

**Минобрнауки России**  
**Федеральное государственное бюджетное**  
**учреждение науки**  
**ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ**  
**Уральского отделения**  
**Российской академии наук**  
**(ИМАШ УрО РАН)**

Комсомольская ул., 34, г. Екатеринбург, 620049  
Тел.: (343) 374-47-25, факс: (343) 374-53-30  
E-mail: ges@imach.uran.ru; http://www.imach.uran.ru  
ОКПО 04538044, ОГРН 1036603482992  
ИНН/КПП 6660005260/667001001

на № 26.11.2018 от № 16348/01-2121-162

**УТВЕРЖДАЮ:**

Директор Федерального  
государственного бюджетного  
учреждения науки, Института  
машинovedения, Уральского отделения  
Российской академии наук, д.т.н.

С.В. Смирнов  
ноября 2018 г.



### **Отзыв ведущей организации**

на диссертацию Первухина Александра Евгеньевича  
«Проявления неоднородности пластической деформации в процессах  
волочения проволоки из благородных металлов»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.16.05 – Обработка металлов давлением.

### **Актуальность темы диссертации**

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, катализаторных сеток, применяемых в химической промышленности. Проволока из чистого золота применяется для изготовления токосъемной аппаратуры высокой степени надежности.

Высокая стоимость драгметаллов, постоянно возрастающие требования к качеству производимого полуфабриката и готовых изделий из них требует совершенствования методов и технологии изготовления. Такие же мероприятия необходимо разрабатывать для увеличения экономических показателей производства.

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**.

Актуальность работы также подтверждается ее выполнением в соответствии с тематикой ряда государственных программ и совместных исследовательских проектах с предприятием-изготовителем продукции из драгметаллов.

### **Основное содержание диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 151 наименования и одного приложения; содержит 133 страницы, включает 79 рисунков и 5 таблиц.

**Во введении** сформулирована актуальность темы диссертации, цель и задачи работы, дана характеристика ее научной новизны, теоретической и практической значимости, приведены методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, обозначены степень достоверности и апробация результатов, а также личный вклад автора.

**В первой главе** приведен обзор литературных данных по теме диссертации, 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 автором определены и сформулированы задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена изучению технологических свойств сплава платины ПлПдРд92,5-4-3,5 и золота марки Зл99,99. Автор описывает и использует комбинированную методику проведения холодных испытаний на основе растяжения проволочных образцов в условиях малых степеней деформации и измерения условного предела текучести после нагартовки в процессе многократного волочения. В результате получены значения сопротивления деформации сплава ПлПдРд92,5-4-3,5 при скорости деформации  $0,008...0,01 \text{ с}^{-1}$  в диапазоне степеней деформации  $0...2,644$ . Полученные зависимости автор представил в графическом и аналитическом виде. Установлено, что кривые упрочнения для указанного сплава имеют вид монотонно возрастающих зависимостей. Также получены кривые упрочнения для золота чистотой 99,99 % в диапазоне значений деформации  $0...2,083$ . Выявлено, что кривая упрочнения имеет локальное снижение сопротивления деформации при степени деформации около значения 1,7. Автор делает вывод, что 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.

**В третьей главе** проведено исследование дефектов, сопровождающих процесс волочения проволоки из благородных металлов. В этой части работы описывается методика отбора и подготовки образцов для исследования. Для проявления картины дефектности используется электронный растровый микроскоп с возможностью рентгеноспектрального анализа. Установлено, что наиболее опасными дефектами при тончайшем волочении проволоки являются дефекты в виде инородных включений и включений на основе



частиц этого же металла. Важным аспектом является наличие пор, примыкающих к частице включения и вытянутые вдоль направления волочения. Для подтверждения правомерности предлагаемых алгоритмов происхождения дефектов поставлена и решена задача по моделированию волочения с включением в виде абсолютно твердого тела. Другим видом рассмотренных дефектов оказались кольцевые дефекты в виде локальных пережимов, возникающие при получении проволочной заготовки на установке непрерывной разливки. Для оценки последствий наличия таких дефектов решена задача по моделированию волочения проволоки с кольцевой выемкой методом. Результат решения показал, что такой дефект не разглаживается полностью и остается на поверхности проволоки. Также был исследован эффект перераспределения деформации в операциях многопроходного волочения. Результат решения этой задачи показал, что при многократном волочении следует учитывать вид кривой упрочнения при назначении режимов обжатий, иначе возникает риск возникновения дефектов типа центральных разрывов. Этот факт объяснен тем, что форма очага претерпевает изменения по проходам волочения, приобретая выпукловогнутую конфигурацию, в отличие от используемой при аналитических расчетах радиальной формы. На основании изученных дефектов даются рекомендации по совершенствованию режимов обработки проволоки и способов получения заготовки.

В четвертой главе рассматриваются эффекты совместного применения операций волочения и скальпирования. Осуществлен экспериментальный анализ процесса скальпирования серебряной проволоки Sr99,99. Выполнена оценка степени нагартованности поверхностного слоя при существующем на производстве режиме скальпирования. Здесь автор приводит описание постановки задачи скальпирования и само решение задачи, по результатам которой предлагает механизм нагартовки приповерхностного слоя в результате проникновения пластической деформации. Решение показало, что степень деформации сдвига в

упрочненном слое достигает величины 1,8, что соответствует степени деформации 1,0. Далее приводится решение задачи по волочению, подвергшейся скальпированию. Решением определено, что наличие нагартованного слоя металла приводит к перераспределению деформаций и напряжений в протягиваемой проволоке. Также автором на основе формула Бочвара делается предположение, что наличие операции скальпирования может провоцировать преждевременную рекристаллизацию особо чистых металлов. 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».

В заключении обобщены основные результаты проведенного исследования.

В целом, рассмотренная диссертация является завершенной научно-исследовательской работой, выполненной на достаточно высоком уровне. Основные материалы в 11 печатных изданиях, в том числе три статьи опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Три статьи вошли в международные базы Scopus и Web of Science.

**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.

**Значимость для развития обработки металлов давлением** представлена следующими результатами, полученными соискателем.

- Получены новые данные о реологических свойствах платинового сплава ПлПдРд 92,5-4-3,5 и золота марки Зл 99,99. Установлен характер этих зависимостей. Выявлено, что для платинного сплава зависимости имеют

монотонно возрастающий характер, а кривая упрочнения золота имеет вид немонотонной зависимости, обладающей экстремальными свойствами.

- Проведено изучение виды дефектов, возникающих в процессе волочения проволоки из драгоценных металлов и их сплавов. Методом конечных элементов поставлена и решена краевая задача из которой следует, что при волочении проволоки с дефектом в виде кольцевых пережимов возникают зоны с неблагоприятным для стабильного волочения деформированным и напряженным состоянием. Решением краевой задачи при плоской деформации выявлено, что при нагружении участка с наличием посторонней частицы напряжениями, характерными для волочения, показало возможность развития вторичных дефектов в виде пор, примыкающих к частице. Предложены алгоритмы зарождения таких дефектов.

- Опытным и расчетным путем установлено, что скальпирование проволоки создает высоконагартованный поверхностный слой металла. Вследствие этого при последующем волочении происходит перераспределение деформаций и напряжений в протягиваемой проволоке.

- Применение операции скальпирования при последующем волочении приводит к повышению уровня растягивающих осевых напряжений, что может провоцировать повышенную обрывность проволоки.

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

**Практическая значимость работы** состоит в формулировке рекомендаций по рационализации процессов холодной обработки указанных материалов способами волочения и скальпирования на АО «Екатеринбургский завод по обработке цветных металлов, г. Верхняя Пышма», что подтверждено актом внедрения.

#### **Рекомендации по использованию результатов диссертации**

Вышеперечисленные разработки соискателя, имеющие практическую ценность, рекомендуется использовать на российских предприятиях, изготавливающих проволоку из драгоценных металлов: АО «Московский



завод по обработке специальных сплавов», ОАО «Красноярский завод цветных металлов имени В.Н. Гулидова», ОАО «НПК Суперметалл».

Полученные в диссертации результаты стоит использовать в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Металлургия», а также при повышении квалификации инженеров по специальности «Обработка металлов давлением».

### **Замечания и вопросы по диссертации**

1. Необходимо представить обоснование выбора для технологических расчетов пакетов анализа МКЭ РАПИД и Abacus.
2. При моделировании процессов волочения используются кривые упрочнения меди. Насколько корректно их использование для последующего анализа напряженно-деформированного состояния драгметаллов.

### **Заключение**

Научные положения и выводы, представленные в диссертационной работе соискателя, полученные посредством теоретического анализа и экспериментальных исследования, являются обоснованными, достоверными, а также согласуются с общепринятыми закономерностями и практики процессов холодного волочения проволоки. Результаты диссертации обладают научной новизной, теоретической и практической значимостью и имеют существенное значение для развития процессов волочения и скальпирования проволоки из драгоценных металлов.


Автореферат отражает содержание диссертации, ее основные результаты и выводы, которые обсуждены на научных конференциях и достаточно полно опубликованы в научной печати, в том числе в изданиях, определенных ВАК.

Диссертация А.Е. Первухина является самостоятельной научно-квалификационной работой, в которой решены актуальные практические задачи в области волочения и скальпирования проволоки из драгметаллов, и


отвечает требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автору может быть присуждена ученая степень кандидата технических наук по специальности 05.16.05 – Обработка металлов давлением.

Отзыв на диссертацию рассмотрен и обсужден на заседании семинара Отдела механики машин и технологий ФГБУН Института машиноведения Уральского отделения Российской академии наук. Протокол № 7 от «20» ноября 2018 г.

Руководитель научного семинара,  
руководитель Отдела механики  
машин и технологий,  
заведующий лабораторией  
механики деформаций,  
доктор технических наук,  
профессор  
Тел. 8 (343) 362-30-11  
e-mail: [avk@imach.uran.ru](mailto:avk@imach.uran.ru)

 Коновалов Анатолий  
Владимирович

Секретарь семинара,  
кандидат технических наук

 Муйземнек Ольга  
Юрьевна

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт  
машиноведения Уральского отделения Российской академии наук  
Почтовый адрес: 620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34.  
Тел. 8 (343) 374-47-25, Факс 8 (343) 374-53-30, e-mail [ges@imach.uran.ru](mailto:ges@imach.uran.ru)