

На правах рукописи

Федорова

Федорова Ольга Викторовна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДОВ И РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ НА
СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЛИТЫХ И ДЕФОРМИРОВАННЫХ
ПОЛУФАБРИКАТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ
ИЗ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ АЛЮМИНИЙ–ЦИРКОНИЙ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание

степени магистра по направлению **Металлургия (150400.68)**

магистерская программа – **Обработка давлением металлов и сплавов
(150400.68.03)**

Красноярск 2014

Работа выполнена на кафедре обработки металлов давлением Института цветных металлов и материаловедения Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор Довженко Николай Николаевич

Рецензент:

Богданова Т. А., начальник металлургического отдела ООО «КиК»

Защита диссертации состоится «9» июля 2014 г. в 9:00 часов в ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу:
660025, г. Красноярск, пр. Красноярский рабочий, 95, ауд. 104 л.

С авторефератом магистерской диссертации можно ознакомиться на сайте СФУ <http://edu.sfu-kras.ru/engineering> и в архиве открытого доступа: <http://elib.sfu-kras.ru>

Руководитель магистерской программы:

доктор технических наук,
профессор



С. Б. Сидельников

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Рост потребления электроэнергии обуславливает повышение требований потребителей к электрическим, механическим и эксплуатационным свойствам проволоки, используемой в силовых кабелях и проводах токопроводящих жил.

Основным российским производителем катанки электротехнического назначения является ОК РУСАЛ. На заводах ОК РУСАЛ изготавливают катанку из алюминия (ГОСТ 13843–78) и сплава АВЕ (ГОСТ 20967–75). Важным свойством технически чистого алюминия является его высокая электропроводность, однако наряду с этим он обладает сравнительно низкими прочностными свойствами. Сплавы системы Al–Mg–Si в термоупрочненном состоянии характеризуются более высокими прочностными свойствами и повышенным удельным электрическим сопротивлением. В последнее время наблюдается повышенный интерес к перспективным термически стабильным сплавам Al–Zr, которые сохраняют высокую электропроводность и прочность в процессе эксплуатационных нагревов, вплоть до температуры 310 °С.

В настоящее время в России не существует алюминиевых сплавов, изготавливаемых в промышленных масштабах, которые бы удовлетворяли требованиям международных стандартов. Поэтому для производителей катанки и проволоки в условиях повышающихся требований к электропроводным материалам наиболее остро встала проблема создания новых сплавов и технологии получения из них электротехнических полуфабрикатов на действующем промышленном оборудовании.

Оптимизация технологии получения катанки электротехнического назначения с заданным в международных стандартах комплексом свойств обуславливает потребность изучения закономерностей влияния состава сплава и технологических режимов литья, деформационно–термической обработки на структуру и свойства. Установлению таких закономерностей и посвящена магистерская диссертация.

Магистерская диссертация выполнена при реализации государственной программы поддержки развития кооперации и использования субсидий ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» и ООО «РУСАЛ ИТЦ», совместно участвующих в рамках договора №13.G25.31.0083 с Министерством образования и науки России в выполнении комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства по теме «Разработка технологии получения алюминиевых сплавов с редкоземельными, переходными металлами и высокоэффективного оборудования для производства электротехнической катанки».

Цель работы

Исследование влияния видов и режимов обработки литых и деформированных полуфабрикатов для получения повышенного комплекса эксплуатационных свойств в соответствии с международными стандартами ASTM B 941–05 и IEC 62004–09.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Исследование влияния перспективных технологий получения катанки электротехнического назначения на структуру и свойства, выбрать ресурсосберегающую технологию.

2. Исследовать влияние концентрации легирующих элементов, параметров литья и термической обработки (ТО) на свойства катанки, рекомендовать перспективный состав сплава, режим литья и ТО.

3. Рассчитать маршрут холодного волочения проволоки, формоизменения и энергосиловых параметров.

4. Провести опытно–промышленное опробование рекомендованных режимов для получения катанки и проволоки, удовлетворяющих требованиям международных стандартов ASTM B 941–05 и IEC 62004–07.

Объект исследования

Объектами исследования являются технологии производства катанки и проволоки из опытных сплавов Al–(0,12–0,36)%Zr–(0,20–0,28)%Fe.

Предмет исследования

Методы и способы повышения свойств деформированных полуфабрикатов с применением энергоэффективной деформационно-термической обработки и достижения свойств в соответствии с требованиями международных стандартов ASTM B 941–05 и IEC 62004–07.

Научная новизна работы

1. Показано, что достижение максимальных значений прочности и электропроводности катанки из сплавов Al–(0,12–0,36)%Zr–(0,20–0,28)%Fe обеспечивает способ совмещенной прокатки–прессования.

2. Выявлено, что при температуре расплава 900 °С и температуре литья 800 °С цирконий полностью растворяется в твердом растворе, образуя максимально пересыщенный твердый раствор, снижение температуры расплава до 800 °С приводит к нежелательному выделению первичных кристаллов фазы Al₃Zr.

3. На основании изучения закономерностей изменения свойств катанки от концентрации циркония, были получены следующие зависимости. Изменение удельного электрического сопротивления (далее по тексту УЭС) описывается уравнением $\rho_{20}=0,028+0,0179 \cdot c_{Zr}$; изменение временного сопротивления разрыву описывается уравнениями $\sigma_b=103,6+112,1 \cdot c_{Zr}$ и $\sigma_b=145,8-12,3 \cdot c_{Zr}$ (для сплавов с 0,20% и 0,28% Fe, соответственно).

4. С использованием расчетных и экспериментальных методов обоснованы технологические параметры производства алюминиевой катанки сплава Al–0,27%Zr–0,20%Fe способом совмещенной прокатки–прессования и волочения.

Практическая значимость работы

1. Рекомендован сплав Al–0,27%Zr–0,20%Fe, позволяющий достичь в деформированных полуфабрикатах механических свойств и УЭС, регламентированных в международных стандартах ASTM B 941–05 и IEC 62004–09.

2. Разработаны технологические рекомендации по производству алюминиевой катанки и проволоки из сплава Al–0,27%Zr–0,20%Fe способом совмещенной прокатки–прессования и волочения.

3. Опытнo–промышленное опробование рекомендованных режимов изготовления катанки и проволоки позволило достичь требований термостойкости АТ1 и АТ3 в соответствии со стандартом IEC 62004–07.

Место выполнения диссертации

Диссертация выполнена на кафедре обработки металлов давлением в Институте цветных металлов и материаловедения ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», совместно с кафедрами материаловедения и термической обработки, литейного производства и ООО «РУСАЛ ИТЦ».

Место международной стажировки

В рамках научно–исследовательской деятельности была пройдена стажировка в Международной Академии менеджмента и технологий (INTAMT) г. Дюссельдорф, Германия. В Университете прикладных наук (Fachhochschule Düsseldorf) были изучены передовые методы пробоподготовки, изучения структуры и свойств материалов на оборудовании фирмы Carl Zeiss под руководством Андреаса Шмидта.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Содержит 144 страницы машинописного текста, 40 рисунков, 32 таблицы, 26 формул, библиографический список из 63 позиций.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Обзор литературы

В данном разделе рассмотрены основные методы получения деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов, в том числе современные энергоэффективные способы совмещенной обработки давлением.

Проанализированы сплавы электротехнического назначения, изготавливаемые в России и за рубежом. На основании научных исследований отечественных и зарубежных ученых обоснован выбор циркония для легирования проводниковых алюминиевых сплавов.

2. Методика исследования

Низколегированные алюминиевые сплавы с добавками циркония выплавляли в высокочастотной плавильной установке. Для приготовления сплавов использовали цирконий в виде брикетов фирмы HOESH. Лигатуру вводили под зеркало расплава при температурах ~ 900 °С.

Для исследований применяли следующие технологические схемы получения катанки диаметром 9 мм: горячая сортовая прокатки (ГСП) осуществлялась на стане Ambifilo Veloce Rosen» (Mario Di Maio, Италия);

совмещенная прокатка-прессование (СПП) литой заготовки осуществлялась на экспериментальной установке совмещенной обработки, смонтированной на базе прокатного стана дуо 200; совмещенное литье и прокатка-прессование (СЛИПП) прессование проводили на экспериментальной установке с использованием устройства для непрерывного литья, прокатки и прессования металла. Проволоку диаметрами 2–4,5 мм получали холодным волочением на цепном стане однократного действия.

УЭС катанки и проволоки измеряли с помощью омметра «ВИТОК» в соответствии с ГОСТ 7229–76. Испытание на растяжение катанки и проволоки проводили на машине Walter + Bai AG, Швейцария, в соответствии с ГОСТ 1497–84. Термическую обработку катанки проводили в электропечах LAC PK10–1000/12 и LAC PP20–540. Исследование микроструктуры сплавов осуществляли на микроскопе Carl Zeiss Axio Observer A1m.

Испытания на термостойкость проводили в соответствии с IEC 62004–09. Термостойкость проволоки из исследуемых сплавов оценивали по изменению временного сопротивления разрыву при комнатной температуре после нагрева до температур 230, 280 и 400 °С и выдержке в течение часа.

3. Выбор ресурсосберегающей технологии изготовления катанки и проволоки электротехнического назначения

В третьей главе магистерской диссертации проводили оценку влияния способов обработки давлением на свойства деформированных полуфабрикатов. Исследования проводили на сплаве Al–0,15%Zr, который имеет минимальное УЭС и максимальный предел прочности.

Анализ изменения предела прочности и УЭС деформированных полуфабрикатов позволил выявить, что катанка, полученная методом ГСП и СЛИПП, не удовлетворяет требованиям ASTM B 941–05 и впоследствии не обеспечивает получение свойств в проволоке, требуемых в IEC 62004–09. Установлено, что высокий комплекс механических и электрофизических свойств деформированных полуфабрикатов достигается при изготовлении катанки методом СПП, рисунок 1.

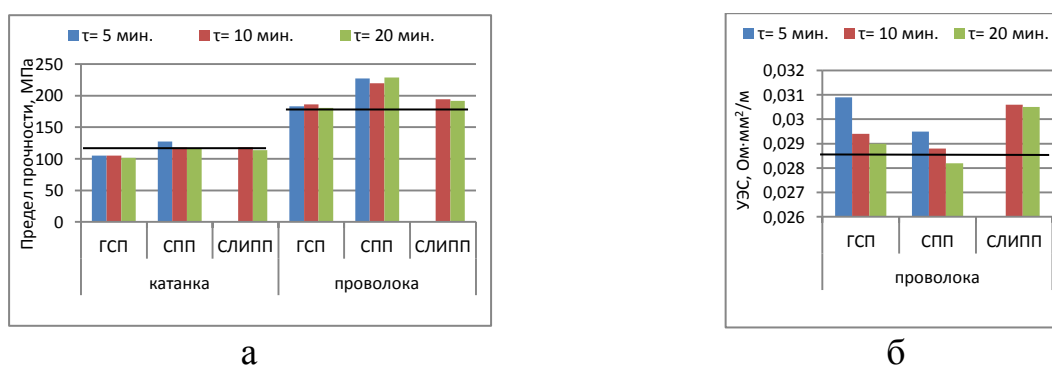


Рисунок 1 – Зависимость предела прочности (а) и УЭС (б) катанки и проволоки от технологии изготовления катанки, времени выдержки расплава и температуры литья

На основании выше изложенного рекомендовано для изготовления деформированных полуфабрикатов, удовлетворяющих требованиям

международных стандартов, использовать метод СПП, который позволяет достичь в проволоке из сплава Al–0,15%Zr максимальных значений прочности и электропроводности. Однако исследуемый сплав не обеспечивает необходимую термостойкость, регламентируемую стандартом IЕС 62004–09. Поэтому дальнейшие исследования были направлены на отработку состава сплава и режимов его приготовления.

4. Исследование влияния легирующих элементов и режимов обработки на структуру и свойства катанки из сплавов системы Al–Zr–Fe

В данной главе проводили анализ влияния концентрации циркония и железа на механические свойства и УЭС катанки, рисунок 2. Цирконий вводили для повышения термостойкости сплавов, а железо— для увеличения прочностных свойств деформированных полуфабрикатов.

Было установлено, что исследуемая катанка, изготовленная из сплавов Al–(0,12–0,36)%Zr–(0,20–0,28)%Fe не соответствует требованиям стандарта ASTM В 941–05 по значениям УЭС, рисунок 2, а. Кроме того, катанка с низким содержанием циркония не удовлетворяет по временному сопротивлению разрыву, рисунок 2, б.

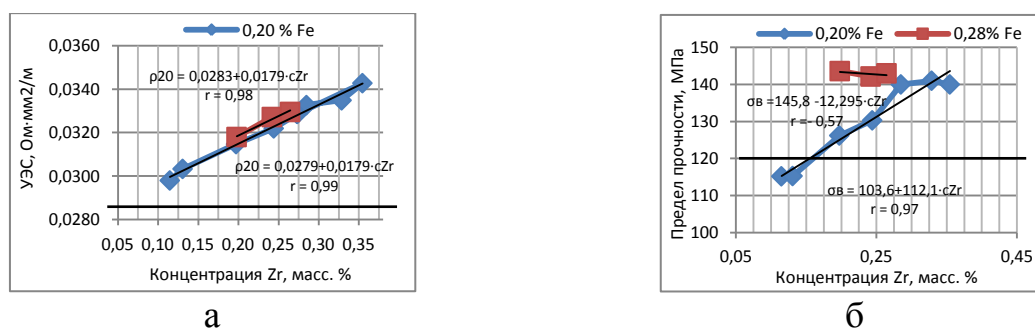


Рисунок 2– Зависимость УЭС (а) и временного сопротивления разрыву (б) катанки от концентрации циркония и железа в сплаве, где c_{Zr} –концентрация циркония в сплаве; r –коэффициент корреляции

Анализ зависимостей позволил выявить, что с повышением концентрации циркония УЭС растет, наблюдается прямолинейная зависимость, рисунок 2, а. Такое закономерное повышение УЭС с ростом концентрации циркония подтверждает, что он растворяется в алюминии. В сплавах с 0,2 % Fe повышение циркония от 0,12 до 0,30 масс.% приводит к росту временного сопротивления разрыву, дальнейшее увеличение концентрации циркония до 0,36 масс.% не приводит к изменению прочностных свойств. Повышение концентрации железа до 0,28 % в сплавах Al–(0,20–0,27)%Zr нивелирует влияние циркония на прочностные свойства катанки (рисунок 2, б). Были получены уравнения, описывающие зависимость временного сопротивления разрыву и УЭС от концентрации циркония в сплаве. Изменение УЭС характеризуется уравнением $\rho_{20}=0,028+0,018 \cdot c_{Zr}$, рисунок 2, а. Зависимость изменения временного сопротивления разрыву описывается уравнениями $\sigma_B=103,6+112,1 \cdot c_{Zr}$ и $\sigma_B=145,8-12,3 \cdot c_{Zr}$ (для сплавов с 0,20% и 0,28% Fe, соответственно), рисунок 2, б. На основании исследований механических и

электрофизических свойств катанки из сплавов $Al-(0,12-0,36)\%Zr-(0,20-0,28)\%Fe$ выбраны сплавы $Al-(0,27-0,3)\%Zr-(0,2-0,28)\%Fe$, обеспечивающий высокий комплекс свойств.

Цирконий способен образовывать пересыщенный твердый раствор при литье, однако температура приготовления расплава должна быть существенно выше по сравнению с обычной технологией. Поэтому исследовали влияние температуры расплава и заливки расплава на структуру и свойства катанки из сплавов $Al-0,30\%Zr-(0,15-0,20)\%Fe$. Температура приготовления расплава составляла 800 и 900 °С, а температура литья – 800 и 900 °С. Исследовали катанку, полученную методом СПП.

Было установлено, что предел прочности катанки из исследуемых сплавов $Al-0,30\%Zr-(0,15-0,20)\%Fe$ составляет 135–148 МПа, относительное удлинение катанки 15–25 %, что значительно выше требований стандарта ASTM B 941–05. Выявлено, что температура расплава и заливки в исследуемом интервале не оказывает существенного влияния на механические свойства катанки. УЭС катанки составляет 0,0314–0,0334 Ом·мм²/м, что не соответствует требованиям ASTM B 941–05. С увеличением температуры расплава с 800 до 900 °С удельное электросопротивление возрастает.

При температуре расплава и литья 800 °С в микроструктуре катанки обнаружены первичные кристаллы Al_3Zr . Выделение первичных кристаллов Al_3Zr свидетельствует о том, что введенный цирконий не полностью растворяется в твердом растворе. Ободевание твердого раствора по цирконию, из-за выделения первичных кристаллов, обеспечивает снижение уровня УЭС. При температуре расплава 900 °С и литья 800–900 °С цирконий полностью растворяется в твердом растворе, образуя максимально пересыщенный твердый раствор, что приводит к высоким значениям УЭС катанки.

Таким образом, для получения качественной литой заготовки выбрали сплавы $Al-0,27\%Zr-0,20\%Fe$, с повышенным содержанием циркония, который впоследствии позволит обеспечить сохранение требуемой прочности и термостойкость проволоки. Рекомендована температура расплава 900 °С и температура литья не менее 800 °С.

5. Расчет режимов обжатий при волочении проволоки для сплавов системы Al – Zr

В пятой главе выполнены расчеты холодного волочения, формоизменения и энергосиловых параметров по методикам В.И. Непомнящего и В. Н Истомина. Рекомендуются коэффициенты запаса по выше приведенным методикам находятся в интервале 1,4–2,0.

По методике В.И. Непомнящего коэффициенты запаса получились достаточно большие от 1,96 до 4,69, по методике В. Н Истомина коэффициенты запаса находятся в интервале 1,6–2,4. Волочение по рассчитанным маршрутам не вызвало никаких затруднений на практике, поэтому было принято решение сократить маршрут волочения с целью приблизить коэффициент запаса к рекомендуемому интервалу. Полученные значения коэффициента запаса во всех переходах находятся в интервале 1,4–2,13. Волочение по маршруту в 10 переходов протекало стабильно без обрывов.

По результатам испытаний на растяжение была построена графическая зависимость временного сопротивления разрыву от степени деформации для сплавов системы Al–Zr, рисунок 3.

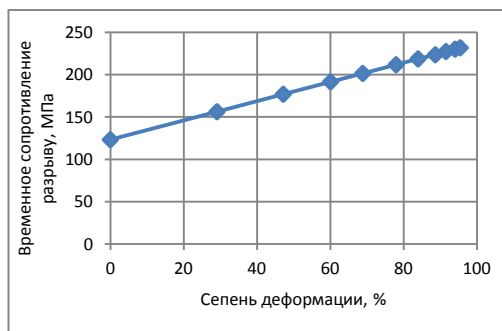


Рисунок 3 – Зависимость временного сопротивления разрыву сплавов системы Al–Zr от степени деформации

Полученный в результате расчетов маршрут волочения в 10 переходов был неоднократно использован и подтвержден на практике.

6. Опытно-промышленное опробование технологии изготовления катанки для получения термостойкой проволоки

В заключительной главе рассмотрены способы достижения термостойкости проволоки. Для этого изготовили катанку по рекомендованному режиму на Иркутском алюминиевом заводе из рекомендованного сплава Al–0,27%Zr–0,20%Fe со следующими свойствами: $\sigma_B=147$ МПа, $\rho_{20}=0,03287$ Ом·мм²/м, $\delta=6$ %.

Для снижения удельного электрического сопротивления катанку перед волочением подвергали двухступенчатому гетерогенизирующему отжигу по режиму: первая ступень – нагрев до температуры 350 °С, выдержка 48 ч + вторая ступень, при которой уменьшилась концентрация легирующих элементов в твердом растворе за счет распада пересыщенного цирконием твердого раствора с выделением наноразмерных частиц метастабильной фазы Al₃Zr. Отжиг позволил снизить УЭС катанки до 0,02824 Ом·мм²/м, при этом снизился предел прочности до 127 МПа и повысилось относительное удлинение до 16 %. Значения свойств катанки после отжига соответствовали требованиям стандарта ASTM B 941–05.

На завершающем этапе проводили опытнo-промышленные испытания проволоки на термостойкость, изготовленной из отожженной катанки сплава Al–0,27%Zr–0,20%Fe. Испытания осуществляли на кабельном заводе ОАО «Иркутсккабель» на соответствие типам термостойкости АТ1, АТ3 и АТ4. Для этого катанку волочили до диаметров проволоки 4,5, 3,8 и 2,1 мм. Требования по температуре испытаний, а так же по механическим свойствам проволоки приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Требования значений термостойкости проволоки из теплостойкого алюминиевого сплава

Тип	T_n , °C, в теч. 1 ч.	$T_{\text{доп.экс}}$ °C, в теч. 400 ч.	$T_{\text{экс}}$ °C, в теч. 40 лет	R_{20} , нОм·м, не более	σ_B , МПа, не менее	δ , %, не менее
AT1	230	180	150	28,735	159–169	1,5–2,0
AT2	230	180	150	31,347	225–248	1,5–2,0
AT3	280	240	210	28,735	159–176	1,5–2,0
AT4	400	310	230	29,726	159–169	1,5–2,0

T_n – температура нагрева при испытании в течение 1 ч, °C; $T_{\text{доп.экс}}$ – допустимая температура эксплуатации в течение 400 ч (°C), не менее; $T_{\text{экс}}$ – допустимая непрерывно действующая температура эксплуатации 40 лет (°C), не менее.

Остаточный коэффициент напряжения при растяжении, измеренный при комнатной температуре, после нагрева проволоки до температуры, указанной в таблице 2, не должен быть менее 90 % в сравнении с первоначально измеренным значением. Результаты испытаний приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты испытаний на термостойкость сплава Al–0,27%Zr–0,20%Fe

Ø проволоки, мм	Исходное состояние σ_B , МПа	Температура нагрева 230 °C (AT1)		Температура нагрева 280 °C (AT3)		Температура нагрева 400 °C (AT4)	
		σ_B , МПа	α , %	σ_B , МПа	α , %	σ_B , МПа	α , %
4,5	167	164	98,2	167	100	151	90,4
3,8	172	171	99,4	166	96,5	154	89,5
2,1	199	199	100	192	96,5	167	83,9

α – остаточный коэффициент напряжения после нагрева, %.

Проведенные исследования термостойкости показали, что проволока из сплава Al–0,27% Zr–0,20%Fe соответствует типам AT1 и AT3 и находится на границе требований по типу AT4.

ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Исследование влияния современных технологий обработки металлов давлением позволило рекомендовать ресурсосберегающую технологию совмещенной прокатки–прессования для изготовления катанки из сплава системы Al–0,15%Zr, удовлетворяющей требованиям стандарта ASTM B 941–05.

2. На основании исследования влияния концентрации легирующих элементов на свойства катанки был выбран состав сплава Al–(0,27–0,3)%Zr–

(0,20–0,28)%Fe, обеспечивающий высокий комплекс механических и электрофизических свойств.

3. Установлено, что при температуре расплава 900 °С и температуре литья 800 °С цирконий полностью растворяется в твердом растворе, образуя максимально пересыщенный твердый раствор, снижение температуры расплава до 800 °С приводит к нежелательному выделению первичных кристаллов фазы Al_3Zr .

4. Выполненный расчет холодного волочения, формоизменения и энергосиловых параметров позволил определить маршрут волочения с оптимальными значениями коэффициента запаса 1,4–2,13.

5. Катанка, полученная по рекомендованному режиму на Иркутском алюминиевом заводе из сплава $Al-0,27\%Zr-0,20\%Fe$ после отжига удовлетворяет требованиям ИЕС 62004–07.

6. Проволока, изготовленная в производственных условиях ОАО «Иркутсккабель» из сплава $Al-0,27\%Zr-0,20\%Fe$, удовлетворяет требованиям международного стандарта ИЕС 62004–07 по типу проволоки АТ1 и АТ3 с допустимой непрерывно действующей температурой эксплуатации 150–210 °С в течении 40 лет, и находится на границе по типу АТ4.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. **О. В. Федорова**, В. А. Бернгардт «Разработка режимов отжига катанки из сплавов системы $Al-Zr$ для достижения заданного комплекса свойств» // Журнал Сибирского федерального университета, серия «Техника и технологии». Июль 2014 (том 7, № 4), **(принята в печать, издание, рекомендованное ВАК)**.

2. Пат. 139085 Российская Федерация, МПК⁷ В 21 С 23/08. Устройство для непрерывной прокатки и прессования катанки из цветных металлов и сплавов / **Федорова О. В.**, Сидельников С.Б., и др.; заявитель и патенто-обладатель ФГАОУ ВПО «Сибирский Федеральный Университет» В. – № 2013152037/02; заявл. 21.11.13; опубл. 10.04.14, Бюл. № 10. – 2 с.

АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ

1. **О. В. Федорова**, В. А. Бернгардт, В.М. Беспалов «Исследование влияния видов и режимов обработки на свойства деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения» // Сборник научных трудов XIII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов – молодых ученых. 2012. – С. 268–270.

2. **О. В. Федорова**, В. А. Бернгардт, В.М. Беспалов «Влияние режимов термической обработки на структуру и свойства проволоки из сплавов системы $Al-Zr$ » // Сборник научных трудов XIII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов – молодых ученых. 2012. – С. 326 – 328.

3. **О. В. Федорова**, В. А. Бернгардт, В.М. Беспалов «Исследование технологии изготовления проволоки электротехнического назначения с повышенными эксплуатационными свойствами» // Сборник научных трудов XIV Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлургов – молодых ученых. 2013. – С. 250 – 252.

4. **О. В. Федорова**, А. С. Сидельников «Исследование структуры и свойств литых и деформированных полуфабрикатов при совмещенной обработке сплавов системы Al-Zr» // Электронный сборник трудов конференции Молодёжь и наука IX. 2013. Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/thesis/s007/s007-024.pdf>

5. **О. В. Федорова**, В. А. Бернгардт, В.М. Беспалов «Research of influence of the type and processing modes on properties of the deformed semi-finished products of electrotechnical appointment from Al-Zr system alloys» // Электронный сборник трудов конференции Молодёжь и наука IX. 2013. Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/thesis/s082/s082-011.pdf>

6. **О. В. Федорова**, В. А. Бернгардт «Исследование влияние режимов термической обработки на структуру и свойства катанки из сплавов системы Al-Zr» // Электронный сборник трудов конференции Молодёжь и наука IX. 2013. Режим доступа: <http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2013/thesis/s007/s007-006.pdf>

7. **О. В. Федорова**, В. А. Бернгардт, В.М. Беспалов, Т. Н. Дроздова. «Исследование влияния химического состава и параметров литья на свойства полуфабрикатов электротехнического назначения// Электронный сборник трудов конференции Молодёжь и наука X. 2013. Режим доступа: http://conf.sfu-kras.ru/sites/mn2014/pdf/d03/s10/s10_015.pdf