

На правах рукописи

Беспалов В.

Беспалов Вадим Михайлович

Исследование совмещенных процессов обработки сплавов системы Al-Zr для получения длинномерных деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения

05.16.05 – Обработка металлов давлением

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2015

Работа выполнена в ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор, Сидельников Сергей Борисович

Официальные оппоненты:

Шеркунов Виктор Георгиевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет), кафедра «Машины и технологии обработки материалов давлением», заведующий кафедрой.

Уманский Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный университет», кафедра металлургии черных металлов, доцент.

Ведущая организация:

ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск

Защита состоится 5 марта 2015 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.10, при ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660025, г. Красноярск, пр. «Красноярский рабочий», 95, ауд. 212.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» и на сайте <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан 20 января 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Гильманшина
Татьяна Ренатовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В последнее время существенно выросли объемы производства длинномерных полуфабрикатов из алюминия и его сплавов в виде катанки, прутков, профилей и проволоки, при этом основными потребителями такой продукции являются электротехническая и кабельная отрасли промышленности.

Применение алюминия в этих отраслях объясняется тем, что помимо высокой электропроводности он позволяет значительно облегчить конструкцию силовых проводов, что, по сравнению с медными проводами, позволяет добиться увеличения пропускной способности линий электропередач в 1,5-2 раза при использовании старых опор. Другой причиной увеличения доли потребления алюминиевых полуфабрикатов являются большие темпы роста цен на медь, которые на сегодняшний день в 4 раза выше цены на алюминий.

В России базовой технологией производства одного из таких полуфабрикатов (катанки) для изготовления проводов из алюминия марки А5Е и А7Е является совмещенный процесс литья и прокатки, реализуемый на литейно-прокатных агрегатах, введенных в эксплуатацию в 70-х годах прошлого столетия. При этом выпускаемые провода имеют низкие прочностные свойства и термостойкость. Недостаточная прочность алюминиевой проволоки, изготовленной из такой катанки, даже при нормальной температуре эксплуатации под воздействием длительной нагрузки может привести к ее разрушению, при этом чем больше температура, тем ниже ее стойкость. Вместе с тем за рубежом для изготовления термостойких проводов успешно применяют проволоку из сплавов системы Al-Zr, которая имеет высокие прочностные свойства при длительно действующих температурах нагрева до 230°C.

Эти обстоятельства делают актуальными исследования в области создания электротехнических сплавов системы Al-Zr и разработку новых технологий и оборудования для их обработки с целью получения длинномерных деформированных полуфабрикатов, имеющих повышенный уровень механических свойств и термостойкости при удовлетворительных характеристиках удельного электросопротивления. В основу таких энергосберегающих технологий может быть положено развитие и применение совмещенных процессов прокатки-прессования (СПП) и литья и прокатки-прессования (СЛиПП).

Данная работа выполнялась в рамках Постановления Правительства РФ №218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства» в соответствии с договором Министерства образования и науки России №13.G25.31.0083 по созданию высокотехнологичного производства по теме «Разработка технологии получения алюминиевых сплавов с редкоземельными, переходными

металлами и высокоэффективного оборудования для производства электротехнической катанки», а также по договорам с ООО «РУСАЛ ИТЦ».

Цель и задачи исследований. Целью диссертации является разработка комплекса технических и технологических решений, направленных на повышение эффективности производства длинномерных деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения из сплавов системы Al-Zr на основе применения процессов совмещенной обработки металла.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

- теоретико-экспериментальные исследования и моделирование в среде ПК DEFORM[®] температурно-скоростных условий различных процессов совмещенной обработки металла для определения энергосиловых параметров и обоснования технологических режимов получения длинномерных деформированных полуфабрикатов;

- разработка новых устройств для реализации различных способов совмещенной обработки металла;

- проведение экспериментальных исследований по изучению влияния химического состава сплавов системы Al-Zr, режимов их приготовления и обработки на структуру и физико-механические свойства металла;

- изучение механических свойств, удельного электросопротивления и термостойкости полуфабрикатов из исследуемых сплавов при горячей и холодной деформации металла.

Научная новизна полученных результатов:

1. На основании результатов экспериментально-аналитических исследований и компьютерного моделирования установлены и обоснованы технологические параметры получения длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-Zr с использованием способов совмещенной прокатки-прессования (СПП), совмещенного литья и прокатки-прессования (СЛиПП) и интенсивной пластической деформации (ИПД).

2. Установлены закономерности изменения механических и электрофизических свойств полуфабрикатов из сплавов системы Al-Zr, полученных совмещенными методами, при изменении их химического состава, режимов приготовления и температурно-деформационной обработки металла.

3. Изучено влияние совместного воздействия параметров совмещенной обработки и интенсивной пластической деформации на структуру и свойства деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-Zr и установлено, что применение такого способа позволяет добиться дополнительного упрочнения металла за счет формирования в нем ультрамелкозернистой структуры с размерами зерен порядка 618-676 нм.

Практическая значимость работы:

1. Разработан комплекс технических решений для реализации процессов совмещенной обработки алюминиевых сплавов, защищенных патентами РФ №2429943, 2486027, 1122315, 119267, 128529, 138590, 139085, позволивших

повысить эффективность производства деформированных полуфабрикатов для электротехнических изделий.

2. На основе результатов решения теоретической задачи с помощью метода баланса мощностей создано программное обеспечение, позволяющее выполнить количественную оценку осуществимости совмещенной прокатки-прессования при заданных параметрах процесса.

3. Разработаны технологические режимы для получения катанки из сплавов системы Al-Zr с требуемым уровнем механических и электрофизических свойств на лабораторной установке СЛиПП-2,5 и опытно-промышленной установке СЛиПП Иркутского алюминиевого завода.

4. Результаты исследований внедрены в учебный процесс СФУ и используются для подготовки инженеров по специальности 150106 «Обработка металлов давлением», бакалавров и магистров по направлению «Металлургия» и аспирантов по специальности 05.16.05 – Обработка металлов давлением.

Методы исследования. Работа выполнена с использованием основных законов обработки металлов давлением и научно-обоснованного метода баланса мощностей, с применением универсальных методов исследований структуры и свойств металла, таких как методы испытания на растяжение и кручение, металлографические методы, а также с применением статистического анализа данных и программного комплекса DEFORM[®] 3D.

Степень достоверности полученных результатов. Обоснована применением научных методов и современных методик исследований на аттестованном и поверенном оборудовании, расчетных и общепринятых статистических методов обработки экспериментальных данных и подтверждена практическими данными опытно-промышленного опробования разработанных рекомендаций.

Апробация работы.

Основные положения диссертационной работы изложены и обсуждены на Всероссийских научно-технических конференциях Сибирского федерального университета (г. Красноярск, 2011-2014 гг.); на Международных конгрессах «Цветные металлы» (г. Красноярск, 2011-2014 гг.); на Международных научно-технических Уральских школах-семинарах металлургов-молодых ученых (г. Екатеринбург, 2011-2013 гг.); на VIII Международной научно-практической конференции «Дни науки» (г. Прага, 2012); на XIV Международной научно-практической конференции «New technologies and achievements in metallurgy, materials engineering and production engineering (г. Ченстохова, 2013) и др.

Публикации. Результаты диссертационной работы отражены в 30 печатных трудах, из них 4 статьи в журналах, рекомендуемых ВАК, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ и 7 патентов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Содержит 180 страниц машинописного текста, 74 рисунка, 28 таблиц, библиографический список из 161 наименования и 5 приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана и обоснована актуальность решения существующей научно-технической проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, кратко отражены основные полученные результаты.

В первой главе дана оценка современного состояния производства деформированных полуфабрикатов из алюминия и его сплавов, приведен обзор свойств сплавов системы Al-Zr, технологий и оборудования для получения из них продукции электротехнического назначения. Анализ научно-технической и патентной литературы позволил сделать следующие выводы:

- одним из самых востребованных промышленностью видов продукции является катанка из алюминия и ее сплавов, при этом технологии и оборудование в России, на котором она производится, внедрены в эксплуатацию в середине прошлого века и физически и морально устарели;

- в качестве перспективных материалов для производства деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения большой потенциал имеют сплавы системы Al-Zr, которые обладают высоким уровнем механических свойств при повышенных температурах ее эксплуатации при сохранении удовлетворительной электропроводности;

- в качестве базовых для разработки новых технологий для получения катанки и проволоки наиболее перспективными являются устройства и способы совмещенных методов обработки, включающие операции непрерывного литья и обработки давлением в различных сочетаниях, что дает возможность использовать их преимущества наиболее эффективным способом;

- недостаточно изучены вопросы, связанные с формированием и изменением свойств алюминиевых полуфабрикатов, получаемых по технологиям с применением совмещенных процессов и способов интенсивной пластической деформации, в связи с чем требуется исследование их структуры и свойств;

- актуальным является анализ новых процессов с применением средств компьютерного моделирования и аналитических методов теории ОМД и экспериментальная проверка с целью определения адекватности их результатов.

На основании вышеизложенного сформулированы цель и задачи исследований, приведенные во введении.

Во второй главе описаны методики и оборудование для проведения экспериментальных исследований.

Алюминиевые сплавы электротехнического назначения с добавками циркония в пределах 0,1-0,5% выплавляли при заданной температуре $T_{пл}$ и времени выдержки t_v в высокочастотной плавильной установке ЛПЗ-67 с использованием лигатуры в виде брикетов (80% Zr, остальное – флюс) фирмы Hoesch metallurgies GmbH (Германия). Химический состав исследуемых сплавов и режимы их приготовления представлены в табл.1. Для получения

заготовок размерами 14x14x250 мм, которые служили для проведения экспериментов способом СПП, полученный расплав с температурой $T_{\text{зал}} = 720-900^{\circ}\text{C}$ заливали в подогретые изложницы. Для реализации способа СЛиПП расплав при температуре $T_{\text{зал}} = 750-780^{\circ}\text{C}$ заливали непосредственно в валки.

Таблица 1 – Химический состав алюминиевых сплавов и режимы литья

| № сплава | Легирующие элементы, % масс. | | | Si | Примеси Zn, Cu, Mn, Ti, Ni, Cr, V, не более | $T_{\text{пл}}, ^{\circ}\text{C}$ | $t_{\text{в}},$ мин | $T_{\text{зал}}, ^{\circ}\text{C}$ |
|----------|------------------------------|------|-----------|-------|--|-----------------------------------|------------------------|------------------------------------|
| | Zr | Fe | Mg | | | | | |
| 1 | 0,10 | 0,12 | - | 0,060 | 0,010 | 850 | 10 | 750 |
| 2 | 0,12 | 0,15 | - | 0,060 | 0,010 | 850 | 10 | 750 |
| 3 | 0,12 | 0,25 | - | 0,060 | 0,010 | 850 | 10 | 750 |
| 4 | 0,15 | 0,20 | 0,01 | 0,100 | 0,011 | 750-790 | 5-20 | 750-790 |
| 5 | 0,15 | 0,03 | - | 0,030 | 0,010 | 850 | 10 | 750 |
| 6 | 0,15 | 0,12 | - | 0,060 | 0,010 | 850 | 10 | 750 |
| 7 | 0,15 | 0,20 | 0,01 | 0,150 | 0,011 | 900 | 10 | 720-880 |
| 8 | 0,15 | 0,30 | - | 0,070 | 0,010 | 900 | 10 | 900 |
| 9 | 0,20 | 0,20 | 0,30-0,40 | 0,050 | 0,010 | 900 | 10 | 850 |
| 10 | 0,20 | 0,12 | - | 0,060 | 0,010 | 850 | 10 | 750 |
| 11 | 0,20 | 0,20 | 0,01 | 0,100 | 0,011 | 790 | 10 | 790 |
| 12 | 0,25 | 0,03 | - | 0,030 | 0,010 | 850 | 10 | 750 |
| 13 | 0,25 | 0,12 | - | 0,060 | 0,010 | 850 | 10 | 750 |
| 14 | 0,25 | 0,20 | 0,01 | 0,100 | 0,011 | 790 | 10 | 790 |
| 15 | 0,28 | 0,26 | - | 0,060 | 0,010 | 850 | 10 | 790 |
| 16 | 0,30 | 0,12 | - | 0,060 | 0,010 | 850 | 10 | 750 |
| 17 | 0,30 | 0,15 | - | 0,070 | 0,010 | 800-900 | 10 | 740-900 |
| 18 | 0,30 | 0,20 | 0,01 | 0,070 | 0,011 | 800-900 | 10 | 740-900 |
| 19 | 0,30 | 0,40 | - | 0,100 | 0,010 | 900 | 10 | 900 |
| 20 | 0,35 | 0,20 | - | 0,100 | 0,010 | 800-900 | 10 | 740-900 |
| 21 | 0,40 | 0,20 | - | 0,100 | 0,010 | 800-900 | 10 | 740-900 |
| 22 | 0,50 | 0,15 | - | 0,100 | 0,010 | 900 | 10 | 900 |
| 23 | 0,15 | 0,20 | 0,01 | 0,150 | 0,011 | 900 | 10 | 780 |
| 24 | 0,25 | 0,03 | - | 0,030 | 0,010 | 850 | 10 | 750-780 |

В качестве оборудования для экспериментальных исследований применяли установки совмещенной обработки, технические характеристики которых представлены в табл.2.

Таблица 2 – Технические характеристики установок совмещенной обработки

| Параметры | СПП-200 | СЛиПП-2,5 |
|--|----------|--------------|
| Начальный диаметр валка, мм | 200 | 480 |
| Длина бочки валка, мм | 240 | 250 |
| Диаметр шейки вала, мм | 100 | 150 |
| Размеры ящичного калибра в наименьшем сечении, мм | 7x15 | 10x22, 20x42 |
| Количество оборотов валка, об/мин | 4, 8, 14 | 1-15 |
| Передаточное число редуктора, ед. | 40 | 40 |
| Мощность электродвигателя, кВт | 20 | 45 |
| Момент на выходном валу, кН·м | 10 | 20 |
| Рабочее давление гидростанции, кгс/см ² | 200-500 | 200 |
| Максимальное усилие прижима, кН | 300 | 300 |

Лабораторная установка непрерывного литья, прокатки и прессования СЛиПП-2,5 показана на рис.1. Линия совмещенной обработки на базе этой установки включает в себя наклоняемую индукционную печь-миксер, деформирующий узел, ванну для охлаждения, калибровочную машину и моталку. Печь-миксер выполнена с регулятором подачи расплава и имеет общую емкость тигля по алюминию 350 кг. Деформирующий узел состоит из наклонной станины, в которой расположены валки, образующие закрытый ящичный калибр, перекрытый на выходе матрицей с помощью гидроцилиндра, и устройства для поджима валков гидравлического типа.



Рис.1. Экспериментальная установка СЛиПП-2,5

Для исследования структуры опытных образцов применяли оптический микроскоп Carl Zeiss Axio Observer A1m, растровый электронный микроскоп EVO 50 HVP (Carl Zeiss) с энергодисперсионным анализатором Inca ENERGY 350 и просвечивающий электронный микроскоп JEM-2100 (Jeol); для определения механических свойств – универсальные испытательные машины LFM20 и LFM400 (Швейцария) усилием 20 и 400 кН; а для определения удельного электросопротивления омметр «ВИТОК».

Третья глава посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям процесса совмещенной прокатки-прессования, разработке устройств для его реализации и изучению структуры и физико-механических свойств полученных полуфабрикатов из сплавов системы Al-Zr.

Для оценки условия реализации процесса совмещенной прокатки-прессования использовали условие

$$N_a/N_p \geq 1, \quad (1)$$

где N_a - мощность, формируемая активными силами трения, действующими на контактной поверхности калибра вращающихся валков с деформируемой заготовкой; N_p - мощность, затрачиваемая на осуществление процесса выдавливания металла через заданное сечение рабочего отверстия матрицы.

Для вывода формул и расчета отдельных составляющих обеих мощностей принята схема процесса СПП, показанная на рис.2.

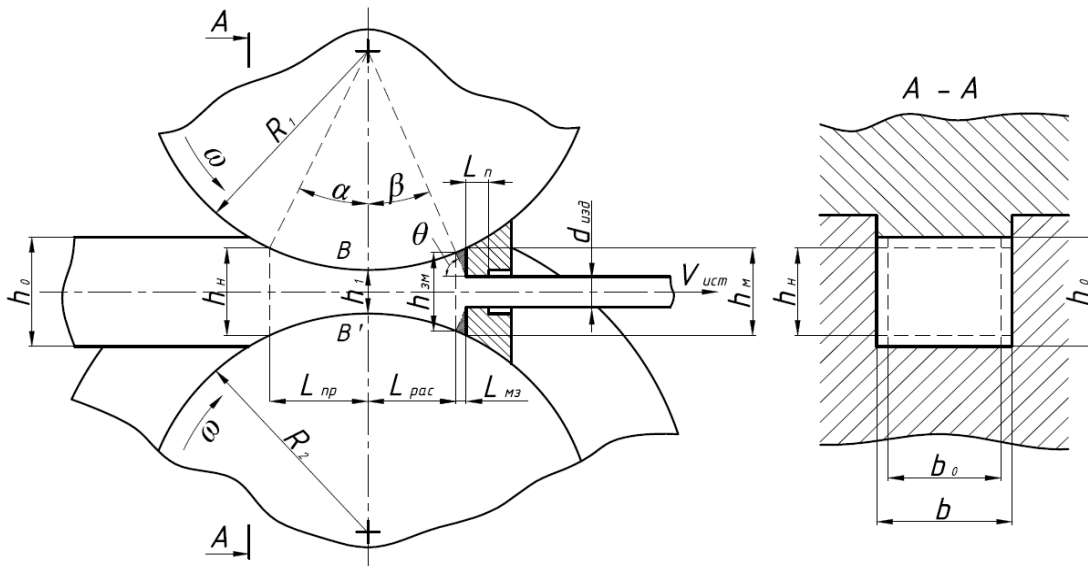


Рис.2. Принципиальная схема процесса совмещенной прокатки-прессования

Принято допущение, что радиусы обоих валков равны между собой, т.е. $R_1 = R_2 = R$, а средняя по сечению BB' скорость движения металла по зоне прокатки максимальна и определяется окружной скоростью вращения валков $V_в$ с учетом коэффициента проскальзывания k_{np} . Справа и слева от плоскости BB' расположены зоны отставания, в которых средняя по соответствующему сечению скорость перемещения металла изменяется с учетом условия постоянства секундного объема деформируемого металла, рассчитываемого по формуле:

$$V_{сек} = k_{np} \cdot V_в \cdot F_1 = k_{np} \cdot \omega \cdot R \cdot b \cdot h_1, \quad (2)$$

где $\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$ - угловая скорость вращения валков; n - число оборотов валков; F_1 - площадь поперечного сечения металла в наименьшем сечении калибра.

Полная мощность N_p , которую нужно развить валками установки СПП, в общем случае складывается из следующих составляющих:

$$N_p = N_{деф} + N_{тр_м} + N_{тр_п}, \quad (3)$$

где $N_{деф}$ - мощность, затрачиваемая на деформацию металла без учета контактного трения; $N_{тр_м}$ - мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения на границе упругой и пластической зон перед матрицей; $N_{тр_п}$ - мощность сил трения на калибрующем пояске матрицы.

После записи всех составляющих полной мощности была разработана и реализована на ЭВМ программа расчета, с помощью которой проанализировано влияние отдельных факторов на осуществление процесса СПП. В качестве критерия оценки был принят коэффициент запаса мощности K_N :

$$K_N = \frac{N_a}{N_p K_3}, \quad (4)$$

где $K_3 = 1,1$ – коэффициент, учитывающий, что при выдавливании части металла в зазор между валками и матрицей расходуется дополнительная энергия, составляющая по экспериментальным оценкам до 10% от затраченной.

Для расчетов принимали среднюю величину радиуса валков R , а значения сопротивления деформации, полученные методом горячего кручения, брали для сплава 9. На рис.3 отображена динамика изменения коэффициента K_N при заданных исходных параметрах процесса, соответствующих условиям эксперимента, с изменением значений показателей трения на катающих поверхностях верхнего ψ_v , нижнего ψ_n валков и на стенках валка с канавкой ψ_{cm} в диапазоне $0,75 \div 1$; в обжимающей части ψ_m и на калибрующем пояске ψ_n матрицы в диапазоне $0,5 \div 0,75$.

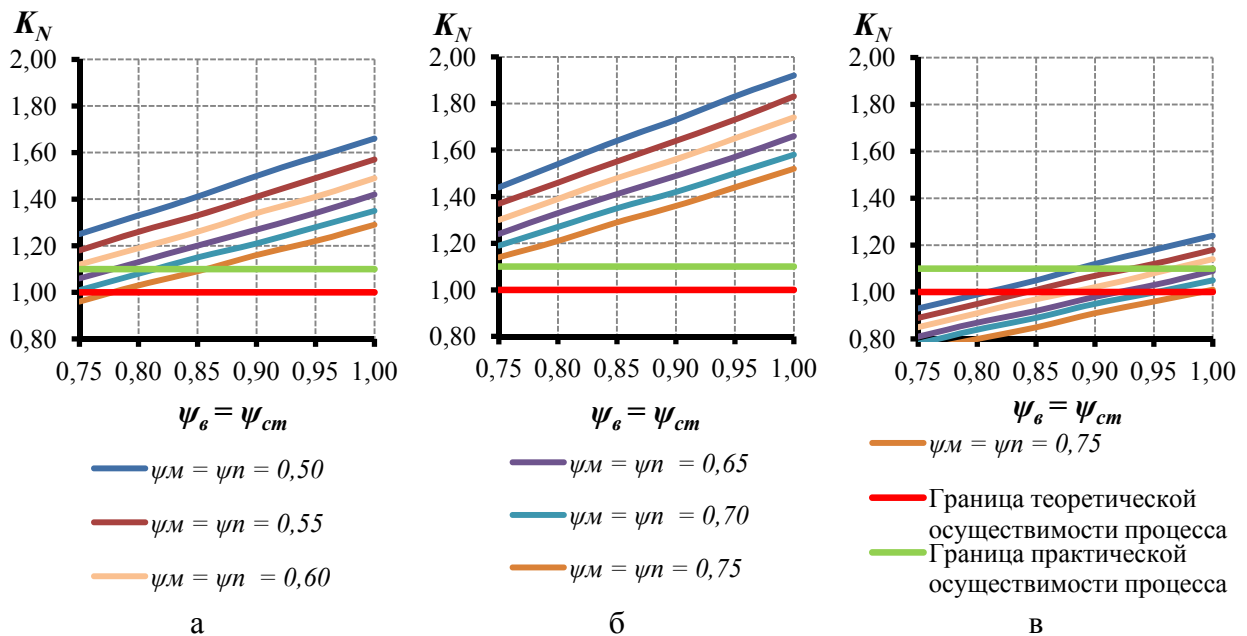


Рис.3. Коэффициенты запаса мощности при обработке слитков из сплава 9 способом СПП:
 а - для установки СПП-200 ($R = 100$ мм; размеры калибра 7x15 мм);
 б - для установки СЛиПП-2,5 ($R = 215$ мм; размеры калибра 10x22 мм);
 в - для установки СЛиПП-2,5 ($R = 215$ мм; размеры калибра 20x42 мм)

Из рассмотрения данных, приведенных на рис.3, следует, что для обеспечения стабильного протекания процесса СПП необходимо стремиться к созданию на контакте обрабатываемой заготовки с валками условий трения, близких к варианту деформирования металла в условиях прилипания его к поверхности инструмента, т.е. когда $\psi_v = \psi_{cm} \geq 0,9$. С увеличением размеров калибра коэффициент запаса мощности K_N снижается (рис.3б, в), что следует учитывать при проектировании установок совмещенной обработки.

Для изучения формоизменения и температурно-скоростных условий процесса СПП проведено компьютерное моделирование в программном комплексе DEFORM[®] 3D. В качестве исходных были приняты данные, со-

ответствующие условиям эксперимента на установке СПП-200 (см.табл.2). Проведенное компьютерное моделирование совмещенной прокатки-прессования (рис.4) позволило оценить температурно-скоростные условия проведения процесса. Были определены энергосиловые параметры процесса СПП для сплава 9, при этом усилие, действующее на валки, составило 210,5 кН (погрешность в сравнении с экспериментом 6%), а усилие, действующее на матрицу, было равно 151,8 кН (погрешность 8%). Таким образом, данный расчет показал, что для проведения экспериментальных исследований можно использовать имеющиеся установки совмещенной обработки (см.табл.2), у которых максимальное усилие прижима матрицы к валкам составляет 300 кН, а минимальная мощность приводного двигателя – 20 кВт.

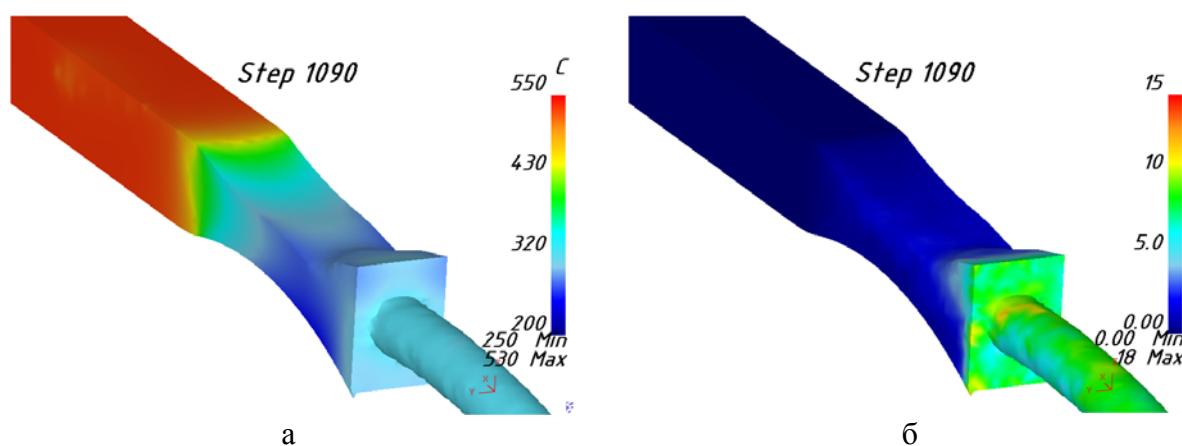


Рис.4. Результаты моделирования процесса СПП для обработки сплава 9:
а - распределение температуры, °С; б - распределение скоростей деформации, с⁻¹

Для проведения опытов, таким образом, были рекомендованы следующие технологические режимы обработки: температура заготовки $T_3 = 550^\circ\text{C}$; температура валков $T_B = 100^\circ\text{C}$, степень деформации при прокатке $\varepsilon = 50\%$; коэффициент вытяжки при прессовании $\mu = 4,5$; скорость вращения валков $V_B = 4$ об/мин. Совмещенной обработке подвергались образцы сплавов 1-22 (см.табл.1) размерами 14x14x250 мм, из которых получали прутки диаметром 9 мм. Тензометрические замеры энергосиловых параметров показали, что усилие, действующее на валки, составило 198 кН, а усилие, действующее на матрицу, равнялось 165 кН.

Металлографический анализ прутков, полученных из слитков с различными температурами литья (рис.5), и проволоки, изготовленной из них путем волочения, показал, что микроструктура всех образцов состоит из α -твердого раствора и дисперсных частиц фаз AlFe , AlFeSi и Al_3Zr . После деформации форма и размеры интерметаллидных фаз Al_3Zr существенно не изменились по сравнению со строением включений в слитках. В долевом сечении прутка наблюдается ориентированность частиц железосодержащих фаз и включений Al_3Zr в направлении оси деформации. С увеличением температур плавки и заливки расплава достигается полное растворение циркония в алюминии и получение максимально пересыщенного твердого раствора циркония в алюминии без выделения первичных кристаллов

Al_3Zr . Исследование микроструктуры проволоки показало, что в ее доле-вом сечении наблюдается строчечное расположение дисперсных частиц избыточных фаз, раздробленных при холодном волочении в направлении оси деформации.

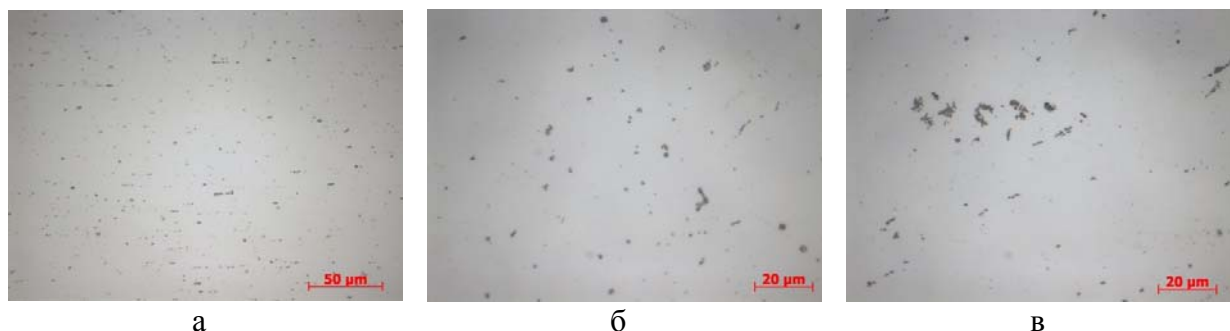


Рис.5. Микроструктура прутков из сплава 7 диаметром 9 мм, полученных СПП из слитков с различными режимами литья: а - $T_{зал} = 880^{\circ}C$; б - $T_{зал} = 800^{\circ}C$; в - $T_{зал} = 720^{\circ}C$

Исследование свойств полученных полуфабрикатов (табл.3) показало, что диапазон изменения значений временного сопротивления разрыву (σ_B) прутков составляет 115-170 МПа, а удлинения (δ) 15-25%. Холодная деформация приводит к увеличению значений σ_B до 200-250 МПа, что в 1,5-2 раза выше значений временного сопротивления разрыву по требованиям стандартов к деформируемым полуфабрикатам из электротехнического алюминия. При этом пластические свойства ($\delta = 2-4\%$) обеспечивают холодную деформацию без отжигов и обрывов со степенями деформации до 90%. В сплаве 9, легированном магнием, значения прочности и микротвердости увеличены.

Образцы проволоки сплавов 5 и 12 с пониженным содержанием железа отличаются более низкими прочностными свойствами 159-187 МПа, что объясняется существенным уменьшением объемной доли железосодержащих фаз. Более высокое значение временного сопротивления разрыву 187 МПа в проволоке образца 12 связано с повышенной концентрацией циркония в сплаве, который обеспечивает твердорастворное и дисперсионное упрочнение. В прутках и проволоке образцов 3 и 19 наблюдаются максимальные прочностные свойства на уровне 150 и 250 МПа, соответственно. Таким образом, концентрация железа в сплаве значительно повышает объемную долю железистых фаз и приводит к существенному упрочнению.

Значения микротвердости прутков изменяются в пределах 37-48 HV, а проволоки 47-64 HV, причем эти значения повышаются при холодной деформации.

Полученные значения удельного электрического сопротивления (УЭС) для деформированных полуфабрикатов показывают, что совместное снижение концентрации железа и циркония обеспечивает более низкие значения удельного электрического сопротивления, но больший вклад вносит изменение содержания циркония, а дополнительное легирование магнием (сплав 9) приводит к существенному повышению удельного электросопротивления.

Таблица 3 – Механические свойства и удельное электросопротивление ρ деформированных полуфабрикатов из сплавов Al-Zr

| № сплава | Прутки диаметром 9 мм | | | | | Проволока диаметром 2 мм | | | | |
|----------|-----------------------|------------------|--------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------|------------------|--------------|-------------------------|--------------------------------|
| | $\sigma_{0,2}$, МПа | σ_B , МПа | δ , % | HV, кгс/мм ² | ρ , Ом·мм ² /м | $\sigma_{0,2}$, МПа | σ_B , МПа | δ , % | HV, кгс/мм ² | ρ , Ом·мм ² /м |
| 1 | 88 | 115 | 25,2 | 44,7±1,8 | 0,02724 | 172 | 223 | 2,1 | 46,8±1,6 | 0,02962 |
| 2 | 88 | 126 | 17,2 | 44,5±1,5 | 0,02768 | 180 | 223 | 2,3 | 47,8±1,0 | 0,02910 |
| 3 | 112 | 160 | 20,7 | 44,8±1,3 | 0,02759 | 190 | 245 | 1,6 | 49,1±1,1 | 0,02956 |
| 4 | 93 | 127 | 18,5 | 47,4±0,8 | - | 156 | 227 | 2,0 | 48,7±0,9 | 0,03080 |
| | 90 | 118 | 21,5 | 43,4±0,6 | - | 161 | 219 | 1,3 | 46,7±0,6 | 0,02880 |
| | 91 | 117 | 22,0 | 43,2±0,7 | - | 152 | 229 | 2,3 | 46,8±1,2 | 0,02820 |
| | 92 | 125 | 16,6 | 43,3±1,8 | - | 162 | 222 | 1,7 | 47,7±1,4 | 0,02830 |
| | 94 | 121 | 15,2 | 48,1±1,8 | - | 159 | 226 | 1,7 | 46,7±1,8 | 0,02980 |
| | 90 | 120 | 13,9 | 44,6±1,2 | - | 164 | 230 | 1,95 | 48,8±0,8 | 0,02940 |
| 5 | 75 | 120 | 38,3 | 37,2±1,1 | 0,02795 | 131 | 159 | 2,9 | 47,1±0,3 | 0,02962 |
| 6 | 97 | 130 | 18,4 | 45,4±1,5 | 0,02857 | 142 | 216 | 2,4 | 59,9±1,5 | 0,02972 |
| 7 | 99 | 123 | 17,3 | 40,8±2,1 | - | 153 | 213 | 2,4 | 49,4±1,2 | 0,02990 |
| | 93 | 125 | 17,0 | 40,5±2,5 | - | 141 | 218 | 2,9 | 49,4±1,8 | 0,02950 |
| | 96 | 138 | 20,3 | 42,2±1,6 | - | 125 | 238 | 2,7 | 46,1±0,5 | 0,03070 |
| 7* | 98 | 136 | 20,4 | 40,1±2,3 | - | 155 | 215 | 3,5 | 42,8±2,3 | 0,03130 |
| 8 | 99 | 135 | 17,0 | - | 0,03090 | 160 | 233 | 3,7 | - | 0,03328 |
| 9 | 99 | 145 | 16,0 | 42,0±1,7 | 0,03250 | 187 | 249 | 2,6 | 63,0±1,2 | 0,03420 |
| 10 | 98 | 142 | 16,2 | 46,5±0,8 | 0,03085 | 180 | 234 | 2,0 | 60,2±1,9 | 0,03155 |
| 11 | 97 | 137 | 18,5 | 44,0±0,9 | - | 163 | 226 | 1,9 | 47,3±0,5 | 0,03111 |
| 12 | 90 | 137 | 29,9 | 42,5±1,5 | 0,03169 | 154 | 187 | 2,3 | 56,6±0,8 | 0,03298 |
| 13 | 99 | 132 | 24,1 | 43,8±0,3 | 0,03279 | 151 | 228 | 1,3 | 60,7±2,1 | 0,03329 |
| 14 | 98 | 142 | 16,6 | 43,1±1,6 | - | 147 | 223 | 1,9 | 48,3±0,7 | 0,03200 |
| 15 | 96 | 136 | 26,0 | - | 0,03345 | 127 | 211 | 2,2 | - | 0,03384 |
| 16 | 99 | 144 | 17,2 | 47,9±1,8 | 0,03240 | 164 | 220 | 2,6 | 61,3±0,5 | 0,03360 |
| 17 | 92 | 148 | 22,0 | - | 0,03340 | 165 | 228 | 2,0 | - | 0,03369 |
| | 112 | 150 | 18,0 | - | 0,03320 | 175 | 214 | 2,5 | - | 0,03381 |
| | 93 | 136 | 23,0 | - | 0,03190 | 182 | 224 | 1,8 | - | - |
| | 94 | 140 | 22,0 | - | 0,03150 | 165 | 225 | 2,5 | - | 0,03189 |
| 18 | 90 | 136 | 20,0 | - | 0,03340 | 156 | 199 | 2,4 | - | 0,03387 |
| | 99 | 139 | 24,0 | - | 0,03270 | 160 | 215 | 3,2 | - | 0,03280 |
| | 84 | 147 | 23,0 | - | 0,03150 | 159 | 213 | 3,7 | - | 0,03266 |
| | 92 | 145 | 16,0 | - | 0,03140 | 172 | 252 | 2,0 | - | 0,03273 |
| | 92 | 137 | 17,5 | - | - | - | - | - | - | - |
| 19 | 92 | 147 | 20,0 | - | 0,03276 | 166 | 226 | 3,9 | - | 0,03312 |
| 20 | 106 | 139 | 15,0 | - | 0,03273 | 173 | 208 | 2,7 | - | 0,03319 |
| | 109 | 127 | 24,7 | - | 0,03248 | 170 | 208 | 2,5 | - | 0,03384 |
| | 105 | 128 | 25,1 | - | 0,03261 | 180 | 227 | 2,4 | - | 0,03339 |
| | 110 | 141 | 16,3 | - | 0,03319 | 178 | 213 | 2,5 | - | 0,03322 |
| 21 | 109 | 142 | 15,2 | - | 0,03256 | 132 | 203 | 1,4 | - | 0,03349 |
| | 110 | 121 | 28,7 | - | 0,03234 | 159 | 202 | 3,4 | - | 0,03365 |
| | 108 | 166 | 18,3 | - | 0,03321 | 163 | 219 | 3,4 | - | 0,03398 |
| 22 | 105 | 146 | 23,0 | - | 0,03376 | 156 | 222 | 3,3 | - | 0,03464 |
| 23** | 94 | 121 | 21,1 | 35,9±0,7 | - | 126 | 193 | 3,0 | 41,9±1,4 | - |
| 24** | 102 | 128 | 28,8 | - | 0,03101 | 159 | 202 | 1,7 | - | 0,03290 |

Примечание: * - образец получен литьем в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК),
** - образцы получены при заливке расплава в валки

Для определения термостойкости проволоки из исследуемых сплавов (рис.6) проводили испытания по методике, приведенной в стандартах ASTM B941 и ИЕС 62004, в соответствии с которой временное сопротивление разрыву, измеряемое при комнатной температуре, после нагрева до заданной температуры не должно быть менее 90% от его исходного значения до нагрева образца. В первом случае образцы проволоки подвергали длительной выдержке в печи при температуре 180°C в течение 400 ч и охлаждали на воздухе, во втором – нагревали образцы до температур 230 и 280°C, выдерживали в течение 1 ч и охлаждали на воздухе. В обоих случаях определяли значения временного сопротивления разрыву и удельного электро-сопротивления в зависимости от времени выдержки и температуры. Анализ полученных данных показывает, что значения временного сопротивления разрыву образцов проволоки после длительной выдержки (свыше 400 часов) при 180°C уменьшаются более значительно у сплавов с меньшей концентрацией циркония. Термостойкость проволоки из сплавов 3 и 15 удовлетворяет требованиям стандарта ИЕС 62004 на соответствие типу проводов АТ1. Значения удельного электросопротивления для этих образцов проволоки составляют 0,0275-0,0320 Ом·мм²/м. После длительных испытаний значения удельного электросопротивления уменьшаются незначительно не более чем на 5% и составляют 0,0279-0,0317 Ом·мм²/м в зависимости от химического состава.

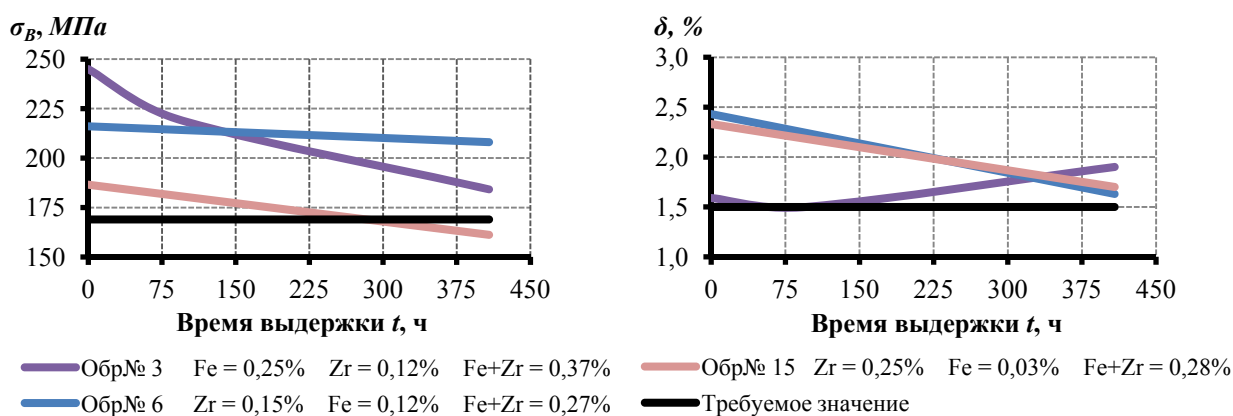


Рис.6. Механические свойства проволоки из сплавов Al-Zr после выдержки при 180°C

На основании результатов проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны новые технические решения в виде устройств для совмещенной обработки металла (рис.7). Они позволили повысить эффективность использования прессового инструмента, снизить энергетические затраты, повысить производительность и выход годного металла.

В четвертой главе даны результаты определения силовых условий процесса совмещенного литья и прокатки-прессования при различных вариантах прижима матрицы к валкам, описаны конструкции устройств для его реализации и приведены данные по физико-механическим свойствам и структуре полученных деформированных полуфабрикатов.

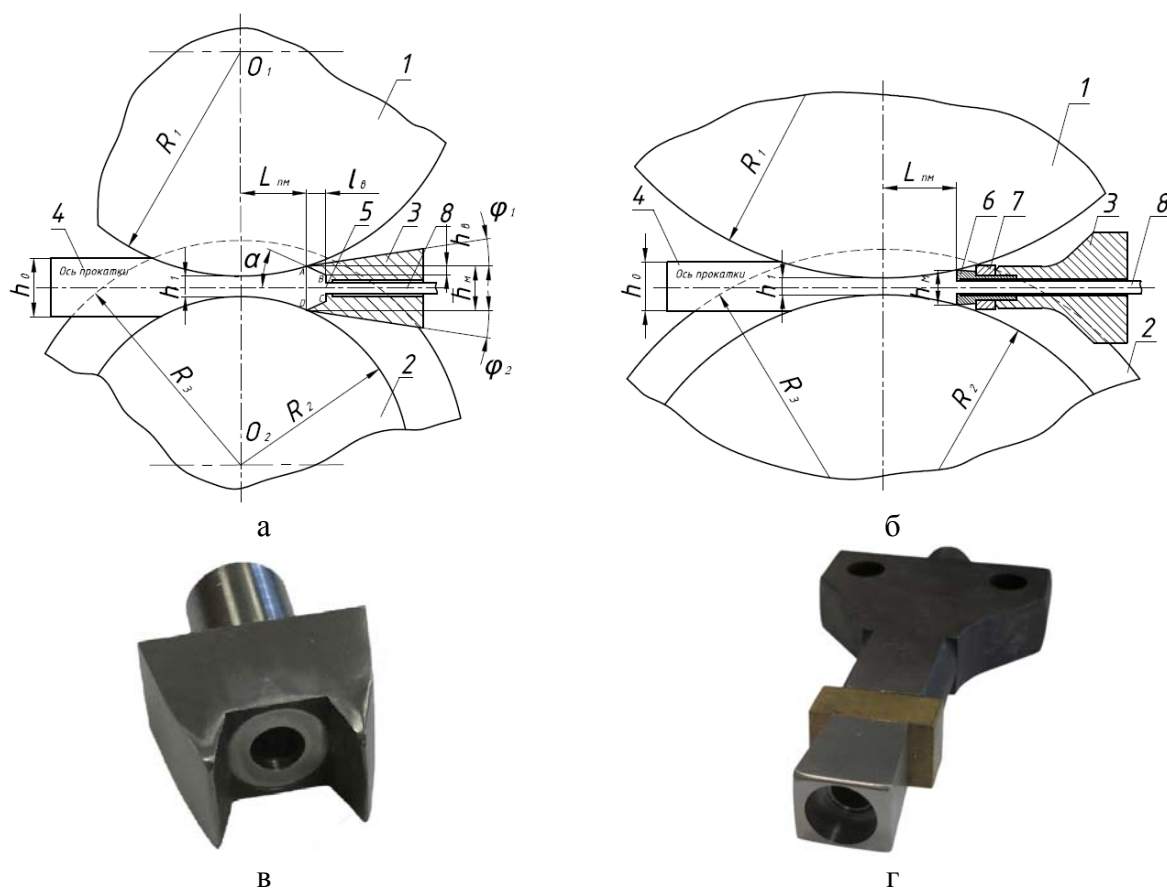


Рис.7. Устройства для совмещенной прокатки и прессования по патенту РФ №138590 (а) и РФ №139085 (б) и вид матричного инструмента (в, г): 1 - валок с выступом; 2 - валок с канавкой; 3 - матрица; 4 - заготовка; 5 - трапециевидная выемка; 6 - калибрующая вставка; 7 - антифрикционная вставка; 8 - изделие

Установлено, что несовпадение осей прокатки и прессования при реализации процесса СЛиПП приводит к увеличению в 2,7-3,0 раза реакции опоры рычага прижимного устройства. В связи с этим была проведена оценка силовых условий и предложено применение компенсирующего усилия, приложенного к рычагу прижимного устройства матрицы к валкам с помощью вертикального гидроцилиндра, которое позволяет исключить неравномерное силовое воздействие на рабочий инструмент, и гарантирует регламентируемую толщину заусенца из деформируемого металла между валками и матрицей.

На основании полученных аналитических зависимостей предложено устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования цветных металлов и сплавов по патенту РФ №128529 (рис.8).

Экспериментальные исследования проводили при следующих технологических параметрах: температура расплава перед заливкой в калибр валков составляла $T_{\text{зал}} = 780^{\circ}\text{C}$; температура валков $T_{\text{в}} = 20^{\circ}\text{C}$, степень деформации при прокатке $\epsilon = 50\%$; коэффициент вытяжки при прессовании $\mu = 4,5$ (диаметр прутка 9 мм); скорость вращения валков $V_{\text{в}} = 4$ об/мин; скорость деформации $\xi = 0,74 \text{ с}^{-1}$. На выходе получали прутки диаметром 9 мм, которые

далее подвергали волочению до диаметра 2 мм. Далее производили отжиг проволоки сначала при температуре 300°C, а затем при температуре 450°C при фиксированном времени выдержки.

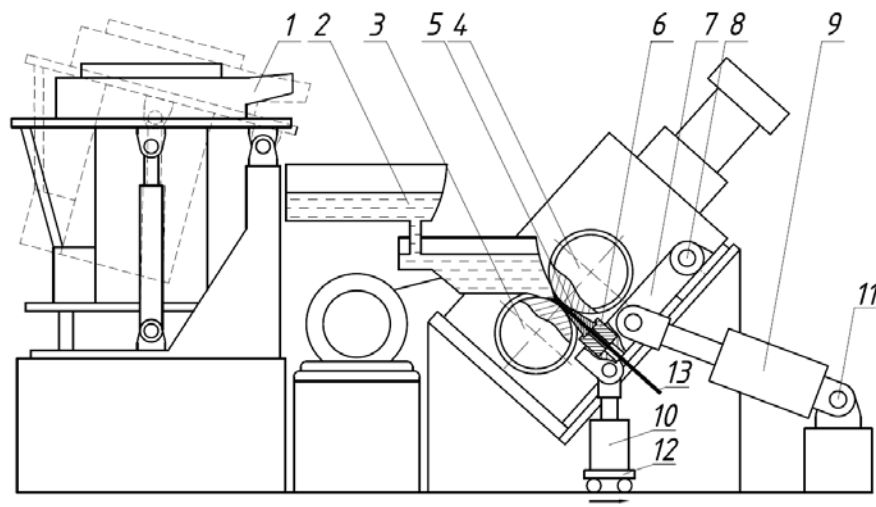


Рис.8. Общий вид устройства по патенту РФ №128529: 1 - печь-миксер; 2 - литниковая система; 3 - валок с ручьем; 4 - валок с выступом; 5 - матрица; 6 - матрицедержатель; 7 - кронштейн; 8, 11, 12 - шарниры; 9 - гидроцилиндр; 10 - вертикальный гидроцилиндр

Микроструктура металла прутков, полученных методом СЛиПП, и проволоки (рис.9) представляет α -твердый раствор на основе алюминия и избыточных фаз, содержащих железо и кремний. Металлографические исследования показали, что структура всех образцов, полученных способом СЛиПП, характеризуется неоднородным распределением фаз по сечению алюминиевого твердого раствора (рис.9а), причем в отличие от прутков, полученных способом СПП, здесь наблюдаются более грубые скопления железосодержащих частиц и алюминидов циркония.

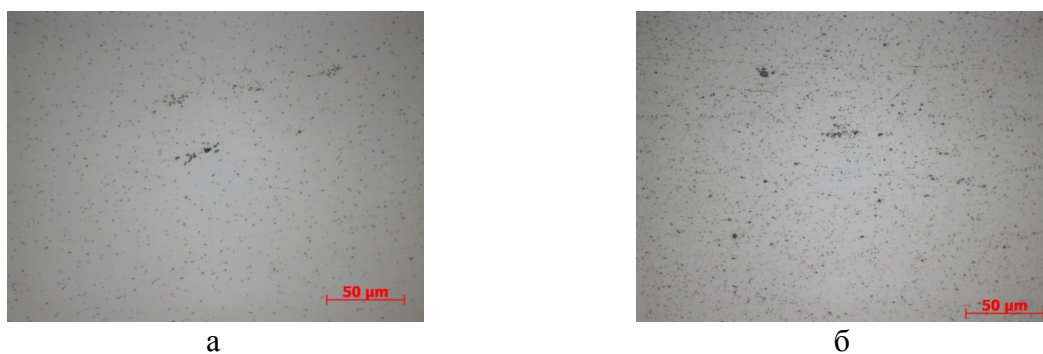


Рис.9. Микроструктура деформированных полуфабрикатов из сплава 23, полученных способом СЛиПП: а - пруток (диаметр 9 мм); б - проволока (диаметр 2 мм)

Кроме того, в прутках обнаружены мелкие частицы Al_3Zr , вытянутые вдоль направления деформации, чего не наблюдалось в слитках. Выделение некоторого количества включений Al_3Zr , по-видимому, связано с более низкой температурой при заливке расплава в валки, так как его температура соответствовала 780°C, что на 100°C ниже температуры заливки при литье слитков в металлическую форму. Холодное волочение при получении проволоки приводит к дроблению частиц Al_3Zr , в результате чего они образуют

строчки из мелких частиц, близких к округлой форме (рис.9б), тогда как в соответствующих прутках большинство частиц имеет пластинчатую форму.

Механические и электрические свойства деформированных полуфабрикатов, полученных с использованием способа СЛиПП, приведены в табл.3. Установлено, что применение этого способа дает возможность получить деформированные и отожженные полуфабрикаты с достаточно хорошим сочетанием прочностных, пластических и электрофизических свойств, при этом пластические свойства выше, чем у полуфабрикатов, изготовленных способом СПП. Это позволяет применять высокие суммарные степени деформации при волочении (до 95%) без использования промежуточных отжигов. Применение окончательного двухступенчатого отжига позволило улучшить свойства полуфабрикатов, так относительное удлинение проволоки диаметром 2 мм в отожженном состоянии составило 31-36%, а удельное электросопротивление 0,0275-0,0297 Ом·мм²/м.

На основании выполненных исследований подготовлены технологические рекомендации по выбору химического состава, режимов приготовления и обработки сплавов системы Al-Zr. С использованием этих рекомендаций разработан технологический регламент на производство катанки из алюминия и его сплавов на лабораторной установке СЛиПП-2,5 и произведены опытные партии катанки и проволоки из сплавов системы Al-Zr различного химического состава, механические и электрофизические свойства которых соответствуют требованиям стандартов.

Пятая глава посвящена изучению совместного применения методов совмещенной обработки и методов интенсивной пластической деформации, что дает возможность получить ультрамелкозернистую структуру деформированных полуфабрикатов и увеличить их прочность.

В качестве методов интенсивной пластической деформации был выбран способ равноканального углового прессования (РКУП), осуществляемый на опытно-экспериментальной установке института физики перспективных материалов Уфимского государственного авиационного технического университета. Исходными заготовками, подвергаемыми обработке РКУП, являлись прутки, полученные по технологии СЛиПП.

Значительное измельчение структуры и рост механических характеристик в процессе обработки методом РКУП достигается при холодной деформации и углах пересечения каналов 110-135°, поэтому при моделировании процесса совмещенной обработки с применением ИПД (рис.10) температуру заготовки и рабочего инструмента принимали равной 20°C, угол пересечения каналов 125°C; число оборотов валков $n = 4$ об/мин; степень деформации при прокатке $\varepsilon = 20\%$; коэффициент вытяжки при прессовании $\mu = 3$; число оборотов валков $n = 4$ об/мин; показатель трения на валках ψ_B принимали постоянным и равным 0,9; а на матрице ψ_M варьировали от 0,5 до 0,75; количество элементов сетки составило: для валка с выступом – 22533; валка с канавкой – 23615; заготовки – 23139; матрицы – 14715.

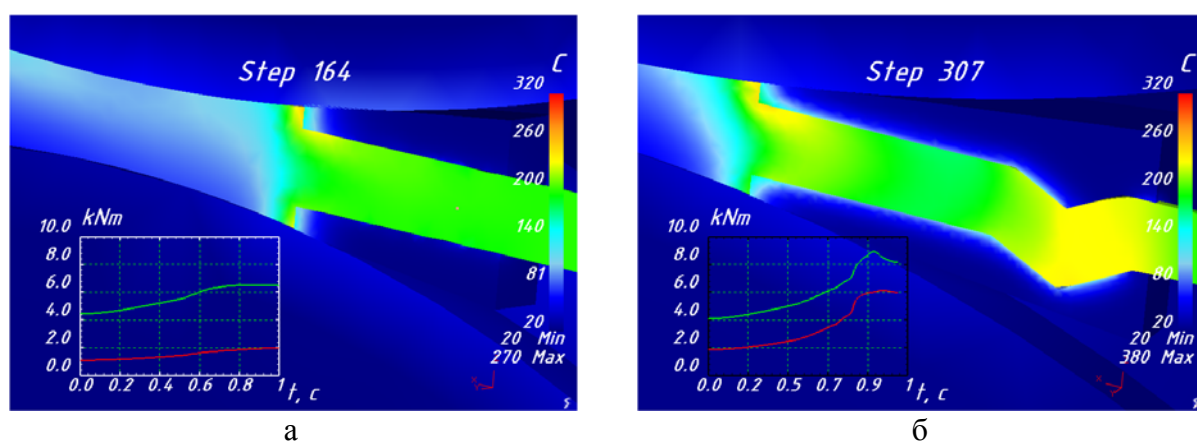


Рис.10. Изменение температурных полей и моментов на валках в зависимости от способа и времени обработки при $\psi_m = 0,5$ и $n = 4$ об/мин: а - матрица с продольным каналом; б - матрица с пересекающимися каналами; ----- валок с выступом; ---- валок с канавкой

Суммарные моменты на валках при прессовании через обычную матрицу составили $M_B = 12,4$ кНм и $M_K = 4,8$ кНм, а при прессовании через матрицу с пересекающимися каналами $M_B = 17,6$ кНм и $M_K = 12,0$ кНм.

Результаты моделирования позволили выбрать технологические параметры для проведения экспериментальных исследований по получению деформированных полуфабрикатов из сплава 9 системы Al-Zr и определить их свойства в зависимости от способа обработки (табл.4 и 5).

Изучение механических свойств показало, что среднее значение временного сопротивления разрыву прутков составляет 145 МПа, пластичность – 26%, значение микротвердости – 42 НВ. Увеличение степени холодной деформации при волочении приводит к повышению прочностных характеристик до 250 МПа, микротвердости 63 НВ и понижению пластичности до 2,6%. Полученные значения удельного электрического сопротивления (УЭС) составляют $0,0335$ Ом·мм²/м для прутков и $0,0342$ Ом·мм²/м для проволоки.

Таблица 4 – Средние значения механических и электрических свойств деформированных полуфабрикатов из сплава 9 после СЛиПП

| Полуфабрикат | Механические свойства | | | Удельное электросопротивление, Ом·мм ² /м |
|----------------------------|-----------------------|--------------|-------------------------|--|
| | σ_b , МПа | δ , % | НВ, кгс/мм ² | |
| Пруток диаметром 9,5 мм | 145 | 25,9 | 42±1,7 | 0,03353 |
| Проволока диаметром 3,9 мм | 206 | 3,4 | - | - |
| Проволока диаметром 2,0 мм | 249 | 2,6 | 63±1,2 | 0,03420 |

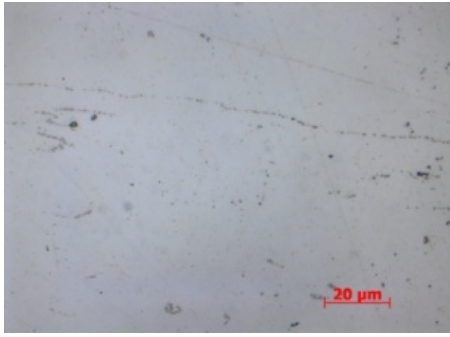
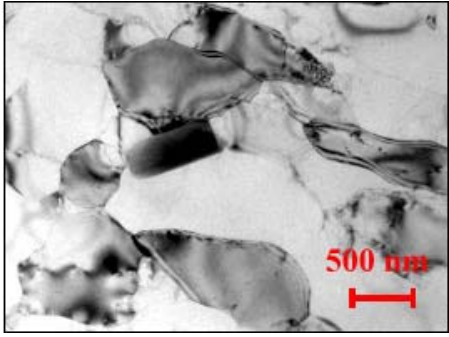
Таблица 5 – Средние значения механических свойств и электросопротивления деформированных полуфабрикатов, полученных по разным режимам обработки

| Режим обработки | σ_b , МПа | δ , % | ρ , Ом·мм ² /м |
|--|------------------|--------------|--------------------------------|
| СЛиПП | 145 | 25,9 | 0,03353 |
| СЛиПП - ТО - 4 цикла РКУП | 193 | 12,9 | 0,02917 |
| СЛиПП - волочение до диаметра 3 мм | 224 | 2,91 | 0,03421 |
| СЛиПП - ТО - РКУП - волочение до диаметра 3 мм | 254 | 2,0 | 0,02954 |

Полуфабрикаты из исследуемого сплава характеризуется повышенными значениями УЭС, тогда как по международным стандартам ИЕС 62004 требуемое значение этого показателя не должно превышать $0,0287 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м}$. Поэтому экспериментальные образцы прутков, полученные методом СЛиПП, подвергали термической обработке с целью снижения электросопротивления, и только после этого – 4 циклам обработки методом РКУП при комнатной температуре (табл.5).

Электронно-микроскопический анализ прутков методом ПЭМ показал, что после обработки прутков способом РКУП формируется ультрамелкозернистая (УМЗ) структура сплава (табл.6), а проведенный количественный анализ микроструктуры позволил оценить размер зерен после ИПД, который составил 618-676 нм (в среднем 647 ± 29 нм).

Таблица 6 – Микроструктура деформированных полуфабрикатов из сплава 9, полученных разными способами обработки

| Полуфабрикат | Способ обработки | |
|-----------------------|--|---|
| | СЛиПП | СЛиПП-РКУП |
| Пруток диаметром 9 мм |  |  |

Подобное измельчение зерна в свою очередь приводит к довольно существенному упрочнению прутков (см.табл.5). Дальнейшая обработка прутка, полученного методом СЛиПП, способом РКУП приводит к повышению прочности на 33% и небольшому снижению пластичности. Необходимо отметить, что для достижения аналогичного упрочнения прутков путем традиционного холодного волочения необходимо обработать их с довольно большой степенью деформации – порядка 90%, соответствующей 8-10 переходам волочения.

В заключении представлены основные выводы и результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. На основе решения теоретической задачи по определению реализуемости совмещенной прокатки-прессования с применением метода баланса мощностей и с использованием компьютерной модели определены проектные параметры оборудования, деформационные и температурно-скоростные условия обработки, позволяющие реализовать процесс в устойчивом режиме и получать деформированные полуфабрикаты из сплавов системы Al-Zr с требуемым уровнем механических и электрических свойств.

2. С помощью программного комплекса DEFORM[®] 3D созданы компьютерные модели и проведено моделирование процесса СПП и совмещенной обработки с последующей интенсивной пластической деформацией, что позволило выбрать технологические параметры для экспериментальных исследований и получить опытные партии катанки с ультрамелкозернистой структурой и высокими прочностными характеристиками.
3. Разработаны новые устройства для совмещенной обработки алюминиевых сплавов, защищенные 7 патентами РФ, которые позволяют за счет усовершенствования их конструкции, формы и способов охлаждения инструмента повысить производительность процесса и увеличить выход годного металла.
4. С использованием новых технических решений сконструирована и изготовлена лабораторная установка СЛиПП-2,5, для которой на основании аналитической оценки силовых условий процесса предложено применение дополнительного компенсирующего устройства в виде вертикального гидроцилиндра, позволяющего исключить неравномерное силовое воздействие на рабочий инструмент во время работы установки, и гарантирующего регламентируемую толщину зазора между валками и матрицей.
5. С использованием способов совмещенной прокатки-прессования и совмещенного литья и прокатки-прессования проведены экспериментальные исследования по получению длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-Zr и изучению влияния режимов приготовления и обработки, а также химического состава сплавов на их структуру, механические и электрофизические свойства, на основании которых подготовлен технологический регламент производства катанки из алюминия и его сплавов.
6. Получены опытные партии катанки и проволоки, соответствующие требованиям международных стандартов, которые характеризуются высокой технологичностью обработки при холодной деформации металла, отсутствием промежуточных отжигов, удовлетворительной термостойкостью и электропроводностью.
7. На основании проведенных экспериментальных исследований по получению деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-Zr рекомендованы для промышленного внедрения сплавы с содержанием циркония и железа на уровне 0,15-0,20% Zr и 0,10-0,15% Fe для изготовления проволоки типа АТ1 по стандарту ИЕС 62004 без термической обработки, а также 0,25-0,30% Zr и 0,2-0,25% Fe для состояния проволоки АТ3 с термической обработкой.
8. Деформированные полуфабрикаты, полученные способом совмещенной прокатки-прессования отличаются повышенными прочностными характеристиками и достаточной технологичностью при дальнейшей холодной обработке, а прутки и проволока, полученные способом совмещенного литья, прокатки и прессования, обладают более высокими пластическими свойствами и электропроводностью.

9. Сочетание при обработке сплавов системы Al-Zr методов совмещенной обработки и способов интенсивной пластической деформации позволяют добиться дополнительного повышения прочностных характеристик деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-Zr и достичь при изготовлении проволоки требований стандарта ИЕС 62004 по типу АТ2.

10. Результаты исследований внедрены в учебный процесс СФУ и проходят промышленную апробацию на установке СЛиПП в условиях Иркутского алюминиевого завода.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ

1. **Беспалов, В.М.** Исследование структуры и свойств литых и деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-Zr, полученных совмещенными методами литья и прокатки-прессования / В.А. Падалка, Н. Н. Довженко, С. Б. Сидельников, В.С. Биронт [и др.] // Литейщик России, Москва, 2011. – №.5. – С. 33-36 (издание, рекомендуемое ВАК).

2. **Беспалов, В.М.** Исследование структуры металла и оценка свойств опытных образцов из сплава системы Al-Zr для производства электропроводников с помощью методов литья и обработки давлением / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, Л.П. Трифоненков, М.В. Первухин [и др.] // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. Магнитогорск, 2012. – №.1. – С. 51-55 (издание, рекомендуемое ВАК).

3. **Беспалов, В.М.** Совершенствование конструкции опытно-промышленной установки СЛИПП-2,5 / Н.Н. Довженко, С.Б. Сидельников, С.В. Беляев, С.В. Солдатов [и др.] // Журнал Сибирского Федерального университета. Серия: техника и технологии. Красноярск, 2012. – Т.5 – №7. – С. 817-828 (издание, рекомендуемое ВАК).

4. **Беспалов, В.М.** Сравнительная оценка прочностных характеристик деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-Zr, полученных по разным схемам совмещенной обработки / С.Б. Сидельников, Н.Н. Загиров, Э.А. Рудницкий, Е.С. Лопатина, В.М. Беспалов // Цветные металлы. Москва, 2013. – №.1. – С. 86-90 (издание, рекомендуемое ВАК).

5. **Беспалов, В.М.** Исследование механических свойств новых сплавов алюминия с переходными металлами / В.М. Беспалов, Р.Е. Соколов, А.С. Сидельников // Молодежь и наука: материалы НТК. – Красноярск: Сибирский Федеральный ун-т, 2011. – Т.3. – С. 161-165.

6. **Беспалов, В.М.** Исследование структуры и свойств прутков из низколегированных сплавов системы Al-Zr / В.М. Беспалов, А.Л. Трифоненков, Л.С. Шадрин // XII Международной научно-технической конференции Уральская школа-семинар молодых ученых – металловедов: сб. научных трудов. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – С. 202-204.

7. **Беспалов, В.М.** Опытнo-промышленное освоение производства катанки из алюминиево-циркониевых сплавов / Л.П. Трифоненков, Н.Н. Дов-

женко, С.Б. Сидельников [и др.] // Цветные металлы – 2011: сб. докладов третьего международного конгресса. – Красноярск: ООО «Версо», 2011. – С. 560-564.

8. **Беспалов, В.М.** Исследование структуры и свойств литых и деформированных полуфабрикатов из низколегированных сплавов системы Al-Zr с различным содержанием железа и циркония / Н.Н. Довженко, С.Б. Сидельников, Л.П. Трифоненков, В.Н. Баранов [и др.] // Цветные металлы – 2012: сб. докладов четвертого международного конгресса. – Красноярск: ООО «Версо», 2012. – С. 700-703.

9. **Беспалов, В.М.** Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства проволоки из сплавов системы Al-Zr / В.А. Бернгардт, О.В. Федорова, В.М. Беспалов // XIII Международная научно-техническая Уральская школа-семинар молодых ученых – металлургов: сб. научных трудов. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 326-328.

10. **Беспалов, В.М.** Исследование возможности повышения эффективности производства электропроводников из алюминиевых сплавов / С. Б. Сидельников, В.М. Беспалов, Л.П. Трифоненков [и др.] // Дни науки: сб. научных трудов по итогам VIII Международной научно-практической конференции: Технические науки / Издательский дом «Education and Science». Прага, 2012. – Ч.89 – С. 34-38.

11. **Беспалов, В.М.** Проектирование модельной установки совмещенной обработки алюминиевых сплавов / Н.Н. Довженко, С.Б. Сидельников, С.В. Солдатов, Л.П. Трифоненков [и др.] // Механическое оборудование металлургических заводов: межрегион. сб. научных трудов / под ред. Корчунова А.Г. – Магнитогорск: изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2012. – С. 12-16.

12. **Беспалов, В.М.** Исследование влияния вида и режима обработки на свойства деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения / О.В. Федорова, В.А. Бернгардт, В.М. Беспалов // XIII Международная научно-техническая Уральская школа-семинар молодых ученых – металлургов: сб. научных трудов. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С.268-270.

13. **Беспалов, В.М.** Технологические режимы волочения проволоки из сплава системы алюминий-цирконий / Э.А. Рудницкий, В.М. Беспалов, А.А. Роговой, А.Л. Трифоненков // Цветные металлы – 2012: сб. докладов четвертого конгресса. – Красноярск: ООО «Версо», 2012. – С. 842-845.

14. **Беспалов, В.М.** Исследование способов получения и свойств катанки из сплавов алюминия с переходными и редкоземельными металлами на установке совмещенного литья, прокатки и прессования / Н.Н. Довженко, С.Б. Сидельников, Л.П. Трифоненков, С.В. Солдатов [и др.] // Обработка сплошных и слоистых материалов: межвуз. сб. научных трудов / под ред. проф. М.В. Чукина. – Магнитогорск: изд-во МГТУ, 2012. – В.38. – С. 6-10.

15. **Bespalov, V.M.** Research of properties and thermal stability of deformed semi-finished products from alloys system Al-Zr obtained with using combined methods of metal forming / S.B. Sidelnikov, N.N. Dovzhenko, V.I. Kirko [et al.] // XIV International scientific conference «New technologies and achievements in

metallurgy, materials engineering and production engineering» / A collective monograph edited by dr. hab. inz. Agata Dudek, prof. PCz. V.2, Series: Monograph № 31, Czestochowa, 2013. – P.157-160.

16. **Беспалов, В.М.** Исследование технологии изготовления проволоки электротехнического назначения с повышенными эксплуатационными свойствами / О.В. Федорова, В.А. Бернгардт, В.М. Беспалов // XIV Международная научно-техническая Уральская школа-семинар молодых ученых – металлургов: сб. научных трудов. – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – С. 250-252.

17. **Беспалов, В.М.** Совершенствование конструкции установок совмещенной обработки алюминия и его сплавов / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, С.В. Солдатов [и др.] // Механическое оборудование металлургических заводов: межрегион. сб. научных трудов / под ред. Корчунова А.Г. –Магнитогорск: изд-во МГТУ им. Г.И. Носова, 2013. – В.2. – С. 7-12.

18. **Беспалов, В.М.** Исследование влияния химического состава и параметров литья на свойства полуфабрикатов электротехнического назначения / О.В. Федорова, В.М. Беспалов, В.А. Бернгардт, Т.Н. Дроздова // Молодежь и наука: сб. материалов X Юбилейной Всероссийской НТК студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием [Электронный ресурс] – Красноярск: Сибирский Федеральный ун-т, 2014.

19. **Беспалов, В.М.** Исследование свойств катанки из сплавов системы Al-Zr, полученной совмещенными методами литья и ОМД / А.Л. Трифоненков, В.М. Беспалов // Молодежь и наука: сб. материалов X Юбилейной Всероссийской НТК студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием [Электронный ресурс]. – Красноярск: Сибирский Федеральный ун-т, 2014.

20. **Беспалов, В.М.** Разработка составов сплавов Al-Zr-Fe для изготовления термостойких проводов линий электропередачи / В.А. Бернгардт, Т.Н. Дроздова, Л.П. Трифоненков, В.Ф. Фролов, О.В. Федорова // Цветные металлы – 2014: сб. докладов шестого международного конгресса. – Красноярск: ООО «Версо», 2014. – С. 1061-1066.

21. **Беспалов, В.М.** Исследование влияния интенсивной пластической деформации на структуру и физико-механические свойства полуфабрикатов электротехнического назначения из алюминиевых сплавов с переходными и редкоземельными металлами / С.Б. Сидельников, Г.И. Рааб, М.Ю. Мурашкин, Л.П. Трифоненков [и др.] // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: междунар. сб. научных трудов / под ред. В.М. Салганика. – Магнитогорск: изд-во МГТУ, 2014.– С. 12-20.

22. **Беспалов, В.М.** Разработка новых устройств и способов совмещенной обработки для получения электротехнической катанки из алюминиевых сплавов системы Al-Zr / С.Б. Сидельников, В.М. Беспалов // Цветные металлы – 2014: сб. докладов шестого международного конгресса. – Красноярск: ООО «Версо», 2014. – С. 1229-1237.

23. Пат. 2429943 Российская Федерация, МПК В22F3/18. Устройство для получения проволоки и профилей из некомпактных материалов / С.Б. Сидельников, Н.Н. Загиров, Е.В. Иванов, **В.М. Беспалов**; опубл. 27.09.2011.
24. Пат. 119267 Российская Федерация, МПК В2123/00. Устройство для непрерывной прокатки и прессования профилей / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, С.В. Беляев, **В.М. Беспалов** [и др.]; опубл. 20.08.2012 Бюл. № 23.
25. Пат. 122315 Российская Федерация, МПК В21С23/00. Устройство для непрерывной совмещенной прокатки и прессования длинномерных изделий / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, С.В. Беляев, **В.М. Беспалов** [и др.]; опубл. 27.11.2012 Бюл. №33.
26. Свидетельство 2012611852 Российская Федерация. Моделирование температурно-скоростных режимов при совмещенном литье и прокатке прессовании цветных металлов и сплавов / Н.Н. Довженко, С.В. Беляев, Н.Н. Загиров, **В.М. Беспалов** [и др.]; опубл. 17.02.2012.
27. Пат. 2486027 Российская Федерация, МПК В22D11/06. Устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования катанки / Н.Н. Довженко, С.Б. Сидельников, С.В. Беляев, **В.М. Беспалов** [и др.]; опубл. 27.06.2013.
28. Пат. 128529 Российская Федерация, МПК В22D11/06. Устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования цветных металлов и сплавов / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, С.В. Беляев, **В.М. Беспалов** [и др.]; опубл. 27.05.2013.
29. Пат. 138590 Российская Федерация, МПК В21С23/08. Устройство для непрерывной прокатки и прессования изделий из цветных металлов и сплавов / С.Б. Сидельников, **В.М. Беспалов**, Н.Н. Довженко [и др.]; опубл. 20.03.2014.
30. Пат. 139085 Российская Федерация, МПК В21С23/08. Устройство для непрерывной прокатки и прессования катанки из цветных металлов и сплавов / С.Б. Сидельников, **В.М. Беспалов**, Н.Н. Довженко [и др.]; опубл. 10.04.2014.

Подписано в печать 13.01.2015. Печать плоская. Формат 60x84/16
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1.0. Тираж 100 экз. Заказ 2055

Отпечатано полиграфическим центром
Библиотечно-издательского комплекса
Сибирского федерального университета
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 82а
Тел./факс: 8(391)206-26-67, 206-26-49
E-mail: print_sfu@mail.ru; <http://lib.sfu-kras.ru>