

На правах рукописи



**ПЕРВУХИН Александр Евгеньевич**

**ПРОЯВЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ  
ДЕФОРМАЦИИ В ПРОЦЕССАХ ВОЛОЧЕНИЯ ПРОВОЛОКИ ИЗ  
БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ**

05.16.05 – Обработка металлов давлением

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2018

Работа выполнена на кафедре «Обработка металлов давлением» Института новых материалов и технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Логинов Юрий Николаевич**

Официальные оппоненты: **Трофимов Виктор Николаевич**  
доктор технических наук доцент,  
ФГБОУ ВО «Пермский национальный  
исследовательский политехнический  
университет», профессор кафедры «Динамика и  
прочность машин» Факультета прикладной  
математики и механики;

**Лебедева Ольга Сергеевна,**  
кандидат технических наук,  
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный  
университет», г. Красноярск, доцент кафедры  
«Обработка металлов давлением» Института  
цветных металлов и материаловедения

Ведущая организация: ФГБУН Институт машиноведения Уральского  
отделения Российской академии наук,  
г. Екатеринбург.

Защита состоится «20» декабря 2018 г. в 16:00 ч на заседании диссертационного совета Д 212.285.04 на базе ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19 в ауд. И-420 (зал Ученого Совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://lib.urfu.ru/mod/data/view.php?id=51&rid=285868>

Автореферат разослан «\_\_\_» октября 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Селиванова  
Ольга Владимировна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Проволока из сплавов платины часто применяется для изготовления химически стойких фильтров, катализаторных сеток, эксплуатирующихся в химической промышленности. Создание и совершенствование биокаталитических, биосинтетических и биосенсорных технологий входит в перечень критических технологий Российской Федерации (утв. Указом Президента РФ России от 7 июля 2011 года № 899). 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 (утв. Указом Президента РФ России от 7 июля 2011 года № 899). 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.

Работа выполнена в рамках исследований, включенных в следующие научные программы:

- «Разработка научных основ физики и механики обработки металлов давлением с целью создания энерго- и ресурсосберегающих инновационных технологий производства металлургической продукции ответственного назначения» (гос. задание № 11.13692014/К от 18.07.2014);

- 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 План научно-исследовательских работ по совершенствованию технологии изготовления продукции из драгметаллов Отдела главного технолога ЕЗОЦМ на 2016 г.

**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** данной 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 ПлПдРд92,5-4-3,5 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 способами волочения и скальпирования (акт внедрения АО «Екатеринбургский завод по обработке цветных металлов, г. Верхняя Пышма»).

**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 многократного 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.

**Положения, выносимые на защиту:**

- получение новых данных, описывающих зависимость сопротивления деформации от степени деформации для сплава платины и золота высокой чистоты в холодном состоянии;
- механизмы образования дефектов при волочении проволоки из драгметаллов и установление их влияния на процесс волочения;
- расчет деформированного состояния методом конечных элементов в процессе скальпирования проволоки и установление факта нагартовки поверхностного слоя в результате осуществления пластической деформации;

- способ учета влияния нагартованного поверхностного слоя на напряженного-деформированное состояние очага деформации при последующем волочении скальпированной проволоки.

**Личный вклад** выразился в формировании цели, задач и направлений исследований; разработке методики, планировании, подготовке и непосредственном проведении лабораторных и промышленных опытов; обработке, анализе и обобщении полученных данных; подготовке научных статей, тезисов докладов российских и международных конференций.

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

**Апробация результатов работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XV международная научно-техническая уральская школа семинар металлургов – молодых ученых: - Екатеринбург, 2014; XVI международная научно-техническая уральская школа семинар металлургов – молодых ученых: - Екатеринбург, 2015; XVII международная научно-техническая уральская школа семинар металлургов – молодых ученых: - Екатеринбург, 2016; II Международная молодежная научно-практическая конференция «Инновационные процессы обработки металлов давлением: фундаментальные вопросы связи науки и производства»: - Магнитогорск, 2016; XVIII международная научно-техническая уральская школа семинар металлургов – молодых ученых: - Екатеринбург, 2017; XI Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций»: - Екатеринбург, 2017

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 11-ти печатных трудах, в том числе три статьи опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Две статьи вошли в международные базы Scopus и Web of Science.

**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 133 страницах машинописного текста; включает 79 рисунков; 5 таблиц и состоит из введения; четырех глав; заключения; списка литературы из 151 наименования и одного приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** сформулирована актуальность темы диссертации, цель и задачи работы, дана характеристика ее научной новизны, теоретической и практической значимости.

**В первой главе** представлен обзор литературных данных, описывающих основные физико-механические свойства платины и ее сплавов, области применения в различных отраслях промышленности. Описаны эффекты, сопровождающие процесс волочения проволоки из чистого золота, рассмотрена специфика процесса волочения по отношению к

другим методам обработки давлением, приведены разные варианты поверхностной обработки проволоки. Также дано описание программных продуктов для анализа напряженно-деформированного состояния в операциях волочения. На основании выполненного обзора сформулированы задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена изучению технологических свойств сплава платины ПлПдРд92,5-4-3,5 и золота марки Зл99,99. Применена комбинированная методика проведения холодных испытаний на основе растяжения проволочных образцов в условиях малых степеней деформации и измерения условного предела текучести после нагартовки в процессе многократного волочения.

Получены значения сопротивления деформации сплава ПлПдРд92,5-4-3,5 при скорости деформации  $0,008...0,01 \text{ с}^{-1}$  в диапазоне степеней деформации  $0...2,644$ . Установлено, что метод растяжения образцов позволяет получить данные по сопротивлению деформации при достижении обжатия не выше 12 %. Метод определения сопротивления деформации измерением условного предела текучести позволил получить данные при обжатии до 95 %. Полученные зависимости представлены в графическом (рисунок 1) и аналитическом виде. Выявлено, что кривые упрочнения для указанного сплава имеют вид монотонно возрастающих зависимостей.

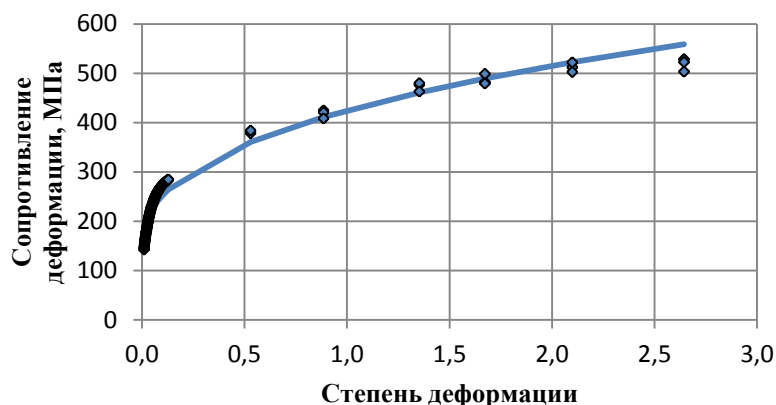


Рисунок 1 – Кривая упрочнения сплава ПлПдРд92,5-4-3,5 при больших деформациях: точки – опытные данные в трех сериях опытов, линия – по уравнению регрессии

По использованной выше методике получены кривые упрочнения для золота чистотой 99,99 % в диапазоне значений деформации  $0...2,083$ . Установлено, что кривая упрочнения имеет локальное снижение сопротивления деформации при степени деформации около значения 1,7 (рисунок 2).

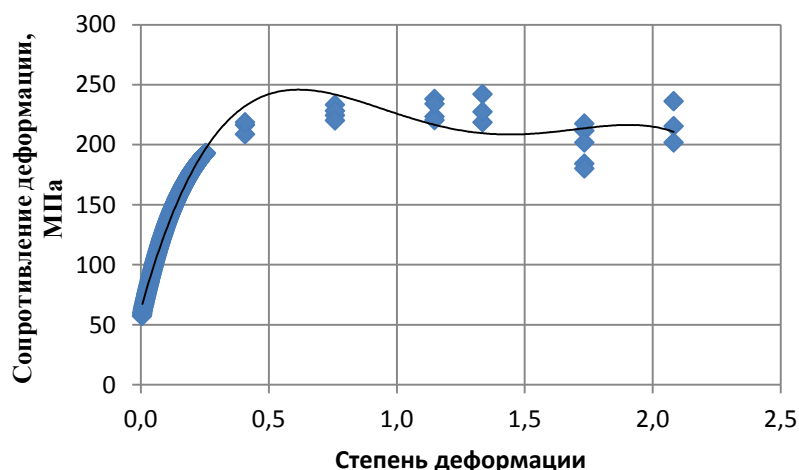


Рисунок 2 – Кривая упрочнения золота чистотой 99,99%

В **третьей главе** проведено исследование дефектов, сопровождающих процесс волочения проволоки из благородных металлов. В частности, изучены дефекты, возникающие при производстве тончайшей проволоки из платины и ее сплавов. Для изучения характера дефектов, в том числе, унаследованных от обработки, предшествующей волочению, были подготовлены образцы проволоки из платины марок Пл0, Пл2 и сплава ПлПдРд92,5-4-3,5. Для исследования применяли электронный растровый микроскоп Philips XL-30 с микрорентгеноспектральным анализатором. На рисунке 3 показан один из вариантов обнаруженного дефекта в виде поверхностного включения сферической формы. Приведенная рядом спектрограмма показывает, что это включение на основе железа. Важным аспектом является наличие пор, примыкающих к частице включения и вытянутые вдоль направления волочения.

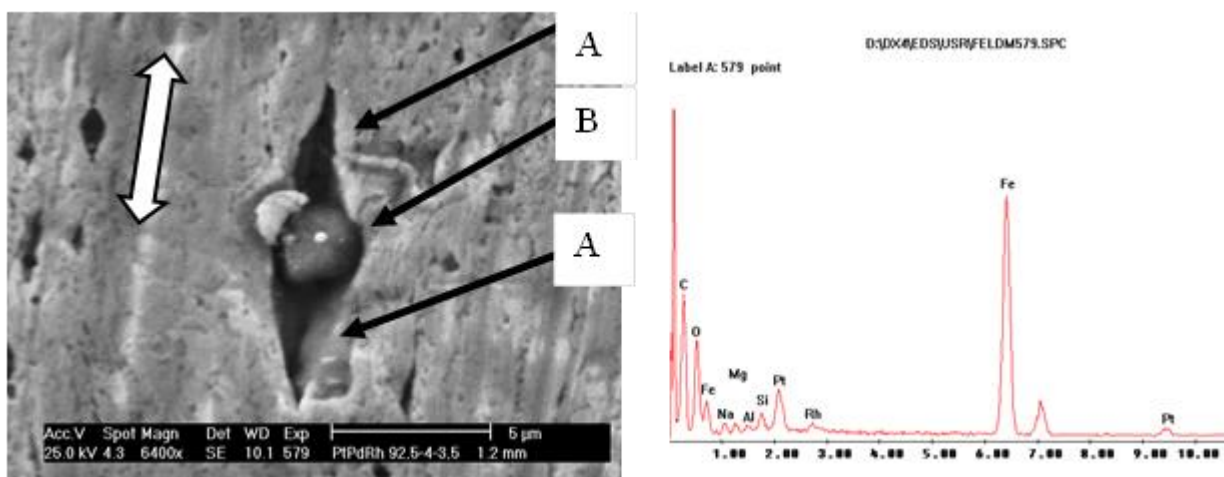


Рисунок 3 – Частица сплава на основе железа на поверхности проволоки диаметром 1,2 мм из платинового сплава ПлПдРд 92,5-4-3,5; белая стрелка показывает направление волочения (а); спектрограмма дефекта (б)

На фоне выявленной картины расположения поверхностных пор при включении создан алгоритм их возникновения, схема которого приведена на рисунке 4.



Рисунок 4 – Алгоритм образования раковины вокруг частицы включения

В дальнейшем исследовали тончайшую проволоку диаметром 50 мкм из платины марки Пл0. На ней было обнаружено наличие вдавленных частиц поверхностной поры треугольной формы, вытянутых в направлении волочения (рисунок 5). В отличие от описанного ранее дефекта в виде включения стали, вдавленные частицы имеют контур поверхности, совпадающий с контуром проволоки, т.е. эти частицы деформированы в процессе волочения. На рисунке 6 отражен алгоритм развития такого дефекта.

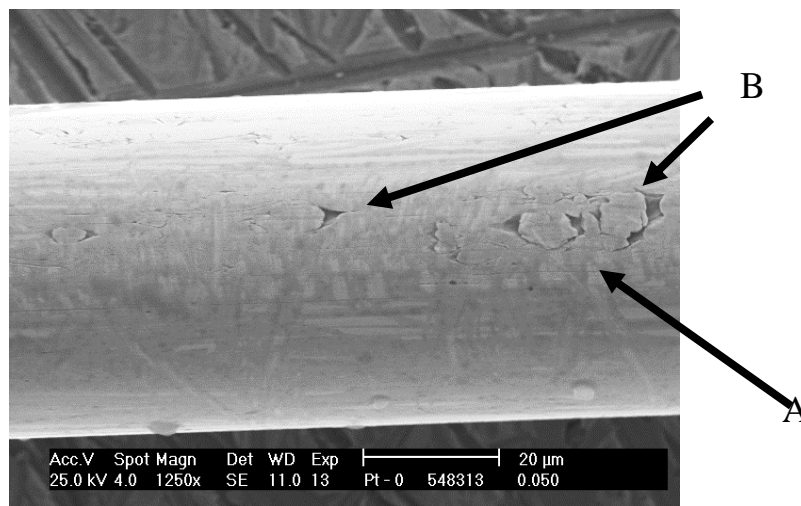


Рисунок 5 – Поверхность проволоки диаметром 50 мкм из платины Пл0: наличие вдавленных частиц самого деформируемого металла (А) и раковин (В)



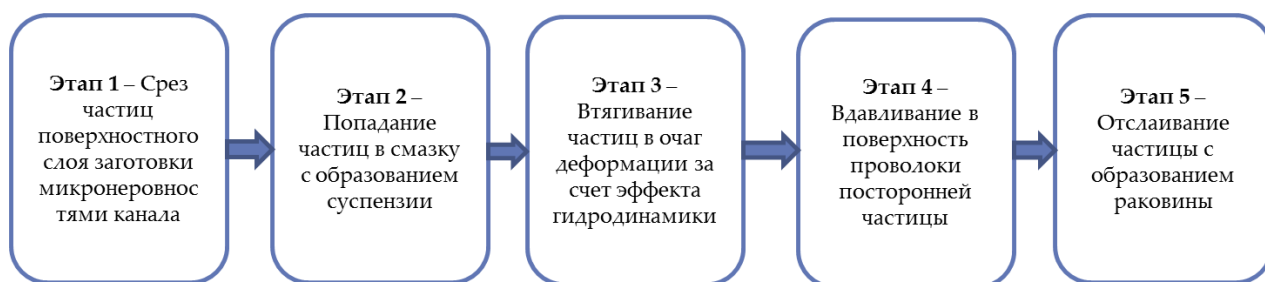


Рисунок 6 – Последовательность образования раковины при выпавшей частице на поверхности проволоки

Выявленный выше феномен появления дополнительных дефектов при наличии в металле первичных включений был обоснован решением краевой задачи. Исходным условием для постановки является наличие участка металла, подвергаемого действию осевых напряжений растяжения в направлении волочения и радиальных напряжений со стороны стенок волоки. Для упрощения постановки выбрана схема плоской деформации. На заданном участке имеется включение круглой формы, которое представляет собой абсолютно твердое тело, металл не может внедряться в него, но может отрываться от его поверхности. Модельным материалом выступила медь с соответствующей кривой упрочнения. Моделирование было выполнено в программном комплексе ABAQUS, на рисунке 7 показано решение с распределением эквивалентных напряжений по Мизесу.

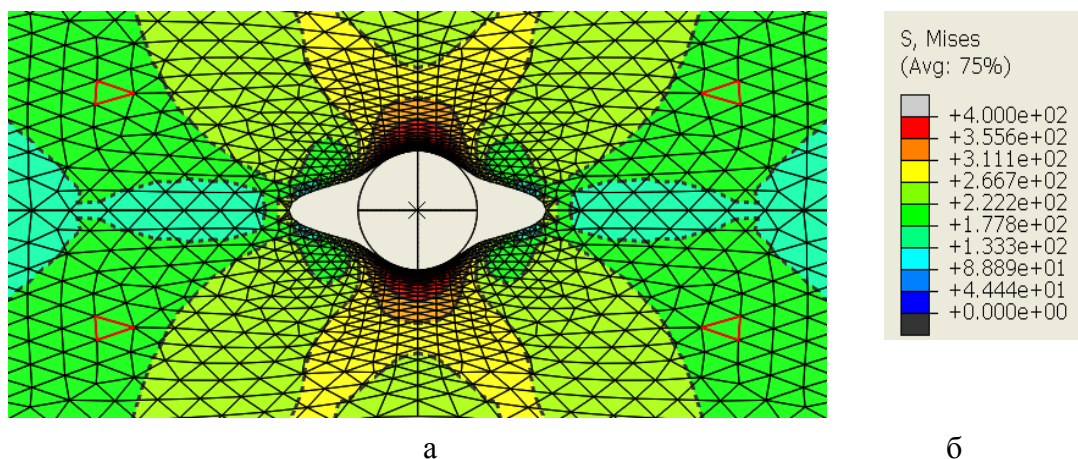
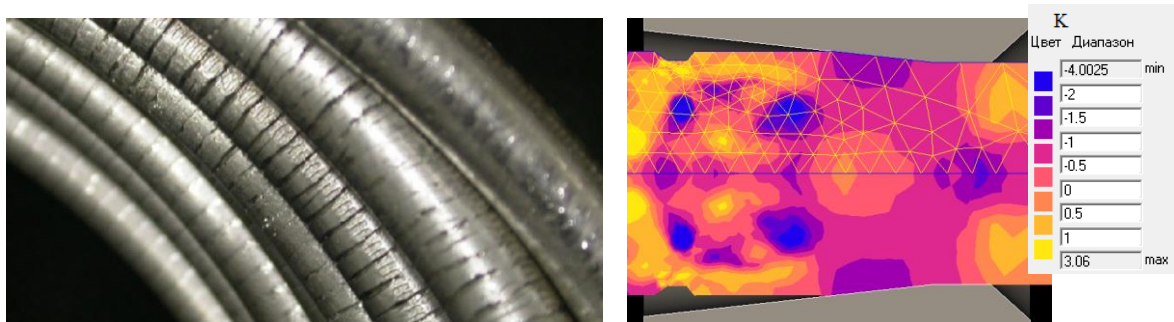


Рисунок 7 – Решение задачи (а) методом конечных элементов с полем распределения эквивалентных напряжений по Мизесу (МПа); б – цветовой ключ

Другим исследуемым видом дефектов являются кольцевые дефекты в виде локальных пережимов, возникающие из-за наличия шага вытягивания при получении проволоочной заготовки на установке непрерывной разливки (рисунок 8, а). Для оценки последствий наличия таких дефектов в программном комплексе РАПИД поставлена задача волочения проволоки с кольцевой выемкой. Для постановки задачи использована заготовка с  $d =$

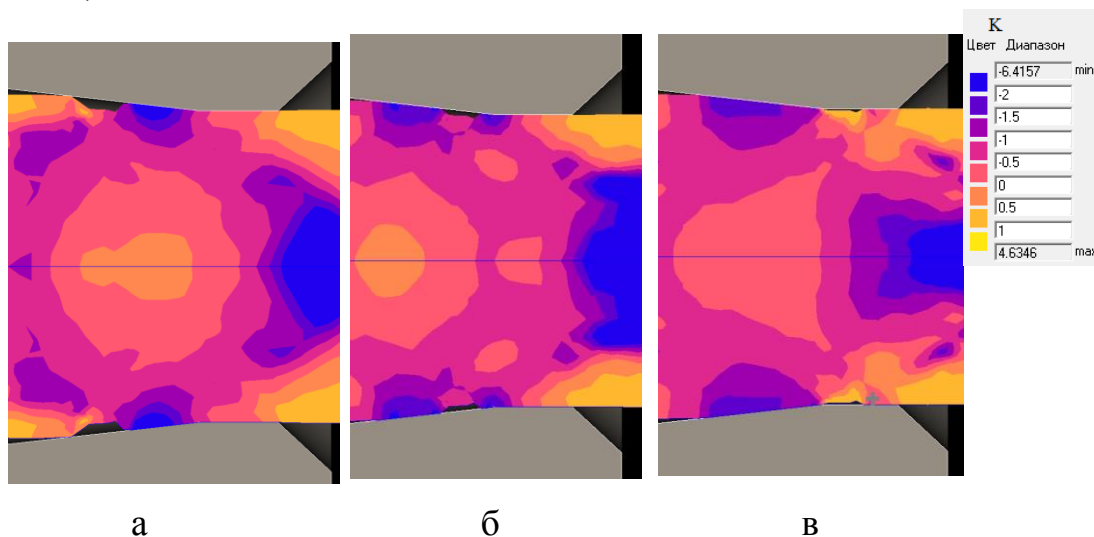
8 мм и с кольцевой выемкой глубиной  $h_d = 300$  мкм. Таким образом, безразмерный параметр  $h_d/d$  равен 0,0375. Протяженность дефекта  $l_d$  равна 600 мкм, а в безразмерном виде  $l_d/d = 0,075$ . При прохождении проволоки через волоку диаметром 7,3 мм и при отсутствии дефекта (рисунок 8, б) показатель напряженного состояния  $K$ , рассчитываемый по формуле  $K = \frac{\sigma}{T}$ , на конической контактной поверхности оказался на уровне -1,5, что говорит о наличии существенных напряжений сжатия.



б

Рисунок 8 – Заготовка с кольцевым пережимом (а) и поле показателя напряженного состояния (б)

Было рассмотрено поле показателя напряженного состояния в различные моменты времени при прохождении дефекта через канал волоки (рисунок 9).



а

б

в

Рисунок 9 – 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

На входе в очаг деформации наличие дефекта вызвало появление растягивающих напряжений. При продвижении через коническую зону волоки дефект такого типа уменьшился по высоте. В результате моделирования было установлено, что не происходило увеличение длины дефекта пропорционально коэффициенту вытяжки. Таким образом, на

выходе из конической зоны глубина дефекта составила 50 мкм при длине 800 мкм вместо 920 мкм, что следовало бы при учете коэффициента вытяжки 1,2. Изменение глубины дефекта  $h_d$  в зависимости от осевой координаты  $z$  можно описать уравнением вида

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

Линия, описываемая такой функцией, характеризуется наличием двух точек перегиба, что достаточно точно соответствует наличию разных градиентов изменения размера дефекта на входе и выходе из очага деформации.

В результате 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. Для устранения такого рода дефектов в практике обработки благородных металлов применяется операция скальпирования.

Также был исследован эффект перераспределения деформации в операциях многопроходного волочения. В базовых решениях задач из теории волочения принято представлять форму очага деформации в продольном сечении в виде сегмента, ограниченного дугами окружностей. 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 методом конечных элементов. Угол наклона образующей волокна был назначен  $10^\circ$ , в качестве маршрута волочения использовали маршрут одного из производств следующего вида (мм): 8,0 - 6,53 - 5,37 - 4,48 - 3,76. Модельным материалом была использована технически чистая медь, для которой напряжения пластического течения были заданы от степени и скорости деформации (нелинейно упрочняемая среда), т.е. при решении задачи учитывалось не только степенное, но и скоростное упрочнение. Предполагалось, что волочение ведется на многопроходном стане, для которого выполняется постоянство секундных объемов, поэтому линейные скорости нарастают пропорционально коэффициентам вытяжки.

Целью исследования было изучение формы очага деформации, наиболее корректно его границы можно описать полем скоростей деформации. Это поле для четырех проходов волочения представлено на рисунке 10, из которого видно, что радиальное строение очага деформации реализовалось, и то частично, только для первого прохода.

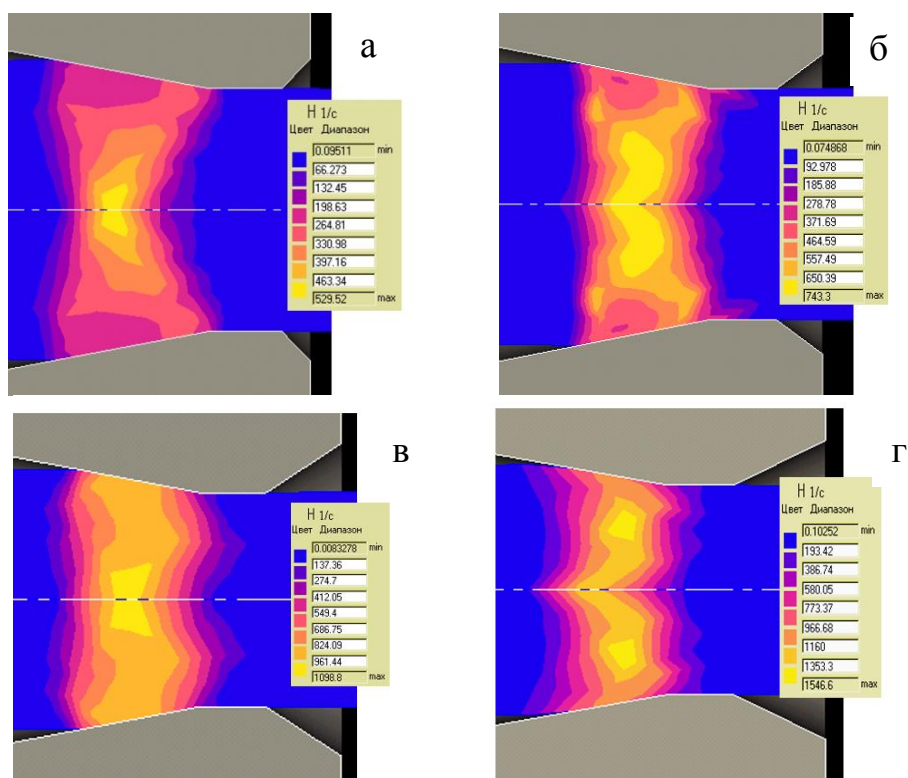


Рисунок 10 – Поле интенсивности скорости деформации сдвига  $H$  от первого к четвертому проходу (а...г)

В последующих проходах это условие нарушается. Отмечено, что к четвертому проходу волочения вместо одного максимума величины  $H$  появляется два максимума. Предполагается, что такой эффект можно объяснить различной интенсивностью изменения сопротивления деформации  $\sigma_s$  по мере нагартовки со степенью деформации  $\varepsilon$ . Разделение очага деформации на зоны с двумя максимумами опасно появлением макропор, которые могут провоцировать обрывы проволоки уже через несколько проходов или после перехода от режима грубого волочения к среднему, тонкому или тончайшему.

В **четвертой главе** рассмотрены эффекты совместного применения операций волочения и скальпирования в производстве проволоки из цветных и благородных металлов. Был выполнен экспериментальный анализ процесса скальпирования серебряной проволоки  $Sr99,99$  через специальный инструмент – скальпирующую волоку, основным параметром которой является угол наклона острой кромки  $\gamma$ , отсчитываемый от нормали к оси волочения.

Схема этого процесса показана на рисунке 11. Исследование производственных образцов показало, что скальпированием удастся резко улучшить качество поверхности производимой проволоки.

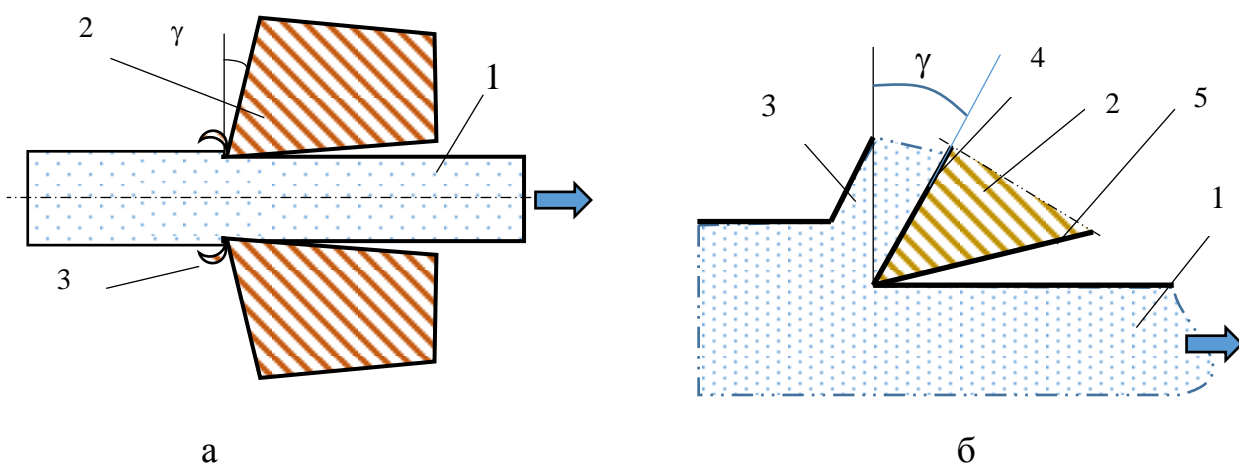


Рисунок 11 – Схема скальпирования прутковой заготовки (а) и увеличенное изображение места съема стружки (б): 1 – заготовка; 2 – скальпирующая волока; 3 – стружка, 4 и 5 – передняя и задняя кромки реза соответственно, стрелка показывает направление перемещения заготовки

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 12). Наличие зоны *B* приводит к мысли о том, что в заготовке, подвергнутой скальпированию, появляется поверхностный слой, нагартованный в результате осуществления пластической деформации.

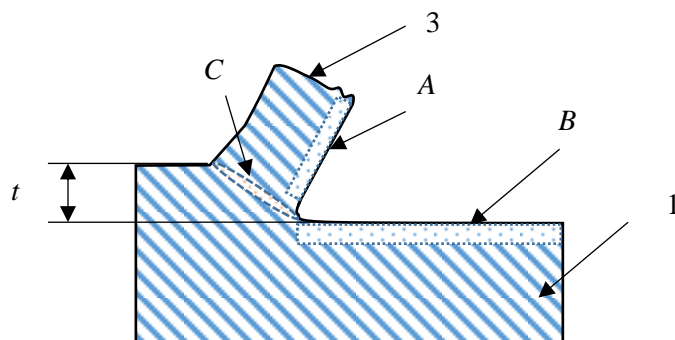


Рисунок 12 – Схема образования зон пластической деформации при съеме стружки: *A* – зона интенсивной деформации в стружке, *B* – зона умеренной деформации вблизи поверхности заготовки; *C* – зона интенсивного сдвига на границе стружки и заготовки, цифровые обозначения соответствуют рисунку 11.

Для оценки степени нагартованности поверхностного слоя выполнен опыт по скальпированию проволоки из серебра марки  $\text{Ср}99,99$  при ее обработке с уменьшением диаметра по маршруту (мм): 6,40 – 6,32 – 6,12 – 5,47. После обработки опытных данных по измерению твердости образцов



построен график приращения микротвердости в зависимости от глубины съема (рисунок 13), из которого видно, что приращение нелинейно зависит от глубины съема. После выполнения статистической обработки приращение микротвердости  $DHV$  в функции от глубины съема  $t$  можно описать формулой

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

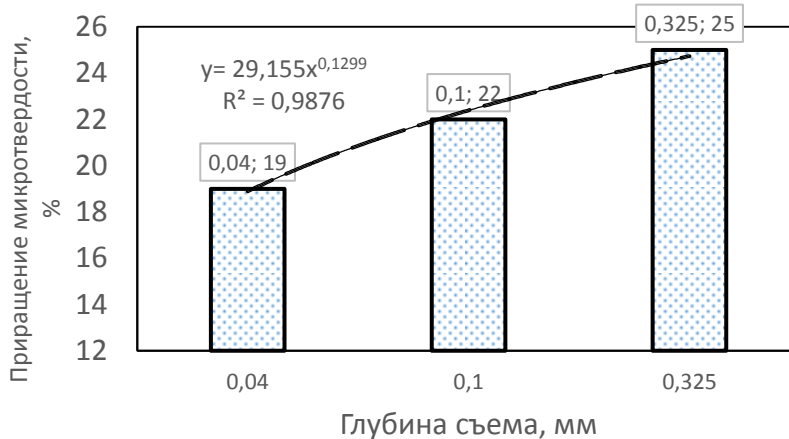


Рисунок 13 – Приращение микротвердости поверхности серебряной проволоки в зависимости от глубины съема: столбцы – опытные данные; линия – регрессионная зависимость

Практическая значимость выполненного исследования заключается в том, что явление поверхностного упрочнения после скальпирования необходимо учитывать при анализе напряженно-деформированного состояния при последующей обработке волочением. Действительно, уже в первом проходе волочения придется учесть неравномерное распределение прочностных свойств, в том числе сопротивления деформации, по радиальной координате. Известно, что 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 обстоятельство ограничивает применение изделий, если требуется их повышенная прочность и жесткость.

Для оценки напряженно-деформированного состояния металла в процессе скальпирования применен метод конечных элементов. Схема деформированного состояния была выбрана плоской, при такой постановке цилиндрическую систему координат  $r\varphi z$  заменили на обычную декартову систему  $xuz$ . Ось  $x$  направили вдоль направления перемещения, ось  $z$  вдоль бывшей радиальной координаты, а ось  $y$  в ортогональном направлении. 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. 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 (по закону Зибеля) 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 данные могут распространяться на толщину съема металла 0,3, 0,2 и 0,1 мм при соответствующей коррекции других размерных величин.

Главным вопросом, который часто не рассматривается в теории резания, является определение зоны пластической деформации, возникающей при прохождении режущей кромки по металлу. Предположено, вследствие чего может возникнуть такой тип деформации.

Для этого из всей совокупности показателей напряженно-деформированного состояния была проанализирована компонента тензора скоростей деформации  $\xi_{xx}$ . При использовании условия не сжимаемости 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 14 отображены области равного уровня компоненты  $\xi_{xx}$ . Видно, что компонента  $\xi_{xx}$  имеет зоны максимума и минимума. Зона А минимума расположена перед режущей кромкой волокна. Отрицательные значения компоненты  $\xi_{xx}$  говорят о том, что здесь действуют деформации сжатия, что отражено также на соответствующей грани элементарного кубика.

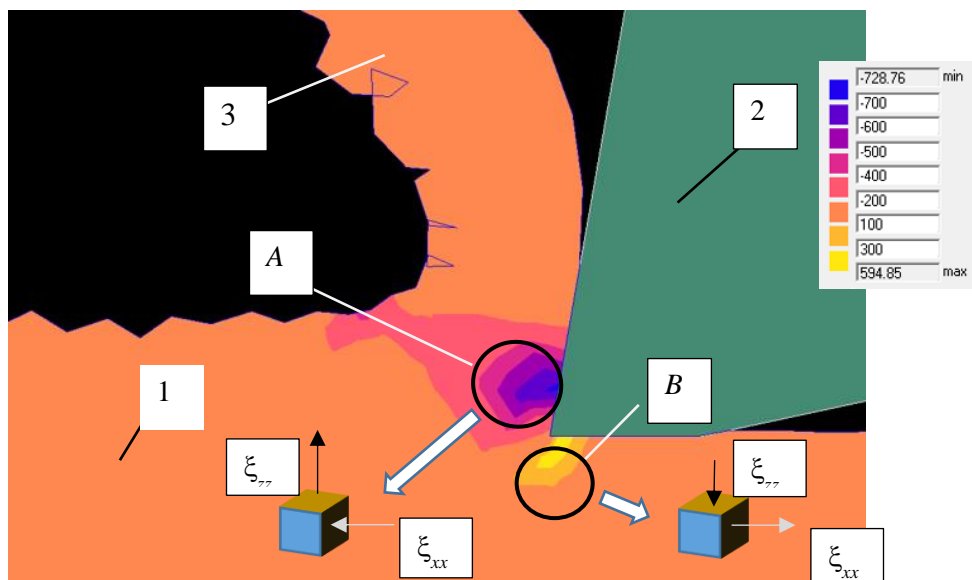


Рисунок 14 – Отделение стружки 3 от заготовки 1 скальпирующей волокой 2 с отображением поля компоненты тензора  $\xi_{xx}$  (1/с) при условной глубине реза 2 мм

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. Следует отметить, 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. Анализ решений показал, что глубина проникновения деформации  $h_p$  составляет 100 % и выше от глубины реза.

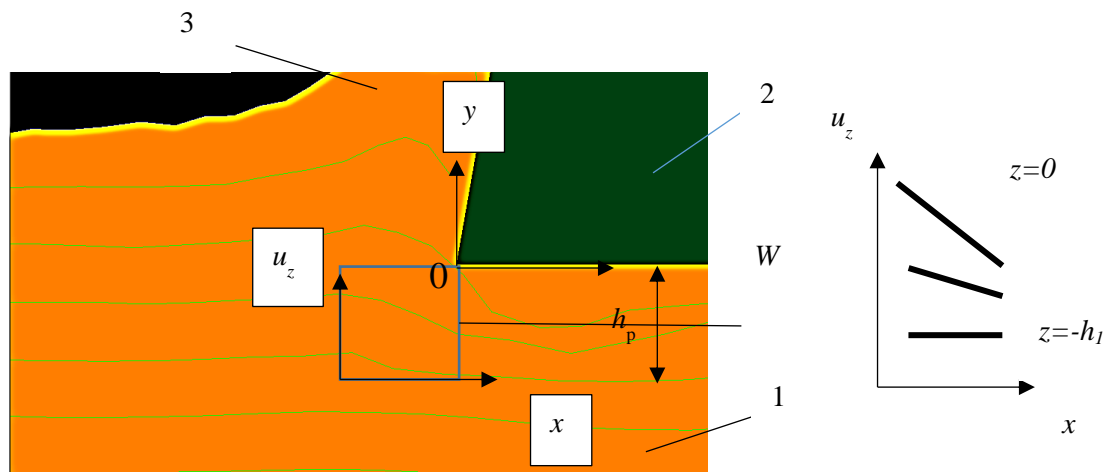


Рисунок 15 – Зона  $W$  искажения горизонтальных линий координатной сетки под режущей кромкой волокна с графиком зависимости перемещений частиц металла от продольной координаты  $x$  при условной глубине съема 1 мм, цифровые обозначения аналогичны рисунку 14

На рисунке 15 показаны горизонтальные линии координатной сетки, прогибающиеся 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  $\Lambda$ . Измерения показали, что величина  $\Lambda$  практически линейно зависит от абсолютной величины  $z$  и относительной величины  $z/h_c$ . Таким образом, можно записать аналитические выражения зависимости накопленной степени деформации сдвига  $\Lambda$  в поверхностном слое от указанных выше параметров. Например, при условной глубине реза 1 мм функции будут иметь вид.



$$\Lambda = -0,5144z + 1,1755;$$

$$\Lambda = -0,5144z/h_c + 1,5756.$$

Для условной глубины реза 3 мм функции примут вид

$$\Lambda = -0,7919z + 1,5756;$$

$$\Lambda = -2,3758z/h_c + 1,5756.$$

Границу проникновения пластической деформации в глубину металла можно оценить, как точку пересечения полученных линий регрессии с горизонтальной осью координат. Второй вариант оценки состоит в приравнивании нулю результата расчета  $\Lambda$  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  $h_c$ .

Таблица 1 – Геометрические соотношения в поверхностном слое металла

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

После оценки глубины проникновения деформации для действующего режима обработки на производстве (таблица 1) можно заключить, что после скальпирования следует ожидать появления пластически нагартованного слоя в проволоке, толщина которого составляет 2...4 % от диаметра заготовки. Согласно данным таблицы была проведена оценка влияния такого слоя на изменение энергосиловых параметров волочения.

Площадь  $F_k$  такого кольцевого слоя толщиной  $\delta$  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, может быть оценена по формуле

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

Было рассчитано, что в диапазоне диаметров 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.

Для анализа влияния скальпирования на напряженно-деформированное состояние предложен специальный подход, в котором высоконагартованный поверхностный слой не будет выделяться как особенный, а его аномальные свойства будут заданы через граничные условия. Такому подходу удовлетворяет применение закона трения Зибеля. Его можно записать с применением величины сопротивления деформации  $\sigma_s$ :

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

где  $\psi$  – показатель трения;  $\tau$  – касательные напряжения трения.

Здесь величина  $\sigma_s$  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. Поэтому придется представить показатель трения как функцию, зависящую от параметров скальпирования, в частности от степени деформации сдвига  $\Lambda$ , полученной поверхностным слоем, т.е.  $\psi = \psi(\Lambda)$ . Анализируя кривые упрочнения для конкретного материала можно установить соотношение между сопротивлением деформации поверхностного слоя металла, подвергнутого скальпированию и сопротивлением деформации основной части металла. Например, для сплава ПЛПдРдРу81-15-3,5-0,5 и меди марки М1 это соотношение может достигать значения 4 и выше.

Для моделирования напряженно-деформированного состояния брали исходную заготовку из меди марки М0 диаметром 8 мм, которая протягивается через волоку с диаметром отверстия 7,3 мм с коэффициентом вытяжки 1,2 и относительном обжатии 17 % при разных показателях трения по Зибелю.

Из результатов решения было установлено, что форма очага деформации мало зависит от значения показателя трения. При больших показателях трения несколько расширяется область повышенных значений величины скорости деформации  $N$  в центре очага деформации. Анализ полей распределения степени деформации сдвига  $\Lambda$  показал, что волочение при

более высоком значении показателя трения приводит к большей неоднородности деформации. Касательные напряжения  $\sigma_{rz}$  достигают наибольшей величины 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 выше в том месте, где материал оказывается более прочным, т.е. на выходе из очага деформации.

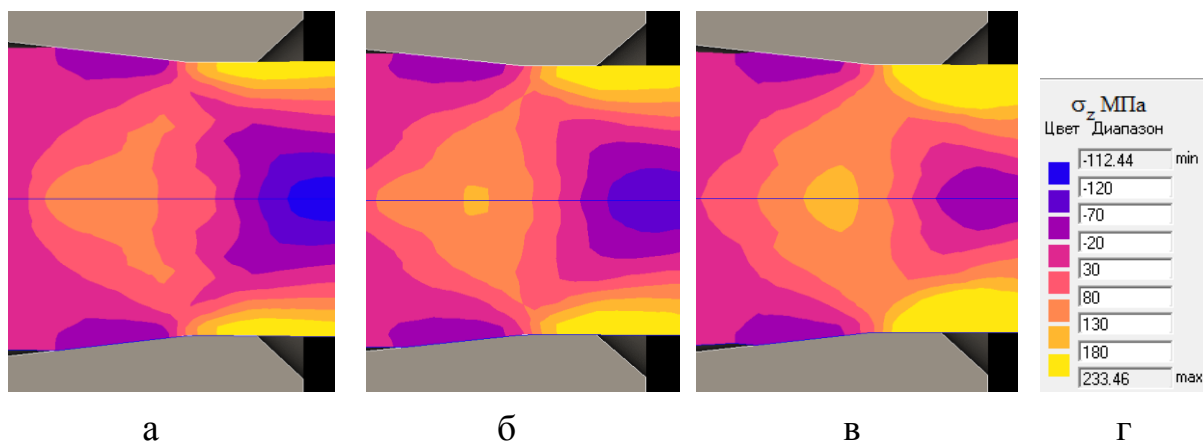


Рисунок 16 – Распределение нормального осевого напряжения  $\sigma_{zz}$  при различных значениях  $\psi$ : 0,1 (а), 0,2 (б), 0,4 (в) и цветовой ключ (г)

Распределение осевого напряжения  $\sigma_{zz}$  (рисунок 16) подчиняется общей закономерности, состоящей в наличии в центре пластической зоны области действия растягивающих напряжений. Сравнение трех рисунков с описанием полей 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 волоочильного инструмента. При этом уменьшаются сжимающие напряжения в осевой зоне заготовки, а также уменьшается участок их действия.

Если построить распределение осевого напряжения  $\sigma_{zz}$  вдоль относительной радиальной координаты при значениях  $\psi$  равных 0,1 и 0,2, то их можно аппроксимировать параболическими зависимостями с достаточно высокой величиной достоверности аппроксимации (на уровне 0,97...0,99) вида

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

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

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). Таким образом, 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.

Согласно проведенным исследованиям и установлению эффекта возникновения высоконагартованного поверхностного слоя после операции скальпирования, была скорректирована технология изготовления проволоки из золота марки Зл99,99 диаметром 0,04 мм, производимой АО «Екатеринбургский завод ОЦМ». Были введены дополнительные операции термообработки, которые снизили величину накопленной деформации и уменьшили величину разупрочнения проволоки при длительном хранении.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

По итогам выполненного исследования можно заключить, что поставленные цели и задачи выполнены в полном объеме.

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 осевых напряжений, что может провоцировать повышенную обрывность проволоки

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».

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:**

1. Первухин А.Е. Перераспределение деформации в операциях многопроходного волочения / Ю.Н. Логинов, А.Е. Первухин, Н.А. Бабайлов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. - 2016. - № 5. - С. 26-30 (0,52 / 0,17 п. л.).

2. Первухин А.Е. Сопротивление деформации проволочных образцов из платинового сплава / Ю.Н. Логинов, А.Е. Первухин // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. - № 12. - С. 57-60 (0,39 / 0,19 п. л.).

3. Первухин А.Е. Скальпирование как операция для устранения дефектов сортового проката из благородных металлов / Ю.Н. Логинов, А.Е. Первухин // Производство проката. – 2018 - № 4. – С. 32 – 40 (1,04 / 0,52 п. л.).

4. Pervukhin A.E. Calculation of the strain state under multipass wire drawing / Loginov Yu.N., Babailov N.A., Pervukhin A.E. // AIP Conference Proceedings. - 2016. – I.1 - V. 1785. - P. 040032-1 - 040032-4 (0,53 / 0,17 п. л.) (*индексирована в Scopus и Web of Science*).

5. Pervukhin A.E. Evolution of surface defects in platinum alloy wire under drawing / Loginov Yu.N., Babailov N.A., Pervukhin A.E. // AIP Conference Proceedings. - 2017. – I.1 - V. 1915. - P. 040032-1 - 040032-4 (0,17 / 0,53 п. л.) (*индексирована в Scopus и Web of Science*).

### **Публикации в других изданиях:**

6. 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 (0,06 / 0,06 п. л.).

7. Первухин А.Е. Пути повышения температуры рекристаллизации золота / А.Е. Первухин // Сборник трудов XV международной научно-технической уральской школы семинара металлургов – молодых ученых. – Екатеринбург : УрФУ, 2014. - С. 318-320 (0,13 / 0,13 п. л.).

8. Первухин А.Е. Внедрение в учебный процесс программы расчета энергоемкости процессов обработки металлов давлением. / Н.Н. Шишин, А.Е. Первухин, Н.А. Бабайлов // Молодежь и наука : материалы международной науч.-практ. конф. (20 мая 2016 г., г. Нижний Тагил) в 2 т. Т. 1 - Нижний Тагил: НТИ УрФУ, 2016. С. 8-12 (0,13 / 0,04 п. л.).

9. Первухин А.Е. Пластические деформации при скальпировании серебряной проволоки / А.Е. Первухин // Сборник материалов XVIII международной научно-технической уральской школы семинара металлургов – молодых ученых. – Екатеринбург : УрФУ. – 2017. - С. 581 – 584 (0,18 / 0,18 п. л.).

10. Первухин А.Е. Напряженное состояние заготовки по переходам волочения – моделирование с помощью системы «РАПИД-2D» / А.Е. Первухин // Сборник материалов и докладов XVI международной научно-технической уральской школы семинара металлургов – молодых ученых : ч.1 / Екатеринбург, УрФУ. – 2015. – С. 31-34 (0,18 / 0,18 п. л.).

11. Первухин А.Е. Структура дефектов в процессе производства проволоки из платины / А.Е. Первухин // Сборник материалов XVII международной научно-технической уральской школы семинара металлургов – молодых ученых : ч.1 / Екатеринбург, УрФУ - 2016. - С. 29-33 (0,24 / 0,24 п. л.).