

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Ворошилова Дениса Сергеевича «Развитие научных основ и разработка комплекса ресурсосберегающих технологий для производства проволоки из сплавов системы Al-PЗМ с применением совмещенных методов обработки», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.4. Обработка металлов давлением

### **Актуальность темы диссертационного исследования**

В настоящее время всё большее применение в различных отраслях мировой экономики, таких как электротехника, электроника, авиастроение и др., находят алюминиевые сплавы, легированные редкоземельными металлами (РЗМ). С одной стороны, применение в качестве легирующих элементов РЗМ позволяет добиваться уникального комплекса свойств изделий из алюминиевых сплавов, однако с другой ведет к их удорожанию. Производство изделий и полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, в особенности длинномерных с относительно малой площадью поперечного сечения, традиционными методами обработки давлением является многопередельным процессом. Как следствие, такие процессы характеризуются высокой энерго- и металлоемкостью. Последнее обстоятельство особенно негативно сказывается на экономику производства небольших партий продукции из сплавов, легированных дорогостоящими РЗМ.

В последние десятилетия получили развитие технологии совмещенных процессов обработки металлов давлением. Такие процессы ориентированы на производство небольших объемов продукции, позволяют существенно снижать энергозатраты на производство, а также технологические потери металла, имеющие место практически на каждом переделе.

Диссертационная работа Ворошилова Д.С. направлена исследование, развитие и адаптацию технологий совмещенных процессов обработки металлов давлением к условиям производства изделий из алюминиевых сплавов легированных РЗМ. Учитывая вышеизложенное, выбор темы диссертационного исследования следует признать весьма актуальным.

|  |            |
|--|------------|
| ЗАРЕГИСТРИРОВАНО В ОТДЕЛЕ ДЕЛОПРОИЗВОДСТВА<br>ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И.Носова» |            |
| за № _____   | _____      |
| Дата регистрации   | 04.05.2026 |
| Фамилия регистратора   | _____      |

## **Соответствие диссертации паспорту научной специальности**

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 2.6.4. «Обработка металлов давлением» по следующим пунктам:

- п. 1 «Исследование и расчет деформационных, скоростных, силовых, температурных и других параметров разнообразных процессов обработки металлов, сплавов и композитов давлением»;

- п. 2 «Исследование процессов пластической деформации металлов, сплавов и композитов с помощью методов физического и математического моделирования»;

- п. 3 «Исследование структуры, механических, физических, магнитных, электрических и других свойств металлов, сплавов и композитов в процессах пластической деформации»;

- п. 6 «Разработка способов, процессов и технологий для производства металлопродукции, обеспечивающих экологическую безопасность, экономию материальных и энергетических ресурсов, повышающих качество и расширяющих сортамент изделий».

## **Степень достоверности результатов**

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается сопоставимостью результатов теоретических изысканий с многочисленными экспериментальными исследованиями, выполненными с применением современных методик и оборудования. Кроме того, результаты исследований подтверждены эффективностью разработанных технологических решений по результатам их опытно-промышленного опробования и внедрения в условиях действующего металлургического производства.

Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на многочисленных конференциях российского и международного уровня.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, библиографического списка из 261 наименования и восьми приложений.

Во **введении** обоснована актуальность научной проблемы, степень разработанности темы исследования, сформулированы цель, задачи работы, описана методология и методы исследования, представлены основные научные положения, выносимые на защиту, показана научная новизна и практическая ценность и приведены данные об апробации, публикациях и структуре

диссертации.

Содержание работы изложено в семи главах.

В **первой главе** представлены результаты литературного обзора и анализа современного состояния научно-технической проблемы повышения и эффективности производства полуфабрикатов и изделий из алюминиевых сплавов. Особое внимание уделено процессам совмещенной обработки, как наиболее эффективным с точки зрения снижения энерго- и металлоемкости производства. Проанализированы возможные технологических схем и оборудования для получения деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-PЗМ.

Приведенный аналитический обзор позволил систематизировать и обобщить накопленный отечественными и зарубежными исследователями опыт реализации и совершенствования процессов совмещенной обработки алюминиевых сплавов. На этой основе сформулированы цель и задачи исследования.

Во **второй главе** изложены результаты теоретических исследований совмещенных процессов прокатки-прессования (СПП). Теоретические исследования выполнены для вариантов СПП с одним и двумя приводными валками.

Приведены результаты физического и компьютерного моделирования процесса СПП из заготовки прямоугольного сечения с одним приводным валком. Полученные результаты позволили выполнить оценку формоизменения металла, температурно-скоростных и энергосиловых параметров процесса. Изложена методика расчета коэффициента реализуемости процесса СПП с одним приводным валком для сплава 01417 при различных параметрах формоизменения при прокатке и прессовании.

Выполнена постановка вариационной задачи по определению характеристик формоизменения и энергосиловых параметров процесса СПП из заготовки круглого поперечного сечения с двумя приводными валками. Задача решена с применением вариационного принципа минимума полной мощности. По результатам решения предложена математическая модель, позволяющая вычислять геометрические характеристики и энергосиловые параметры процесса. Также изложена методика расчета коэффициента реализуемости процесса СПП рассматриваемого варианта.

**Третья глава** посвящена исследованиям технологии получения проволоки электротехнического назначения из сплавов системы Al-PЗМ методом СПП. Представлены результаты исследования сопротивления деформации сплава 01417, с содержанием 7-9% PЗМ. Описаны зависимости сопротивления деформации этого сплава от степени, скорости и температуры деформации, которые были применены при цифровом моделировании процесса получения проволоки методом СПП. Представлена постановка задачи, описание граничных условий и результаты такого моделирования. По результатам компьютерного моделирования проанализированы поля температур в зоне деформации, а также определены силовые характеристики процесса при изменении технологических параметров деформации. Описана методика проведения экспериментальных исследований для подтверждения сделанных выводов. Приведены результаты экспериментальных исследований при опытном производстве проволоки диаметром 0,5 мм из сплава 01417, которые подтвердили обоснованность сделанных ранее выводов. Выполнено исследование микроструктуры металла от литого состояния до конечного продукта. Выявлены зависимости изменения его механических характеристик (временного сопротивления, предела текучести, относительного удлинения), а также удельного электрического сопротивления прутков и проволоки.

**В четвертой главе** приводятся результаты экспериментальных исследований и моделирования процессов получения прутков и проволоки из сплава системы Al-PЗМ с содержанием редкоземельных элементов (церия и лантана) до 1 % с применением методов совмещенной обработки. Особенностью предложенной и исследуемой технологии является то, что для получения литой заготовки круглого поперечного сечения использовался электромагнитный кристаллизатор. Представлены результаты исследования реологических свойств металла заготовок, полученных таким методом.

Описана постановка задачи цифрового моделирования комбинированного процесса прокатки-прессования из круглой заготовки в закрытом ящичном калибре. Приведен анализ полученных результатов моделирования, включающий оценку деформации металла, параметров деформации, энерго-силовых и температурно-скоростных характеристик процесса, а также напряжений, возникающих в зоне деформации. На основе полученных данных представлены разработанные рекомендации по практической реализации

процесса в промышленных масштабах.

Представлена методика и результаты экспериментальных исследований производства проволоки диаметром 2 мм из рассматриваемых сплавов, включающих производство непрерывно-литой заготовки диаметром 12 мм с разливкой в электромагнитный кристаллизатор, производство горячепрессованных прутков диаметром 5 и 9 мм на установке СПП и дальнейшее холодное волочение до конечного размера. Для всех этапов эксперимента приведены результаты исследования структуры металла, и выявленные закономерности изменения временного сопротивления, относительного удлинения и удельного электрического сопротивления исследуемых образцов в условиях горячей и холодной деформации в зависимости от параметров обработки.

**Пятая глава** представляет результаты экспериментального изучения процесса бесслитковой прокатки и прессования (БПП) прутков и проволоки из сплавов 01417 и системы Al-1%РЗМ. Приведены методика и результаты экспериментальных исследований по реализации процесса БПП с асимметричным очагом деформации для сплавов 01417 и Al-1%РЗМ при варьировании температуры обработки, скорости и степени деформации. Представлен анализ полученных экспериментальных данных по оценке энергосиловых параметров процессов БПП, анализ зависимостей энергосиловых параметров процессов СПП и БПП от технологических факторов, который показал, что в процессе СПП сила, действующая на матрицу и валки, чем в процессе БПП при прочих равных условиях. Описана структура деформированных полуфабрикатов из сплавов 01417 и Al-1%РЗМ и влияние на нее таких факторов, как степень и скорость деформации, температура обработки. Представлены графические зависимости механических свойств прутков, полученных методом БПП, от технологических факторов, показывающие, что в целом пресс-изделия, полученные методом БПП более пластичны, при этом временное сопротивление ниже на 50-80 МПа, а относительное удлинение выше на 5-6 % по сравнению с изделиями, полученными методом СПП для сплава Al-1%РЗМ. Описана предложенная и опробованная технологическая схема для производства пресс-изделий небольшого поперечного сечения из сплава 01417, включающая в качестве основных переделов получение литой заготовки с помощью ЭМК и ее обработку с использованием метода СПП или применения метода БПП. Представлена разработанная и опробованная тех-

нологическая схема получения электротехнической проволоки путем использования трех переделов: метод БПП, сортовая прокатка, волочение.

В **шестой** главе приведены результаты экспериментальных исследований и моделирования процессов совмещенной обработки для получения прутков и проволоки из сплавов системы Al-Mg с различным содержанием скандия. Описаны реологические свойства для нового сплава 1580 в широком диапазоне изменения температурно-скоростных и деформационных параметров. Приведены результаты экспериментальных исследований и моделирования процесса совмещенной обработки прутков из сплавов 01570 и 1580, а также параметры новой, реализованной технологии получения сварочной проволоки диаметром 3 мм из этих сплавов. Предложенная инновационная технологическая схема, обеспечивающая производство сварочной проволоки, включает в себя три основных этапа: подготовку прутка (БПП), сортовую прокатку и волочение, а также процессы термообработки, в частности, отжиги. Такой подход позволяет изготавливать длинномерные деформированные полуфабрикаты высокого качества, соответствующие установленным стандартам. Представлены результаты исследования структуры и свойств деформированных, отожженных и сварных полуфабрикатов. Продемонстрировано успешное применение полученной сварочной проволоки.

В **седьмой** главе изложены новые технические решения для конструкций устройств, предназначенных для комбинированной обработки алюминиевых сплавов, а также результаты практической апробации разработанных технологий получения проволоки из исследуемых сплавов. Приведены разработанные и защищенные 6-ю патентами РФ новые технические решения на конструкции устройств для совмещенной прокатки-прессования, бесслитковой прокатки и прессования, на основе которых спроектированы, изготовлены и опробованы инструмент, валковые и прессовые узлы установок СПП-200 и СПП-400. Представлены результаты промышленной апробации разработанных технологических режимов для производства для проволоки из сплава 01417 диаметром 0,5 мм и прутков из сплава 01417 диаметром 9 мм, подтвержденные актами.

Автореферат соответствует содержанию диссертации. Результаты исследований в достаточной степени опубликованы в научной печати и апробированы на конференциях различного уровня.

### **Новизна и практическая значимость результатов исследований**

Основными разработками автора, имеющими существенную научную новизну и практическую значимость, вносящими существенный вклад в развитие теории и технологии совмещенных процессов обработки металлов давлением, являются следующие.

В части **научной новизны** наиболее ценным представляются следующие разработки автора:

- модели реологических свойств сплавов системы Al-PZM;
- методики определения реализуемости совмещенного процесса прокатки прессования;
- математическая модель процесса совмещенной прокатки-прессования в закрытых ящичных калибрах заготовки круглого поперечного сечения, с помощью которой впервые получены новые научные знания о комплексе геометрических, технологических и энергосиловых параметров этого процесса;
- закономерности формоизменения металла, распределения температуры, скоростей течения и энергосиловых параметров по длине очага деформации процесса СПП при использовании заготовки круглого поперечного сечения для процесса получения прутков из сплавов системы Al-PZM;
- закономерности изменения механических свойств изделий из сплавов алюминия системы Al-PZM, полученных методами СПП и БПП с последующим волочением и термообработкой;
- закономерности изменения механических свойств изделий из сплавов алюминия системы Al-Mg с различным содержанием скандия, полученных методом БПП с последующим волочением и термообработкой.

Существенной **практической значимостью** обладают следующие результаты диссертационного исследования:

- алгоритм проектирования совмещенных процессов прокатки-прессования с последующим волочением и термической обработкой прутков и проволоки из алюминиевых сплавов;
- разработанные компьютерные модели процессов СПП, пригодные для

анализа формоизменения, энергосиловых и температурно-скоростных параметров процессов совмещенной обработки сплавов системы Al-PЗМ;

- новая энергосберегающая технология производства проволоки из заготовок круглого сечения после ЭМК из сплава 01417 с применением установок СПП;

- комплекс ресурсосберегающих технологий для производства проволоки из сплавов системы Al-PЗМ с применением совмещенных методов обработки, что позволяющих снизить энергоемкость на 30-50 % и увеличить выход годного металла на 18-20 % по сравнению с традиционной технологией прямого горячего прессования;

- рациональные деформационные режимы бесслитковой прокатки-прессования при изготовлении сварочной проволоки из сплавов системы Al-Mg с различным содержанием скандия;

- технические и технологические решения, защищенные патентами РФ, по совершенствованию конструкции и инструмента деформации установок для совмещенной обработки алюминиевых.

Вместе с тем по работе имеются **замечания и вопросы**.

1. Раздел 2.2 представлен не убедительно и несколько небрежно. Выражения 2.12 и 2.13 не соответствуют тексту, предшествующему им. Следующие за ними предложения вырваны из контекста. В таблице 2.1 также имеются неточности, например, «Размеры калибра в наименьшем сечении  $h \times b$ , мм» для СПП-200 составляют «3». В заголовке заявлены «Теоретические исследования геометрических параметров очага деформации», однако, как таковые, геометрические параметры очага деформации не описаны.

2. При постановке задачи математического моделирования процесса совмещенной прокатки-прессования, выражения 2.17 и 2.18 описывают изменения высоты  $h_x$  деформируемого металла. Однако, в указанных выражениях отсутствует зависимость высоты  $h_x$  от координаты  $x$ . И в целом, при заданных радиусах валков и размерах исходной заготовки по выражениям 2.17 и 2.18 высоты  $h_x$  – есть величина постоянная.

3. Как при постановке вариационной задачи учитывалось, что исходная заготовка круглого поперечного сечения?

4. При постановке вариационной задачи принято допущение об отсутствии уширения. Скорость скольжения и напряжения трения в зонах 1 и 2 (см. рис. 2.18) лежат в касательной плоскости к поверхности валка (кинематическое граничное условие на поверхности скольжения). В предположении, что  $V_y = 0$  (отсутствие уширения), они тождественно лежат на линии касательной к окружности валка. О каких проекциях идет речь в выражении 2.44?

5. Осталось не совсем ясным, как определялись реологические свойства сплава 01417 на установке СПП-200 методом кручения (стр. 87)?

6. При исследовании реологических свойств сплава 1580 заявлено, что: «Получены формулы, описывающие напряжения текучести в установившемся режиме. Эти формулы выражаются через параметр Зинера-Холломона и позволяют точно предсказывать сопротивление сплава пластической деформации.» (стр. 184). Однако указанные формулы в диссертации не приведены.

7. В разделе 7.1 описаны установки (см. рис. 7.2 и 7.3) и способ непрерывного процесса прокатки прессования. В чем заключается непрерывность предложенного способа?

8. Автореферате не приведены результаты металлографических исследований, которых в тексте диссертации достаточно много. Почему?

Указанные замечания не снижают научной ценности и практической значимости работы и полученных в диссертации результатов исследований, при этом некоторые из замечаний носят дискуссионный характер.

### **Заключение**

Анализ материалов, представленных в диссертации и автореферате, позволяет сделать следующее заключение.

Диссертация Ворошилова Д.С. актуальна, содержит научную новизну, обладает практической значимостью и является законченной научно-квалификационной работой. Материалы диссертации достоверны, достаточно апробированы и опубликованы в научной печати. Содержание работы соответствует паспорту специальности 2.6.4. Обработка металлов давлением. Основные результаты диссертации Ворошилова Д.С. направлены на решение крупной научной проблемы, связанной с разработкой

теоретических и технологических основ эффективного производства соевещными методами обработки давлением изделий и полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, легированных редкоземельными металлами.

В целом диссертация соответствует требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждения ученых степеней» №842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор, Ворошилов Денис Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.6.4. Обработка металлов давлением.

Выражаю согласие на включение своих персональных данных в аттестационные документы соискателя ученой степени доктора технических наук Ворошилова Дениса Сергеевича и их дальнейшую обработку.

Шварц Данил Леонидович,  
заведующий кафедрой обработки металлов  
давлением Федерального государственного  
автономного образовательного учреждения  
высшего образования «Уральский федеральный  
университет имени первого Президента  
России Б.Н. Ельцина»,  
доктор технических наук, доцент



Подпись Шварца Д.Л. удостоверяю:

СПЕЦИАЛИСТ  
УЧЕНОГО СОВЕТА УРФУ  
КУДРЯШОВА Н.Н.

Специальность, по которой была защищена диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук - 05.16.05 — Обработка металлов давлением

Телефон: +7 (343) 375-44-37, E-mail: [d.l.shvartc@urfu.ru](mailto:d.l.shvartc@urfu.ru)

620002, Уральский федеральный округ, Свердловская область, Екатеринбург, ул. Мира, 19

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

Телефон +7 (343) 375-44-44, E-mail: [rector@urfu.ru](mailto:rector@urfu.ru)