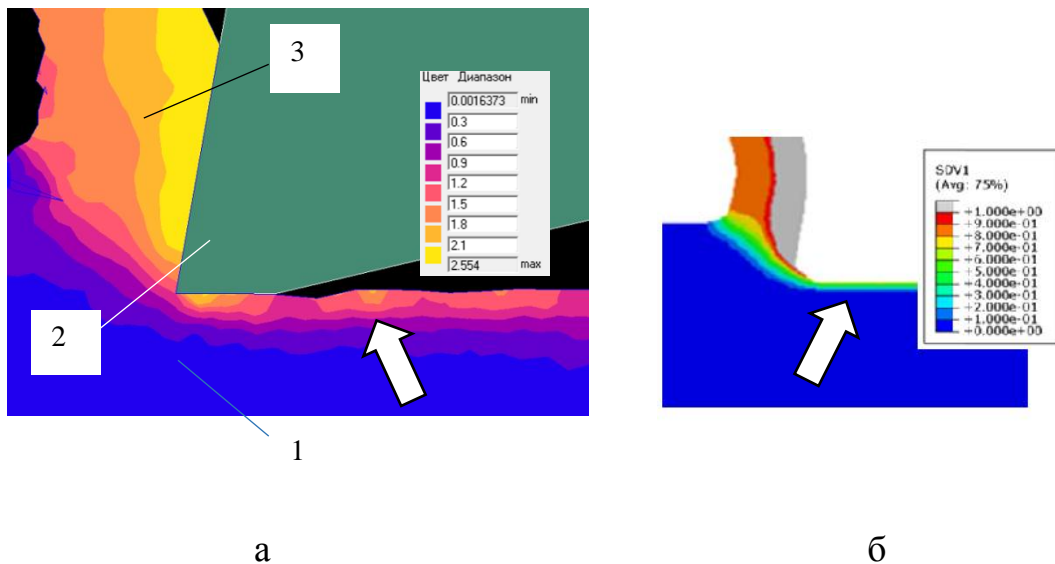


Рисунок 4.11 – Решение задачи отделения стружки при скальпировании при угле $\gamma = 10^\circ$ и условной глубине съема 3 мм: 1 – деформируемый материал, 2 – скальпирующая волока; 3– стружка; а - в настоящей работе, в таблице указан уровень степени деформации сдвига; б – при резании резцом по данным работы [134], в таблице указан уровень степени деформации, белая стрелка показывает на слой заготовки, подвергнутый пластической деформации

Области равного уровня показывают, что степень деформации сдвига в стружке может достигать величины более 2. При этом наблюдается наличие приповерхностного слоя металла со степенью деформации сдвига на уровне 1,8, что соответствует степени деформации 1,0. Следует отметить, что качественно похожее решение задачи, но для случая обычного резания (рисунок 4.11, б),

было получено в совместном исследовании научных сотрудников США, республики Корея и Великобритании [137]. Задача решалась методом конечных элементов в программном комплексе Abaqus/Explicit при реализации плоского деформированного состояния. На рисунке 4.11, б контур резца не показан, а на печать выведена только форма очага деформации, видна также некоторая неточность решения, поскольку вместо контура острого угла 80° получен угол со скруглением, что видимо, связано с алгоритмом решения, разрешающим небольшое внедрение деформируемого материала в инструмент. Тем самым создаются плавные очертания контуров.

Предыдущий рисунок показывал расположение максимума деформаций, и он находился в объеме стружки. Это свидетельствует о том, что именно стружка накапливает наибольшую деформацию. Однако локализация скорости деформации происходит не в объеме стружки, а вблизи острой кромки волокна. Это показано на рисунке 4.12, где изображено распределение интенсивности скорости деформации сдвига N , связанной со скоростью деформации ξ соотношением $N = \sqrt{3}\xi$. Тем самым на рисунке показана и форма очага деформации: она вытянута от острия режущей кромки ортогонально поверхности этой кромки. Форма очага деформации совпадает с контуром действия наибольших эквивалентных напряжений, приведенным в статье [141]. В направлении вытянутости очага деформации проведена линия, образующая с горизонталью угол β , в теории резания его принято называть углом сдвига. Определенный опытным путем угол сдвига при резании меди кромкой с углом $\gamma = 15^\circ$ составляет $\beta = 36^\circ$ [142, с.97]. В полученном решении угол β оказался равным 34° , что можно считать хорошим соответствием. В некоторых теоретических решениях процесса резания угол сдвига характеризует положение зоны дилатансии, т.е. пластического разрыхления материала. Это сделано, например, в монографии [143], но наличие зоны пластического упрочнения поверхностного слоя не было допущено.

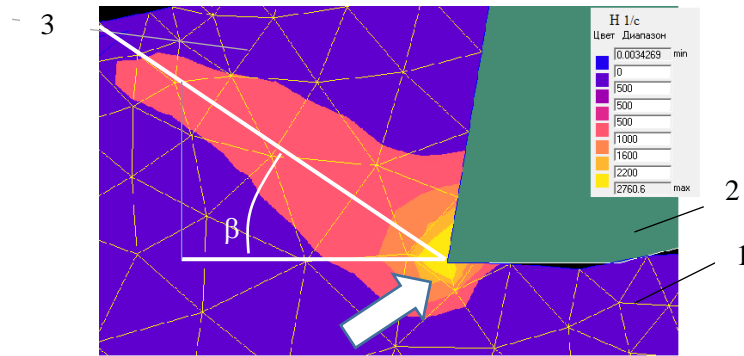


Рисунок 4.12 – Форма очага деформации вблизи режущей кромки при скальпировании при угле $\gamma = 10^\circ$, в таблице указан уровень интенсивности скорости деформации сдвига; белая стрелка показывает на месторасположение максимума величины

На рисунке 4.12 видна также глубина проникновения пластической деформации в приповерхностные слои заготовки. Если минимальное значение степени деформации сдвига, при которой деформации начинают отличаться от нуля, назначить на уровне 0,3, то глубина проникновения деформации составляет 100 % и выше от глубины реза.

Уменьшение в три раза глубины съема несколько изменило картину формоизменения (рисунок 4.13, а). В стружке со стороны, обратной воздействию режущей кромки, появились разрывы и зажимы. Подобный эффект наблюдался и в решении задачи авторами [137], приведенным на рисунке 4.13, б, и он произошел также при уменьшении глубины съема металла.

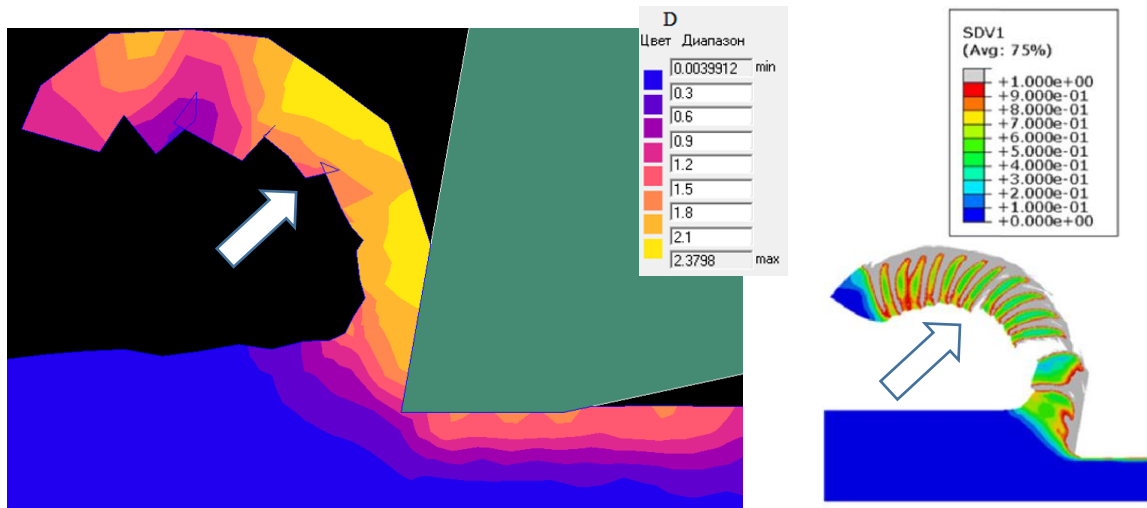


Рисунок 4.13 – Решение задачи отделения стружки при скальпировании с углом $\gamma = 10^\circ$ и условной глубине съема 1 мм: а - в настоящей работе, в таблице указан уровень степени деформации сдвига; б - при резании резцом по данным работы [134], в таблице указан уровень степени деформации, белая стрелка показывает на область появления разрывов в стружке

На рисунке 4.14 приведен результат решения задачи при условной глубине съема стружки 2 мм и показано распределение степени деформации сдвига.

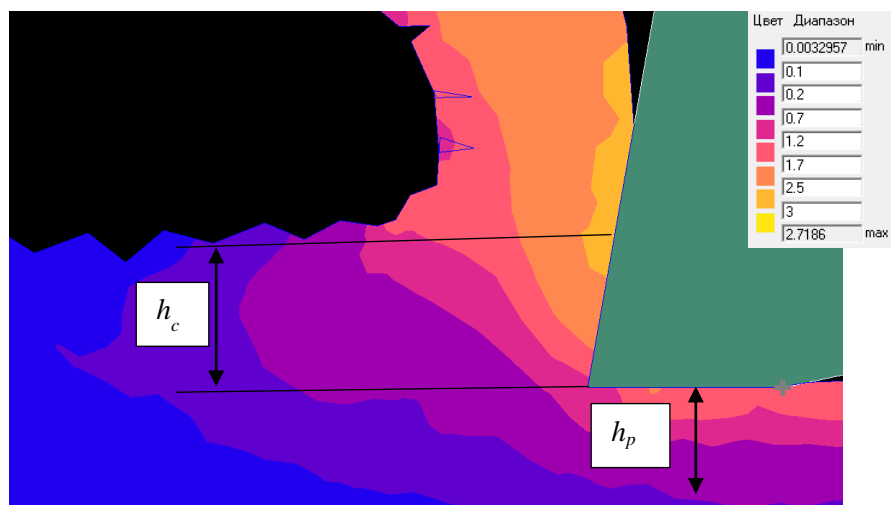


Рисунок 4.14 – Распределение степени деформации сдвига в пластической зоне при скальпировании с углом $\gamma = 10^\circ$ и условной глубине съема 2 мм

Сведения о глубине проникновения пластически деформированного слоя h_p в заготовку при резании довольно противоречивы. Результаты расчетов, приведенных в статье [137], свидетельствуют о наличии обратной зависимости глубины этого слоя от толщины срезаемого металла. Однако в других источниках информации [144] говорится о наличии прямой зависимости между этими величинами. В рамках нашего исследования не удалось выявить ни прямой ни обратной зависимости, по крайней мере, при использовании угла $\gamma = 10^\circ$ и при изменении толщины срезаемого слоя в три раза. Представленные результаты по скальпированию проволоки более широко изложены в работах [145, 146].

4.3. Аналитическое описание поля скоростей в зоне поверхностного упрочнения при скальпировании

Как было показано выше, довольно много работ в теории резания посвящено оценке нагартовки стружки. Однако чаще всего упускается из виду, что при резании возникает второй очаг деформации, расположенный непосредственно под режущей кромкой инструмента. Выполненные выше расчеты показывают, что в указанном месте металл претерпевает сдвиговые деформации, которые придется учесть при анализе последующей обработки.

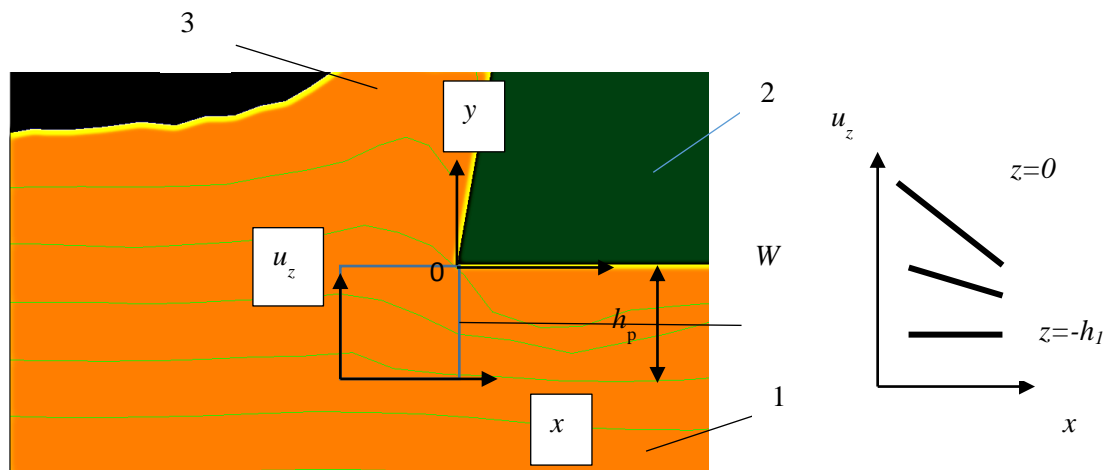
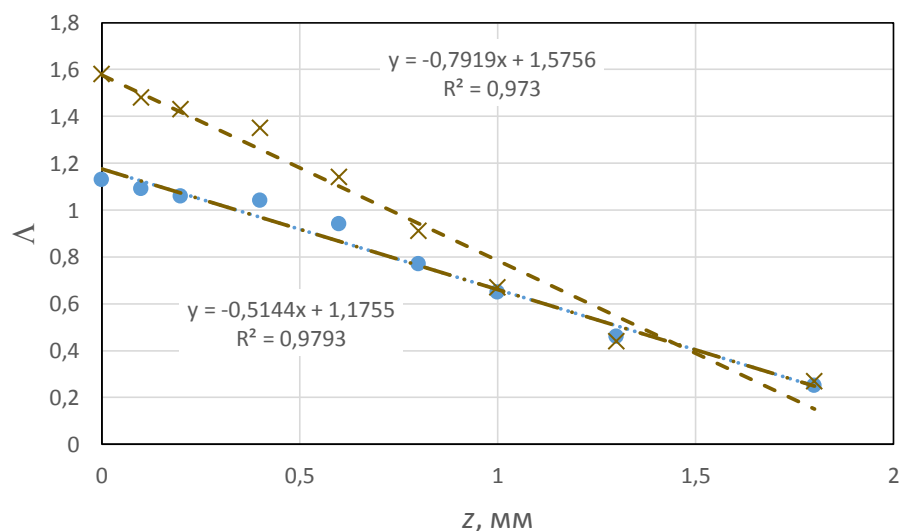


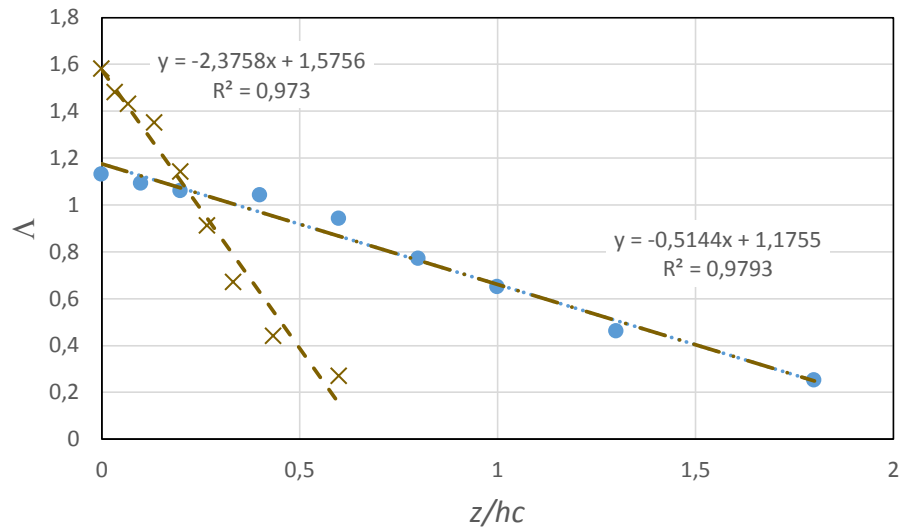
Рисунок 4.15 – Зона W искажения горизонтальных линий координатной сетки под режущей кромкой волокна 2 с графиком зависимости перемещений частиц металла от продольной координаты x при условной глубине съема 1 мм

Как видно из рисунка 4.15, горизонтальные линии координатной сетки прогибаются вниз при подходе к режущей кромке. Тем самым в выделенной зоне W наблюдается наличие перемещения u_z металла в направлении координаты z . Наиболее сильный прогиб линий сетки наблюдается вблизи режущей кромки при координате $z = 0$. После прохождения зоны W линии координатной сетки вновь становятся горизонтальными.

После прохождения очага деформации вблизи поверхности возникает слой нагартованного металла с переменной по толщине величиной накопленной степени деформации сдвига Λ . Измерения показали, что величина Λ практически линейно зависит от абсолютной координаты z (рисунок 4.16, а) и относительной координаты z/h_c (рисунок 4.16, б), что подтверждается высокими значениями достоверности аппроксимации R^2 (выше 0,97). При этом, вторым аргументом является условная глубина реза h_c . Границу проникновения пластической деформации в глубину металла можно оценить, как точку пересечения полученных линий регрессии с горизонтальной осью координат. Второй вариант оценки состоит в приравнении нулю результата расчета Λ по уравнению регрессии. Для $h_c = 1$ мм получается значение $z_0/h_c = 2,285$, а для $h_c = 3$ мм $z_0/h_c = 1,990$. Таким образом, относительная глубина проникновения деформации в результате скальпирования может составлять $z_0/h_c = 1,990...2,285$ или в первом приближении z_0 составляет двукратную величину от параметра h_c .



а



б

Рисунок 4.16 – Зависимость степени деформации сдвига в поверхностном слое металла от абсолютной координаты z (а) и относительной координаты z/h_c (б) при условной глубине реза 1 мм (штрих-пунктирная линия) и 3 мм (штриховая линия)

Максимальная степень деформации зависит от глубины реза: при условной глубине реза $h_c = 1$ мм составляет величину 1,13, а при $h_c = 3$ мм величину 1,58.

В реальных условиях производства могут применяться следующие режимы: для проволоки диаметром 6,6 мм $h_c = 140$ мкм, для проволоки диаметром 6,25 мм $h_c = 65$ мкм, для проволоки диаметром 5,58 мм $h_c = 55$ мкм.

Ниже приведены результаты расчетов глубины проникновения пластической деформации h_p для этих трех случаев обработки металла.

Таблица 4.1 – Геометрические соотношения в поверхностном слое металла

Диаметр проволоки d , мм	h_c , мкм	Соотношение h_c/d	h_p , мкм	Соотношение h_p/d
6,60	140	0,021	280	0,04
6,25	65	0,010	130	0,02
5,58	55	0,010	110	0,02

Из данных таблицы следует, что после скальпирования следует ожидать появления пластически нагартованного слоя в проволоке, толщина которого составляет 2...4 % от диаметра заготовки. Следует оценить влияние такого слоя на изменение энергосиловых параметров волочения.

Для этого надо рассчитать площадь поперечного сечения заготовки, имеющую аномальную прочностную характеристику, вызванную нагартовкой от скальпирования.

Площадь F_k такого кольцевого слоя толщиной δ равна

$$F_k = \pi(D_H - \delta/2)\delta,$$

а площадь сечения проволоки

$$F_H = \pi D_H^2 / 4 .$$

Отсюда доля поверхности, занимаемая слоем, равна

$$F_k/F_H = (D_H - \delta/2)\delta/(4D_H^2) = (1 - 1/2(\delta/D_H)) * 1/4(\delta/D_H) .$$

На графике рисунка 4.17 представлено такое соотношение в функции от диаметра проволоки при назначении глубины проникновения пластической деформации 100 мкм.

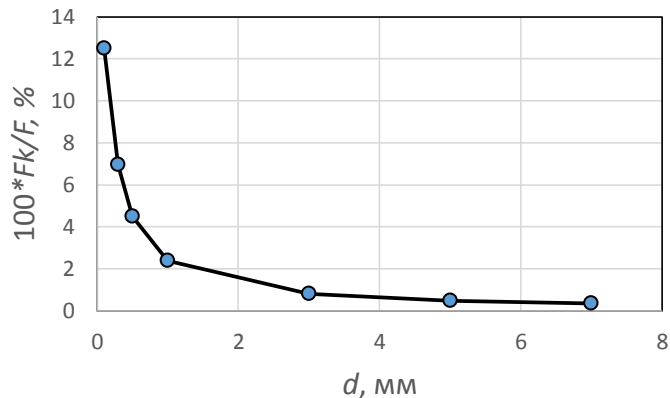


Рисунок 4.17 – Отношение площади сечения, подвергнутого пластической деформации при скальпировании к площади сечения проволоки

Как видно из графика, при диаметрах проволоки 4...6 мм, площадь, подвергнутая пластической деформации, оказывается невелика – на уровне 0,5 % от площади сечения проволоки. Однако при переносе операции скальпирования

на меньшие значения диаметра, доля площади может достигнуть десятков процентов.

Отсюда следует вывод, что при волочении проволоки в диапазоне размеров 4...6 мм можно не учитывать изменение свойств металла вследствие нагартовки, если оцениваются интегральные характеристики процесса, определяемые с учетом свойств в объеме металла.

Однако, наличие слоя металла, расположенного именно на поверхности проволоки, изменяет граничные условия волочения. Они учитываются с помощью задания соответствующего закона трения и параметров, описывающих это трение.

4.4. Сравнение полученного решения с известными данными

В работе [147] на основе применения метода фото пластичности и стресс чувствительного материала – поликарбонатного полимера получены изолинии, характеризующие проникновение напряжений в очаге резания. На рисунке 4.18 показано распространение этих линий в двух случаях резания: для малой глубины реза 0,13 мм и большой глубины реза 0,64 мм. Здесь видно, что при увеличении глубины реза поле напряжений распространяется на большую глубину.

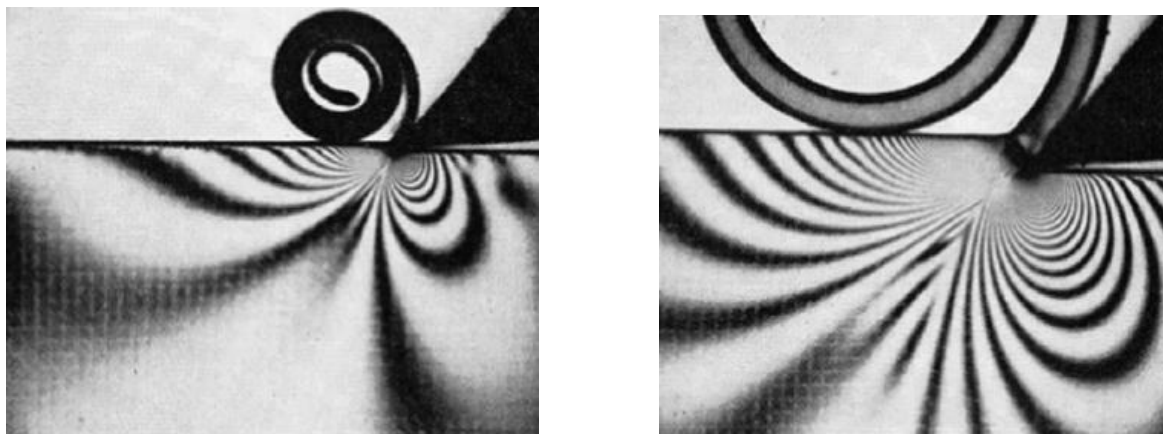


Рисунок 4.18 – Поле изохром при резании поликарбонатного полимера из работы [147]

Однако этот вывод распространяется на заведомо неупрочняющийся материал, его по свойствам можно отнести к идеально пластической среде. Для упрочняющегося материала деформация должна переходить из области уже нагартованного материала в область менее нагартованного материала, если пользоваться законом наименьшего сопротивления.

4.5. Анализ результатов применения операции скальпирования для последующей обработки давлением

Если для анализа процесса волочения заготовки, подвергнутой скальпированию, применить закон трения по Амонтону – Кулону, то не удастся учесть специфику этого слоя, у которого вследствие пластической деформации изменилось сопротивление деформации.

Если представить объем заготовки, предназначенной для волочения с наличием слоя нагартованного металла, то такую задачу не удастся решить методом конечных элементов, так как слой окажется слишком тонким, его роль в формировании напряженно-деформированного состояния очага деформации окажется слишком мала и решение задачи не будет отличаться от обычного.

Поэтому придется применить специальный подход, в котором слой не будет выделяться как особенный, а его аномальные свойства будут заданы именно через граничные условия. Такому подходу удовлетворяет применение закона трения Зибеля, который обычно не используют для анализа процесса волочения, так как нормальные напряжения, действующие на инструмент, здесь оказываются не велики. Запись такого закона осуществляется с применением величины сопротивления деформации σ_s :

$$\tau = \frac{1}{\sqrt{3}} \psi \sigma_s,$$

где ψ – показатель трения; τ – касательные напряжения трения.

Здесь величина σ_s соотнесена с состоянием той части металла, относительно которой осуществляется трение. Такой частью металла в

рассматриваемом случае является слой, который обработан методом скальпирования и который получил соответствующую нагартовку.

Целью описания трения законом Зибеля является определение напряжений трения, которые оцениваются с одной стороны показателем трения и с другой стороны сопротивлением деформации. Таким образом, для учета дополнительной нагартовки от скальпирования можно повысить значение показателя трения либо увеличить сопротивление деформации. Однако при этом придется учесть, что сопротивление деформации в краевых задачах волочения, решенных аналитическими методами уже входит в состав формул и оно оценивается как среднее по объему очага деформации. Если решать задачу не аналитическим методом, а методом конечных элементов, тонкий слой металла, обладающий аномально высоким значением деформации, выделить не удастся. Поэтому остается путь назначения такого показателя трения, который бы учитывал аномальное упрочнение. Для этого придется представить показатель трения как функцию, зависящую от параметров скальпирования, в частности от степени деформации сдвига Λ , полученной поверхностным слоем, т.е. $\psi = \psi(\Lambda)$.

Как это было выявлено в предыдущей части исследования, на поверхности скальпированной проволоки степень деформации сдвига может достигать значения 1,6, соответственно степень деформации равна 0,92. Следует установить, какому приращению сопротивления деформации соответствует эта величина. Естественно, что характер кривых упрочнения для различных металлов и сплавов различен, но для некоторых из них можно выработать необходимые соотношения.

На рисунке 4.19 приведены кривые упрочнения меди марки М1 при различных скоростях деформации от 0,005 до 15 1/с (а) и кривая упрочнения сплава ПлПдРдРу 81-15-3,5-0,5 (б).

Видно, что сопротивление деформации меди при степени деформации 0,9...1 может достигать 320 МПа(при повышенной скорости деформации), а в ненагартованном состоянии оно равно 80 МПа. Таким образом, сопротивление деформации поверхностного слоя может оказаться выше в 4 раза по отношению

к такому же показателю сердцевины проволоки. Для сплава на основе платины в ненагартованном состоянии сопротивление деформации равно 120 МПа, а при $\varepsilon = 1$ оно равно 460 МПа, т.е. оно возросло примерно в 4 раза. На рисунке 4.19 приведены данные статических испытаний проволоки на основе платины, для динамических испытаний, как это показано для меди, различия окажутся еще выше.

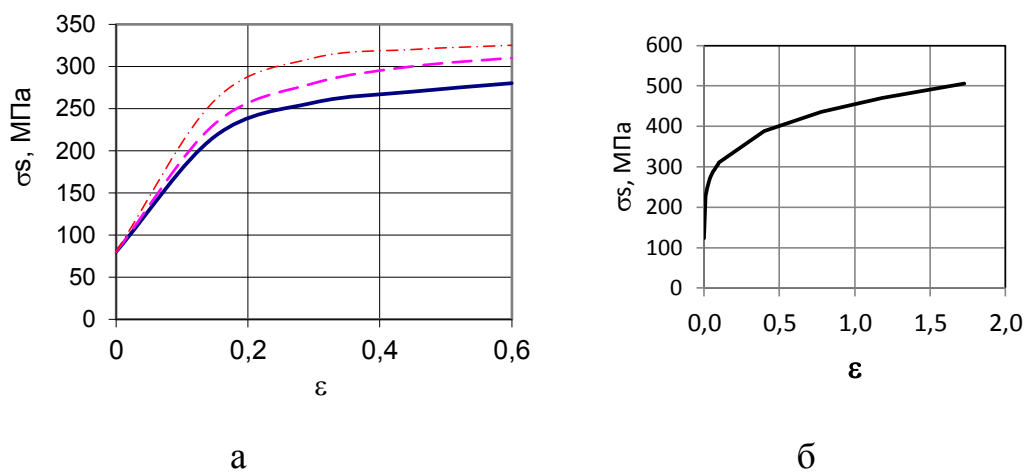


Рисунок 4.19 – Кривые упрочнения меди марки М1 (а) при различных скоростях деформации (с^{-1}): 0,005 (сплошная линия); 3 (штриховая линия); 15 (штрихпунктирная линия) и кривая упрочнения сплава ПлПдРдРу 81-15-3,5-0,5 (б)

С указанных позиций можно установить соотношение между сопротивлением деформации поверхностного слоя металла, подвергнутого скальпированию и сопротивлением деформации основной части металла. Оно равно четырехкратной величине. Это позволяет задавать показатель трения при волочении скальпированной проволоки в четыре раза большим, чем для случая волочения не скальпированной проволоки. Так, если при волочении с жидкой смазкой приемлемыми принято считать показатели трения 0,1...0,2, то для волочения скальпированной проволоки придется назначить показатели трения на уровне 0,4...0,8.

Такие показатели трения по Зибелю более характерны для случая деформации при существенном трении (горячая деформация без смазки). Поэтому встает вопрос, насколько велики окажутся коэффициенты запаса при

волочении и не возникнет ли опасность повышенной обрывности. Если такая опасность существует, то придется снижать коэффициенты вытяжки.

Для моделирования напряженного состояния применили программный комплекс РАПИД-2D. Расчет основан на применении метода конечных элементов. Примененный алгоритм разработан для решения задач пластической деформации упруго - вязко - пластической среды. Как правило, волочение – это процесс холодной деформации, при которой вязкие свойства не учитываются, но принимается во внимание процесс холодной нагартовки металла. Эту трудность удалось обойти при моделировании формоизменения заготовок из меди. Исследования показывают, что медь и в холодном состоянии проявляет вязкие свойства, т.е. ее сопротивление деформации зависит как от степени, так и от скорости деформации [31]. Для решения применили соответствующие кривые упрочнения из справочника [91], переведя графическое изображение функций в табличные значения. При использовании аналитических зависимостей можно воспользоваться также аппроксимированными функциями из публикации [128].

Исходные данные для расчета: исходная заготовка из меди марки М0 диаметром 8 мм протягивается через волоку с диаметром отверстия 7,30 мм с коэффициентом вытяжки 1,20 (относительное обжатие 17 %) при показателе трения по Зибелю 0,1 и 0,6 (т.е. коэффициенте трения по Кулону 0,05 и 0,3). Угол наклона образующей волоки равен $6,5^\circ$. Режим протягивания заготовки создается за счет задания граничного условия в перемещениях переднего торца заготовки.

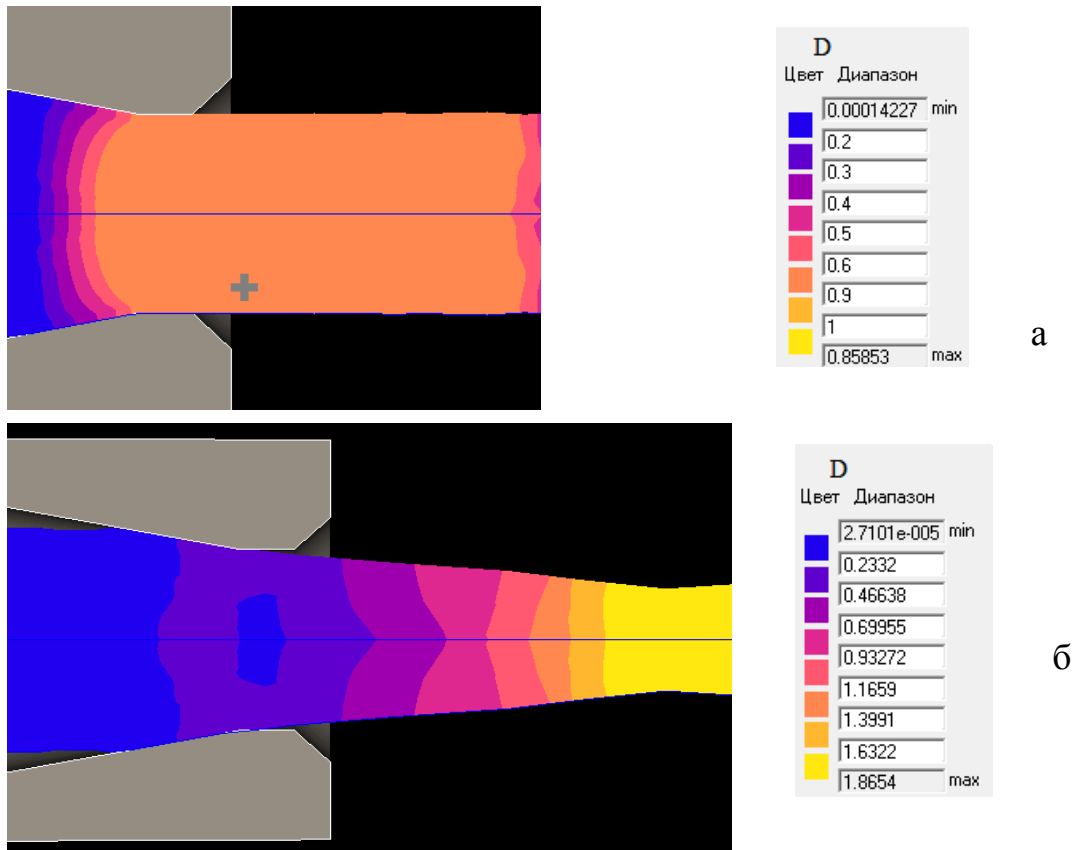


Рисунок 4.20 – Очаг деформации и распределение степени деформации сдвига Λ при волочении с показателем трения 0,1 (а) и 0,6 (б); в последнем случае видно образование шейки за пределами волокна

Как видно из приведенного рисунка 4.20, при малом трении профиль проволоки остается постоянным за пределами волокна, а при большом трении деформации локализовались на участке проволоки, расположенном за пределами волочильного инструмента.

В первом случае степень деформации сдвига не превысила величины 0,86, во втором случае она превысила значение 1,86, что должно привести к обрыву. Таким образом, здесь показано, что волочение с показателем трения 0,6 и коэффициенте вытяжки 1,2 в режиме стационарного процесса невозможно. Аналогичные результаты получены при значении показателя трения, равном 0,5.

В связи с этим дальнейшие расчеты выполнены для моделирования волочения с меньшими показателями трения в диапазоне 0,1...0,4.

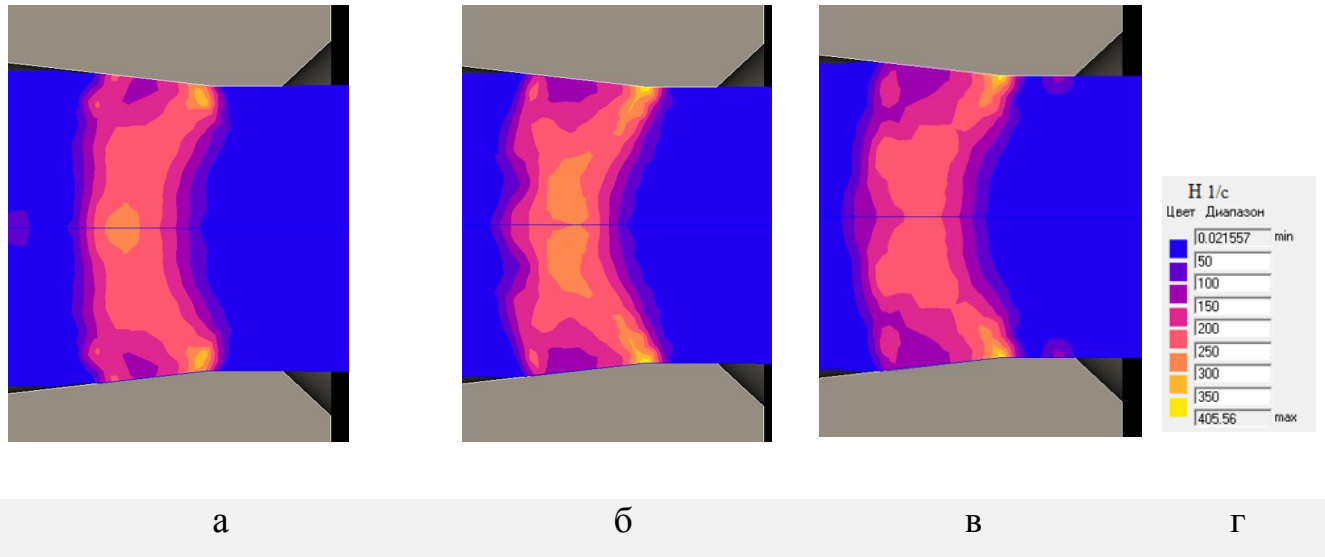
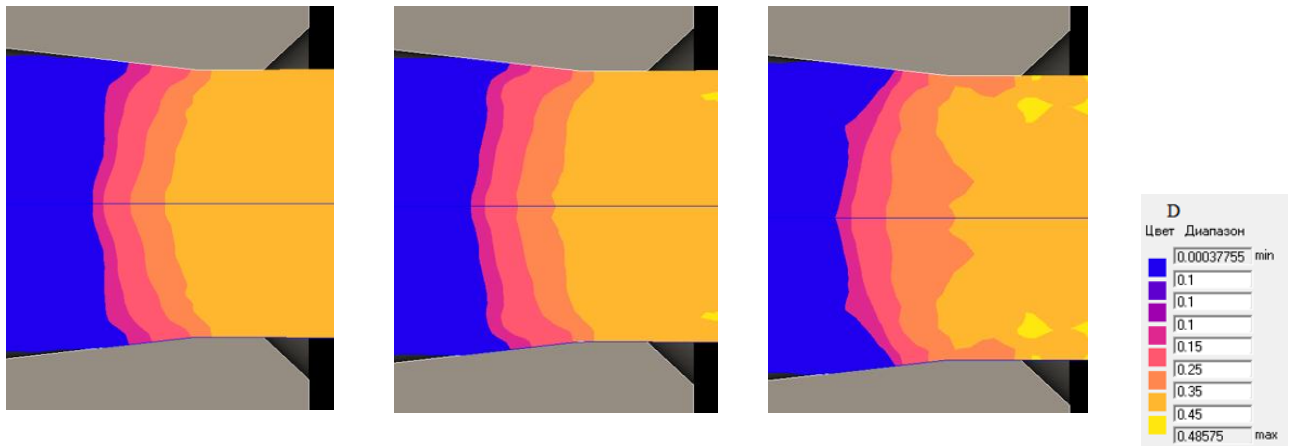


Рисунок 4.21 – Форма очага деформации при волочении с полем скоростей деформации сдвига N при различных значениях ψ : 0,1 (а), 0,2 (б), 0,4 (в) и цветовой ключ (г)

Как видно из приведенных данных, форма очага деформации мало зависит от значения показателя трения. При больших показателях трения несколько расширяется область повышенных значений N в центре очага деформации. При заданных в решении параметрах трения и коэффициента вытяжки не происходит деления очага деформации на две половины, и не возникает опасности появления центральных разрывов, что отмечалось в статье [131] при анализе волочения проволоки при других режимах обработки.

Полученные результаты расчета степени деформации сдвига Λ приведены на рисунке 4.22.



а

б

в

г

Рисунок 4.22 – Распределение степени деформации сдвига Δ при различных значениях ψ : 0,1 (а), 0,2 (б), 0,4 (в) и цветовой ключ (г)

На рисунке 4.23 представлено распределение степени деформации сдвига в проволоке вдоль относительной радиальной координаты r/R , где r и R – текущий радиус и радиус проволоки соответственно.

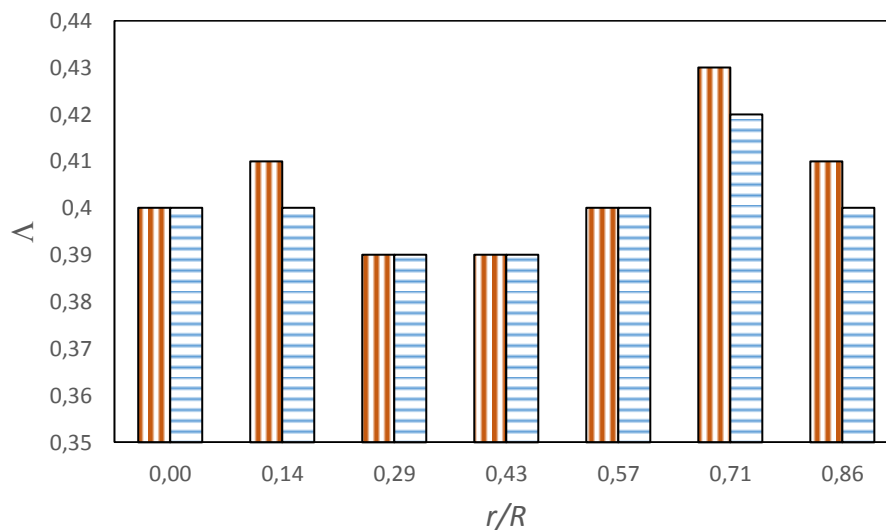


Рисунок 4.23 – Распределение степени деформации сдвига Δ вдоль относительной радиальной координаты при значениях ψ : 0,1 (горизонтальная штриховка) и 0,4 (вертикальная штриховка)

Из рисунка видно, что волочение при более высоком значении показателя трения приводит к большей неоднородности деформации. Вместе с тем диапазон

изменения сдвига Λ вдоль радиальной координаты оказывается довольно узким: 0,39...0,43, т.е. отклонения не превышают 9 %.

Расчет касательных напряжений σ_{rz} (рисунок 4.24) показывает, что наибольшей величины они достигают на уровне перехода конической зоны к зоне, примыкающей к калибрующему пояску волокни. Из-за малого угла рабочей зоны волоочильного инструмента касательные напряжения на контактной поверхности могут быть ассоциированы с напряжениями трения. Если применять закон трения по Зибелю, то уровень напряжений трения должен оказаться в том месте, где материал оказывается более прочным, т.е. на выходе из очага деформации.

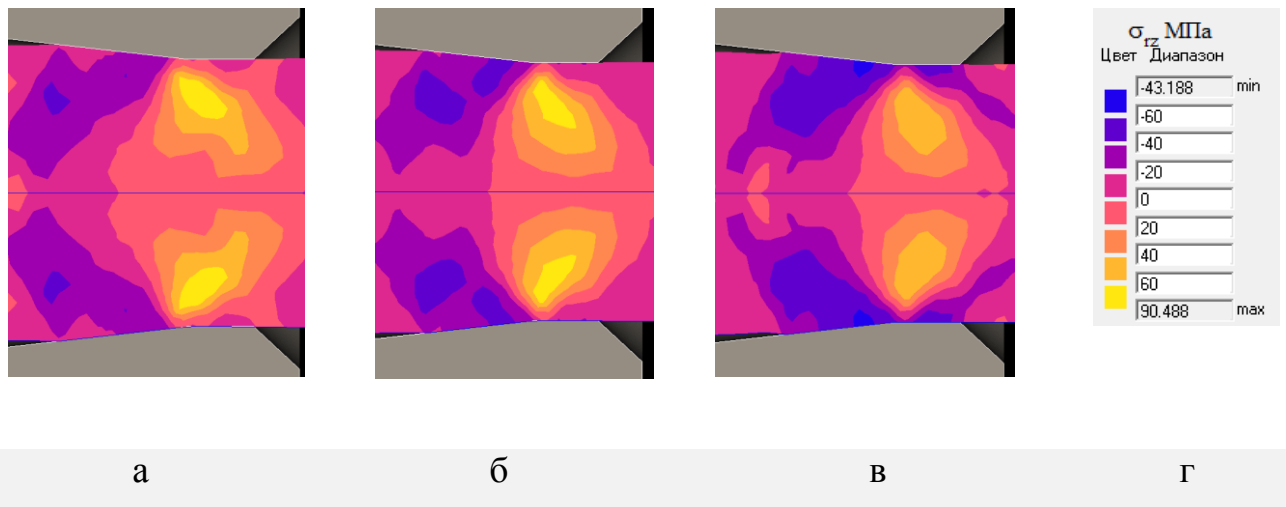
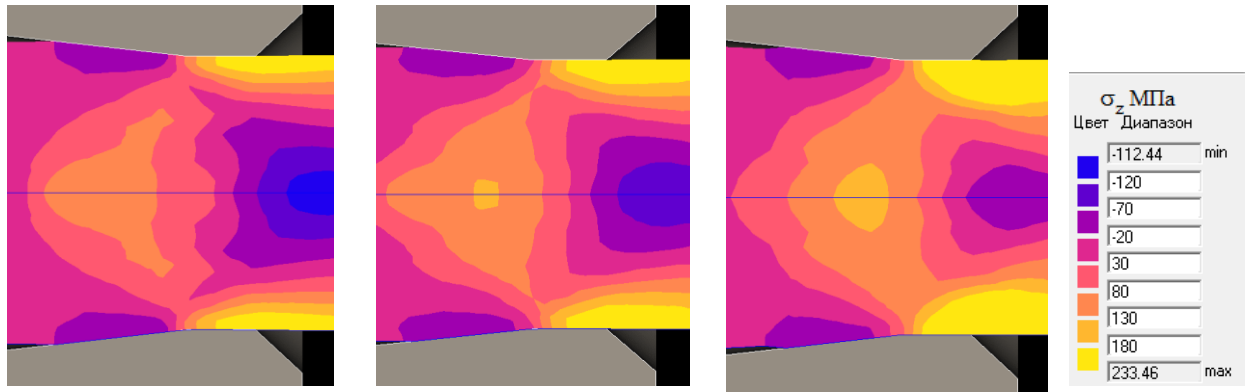


Рисунок 4.24 – Распределение касательного напряжения σ_{rz} при различных значениях ψ : 0,1 (а), 0,2 (б), 0,4 (в) и цветовой ключ (г)

Зона действия наибольших касательных напряжений не прилегает к поверхности проволоки, а сдвинута ближе к центру. При увеличении трения повышается уровень напряжений на входе в очаг деформации

Распределение осевого напряжения σ_{zz} (рисунок 4.25) подчиняется общей закономерности, состоящей в наличии в центре пластической зоны области действия растягивающих напряжений. Именно они создают опасность появления дефекта типа макропоры [131]. Второе по опасности место для появления дефектов – это периферийный слой проволоки на выходе из очага деформации.

Как видно по рисункам, этот слой возникает в месте стыка конической части волокна и калибрующего пояса. Источником происхождения этой зоны является действие усилия волочения.



а

б

в

г

Рисунок 4.25 – Распределение нормального осевого напряжения σ_{zz} при различных значениях ψ : 0,1 (а), 0,2 (б), 0,4 (в) и цветовой ключ (г)

Усилие волочения передается в очаг деформации через сечение проволоки. У источника приложения силы осевые напряжения могут быть распределены равномерно относительно радиальной координаты. Однако при приближении к волоку возникает неоднородное распределение напряжений. Растягивающие напряжения локализируются в поверхностном слое. В осевой зоне напряжения могут оказаться сжимающими. Сравнение трех рисунков с описанием полей этих напряжений при различных показателях трения приводит к выводу о том, что увеличение трения приводит к расширению в радиальном направлении зоны действия растягивающих напряжений на выходе из волочильного инструмента. При этом уменьшаются сжимающие напряжения в осевой зоне заготовки, а также уменьшается участок их действия. Собственно говоря, этот эффект и вызывает появление пережима при дальнейшем наращивании показателя трения.

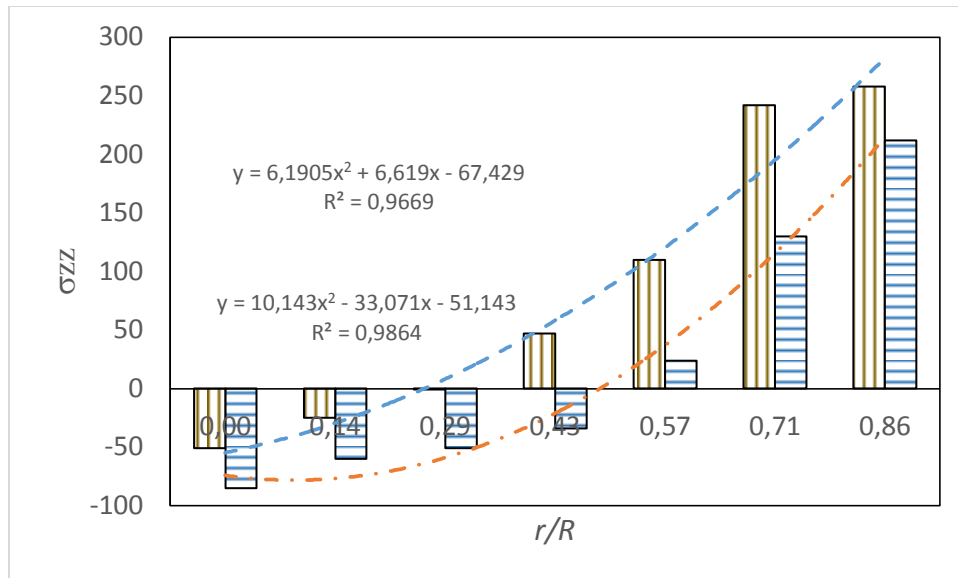


Рисунок 4.26 – Распределение осевого напряжения σ_{zz} вдоль относительной радиальной координаты при значениях ψ : 0,1 (горизонтальная штриховка) и 0,4 (вертикальная штриховка)

Если провести линии тренда на графике рисунок 4.26, то окажется, что с высокой степенью величины достоверности аппроксимации (на уровне 0,97...0,99) их можно описать параболическими зависимостями вида

$$\sigma_{zz} = 6,190\left(\frac{r}{R}\right)^2 - 6,619\left(\frac{r}{R}\right) - 67,429 \text{ для } \psi = 0,1;$$

$$\sigma_{zz} = 10,143\left(\frac{r}{R}\right)^2 - 33,071\left(\frac{r}{R}\right) - 51,143 \text{ для } \psi = 0,4.$$

При этом линии графиков для двух разных показателей трения окажутся практически эквидистантными. То есть при увеличении показателя трения происходит сдвиг эпюры осевых напряжений в положительную область (действия растягивающих напряжений).

После установления такой зависимости следует связать обнаруженный эффект с его первопричиной. Задание повышенных значений показателя трения было связано с наличием поверхностной зоны упрочненного металла, образованной при скальпировании. После выполнения расчетов методом конечных элементов удалось выяснить, что наличие упрочненного слоя приводит, во-первых, к перераспределению напряжений на выходе из волокна, а

во-вторых, к повышению уровня осевых растягивающих напряжений на периферии проволоки.

4.6. Практическое применение результатов исследования

Проволоку из золота марки Зл99,99, соответствующую требованиям ГОСТ 7222-2014, изготавливают по следующей технологической схеме: составление шихты, плавка в тигле из оксида магния, отливка пластины в графитовую изложницу, обточка прутка, холодная сортовая прокатка на заготовку диаметром 8,0 мм, волочение до достижения готового размера с промежуточным отжигом на размере 1,2 мм. Обработку до диаметра 0,02 мм ведут на многократных волочильных машинах, работающих по принципу скольжения. Пример такой машины для протяжки заготовки до диаметра 0,2 мм показан на рисунке 4.27.



Рисунок 4.27 – 19-ти кр. волочильная машина Schmidt тип 180-15

Процесс производства проволоки микронных размеров до диаметра 0,02 мм из золота марки Зл99,99 (рисунок 4.28) сопровождается проблемой

достижения высоких прочностных свойств металла на финишном размере обработки.

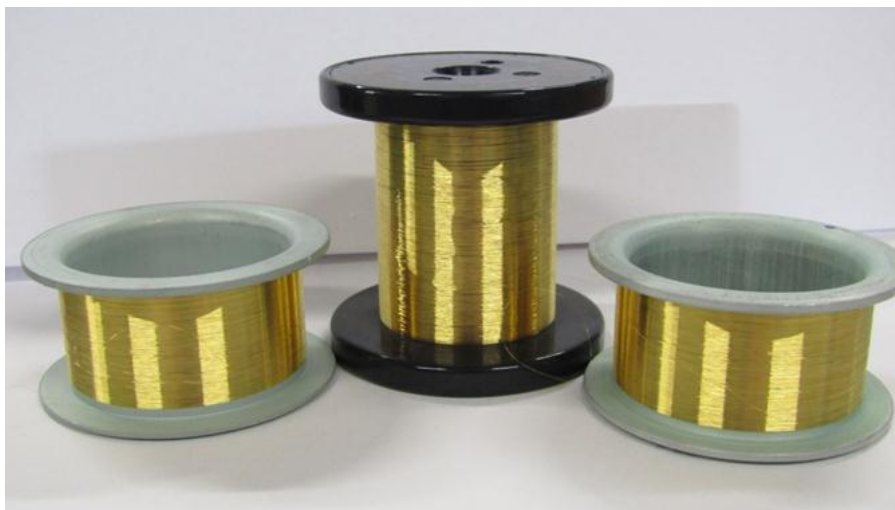


Рисунок 4.28 – проволока марки Зл 99,99 на товарных катушках

Золото высокой чистоты подвержено разупрочнению при комнатной температуре, что не допускается нормативными документами. В соответствии с формулой Бочвара температура начала рекристаллизации $T_{\text{нр}}$ (градусы Кельвина) определяется выражением

$$T_{\text{нр}} = aT_{\text{п}},$$

где $T_{\text{п}}$ – температура плавления, a – коэффициент пропорциональности.

Последняя величина зависит от степени чистоты металла. С уменьшением количества примесей коэффициент a снижается, что приводит к уменьшению температуры рекристаллизации, часто, вплоть до комнатной.

В таком случае может возникнуть нежелательная ситуация, когда потребителю поставляется проволока с одними значениями прочностных характеристик, а при получении они оказываются другими. Или разупрочнение может происходить уже в процессе эксплуатации изделий.

Выше было установлено, что при скальпировании проволоки возникает сильно нагартованный приповерхностный слой, влияние которого снижает температуру рекристаллизации золотой проволоки [17]. Наличие такого слоя может приводить к описанным выше эффектам разупрочнения для золота.

В производственной практике для повышения стабильности свойств микронной проволоки при выплавке заготовки вводятся определенные элементы для микролегирования [27, 148]. Однако это не всегда дает требуемого результата. Другой способ сохранения прочностных свойств указан в источнике [149], в котором рекомендуется хранить проволоку при температурах, ниже комнатной, например, в специальных морозильных установках. Однако такой способ хранения значительно усложняет и удорожает доставку до конечного потребителя. Влияние большой накопленной степени деформации на проявление эффекта самоотжига золотой проволоки рассмотрено в работе [150].

В статье [151] отмечены основные пути повышения температуры рекристаллизации. В исследовании [44] было более подробно изучено влияние дополнительных сдвиговых деформаций на формирование свойств готовой проволоки. Анализ действующей технологии волочения золотой проволоки показал, что при достижении готового размера накапливается достаточно большой уровень деформации. Так, например, для проволоки диаметром 0,1 мм после отжига на размере 1,2 мм значение деформации составляет 2,4, а для проволоки диаметром 0,03 мм достигает 7,8. Поэтому дальнейшие промышленные эксперименты были направлены на управление частотой отжигов по маршруту обработки.

Для этого были подготовлены образцы золотой проволоки после волочения по действующей технологии и по скорректированной с введением промежуточного отжига в двух случаях на диаметре 0,1 мм и 0,2 мм. Отжиг образцов проволоки из золота марки Зл 99,99 проводили в проходной трубчатой печи (рисунок 4.29), после отжига выполнялось волочение до диаметра 0,04 мм по существующему маршруту обработки. Непосредственно сразу после окончания волочения выполняли замер предела прочности σ_b на специальной разрывной установке. Затем после длительной выдержки при комнатной температуре проволоочных образцов из той же партии делали повторные испытания.



Рисунок 4.29 – Трубчатая печь фирмы АКТЕК для проходного отжига проволоки

Установка для испытания тончайшей проволоки на разрыв показана на рисунке 4.30. Работу на ней ведут в следующем порядке: катушку с проволокой крепят на установочном валу, верхний конец проволоки фиксируется в верхнем неподвижном зажиме, затем отмеряют отрезок проволоки длиной 100 мм и к нему снизу прицепляют нижний зажим, в который плавно насыпается груз. После разрыва образца нижний зажим отцепляется от проволоки и на весах высокой точности фиксируется его вес. По окончании испытания можно рассчитать предел прочности по формуле $\sigma_b = 4P/(\pi d_0^2)$, где P – разрывная нагрузка, d_0 – начальный диаметр проволоки.



Рисунок 4.30 – Установка для проведения испытаний на разрыв для проволоки микронных размеров

После проведения экспериментов получили результаты, которые представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты испытаний проволоки Зл 99,99 диаметром 0,04 мм

№ пп	Диаметр проволоки до волочения, мм	Конечный диаметр проволоки, мм	Степень деформации	Предел прочности после волочения σ_v , МПа	Предел прочности после выдержки σ_v , МПа
1	0,10	0,04	1,833	229	206
2	0,20	0,04	3,219	238	208
3	1,20	0,04	6,802	255	192

На рисунке 4.31 показана диаграмма, визуализирующая данные таблицы 4.2.

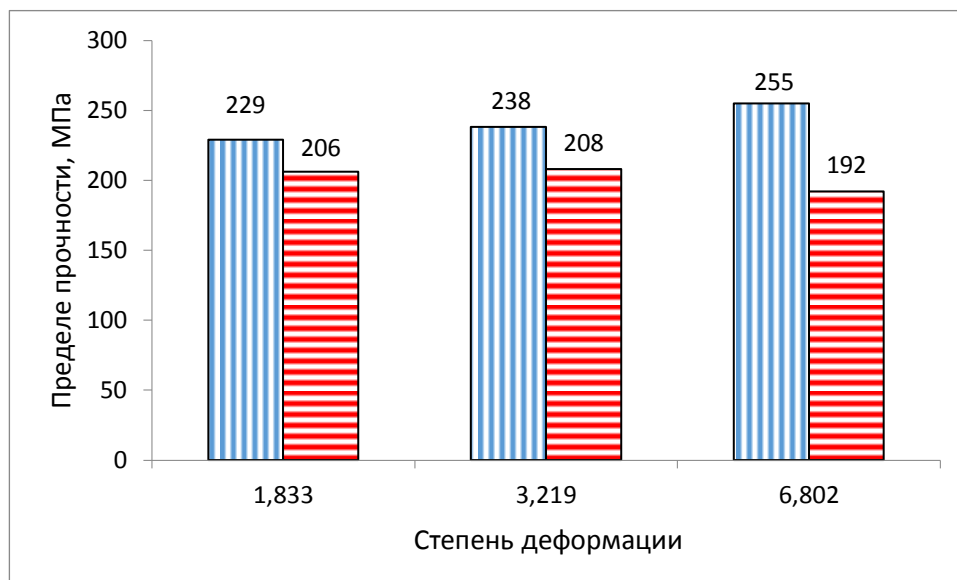


Рисунок 4.31 – Значение предела прочности золотой проволоки после волочения (вертикальная штриховка) и после выдержки (горизонтальная штриховка)

Из диаграммы видно, что со снижением величины накопленной деформации происходит уменьшение предела прочности со значения 255 МПа до 229 МПа. С другой стороны заметно повышение предела прочности после хранения проволоки при комнатной температуре. Из графика на рисунке 4.32 видно, что при уменьшении степени деформации уровень разупрочнения золотой проволоки уменьшается.

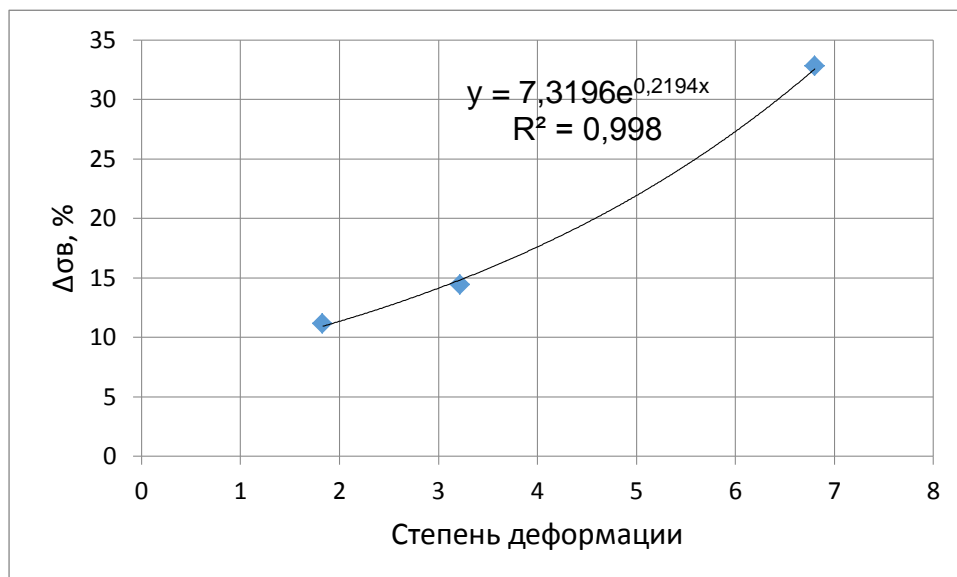


Рисунок 4.32 - Процентное соотношение между значениями предела прочности до и после вылеживания образцов

Таким образом, полученные в результате эксперимента данные показывают, что в следствие перенагартовки проволоки после скальпирования и волочения значительно снижается предел прочности после хранения при комнатной температуре. Введение операций промежуточной термообработки позволяет снизить уровень разупрочнения. Данные результаты подтверждены актом внедрения, приведенным в приложении П1.

Дальнейшая работа направлена на поиск оптимального режима отжига и величины накопленной деформации, позволяющим получить проволоку с требуемым пределом прочности и сниженным уровнем разупрочнения.

4.7. Выводы по разделу

Совместный анализ операций скальпирования и волочения показал следующее.

1. Операция скальпирования создает нагартованный поверхностный слой металла, обладающий повышенными прочностными свойствами.

2. Степень деформации сдвига в упрочненном слое достигает величины 1,8, что соответствует степени деформации 1,0.

3. При последующей операции волочения наличие нагартованного слоя металла приводит к перераспределению деформаций и напряжений в протягиваемой проволоке.

4. Наиболее ощутимый эффект применения операции скальпирования при последующем волочении проявляется в повышении уровня растягивающих осевых напряжений, что может приводить или к повышенной обрывности проволоки или появлению поверхностных дефектов.

5. Наличие операции скальпирования может провоцировать преждевременную рекристаллизацию особо чистых металлов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы достигнута поставленная цель и получены следующие результаты.

1. При использовании комбинированного метода измерения сопротивления деформации по результатам растяжения отожженного образца и определения условного предела текучести для предварительно нагартованных образцов определены кривые упрочнения для золота Зл 99,99 и сплава Pt92,5Pd4Rh3,5, ранее не известные в технической литературе. Выявлено, что кривые упрочнения для сплава Pt92,5Pd4Rh3,5 имеют вид монотонно возрастающих зависимостей, т.е. материал относится к классу упрочняющихся сред, а кривые упрочнения золота имеют вид немонотонных зависимостей, обладающих экстремальными свойствами.

2. Решение краевой задачи волочения проволоки с кольцевыми пережимами методом конечных элементов показало возможность возникновения на поверхности проволоки локальных зон с неблагоприятным для стабильного волочения деформированным и напряженным состоянием. Решение краевой задачи плоской деформации ограниченной области материала с наличием посторонней частицы при нагружении этой области напряжениями, характерными для волочения, показало возможность развития вторичных дефектов в виде пор, примыкающих к частице.

3. Обосновано применение операции скальпирования для описанных выше дефектов поверхности. Опытным и расчетным путем установлено, что операция скальпирования создает нагартованный поверхностный слой металла, обладающий повышенными прочностными свойствами, при этом степень деформации сдвига в упрочненном слое достигает величины 1,8, что соответствует степени деформации 1,0.

4. Показано, что при последующей операции волочения наличие нагартованного слоя металла приводит к перераспределению деформаций и напряжений в протягиваемой проволоке.

5. Несмотря на наличие позитивного воздействия на поверхность металла, применение операции скальпирования при последующем волочении приводит к повышению уровня растягивающих напряжений на поверхности проволоки, что может провоцировать повышенную обрывность.

6. Наличие операции скальпирования может провоцировать преждевременную рекристаллизацию особо чистых металлов.

7. Выявление особенностей совместного применения операций волочения и скальпирования способствовало выработке рекомендаций для изменения маршрутов холодной обработки проволоки из благородных металлов на АО «Екатеринбургский завод ОЦМ».

Перспективы дальнейшей разработки темы. Разработанные в диссертации основные положения и методики рекомендуется в перспективе использовать для проектирования новых и совершенствования действующих технологических режимов холодной обработки проволочной продукции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Платина, ее сплавы и композиционные материалы / Васильева Е.В Волкова Р.М., Захарова М.И., Матвеева М. П., Шнырев Г.Д. – Москва : Металлургия, 1980. – 296 с.
2. Савицкий Е.М.. Благородные металлы: справочное издание под ред. Е.М. Савицкого / Е.М. Савицкий ; Москва : Металлургия, 1984. - 592 с.
3. Wright J.C. Jewellery-related properties of platinum / J.C. Wright // *Platinum Metals Review*. – 2002. -№ 46 (2) - p. 66-72.
4. Biggs T. The hardening of platinum alloys for potential jewellery application / Biggs T., Taylor S.S., Van Der Lingen E. // *Platinum Metals Review*. – 2005. – № 49 (1) – p. 2-15.
5. Loginov Yu.N. Условия разупрочнения и сопротивление деформации платины / Yu.N. Loginov, A.V. Ermakov, L.G. Grokhovskaya, G.I. Studenok // *Цветные металлы*. – 2006. – № 6. - С. 85-87.
6. Loginov Yu. N. Annealing characteristics and strain resistance of 99.93 wt.% platinum / Yu. N. Loginov , A.V. Ermakov, L.G. Grokhovskaya, G.I. Studenok // *Platinum Metals Review*. – 2007 - № 51 (4) - P. 178-184.
7. Параметры упрочнения сплавов платины и палладия с легирующими добавками при учете эффекта Баушингера / Н.И. Тимофеев и [др.] // *Сборник 300 ЛЕТ УРАЛЬСКОЙ МЕТАЛЛУРГИИ. Труды международного конгресса*. - 2001. - С. 347.
8. Логинов Ю.Н. 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.
9. Логинов Ю.Н. Изучение трения при листовой прокатке платины и ее сплавов / Логинов Ю.Н., Студенок Г.И. // *Производство проката*. - 2010. - № 7. - С. 14-16.
10. Логинов Ю.Н. Кинематические условия выдавливания пластического слоя в многорядном щелевом штампе / Логинов Ю.Н., Фомин А.А. // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. - 2013. - № 4. - С. 14-17.

11. Логинов Ю.Н. Исследование первой операции штамповки элементов платиновых стеклоплавильных аппаратов / Логинов Ю.Н., Фомин А.А. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2014. - № 4. - С. 37-41.

12. Фомин А.А. Анализ видов дефектности после первой операции штамповки дна стеклоплавильного аппарата из платины / Фомин А.А., Логинов Ю.Н. // Сборник инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Материалы международной молодежной научно-практической конференции, посвященной памяти члена-корреспондента РАН, почетного доктора УрФУ В. Л. Колмогорова. - 2014. - С. 475-477.

13. Фомин А.А. Деформации при листовой штамповке платинового стеклоплавильного сосуда / Логинов Ю.Н., Фомин А.А. // Сборник Трубы-2014. Труды международной научно-практической конференции. ОАО «РосНИТИ», НО «ФРТП». - 2014. - С. 284-287.

14. Гах С.В. Производство каталитических и улавливающих систем для конверсии аммиака по технологии компании UMICORE AG&CO.KG / Гах С.В., Савенков Д.А. // Цветные металлы. - 2012. - № 5. - С. 46-49.

15. Пакет газопроницаемых сеток из благородных металлов для каталитических процессов : пат. 2150389 Рос. Федерация : МПК В32В15/02, В01J23/40, В01J35/04 / Тимофеев Н.И., Богданов В.И., Дмитриев В.А., Гуцин Г.М., Шабуров С.Ю. ; патентообладатель ОАО «Екатеринбургский завод по обработке цветных металлов» - № 99102087/04 ; заявл. 01.02.1999 ; опубл. 10.06.2000.

16. Rdzawski Z.M. Microstructure and properties of wires from platinum alloys for the catalytic ammonia oxidation processes / Rdzawski Z.M., Stobrawa J.P., Ciura L.K., Bestak B. // Wire Journal International. - 2001. - № 34(4). - P. 208-214.

17. Лахтин Ю.М. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений / Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. - Москва: Машиностроение. - 1990 - 528 с.

18. Nagasekhar A.V. Microstructure and mechanical properties of pure gold processed by equal channel angular pressing / Nagasekhar A.V., Rajkumar T.,

Stephan D., Tick-Hon Y., Guduru R.K. // *Materials Science and Engineering A*. - 2009. - № 524 (1-2). - P. 204-207.

19. Suzuki T. Strength enhancement and deformation behavior of gold after equal-channel angular pressing / Suzuki T., Vinogradov A., Hashimoto S. // *Materials Transactions*. - 2004. - № 45 (7). - P. 2200-2208.

20. Chen Y. Size effects in thin coarse-grained gold microwires under tensile and torsional loading / Chen Y., Kraft O., Walter M. // *Acta Materialia*. - № 87, 1 – 2015. - P. 78-85.

21. Головин Ю.И. Область существования эффекта Портевена–Ле Шателье в условиях непрерывного индентирования сплава Al–2.7%Mg при комнатной температуре/ Головин Ю.И., Иволгин В.И., Лебедкин М.А., Сергунин Д.А. // *Физика твердого тела*. – 2004. – Т. 46, № 9. - С. 1618 – 1620.

22. Лебедкин М.А. Динамический механизм температурной зависимости эффекта Портевена–Ле Шателье / Лебедкин М.А., Дунин-Барковский Л.Р. // *Физика твердого тела*. – 1998. – Т. 40, № 3. - С. 487 -492.

23. Текстурирование на этапах изготовления медной проволоки. / Демаков С. Л. [и др.] // *Кабели и провода*. - 2012. - № 2 (333). - С. 8-12.

24. Логинов Ю.Н. Влияние вида кривой упрочнения на локализацию деформации при осадке титановых заготовок / Логинов Ю.Н., Ершов А.А. // *Титан*. - 2012. - № 1 (35). - С. 22-28.

25. Логинов Ю. Н. Анализ сортовой прокатки кислородосодержащей меди с учетом немонотонности характеристик упрочнения / Логинов Ю.Н., Зуев А.Ю., Инатович Ю.В. // *Цветные металлы*. - 2012. - № 7. - С. 77-81.

26. Relationship between mechanical properties and microstructure of ultra-fine gold bonding wires / Kim K.S. [etc.] // *Mechanics of Materials*. – 2006. - №. 38. - P. 119–127.

27. Effects of calcium on the mechanical properties of ultra-fine grained gold wires / Chew Y.H. [etc.] // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2006. - № 415, 1–2. – P. 193-197.

28. Influences of 1.0 wt.% additives on the microstructures and mechanical properties of gold / Viola L. [etc.] // Journal of Alloys and Compounds. - 2017. - №. 721. - P. 615-621.

29. Grain refinement of coarse grained gold by combined thermo-mechanical process of severe plastic deformation and low temperature annealing / Miura H. [etc.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2010. - № 240 – P. 12-16.

30. Role of strain rate on the micromechanical characterization properties of 4N gold micro wire: Micro tensile and nanoindentation / Abdullah S. [etc.] // European Journal of Scientific Research. - № 28 (1). - P. 33-43.

31. Влияние скорости деформации на свойства электротехнической меди / Логинов Ю.Н. [и др.] // Металлы. - 2011. - № 2. - С. 31.

32. Liu D.S. Effects of dopant, temperature, and strain rate on the mechanical properties of micrometer gold-bonding wire / Liu D.S., Chao Y.C. // Journal of Electronic Materials. - 2003. – № 32 (3). - P. 159-165.

33. Strain rate sensitivity and Hall-Petch behavior of ultrafine-grained gold wires / Chew Y.H. [etc.] // Thin Solid Films. - 2008. - № 516 (16). - P. 5376-5380.

34. Deformation and heat treatment of cold drawn gold / Kang S.H. [etc.] // Materials Science Forum. International Symposium on Fundamentals of Deformation and Annealing, Manchester; United Kingdom. – 2007. - № 550. – P. 289 – 294.

35. Расчет показателей напряженного состояния и кинематических характеристик процесса волочения проволоки из сплавов золота 585 пробы / Сидельников С.Б. [и др.] // Моделирование и развитие процессов ОМД. – 2011 - № 1. - С. 185-193.

36. Исследование технологии получения проволоки из сплавов на основе золота / Сидельников С. Б. [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2010. - № 3. - С. 26-27.

37. Исследование структуры и свойств никельсодержащего сплава золота 585-й пробы / Сидельников С. Б. [и др.] // Материаловедение. - 2014. - № 12. - С. 14-19.

38. Анализ и проектирование технологии получения проволоки ювелирного назначения из новых сплавов драгоценных металлов /

Сидельников С.Б. [и др.] // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy. - 2015. - Т. 15. № 4. - С. 108-115.

39. Логинов Ю.Н. Дорнование полой заготовки из сплава золота / Логинов Ю.Н., Каменецкий Б.И., Студенок Г.И. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2006. - № 6. - С. 36-41.

40. Volkov A.Yu. Structure and mechanical properties of CuAu and CuAuPd ordered alloys / Volkov A.Yu. // Gold Bulletin. - 2004. - Т. 37. № 3-4. - С. 208-215.

41. Volkov A.Y. Structure formation in gold-copper-palladium during atomic ordering. Communication 1. High temperature ordering / Volkov A.Y., Syutkina V.I. // Физика металлов и металловедение. - 1995. - Т. 79. № 6. - С. 85-92.

42. Волков А.Ю. Новые подходы к созданию золотых ювелирных сплавов / Волков А.Ю., Зигандарова И.С. // Цветные металлы. - 2008. - № 9. - С. 43-46.

43. Антонова О.В. Микроструктура эквиаомного сплава CuPd после мегапластической деформации и последующего упорядочения / Антонова О.В., Новикова О.С., Волков А.Ю. // Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. - 2015. - № 5. - С. 133-138.

44. Логинов Ю.Н. Роль дополнительных сдвиговых деформаций при волочении золота в формировании свойств конечного продукта / Логинов Ю.Н., Первухин А.Е. // Сборник Трубы-2014. Труды международной научно-практической конференции. ОАО «РосНИТИ», НО «ФРТП». - 2014. - С.314-316.

45. Зенин В.В. Золото в технологии производства полупроводниковых изделий / Зенин В.В., Спиридонов Б.А., Чистяков С.Ю. // Вестник Воронежского государственного технического университета. - 2010. - Т. 6. № 6. - С. 67-72.

46. A numerical approach on the inclusion effects in ultrafine gold wire drawing process / Lee K.W. [etc.] // Engineering Failure Analysis. - 2011. - № 18. - P. 1272-1278.

47. Патент Японии JP2003053418, НКИ В21С1/00; В21С1/06. Method and device for drawing extra fine gold wire. Yamada Takashi. Заявл. 01.04.2000. Оpubл. 26.02.2003.

48. Патент Японии JP2005297037, НКИ В21С1/00; В21С1/06; В21С1/14; В21С9/00. Drawing method for extra fine wire. Заявл. 11.06.2002. Опубл. 27.10.2005.
49. Kazeminezhad M. Modeling the effect of redundant strain factor on the microstructure inhomogeneity of drawn and annealed wire / Kazeminezhad M. // *Journal of Computer-Aided Materials Design*. - 2007. - № 14 (3). - P. 435-446.
50. Chin R.K. A computational study of strain inhomogeneity in wire drawing / Chin R.K., Steif P.S. // *Int. J. Mach. Tools Manufact*/ - 1995/ - V. 35, № 8. - P. 1187-1198.
51. Celentano D.J. Thermomechanical Simulation and Experimental Validation of Wire Drawing Processes / Celentano D.J. // *Materials and Manufacturing Processes*. 2010. - № 25. - P. 546-556.
52. The effects of die angle on texture and annealing response of ETP copper wire / Kraft F.F. [etc.] // *Journal of Materials Processing Technology*. - 1996. - № 60. - P. 171-178.
53. Колмогоров Г.Л. Температурные режимы и критические скорости при волочении проволоки / Колмогоров Г.Л., Кошелева Н.А. // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. - 2016. - № 3. - С. 34-39.
54. Колмогоров Г.Л. Эффективность оптимизации геометрии технологического инструмента для волочения / Колмогоров Г.Л., Чернова Т.В., Бурдина Ю.А. // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. - 2015. - № 3 (51). - С. 55-58.
55. Красильников Л.А. Волочильщик проволоки / Л.А. Красильников, А.Г. Лысенко. – Москва : Металлургия, 1987. - 320 с.
56. Гурьянов Г.Н. Относительный прирост осевого напряжения в калибрующем пояске волокна / Гурьянов Г.Н. // *Металлург*. - 2007. - №6. - С. 53-55.
57. Паршин В.С. Об использовании противонапряжения на волочильном стане с подвижной волокой / Паршин В.С. // *ИВЧМ*. – 1975. - № 6. – С. 74.

58. Dixit U.S. An analysis of the steady-state wire drawing of strain-hardening materials / Dixit U.S., Dixit P.M. // Journal of Materials Processing Technology. - 1995. - № 47. - P. 201-229.

59. Analysis of the influence of back-pull in drawing process by the finite element method / Camacho A.M. [etc.] // Journal of Materials Processing Technology. - 2005. - № 164–165. - P. 1167-1174.

60. Радионов А.А. О повышении энергоэффективности процесса волочения проволоки средствами автоматизированного электропривода / Радионов А.А. // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. - 2009. - № 1. - С. 108-111.

61. Добров И.В. Влияние сил инерции на энергосиловые параметры процесса волочения / Добров И.В. Большаков В.И. // Metallurgical and Mining Industry. - 2005. - № 3. - С.48-52.

62. Колмогоров В.Л. Волочение в режиме жидкостного трения / В.Л. Колмогоров, С. И. Орлов, К. П. Селищев. Москва : Metallurgy, 1967. - 155 с.

63. Басин М.Е. Математическая модель процессов течения смазочного слоя и упругопластического деформирования изделия // Инженерно-физический журнал / Басин М.Е., Бояршинов М.Г. // Инженерно-физический журнал. - 2008. - Т. 81. № 3. - С. 538-547.

64. Lo S.-W. The theoretical model of micro-pool lubrication in metal forming / Lo S.-W., Wilson William R.D. // J. Tribology. - 1999. - V. 121, №. 4. - P. 731-738.

65. Колмогоров В.Л. Гидродинамическая подача смазки / В.Л. Колмогоров, С.И. Орлов, Г.Л. Колмогоров. Москва : Metallurgy, 1975. - 256 с.

66. Колмогоров Г.Л. Условия улучшенного (смешанного) режима трения при волочении / Г.Л. Колмогоров, В.Н. Трофимов, Т.В. Чернова // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2013. - № 1. - С. 31-33.

67. Колмогоров Г.Л. Методика моделирования упругопластического деформирования длинномерного изделия в режиме гидродинамического трения / М.Е. Басин, М.Г. Бояршинов, Г.Л. Колмогоров // Вестник Магнитогорского

государственного технического университета им. Г.И. Носова. - 2010. - № 3. - С. 45-51.

68. The process of ultra-fine wire drawing for magnesium alloy with the guaranteed restoration of ductility between passes / Kustra P. [etc.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2017. - № 247. – P. 234-242.

69. Гурьянов Г.Н. Выбор параметров деформации волочения проволоки на основе допустимых значений коэффициента запаса прочности И.Л. Перлина и показателя напряженного состояния В.Л. Колмогорова / Гурьянов Г.Н., Смирнов С.В. // Проблемы черной металлургии и материаловедения. - 2017. - № 4. - С. 5-12.

70. Методика оценки способности углеродистой стали к волочению с учетом технологии ее обработки / Богатов А.А. [и др.] // Производство проката. - 2005. - № 5. С. - 27-30.

71. Серегина Е.С. Обрывность проволоки во время волочения по причинам наличия поверхностных дефектов, наследованных с катанки / Серегина Е.С. // Литье и металлургия. - 2017. - № 4 (89). - С. 26-31.

72. Паршин С.В., Влияние условий волочения и вида обработки заготовки на развитие дефектов поверхности / Паршин С.В., Паршин В.С. // Сталь. - 2013. - № 8. - С. 50-52.

73. Получение непрерывнолитой заготовки для волочения прутков и проволоки в ОАО «КУЗОЦМ» / Железняк Л.М. [и др.] // Металлург. - 2008. - № 5. - С. 61-63.

74. Дефекты слитков черных и цветных сплавов, предназначенных для пластической деформации / Ю.Н. Логинов [и др.] – Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2007. - 167 с.

75. Логинов Ю.Н. Модель деформации поверхностного слоя заготовки, пораженного дефектами / Логинов Ю.Н. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2001. - № 4. - С. 36-40.

76. Логинов Ю.Н. Концепция описания деформации заготовки, имеющей неровную поверхность / Логинов Ю.Н. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. - 2004. - № 5. - С. 29.

77. Харитонов В.А. Производство пружинной проволоки / В.А. Харитонов, Д.Э. Галлямов – Магнитогорск : МГТУ, 2013. - 151 с.
78. Армарего И. Дж. А. Обработка резанием. Пер с англ. / Армарего И. Дж. А., Браун Р.Х. – Москва : Машиностроение, 1977. - 325 с.
79. Влияние режимов механической обработки стали 38ХНЗМФА на величину остаточных напряжений / Трофимов В.Н. [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университет. Машиностроение. Материаловедение. – 2017. - № 1 – С. 27-33.
80. Богатов А.А. Определение поврежденности приповерхностного слоя металла при обработке резанием / Мижирицкий О.И., Богатов А.А. // Инновационные технологии в металлургии и машиностроении. Уральская научно-педагогическая школа имени профессора А. Ф. Головина. – Екатеринбург : УрФУ. 2013, - С.119-123.
81. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания / А.Д. Макаров – Москва : Машиностроение, 1976. - 278 с.
82. Cui X. Influences of tool rake angle and cutting speed on ceramic tool failure in continuous and intermittent turning of hardened steel / Cui X., Wang D., Guo J. // *Ceramics International*. - 2016. - № 42. - P. 12390–12400.
83. Полищук Е.Г. Система расчета пластического деформирования РАПИД / Полищук Е.Г., Жиров Д.С., Вайсбурд Р.А. // Кузнечно-штамповочное производство. - 1997. - №8. - С. 16-19.
84. Логинов Ю.Н. Решения технологических задач прессования с применением системы анализа процессов пластического деформирования «РАПИД 2D» Учебно-методическое пособие : / Ю.Н. Логинов – Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. - 78 с.
85. Деформации и структура металла при холодной стыковой сварке медных заготовок / Логинов Ю.Н. [и др.] // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. - 2012. - № 1. - С. 37-44.
86. Логинов Ю.Н. Изучение напряженно-деформированного состояния для предупреждения образования продольных трещин в прессованных трубах / Логинов Ю.Н., Антоненко Л.В. // Цветные металлы. - 2010. - № 5. - С. 119-122.

87. Взаимодействие частицы оксида меди с медью в процессе волочения / Логинов Ю.Н. [и др.] // *Металлы*. - 2012. - № 6. - С. 36-45.
88. ABAQUS, Инженерные программы [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://tesis.com.ru/cae_brands/abaqus/.
89. Логинов Ю.Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния при волочении с вращением волокна / Логинов Ю.Н. // *Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением*. - 2014. - № 6. - С. 39-41.
90. Полухин П.И. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов / П.И. Полухин, Г.Я. Гун, А.М. Галкин – Москва : *Металлургия*, 1983. – 352 с.
91. Annealing characteristics and strain resistance of 99.93 wt.% platinum / Loginov Yu.N. [etc.] // *Platinum Metals Review*. - 2007. - V. 51. № 4. - P. 178-184.
92. Условия разупрочнения и сопротивление деформации платины / Логинов Ю.Н. [и др.] // *Цветные металлы*. - 2006. - №6. - С.85-88.
93. Логинов Ю.Н. Влияние эффекта дисперсного упрочнения платинородиевого сплава на характеристики упрочнения / Логинов Ю.Н. Фомин А.А. // *Инновационные технологии в металлургии и машиностроении*. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета. - 2012. - С. 51-55.
94. The effect of solute elements on hardness and grain size in platinum based binary alloys / Murakami T. [etc.] // *Materials Transactions*. - 2008. - №. 49. - P. 538-547.
95. Biggs T. The hardening of platinum alloys for potential jewellery application / Biggs T., Taylor S.S., Van Der Lingen E. // *Platinum Metals Review*. - 2005. - № 49. - P. 2-15.
96. Улыбышева Л.П. Рациональное использование платиновых металлов в производстве стеклянного волокна / Улыбышева Л.П. Тыкочинский Д.С. // *Цветные металлы*. - 2012. - № 5. - С. 40-46.
97. Dietmar K. High-quality wires for high-tech applications / Dietmar K. // *Wireworld*. - 1993. - № 35. - P. 24-28.

98. ГОСТ 10446-80 (ИСО 6892-84). Проволока. Метод испытания на растяжение. – Москва : Издательство стандартов, 1982 – 6 с.
99. ГОСТ 13498-2010. Платина и сплавы на ее основе. Марки – Москва : Стандартиформ, 2012 - 8с.
100. Зюзин В.И. Механические свойства металлов и сплавов при обработке металлов давлением : справочник / В.И. Зюзин, А.В. Третьяков – Челябинск : «Металл», 1993. - 368 с.
101. Effect of the strain rate on the properties of electrical copper / Loginov Y.N. [etc.] // Russian Metallurgy (Metally). - 2011. - № 3. - P. 194-201.
102. Bhattacharyya A. Ravichandran G. Effect of strain rate on deformation texture in OFHC copper / Bhattacharyya A., Rittel D., Ravichandran G. // Scripta Materialia. - 2005. - №. 52. - P. 657 –661.
103. Первухин А.Е. Сопротивление деформации проволоочных образцов из платинового сплава / Первухин А.Е., Логинов Ю.Н. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. - № 12. - С. 57 – 60.
104. Chen Y. Size effects in thin coarse-grained gold microwires under tensile and torsional loading / Chen Y., Kraft O., Walter M. // Acta Materialia. – 2015. - № 87, 1. - P. 78-85.
105. . Effect of reduction ratio, inclusion size and distance between inclusions on wire breaks in Cu fine wire drawing / Cho H. [etc.] // Journal of Materials Processing Technology. - 2002. - № 130-131. - P. 416-420.
106. Origination of wire breakage in ultra-fine single crystal copper wire drawings and its technical improvement / Ding Y. [etc.] // Special Casting and Nonferrous Alloys. - 2008. - № 28 (4). - P. 261-264.
107. Wright R.N. Mechanisms of wire breaks / Wright R. N. // Proceedings of the Annual Convention of the Wire Association International. - 1981. - P. 104-109.
108. Analysis of wire breakage in the manufacturing of higher strength steel cord / Yasuhiro O. // Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan. - 1986. - № 26 (12). - P. 368.
109. Логинов Ю.Н. Исследование изменения относительного сужения кислородсодержащей медной проволоки по маршруту волочения /

Логинов Ю.Н., Осминин А.С., Копылова Т.П. // Заготовительные производства в машиностроении. - 2012. - № 5. - С. 29-32.

110. Influence of geometrical conditions on central burst appearance in axisymmetrical drawing processes / Camacho A.M. [etc.] // Journal of Materials Processing Technology. – 2006. - № 177 (1-3). - P. 304-306.

111. Взаимодействие частицы оксида меди с медью в процессе волочения / Логинов Ю.Н. [и др.] // Металлы. - 2012. - № 6. - С. 36-45.

112. Возникновение пористых структур в кислородсодержащей меди при деформационном воздействии / Логинов Ю.Н. [и др.] // Физическая мезомеханика. - 2013. - Т. 16. № 6. - С. 99-102.

113. ГОСТ 32597-2013. Медь и медные сплавы. Виды дефектов заготовок и полуфабрикатов – Москва : Стандартинформ, 2014 - 28 с.

114. Evolution of defects in the production of capillary copper tubes / Loginov Y.N. [etc.] // Journal of Materials Processing Technology. - 2015. - № 224. - P. 80-88.

115. Логинов Ю.Н. Модель деформации поверхностного слоя заготовки, пораженного дефектами / Логинов Ю.Н. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2001. - № 4. - С. 36-40.

116. Первухин А.Е. Структура дефектов в процессе производства проволоки из платины / Первухин А.Е. // Сборник материалов XVII международной научно-технической уральской школы семинар металловедов – молодых ученых : ч.1 / Екатеринбург, УрФУ - 2016. - с. 29-33.

117. Логинов Ю.Н. Эволюция поверхностных дефектов при волочении проволоки из платинового сплава / Логинов Ю.Н., Первухин А.Е., Бабайлов Н.А. // Сборник материалов XI Международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» : Екатеринбург, ИМАШ УрО РАН. - 2017. - С. 47.

118. Логинов Ю.Н. Формоизменение одиночно расположенной поры в круглой заготовке при волочении / Логинов Ю.Н., Еремеева К.В. // Кузнечно-штамповочное производство. - 2009. - № 4 -. С. 3.

119. Логинов Ю.Н. Влияние типа пластической деформации на видоизменение одиночной поры / Логинов Ю.Н., Еремеева К.В. // Деформация и разрушение материалов. - 2011. - № 4. - С. 40-44.

120. Логинов Ю.Н. Концепция описания деформации заготовки, имеющей неровную поверхность / Логинов Ю.Н. // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. - 2004. - № 5. - С. 29.

121. Кургузов С.А. Исследование поведения дефектов поверхности при волочении с целью улучшения качества проволоки : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.15.05 / С.А. Кургузов ; МГТУ, Магнитогорск, 1990. - 21 с.

122. Формоизменение рисок при волочении проволоки / Никифоров А.Б. [и др.] // Сталь. - 1988. - № 3. - С. 67-69.

123. Галкин В.И. Исследование влияния величины угла волокна на напряженно-деформированное состояние в очаге деформации при волочении проволоки из сплава ВТ16 / Галкин В.И., Сидяев В.В. // Технология легких сплавов. - 2015. - №3. - С. 127-130.

124. . Минимизация потребляемой мощности при производстве стального проката на литейно-деформационных модулях / Буркин С.П. [и др.] // Сталь. - 1996. - № 6. - С. 29-33.

125. Перлин И.Л. Теория волочения / Перлин И.Л., Ерманок М.З. - Москва : Металлургия, 1971. - 448с.

126. Логинов Ю.Н. Решения технологических задач прессования с применением системы анализа процессов пластического деформирования "РАПИД 2D". Учебно-методическое пособие / Логинов Ю.Н. – Екатеринбург ; УГТУ-УПИ, 2007. - 78с.

127. Логинов Ю.Н. Метод конечных элементов в описании напряженно деформированного состояния процесса прессования / Логинов Ю.Н., Котов В.В. – Екатеринбург : УрФУ, 2010. - 320 с.

128. Логинов Ю.Н. Медь и деформируемые медные сплавы : учеб. Пособие / Логинов Ю.Н. – Екатеринбург : УГТУ, 2006. - 136с.

129. Chevalier L. Prediction of defects in metal forming: application to wire drawing / Chevalier L // *Journal of Materials Processing Technology*. - 1992. - № 32. - P. 145–153.

130. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров – Москва : Металлургия, 1986. - 689 с.

131. Логинов Ю.Н. Влияние угла рабочей зоны волокна на напряженное состояние в очаге деформации при волочении меди / Логинов Ю.Н. // *Цветные металлы*. - 2010. - № 3. - С. 94-97.

132. McAllen P.J. Numerical analysis of axisymmetric wire drawing by means of a coupled damage model / McAllen P.J., Phelan P. // *Journal of Materials Processing Technology*. - 2007. - № 183. - P. 210–218.

133. Расчет деформаций и экспериментальное исследование текстуры в нагартованной медной проволоке / Логинов Ю.Н. [и др.] // *Деформация и разрушение материалов*. - 2011. - № 5. - С. 38-44.

134. Первухин А.Е. Напряженное состояние заготовки по переходам волочения – моделирование с помощью системы «РАПИД-2D» / Первухин А.Е. // *Сборник материалов и докладов XVI международной научно-технической уральской школы семинар металловедов – молодых ученых : ч.1* / Екатеринбург, УрФУ. – 2015. – С. 31-34.

135. Логинов Ю.Н. 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.

136. Loginov Yu. N. The strain state calculation during the multipass wire drawing // Loginov Yu.N., Pervukhin A.E., Babailov N.A. // *Сборник материалов X международной конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций»*. – Екатеринбург : ИМАШ УрО РАН. – 2016. - С.3.

137. Zones of material separation in simulations of cutting / Pan H. [etc.] // *International Journal of Mechanical Sciences*. - 2016. - № 115-116. - P. 262–279.

138. Controlling deformation and microstructure on machined surfaces / Guo Y. [etc.] // *Acta Materialia*. - 2011. - № 59. - P. 4538–4547.

139. Loginov Yu.N. Calculation of the strain state under multipass wire drawing / Loginov Yu.N., Babailov N.A., Pervukhin A.E. // AIP Conference Proceedings. - 2016. - № 1785. - P. 040032-1 - 040032-4.

140. Relationship between mechanical properties and microstructure of ultra-fine gold bonding wires / Kim K.S. [etc.] // Mechanics of Materials. - 2006. - № 38 - P.119–127.

141. Chen X. The chip-flow behaviors and formation mechanisms in the orthogonal cutting process of Ti6Al4V / Chen X., Ma W., Shuang F. // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. - 2017. - № 98. - P. 245-270.

142. Бобров В.Ф. Основы резания металлов / В.Ф. Бобров – Москва : Машиностроение, 1975 - 344 с.

143. Макаров Э.С. Теория пластичности дилатирующих сред: монография / Э.С. Макаров, А.Е. Гвоздев, Г.М. Журавлев; под. ред. А.Е. Гвоздева. - 2-е изд. перераб. и доп. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. - 337с.

144. Воронцов А.Л. Разработка новой теории резания. Математическое описание образования стружки разных видов, пульсации силы резания и параметров контакта обработанной поверхности заготовки с задней поверхностью резца / Воронцов А.Л., Султанзаде Н.М., Албагачиев А.Ю. // Вестник машиностроения. - 2008. - №7. - С. 56-60.

145. Первухин А.Е. Пластические деформации при скальпировании серебряной проволоки / Первухин А.Е. // Сборник материалов XVIII международной научно-технической уральской школы семинар металлословов – молодых ученых. – Екатеринбург : УрФУ. – 2017. - С. 581 - 584.

146. Логинов Ю.Н. Скальпирование как операция для устранения дефектов сортового проката из благородных металлов / Логинов Ю.Н., Первухин А.Е. // Производство проката. - 2018 - № 4 – С. 32 – 40.

147. Huang K. Analytical model of stress field in workpiece machined surface layer in orthogonal cutting / Huang K., Yangn W., Chen Q. // International Journal of Mechanical Sciences. - 2015. - № 103. - P. 127–140.

148. Saraswati T.S. The effects of Ca and Pd dopants on gold bonding wire and gold rod / T.S. Saraswati [etc.] // Thin solid films. – 2004. - № 462-463. – P. 193-197.

149. Малышев В.М.. Золото / В.М. Малышев, Д.В. Румянцев – Москва : Металлургия, 1979. – 288 с.

150. Первухин А.Е. Влияние высоконагартованного состояния на стабильность механических свойств золота марки Зл99,99 / А.Е. Первухин // Сборник трудов II Международной молодежной научно-практической конференции «Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства» ; г. Магнитогорск, ФГБОУ «МГТУ им. Г.И. Носова». – 2016 - С. 17-18.

151. Первухин А.Е. Пути повышения температуры рекристаллизации золота / Первухин А.Е. // Сборник трудов XV международной научно-технической уральской школы семинара металловедов – молодых ученых. – Екатеринбург : УрФУ, 2014. - с. 318-320.

ПРИЛОЖЕНИЕ П1



plaurum

АО «Екатеринбургский завод
по обработке
цветных металлов»

www.ezocm.ru

Россия, 624097, Свердловская обл.
г. Верхняя Пышма
пр-т Успенский, 131

Тел. +7 (343) 311-46-00, 311-46-03
Факс +7 (343) 311-46-01
E-mail: mail@ezocm.ru

«01» февраля 2018 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

АО «ЕЗ ОЦМ» подтверждает, что аспирант Первухин Александр Евгеньевич (научный руководитель от УрФУ проф., д.т.н. Логинов Юрий Николаевич) принимал активное участие в научно-исследовательских работах в рамках совершенствования технологических процессов изготовления проволоки из благородных металлов и сплавов до диаметра 0,02 мм.

За 2014 – 2018 г.г. аспирантом были выполнены следующие работы.

1. Проведен литературный обзор свойств благородных металлов и сплавов и существующих в мире проблем при волочении проволоки до диаметра 0,02 мм, в т.ч. золотой микронной проволоки. Проведенный обзор показал наличие проблем, связанных с возникновением дефектов проволоки и проявлением явления самоотжига золотой проволоки, согласно чему было принято решение усовершенствовать существующую на ЕЗ ОЦМ технологию волочения.

2. Было выявлено отсутствие данных о механических свойствах производимых материалов, в т.ч. необходимых для моделирования. Были испытаны проволоочные образцы диаметром от 0,3 мм до 1,2 мм на разрывной машине INSTRON 3365. Результаты растяжения проволоки были обработаны статистически и получены зависимости упрочнения для сплавов Зл 99,99 и ПлПдРд 92,5-4-3,5 от пластической деформации при холодной обработке.

3. Проведен анализ существующей технологии волочения проволоки из золота марки Зл99,99. Было установлено, что в технологическом цикле применяется операция скальпирования, предназначенная для устранения поверхностных дефектов на заготовке, привнесенных на предыдущих переделах. Выполнено компьютерное моделирование процесса скальпирования проволоки при протяжке на однократной волочильной машине KRATOS 1/400. Результаты моделирования помогли установить, что после скальпирования возникает перенагартовка проволоки, что может приводить к нестабильной прочности полуфабрикатов и возникновению эффекта самоотжига.

4. По результатам работы проведена корректировка технологии изготовления проволоки из Зл 99,99 с введением дополнительного промежуточного отжига. Изготовление опытной партии показало, что дополнительный отжиг позволяет снизить уровень разупрочнения проволоки при длительном хранении. Полученные результаты будут отображены в пересматриваемой технологической документации.

Директор по производству -
начальник ЦВЗиГП

Главный технолог, к.т.н.

Начальник УВГП



А.С. Штырлов

Г.М. Гушин

Д.Б. Судаков