#### ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

Bocnandb -

#### БЕСПАЛОВ Вадим Михайлович

# ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕЩЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ AI-Zr ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДЛИННОМЕРНЫХ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор СИДЕЛЬНИКОВ Сергей Борисович

#### ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ4
1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР
1.1. Современное состояние производства деформированных полуфабрикатов
электротехнического назначения из алюминия и его сплавов
1.2. Анализ свойств сплавов системы Al-Zr и особенностей технологии изготовле-
ния из них литых и деформированных полуфабрикатов19
1.3. Технологии и оборудование для производства деформированных полуфабри-
катов из алюминия электротехнического назначения
1.4. Выводы по главе
2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ45
2.1. Сплавы для проведения экспериментальных исследований
2.2. Изготовление опытных образцов методами совмещенной обработки47
2.3. Методика определения электрического сопротивления и исследование термо-
стойкости экспериментальных образцов
2.4. Методика исследования механических свойств образцов
2.5. Методика проведения металлографических исследований
3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОВМЕЩЕННОЙ ПРОКАТКИ-
ПРЕССОВАНИЯ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Zr
3.1. Теоретическое исследование условий реализации процесса совмещенной про-
катки-прессования на основе сопоставления активной и реактивной составляю-
щих уравнения баланса мощностей
3.2. Моделирование процесса совмещенной прокатки-прессования сплавов систе-
мы Al-Zr в программном комплексе DEFORM® 3D
3.3. Экспериментальные исследования структуры и свойств полуфабрикатов, по-
лученных из сплавов системы Al-Zr с применением совмещенной прокатки-
прессования
3.4. Новые технические решения для совершенствования процесса совмещенной
прокатки-прессования95

3.5. Выводы по главе	108
4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОВМЕЩЕННОГО ЛИТЬЯ И Г	ІРОКАТКИ-
ПРЕССОВАНИЯ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Zr	110
4.1. Аналитическая оценка силовых условий процесса СЛиПП при ра	зличных ва-
риантах прижима матрицы к валкам	110
4.2. Экспериментальные исследования структуры и свойств полуфаб	рикатов, по-
лученных из сплавов системы Al-Zr с применением совмещенного л	итья и про-
катки-прессования	120
4.3. Новые технические решения для совершенствования процесса со	вмещенного
литья и прокатки-прессования	123
4.4. Выводы по главе	129
5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКИ	и интен-
СИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ А	.l-Zr131
5.1. Моделирование процесса обработки сплавов системы Al-Zr с прим	иенением
процессов совмещенной обработки и интенсивной пластической дефор	рмации в
программном комплексе DEFORM® 3D	131
5.2. Экспериментальные исследования структуры и свойств полуфаб	рикатов, по-
лученных из сплава системы Al-Zr с применением процессов совмеш	енной обра-
ботки и интенсивной пластической деформации	137
5.3 Новые технические решения для реализации процессов совмещ	енной обра-
ботки и интенсивной пластической деформации металла	143
5.4. Выводы по главе	147
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	149
Список использованных источников.	152
Приложение А	170
Приложение Б.	171
Приложение В.	175
Приложение Г.	177
Приложение Д	180

#### **ВВЕДЕНИЕ**

В последнее время существенно возрастают объемы производства длинномерных полуфабрикатов из алюминия и его сплавов в виде катанки, прутков, профилей и проволоки. Так, например, объем производства катанки в России за последние пять лет вырос с 126 тыс. тонн до 250 тыс. тонн [1]. Основными потребителями такой продукции является электротехническая и кабельная отрасли промышленности [2, 3].

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 электропередачи в 1,5 – 2 раза при использовании старых опор. Другой причиной увеличения доли потребления алюминиевой катанки являются большие темпы роста цен на медь, которые на сегодняшний день в 4 раза выше цены на алюминий.

Наряду с экономическими преимуществами использования алюминия для производства силовых проводов, хорошо известны и его недостатки, сильно ограничивающие его применение в энергетике. В качестве материалов для проводов в России выпускают в основном катанку из алюминия марки А5Е и А7Е, имеющую низкие прочностные свойства (временное сопротивление разрыву в твердом состоянии до 98 МПа) и термостойкость. Недостаточная прочность и низкое сопротивление ползучести алюминиевой проволоки, изготовленной из такой катанки, даже при нормальной температуре эксплуатации под воздействием длительной нагрузки может привести к ее разрушению. При этом с увеличением рабочей температуры «ползучесть» алюминиевой проволоки повышается [3], что делает ее непригодной для изготовления термостойких проводов. Вместе с тем за рубежом для их изготовления успешно применяют сплавы системы A1-Zr, которые имеют сравнительно высокие прочностные свойства при длительно действующих рабочих температурах нагрева до 230°C.

Для изготовления алюминиевой катанки в России и за рубежом применяют литейно-прокатные агрегаты, имеющие высокую производительность и позволяющие получать ряд типоразмеров продукции различного диаметра. В России на сегодняшний день эксплуатируется 14 ЛПА [3], большая часть которых введена в эксплуатацию еще в 70-х годах прошлого столетия и не соответствует современному уровню оборудования. Прежде всего, это связано с недостаточной надежностью прокатных станов для производства катанки из высокопрочных электротехнических сплавов алюминия.

Эти обстоятельства делают актуальными исследования в области создания электротехнических сплавов системы Al-Zr, новых технологий их обработки и оборудования с целью получения длинномерных деформированных полуфабрикатов, имеющих повышенный уровень механических свойств и термостойкости при удовлетворительных характеристиках удельного электросопротивления.

В основу энергосберегающих технологий производства длинномерных изделий, разработанных на кафедре обработки металлов давлением института цветных металлов и материаловедения (ИЦМиМ) Сибирского федерального университета (СФУ), положено развитие и применение совмещенных процессов прокатки-прессования (СПП) и литья и прокатки-прессования (СЛиПП). Технологические особенности этих способов позволяют получать длинномерные деформированные полуфабрикаты с повышенным уровнем механических характеристик, выходом годного и снизить затраты на производство.

Исследования проводились в рамках выполнения проекта по Постановлению Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. №218 «О мерах государственной поддержке развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства». Результаты исследований используются при разработке технологии изготовления деформированных полуфабрикатов для производства электропроводов с заданным уровнем механических и электрофизических свойств в соответствии cдоговором Министерства образования И науки России №13.G25.31.0083 по созданию высокотехнологичного производства совместно с ОК «РУСАЛ» по теме «Разработка технологии получения алюминиевых сплавов с редкоземельными, переходными металлами и высокоэффективного оборудования для производства электротехнической катанки».

Учитывая актуальность существующей научной проблемы, 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 работы заключается в следующем:

- 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);

- 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;
- 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.

Практическую значимость имеют следующие результаты работы:

- 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;
- 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;
- 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;
- 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.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. В первой главе дана оценка современного состояния производства деформированных полуфаб-

рикатов из алюминия и его сплавов, приведен обзор свойств сплавов системы Al-Zr, выполнен анализ технологий и оборудования для получения из них продукции электротехнического назначения. Во второй главе описаны методики и оборудование для проведения экспериментальных исследований. 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. 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. Пятая глава посвящена изучению совместного применения процессов совмещенной обработки и интенсивной пластической деформации, что дает возможность получить ультрамелкозернистую структуру изделий и увеличить их прочность.

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.

Работа выполнена при научной консультации д-ра техн. наук, проф. Н.Н. Довженко.

#### 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

## 1.1. Современное состояние производства деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения из алюминия и его сплавов

Алюминий и его сплавы широко применяются практически во всех отраслях и во многом определяют развитие промышленности России. По данным ОК «РУСАЛ» за 2012 г. производство первичного алюминия составило 4,174 млн. тонн, из которых в переработку поступило 788 тыс. тонн (табл. 1.1) [1] и 900 тыс. тонн с учетом переработанных ломов привлекаемых с рынка [2]. Таким образом, большая часть произведенного металла направляется на экспорт, что негативно сказывается на развитии отечественной промышленности, особенно, если учитывать объемы импортных поставок деформированных полуфабрикатов из алюминия, которые составили в 2012 г. около 658 тыс. тонн. Поэтому актуальной задачей является расширение объемов глубокой переработки алюминия, для чего необходимо проводить научные исследования, направленные на совершенствование отечественных технологий, а также разработку новых материалов и технологий для производства конкурентоспособной продукции из алюминия и его сплавов.

Таблица 1.1 - Объемы поставки алюминия компанией ОК «РУСАЛ» различным отраслям промышленности СНГ в 2012 г. [2]

Отрасль	Потребление алюминия промышленностью стран СНГ, тыс. тонн						
промышленности	Армения	Белорус-	Казахстан	Россия	Украи-	Узбеки-	Bce-
промышленности	Армсния	сия			на	стан	ГО
Цветная металлур- гия (прокат)	27	-	-	265	-	-	291
Цветная металлур- гия (прессовки)	-	17	1	81	4	4	108
Кабельная	-	10	3	186	22	6	229
Автомобильная	-	2	-	69	-	-	71
Черная металлургия	-	-	3	42	-	-	46
Другие	-	1	-	41	-	-	43
Итого	27	30	7	684	27	11	788

Приведенные данные в таблице 1.1 показывают, что одним из основных потребителей алюминия в России является энергетика и кабельная промышленность. Доля потребления за 2012 г. составляет 29 % в отличие от мировой промышленности, которая потребляет около 10-15% катанки из алюминиевых электротехнических сплавов. В частности, в США объем производства катанки из алюминиевых сплавов составляет 50 тыс. тонн, при годовом производстве катанки 470 тыс. тонн. Аналогичная ситуация наблюдается и в Европе [3].

Динамика объемов переработки алюминия на предприятиях Ассоциации «Электрокабель», за период с 1990-2012 гг. показана на рис. 1.1 [4-7].

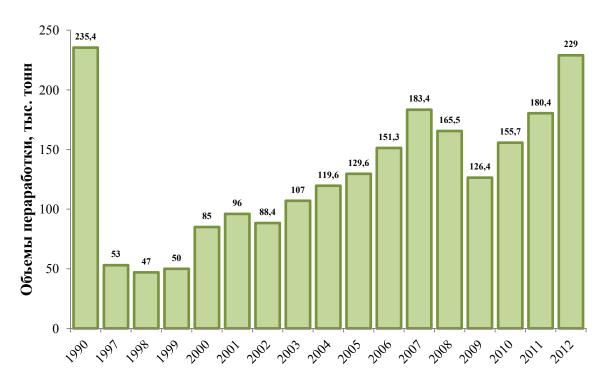


Рисунок 1.1 – Объем переработки алюминия на отечественных предприятиях (данные Ассоциации «Электрокабель» в 1990-2012 г)

Из графика видно, что на объем переработки сильно повлиял кризис в 1991 г, который привел к резкому снижению переработки в 4,5 раза. Затем про-изошел значительный спад во время мирового и экономического кризиса в 2009 г, порядка 24% по сравнению с предкризисным 2008 г. Однако, в остальное время наблюдается постепенный рост объемов переработки, стремящийся к пиковым объемам 235,4 тыс. тонн, достигнутым в 90-ом году прошлого века.

Большой спрос на алюминиевую кабельную продукцию вызван, прежде всего, активным строительством новых воздушных ЛЭП и подземных распределительных сетей, которое объясняется ежегодным увеличением объема потребления электроэнергии, составляющего по прогнозам разных экспертов в среднем около 2 - 3% в год по России [8-10]. В связи с этим растет нагрузка на электросети, что способствует повышению их износа. Общая протяженность электрических сетей из неизолированных проводов в России составляет порядка 2,3 млн. км, из которых 70% находится в изношенном состоянии. Такая ситуация приводит к частым сбоям передачи электроэнергии и, как следствие, ее дефициту в некоторых регионах, причем, основной причиной сбоев в 50 % случаях являются выход из строя, именно, проводов. Все вышеперечисленное создает большую общегодовую потребность в проводах, которая составляет более 100 тыс. км в год [9-14].

Исходя из анализа научно-технической литературы, в настоящее время для изготовления неизолированных силовых проводов ЛЭП на отечественных заводах, представленных в таблице 1.2, преимущественно используют алюминиевую катанку из сплавов технически чистого алюминия марок А5Е и А7Е диаметром 9 - 19 мм. В соответствии с ГОСТ 13843-78 катанка АКЛП, производимая на литейно-прокатных агрегатах (ЛПА), имеет сравнительно низкую прочность и удельное электросопротивление, равное 0,0282 Ом·мм²/м, что в 1,62 раза больше электросопротивления меди. При этом максимально возможная рабочая температура такой катанки не превышает 90 °С. Недостаток электропроводности, по сравнению с медными проводами, можно компенсировать увеличением токопроводящей жилы, однако такой прочности и термостойкости недостаточно, чтобы обеспечить надежную работу линий, исключающую обрывы. В связи с этим современные исследования направлены на поиск способов упрочнения и повышения термической устойчивости алюминиевой катанки [2, 3, 12, 15].

Для упрочнения алюминий легируют кремнием и магнием (сплавы марки ABE), что позволяет увеличить прочностные характеристики и термостойкость, но при этом существенно снижается электропроводность проволоки. К тому же, опубликованные данные свидетельствуют о том, что изготовление катанки из это-

го сплава в нашей стране производится в ограниченном количестве на заводе «Цветлит» (г. Саранск) способом непрерывного литья и прокатки в связи с жесткими требованиями по химическому составу, делающими сплав дорогим и более сложным в производстве [3, 12].

Таблица 1.2 – Производство алюминиевой катанки на отечественных заводах [3]

Завод		Количество	Производительность, тыс. тонн		
		ЛПА	ЛПА	Годовое	
				производство	
Иркутский алюминиевый завод	1966	6	5,0	150	
Братский алюминиевый завод	1971	4	5,0	100	
Кандалакшский алюминиевый завод	1972	1	3,0	15	
Красноярский металлургический завод	2006	1	5,0	10-15	
ВМС, г. Подольск	2005	1	2,0	8-10	
Цветлит, г. Саранск	2006	1	2,0	8-10	

Некоторые производственные мощности катанки из сплава ABE организованы на заводах «Кирскабель» путем прокатки слитков на полунепрерывном прокатном стане, «Москабельмет» и в Самарской кабельной компании способом прессования слитков в незначительных объемах. Однако добиться удовлетворительного качества катанки по этим технологиям довольно проблематично, вследствие, химической неоднородности и газовой пористости исходного слитка [12].

В общем итоге производственные мощности, существующие на отечественных предприятиях, составляющие порядка 300 тыс. тонн в год, значительно превышают объемы производства отечественной катанки (табл. 1.1, 1.2) из-за низкого на нее спроса, вызванного несоответствием ряду требований некоторых международных стандартов, что, в частности, касается и катанки АКЛП [3].

Одним из выходов в сложившейся ситуации на сегодняшний день является применение на отечественных кабельных заводах импортной катанки. Так в 2000 г. сплав АД31Е - аналог 6101, был включен в ГОСТ 4784, чем узаконено применение импортной катанки и проволоки в отечественных проводах. Проволока из сплавов 6101 и 6201 обладает повышенными прочностными свойствами (что позволяет наносить на провода изоляцию) и постепенно вытесняет оголенные провода из чистого алюминия. Тем не менее, электропроводность прово-

дов из этих сплавов значительно ниже и составляет порядка 86 % от чистого алюминия. При этом потребность в упрочненных самонесущих изолированных проводах для линий электропередач на напряжение 6-10 кВ в России по данным за 2012 г. составило порядка 8-10 тыс. т. в год [3, 12].

Наряду с оценкой возможности обработки сплавов для производства катанки, немаловажным следует считать и современное состояние отечественного оборудования. Данные по применению литейно-прокатных агрегатов на отечественных заводах приведены в табл. 1.2. Следует отметить, что данное оборудование физически устарело, кроме того оно не обладает всем необходимым комплексом оборудования, в частности, устройствами для подогрева катанки перед прокатным станом и охлаждения, обеспечивающими закалку готовой катанки перед подачей ее на моталку. Поэтому отечественные заводы вынуждены проводить модернизацию производственных мощностей путем замены существующего оборудования, причем преимущественно на импортное [3, 12].

В современной зарубежной практике алюминиевую катанку производят только на ЛПА, а в качестве основных материалов используются сплавы марок 1050, 1080, 1100, 1188, 1350, 5005, 5052, 5154A, 6063, 6101, 6201, 8176, химический состав которых приведен в работе [3]. Наиболее известными импортными производителями современных литейно-прокатных агрегатов являются фирмы Southwire (США), Continus-Properzi (Италия) и SMS-Group (Германия), на которых производится основная доля мировой катанки, создающие жесткую конкуренцию отечественным предприятиям [3, 16-18].

В связи с этим, наряду с необходимостью создания новых алюминиевых сплавов, не менее актуальной задачей является разработка нового оборудования и технологий для производства катанки с эксплуатационными характеристиками, отвечающими требованиям зарубежных и международных стандартов ASTM, IEC, CENELEC.

Произведенная катанка электротехнического назначения является заготовкой для производства способом холодного волочения проволоки различного диаметра, которая в дальнейшем идет на изготовление проводов. В качестве перспективных, с точки зрения повышения эксплуатационных характеристик, материалов для производства деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения большой потенциал имеют сплавы системы Al-Zr. Небольшие добавки циркония (до 0,4 %) в алюминиевый сплав приводят к значительному увеличению уровня механических характеристик проволоки, особенно при повышенных температурах ее эксплуатации, при сохранении удовлетворительной электропроводности [19-22].

Свойства длинномерных деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-Zr регламентируются стандартами ASTM B94-05 и IEC 62004-07. Исходя, из стандартов «Американского Общества по Испытаниям и Материалам» (ASTM), проволока для производства алюминиевых проводов должна изготавливаться из катанки, отвечающей требованиям, приведенным в таблице 1.3. При этом, наряду с регламентируемыми механическими характеристиками (табл. 1.4), проволока должна обладать высокой термостойкостью, то есть сохранять свою прочность под воздействием длительных повышенных температур на протяжении долгого периода времени [23].

Таблица 1.3 – Характеристики катанки из сплавов системы Al-Zr (ASTM) [23]

Характеристика	Значение
Временное сопротивление разрыву $\sigma_{e}$	120 МПа
Относительное удлинение $\varepsilon$	8%
Минимальная электропроводность	80,5 % от стандарта IACS при температуре 20°C
Минимальное электросопротивление $\rho$	0,0285 Ом.мм <sup>2</sup> /м при температуре 20°C

Таблица 1.4 – Механические характеристики проволоки из сплавов системы Al-Zr (ASTM) [23]

Диаметр, мм	Временное сопротивление разры-	Относительное удлинение $\varepsilon$ на
	ву $\sigma_{e}$ , МПа	длине 250 мм, %
1,25 - 3,25	165	2%
3,25 - 3,91	162	2%
3,91 - 4,70	159	2%

В соответствии со стандартами «Международной Электротехнической Комиссии» (IEC) выпускают четыре типа проволоки из алюминиево-циркониевых сплавов, рассчитанных на разные температурные режимы эксплуатации [24]:

- проволока AT1 из теплостойкого алюминиевого сплава с максимально допустимой длительно действующей рабочей температурой 150 °C;
- проволока AT2 из сверхпрочного теплостойкого алюминиевого сплава с максимально допустимой длительно действующей рабочей температурой 150 °C;
- проволока AT3 из алюминиевого сплава с повышенной теплостойкостью максимально допустимой длительно действующей рабочей температурой 210 °C;
- проволока AT4 из сверхтеплостойкого алюминиевого сплава с максимально допустимой длительно действующей рабочей температурой 230 °C.

Механические и электрофизические характеристики описанных типов проволоки, представлены в табл. 1.5.

Таблица 1.5 – Механические характеристики проволоки из теплостойкого алюминиевого сплава (IEC) [24]

Тип	Номинальный диаметр, мм	Временное сопротивление разрыву $\sigma_{e}$ , МПа	Минимальное относительное удлинение, %	Удельное сопротивление при 20 °C, Ом·мм <sup>2</sup> /м	Проводимость, в соответствии с IACS, %
AT1	2,60 - 4,50	169 - 159	2,0 - 1,5	0,0287	60,0
AT2	2,60 - 4,50	248 - 225	2,0 - 1,5	0,0313	55,0
AT3	2,30 - 4,50	176 - 159	2,0 - 1,5	0,0287	60,0
AT4	2,60 - 4,50	169 - 159	2,0 - 1,5	0,0297	58,0

Примечание: IACS – Международный стандарт по отожженной меди (см. МЭК 60028)

По результатам испытаний остаточный коэффициент напряжения при растяжении после нагрева проволоки с определенными температурами и длительностью выдержки, указанных в табл. 1.6, не должен быть менее 90% при комнатной температуре по сравнению с первоначально измеренным значением перед нагревом.

Соответствие тому или иному типу проволоки определяется путем проведения температурных испытаний по специально разработанным в стандарте режимам (см. табл. 1.6).

Таблица 1.6 – Длительность и температура нагрева для подтверждения термостойкости [24]

Длительность, ч	Температура, °С	AT1	AT2	AT3	AT4
	Температура нагрева	230	230	280	400
1	Допустимое отклонение температуры	+ 5 - 3	+ 5 - 3	+ 5 - 3	+ 10 - 6
	Температура нагрева	180	180	240	310
400	Допустимое отклонение температуры	+ 10 - 6	+ 10 - 6	+ 10 - 6	+ 10 - 6

Современный рынок алюминиевых проводников из сплавов Al-Zr характеризуется наличием большого ассортимента кабельно-проводниковой продукции многих зарубежных компаний, среди которых Alstom, Nexans (Франция), Simens (Германия), Prysmian (Италия), NPA Skawina S.A. (Польша), J-Power Systems (Япония), Lumpi-Berndorf (Австрия), Southwire, General Cable, 3M (США) и многие другие. Все они занимают весомую долю Российского рынка и в целом создают жесткую конкуренцию отечественным кабельным заводам. По данным из разных источников, многие из них в настоящее время широко используют сплавы системы Al-Zr для производства высокотемпературных неизолированных проводов с малым провисанием (HTLS) [2,3, 12, 25, 26].

Отдельно можно отметить продукцию производственной компании J-Power Systems, которая выпускает провода марок GTACSR и ZTACIR/AS. Конструкция этих проводов, в общем случае, представляет собой стальной сердечник с обмоткой из термостойкой проволоки алюминиево-циркониевого сплава. Провода GTACSR выполняются со специальным зазором между внешней токопроводящей частью и внутренним несущим сердечником, заполненным смазкой, стойкой к

воздействию температуры. Такая конструкция обеспечивает скольжение алюминиевых слоев относительно стального сердечника, за счет чего провод можно натянуть только зафиксировав стальной сердечник. Благодаря этому снижается провисание провода и исключается механическое натяжение алюминиевого слоя в процессе эксплуатации. Однако для этих конструкций необходима специальная процедура натяжения провода, более сложная по сравнению с натяжением обычных сталеалюминиевых проводов. В проводах ZTACIR/AS сердечник изготавливается из сталеникелевого сплава Invar, что позволяет увеличить передаваемую мощность в 2,5-3 раза за счет значительного облегчения конструкции [26, 27].

Также без внимания нельзя оставить революционные разработки американской компании 3М (США), разработавшей и преступившей к коммерческой реализации в 2005 г. нового алюминиевого усиленного композитного провода марки ACCR. Его отличительная особенность, по сравнению с классическими сталеалюминевыми проводами, заключается в применении алюминиевого сердечника, состоящего из нескольких алюминиевых проволок диаметром от 1,9 до 2,9 мм и внешней токоведущей жилы из термостойкого высокопрочного алюминиевоциркониевого сплава. Каждая проволока сердечника изготовлена из алюминия высокой чистоты, в который внедрено более 25 000 микрометровых непрерывных продольных нановолокон оксида алюминия (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).Эксплуатационные характеристики такого сердечника превосходят алюминиевые и стальные аналоги [3, 25, 28].

В России сегодня существует большая потребность в таких проводах, однако для их применения потребуется ряд процедур по сертификации и локализации продуктов, что является долгим и трудоемким процессом. Кроме того, цены на провода марок GTACSR, ZTACIR и ACCR дороже по сравнению с традиционным проводом AC, в 2, 5 и 6,5 раз, соответственно [29].

Оперативным решением задачи по обеспечению отечественного рынка кабельной продукцией из сплавов системы Al-Zr явилось создание совместного российско - бельгийского предприятия «Сим-Росс-Ламифил», запустившего в 2012 г. производство проводов марки АССС в г. Углич Ярославской области и в 2013 г. преступившего к коммерческой реализации своей продукции. Конструкция таких проводов аналогична разработкам компании 3М, только сердечник выполнен из композитного материала на основе углеродных волокон. При этом комплектующие для производства данного провода импортируются из Бельгии, вследствие чего он имеет достаточно высокую цену. В дальнейшие планы предприятия входит создание собственных литейно-прокатных мощностей с объемом производства катанки до 250 тыс. тонн в год, что, очевидно, потребует наличие отечественных сплавов указанной системы [3, 9].

Первые известные работы по созданию отечественных аналогов сплавов системы A1-Zr были проведены учеными Национального исследовательского технологического университета «Московский институт стали и сплавов» и Кирсинским кабельным заводом, который совместно с Иркутским кабельным заводом входит в УК «Ункомтех». Учитывая потенциально высокий спрос на продукцию с применением алюминиево-циркониевых сплавов и масштабность задач по созданию группы новых воздушных ЛЭП ОК «РУСАЛ» включила эту тематику в перечень перспективных разработок. Летом 2010 г. были разработаны технические условия ТУ 16.К03-51-2010, в соответствии с которыми изготовлена опытная партия термостойкого алюминиевого провода из сплава АЦр1Е в рамках совместного проекта НИТУ «МИСиС» и ОАО «Кирскабель» [30].

Разработке основ совмещенных способов обработки металлов давлением посвящены работы [31, 32], где даны рекомендации по их использованию для получения длинномерных деформированных полуфабрикатов из различных металлов и сплавов.

Для выполнения программы работ по организации производства катанки с применением совмещенных способов обработки из сплавов системы Al-Zr на Иркутском алюминиевом заводе (ОАО «ИркАЗ») были проведены совместные исследования специалистами ООО «РУСАЛ-ИТЦ» и учеными института цветных металлов и материаловедения Сибирского федерального университета [33].

С точки зрения дальнейшего повышения механических характеристик, полученной совмещенными способами катанки, перспективным является примене-

ние способов интенсивной пластической деформации (ИПД), в частности, равноканального углового прессования (РКУП). Исследованию влияния сдвиговых деформаций, характерных для процессов ИПД, посвящены работы многих российских и зарубежных ученых [34-63], в которых показана возможность формирования субмикрокристаллической (СМК) структуры, обеспечивающей одновременное повышение пластических и прочностных характеристик деформированных полуфабрикатов. В частности, в работе [64] изучено влияние ИПД способом динамического канально-углового прессования сплавов системы A1-Zr, который обеспечивает СМК структуру с размерами зерен до 200 - 500 нм.

## 1.2. Анализ свойств сплавов системы Al-Zr и особенностей технологии изготовления из них литых и деформированных полуфабрикатов

Алюминиевые сплавы с добавками циркония довольно широко применяются как в российской, так и зарубежной промышленности. Первые исследования, направленные на разработку сплавов системы Al-Zr, проводились в 1960-х годах учеными из Японии. В то время была предложена серия новых сплавов TAL, ZTAL и XTAL, которые могут длительно эксплуатироваться без существенной потери прочности при температурах 150 °C, 210 °C и 230 °C, соответственно, а также – высокопрочные сплавы KTAL или Hi-TAL.

Анализ российской патентной литературы [65-84] показал, что содержание циркония в отечественных сплавах может изменяться от 0,001 до 3% в зависимости от их назначения. В промышленности эти сплавы используют в ядерном ракетостроении, военной отрасли, авиастроении, при литье в механические прессформы, для изготовления деталей средней и высокой прочности, сварных баков, бензо- и маслопроводов работающих в широком интервале температур, для производства двигателей, лопаток компрессоров, крыльчаток, дисков, колец турбореактивных и турбовинтовых двигателей, поршней и т.д. Благодаря высокой термостойкости за рубежом данные сплавы широко используют для производства проводов различной конфигурации и назначения [3, 12, 23-26]. В России такое производов различной конфигурации и назначения [3, 12, 23-26].

водство не организовано в промышленных масштабах, однако в последние годы активно ведутся научно-исследовательские работы по подготовке научной базы для его создания [83-94].

Исследованию свойств сплавов системы Al-Zr посвящено большое количество научных работ, проводимых под руководством многих известных ученых, среди которых Фридляндер И.Н. (ВИАМ), Добаткин В.И., Елагин В.И., Федоров В.М. (ВИЛС), Золоторевский В.С., Белов Н.А (МИСиС), Горбунов Ю.А., Довженко Н.Н. (СФУ). Особенностью этих сплавов является образование вторичных дисперсных интерметаллических фаз, устойчивых к коагуляции до определенного уровня температур, происходящее в результате распада пересыщенного твердого раствора быстро закристаллизованных сплавов. Причем, чем выше температура плавления тугоплавких компонентов, тем выше жаропрочность сплава [20-22, 83].

Цирконий обладает низким коэффициентом диффузии, благодаря чему, является сильным антирекристаллизатором, в силу особенностей электронной конфигурации способствует увеличению сил межатомной связи с алюминием, повышению устойчивости зон Гинье-Престона (ЗГП) метастабильных фаз, а также росту и коагуляции стабильных фаз, что увеличивает торможение движения дислокаций и повышает термостойкость сплавов. В результате распада пересыщенного алюминиевого раствора выделяются дисперсные частицы алюминидов, которые увеличивают прочность и замедляют процессы роста зерен [64, 84, 86, 91, 95].

В работе [88] показано резкое измельчение зерна в структуре литых алюминиевых слитков с цирконием в количестве 0,6%. Такой модифицирующий эффект объясняется образованием первичных кристаллов  $Al_3Zr$  в очень небольшом количестве еще до начала кристаллизации. В тоже время волочение таких слитков с высокой степенью деформации порядка  $\varepsilon = 90\%$  проходит без обрывов, что свидетельствует о высокой технологичности сплава при холодной деформации.

Цирконий относится к переходным металлам, имеющим относительно большую растворимость в алюминии (Zr, Mn, Cr, Ti и др.), причем, чем выше ско-

рость кристаллизации, тем она больше. Дальнейший нагрев быстрозакристаллизованных слитков из сплавов с этими металлами приводит к выделению вторичных алюминидов из твердого раствора, которые распределяются по границам зерен и субзерен, затрудняя их перемещение, а также способствуют закреплению дислокаций, в результате чего улучшается термическая стабильность сплава. В сплавах с добавками 0,4-0,6% циркония выделение вторичных фаз Al<sub>3</sub>Zr приводит к существенному упрочнению деформируемого алюминия, сохраняющегося вплоть до 450 °C, что может быть особенно полезно при разработке жаропрочных сплавов электротехнического назначения [84, 85, 89, 91].

Упрочнение твердого раствора алюминия характеризуется степенью и характером искажения кристаллической решетки, и проявляется тем больше, чем больше различие атомных диаметров алюминия и легирующего элемента. Высокотемпературный распад быстрозакристаллизованных сплавов алюминия с цирконием приводит к образованию вторичных фаз  $Al_3Zr$  когерентных алюминиевой матрице и имеющих структуру  $L1_2$  с размерами зерен < 10 нм, за счет чего происходит значительное упрочнение сплава.

Величина упрочнения также зависит от предела растворимости легирующего элемента в металле. Растворимость циркония в твердом алюминии при температуре 661,3 °C составляет 0,28%, при 427 °C – 0,05-0,06% и может быть увеличена до 2 - 2,5% методом закалки из жидкого состояния. Временное сопротивление разрыву  $\sigma_B$  сплава с 0,28% Zr составляет 100 - 120 МПа, в то же время сплав обладает довольно высокой пластичностью (относительное удлинение  $\delta$  = 15 - 20%) и удельным электросопротивлением 0,030 Ом·мм²/м. Коэффициент линейного расширения уменьшается, особенно при повышенных температурах [20, 21, 85].

В работе [20] также отмечается, что присутствие циркония в сплаве в мелкодисперсной форме, сформированной при быстрой кристаллизации и последующем распаде твердого раствора, повышает температуру рекристаллизации примерно на 100 °C. В некоторые сплавы (например, Al-Mg-Zn) цирконий в небольших количествах добавляют для повышения коррозионной стойкости.

Учитывая выше изложенное, важной стадией, при создании технологии изготовления проводников из сплавов Al-Zr, является выбор рациональной концентрации циркония, способа его введения в расплав, а также режимов плавки и литья, определяющих качество исходных слитков и катанки после деформационнотермической обработки.

Данный вопрос довольно широко изучен учеными НИТУ «Московский институт стали и сплавов» под руководством Н.А. Белова. В работах [85-94] рекомендуется использовать повышенные температуры плавки и литья при изготовлении слитков из сплавов системы Al-Zr с целью предотвращения выделения первичных грубых кристаллов  $Al_3Zr$ , сильно снижающих уровень механических характеристик и электропроводность получаемых изделий.

В работах [85, 88, 90], исходя из особенностей диаграммы состояния Al-Zr, характеризующейся резким повышением температуры ликвидуса  $T_L$  с ростом концентрации циркония, для выбора температуры нагрева расплава перед вводом циркониевой лигатуры предложено использовать условие  $T_m = T_L + 30$  (рис. 1.2). В противном случае первичные кристаллы  $Al_3Zr$  будут присутствовать в расплаве еще до начала литья и перейдут в слиток. Таким образом, для предотвращения образования первичных кристаллов  $Al_3Zr$  в сплавах с концентрацией циркония от 0,4 до 1% температуры плавки и литья должны быть не ниже 800-900 °C.

Проведенное исследование микроструктуры слитков из сплава с содержанием 0.6% циркония, отлитых при различных температурах заливки в интервале 750 - 900 °C, подтверждает адекватность предложенной выше формулы. В структуре слитков, отлитых после выдержки расплава при температуре 850 °C, удовлетворяющей условию выбора  $T_m$  при данной концентрации, первичные кристаллы  $Al_3Zr$  не были обнаружены, а весь цирконий вошел в алюминиевую матрицу. Тогда как при выдержке 800 °C на дне слитка было выявлено скопление циркония, а дальнейшее снижение температуры заливки до 750 °C приводит к резкому увеличению количества включений  $Al_3Zr$  [88].

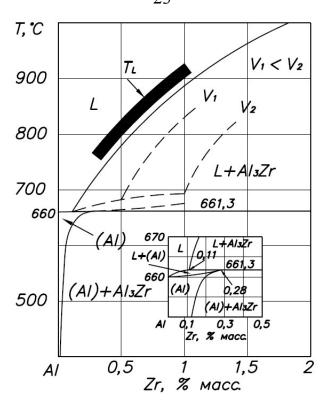


Рисунок 1.2 - Диаграмма состояния Al-Zr (сплошные линии) и ее трансформация в условиях неравновесной кристаллизации

Немаловажным параметром при изготовлении слитков из указанных сплавов является скорость охлаждения при кристаллизации расплава. Изменяя этот параметр, можно в довольно широком интервале регулировать величину растворимости циркония (до 2,5 %) в сплаве, что, в свою очередь, отразится на физикомеханических свойствах полуфабрикатов после дальнейшей обработки. С одной стороны, увеличение концентрации циркония в твердом растворе алюминия приводит к упрочнению и измельчению зерна слитков, с другой – к повышению электросопротивления деформированных полуфабрикатов, полученных из них, причем последнее может быть снижено термической обработкой за счет выделения дисперсных частиц Al<sub>3</sub>Zr из твердого раствора при высокотемпературном отжиге. В связи с этим актуальной задачей является выбор рациональной скорости охлаждения расплава с учетом концентрации циркония, температуры литья и режимов последующей деформационно-термической обработки.

Влияние скорости охлаждения на структуру и физико-механические свойства алюминиевых полуфабрикатов, содержащих до 1% Zr, подробно описано в ра-

ботах [85, 90, 93, 94], где обоснована возможность применения обычных скоростей охлаждения (5 - 20 К/с), реализуемых при получении тонкостенных отливок в металлических изложницах. Причем скорости охлаждения расплава равной 5 К/с достаточно для получения в литом состоянии твердого раствора, содержащего 0,5-0,6 % циркония, а существенное увеличение растворимости последнего в 2-3 раза, достигаемое методами быстрого затвердевания, не дает соответствующего прироста прочности по сравнению с обычным литьем.

Рациональная концентрация циркония в сплаве, позволяющая добиться существенного упрочнения сплава по сравнению с алюминием высокой чистоты, составляет 0,4 - 0,6 %. Использование добавки менее 0,4% приводит к небольшому упрочнению, а свыше 0,6 % – к менее значительному его росту. Кроме того, дальнейшее повышение содержания не целесообразно, так как рекомендуемая температура плавки данного сплава (850 °C) близка к верхнему пределу температур, достигаемых в промышленных условиях при получении отливок.

При создании новых составов проводниковых сплавов системы Al-Zr также необходимо учитывать примеси, которые зачастую присутствуют в алюминиевых сплавах технической чистоты. Прежде всего, это касается железа и кремния.

Преобладающей примесью в алюминии является железо, которое часто попадает в него из-за использования стальной оснастки при плавке, литье и перемешивании расплава. Его специально добавляют в некоторые сплавы для повышения жаропрочности (сплавы Al-Cu-Ni), снижения аномального роста зерна (сплавы типа магналия), уменьшения коррозии в атмосфере пара при повышенных температурах (сплавы Al-Fe-Ni). Важно также отметить, что для производства современных алюминиевых проводников используют сплавы (марки A5, A5E, A7, A7E и т.д.), дополнительно содержащие железо в целях упрочнения без существенной потери проводимости [20].

Железо относится к металлам переходной группы, малорастворимым (Fe, Ni, Ce и др.) в алюминии, однако образующим в сплаве фазы эвтектического или первичного происхождения, которые измельчают зерно и сдвигают эвтектическую точку в сторону их большего содержания. Предельная растворимость железа

в твердом алюминии соответствует примерно 0,03-0,05% при эвтектической температуре 655 °C. Удельное электрическое сопротивление таких сплавов увеличивается приблизительно до 0,0275 Ом·мм²/м при концентрации 0,05% Fe и до 0,0290 Ом·мм²/м при 1% Fe, причем это изменение в отожженном состоянии менее заметно. Температурный коэффициент линейного расширения по мере увеличения концентрации Fe линейно снижается до значений, отвечающих коэффициенту линейного расширения соединения FeAl<sub>3</sub>, составляющему  $\alpha = 11,9 \cdot 10^{-6}$  м/ (м · K) в диапазоне температур 27 – 127 °C и 15,2 ·  $10^{-6}$  м/ (м · K) в диапазоне 127 – 627 °C. Изменение механических характеристик в зависимости от концентрации железа представлено в табл. 1.7 [20].

Таблица 1.7 – Механические свойства сплавов системы Al-Fe [20]

Состояния	Al 99,99	)	Al – 1% Fe		
Состояние	σ <sub>В</sub> , МПа	δ, %	$σ_B$ , ΜΠ $a$	δ, %	
Деформированное	130	6	160	12,6	
Отожженное	45	49	110	38,3	

Добавки железа приводят к уменьшению размера зерна, причем последнее в меньшей степени проявляется при кристаллизации из расплава и более заметно при рекристаллизации. Данный эффект связан с закреплением дислокаций у частиц FeAl<sub>3</sub>, что затрудняет рост зерна. Температура рекристаллизации с увеличением концентрации железа повышается [20].

Кремний является второй наиболее распространенной примесью алюминия, вносимой в сплав из силикатов и кремнезема, присутствующих в бокситах. Он является одной из легирующих добавок алюминиевых сплавов, повышающих жидкотекучесть при литье, сварке и способствует жаропрочности. Наличие избыточного кремния приводит к увеличению механической прочности как сплавов с железом, так и сплавов, не содержащих добавок железа, однако приводит к снижению длительной прочности при температурах 350 °C и выше. Растворимость кремния в твердом алюминии изменяется в пределах 0,001-1,65% с повышением температуры от 227 до 577 °C, соответственно. Удельное электросопротивление

при этом для закаленного состояния увеличивается до значений 0,037-0,038 Ом·мм<sup>2</sup>/м, соответствующего предельной концентрации этого элемента, и может быть снижено до 0,030 Ом·мм<sup>2</sup>/м искусственным старением сплава по режимам: температура 227 °C и выдержка 20 ч; или - 327 °C, 10 мин [19, 20, 22].

В работах [92-94, 95] показано влияние различного содержания кремния на свойства алюминиевых сплавов с цирконием, где показано, что его присутствие в сплаве свыше 0,3% способствует горячеломкости из-за образования неравновесной эвтектики, однако позволяет ускорить распад пересыщенного цирконием твердого раствора. В связи с последним рекомендованное содержание Si в сплаве не должно превышать 0,2%.

В российских патентах на проводниковые алюминиевые [79-82] сплавы содержащие цирконий обозначены довольно широкие концентрационные пределы легирующих компонентов: 0,3 - 0,7% циркония; 0,1 - 0,6 % железа; 0,04 - 0,2% кремния. Химический состав, соответствующий верхним значениям этих пределов, обеспечивает существенное повышение термостойкости, уровня механических свойств и сильно снижает электрическую проводимость сплавов. Также необходимо отметить, что в электротехнической промышленности используются провода различного напряжения, подвергающиеся разным деформационным и температурным нагрузкам в процессе эксплуатации, поэтому и состав таких сплавов, очевидно, должен быть разным. В связи с последним актуальной научной задачей является определение необходимого сочетания легирующих компонентов, обеспечивающих разные потребительские свойства [23, 24].

Не менее важной стадией технологии изготовления катанки электротехнического назначения является термическая обработка. Проведенные исследования в работах [87-90] показывают, что изменением режимов отжига можно в определенной мере управлять процессами формирования структуры и, тем самым, регулировать уровень эксплуатационных характеристик деформированных полуфабрикатов из сплавов с переходными металлами.

Механические характеристики деформированной катанки из технических сплавов алюминия без добавок циркония мало отличаются по сравнению с катан-

кой, полученной из сплавов легированных этим элементом, однако наблюдается существенная разница при ее дальнейших нагревах. Наличие циркония в сплаве позволяет сохранять нерекристаллизованную структуру до определенного уровня температур, а значит и деформационное упрочнение катанки, причем, чем больше Zr в сплаве, тем выше температурный порог, после которого начинаются процессы разупрочнения. С другой стороны повышение содержания Zr в сплаве приводит к увеличению электросопротивления полуфабрикатов из него, однако р может быть снижено в результате последующего нагрева, который позволяет выделить цирконий из твердого алюминия в виде высокодисперсных алюминидов Al<sub>3</sub>Zr.

Результаты исследования совместного влияния концентрации Zr и режимов отжига на свойства алюминиевых полуфабрикатов, приведенные в научнотехнической литературе, позволяют сделать следующие выводы: отжиг катанки с содержанием циркония в сплаве до 0,2% при температурах 300 - 450 °C приводит к сильному ее разупрочнению из-за полной рекристаллизации структуры; для сохранения деформационного упрочнения после отжига при 300 °C достаточно 0,3% Zr, а разупрочнение такого сплава начинается с 350-400 °C; содержание Zr в пределах 0,4 - 0,6 % позволяет сохранять нерекристаллизованную структуру и деформационное упрочнение вплоть до 450 °C; удельное электросопротивление с ростом концентрации изменяется с 0,0280 Ом·мм<sup>2</sup>/м для сплава без Zr до 0,0375  $O_{\text{M}} \cdot M_{\text{M}}^2 / M$  для сплава с 0,6% Zr, однако отжиг при температурах 300-450 °C позволяет нивелировать эти различия; отжиг сплава с 0,6 % Zr при температуре свыше 450 °C нецелесообразен, так как приводит к одновременному снижению электропроводности и прочности. Таким образом, выбор концентрации циркония зависит от требуемой температуры эксплуатации проводов, регламентированной IEC [24], например, если последняя составляет 200 °C, то достаточно 0,2% Zr и т.д.

В рамках совместной работы НИТУ «МИСиС» и ОАО «Кирскабель» разработаны новые алюминиевые проводниковые сплавы с содержанием 0,18-0,476 % циркония, 0,139-0,140 % железа, 0,072-0,08 % кремния, и проведены промышленные опыты по получению литых и деформированных полуфабрикатов с использованием традиционных технологий непрерывного литья-прокатки [90]. Разработаны режимы приготовления расплава, литья слитков и термической обработки с учетом специфики свойств данных сплавов. Получена опытная партия проволоки, использованной при изготовлении термостойкого провода АСТ 240/39, прошедшего испытания на соответствие требованиям ГОСТ 839-80 [96].

Многочисленные исследования по отработке режимов термической обработки катанки, полученной из сплавов Al-Zr с различным содержанием легирующих элементов, проведены учеными ИЦМиМ СФУ совместно с ООО «РУСАЛ-ИТЦ» [97, 98]. В результате разработаны рекомендации по режимам термической обработки, опробованные в производственных условиях ОАО «ИркАЗ» и обеспечивающие эксплуатационные характеристики проволоки с состоянием АТ1 и АТ3.

Большое влияние на физико-механические характеристики катанки из сплавов Al-Zr оказывает деформационный режим обработки. Поскольку для получения требуемых значений по электропроводности необходимо проводить отжиг, приводящий к определенной потере прочности, основной задачей на стадии деформационной обработки является обеспечение такого режима, который позволит создать некоторый запас прочности (для последующей термообработки) по сравнению с ее величиной, регламентированной стандартами.

Представленные выше результаты исследований ориентированы в основном на применение традиционных технологий литья-прокатки. Деформационное упрочнение при сортовой прокатке приводит к небольшому повышению электросопротивления. В то же время возможность упрочнения при такой схеме обработки весьма ограничена по допустимым величинам обжатия в каждом проходе, превышение которых приводит к чрезмерному наклепу (иногда к «раскрытию» заготовки), росту энергосиловой нагрузки на прокатные клети и нарушению стабильности осуществления процесса. Поэтому актуальной задачей является поиск новых технологий, обеспечивающих обработку с более высокой интенсивностью деформации и обеспечивающих заданный потребителем уровень физикомеханических свойств.

Обобщая вышеизложенное можно сказать, что алюминиевые сплавы с добавками циркония широко применяются за рубежом для производства кабельно-проводниковой продукции, благодаря хорошему сочетанию физико-механических характеристик. В России существует огромная потребность в таких сплавах, в связи с чем проводятся активные поисковые исследования, направленные на определение рационального химического состава и эффективных технологий изготовления из них проводников, отвечающих разным запросам потребителей.

## 1.3. Технологии и оборудование для производства деформированных полуфабрикатов из алюминия электротехнического назначения

Для производства алюминиевой катанки в России и мире преимущественно используют технологию совмещенного литья и прокатки, хотя на отечественных предприятиях имеются некоторые производственные мощности реализованные способами прессования и полунепрерывной прокатки слитков. Одними из самых распространенных зарубежных компаний, производящих полный комплекс современного литейно-прокатного оборудования, являются фирмы Southwire (США), Continus-Properzi (Италия) и SMS-Group (Германия), создающие жесткую конкуренцию отечественным предприятиям [3, 18].

Литейно-прокатные агрегаты (ЛПА) различных фирм изготовителей имеют практически одинаковый состав основного технологического оборудования, в частности, печи, миксеры, литейные машины, прокатные станы и моталки, однако их технические и эксплуатационные характеристики заметно различаются. В частности, ЛПА фирмы SMS оснащены литейными машинами «Контирод», выполненными в виде гусеничной тяги, где кристаллизация заготовки осуществляется в пазу между движущимися стальными лентами и бронзовыми трапециями. В агрегатах фирм Southwire и Properzi используются роторные (вращающиеся) кристаллизаторы с трапецеидальным пазом, но различным конструктивным оформлением литейных машин [18].

Исходя из опубликованных данных представителями фирмы Properzi, на оборудовании кампании изготавливается свыше 80 % мировой алюминиевой катанки. Общая технологическая схема, отражающая основные рабочие узлы линий Properzi приведена на рис. 1.3.

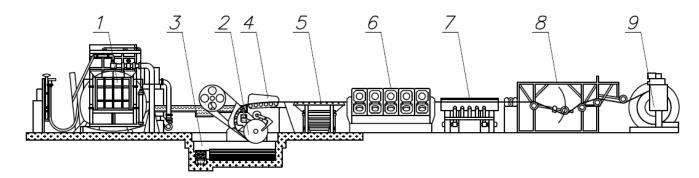


Рисунок 1.3 – Общая схема линий Properzi: 1 - печь миксер; 2 - кристаллизатор;

- 3 литейная яма; 4 датчик автоматической разливки металла (АМР);
  - 5 рольганг; 6 прокатный стан; 7 устройство для охлаждения;
    - 8 натяжное устройство; 9 моталка

Литейная машина имеет двухколесное исполнение с замкнутым контуром водяного охлаждения. При этом плоскость литейного колеса повернута на 7-8 ° относительно оси прокатки, что требует обратного разворота заготовки после ее выхода из кристаллизатора. В начале процесса расплавленный металл из печимиксера 1 поступает на медное вращающееся колесо кристаллизатора 2, охлаждается и кристаллизуется, затем полученная заготовка проходит по рольгангу 5 и подается на прокатный стан 6, состоящий из нескольких прокатных клетей, в которых обжатие происходит в трех валках, расположенных под углом 120° относительно друг друга. Полученная алюминиевая катанка требуемого диаметра подается на охлаждающие устройство 7 и, с помощью натяжного устройства 8, наматывается на барабаны моталки 9. Для смотки катанки используются орбитальные моталки со свободной укладкой полосы, позволяющие осуществлять качественную намотку. На агрегатах Ргорегzi производят катанку диаметрами 9,5 мм, 12,7 мм и 17,4 мм, а общая их производительность может составлять от 1 до 15 тонн в час [17].

ЛПА фирмы Properzi, преимущественно, снабжены трехвалковыми прокатными станами, однако следует отметить, что в последние годы компанией разработаны и используются комбинированные станы, в которых черновые клети – двухвалковые, а промежуточные и чистовые – трехвалковые.

Преимуществами линий Properzi являются: наличие средств регулирования скорости кристаллизации; автоматическая разливка металла; высокая степень автоматизации и проработки процесса за счет чего максимально уменьшено влияние человеческого фактора на производственный процесс. При этом все технологические параметры процесса задаются и контролируются при помощи специальных средств мониторинга [17].

Помимо Properzi одним из широко известных фирм, занимающихся разработкой и монтажом оборудования для производства катанки, является американская компания Southwire, которая охватывает практически все циклы производства кабельно-проводниковой продукции, начиная от проектирования оборудования и заканчивая выпуском проводов различной конфигурации и назначения [16, 18].

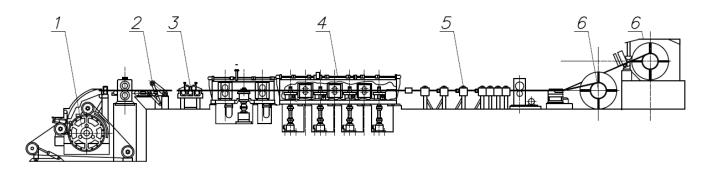


Рисунок 1.4 – Общая схема Southwire: 1 – печь-миксер с кристаллизатором;

2 - автоматические ножницы; 3 - машина подготовки полосы; 4 - прокатный стан;

5 - система спиртового осветления катанки; 6 - моталки

Линии НЛП компании Southwire имеют аналогичную совокупность рабочих узлов и принцип действия, как и у Properzi, за исключением ряда конструктивных особенностей (рис. 1.4). Печь-миксер представляет собой резервуар барабанного типа для обеспечения последовательной подачи расплава в литейную машину. Автоматический отбор проб позволяет контролировать соотношение водорода и

кислорода в жидком металле. Линии оснащены системой специальных закрытых желобов для транспортировки жидкого металла от плавильной печи к миксеру, от миксера — к литейной машине. Закрытие желоба обеспечивает экономию топлива при подогреве системы литников и предохраняет металл от окисления.

Литейные машины могут иметь как двухколесное, так и четырехколесное исполнение в зависимости от назначения и производительности агрегата. К основным особенностям литейных машин Southwire [18] можно отнести: вертикальную разливку и лучшую дегазацию, обеспечивающую получение заготовки высокого качества; подачу металла с днища разливной ванны, благодаря чему сокращается возможность включений шлака; большую длину ленты, обеспечивающую длительный срок эксплуатации; синхронизацию скорости литья и прокатки; автоматический контроль натяжения; охлаждение со всех сторон; зоны подачи охлаждающей воды с индивидуальной регулировкой; улучшенный контроль качества заготовки; высокоэффективный отвод тепла; более высокие рабочие скорости для заготовки меньшего сечения; работа литейной машины контролируется системой автоматизированной разливки металла (АМРS) и пр.

Автоматические барабанные ножницы и приемный стол обеспечивают непрерывную резку трапецеидальной заготовки при пуске до тех пор, пока не будут достигнуты требуемые показатели по химическому составу, а машина подготовки полосы снабжена секцией выпрямления и снимает фаску перед прокаткой.

Прокатные станы «No-Twist», позволяющие осуществлять прокатку без кантовки раската, разработаны компанией Morgan-Siemens (Германия) и снабжены индивидуальными приводами, что обеспечивает гибкость при производстве катанки различных диаметров. Агрегаты имеют двухвалковые прокатные станы, в отличие от Properzi. Производительность данных линии может составлять до 15-ти тонн в час [18]. Одним из преимуществ линий Southwire являются высокая степень механизации и автоматизации технологического процесса, включающая загрузку и расправление исходного сырья, разливку, прокатку, термообработку, смотку катанки при минимальном количестве персонала. Кроме того, линии снабжены системой спиртового осветления катанки и большой вес бунтов (до 4

тонн), которые могут размещаться на деревянных, пластмассовых или стальных паллетах или стальных основах.

В России разработкой оборудования для непрерывного литья и прокатки заакционерная холдинговая компания «Всероссийский научнонимается исследовательский проектно-конструкторский институт металлургического оборудования им. А.И. Целикова», который ввел в эксплуатацию 21 литейнопрокатный агрегат для производства алюминиевой и медной катанки. Конструкция литейной машины отечественных агрегатов предполагает использование аналогичной литейной машины роторного типа, как и у зарубежных производителей. Отечественные линии включают в свой состав литейную машину, барабанные ножницы, правильно-тянущую машину, машину для зачистки кромок заготовки, промежуточные индукторы подогрева, черновую и чистовую группу прокатных станов, линию охлаждения, делительные ножницы и моталки [99].

Обобщая вышеперечисленное можно сказать, что современное литейнопрокатное оборудование отечественного и импортного производства достигло довольно высокого уровня развития, однако существует также и ряд недостатков его применения. Прежде всего, это необходимость использования больших производственных площадей, сложная система контроля и управления линии, сложное оборудование, которое состоит из большого количества клетей (14 - 17) и требует высококвалифицированных специалистов, а также невозможность обработки высокопрочных сплавов. Кроме того, использование традиционных технологий литья-прокатки не позволяет обрабатывать заготовку с большими степенями деформации за один проход прокатки, что необходимо для достижения повышенных механических характеристик и способствует формированию существенно проработанной мелкозернистой структуры катанки.

Одним из эффективных способов изготовления таких полуфабрикатов могло бы быть классическое прессование, однако, в силу невозможности обеспечения непрерывного потока производства, оно используется весьма ограниченно. Кроме того, значительным недостатком прессования является наличие большого контактного трения металла о стенки контейнера, которое приводит к интенсивному

разогреву изделий при прессовании, что накладывает определенные ограничения по допустимым температурно-скоростным режимам обработки, снижает производительность процесса и требует использования дополнительных сложных систем охлаждения. Более того, из-за трения возрастает усилие необходимое для выдавливания металла, что снижает стойкость и жесткость конструкции инструментальной оснастки и, как следствие, повышает стоимость комплектующих для сборки прессовых линий.

Известными перспективными способами, с точки зрения повышения экономической и технологической эффективности производства алюминиевых полуфабрикатов, позволяющих исключить указанные недостатки традиционных технологий литья-прокатки и дискретного прессования, являются способы непрерывного прессования Конформ, Экстроллинг (рис. 1.5) и Лайнекс [31, 100]. Следует отметить, что способ непрерывного прессования Лайнекс не нашел промышленного применения.

Представленные способы основаны на деформации нагретой заготовки, непрерывно подаваемой в деформирующий узел, который, в случае использования способа Конформ, состоит из подвижного рабочего колеса 1 с кольцевой канавкой 3, неподвижного башмака 4 с упором и матриц 5, установленных в упоре башмака (рисунок 1.5, а), в случае использования способа Экстроллинг рабочий узел представляет собой два одинаковых по диаметру валка, формирующих открытый калибр круглого сечения, на выходе из которого установлена матрица 5 с требуемым калибрующим отверстием (рис. 1.5, б).

Преимуществами данных способов являются: наличие активных сил трения, способствующих процессу деформации и снижению энергозатрат на производство; высокое качество получаемых пресс-изделий; сравнительно низкая себестоимость производства за счет сокращения технологического цикла обработки. Однако существует и ряд недостатков существенно ограничивающих промышленное использование описанных способов.

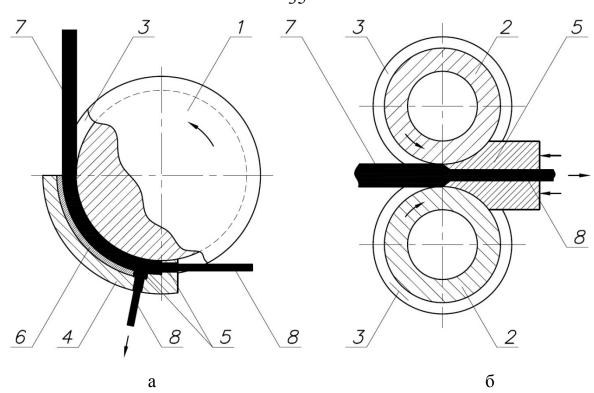


Рисунок 1.5 – Схемы непрерывного прессования: а – Конформ; б – Экстроллинг; 1 – рабочее колесо; 2 - рабочие валки; 3 – кольцевая канавка; 4 – башмак с упором; 5 – матрицы; 6 - кольцевая вставка; 7 – заготовка; 8 - изделие

Значительным недостатком способа Конформ является наличие реактивных сил контактного трения заготовки о неподвижный инструмент (башмак), приводящих, хоть и к несколько сниженным по сравнению с традиционным прессованием, но, тем не менее, довольно высоким энергозатратам на осуществление процесса. Кроме того, трение о башмак приводит к снижению износостойкости инструмента, способствует неравномерности деформации при обработке и, как следствие, к неоднородности свойств полуфабрикатов, что неприемлемо, в частности, для продукции электротехнического назначения.

Процесс Экстроллинг не получил широкого распространения в производстве, так как не было обеспеченно устойчивое протекание процесса и создано достаточное давление для выдавливания металла через матрицу, что, прежде всего, связано с использованием открытого калибра круглого сечения и расположения матрицы на общей вертикальной оси валков.

Несмотря на указанные выше недостатки, представленные способы непрерывного прессования имеют большой потенциал и на сегодняшний день активно развиваются многими отечественными и зарубежными учеными, в том числе и учеными кафедры обработки металлов давлением ИЦМиМ СФУ, обобщение результатов которых приведено в монографиях [31, 100-102].

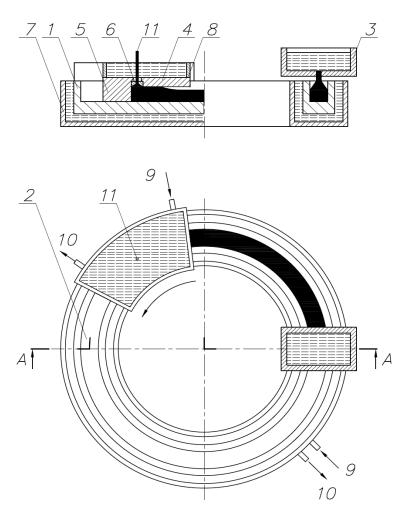


Рисунок 1.6 – Схема непрерывного прессования по способу Конформ:

1 - колесо-кристаллизатор; 2 - ручей; 3 - дозатор расплава; 4 - башмак; 5 - упор;

6 - матрица; 7, 8 - коллектор для охлаждения; 9, 10 - патрубки; 11 – изделие

Исследованиям процессов непрерывного прессования способом Конформ посвящены научные работы Ю.В. Горохова с соавторами [100]. В них решены задачи, связанные с разработкой научно-методического обеспечения и математического моделирования процесса непрерывного прессования и совмещенного литья-прессования металлов. Разработан пакет программ для их технического и тех-

нологического проектирования, проведены лабораторные и промышленные испытания спроектированного оборудования, на основании которых разработан ряд конструкций установок Конформ. В частности спроектирована лабораторная установка на базе карусельного кристаллизатора (рис. 1.6), конструктивные особенности которой позволяют значительно снизить реактивное трение металла о неподвижный башмак и объединить в одном технологическом цикле процессы литья и прессования.

Коллективом авторов под руководством Н.Н. Довженко были предложены новые способы непрерывного прессования и совмещенной обработки, получившие название совмещенная прокатка-прессование (СПП) и совмещенное литье и прокатка-прессование (СЛиПП).

Схема реализации СПП представлена на рис. 1.7 [31]. Данный способ основан на деформации длинномерной заготовки в закрытом ящичном калибре, образованном валками с выступом и кольцевой канавкой, перекрытом на выходе матрицей, которая расположена на некотором расстоянии от оси валков.

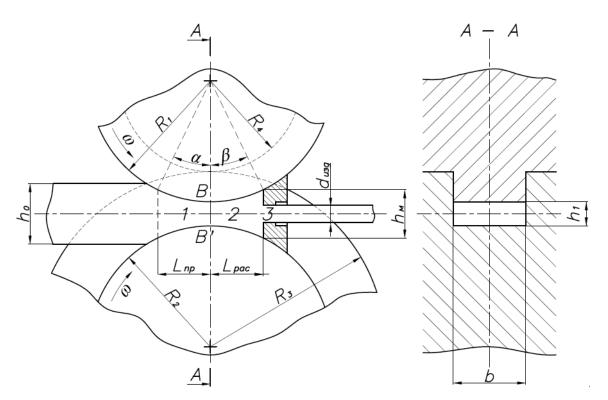


Рисунок 1.7 – Общая схема процесса совмещенной прокатки-прессования:

1 – зона прокатки; 2 – зона распрессовки; 3 – зона прессования [31]

Основной особенностью способа СПП является наличие больших, по сравнению с процессом Экстроллинг, активных сил трения, создаваемых валками при взаимодействии с обрабатываемым металлом, которые способствуют процессу деформации и уменьшают усилие, необходимое для выдавливания прутка. Кроме того, в процессе обработки данным способом появляется дополнительный вид знакопеременной деформации, когда металл по мере продвижения при прокатке подвергается сначала вертикальной деформации сжатия, затем горизонтальной деформации удлинения и далее противоположной горизонтальной деформации сжатия при распрессовке перед зеркалом матрицы. Такой переменный характер деформации способствует повышению пластичности (особенно литой заготовки) и увеличению предельно допустимой скорости прессования.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований нашли практическое применение в технических решениях конструкций устройств и установок непрерывного прессования, защищенных патентами на изобретение и полезные модели [103-121].

Одна из первых конструкций установок СПП была внедрена на ОАО «Верхне-Салдинском металлургическом производственном объединении» (рис. 1.8) [31]. Линия СПП включала электропечь для нагрева заготовок, установку непрерывной прокатки-прессования, смонтированную на базе прокатного стана ДУО 260, устройство охлаждения и моталку (рис. 1.8, а).



a



б

Рисунок 1.8 – Общий вид линии непрерывного прессования и установки СПП-260

Таблица 1.8 – Технические характеристики установки СПП-260

$N_{\underline{0}}$	Параметр	Единицы измерения	Значения
1	Диаметр валка	MM	260
2	Длина бочки валка	MM	350
3	Диаметр шейки валка	MM	190
4	Наименьшее сечение калибра	MM	41x20
5	Линейная скорость валков	м/мин	25,2
6	Максимальная скорость истечения прутка	м/мин	70
7	Мощность Электродвигателя	кВт	50
8	Усилие поджима матрицы	кН	400
9	Производительность	т/час	2,1

В состав линии непрерывной прокатки-прессования входили правильнозадающие устройство, прокатный стан ДУО 260, матричный блок и устройство поджима (рисунок 1.8, б). Правильно-задающие устройство включало набор роликов с ручьями по форме заготовки, которые обеспечивали подачу заготовки и ее гарантированный захват валками. Валки прокатного стана образовывали закрытый ящичный калибр, как показано на общей схеме процесса СПП (см. рис. 1.7). Матричный блок состоял из матрицы трапецеидальной формы с боковыми гранями, прилегающими при поджиме к катающим радиусам валков по касательной, и матрицедержателя. Устройство поджима было выполнено в виде жесткой рамы с закрепленным на ней гидравлическим цилиндром, обеспечивающим как поджим матрицы к валкам, так и выдвижение ее из калибра после завершения процесса прессования, что позволяло производить быструю смену матрицы.

Результаты экспериментальных исследований, проведенных на описанной выше установке, показали возможность изготовления прутков способом СПП с требуемыми механическими свойствами, структурой и геометрическими размерами с достаточно высокой производительностью [31].

Проведенный сравнительный анализ затрат на производство показал, что применение технологии СПП, по сравнению с технологиями литья-прокатки и Конформ, позволит в 1,5 – 2 раза уменьшить суммарные затраты на производство прутковой продукции, прежде всего, за счет сокращения капитальных и трудовых затрат, а также снижения энергоемкости процесса. Еще больший экономический

эффект от применения позволяет получить способ совмещенного литья и прокатки-прессования, так как в этом случае отсутствуют литейные агрегаты.

В соответствии с патентом РФ №73245 [113] в устройстве для непрерывного литья, прокатки и прессования, включающем печь-миксер, валок с ручьем и валок с выступом, имеющие охлаждаемые полости и образующие рабочий калибр, на выходе из которого установлена матрица, на ее наружной поверхности, находящейся в контакте с валками, выполнены охлаждаемые каналы. Кроме того, матрица на выходе из ее канала снабжена охлаждаемыми каналами для подвода хладагента к прессуемому изделию, а валки снабжены индукторами для их нагрева, расположенными по разные стороны от валков (рис. 1.9).

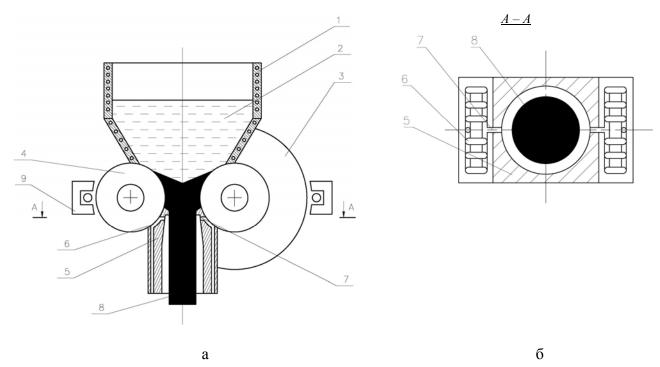


Рисунок 1.9. Общий вид устройства для непрерывного литья, прокатки и прессования (a) и вид инструментального узла устройства в разрезе (б) [113]: 1 — печь-миксер, 2 — расплав, 3 — валок с ручьем, 4 — валок с выступом, 5 - матрица, 6 и 7 — каналы для охлаждения матрицы, 8 — пресс-изделие, 9 - индуктор

Возможность варьирования температур нагрева и охлаждения матрицы и валков способствует увеличению производительности технологического процесса, а также повышению качества прессуемых изделий за счет увеличения эффективности охлаждения рабочего инструмента.

Повышение механических характеристик деформированных полуфабрикатов, полученных совмещенными способами обработки, можно обеспечить применением способов интенсивной пластической деформации (ИПД). Например, известно устройство непрерывного литья, прокатки и прессования алюминиевых сплавов [120], в котором прессование осуществляется в матрице с форкамерой. Цилиндрическая полость последней подобна калибрующему отверстию матрицы, ( рис 1.10), причем угол между осями цилиндрической полости форкамеры и калибрующего отверстия матрицы может составлять 90-175°, а в матрице и форкамере предусмотрены клиновидные полости для охлаждения деформируемого металла.

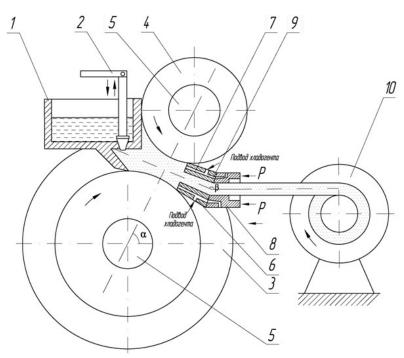


Рисунок 1.10 – Общий вид устройства для непрерывного литья, прокатки и прессования цветных металлов и сплавов [120]: 1 - печь-миксер; 2 - регулятор подачи расплава; 3, 4 - валки; 5 - полости для охлаждения валков; 6 - форкамера; 7, 9 – каналы для охлаждения матрицы; 8 - матрица; 10 - моталка

Переменный угол между осями форкамеры и матрицы дает возможность реализации схемы равноканального углового прессования (РКУП), которая позволяет интенсифицировать процесс пластической деформации, сформировать в изделиях более однородную мелкозернистую структуру металла и повысить уровень механических характеристик.

Большой научный интерес представляют работы [59-62], проводимые учеными института физики перспективных материалов Уфимского государственного авиационного технического университета под руководством Г.И. Рааба, которые направлены на развитие основ технологий интенсивной пластической деформации и создание оборудования для реализации непрерывного равноканального углового прессования. Ими предложена конструкция установки РКУП-К для обработки длинномерных изделий, работающая по способу Конформ. Принципиальная схема установки представлена на рис. 1.11.

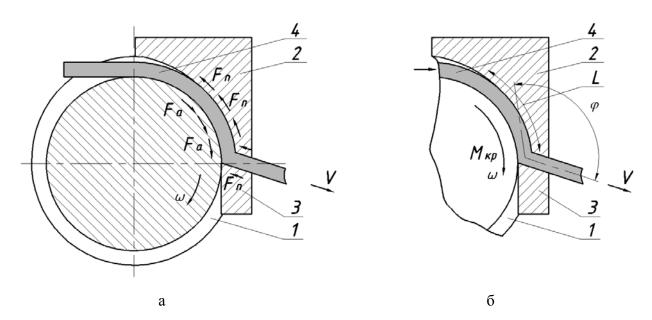


Рисунок 1.11 — Принципиальная схема РКУП-К: 1 — ротор с гравюрой;  $2- \text{прижим (башмак)}; 3- \text{упор, } 4- \text{заготовка}; a- \text{схема действия сил активного } F_a$  и пассивного трения  $F_n$ ;  $\delta$  — наиболее значимые параметры процесса:

L - дуга захвата заготовки,  $M_{\mbox{\scriptsize kp}}$  - крутящий момент;  $\omega$  - угловая скорость

Исходя из представленной схемы, канал прессования в деформирующем узле установки Конформ образован кольцевой канавкой в рабочем колесе 1, в которую проталкивается исходная заготовка 4, и неподвижным башмаком 2, выполненным с упором 3. В процессе обработки между заготовкой и вращающимся колесом возникают активные силы трения, способствующие захвату заготовки, перемещению ее вслед за вращающимся колесом и выдавливанию через выполненный в упоре башмака канал, пересекающий канавку под углом ф (рис. 1.11, б).

При этом площадь поперечного сечения заготовки в процессе прессования не изменяется.

Особенностью применения такой схемы деформирования металла является присутствие сдвиговых деформаций заготовки, способствующих накоплению суммарной истинной деформации порядка е = 4-5, достижению изотропного состояния по механическим свойствам за счет обеспечения однородного деформационного состояния и формированию ультрамелкозернистой структуры, причем наилучшие сочетания получаемых свойств достигаются после холодной обработки [159]. В связи с этим, получение длинномерных деформированных полуфабрикатов предполагает применение заготовки в виде бухты. Применение в качестве такой заготовки катанки, изготовленной традиционными способами литьяпрокатки, приведет к значительному повышению себестоимости производства указанных полуфабрикатов и цен на них, а использование непрерывнолитой заготовки менее эффективно. Поэтому актуальной научной задачей является исследование возможности объединения менее энергоемких способов СПП, СЛиПП и РКУП в одной технологической цепочке.

В работе [62] представлены исследования способа СЛиПП-ИПД с использованием математического моделирования в программном комплексе Deform-3D, на основании которых выявлены некоторые особенности течения материала в очаге деформации и предложен вариант устройства [121] для получения алюминиевых профилей. Однако для его промышленного применения требуется проведение дополнительных экспериментальных исследований.

Таким образом, проведенный анализ современных технологий и оборудования показал, что перспективными, с точки зрения повышения экономической и технологической эффективности производства алюминиевых полуфабрикатов, являются совмещенные способы обработки, включающие операции литья, прокатки, прямого и равноканального прессования, такие как СПП, СЛиПП и РКУП. В то же время оборудование для реализации этих технологий не требует больших производственных площадей, позволяет обрабатывать металл с более высокой интенсивностью деформации при меньших энергетических затратах.

#### 1.4. Выводы по главе

Таким образом, проведенный анализ научно-технической и патентной литературы позволил сделать следующие выводы.

- 1. 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, внедренные в эксплуатацию в середине прошлого века и физически, и морально устарели.
- 2. 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.
- 3. 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.
- 4. Обзор научно-технической литературы показал, что 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 требуются исследования их структуры и свойств.
- 5. Актуальным является анализ новых способов с применением средств компьютерного моделирования и аналитических методов теории ОМД и экспериментальная проверка с целью определения адекватности их результатов.

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

## 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### 2.1. Сплавы для проведения экспериментальных исследований

Алюминиевые сплавы электротехнического назначения с добавками циркония выплавляли в высокочастотной плавильной установке. Основным легирующим элементом в сплавах являлся цирконий, а железо и магний вводили дополнительно для повышения прочностных свойств. Химический состав исследуемых сплавов, режимы его приготовления и литья представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Химический состав алюминиевых сплавов и режимы литья

	Легирующие элементы, % масс.			Примеси				
№ сплава				Si	Zn, Cu, Mn,	Тпл, °С	t <sub>B</sub> ,	$T_{3a\pi}$ ,
J VE CIIJIABA	Zr	Fe	Mg	51	Ti, Ni, Cr, V	1 пл, С	МИН	°C
					не более			
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 7*	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

Примечание \* - получен литьем в кокиль и ЭМК, \*\* - получены заливкой расплава в валки

Для приготовления опытных сплавов навески технического алюминия марок A7E, A8, A85 плавили в индукционной высокочастотной плавильной установке ЛПЗ-67 в графитовых тиглях. После расплавления алюминия при температурах в интервале  $T_{\pi\pi} = 720\text{-}900$  °C (см. табл. 2.1) навески предварительно просущенной лигатуры A1-Zr расчетного состава и массы вводили непосредственно в тигель с последующей его выдержкой, при этом варьировали содержание в сплаве циркония и железа в диапазонах 0,10-0,50% и 0,03-0,30%, соответственно. Расплав тщательно перемешивали от 1 до 3 мин, подвергали выдержке в печи в интервале  $t_{\rm B} = 5\text{-}20$  минут и разливали в подогретые алюминиевые изложницы с целью получения слитков размерами 14х14х250 мм, пробы на химический состав отливали в специально подготовленный алюминиевый кокиль. Для приготовления сплавов использовали циркониевую лигатуру в виде брикетов (80 % Zr, остальное – флюс) фирмы Hoesch metallurgies GMBH (Германия).

Часть слитков получали с применением электромагнитного кристаллизатора (ЭМК) на установке непрерывного литья, разработанной учеными кафедры электротехнологии Сибирского федерального университета.

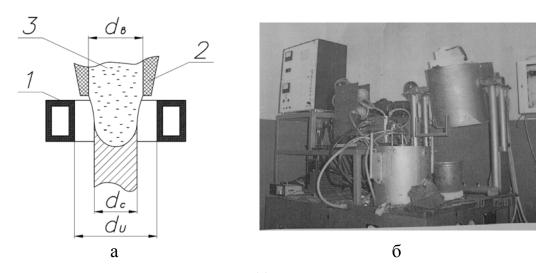


Рисунок 2.1 – Схема литейного узла (a) и внешний вид установки непрерывного литья (б) [122]

На рис. 2.1 представлена схема и общий вид установки непрерывного литья слитков в электромагнитном кристаллизаторе, содержащая индуктор 1, в зоне

действия магнитного поля которого размещена воронка 2 для подачи жидкого металла. Методика получения литых заготовок заключалась в следующем: в процессе литья жидкий металл 3, посредством раздаточной коробки 2, подавали в индуктор, создающий магнитное поле, под действием которого расплав формировался в слиток диаметром 15 мм. В начале литья жидкий металл 3 опирался на электропроводящее основание, по мере затвердевания вытягивался из индуктора в виде непрерывного слитка и охлаждался потоком воды, поступающей непосредственно на поверхность последнего.

Расплав на выходе из нижнего среза раздаточной воронки удерживался от растекания магнитным полем, а изменением интенсивности поля регулировалась подача металла в индуктор.

## 2.2. Изготовление опытных образцов методами совмещенной обработки

Полученные литые заготовки подвергались совмещенной обработке на экспериментальных установках СПП-200 и СЛиПП-2,5 [31, 127-129]. Особенности конструкции и принцип действия указанных установок проиллюстрированы на рис. 2.2 - 2.5, а технические характеристики приведены в табл. 2.2.

Модернизированная установка СПП-200 имела в своем составе печь для приготовления расплава или нагрева заготовок, рабочую клеть, матричный блок и тензометрическую аппаратуру (см. рис. 2.2). Рабочая клеть представляла собой чугунный каркас 2 от прокатного стана ДУО-200 закрытого типа, закрепленный на стальных опорах 3 с помощью стяжных болтов, уравновешивающее устройство и валковый узел. Последний состоял из валков с выступом 4 и кольцевой канавкой 5, образующих закрытый ящичный калибр и закрепленных шпоночным соединением на валах, которые в свою очередь установлены на подушках 6 в бронзовых подшипниках скольжения 7. Зазор между валками регулировался уравновешивающим устройством, включающим нажимные винты 8 и штурвалшестерню 9. На валках установлено специальное направляющее устройство 10 с нагревателями, обеспечивающее подачу металла непосредственно в калибр вал-

ков, которые были изготовлены из стали 5XHM и подвергнуты термообработке, обеспечивающей твердость HRC 48-50. Корпус рабочей клети был повернут на угол  $90^0$  для удобства загрузки заготовки и заливки расплава и смонтирован на общем основании с шестеренной клетью, двухступенчатым цилиндрическим редуктором, коробкой передач и двигателем переменного тока, как показано на рис. 2.3.

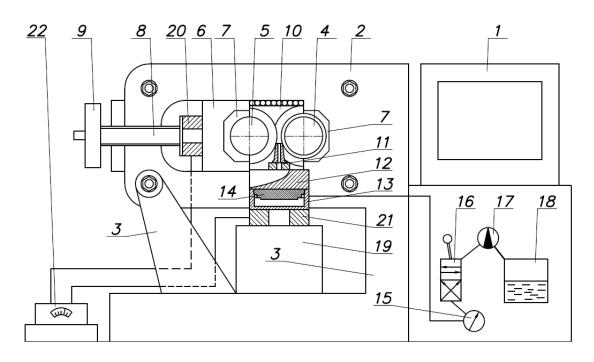


Рисунок 2.2 – Схема установки совмещенной обработки СПП-200:

1 — печь; 2 - каркас; 3 — стальные опоры; 4 — валок с выступом; 5 — валок с кольцевой канавкой; 6 — подушки; 7 — подшипники скольжения; 8 — нажимные винты; 9 — штурвал-шестерня; 10 — направляющее устройство; 11 — матрица; 12 — подставка; 13 - гидравлический цилиндр; 14 — плунжер; 15 — насос; 16 — гидрораспределитель; 17 - манометр; 18 — бак; 19 — опора; 20, 21 — мездозы; 22 — тензостанция

Матричный блок включал матрицу 11 с матрицедержателем, изготовленную из стали 40X (HRC 42-45), подставку 12 и устройство поджима, состоящего из гидравлического цилиндра 13 с плунжером 14, ручного насоса 15 марки MP01/1, двухпозиционного гидрораспределителя 16 с ручным управлением, манометра 17, бака с маслом 18 и опоры 19. Такая конструкция обеспечивает прижим матрицы к валкам и фиксацию ее в заданном рабочем положении (см. рис. 2.2).

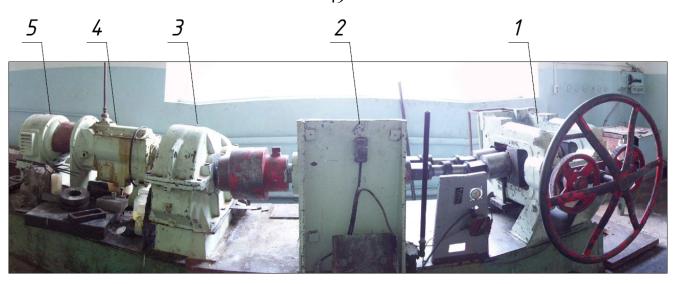


Рисунок 2.3 – Общий вид установки СПП-200:

1 - рабочая клеть; 2 - шестеренная клеть; 3 - редуктор; 4 - коробка передач; 5 - двигатель

Таблица 2.2 – Технические характеристики установок совмещенной обработки

Параметры	СПП-200	СЛиПП-2,5
Начальный диаметр валков	200	480
Диаметр валка с выступом, мм	214	482
Диаметр валка с канавкой, мм	164	394
Длина бочки валка, мм	240	250
Диаметр шейки вала, мм	100	150
Размеры 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 <sup>2</sup>	200-500	200
Максимальное усилие прижима, кН	300	300

Для измерения энергосиловых параметров кольцевые мездозы 20, 21 были установлены под нажимные винты 8, гидроцилиндр 13 и подключены к регистрирующей аппаратуре 22, в качестве которой использовалась тензостанция Zet017-Т8 фирмы ZetLAB (Россия). Для измерения усилия на матрице и нажимных винтах применяли датчики силы CWW-50tf и CWW-100tf фирмы Dacell Co. LTD (Южная Корея) с максимально допустимым усилием сжатия 500 кН и 1 МН, соответственно.

Установка непрерывного литья, прокатки и прессования СЛиПП-2,5, разработанная совместно со специалистами ООО «РУСАЛ ИТЦ», показана на рис. 2.4.



Рисунок 2.4 - Экспериментальная установка СЛиПП-2,5

Линия совмещенной обработки на базе этой установки включает в себя наклоняемую индукционную печь-миксер 1, деформирующий узел 2, ванну для охлаждения 3, калибровочную машину 4 и моталку 5 (см. рис. 2.5). Печь-миксер выполнена с регулятором подачи расплава и имеет общую емкость тигля по алюминию 350 кг. Деформирующий узел состоит из станины, в которой расположены валки, образующие закрытый ящичный калибр, матрица с форкамерой, зафиксированная на выходе из последнего с помощью гидроцилиндра, в свою очередь закрепленного на станине с помощью шаровых опор.

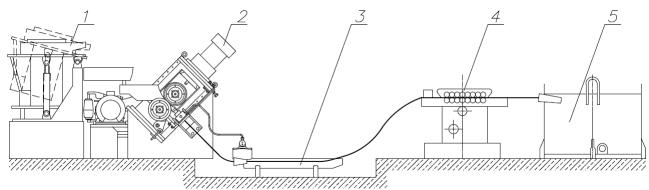


Рисунок 2.5 — Схема линии совмещенной обработки на базе установки СЛиПП-2,5: 1 - печьмиксер; 2 - деформирующий узел; 3 - устройство охлаждения; 4 — калибровочная машина;

5 – моталка

Валки деформирующего узла установки выполнены с внутренними полостями для подвода хладагента и имеют консольное расположение в станине таким образом, чтобы плоскость, проходящая через центры валков, составляла с горизонтальной плоскостью угол равный 5 - 85°. Такое расположение позволяет облегчить доступ к валкам, упрощает сборку-разборку инструментального узла и снижает время переналадки. Кроме того, за счет переменного угла наклона валков появляется возможность варьирования способов заливки расплава из печи в калибр. Матрица выполнена с клиновидными полостями для охлаждения, что позволяет отводить тепло и предотвратить температурное растрескивание изделия при прессовании.

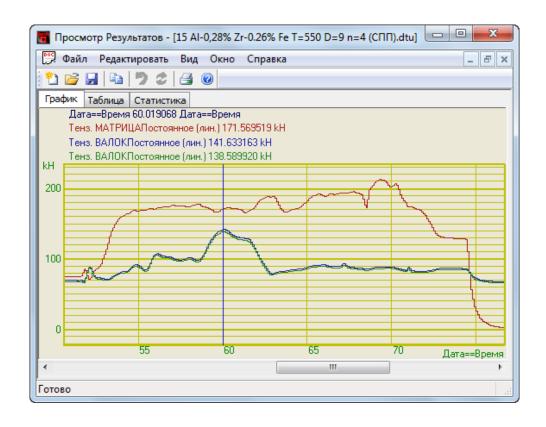


Рисунок 2.6 - Протокол замера энергосиловых параметров для обработки методом СПП сплава 15

Процесс СПП проводили в соответствии со следующей методикой. Литые заготовки, полученные в изложнице или с помощью ЭМК, нагревали в электрической камерной печи 1 до заданной температуры и выдерживали 15-20 мин, одновременно осуществляли нагрев валков с помощью печи, выполненной в виде ко-

жуха по форме валков. После нагрева заготовки задавали в калибр вращающихся валков, где они обжимались, достигали зеркала матрицы, распрессовывались, заполняя калибр, и выдавливались через калибрующее отверстие матрицы диаметром 9 мм. С помощью тензометрической аппаратуры фиксировали усилие на матрице и валках. В качестве примера на рис. 2.6 приведен протокол результатов замеров усилий для сплава Al-Zr.

Технологию СЛиПП реализовали на том же оборудовании (рис. 2.7), однако при этом в калибр валков заливали расплав металла из печи-миксера 1 через воронку 2, в которой жидкий металл последовательно кристаллизовался в калибре вращающихся валков 3 и 4, обжимался ими и выдавливался через матрицу 5 в виде горячепрессованного изделия 7.

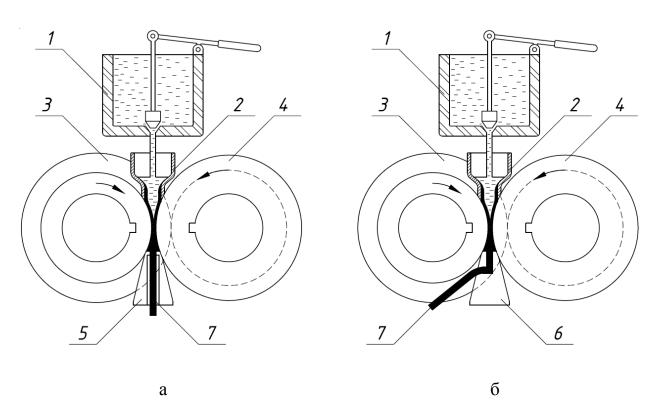


Рисунок 2.7 – Схема проведения экспериментальных исследований: а – СЛиПП; б – СЛиПП-РКУП; 1 – печь-миксер,2 – воронка, 3 – валок с канавкой, 4- валок с выступом; 5 – матрица с продольным каналом, 6 – матрица с пересекающимися каналами, 7 – пресс-изделие

Часть прутков после СЛиПП и термической обработки подвергали обработке способом РКУП на опытно-экспериментальной установке, установленной в институте физики перспективных материалов Уфимского государственного авиационного технического университета, подробно описанной в главе 1 (см. рис. 1.11).

Полученные прутки способами СПП, СЛиП и РКУП диаметром 9 мм подвергали холодному волочению до диаметра 2 мм. Волочение производили на цепном волочильном стане однократного действия (рис. 2.8). Технические характеристики волочильного стана приведены в табл. 2.3., а маршруты волочения — в табл. 2.4.

Таблица 2.3 – Технические характеристики волочильного стана

Характеристики	Значения характеристик
Длина изделия, мм	2000
Количество ниток, шт.	1
Сила волочения, кН	50
Скорость волочения, м/с	0,17
Потребляемая мощность, кВт	25
Габаритные размеры, мм	3000x1800x1300

Таблица 2.4 – Маршрут волочения проволоки из исследуемых сплавов

№	Диаметр канала	Единичная	Суммарная
перехода	волоки, мм	вытяжка	вытяжка
1	9,00	-	-
2	8,20	1,20	1,20
3	7,20	1,30	1,56
4	6,40	1,27	1,98
5	5,70	1,26	2,49
6	5,10	1,25	3,11
7	4,60	1,23	3,83
8	4,20	1,20	4,59
9	3,80	1,22	5,61
10	3,40	1,25	7,01
11	3,10	1,20	8,43
12	2,80	1,23	10,33
13	2,55	1,21	12,46
14	2,33	1,20	14,92
15	2,15	1,17	17,52



Рисунок 2.8 – Цепной волочильный стан однократного действия

Маршрут волочения для получения проволоки, приведенный в табл. 2.3, был установлен экспериментальным путем.



Рисунок 2.9 – Электропечь LAC PP 20-540

Термическую обработку прутков и проволоки из исследуемых сплавов проводили в электропечах LAC PP20–540 (рис. 2.9).

# 2.3. Методика определения электрического сопротивления экспериментальных образцов

Измерение удельного электросопротивления ρ деформированных полуфабрикатов из исследуемых сплавов проводили на образцах с расчетной длиной 1 м с помощью омметра «ВИТОК» (рис. 2.10) в соответствии с требованиями ГОСТ 7229–76 [123].

Площадь поперечного сечения образцов определяли путем расчета по массе, принимая плотность алюминия равной  $2,703 \text{ г/см}^3$ .



Рисунок 2.10 - Омметр «ВИТОК»

Измеренное значение электрического сопротивления пересчитывали на температуру 20 °C по формуле:

$$R_{20} = R_t \cdot K; \tag{2.1}$$

$$K = \frac{1}{1 + \alpha_R (t_{u30} - 20)} \tag{2.2}$$

где  $R_{20}$  –электрическое сопротивление при температуре 20 °C, Ом; t –температура, при которой произведено измерение, °C;  $R_t$  – электрическое сопротивление, измеренное при температуре t, Ом;  $\alpha_R$  – температурный коэффициент электрического сопротивления, ° $C^{-1}$ ; K – температурный множитель, значение которого для алюминия приведено в ГОСТ 7229–76.

Удельное объемное электрическое сопротивление изделия r в Ом·м, приведенное к температуре  $20^{\circ}$ С, вычисляли по формуле:

$$r = \frac{R_{20} \cdot S}{l},\tag{2.3}$$

где S —площадь поперечного сечения,  ${\rm mm}^2$ ; l —длина кабельного изделия, на котором проводилось измерение, м.

Для измерения электрического сопротивления материалов при нагреве использовали зондовый метод, принципиальная схема которого представлена на рис. 2.11.

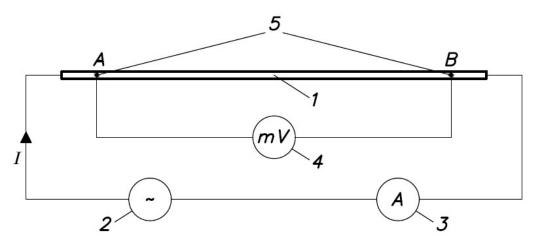


Рисунок 2.11 – Принципиальная схема измерений удельного электросопротивления

Ток I в алюминиевом образце 1 создавался источником переменного тока 2. Падение напряжения на расстоянии AB (0,1м) измерялось мультиметром 4 с помощью закрепленных на образце нихромовых зондов. Электросопротивление R ( Om) металла на базе A-B рассчитывали по формуле:

$$R = \frac{U}{I},\tag{2.4}$$

где U - показания мультиметра, B; I - показания амперметра, A.

Удельное электросопротивление р рассчитывали по формуле:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{I},\tag{2.5}$$

где S - площадь поперечного сечения металла,  $\mathrm{mm}^2$ ; l - расстояние между точками A и B, M (см. рис. 2.11).

На рис. 2.12 приведена сборка цепи для измерения удельного электросопротивления при нагерве. Сборки размещали в электропечи (рис.2.13), а измерения электрофизических характеристик алюминиевого образца производили в интервале температур 20-300 °C, регламентированных IEC 62004-07 [24].



Рисунок 2.12 – Фотография сборки цепи для измерения удельного электросопротивления



Рисунок 2.13 – Муфельная печь ПВК 1,6 - 15

Для проверки было проведено контрольное измерение удельного электросопротивления меди на постоянном токе. При температуре 20° С удельное электросопротивление было равно 2.1 мкОМ·см., что удовлетворительно совпадает с табличными данными и определяет пределы точности выбранной методики измерений.

#### 2.4. Методика измерения механических свойств образцов

Исследование механических свойств экспериментальных образцов определяли методом статических испытаний на растяжение, которые проводили на испытательных машинах LFM 400 и LFM 20 фирмы Walter Bai AG (Швейцария) с развиваемым усилием 400 и 20 кH, соответственно.



Рисунок 2.14 – Универсальная разрывная машина LFM 400

Для испытаний использовали образцы, выточенные из литых и деформированных полуфабрикатов, показанные на рис. 2.15.

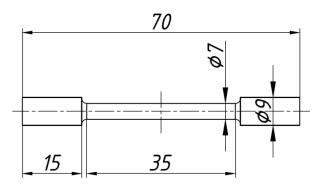


Рисунок 2.15 – Образец на разрыв

Испытания экспериментальных образцов проводили в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-84, при этом отбирали по 5 образцов на точку [124]. Исследование термостойкости проводили по методике, описанной в стандартах ASTM B94-05 и IEC 62004-07 [23, 24]. Измерение микротвердости деформированных полуфабрикатов проводили при нагрузке 100 г на приборе AFFRI DM 8 (Италия) по ГОСТ-9450-76 [125].

#### 2.5. Методика проведения микроструктурного анализа

Изучение микроструктуры алюминиевых сплавов в различных состояниях проводили на микрошлифах образцов, которые изготавливали на автоматизированных шлифовально-полировальных станках Saphir 520, Germany и расходных материалах фирмы Lam Plan, France по методикам, предоставленным ООО «Митэла». Микрошлифы травили в растворе фтористоводородной кислоты.

Перед шлифованием образцы запрессовывали в фенольную смолу на автоматическом гидравлическом прессе ATM Opal 400 (рис. 2.16, а). Запрессованные образцы помещали в обойму шлифовально—полировальной установки ATM Saphir 520 (рис. 2.16, б), в которой образцы фиксировались и прижимались, что обеспечивало получение плоской поверхности и исключало появление завалов.

При шлифовании на образец подавалась вода для охлаждения, во избежание разогрева и возможного изменения структуры поверхностного слоя, а также для удаления остатков абразивных частиц. Для окончательного выравнивания поверхности шлиф полировали до зеркального блеска на шелковых кругах с применением специальных суспензий: Lam Plan, Bio Diamant — жидкость монокристаллическая (9, 6, 3 мкм) 1000 мл и Lam Plan, Superfinish с частицами (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) для финального полирования (0,05мкр.).





а б Рисунок 2.16 – Автоматический гидравлический пресс ATM Opal 400 (a); автоматизированная шлифовально-полировальная установка ATM Saphir 520 (б)

Выявление микроструктуры проводили методом химического травления, который основан на использовании различной скорости растворения отдельных участков металла, отличающихся по химическому составу и физическому строению. В результате травления образуется система выступов и впадин, характеризующих микроструктуру металла, и повышается оптический контраст на границах раздела различных структурных составляющих. В качестве реактива для травления использовали состав, приведенный в табл. 2.5.

Таблица 2.5 – Состав реактива для травления микрошлифов

Состав реактива	Назначение реактивов	
HF – 2 мл;	Для алюминия и всех алюминиевых сплавов	
$H_2O - 98$ мл.	в литом и деформированном состоянии	

Исследование микроструктуры осуществляли на оптическом микроскопе Carl Zeiss Axio Observer A1m (рис. 2.17).



Рисунок 2.17 – Оптический микроскоп Carl Zeiss Axio Observer A1m

Микрорентгеноспектральный анализ образцов проводили с помощью растрового электронного микроскопа EVO 50 HVP (Carl Zeiss) с энергодисперсионным анализатором Inca ENERGY 350 (Oxford instrument). Анализ производили при зондовом токе I=250–264 пА и напряжением U=20кВ. В сканирующем электронном микроскопе EVO 50 HVP установлена детекторная система, учитывающая вторичные электроны (SE) – топографический контраст, и обратно рассеянные электроны (BSD) – для микроанализа (рис.2.18). Содержание циркония в исследуемых образцах определяли поэлементным химическим анализом.



Рисунок 2.18 – Растровый электронный микроскоп CarlZeiss EVO 50

Исследование тонкой структуры проводили методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе JEM-2100 фирмы Jeol (рис. 2.19) при ускоряющем напряжении 200 кВ, оснащенном приставкой INCA x-sight для проведения энерго-дисперсионного анализа наноразмерных элементов тонкой структуры. При этом объекты для исследований тонкой структуры изготавливали методом струйной полировки образцов в виде тонкой фольги на установке «Тепироl-5» в растворе 20 % азотной кислоты и 80 % метанола при температуре - 25 °C и напряжении 15-20 В.



Рисунок 2.19 – Просвечивающий электронный микроскоп JEM-2100

Средний размер структурных элементов (средний размер зерна) получали по результатам измерения не менее 300 диаметров зерен, осуществленных с помощью компьютерной программы для структурного анализа «Grain-Size». Для получения статистически надежных результатов анализа микроструктуры изучали не менее 3-х образцов на каждое исследованное состояние.

## 3. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОВМЕЩЕННОЙ ПРОКАТКИ-ПРЕССОВАНИЯ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Zr

Результаты исследования, представленные в данной главе, направлены на развитие теоретических основ и моделирование процесса совмещенной прокатки-прессования (СПП), а также разработку технических решений и технологических рекомендаций по обработке сплавов системы Al-Zr данным способом, которые необходимы для проектирования оборудования и технологии изготовления длинномерных деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения. Результаты исследований приведены в работах [127-134] и патентах [135-139].

# 3.1. Теоретическое исследование условий реализации процесса совмещенной прокатки-прессования на основе сопоставления активной и реактивной составляющих уравнения баланса мощностей

Анализ научно-технической литературы показал, что методика оценки условий реализации процесса СПП, приведенная работе [31] и основанная на сопоставлении усилия требуемого для выдавливания металла через матрицу и усилия активных сил трения, является приближенной и дает не количественную, а качественную оценку осуществления процесса. Поэтому актуальной задачей является теоретическое исследование процесса СПП с целью установления зависимостей между отдельными геометрическими, расчетными и технологическими показателями процесса, позволяющих определить такие сочетания последних, которые бы обеспечивали осуществление процесса на практике.

С энергетической точки зрения, условия реализации процесса совмещенной прокатки-прессования можно оценить путем сравнения величин мощности  $N_a$ , формируемой активными силами трения, действующими на контактной поверхности вращающихся валков с деформируемой заготовкой, и мощности  $N_p$ , затрачиваемой на осуществление процесса выдавливания металла через заданное сечение рабочего отверстия матрицы. Будем считать, что для стабильного протекания

процесса СПП необходимо, чтобы  $N_a$  было больше  $N_p$  с условным 10%-ым запасом мощности.

Для вывода формул и расчета отдельных составляющих обеих мощностей примем схему СПП, приведенную на рис. 3.1, со следующими обозначениями параметров, характеризующих очаг деформации: начальная высота заготовки  $h_0$ , мм; начальная ширина заготовки  $b_0$ , мм; катающие радиусы  $R_1$ ,  $R_2$  валков, мм; ширина калибра b, мм; минимальный зазор между валками  $h_1$ , мм; высота зеркала матрицы  $h_{3M}$ , мм; диаметр прессуемого прутка d, мм; длина калибрующего пояска матрицы  $l_n$ , мм.

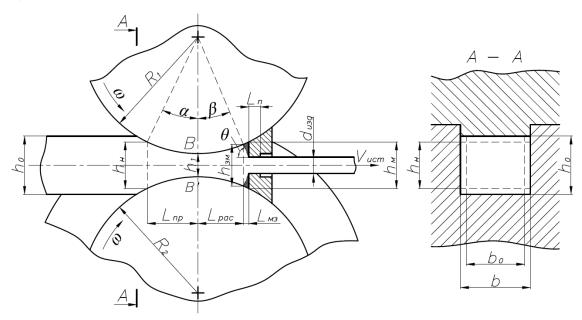


Рисунок 3.1 – Принципиальная схема совмещенной прокатки прессования

Будем считать, что катающие радиусы обоих валков равны между собой, т.е.  $R_1 = R_2 = R$ . В плоскости BB' средняя по сечению скорость движения металла по зоне прокатки максимальна и определяется окружной скоростью вращения валков  $V_{\it e}$  с учетом коэффициента проскальзывания  $k_{\it np}$ . 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:

$$V_{ce\kappa} = k_{np} \cdot V_e \cdot F_l = k_{np} \cdot \omega \cdot R \cdot b \cdot h_l, \qquad (3.1)$$

где  $\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$  - угловая скорость вращения валков; n - число оборотов валков в минуту.

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

$$N_p = N_{\partial e\phi} + N_{mp_M} + N_{mp_{\pi}} , \qquad (3.2)$$

где  $N_{\partial e \phi}$  - мощность, затрачиваемая на деформацию металла без учета контактного трения;  $N_{mp_{\scriptscriptstyle M}}$  - мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения на границе упругой и пластической зон перед матрицей;  $N_{mp_{\scriptscriptstyle \Pi}}$  - мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения на калибрующем пояске матрицы.

Мощность формоизменения с приемлемой для технологических расчетов точностью определяется известным выражением [140]:

$$N_{\partial e\phi} = \xi \cdot \sigma_{S_{CP}} \cdot V_{ce\kappa} \cdot \ln \mu , \qquad (3.3)$$

где  $\xi$  - коэффициент, учитывающий силы среза и неравномерность деформации, принимаемый в нашем случае из-за специфики процесса равным 2;  $\sigma_{s_{cp}} = \sqrt{\sigma_{s_0} \cdot \sigma_{s_\kappa}}$  - величина среднего по пластической зоне сопротивления деформации;  $\sigma_{s_0}$  - начальное значение сопротивления деформции;  $\sigma_{s_\kappa} = \sigma_{s_0} \cdot c$  - сопротивление деформации на выходе из матрицы; c - коэффициент упрочнения, зависящий от температуры, степени и скорости деформации;  $V_{ce\kappa}$  - секундный объем деформируемого металла;  $\mu$  - коэффициент вытяжки при выдавливании прутка.

Мощность, необходимая для преодоления сил трения, возникающих на зеркале матрицы или обжимающей части пластической зоны:

$$N_{mp_{M}} = \frac{F_{3M}}{\sin \theta} \cdot \ln \mu \cdot \tau_{M} \cdot V_{\tau_{M}} , \qquad (3.4)$$

где  $F_{3M}=h_{3M}\cdot s$  - площадь зеркала матрицы;  $\theta$  - расчётный угол канала матрицы, принимаемый равным  $90^{\circ}$ ;  $\tau_{M}=\psi_{M}\frac{\sigma_{S_{CP}}}{\sqrt{3}}$  - среднее значение напряжения трения в обжимающей части перед матрицей, рассчитываемое в соответствии с законом Зибеля;  $\psi_{M}$  - осредненный показатель трения, характеризующий условия трения на зеркале матрицы;  $V_{\tau_{M}}$  - среднее значение скорости скольжения металла, равное полусумме скорости перемещения его в обжимающей части перед зеркалом матрицы и скорости истечения прутка из матрицы, т.е.

$$V_{\tau_{M}} = \frac{1}{2} \left( \frac{V_{CEK}}{F_{3M}} + \frac{V_{CEK}}{F_{U3\partial}} \right) = \frac{1}{2} V_{CEK} \left( \frac{1}{h_{3M} \cdot b} + \frac{4}{\pi \cdot d_{U3\partial}^{2}} \right)$$

Мощность, необходимая для преодоления сил трения прессуемого металла о калибрующий поясок матрицы

$$N_{mp_{\pi}} = \mu \cdot F_n \cdot \tau_n \cdot V_{\tau_{\pi}}, \tag{3.5}$$

Суммарная мощность  $N_a$ , необходимая для осуществления процесса СПП, формируемая активными силами трения, действующими на стенках закрытого калибра, образованного валками, один из которых выполнен с ручьем, а другой с выступом, будет складываться:

$$N_a = N_{mp_1} + N_{mp_2}, (3.6)$$

где  $N_{mp_1}$  - мощность активных сил трения, действующих на контактных поверхностях, образованных катающими диаметрами обоих валков;  $N_{mp_2}$  - мощность активных сил трения, действующих на стенках валка с ручьем.

Если принять, что изменение высоты h в зонах прокатки и распрессовки слева и справа от плоскости BB подчиняется выражению:

$$h = h_1 + R \cdot \varphi^2$$

где  $\varphi$  - угол, отсчитываемой от указанной плоскости;

тогда мощность  $N_{\mathit{mp}_{\scriptscriptstyle I}}$  на катающих поверхностях обоих валков будет равна:

$$N_{mp_{I}} = k_{np} \cdot V_{e} \left( \tau_{e} + \tau_{H} \right) \cdot b \cdot R \int_{0}^{\alpha + \beta} \left( I - \frac{h_{I}}{h_{I} + R \cdot \varphi^{2}} \right) d\varphi =$$

$$= k_{np} \cdot V_{e} \left( \tau_{e} + \tau_{H} \right) \cdot b \cdot R \left[ \left( \alpha + \beta \right) - \sqrt{\frac{h_{I}}{R}} \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{R}{h_{I}}} \cdot \left( \alpha + \beta \right) \right) \right], \qquad (3.7)$$

где  $\alpha$  - угол, определяющий дугу контакта металла с валками в зоне прокатки;  $\beta$  - угол, определяющий дугу контакта металла с валками в зоне распрессовки перед матрицей;  $\tau_{g} = \psi_{g} \cdot \frac{\sigma_{s_{CP}}}{\sqrt{3}}$  и  $\tau_{H} = \psi_{H} \cdot \frac{\sigma_{s_{CP}}}{\sqrt{3}}$  - средние значения напряжений трения, соответственно, на верхнем и нижнем валках, рассчитываемые по закону Зибеля;  $\psi_{g}$  и  $\psi_{H}$  - осредненные показатели трения, характеризующие условия трения, соответственно, на верхнем и нижнем валках.

Мощность  $N_{mp_2}$  , создаваемую силами трения на стенках валка с ручьем, при условии представления контактных поверхностей в виде прямолинейной трапеции вместо реальной криволинейной по аналогии с  $N_{mp_1}$  , можно определить по формуле:

$$N_{mp_{2}} = k_{np} \cdot 2V_{g} \cdot \tau_{cm} \cdot h_{cp} \cdot R \left[ (\alpha + \beta) - \sqrt{\frac{h_{l}}{R}} \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{R}{h_{l}}} \cdot (\alpha + \beta) \right) \right], \quad (3.8)$$

где  $au_{cm} = \psi_{cm} \cdot \sigma_{s_{CP}}$  - средние значения напряжений трения на каждой из двух боковых стенках калибра, рассчитываемых в соответствии с законом Зибеля;

 $\psi_{cm}$  - осредненный показатель трения, характеризующий условия трения на стенках валка с ручьем;  $h_{cp}=\frac{1}{3}(h_{\!{}_{\!H}}+h_{\!{}_{\!I}}+h_{\!{}_{\!J\!M}})$  - осредненное значение высоты очага деформации в зонах прокатки и распрессовки.

В соответствии с принципом минимума полной мощности [141, 142] на практике будет реализован такой процесс, на который затраты энергии будут минимальными, поэтому, как уже указывалось ранее, для осуществления выдавливания металла через матрицу необходимо выполнение неравенства:

$$N_p \le N_a, \tag{3.9}$$

Подстановка выражений (3.3) – (3.5), (3.7) и (3.8) в неравенство (3.9), в результате которой может быть записан его развернутый вариант, приводит к получению достаточно громоздкого математического выражения. Поэтому с использованием представленных выше формул была разработана и реализована программа расчета отдельных составляющих уравнения баланса мощностей в пакете прикладных программ Microsoft Excel 2007, с помощью которой проведен анализ влияния отдельных факторов на осуществление процесса СПП.

В качестве критерия оценки был принят условный коэффициент запаса мощности  $K_N$ , рассчитываемый по формуле:

$$K_N = \frac{N_a}{N_p K_3},\tag{3.10}$$

где  $K_3$ = 1,1 — коэффициент, учитывающий, что при выдавливании части металла («уса») в зазор между валками и матрицей расходуется дополнительная энергия, которая по экспериментальным оценкам составляет до 10% от затраченной.

Вариант, при котором  $K_N$  будет больше 1, соответствует такому сочетанию геометрических и технологических параметров, характеризующих условия протекания процесса СПП, при которых выдавливания металла через матрицу становится возможным. В качестве иллюстрации ниже будет рассмотрен пример расчета показателя  $K_N$  для некоторой комбинации входных параметров максимально отражающих реальные условия осуществления процесса СПП при обработке ис-

следуемых сплавов. Необходимо отметить, что для расчетов принимали среднюю величину радиуса валков, а значения начального сопротивления деформации  $\sigma_{s_0}$  принимали для сплава 9. Значения последних вместе с расчетными геометрическими и технологическими показателями, а также результаты определения составляющих уравнения баланса мощностей сведены в табл. 3.1.

На рис. 3.2 отображена динамика изменения коэффициента  $K_N$  при той же комбинации входных параметров с изменением значений коэффициентов трения  $f_i$ , отражающих возможные условия трения на контакте деформируемого металла с инструментом. Значения коэффициентов трения на различных контактных поверхностях заданы в том диапазоне, который рекомендован авторами работы [143] для практических расчетов при отсутствии данных и подходящих индикаторных диаграмм: на катающих диаметрах обоих валков:  $\psi_{g} = \psi_{h} = 0.75 \div 1$ ; на стенках валка с ручьем:  $\psi_{cm} = 0.75 \div 1$ ; в обжимающей части матрицы:  $\psi_{m} = 0.5 \div 0.75$ ; на калибрующем пояске матрицы:  $\psi_{n} = 0.5 \div 0.75$ .

Из рассмотрения данных, приведенных на рис. 3.2, следует, что для обеспечения стабильного протекания процесса СПП необходимо стремиться к созданию на контакте обрабатываемой заготовки с валками условий трения, близких по определению [143] к варианту деформирования металла в условиях интенсивного прилипания его к поверхности инструмента, т.е. когда  $\psi_6 = \psi_{cm} \ge 0.9$ . При этом, на контакте металла с обжимающей и калибрующей поверхностями матрицы трение нужно минимизировать до уровня, соответствующего условиям деформирования металла при отсутствии интенсивного прилипания его к инструменту, т.е. когда  $\psi_M = \psi_R \le 0.75$ . Следовательно, обеспечивая в практических условиях то или иное сочетание значений показателей трения, с использованием описанного выше алгоритма, можно произвести расчеты и сделать вывод о возможности или невозможности осуществления процесса СПП при заданной комбинации геометрических и технологических параметров.

Таблица 3.1 – Значения параметров и составляющих мощности процесса СПП

Входные параметры			
Средний радиус валков, мм	100		
Ширина калибра $b$ , мм	15		
Минимальный зазор между валками $h_I$ , мм	7		
Высота зеркала матрицы $h_{\scriptscriptstyle M}$ , мм	20		
Диаметр прессуемого прутка $d$ , мм	9		
Длина калибрующего пояска матрицы $l_n$ , мм	2		
Число оборотов валков $n$ , об/мин	4		
Угол зеркала матрицы $ heta$ , град	90		
Начальная высота заготовки $h_0$ , мм	14		
Начальная ширина заготовки $b_0$ , мм	14		
Начальное сопротивление металла $\sigma_{s_0}$ , МПа	40		
Показатель трения на катающих поверхностях валков $\psi_{g}$ , $\psi_{H}$	0,9		
Показатель трения на стенках валка с ручьем $\psi_{cm}$	0,9		
Показатель трения на обжимающем и калибрующем участках матрицы $\psi_{\scriptscriptstyle M}$ , $\psi_{\scriptscriptstyle R}$	0,5		
Коэффициент упрочнения металла при прессовании прутка $C$	1,7		
Коэффициент, учитывающий неравномерность деформации $\xi$	2,0		
Коэффициент проскальзывания $k_{np}$	1		
Расчетные геометрические и технологические параметры			
Высота распрессованной заготовки на входе в очаг деформации в зоне прокатки $h_{H}$ , мм	13,96		
Высота распрессованной заготовки на входе в очаг деформации в зоне прессования $h_{_{M3}}$ , мм	19,85		
Угол, определяющий длину очага деформации в зоне прокатки $\alpha$ , град	15,55		
Угол, определяющий длину очага деформации в зоне распрессовки $oldsymbol{eta}$ , град	21,2		
Коэффициент вытяжки $\mu$	4,50		
Периметр калибрующего отверстия матрицы $\Pi_{uso}$ , мм	28,26		
Линейная скорость вращения валков $V_{\mathfrak{g}}$ , мм/мин	39,77		
Средняя скорость перемещения металла по поверхности матрицы $V_{\tau_{_{M}}}$ , мм/с	36,87		
Скорость истечения металла из матрицы $V_{ucm}$ , мм/с	61,30		
Напряжение трения в обжимающей части матрицы $\tau_{_{M}}$ , МПа	15,06		
Напряжение трения на калибрующем пояске матрицы $\tau_n$ , МПа	19,63		
Напряжение трения на катающих поверхностях валков $\tau_{e}$ , $\tau_{h}$ , МПа	27,10		
Напряжение трения на стенках валка с ручьем $\tau_{cm}$ , МПа	27,10		
Значения составляющих уравнения баланса мощностей и коэффициент запаса мощност			
Мощность, затрачиваемая на осуществление процесса $N_{\partial e\phi}$ , Вт	512,30		
Мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения в обжимающей части матрицы $N_{mpM}$ , Вт	257,74		
Мощность, затрачиваемая на преодоление сил трения на калибрующем пояске матрицы $N_{mp\Pi}$ , Вт	449,24		
Суммарная затрачиваемая мощность, $N_p$ Вт	1219,28		
Мощность сил трения на поверхности катающих диаметров валков $N_{mpl}$ , Вт	927,96		
Мощность сил трения на стенках валка с ручьем $N_{mp2}$ , Вт	901,66		
Суммарная мощность активных сил трения $N_a$ , Вт	1829,62		
-	1027,02		

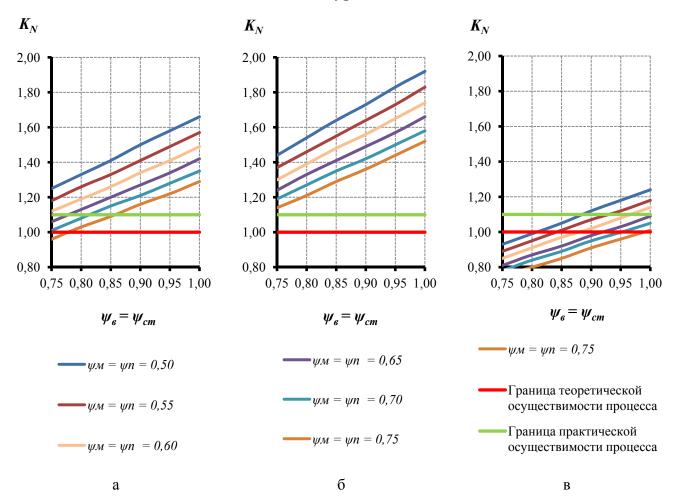


Рисунок 3.2 — Изменение коэффициента запаса мощности  $K_N$  в зависимости от различных условий контактного трения металла с валками и матрицей при обработке слитков из сплава 9 способом совмещенной прокатки-прессования с коэффициентом вытяжки  $\mu = 4,5$ : а — для установки СПП-200 (средний диаметр валков D = 200 мм; размеры калибра 7x15 мм), 6—для установки СЛиПП-2,5 (средний диаметр валков D = 430 мм; размеры калибра 10x22 мм); в — для установки СЛиПП-2,5 (средний диаметр валков D = 430 мм; размеры калибра 20x42 мм)

Следует отметить, что диаграммы, подобные приведенной на рис. 3.2, можно построить и для любого другого сочетания входных параметров при реализации процесса СПП варьируя, например, размерами очага деформации с обеспечением заданного значения коэффициента вытяжки при прессовании и требуемых температурно-скоростных условий его осуществления. В совокупности они формируют общую картину изменения вдоль очага деформации прочностных характеристик обрабатываемого металла, в частности, сопротивления деформации. Поскольку данный параметр в том или ином виде входит во все составляющие уравнения баланса мощностей, то, следовательно, от точности его определения будет

существенно зависеть и корректность использования описанного выше математического аппарата.

Таким образом, выполнена постановка и решена задача реализации процесса совмещенной прокатки-прессования с помощью метода баланса мощностей. С использованием результатов решения можно моделировать различные варианты реализации процесса СПП, варьируя технологические и геометрические параметры, и установить закономерности изменения мощности, подводимой валками, в сравнении с мощностью, затрачиваемой на выдавливание металла. При этом проводится не только качественная, но и количественная оценка возможности осуществления процесса с использованием в качестве основного критерия коэффициента запаса мощности. Экспериментальные исследования, проведенные на установке совмещенной обработки [102] при заданных параметрах (см. табл. 3.1), подтвердили полученные аналитическим путем выводы и свидетельствовали об устойчивой реализации процесса СПП для обработки алюминиевых сплавов.

Результаты исследований дали возможность определить деформационные и температурно-скоростные параметры процесса СПП, которые были реализованы при проведении экспериментальных исследований по получению деформированных полуфабрикатов и изучению их свойств.

## 3.2 Моделирование процесса совмещенной прокатки-прессования сплавов системы Al-Zr в программном комплексе DEFORM<sup>®</sup> 3D

В данном разделе приведены результаты моделирования процесса совмещенной прокатки-прессования заготовок из сплава 9 с целью оценки энергосиловых параметров расходуемых на деформацию металла и сравнения их с экспериментальными значениями усилий при обработке на установке СПП-200. Для реализации задачи в Deform 3D в качестве допущений были приняты следующие:

- валки и матрица несжимаемые;
- материал заготовки изотропный;

- показатели трения на валках и матрице по Зибелю составляют  $\psi_B = 0.9$  и  $\psi_M = 0.5$ , соответственно;
- трение на контакте валков и матрицы отсутствует;
- количество элементов составило: для валка с выступом 41578; валка с канавкой 42087; заготовки 23629; матрицы 28779;

Для определения реологических характеристик были проведены исследования на установке горячего скручивания, разработанной учеными кафедры ОМД ИЦМиМ СФУ по методике, представленной в работе [102], в соответствии с которой определяется истинное сопротивление деформации условно трубчатого образца при заданной температуре, степени и скорости деформации.

Результаты исследований в виде графиков зависимости сопротивления деформации от степени, скорости деформации и температуры для сплава 9 приведены на рис. 3.3.

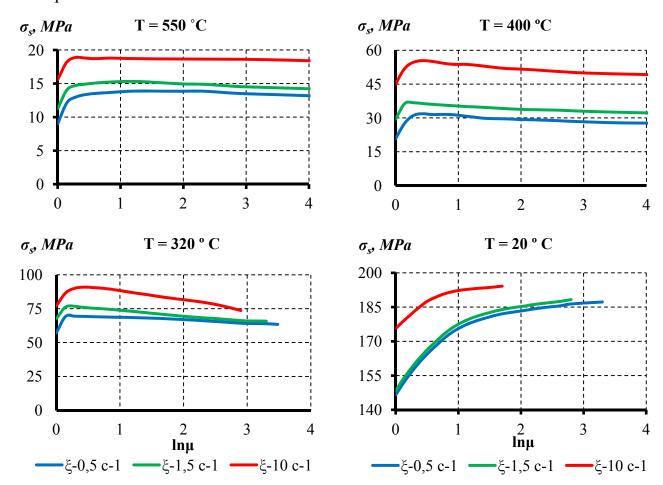


Рисунок 3.3 – Зависимость сопротивления деформации  $\sigma_s$  сплава 9 от истиной деформации  $\ln \mu$  при различных скоростях деформации  $\xi$  и температурах T

При создании компьютерной модели в качестве исходных были приняты характеристики валкового инструмента для установки СПП-200 (см. раздел 2.2), размеры заготовки 14x14x250 мм; диаметр прутка 9 мм; высота зеркала матрицы 20 мм; температура нагрева заготовок составляла  $T_{3A\Gamma} = 550$ °C; температура валков  $T_B = 100$ °C, степень деформации при прокатке  $\varepsilon = 50$ %; число оборотов валков n = 4 об/мин; коэффициент вытяжки при прессовании  $\mu = 4,5$ .

Компьютерная модель процесса совмещенной прокатки-прессования показана на рис. 3.4.

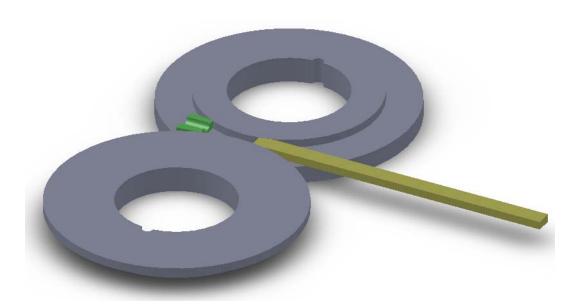


Рисунок 3.4 – Компьютерная модель, полученная в программной среде SolidWorks (разрез)

Результаты расчета температурно-скоростных условий обработки приведены на рис. 3.5.

Анализируя результаты моделирования, следует отметить, что изменения температуры заготовки (рис. 3.5 а), нагретой перед прокаткой-прессованием до 550°С, происходит в соответствии с экспериментальными наблюдениями: в зоне обжатия при прокатке она за счет контакта с валками уменьшается до температур порядка 250°С, а затем в зоне выдавливания растет до температуры порядка 320°С за счет деформационного разогрева при больших вытяжках (степенях деформации). При этом скорость деформации (рис. 3.5 б) изменяется в пределах от 1 до 2 с<sup>-1</sup> в зоне прокатки, и растет до 10 с<sup>-1</sup> в зоне выдавливания. В связи с этим для рас-

чета энергосиловых параметров следует принимать значения сопротивления деформации, соответствующие полученным по модели скоростям и температурам обработки металла по зонам. Такие расчеты показали, что усилие, действующее на валки, в среднем составляет 210,5 кH, а усилие, действующее на матрицу, равно 151,8 кH.

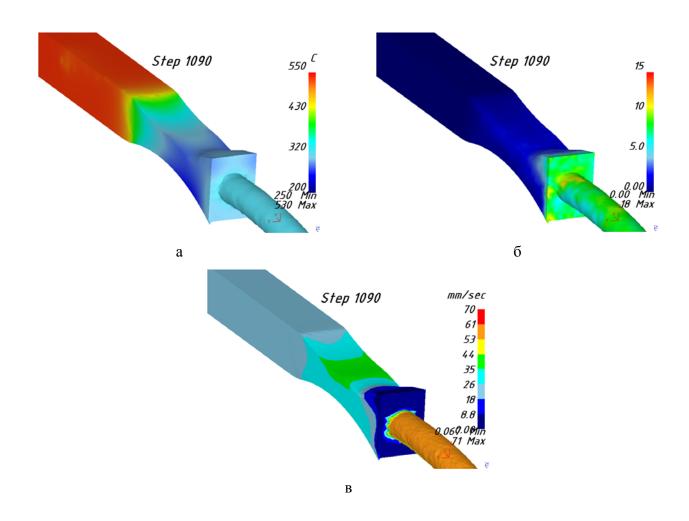


Рисунок 3.5. Результаты моделирования процесса СПП: а – распределение температуры, °С; б - скоростей деформации, с⁻; ¹; в - скоростей перемещения металла, мм/с

Скорость перемещения металла (рис. 3.5 в) в зоне прокатки возрастает, затем в зоне распрессовки снижается до величин порядка 8-9 мм/с, а затем в зоне выдавливания резко возрастает до величин порядка 60 мм/с. Эти данные согласуются с результатами теоретических исследований [31] и использовались для расчета составляющих полной мощности (см. табл. 3.1).

Таким образом, проведенное компьютерное моделирование совмещенной прокатки-прессования позволило оценить температурно-скоростные условия проведения процесса. При этом были определены энергосиловые параметры процесса СПП для одного из сплавов системы Al-Zr, расчет которых показал, что для проведения экспериментальных исследований можно использовать имеющие установки совмещенной обработки, у которых максимальное усилие прижима матрицы к валкам составляло 300 кН.

## 3.3. Экспериментальные исследования структуры и свойств полуфабрикатов, полученных из сплавов системы Al-Zr с применением способа совмещенной прокатки-прессования

В соответствии с методикой, изложенной в разделе 2.2, совмещенной обработке подвергались слитки из сплавов 1-22 (см. табл. 2.1) размерами 14х14х250мм и различным содержанием циркония в сплаве. При этом варьировались режимы приготовления сплавов и содержание легирующих добавок и примесей в сплаве магния). Температура (железа, кремния, нагрева заготовок составляла  $T_{3A\Gamma} = 550$  °C; температура нагрева валков  $T_B = 100$  °C, степень деформации при прокатке  $\varepsilon = 50\%$ ; коэффициент вытяжки при прессовании  $\mu = 4.5$ ; число оборотов валков n = 4 об/мин. Тензометрические замеры энергосиловых параметров показали, что усилие, действующее на валки, составило 198 кН, а усилие, действующее на матрицу, равнялось 165 кН.

На первом этапе проводили металлографические исследования литых и деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-Zr, отлитых по разным режимам, для определения рациональных температур плавки и заливки расплава с целью полного растворения циркония в алюминии и получения максимально пересыщенного твердого раствора циркония в алюминии, при которых не происходит выделение первичных кристаллов  $Al_3Zr$ . Фотографии микроструктур литых и деформированных полуфабрикатов приведены на рис. 3.6-3.14.

Микроструктура слитков из сплавов 1-22, состоит из дендритов α-твердого раствора на основе алюминия и избыточных фаз с Fe и Si, расположенных пре-имущественно по границам зерен, а также по границам дендритных ячеек, причем плотность выделений избыточных фаз по границам зерен значительно выше, чем по границам дендритных ячеек. Избыточные фазы имеют пластинчатую, скелетную и сферическую форму и при больших увеличениях (более 1000 крат) проявляют неоднородный контраст.

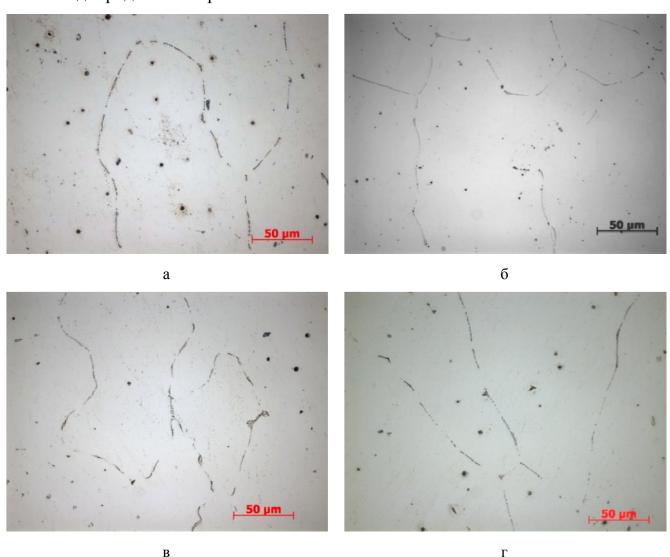


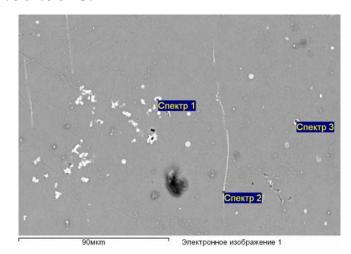
Рисунок 3.6 - Микроструктура слитков из сплавов системы Al-Zr:

а - сплав 4 (0,15% Zr); б - сплав 11 (0,20% Zr); в - сплав 14 (0,25% Zr); г - сплав 18 (0,30% Zr)

При травлении сплавов на основе системы Al-Zr не выявлено ликвации по сечению дендритов. Характерное расположение избыточных фаз в литой структу-

ре исследуемых сплавов свидетельствует о кристаллизации этих фаз по эвтектическому или перитектическому механизму. Микроструктурным методом анализа не выявлено различий в микроструктуре сплавов исследуемых слитков. В микроструктуре сплавов 4, 7, 11, 14, полученных при температуре плавки и заливки в пределах 750-790 °C, обнаружены дисперсные (менее 10 мкм) включения Al<sub>3</sub>Zr игольчатого строения (рис. 3.6).

Был проведен микроренгеноспектральный анализ (MPCA) на растровом электронном микроскопе для определения химического состава фаз, выявленных в структуре слитков. Результаты показали, что микроструктура состоит из дендритов α-твердого раствора на основании алюминия, фаз AlFe и AlFeSi, расположенных по границам и объему дендритных ячеек (рис 3.7). Форма и расположение кристаллов Al<sub>3</sub>Zr, обнаруженных в микроструктуре исследуемых слитков, свидетельствует о том, что они выделяются в результате первичной кристаллизации при приготовлении расплава в диапазоне температур плавки и заливки 750-790 °C.

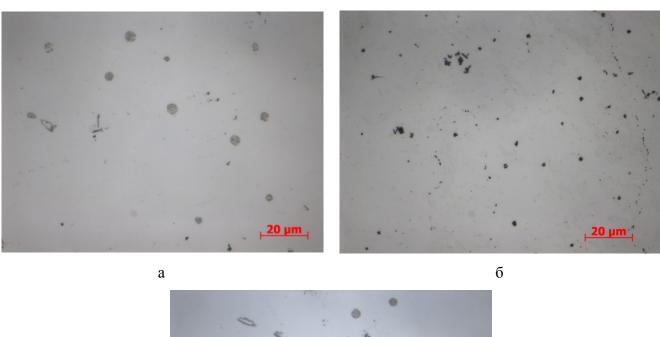


Спектр	Al	Si	Fe	Zr
Спектр 1	90.41		1.14	8.45
Спектр 2	95.97		4.03	
Спектр 3	92.61	1 37	6.03	

Все результаты в атом %

Рисунок 3.7 – Результаты MPCA слитка из сплава 4 (0,15%) при  $T_{nn}$  = 790 °C и  $T_{3an}$  = 750 °C

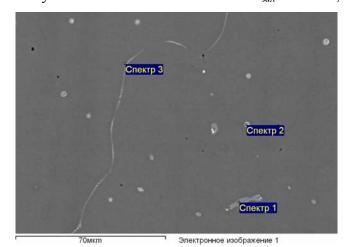
В слитке образца 7, который был получен при температурах плавки и заливки, рекомендуемыми в работе [90] в интервале  $800-900~^{0}$ С, по результатам микроскопического анализа частицы  $Al_{3}$ Zr не обнаружены (3.8 а, б), что также подтверждается результатами MPCA (рис 3.9)



\_20 μm

В

Рисунок 3.8 - Микроструктура слитков из сплава 7 (A1 - 0,15% Zr - 0,20% Fe), полученного литьем в кокиль:  $a-T_{\text{зал}}=880$  °C;  $\delta-T_{\text{зал}}=800$  °C;  $b-T_{\text{зал}}=780$  °C

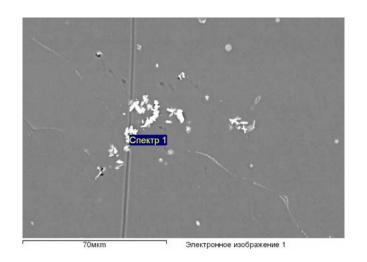


Все результаты в атом %

Спектр	Al	Si	Fe
Спектр 1	96.12	1.28	2.60
Спектр 2	93,36	1.16	5.48
Спектр 3	98,81	1.18	

Рисунок 3.9 — Результаты MPCA слитка из сплава 7 (Al - 0,15% Zr - 0,20% Fe), полученного литьем в кокиль при  $T_{3ал}$  = 880 °C и  $T_{3ал}$  = 800 °C

При температурах плавки и заливки 780 °C в структуре слитков из сплава 7 обнаружены включения  $Al_3Zr$  в виде тонких разветвленных кристаллов (рис 3.8, в), что подтверждается результатами MPCA (рис. 3.10)



Все результаты в атом %

Спектр Al Zr

Спектр 1 64,28 35.72

Рисунок 3.10 – Результаты MPCA слитка из сплава 7 (Al - 0,15% Zr - 0,20% Fe), полученного литьем в кокиль при  $T_{3an}$  = 780 °C

Результаты микроструктурного анализа слитков из сплавов 1-3, 5, 6, 10, 12, 13, 15 и 16, полученных при температуре плавки и заливки, соответственно, 850 °C и 750 °C, показали, что в микроструктуре помимо фаз AlFe, AlFeSi присутствуют включения  $Al_3Zr$ .

В микроструктуре слитков образцов 17, 18, полученных при температуре плавки 800 °C, обнаружены в большом количестве кристаллы фазы Al<sub>3</sub>Zr игольчатой и пластинчатой формы. Морфология фаз Al<sub>3</sub>Zr свидетельствует об их кристаллизационном происхождении. Алюминиды циркония распределены неравномерно по сечению шлифа и образуют скопления, в которых размеры включений не превышают 10 мкм. В областях скопления интерметаллидных включений Al<sub>3</sub>Zr выявляются литейные дефекты в виде оксидных плен, усадочной пористости и микротрещин (рис. 3.11 а). Единичные интерметаллидные включения Al<sub>3</sub>Zr обнаружены в образцах, изготовленных при температуре плавки 900°C, при этом их количество не должно снижать технологичность сплава и механические свойства получаемых полуфабрикатов электротехнического назначения (рис. 3.11 б).

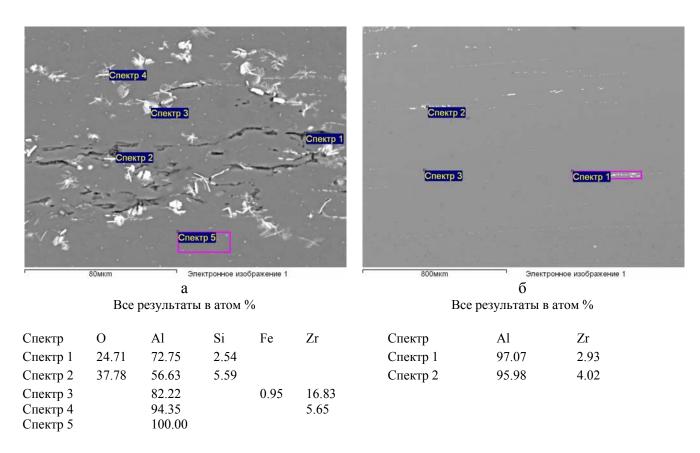


Рисунок 3.11 – Результаты МРСА слитка из сплава 18:

а - 
$$T_{\pi\pi}$$
 = 800 °C и  $T_{\text{зал}}$  = 740 °C; б -  $T_{\pi\pi}$  = 900 °C и  $T_{\text{зал}}$  = 740 °C

Таким образом, проведенные микроструктурные исследования литых заготовок из сплавов 17 и 18 показали, что при температуре плавки 800 °C и температурах заливки 740 и 800 °C, происходит выделение первичных кристаллов Al<sub>3</sub>Zr при кристаллизации, что снижает концентрацию циркония в твердом растворе и эффект термостойкости проволоки. При температуре плавки 900 °C вне зависимости от температуры заливки 740 или 900 °C цирконий практически полностью растворяется в алюминиевом растворе, образуя пересыщенный твердый раствор (рис 3.11, б).

Микроструктура литой заготовки из сплава 7, полученного в ЭМК, в сравнении с заготовкой, полученной литьем в кокиль, представлена на рис. 3.12.

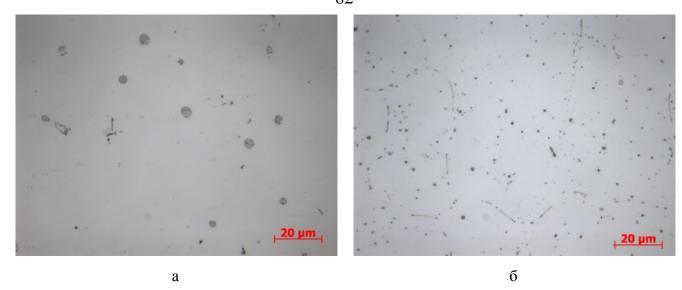


Рисунок 3.12 — Микроструктура слитков из сплава 7 (Al-0,15% Zr-0,20% Fe): a — литье в металлическую форму, б — литье в электромагнитный кристаллизатор

Сравнение слитков, полученных указанными способами литья, показало, что в структуре после ЭМК избыточные фазы существенно мельче (примерно в 5 раз), а плотность их распределения выше. На шлифах присутствуют более светлые фазы  $Al_3Zr$  в виде ограненных кристаллов игольчатой и пластинчатой формы, распределенные неравномерно по сечению шлифа и образующие скопления размерами 15-20 мкм. Таким образом, получение заготовки с применением литья в электромагнитный кристаллизатор дает возможность получить более дисперсную однородную структуру металла, а, следовательно, высокие прочностные свойства.

Металлографический анализ деформированных полуфабрикатов в виде прутков, полученных с применением способа СПП, показал, что микроструктура образцов наследует структуру литых слитков (рис. 3.13). При деформации прутков форма и размеры интерметаллидных фаз существенно не изменились по сравнению со строением включений в слитках. В прутке из сплава 9, отличающемся повышенным содержанием магния, по сечению прутка проявляется неоднородность распределения структурных составляющих, характеризующаяся зонами с повышенным количеством эвтектических составляющих, вытянутых в строчки, и зонами с единичными выделениями эвтектических кристаллов.

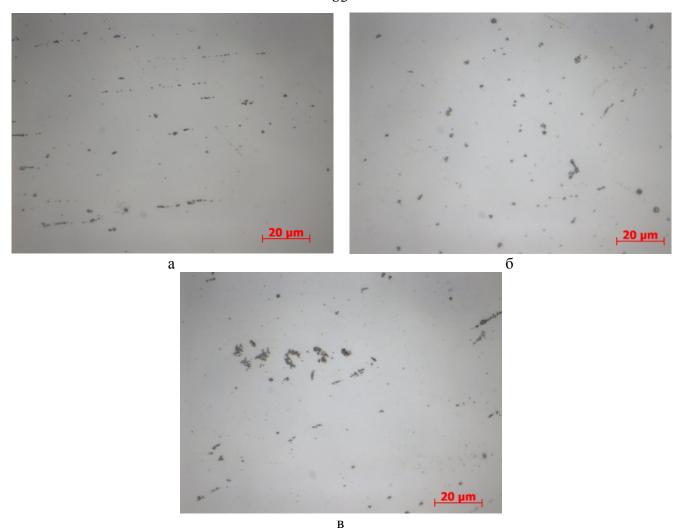


Рисунок 3.13 — Микроструктура прутков из сплава 7 (Al-0,15% Zr-0,20% Fe) диаметром 9 мм, полученных способом СПП:  $a-T_{3ал}=880$  °C;  $\delta-T_{3ал}=800$  °C;  $B-T_{3ал}=780$  °C

Исследование микроструктуры проволоки, полученной волочением из прутков, показало, что в долевом сечении проволоки наблюдается строчечное расположение дисперсных частиц избыточных фаз, раздробленных при холодном волочении в направлении оси деформации. Волочение прутков приводит к измельчению включений  $Al_3Zr$  и ориентированию их в строчки (рис. 3.14).

Таким образом, микроструктура полуфабрикатов, полученных способом СПП и последующего волочения, зависит от качества слитка и режима его получения. Если исходная структура слитка не содержит интерметаллидных частиц  $Al_3Zr$ , то и в деформированном состоянии их не наблюдается.

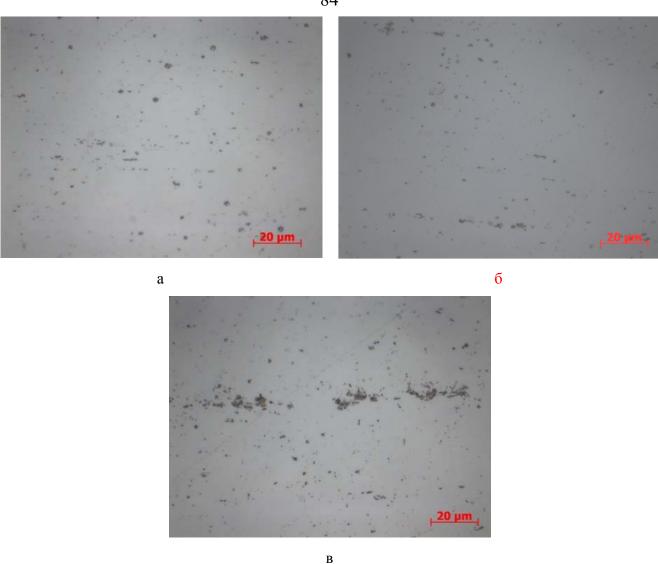


Рисунок 3.14 — Микроструктура проволоки из сплава 7 (Al-0,15% Zr-0,20% Fe) диаметром 2 мм, полученной из прутка после СПП:  $a-T_{\text{зал}}=880~^{\circ}\text{C}; \ \delta-T_{\text{зал}}=800~^{\circ}\text{C}; \ B-T_{\text{зал}}=780~^{\circ}\text{C}$ 

Результаты исследования механических свойств литых заготовок и деформированных полуфабрикатов представлены в табл. 3.2 - 3.4.

Известно, что микротвердость технического алюминия составляет 20-25 кгс/мм<sup>2</sup>, поэтому значения твердости 33-36 кгс/мм<sup>2</sup>, полученные на литых заготовках свидетельствуют об образовании твердых растворов циркония на основе алюминия, результатом которого является твердорастворное упрочнение. Значения микротвердости прутков изменяются в пределах 37 - 48 HV, а проволоки 47 - 64 HV. Значения микротвердости деформированных полуфабрикатов повышаются при накоплении деформации, причем преимущественно за счет холодной.

Таблица 3.2 – Механические свойства литых заготовок из сплавов Al-Zr

No॒	Zr,	Fe,	Т	t	Т	<b>5</b> 0.0	6	δ,	ни
сплавов	% %	%	Т <sub>пл</sub> , °С	t <sub>в</sub> , мин	Т <sub>зал</sub> , °С	σ <sub>0,2</sub> , ΜΠα	$\sigma_{\scriptscriptstyle B}, \ M\Pi a$	0, %	HV, кгс/мм <sup>2</sup>
1	0,10	0,12	850	10	750	42	53	13,8	- KI C/ IVIIVI
2	0,10	0,15	850	10	750	47	61	23,0	_
3	0,12	0,15	850	10	750	53	81	17,0	_
4	0,15	0,20	750	5	750	48	68	34,3	_
	0,15	0,20	750	10	750	46	64	42,2	_
	0,15	0,20	750	20	750	48	61	21,7	_
	0,15	0,20	790	5	790	46	62	24,1	_
	0,15	0,20	790	10	790	51	70	26,0	_
	0,15	0,20	790	20	790	47	63	31,0	_
5	0,15	0,03	850	10	750	42	54	49,5	-
6	0,15	0,12	850	10	750	46	71	30,3	-
7	0,15	0,20	900	10	880	45	62	39,8	_
	0,15	0,20	900	10	800	41	61	39,5	_
	0,15	0,20	900	10	720	45	61	32,8	_
7*	0,15	0,20	900	10	880	80	111	39,4	-
8	0,15	0,30	900	10	900	68	72	35,0	-
9	0,20	0,20	900	10	850	ı	-	ı	-
10	0,20	0,12	850	10	750	59	67	10,7	_
11	0,20	0,20	790	10	790	47	66	38,8	33,1±1,6
12	0,25	0,03	850	10	750	42	58	35,6	-
13	0,25	0,12	850	10	750	45	54	13,7	-
14	0,25	0,20	790	10	790	44	58	21,5	33,6±1,1
15	0,28	0,26	850	10	790	49	71	35,0	-
16	0,30	0,12	850	10	750	52	66	20,2	-
17	0,30	0,15	900	10	900	51	69	28,0	-
	0,30	0,15	900	10	740	47	84	34,0	-
	0,30	0,15	800	10	800	55	73	38,0	_
	0,30	0,15	800	10	740	43	84	32,0	-
18	0,30	0,20	900	10	900	42	69	22,0	-
	0,30	0,20	900	10	740	46	87	37,0	-
	0,30	0,20	800	10	800	42	72	27,0	-
	0,30	0,20	800	10	740	41	87	36,0	-
	0,30	0,20	790	10	790	-	-	-	35,5±1,8
19	0,30	0,40	900	10	900	48	80	28,9	-
20	0,35	0,20	800	10	740	43	86	32,7	-
	0,35	0,20	800	10	800	42	73	26,9	-
	0,35	0,20	900	10	740	42	76	22,3	-
21	0,35	0,20	900	10	900	37	72	32,9	-
21	0,40	0,20	800	10	800	54	75	29,7	-
	0,40	0,20	900	10	740	51	78	21,3	_
22	0,40	0,20	900	10	900	52	90	36,6	-
22	0,50	0,15	900	10	900	48	95	40,5	-

Примечание \* - слиток получен литьем в кокиль и ЭМК

Таблица 3.3 – Механические свойства и удельное электросопротивление прутков из сплавов системы Al-Zr, полученных способом СПП

	1			, ,			Γ			Τ
№	Zr,	Fe,	Тпл,	t <sub>B</sub> ,	Т <sub>зал</sub> ,	$\sigma_{0,2}$ ,	$\sigma_{\scriptscriptstyle B},$	δ,	HV,	ρ,
образцов	%	%	°C	МИН	°C	МПа	МПа	%	HV, кгс/мм²	Ом·мм <sup>2</sup> /м
сплавов	0,10	0,12	850	10	750	88	115	25,2	44,7±1,8	0,02724
1 2	0,10	0,12	850	10	750	88	126	17,2	44,7±1,8 44,5±1,5	0,02724
3	0,12	0,13	850	10	750	112	160	20,7	44,3±1,3 44,8±1,3	0,02759
4	0,12	0,23	750	5	750	93	127	18,5	44,8±1,3 47,4±0,8	0,02739
4	0,15	0,20	750	10	750	90	118	21,5	47,4±0,8 43,4±0,6	_
	0,15	0,20	750	20	750	91	117	22,0		_
	0,15	0,20	790	5	790	92	125	16,6	43,2±0,7	_
	0,15		790	10	790 790	92 94	123		43,3±1,8	-
	0,15	0,20 0,20	790	20	790 790	90	121	15,2 13,9	48,1±1,8	-
5	0,15		850	10	750	75	120	38,3	44,6±12	0,02795
6	0,15	0,03	850	10	750	97	130	18,4	37,2±1,1 45,4±1,5	0,02793
7	0,15	0,12	900	10	880	99	123		$43,4\pm1,3$ $40,8\pm2,1$	0,02037
/	0,15	0,20	900	10	800	93	125	17,3		-
	0,15	0,20	900	10	720	93 96	138	17,0 20,3	40,5±2,5	-
7*			900			98		,	42,2±1,6	-
8	0,15	0,20	900	10	880	98	136	20,4	40,1±2,3	0.02000
9	0,15	0,30		10	900		135	17,0	- 42.0+1.7	0,03090
	0,20	0,20	900	10	850	99	145	16,0	42,0±1,7	0,03250
10	0,20	0,12	850	10	750	98	142	16,2	46,5±0,8	0,03085
11	0,20	0,20	790	10	790	97	137	18,5	44,0±0,9	0.02160
12	0,25	0,03	850	10	750	90	137	29,9	42,5±1,5	0,03169
13	0,25	0,12	850	10	750	99	132	24,1	43,8±0,3	0,03279
14	0,25	0,20	790	10	790	98	142	16,6	43,1±1,6	0.02245
15	0,28	0,26	850	10	790	96	136	26,0	- 47.0+1.0	0,03345
16	0,30	0,12	850	10	750	99	144	17,2	47,9±1,8	0,03240
17	0,30 0,30	0,15	900 900	10 10	900 740	92 112	148 150	22,0	-	0,03340 0,03320
	0,30	0,15 0,15	800	10	800	93	136	18,0 23,0	-	0,03320
	0,30	0,15	800	10	740	93	140	22,0	- -	0,03150
18	0,30	0,13	900	10	900	90	136	20,0		0,03340
10	0,30	0,20	900	10	740	99	139	24,0	_	0,03270
	0,30	0,20	800	10	800	84	147	23,0	_	0,03150
	0,30	0,20	800	10	740	92	145	16,0	_	0,03140
	0,30	0,20	790	10	790	92	137	17,5	-	-
19	0,30	0,40	900	10	900	92	147	20,0	-	0,03276
20	0,35	0,20	800	10	740	106	139	15,0	-	0,03273
	0,35	0,20	800	10	800	109	127	24,7	-	0,03248
	0,35	0,20	900	10	740	105	128	25,1	-	0,03261
	0,35	0,20	900	10	900	110	141	16,3	-	0,03319
21	0,40	0,20	800	10	800	109	142	15,2	-	0,03256
	0,40	0,20	900	10	740	110	121	28,7	-	0,03234
	0,40	0,20	900	10	900	108	166	18,3	-	0,03321
22	0,50	0,15	900	10	900	105	146	23,0	-	0,03376

Примечание \* - слиток получен литьем в кокиль и ЭМК

Таблица 3.4 — Механические свойства и удельное электросопротивление проволоки из сплавов системы Al-Zr, полученной волочением прутка после СПП

20					, ,	<u> </u>	90310 10111		T	
№	Zr,	Fe,	Τ <sub>пл</sub> ,	t <sub>B</sub> ,	Т <sub>зал</sub> ,	$\sigma_{0,2}$ ,	$\sigma_{\scriptscriptstyle B},$	δ,	HV,	ρ,
образцов	%	%	°C	МИН	°C	МПа	МΠа	%	кгс/мм2	$Om \cdot mm^2/m$
сплавов	0.10	0,12	850	10	750	172	223	2.1	46,8±1,6	0,02962
$\frac{1}{2}$	0,10	0,12	850	10	750	180	223	2,1	$46,8\pm1,0$ $47,8\pm1,0$	0,02962
3	0,12	0,13	850	10	750	190	245	1,6	47,8±1,0 49,1±1,1	0,02910
4	0,12	0,23	750	5	750	156	227		49,1±1,1 48,7±0,9	0,03080
4	0,15	0,20	750 750	10	750 750	161	219	2,0	46,7±0,9 46,7±0,6	0,03080
	0,15	0,20	750 750	20	750 750	152	219	1,3		0,02880
	0,15	l .	790	5	790	162		2,3	46,8±1,2	0,02820
	-	0,20	790 790		790 790	159	222 226	1,7	47,7±1,4	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
	0,15	0,20		10				1,7	46,7±1,8	0,02980
	0,15	0,20	790	20	790	164	230	1,95	48,8±0,8	0,02940
5	0,15	0,03	850	10	750	131	159	2,9	47,1±0,3	0,02962
7	0,15	0,12	850 900	10	750	142	216	2,4	59,9±1,5	0,02972
/	0,15	0,20		10	880	153	213	2,4	49,4±1,2	0,02990
	0,15	0,20	900	10	800	141	218	2,9	49,4±1,8	0,02950
7.4	0,15	0,20	900	10	720	125	238	2,7	46,1±0,5	0,03070
7*	0,15	0,20	900	10	880	155	215	3,5	42,8±2,3	0,03130
8	0,15	0,30	900	10	900	160	233	3,7	-	0,03328
9	0,20	0,20	900	10	850	187	249	2,6	63,0±1,2	0,03420
10	0,20	0,12	850	10	750	180	234	2,0	60,2±1,9	0,03155
11	0,20	0,20	790	10	790	163	226	1,9	47,3±0,5	0,03111
12	0,25	0,03	850	10	750	154	187	2,3	56,6±0,8	0,03298
13	0,25	0,12	850	10	750	151	228	1,3	60,7±2,1	0,03329
14	0,25	0,20	790	10	790	147	223	1,9	48,3±0,7	0,03200
15	0,28	0,26	850	10	790	127	211	2,2	-	0,03384
16	0,30	0,12	850	10	750	164	220	2,6	61,3±0,5	0,03360
17	0,30	0,15	900	10	900	165	228	2,0	-	0,03369
	0,30	0,15	900	10	740	175	214	2,5	-	0,03381
	0,30	0,15	800	10	800	182	224	1,8	-	- 0.02100
18	0,30	0,15	800 900	10	740 900	165	225 199	2,5	-	0,03189
18	$0,30 \\ 0,30$	0,20 0,20	900	10 10	740	156 160	215	2,4	-	0,03387 0,03280
	0,30	0,20	800	10	800	159	213	3,2 3,7	_	0,03266
	0,30	0,20	800	10	740	172	252	2,0	_	0,03273
	0,30	0,20	790	10	790	-	-	2,0	_	0,03273
19	0,30	0,40	900	10	900	166	226	3,9	_	0,03312
20	0,35	0,40	800	10	740	173	208	2,7	_	0,03312
	0,35	0,20	800	10	800	170	208	2,5	_	0,03384
	0,35	0,20	900	10	740	180	227	2.4	_	0,03339
	0,35	0,20	900	10	900	178	213	2,5	-	0,03322
21	0,40	0,20	800	10	800	132	203	1,4	-	0,03349
	0,40	0,20	900	10	740	159	202	3,4	-	0,03365
	0,40	0,20	900	10	900	163	219	3,4	-	0,03398
22	0,50	0,15	900	10	900	156	222	3,3	-	0,03464

Примечание: \* - слиток получен литьем в ЭМК

Диапазон изменения значений временного сопротивления разрыву  $\sigma_B$  прутков составляет 115-170 МПа, пластические характеристики по  $\delta$  находятся в диапазоне 15-25 %. Повышение Zr в сплаве с 0,10-0,15 % до 0,20-0,30 % приводит к увеличению микротвердости и прочности полуфабрикатов за счет увеличения его концентрации в твердом растворе, который искажает кристаллическую решетку алюминия, обеспечивая твердорастворное упрочнение.

Холодная деформация волочением приводит к увеличению значений  $\sigma_B$  до 250 МПа, и обеспечивает свойства, регламентированные стандартами ASTM и IEC. Уровень пластичности прутков обеспечивает холодную деформацию при волочении без отжигов и обрывов со степенями деформации до 90%. В сплаве 9, легированном магнием, значения прочности и микротвердости повышены.

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 упрочнение. В прутках и проволоке образцов 3 и 19 наблюдаются максимальные прочностные свойства в среднем 150 и 250 МПа, соответственно. Таким образом, концентрация железа в сплаве значительно повышает объемную долю железистых фаз и приводит к существенному упрочнению. Использование электромагнитного кристаллизатора (образец 7\*) позволяет получить более дисперсную структуру и прочностные характеристики.

Полученные значения удельного электрического сопротивления (УЭС) для деформированных полуфабрикатов (см. табл. 3.3, 3.4) показывают, что для прутков значения УЭС находятся в интервале 0,027-0,034 Ом·мм²/м, для проволоки – 0,028-0,035 Ом·мм²/м. В результате анализа полученных значений по электропроводности выявлено, 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. Проволока из сплавов с пониженным содержанием железа и циркония имеет минимальное значение УЭС.

Первичные кристаллы Al<sub>3</sub>Zr , обнаруженные в микроструктуре литых заготовок и прутков при температуре плавки 800 °C, свидетельствуют о неполном растворении циркония в твердом растворе. Это приводит к снижению содержания циркония в твердом растворе, по сравнению с исходной концентрацией (сплавы 17 и 18) и более низким значениям уровня УЭС. При температуре 900 °C цирконий полностью растворяется в твердом растворе, образуя максимально пересыщенный твердый раствор, что приводит к высоким значениям УЭС катанки. Таким образом, повышение температуры плавки с 800 до 900 °C приводит к росту уровня УЭС проволоки, что объясняется увеличением степени пересыщения твердого раствора цирконием.

Для определения термостойкости прутков и проволоки из исследуемых сплавов проводили испытания в соответствии с методикой, приведенной в стандартах IEC 62004, по которой соответствие тому или иному типу проволоки определяется, исходя из условия:

$$K_H = \frac{\sigma_{B_I}}{\sigma_{B_0}} \cdot 100\% \qquad K_H \ge 90\%$$
 (3.11)

где  $K_H$  - остаточный коэффициент напряжения, %;  $\sigma_{B_0}$  - значение временного сопротивления, при комнатной температуре, МПа;  $\sigma_{B_1}$  - значения временного сопротивления разрыву после нагрева до температуры, определенной в стандарте IEC для каждого типа провода, МПа.

Проволоку из сплавов подвергали температурным испытаниям. В первом случае образцы подвергали длительной выдержке в печи при температуре 180 °C в течение 400 часов и охлаждали на воздухе, во втором — нагревали образцы до температур 230 °C и 280 °C, выдерживали в течение 1 часа и охлаждали на воздухе. В обоих случаях определяли значения временного сопротивления разрыву и удельного электросопротивления в зависимости от времени выдержки и температуры. Результаты испытаний образцов сплавов представлены на рис. 3.15 и 3.16.

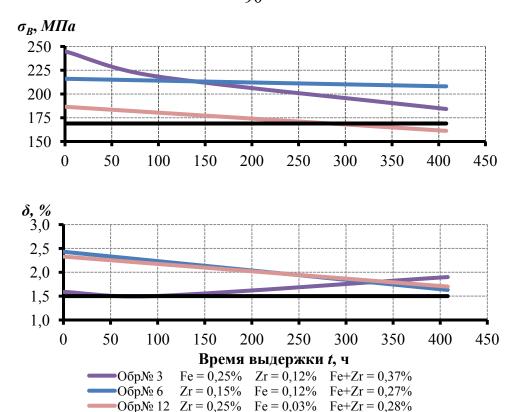
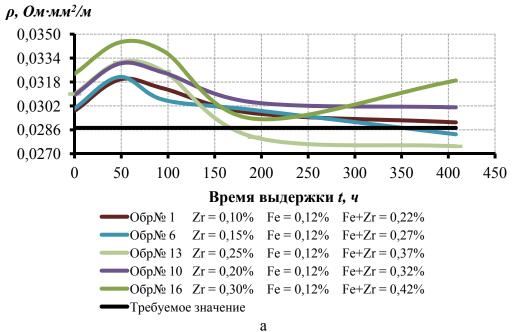
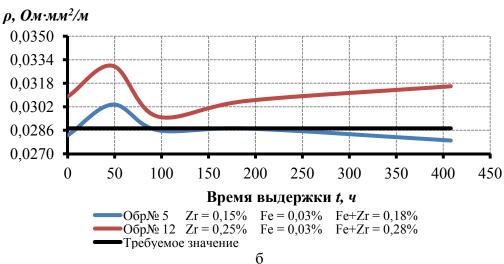


Рисунок 3.15 – Механические характеристики проволоки из сплавов Al-Zr после выдержки при T = 180 °C

Требуемое значение

Анализ графиков, представленных на рис. 3.15, показывает, что значения временного сопротивления разрыву образцов проволоки после длительной выдержки при 180 °C уменьшаются более значительно у сплавов с меньшей концентрацией циркония. В таблице 3.5 приведены расчетные значения остаточного коэффициента напряжения  $K_H$ . Наименьшее значение последнего (75 %) наблюдается у сплава 3 с концентрацией Zr = 0,12%, даже несмотря на достаточно высокую концентрацию Fe = 0,25%. Увеличение концентрации циркония до 0,25% в сплаве 12 с одновременным понижением содержания Fe до 0,03 % приводит к увеличению этого показателя до 86%. Более высокие значения коэффициента напряжения (96%) наблюдаются у сплава 6, который отличается средней концентрацией Zr и Fe по сравнению со сплавами 3 и 12. Таким образом, термостойкость проволоки из сплавов 3 и 6 удовлетворяет требованиям стандарта IEC 62004 на соответствие типу проводов AT1 по термостойкости.





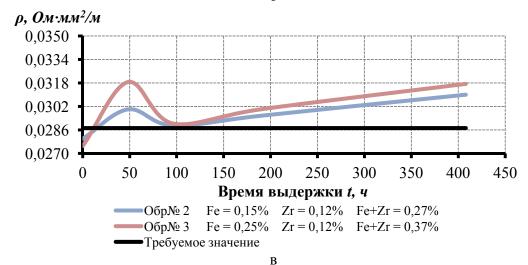


Рисунок 3.16 — Зависимость удельного электросопротивления проволоки из сплавов Al-Zr после выдержки при T=180 °C: a — для образцов 1,6,10,13,16; б — для образцов 2,3; b — для образцов 5,12

Таблица 3.5 — Результаты испытаний на термостойкости проволоки из сплавов Al-Zr при температуре 180 °C и выдержке 400 час (AT1).

№ спл.	Zr, %	Fe, %	Т <sub>пл</sub> , °С	Т <sub>зал</sub> , °С	σ <sub>в</sub> , МПа	δ, %	$K_H$ , %
3	0,12	0,25	850	750	245	1,6	75,2
6	0,15	0,12	850	750	216	2,4	96,3
12	0,25	0,03	850	750	187	2,3	86,4

Дополнительно исследовали влияние термообработки на удельное электросопротивление. Значения УЭС для образцов проволоки в исходном деформированном состоянии составляли 0,0275-0,0320 Ом·мм<sup>2</sup>/м. После длительных испытаний значения удельного электросопротивления уменьшаются незначительно (в среднем на 5%) и составляют 0,0279-0,0317 Ом·мм<sup>2</sup>/м в зависимости от химического состава (рис. 3.16).

С увеличением концентрации циркония в сплаве растут значения удельного электросопротивления, как показано на рис. 3.16 а и б, тогда как изменение концентрации железа менее значительно влияет на этот показатель (см. рис. 3.16 в). Исходя из представленных графиков, можно выделить сплавы 5, 6 и 13 с содержанием Zr и Fe на уровне 0,15-0,25% и 0,03-0,12%, соответственно, значения удельного электросопротивления которых находятся на уровне 0,02750-0,02830 Ом·мм²/м и удовлетворяют требованиям стандарта IEC 62004 на соответствие типу AT1.

На рис. 3.16 также можно заметить характерную для всех образцов закономерность изменения электросопротивления: во время первых двух суток выдержки электросопротивление резко возрастает, а затем падает. В связи с этим на графиках наблюдается характерный максимум на исследуемой зависимости. Природу этого явления, по всей видимости, можно связать со структурными изменениями, происходящими в металле при нагреве проволоки, а именно, со снижением ликвации зерен α-твердого раствора по сечению образцов проволоки. Более равномерное распределение атомов Zr в кристаллической решетке алюминия замедляет протекание электрического тока по объему проводника, что повышает

удельное электросопротивление. Ввиду низкой диффузионной подвижности атомов Zr этот процесс протекает медленно, тем более это термически активируемый процесс, а при температуре 180 °C выравнивающая диффузия протекает с низкими скоростями и может занимать несколько суток. Дальнейшее снижение УЭС можно объяснить тем, что идет процесс дисперсионного упрочнения, в результате которого происходит распад пересыщенного твердого раствора с выделением алюминидов Al<sub>3</sub>Zr.

Температурные испытания прутков проводили при температурах 230 и 280°C, регламентированных стандартом IEC. Результаты представлены в табл. 3.6.

					Температура испытания, °С					
$N_{\underline{0}}$	Zr,	Fe,	Тпл,	Т <sub>зал</sub> ,		230	) (AT1)		280	(AT3)
сплава	%	%	°C	°C	$\sigma_{\scriptscriptstyle B},$	δ,	$K_H$ , %	$\sigma_{\scriptscriptstyle B},$	δ,	$K_H$ , %
					МПа	%	$\kappa_H$ , 70	МПа	%	$K_H$ , 70
8	0,15	0,30	900	900	117	19	86	110	15	81
15	0,25	0,03	850	790	124	15	91	112	16	82
	0,30	0,15	800	740	124	14	89	116	10	83
17	0,30	0,15	800	800	124	14	91	119	11	87
1 /	0,30	0,15	900	740	115	15	77	-	-	-
	0,30	0,15	900	900	124	15	84	108	17	73
	0,30	0,20	800	740	108	12	75	110	14	76
18	0,30	0,20	800	800	127	15	86	113	20	77
18	0,30	0,20	900	740	122	15	88	114	16	82

Таблица 3.6 – Температурные испытания прутков из сплавов системы Al-Zr

Испытания прутков показали снижение предела прочности в среднем на 12 %, и относительного удлинения – на 30 %. Таким образом, значения временного сопротивления разрыву прутков лежит на границе допустимых требований указанных стандартов по типам проводов АТ1 и АТ3.

18

83

112

0,30

0,20

900

900

Определение термостойкости проволоки на соответствие типу термостойкости осуществляли на образцах проволоки, изготовленной из прутков сплава 18 с диаметром 2,00 - 4,30 мм. Поскольку значения удельного электросопротивления (0,0328 Ом·мм<sup>2</sup>/м) прутков из данного сплава изначально выше требуемого уровня, для снижения р их подвергали отжигу перед волочением по режиму рекомендованному в работе [97, 98]: первая ступень – нагрев до температуры 375 °C, выдержка 36 часов + вторая ступень.

Механические свойства и УЭС прутков в деформированном и отожженном состояниях приведены в табл.3.7.

Таблица 3.7 – Исходные механические свойства и удельное электрическое сопротивление прутка из сплава 18

C	остав,				Свойства					
N	мас.%	Τ <sub>пл</sub> ,	Т <sub>зал</sub> ,	в дефо	ормирон	ванном состоянии	ВС	тожженно	м состоянии	
Zı	Fe	°C	°C	σ <sub>B</sub> , ΜΠα	δ, %	ρ <sub>20</sub> , Οм·мм <sup>2</sup> /м	σ <sub>B</sub> , ΜΠα	δ, %	$\rho_{20},  \mathrm{Om} \cdot \mathrm{mm}^2 / \mathrm{m}$	
0,3	0 0,20	900	740	138,67	23,50	0,03266	110	33	0,02819	

После двухступенчатого отжига существенно уменьшилось удельное электрическое сопротивление прутков, а его значение соответствовало требованиям ASTM B941–05, однако предел прочности снизился ниже регламентируемого уровня на 10 МПа, тем не менее, холодное волочение последних привело к достаточному повышению прочности проволоки, значение которого удовлетворяет стандарту (см. табл. 3.7).

Дальнейшее испытание проволоки из сплава 18 при температуре 230 °C (табл. 3.8) с выдержкой 1 час привело к разупрочнению проволоки на 5-6 %, остаточный коэффициент напряжения  $K_H$  сохранился на уровне 95 %, что свидетельствует о соответствии проволоки термостойкости типа AT1. Значение  $K_H$  проволоки после испытания при температуре 280 °C с выдержкой 1 час составил 93 % и удовлетворяет требованиям IEC по типу AT3 (с максимально допустимой длительно действующей рабочей температурой 210 °C).

Проведенные исследования показали, что железо значительно влияет на прочность металла – в сплавах с 0,242-0,265 % Zr с увеличением концентрации от 0,18 до 0,28 % Fe повышается уровень временного сопротивления разрыву с 130 до 147 МПа, при этом железо несущественно влияет на УЭС катанки. Влияние железосодержащих фаз на упрочнение деформированных полуфабрикатов не снижается при последующих технологических переделах изготовления проводов,

а усиливается за счет измельчения железосодержащих частиц при волочении. Поэтому для повышения термостойкости проволоки рекомендуется в сплавах системы Al-Zr повысить концентрацию железа до 0,27-0,30 %.

Таблица 3.8 – Результаты испытаний на термостойкость проволоки из сплава 18

Диаметр про-	Деформир состоя		230	) °C, 1 час (AT1)	280 °C, 1 час (AT3)		
волоки, мм	ρ <sub>20</sub> , Οм·мм <sup>2</sup> /м	$\sigma_{B}, \ M\Pi a$	$σ_{B},$ ΜΠ $a$	$K_H$ , %	$σ_{B},$ ΜΠ $a$	$K_H$ , %	
4,3	0,02839	172	164	95,3	160	93,0	
3,6	0,02839	176	168	95,5	165	93,7	
2,0	0,02867	180	169	93,8	167	92,8	

Таким образом, проведенные исследования позволили получить опытные образцы деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-Zr способом СПП и определить их физико-механические свойства в зависимости от химического состава сплава, режимов приготовления литых заготовок при заданных деформационных и температурно-скоростных условиях их обработки. Результаты исследований были использованы при проектировании опытно-промышленной установки совмещенной обработки на основе технического решения [114], внедряемой на Иркутском алюминиевом заводе, для получения электротехнической катанки из сплавов системы Al-Zr.

## 3.4. Новые технические решения для совершенствования способа совмещенной прокатки-прессования

В патентах [135-139] представлен ряд технических решений, которые позволяют усовершенствовать конструкции матричного узла, и обеспечивают более стабильное протекание процесса прокатки-прессования и снижение энергозатрат. Ниже приведено описание этих решений и результатов их применения при реализации способов совмещенной прокатки-прессования.

Целью устройства по патенту РФ № 119267 [136] (рис. 3.17) является снижение потерь на трение и энергозатраты при поджиме матрицы к валкам за счет снижения сил трения на контакте последней с боковыми стенками калибра валков.

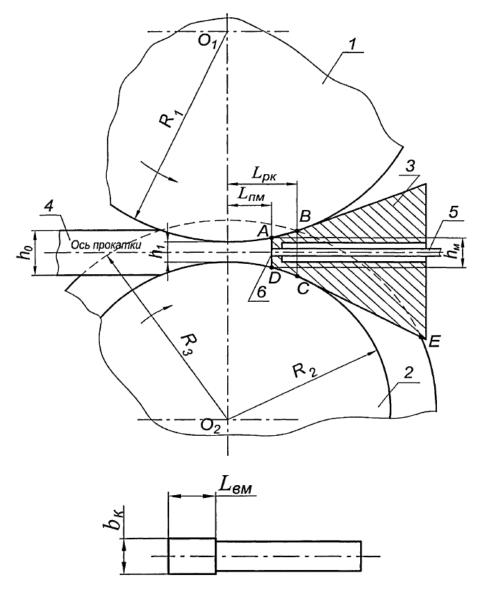


Рисунок 3.17 — Устройство для совмещенной прокатки и прессования профилей по патенту РФ №119267 [136]: 1 — валок выступом; 2 — валок с канавкой; 3 — матрицедержатель; 4 — заготовка; 5 — пресс-изделие; 6 - матрица

При реализации процесса совмещенной прокатки и прессования профилей с помощью данного устройства существенны затраты энергии на преодоление сил трения на поверхности контакта неподвижной матрицы и подвижных валков, что приводит к значительному абразивному износу инструмента, снижению надежно-

сти процесса. Кроме того, силы трения выталкивают матрицу из калибра, вызывая ее перекос в вертикальной плоскости, что приводит к искажению поперечного сечения профиля, т.е. ухудшает качество получаемых профилей, а также требует повышенного усилия прижима матрицы при запирании калибра и усложняет конструкцию устройства для ее прижима.

Для устранения этих недостатков в устройстве для непрерывной прокатки и прессования профилей, включающем валок с ручьем и валок с выступом, образующие закрытый ящичный калибр прямоугольного сечения, на выходе из которого установлена матрица, ее выполняют в виде прямой трапецеидальной призмы, которая имеет различную продольную толщину вдоль оси прокатки и на заходной части имеет выступ, соответствующий прямоугольному сечению закрытого ящичного калибра, а ее остальная часть имеет меньшую продольную толщину.

При этом протяженность выступа на заходной части матрицы должна быть такой, чтобы в рабочем положении матрицы в калибре задняя граница выступа находилась дальше от вертикальной оси прокатки, чем вертикальная плоскость раскрываемости калибра:

$$L_{BM} \ge L_{PK} - L_{IIM}; \tag{3.12}$$

где 
$$L_{PK} = \sqrt{R_3^2 - \frac{(R_3^2 - R_1^2 + D_0^2)^2}{4D_0^2}};$$
 - удаление вертикальной плоскости раскрывае-

мости калибра от оси прокатки;

$$L_{\it ПЛM} = \sqrt{R_{\it ПР}(h_{\it M}-h_{\it 1})}; \ \ -\ \$$
удаление рабочей плоскости матрицы от оси прокатки; 
$$R_{\it ПР} = \frac{2R_{\it 1}R_{\it 2}}{R_{\it 1}+R_{\it 2}} \ \ -\$$
приведенный радиус валков;

 $R_{\rm l}$  - радиус выступа верхнего валка;  $R_{\rm 2}$ ;  $R_{\rm 3}$  - внутренний и наружный радиусы выреза нижнего валка;  $D_{\rm 0}=R_{\rm l}+R_{\rm 2}+h_{\rm l}$ ;

 $h_{_{\! M}}$  и  $h_{_{\! 1}}$  - высота рабочей плоскости матрицы и рабочего зазора между валками соответственно.

Использование такой конструкции матрицы значительно уменьшает площадь поверхности ее контакта с подвижными валками, за счет чего существенно снижаются затраты энергии на преодоление сил трения и прижима матрицы. Для обеспечения равномерного зазора на контактной поверхности валков и матрицы протяженность выступа на заходной части матрицы должна быть такой, чтобы в рабочем положении матрицы в калибре задняя граница выступа находилась дальше от вертикальной оси прокатки, чем вертикальная плоскость раскрываемости калибра, что определяется по формуле (3.12). В противном случае возможно образование заусенца с разной его толщиной на валках, что вызовет перекос матрицы и ухудшит качество получаемых профилей.

Следует отметить, что полное отсутствие зазора между вращающимися валками и неподвижной матрицей невозможно, т. к. данные детали образуют подвижные пары. Кроме того, во время работы инструмент нагревается, поэтому обычно минимально-возможный зазор равен  $\Delta_3 = 0,3-0,4$  мм. Образование заусенца в этом случае возможно только тогда, когда давление при выдавливании профиля через рабочий канал матрицы превысит давление для выдавливания заусенца в зазор между валками и матрицей.

Устройство работает следующим образом. Заготовка 4 начальной высотой  $h_0$  захватывается валками 1 и 2, деформируется до высоты  $h_1$  в закрытом ящичном калибре прямоугольного сечения и выдавливается в виде пресс-изделия 5 через рабочий канал матрицы 6, имеющей высоту рабочей плоскости  $h_M$ . При этом матрица в рабочем положении в калибре располагается на удалении от оси прокатки на расстоянии  $L_{TM}$  (прямая AD на фиг. 1), и вертикальная плоскость раскрываемости калибра расположена от оси прокатки на расстоянии  $L_{PK}$  (прямая BC рис.3.17), а протяженность выступа на заходной части матрицы  $L_{BM}$  будет такой, чтобы в рабочем положении матрицы в калибре задняя граница выступа находилась дальше от вертикальной оси прокатки, чем вертикальная плоскость раскрываемости калибра. Поэтому площадь поверхности контакта неподвижной матрицы и подвижных валков будет не меньше площади фигуры ABCD, а на остальной поверхности матрицы (фигура BEC) контакт с валками будет отсутствовать, т.к. ее продольная толщина будет меньше продольной толщины выступа. Все это позволит существенно снизить затраты энергии на преодоление сил трения и усилие

для прижима матрицы при запирании калибра, убрать перекос матрицы в вертикальной плоскости и повысить качество получаемых пресс-изделий.

Устройство по патенту РФ № 122315 [137] решает задачу повышения качества изделий и стойкости прессового инструмента. При работе данного устройства на поверхности валков образуется заусенец от деформируемого металла, который, проникая в зазор между матрицей и валками, частично или полностью нарушает подачу хладагента через охлаждаемые каналы в матрицедержателе со стороны матрицы на рабочую поверхность валков, и далее через охлаждаемые каналы в матрице в месте выхода пресс-изделия. Это снижает интенсивность и устойчивость отвода тепла вплоть до полного его прекращения. В результате этого дестабилизируются тепловые условия протекания процесса СПП, что вызывает перегрев инструмента и деформируемого металла, появление температурных трещин на изделии, что ведет к получению бракованной продукции и, кроме того, может привести к вынужденной остановке валков. Все это отрицательно сказывается на качестве получаемых профилей. Кроме того, при работе данного устройства для обеспечения равномерного рационального зазора на контактной поверхности подвижных валков и неподвижной матрицы необходимо также соблюдение соосности оси симметрии матрицы с направлением действия прижимного устройства матрицы к валкам.

Для устранения указанных недостатков в устройстве для непрерывной совмещенной прокатки и прессования длинномерных изделий, включающем валок с ручьем и валок с выступом, образующие рабочий калибр, на выходе из которого установлен матрицедержатель с прижимным устройством, а в пазу матрицедержателя установлена матрица в виде прямой трапецеидальной призмы с охлаждающими каналами (рис. 3.18). При этом матрица выполнена составной, содержащей калибровочную и направляющую части. Калибровочная часть имеет цилиндрический выступ, входящий в направляющую часть, основание которой выполнено сферическим, примыкающим к соответствующему сферическому углублению матрицедержателя, выполненного в форме цилиндра и взаимодействующего с прижимным устройством, а на наружной поверхности, в месте примыкания

направляющей части, имеющего резьбу для фиксирования сферического основания направляющей части с помощью накидной гайки, причем в месте примыкания калибровочной и направляющей частей матрицы выполнено сбоку сквозное отверстие для фиксации данных частей с помощью штифта.

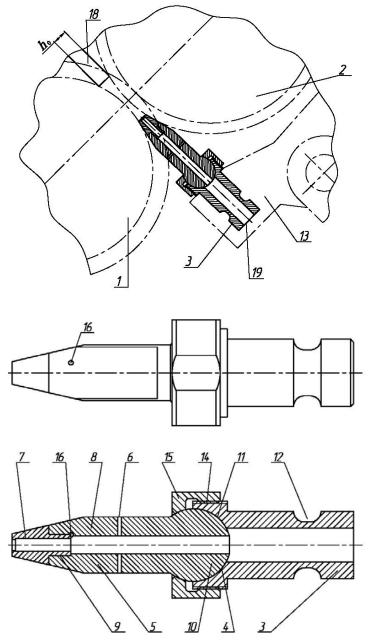


Рисунок 3.18 — Устройство для непрерывной совмещенной прокатки и прессования длинномерных изделий по патенту РФ № 122315 [137]: 1 - валок с ручьем; 2 - валок с выступом; 3 - матрицедержатель; 4 - паз; 5 - матрица; 6 - охлаждающие каналы; 7, 8 - калибровочная и направляющая части; 9 - цилиндрический выступ; 10, 11 - сферические основание и углубление; 12 - цилиндр с выемкой; 13 - прижимное устройство; 14 — резьбовое соединение;15 - накидная гайка; 16 - сквозное отверстие; 17 - штифт; 18 - заготовка; 19 - изделие

Конструкция составной матрицы позволит соблюсти совпадение оси симметрии матрицы с направлением действия прижимного устройства матрицы к валкам за счет изменения положения неподвижной матрицы во вращающихся валках с помощью направляющей ее части, которая имеет возможность изменять свое положение с помощью шарнирного соединения в матрицедержателе, что гарантирует обеспечение равномерного минимального зазора на контактной поверхности подвижных валков и неподвижной матрицы, а также предотвратить отклонение размеров и искажение поперечного сечения профиля, и, тем самым, повысит качество пресс-изделий.

Наличие в предлагаемом техническом решении сменной калибровочной части матрицы, находящейся непосредственно в контакте с вращающимися валками и подвергающейся наиболее интенсивному износу, позволит проводить только ее замену, оставляя прежнюю направляющую часть матрицы нетронутой, что дает возможность существенно снизить затраты на изготовление дорогостоящего прессового инструмента. Оперативно выполнить эту операцию поможет фиксация калибровочной и направляющей частей матрицы с помощью штифта, который располагается в сквозном отверстии, выполненном на боковой поверхности матрицы. Выполнение матрицедержателя цилиндрической формы обеспечит надежное взаимодействие его с прижимным устройством.

Устройство работает следующим образом. Заготовка 18 начальной высотой  $h_0$  захватывается валками 1 и 2, деформируется в закрытом ящичном калибре прямоугольного сечения и выдавливается в виде профиля 19 через рабочий канал матрицы 5. Положение матрицы 5 в закрытом ящичном калибре прямоугольного сечения регулируется с помощью шарнирного соединения в матрицедержателе 3 и обеспечивает равномерный минимальный зазор на контактной поверхности подвижных валков 1, 2 и неподвижной матрицы 5 для изготовления изделия 19 заданного размера и необходимого качества. Для обеспечения регламентируемого отвода избыточного деформационного тепла при реализации процесса СПП производится принудительное охлаждение матрицы 5 и изделия 19 подачей хлада-

гента через охлаждающие каналы 6 матрицы 5, что позволит стабилизировать температурные условия во время проведения процесса СПП и повысить качество прессуемого изделия 19.

При использовании данного устройства отмечено равномерное покрытие рабочей поверхности на обоих валках пленкой алюминия толщиной не более 0,1 мм, что является неизбежным при горячей деформации алюминия без смазки. На поверхности прутка отсутствовали пережимы и искажение формы, а предельное отклонение диаметра прутка по его длине составило  $\pm 0,05$  мм. Износ матрицы при этом был незначительным.

За счет геометрии поверхности матриц, обычно используемых в процессе совмещенной прокатки-прессования, образуется равномерный зазор между поверхностями валков и матрицы, что приводит к образованию заусенца заданной толщины. При длительном процессе деформации образовавшийся заусенец может достигать большой длины, сворачиваться в крупные металлические образования, перемещаться в разные стороны и попадать в движущие детали установки, что приведет к остановке процесса. В частных случаях заусенец может попадать между рабочими бочками валков, что нарушает стабильность процесса, увеличивает нагрузку на валки и способствует их повышенному износу. Все это приводит к необходимости остановки устройства для удаления заусенца и, следовательно, снижает непрерывность и технологичность процесса прессования.

Следующее устройство по патенту РФ № 138590 [138] устраняет эти недостатки и решает задачу повышения стабильности процесса прокатки и прессования (рис. 3.19 и 3.20).

Для этого в устройстве для непрерывной прокатки и прессования, включающем валок с выступом и валок с ручьем, образующие закрытый ящичный калибр прямоугольного сечения, на выходе из которого установлена матрица, которая выполнена в виде прямой трапецеидальной призмы, имеющей трапецеидальную выемку в торцевой части с возможностью прижима краев матрицы к валкам, при этом геометрические параметры выемки должны соответствовать условию

$$h_B = (0.15 \div 0.25) \cdot h_M, \qquad l_B = \frac{h_B}{tg \,\alpha},$$
 (3.13)

где  $h_B$  - высота выступа образованного трапецеидальной выемкой;  $l_B$  - длина трапецеидальной выемки;  $\alpha = 25 \div 60^\circ$  - угол наклона боковых граней трапецеидальной выемки;

 $L_{_{\it IIM}} = \sqrt{R_{_{\it IIP}}(h_{_{\it M}} - h_{_{\! 1}})}$  - удаление матрицы от оси прокатки;

$$R_{\mathit{\PiP}} = \frac{2R_{1}R_{2}}{R_{1} + R_{2}}$$
 - приведенный радиус валков;

 $R_{\scriptscriptstyle 1}$  - радиус выступа валка;  $R_{\scriptscriptstyle 2}$  ,  $R_{\scriptscriptstyle 3}$  - внутренний и наружный радиусы валка с ручьем;

 $h_{\scriptscriptstyle M}$  и  $h_{\scriptscriptstyle 1}$  - высота матрицы в плоскости контакта с валками и рабочего зазора между валками, соответственно.

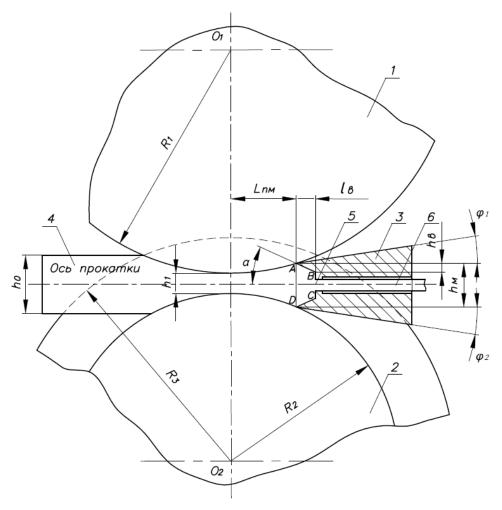


Рисунок 3.19 — Устройство для непрерывной прокатки и прессования изделий из цветных металлов и сплавов по патенту РФ № 138590 [138]: 1 - валок выступом; 2 - валок с канавкой; 3 - матрица; 4 - заготовка; 5 - рабочий канал матрицы; 6 - изделие



Рисунок 3.20 – Вид матрицы для прессования

Использование такой матрицы позволяет перекрывать калибр валков и препятствовать образованию заусенца во время непрерывной прокатки и прессования, что повышает непрерывность и технологичность получения изделий.

Исходя из условия (3.13) геометрические параметры трапецеидальной выемки  $h_B$  и  $l_B$  зависят от высоты матрицы в плоскости контакта с валками  $h_M$  и угла наклона боковых граней трапецеидальной выемки  $\alpha$ , соответственно. При этом параметры  $h_B = 0.15 h_M$  и  $l_B$  при меньшем угле  $\alpha = 25^\circ$  будут соответствовать минимально допустимой высоте  $h_B$  и предельной длине  $l_B$ , обеспечивающих достаточную прочность краев матрицы A и D. Тогда как,  $h_B = 0.25 h_M$  и  $l_B$  при большем угле  $\alpha = 60^\circ$ , наоборот, будут соответствовать предельной высоте  $h_B$  и минимальной длине  $l_B$ . Дальнейшее повышение высоты  $h_B$  и уменьшение длины  $l_B$  приведет к значительному уменьшению камеры распрессовки металла ABCD и, как следствие, снижению качества получаемых изделий.

Устройство работает следующим образом. Заготовка 4 начальной высоты  $h_0$  захватывается валками 1 и 2, деформируется до высоты  $h_1$  в закрытом ящичном калибре прямоугольного сечения и выдавливается в виде изделия 6 через рабочий канал матрицы 5, имеющей высоту рабочей полости матрицы  $h_M$ . При этом матрица в рабочем положении в калибре располагается на расстоянии  $L_{RM}$  от оси валков  $O_1O_2$ , а края матрицы A и D, образованные трапецеидальной выемкой ABCD в ее торцевой части, препятствуют образованию заусенца во время непре-

рывной прокатки и прессования, что повышает непрерывность и технологичность получения изделий.

Таким образом, металл, попав в камеру распрессовки, образованную трапецеидальной выемкой матрицы, компенсировал упругие деформации валков, прижимая края матрицы к поверхностям валков и, тем самым, перекрывал калибр валков и препятствовал образованию заусенца.

Устройство по патенту РФ № 139085 [139] направлено на повышение эффективности процесса непрерывной прокатки и прессования за счет повышения стойкости матрицы. Трение на контакте матрицы с валками при реализации процесса совмещенной прокатки-прессования может приводить к истиранию ее боковых граней, продвижению матрицы в зазор между валками, заклиниванию последних и остановке процесса. Это нарушает непрерывность процесса, снижает производительность и выход годного. Кроме того, истирание матрицы приводит к увеличению контактного трения и ее повышенному абразивному износу, что увеличивает затраты на изготовление инструмента и в целом на производство катанки.

В устройстве для непрерывной прокатки и прессования (рис. 3.21 и 3.22), включающем валок с выступом и валок с ручьем, образующие закрытый ящичный калибр прямоугольного сечения, на выходе из которого установлена матрица, последняя выполнена в виде прямой трапецеидальной призмы, которая дополнительно содержит соединенные последовательно калибрующую вставку и антифрикционную вставку, имеющую возможность контакта с рабочими поверхностями калибра валков. При этом калибрующая вставка выполнена с наклоном боковых граней под углом  $\beta = 5-10^0$  к оси прессования.

При использовании валков с большим радиусом в случае, когда  $\beta=0$  -  $4^0$  , происходит истирание боковых граней калибрующей вставки матрицы поверхностями валков за счет увеличения площади контакта, поэтому выполнение ее с углом  $\beta < 5^0$  нецелесообразно. С увеличением угла  $\beta > 10^0$  нарушается прочность калибрующей вставки матрицы. Антифрикционная вставка, установленная за калибрующей вставкой, контактирует с рабочими поверхностями валков и препят-

ствует истиранию и продвижению последней в зазор между валками, что исключает заклинивание валков в процессе прокатки.

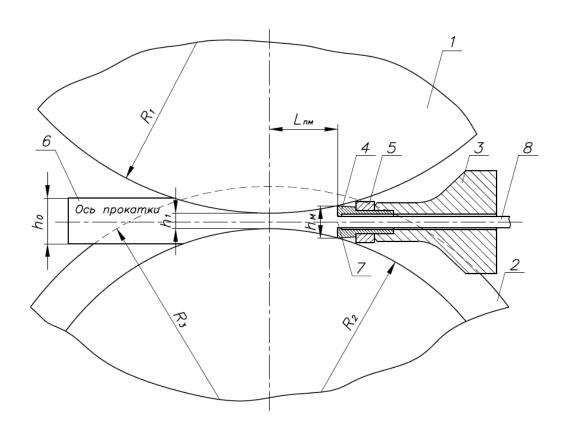


Рисунок 3.21 – Устройство для непрерывной прокатки и прессования катанки из цветных металлов и сплавов по патенту РФ № 139085 [139]: 1 – валок с выступом; 2 – валок с ручьем; 3 – матрица; 4 – калибрующая вставка; 5 – антифрикционная вставка; 6 – заготовка; 7 – рабочий канал матрицы; 8 – изделие

Использование матрицы, дополнительно содержащей соединенные последовательно калибрующую вставку и антифрикционную вставку, имеющую возможность контакта с рабочими поверхностями калибра валков, позволяет существенно увеличить срок службы матрицы за счет того, что калибрующая вставка матрицы выполнена с наклоном боковых граней под углом  $\beta = 5 - 10^0$  к оси прессования, что уменьшает зону контакта матрицы с рабочими поверхностями валков, а антифрикционная вставка предохраняет калибрующую вставку от истирания, препятствует продвижению ее в зазор между валками и исключает заклинивание валков в процессе прокатки.

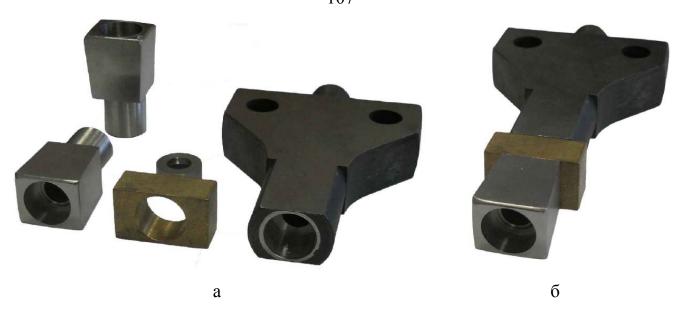


Рисунок 3.22 – Вид матрицы для прессования: а - деталировка; б - сборка

Устройство работает следующим образом. Заготовка 6 начальной высоты  $h_0$  захватывается валками 1 и 2, деформируется до высоты  $h_1$  в закрытом ящичном калибре прямоугольного сечения и выдавливается в виде катанки 8 через рабочий канал матрицы 7, имеющей высоту рабочей полости матрицы  $h_M$ . При этом матрица в рабочем положении в калибре располагается на расстоянии  $L_{RM}$  от оси валков. Калибрующая вставка матрицы 4 выполнена с наклоном боковых граней под углом  $\beta = 5 - 10^0$  к оси прессования, что уменьшает зону контакта матрицы с рабочими поверхностями валков. Антифрикционная вставка 5 контактирует с рабочими поверхностями вращающихся валков, препятствует истиранию и продвижению калибрующей вставки 4 в зазор между валками, что исключает заклинивание валков в процессе прокатки. Все это повышает непрерывность процесса, следовательно, увеличивает производительность и выход годного. Кроме того, позволяет существенно снизить износ матрицы и сократить затраты на изготовление инструмента и в целом производство катанки.

При использовании предлагаемого устройства истирание калибрующей вставки рабочими поверхностями валков отсутствовало, так как антифрикционная вставка контактировала с валками, препятствуя продвижению калибрующей вставки в зазор между валками и, тем самым, обеспечивала более длительную работу устройства до смены рабочего инструмента.

## 3.5. Выводы по главе

Таким образом, выполнена постановка и решена задача реализуемости процесса совмещенной прокатки-прессования с помощью метода баланса мощностей, а также проведено компьютерное моделирование температурно-скоростных условий процесса с целью расчета энергосиловых параметров и сравнения их с экспериментальными значениями. Установлена их хорошая сходимость, при этом погрешность при определении усилия, действующего на валки, составила 6%, а усилия, действующего на матрицу, - 8%.

С использованием результатов теоретических исследований и компьютерного моделирования установлены технологические режимы обработки сплавов системы Al-Zr:

- температура нагрева заготовок  $T_{3A\Gamma} = 550$ °C;
- степень деформации при прокатке  $\varepsilon = 50\%$ ;
- рекомендуемый коэффициент вытяжки при прессовании μ = 4,5;
- скорость вращения валков n = 4 об/мин.

Данные режимы для исследуемых сплавов дают возможность гарантированно осуществить процесс СПП с коэффициентом запаса мощности 1,50 и низкими энергосиловыми затратами.

С использованием этих режимов обработки проведены экспериментальные исследования по получению деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-Zr с использованием способа совмещенной прокатки-прессования и оценке их свойств. Изучено влияние режимов приготовления сплава и химического состава на физико-механические свойства прутков и проволоки, и на основании результатов исследований сделаны следующие выводы:

- температура плавки и заливки металла должна находиться в диапазоне не менее 800-900°C, так как при этом в структуре образцов частицы Al<sub>3</sub>Zr не обнаружены;
- получение заготовки с применением литья в электромагнитный кристаллизатор дает возможность получить более дисперсную однородную структуру металла и высокие прочностные свойства полуфабрикатов по сравнению с литьем в кокиль;

- повышенная концентрация циркония, который обеспечивает твердорастворное упрочнение, и железа, которое значительно повышает объемную долю железистых фаз в сплаве, дает самые высокие значения временного сопротивления разрыву прутков;
- холодная деформация приводит к увеличению значений  $\sigma_B$  до 200 250 МПа, при этом пластические свойства ( $\delta$  = 2-4%) обеспечивают холодную деформацию без отжигов и обрывов со степенями деформации до 90%;
- совместное снижение концентрации железа и циркония обеспечивает более низкие значения удельного электрического сопротивления, но больший вклад вносит изменение содержания циркония, дополнительное легирование сплавов Al-Zr магнием приводит к существенному повышению удельного электросопротивления;
- термостойкость сплава растет с увеличением концентрации циркония до 0,25% (остаточный коэффициент напряжений  $K_H$  составляет 86%), а увеличение содержания железа до 0,12% приводит к еще большему увеличению этого показателя (96%), при этом термостойкость проволоки из сплавов 3,6,18 удовлетворяет требованиям стандарта IEC 62004 на соответствие типу проводов AT1 и AT3.

На основании сделанных выводов для промышленного использования были рекомендованы указанные выше технологические режимы обработки и алюминиевые сплавы с содержанием циркония и железа на уровне: 0,15 - 0,20% Zr и 0,10 - 0,15% Fe для состояния AT1 без термической обработки; 0,25 - 0,30% Zr и 0,2 - 0,25% Fe для состояния AT3 с термической обработкой. Для достижения удельного электросопротивления в соответствии со стандартами ASTM и IEC прутки из данных сплавов необходимо подвергать термической обработке.

На основании результатов проведенных теоретических исследований и моделирования разработаны новые технические решения, защищенные патентами РФ, которые позволили повысить эффективность использования прессового инструмента для реализации процесса совмещенной прокатки-прессования, что дает возможность снизить энергозатраты, повысить производительность и выход годного металла.

#### 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОВМЕЩЕННОГО ЛИТЬЯ И ПРОКАТКИ-ПРЕССОВАНИЯ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Zr

Результаты исследований, представленные в данной главе, включают аналитическую оценку силовых параметров нагружения установки совмещенного литья и прокатки-прессования СЛиПП-2,5, разработку технических решений и технологических рекомендаций по обработке сплавов системы Al-Zr данным способом, которые использовались для проектирования оборудования и технологии изготовления длинномерных деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения. Результаты исследований приведены в работах [144-155], свидетельстве и патентах [156-158].

## 4.1. Аналитическая оценка силовых условий процесса СЛиПП при различных вариантах прижима матрицы к валкам

Одним из ответственных узлов установки СЛиПП-2,5, подробно описанной в главе 2, является прижимное устройство, вариант исполнения которого показан на рисунке 4.1.

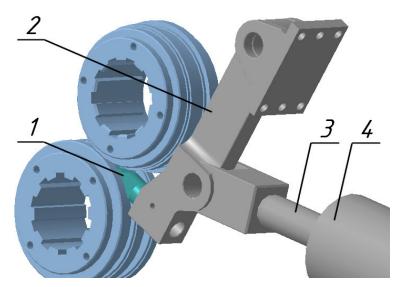


Рисунок 4.1 – Схема прижимного узла установки СЛиПП-2,5: 1 –матрица; 2 – рычаг; 3 – поршень гидроцилиндра; 4 - гидроцилиндр

Реализуемость процесса СЛиПП в значительной мере определяется правильным расположением матричного узла при его размещении в калибре валков, а именно соосностью осей прокатки и прессования, которая задается траекторией перемещения узла с помощью гидроцилиндра. При этом любое отклонение положения прижимного устройства от оптимального (несовпадение осей прокатки и прессования) ведет к увеличению силовых затрат, так как при этом контакт матрицы с валками осуществляется неправильно, зазоры между ними изменяются и начинается истирание матрицы валком по ее боковой поверхности. Все это, в конечном счете, может привести к остановке процесса деформации металла. Для оценки силовых условий проведения процесса СЛиПП заготовок из сплавов системы Al-Zr были проведены расчеты составляющих усилия прижима, действующего на матрицу.

Узел прижимного устройства представляет собой матрицу 1 с матрицедержателем, которые установлены в отверстии рычага 2 и зафиксированы штифтовым соединением. Верхний конец рычага закреплен на станине с помощью шарнирного соединения, а нижний – с поршнем 3 гидроцилиндра 4, также закрепленного на станине посредством шарнирной опоры. Поджатие и отвод матрицы обеспечивает гидроцилиндр, а рычаг направляет матрицу непосредственно в калибр валков. Крепление гидроцилиндра и рычага на общей станине обеспечивает достаточную жесткость конструкции, однако из-за применения ряда шарнирных соединений деталей между собой и станиной перемещение матрицы происходит по дуге относительно оси рычага, что приводит к неравномерному поджатию матрицы к катающим поверхностям валков и появлению неодинакового зазора на контакте валков и матрицы. При увеличении зазора возможно появление «заусенца» с повышенной толщиной из деформируемого металла, что нарушает стабильность протекания непрерывного процесса обработки и может привести к его остановке. Поэтому прижимное устройство матрицы к валкам должно обеспечивать в рабочем положении регламентируемую толщину заусенца из деформируемого металла на валках, т.е. усилие прижима должно удерживать матрицу в заданном положении и обеспечивать равномерную нагрузку на рабочие валки.

Матрица в заданном положении (точка M на рис. 4. 2) удерживается с помощью рычага АВСМ прижимного устройства. Рычаг АВСМ состоит из жестко закрепленных в точке C двух стержней MC и ABC, расположенных под прямым углом по отношению друг к другу. Стержень АВС закреплен с помощью неподвижного шарнира в точке A. Усилие  $P_{\scriptscriptstyle \partial}$  от гидроцилиндра  $B \hspace{-0.5mm} \not\hspace{-0.5mm} \square$  приложено в точке B и направлено под углом  $\beta$  к нормали части рычага AC, поэтому больше действует (давит) на нижний валок с центром в точке  $O_2$ , что приводит в итоге к образованию заусенца большей толщины на поверхности верхнего валка с центром в точке  $O_{l}$ , разворачивает ось прессования через матрицу относительно оси прокатки через валки, что дестабилизирует процесс СЛиПП, приводя к его остановке. Одним из способов решения данной проблемы является создание компенсирующего усилия  $P_{\scriptscriptstyle K}$ , которое необходимо приложить к рычагу ABCM прижимного устройства в точке C с помощью гидроцилиндра, действующего вдоль CK, который расположен по нормали к опорной поверхности и опирается на подвижный шарнир в точке K. При этом соотношение усилий  $P_{\delta}$  и  $P_{K}$  от гидроцилиндров должно быть таким, чтобы усилие прижима удерживало матрицу в заданном положении и обеспечивало совпадение осей прессования и прокатки.

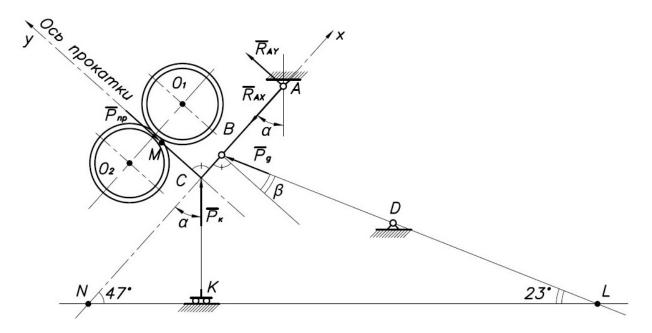


Рисунок 4.2 – Структурная схема прижимного узла к расчету усилия прижима

Для нахождения соотношения усилий  $P_{\delta}$  и  $P_{K}$  от гидроцилиндров в зависимости от известного усилия прижима матрицы  $P_{M}=P_{\Pi P}$  и реакции опоры неподвижного шарнира в точке A рассмотрим равновесие рычага ABCM прижимного устройства. Все силы находятся в одной плоскости, поэтому можно составить только три уравнения равновесия для данной системы сил, а число неизвестных величин -  $P_{\delta}$ ,  $P_{K}$ ,  $R_{AX}$  и  $R_{AY}$  равно четырем, т.е. задача является статически неопределимой. Поэтому примем условие, что проекция активных сил, действующих на нормаль к оси прокатки (ось x), должна равняться нулю:

$$P_K \cos \alpha - P_{\alpha} \sin \beta = 0$$
; или  $P_K = P_{\alpha} \sin \beta / \cos \alpha$  . (4.1)

Теперь задача стала статически определимой. Далее составляем уравнения равновесия для рычага *АВСМ* прижимного устройства и определяем неизвестные величины:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n} m_{A}(F_{i}) = P_{\Pi P} \cdot l_{1} - P_{K} \cdot l_{1} \sin \alpha - P_{\partial} \cdot l_{2} \cos \beta = 0; \\ \sum_{i=1}^{n} F_{ix} = -R_{AX} + P_{K} \cos \alpha - P_{\partial} \sin \beta = 0; \\ \sum_{i=1}^{n} F_{iy} = R_{AY} - P_{\Pi P} + P_{K} \sin \alpha + P_{\partial} \cos \beta = 0; \end{cases}$$

$$(4.2)$$

где  $l_1 = AC$  и  $l_2 = AB$ ;  $l_2/l_1 = 0.74$ ;

Откуда:

$$P_{\delta} = \frac{P_{IIP} \cos \alpha}{\sin \alpha \sin \beta + l_2 / l_1 \cos \alpha \cos \beta};$$
(4.3)

$$P_{K} = \frac{P_{IIP} \sin \beta}{\sin \alpha \sin \beta + l_{2}/l_{1} \cos \alpha \cos \beta};$$
(4.4)

$$R_{AX} = 0; \quad R_{AY} = P_{\Pi P} - P_{\partial} \frac{\cos(\alpha - \beta)}{\cos \alpha} \quad .$$
 (4.5)

Следует отметить, что рассмотренный случай в данной конструкции прижимного устройства возможен только в одном определенном положении матрицы относительно валков. При другом расположении матрицы (дальше или ближе точки M) оси прессования и прокатки не совпадают. Проанализируем данные слу-

чаи. Пусть матрица располагается ближе к точке C рычага ABCM (в точке  $M_2$  рис. 4.3) от рассмотренного положения матрицы в точке  $M_1$ .

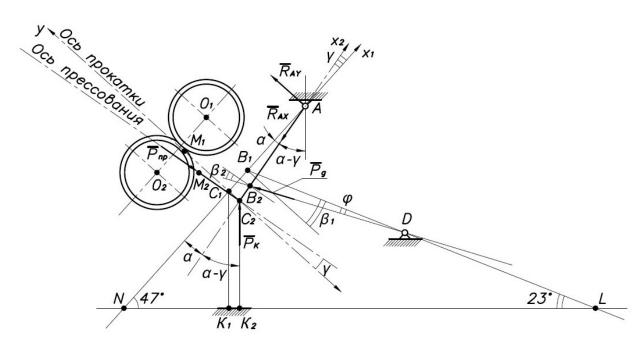


Рисунок 4.3 – Структурная схема прижимного узла опытно-промышленной установки СЛиПП-2,5 при несовпадении осей прессования и прокатки

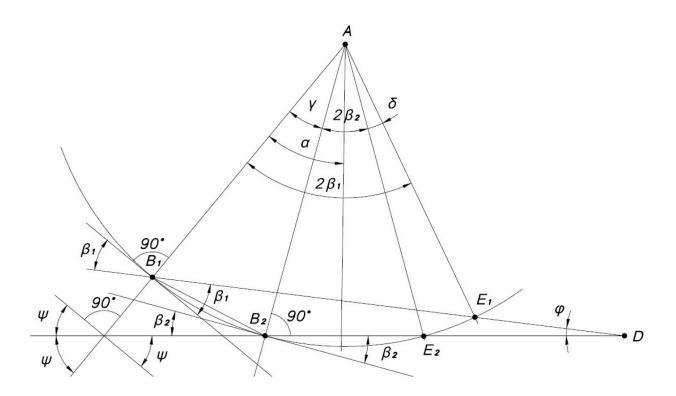


Рисунок 4.4 – Положения углов при несовпадении осей прессования и прокатки

Тогда рычаг прижимного устройства займет положение  $AB_2C_2M_2$  и отклонится на угол  $\gamma$  от исходного положения рычага  $AB_1C_1M_1$ . Оси прессования через матрицу и сортовой прокатки через валки также будут расположены под этим углом  $\gamma$  . Подвижный шарнир из точки  $K_1$  переместится в точку  $K_2$ , а положения точек A и D останутся неизменными.

Условия задачи остаются прежними, но для ее решения необходимо вначале установить, как изменится угол  $\beta_2$ . Для этого рассмотрим схему, приведенную на рис. 4.4.

Учитывая, что углы  $\beta_1$  и  $\beta_2$  образованы соответствующей хордой и касательной, можно получить следующие геометрические соотношения:

$$\angle \beta_{1} = \frac{1}{2} \cup B_{1}E_{1} = \frac{1}{2} \cup (B_{1}B_{2} + B_{2}E_{2} + E_{2}E_{1});$$

$$\angle \beta_{2} = \frac{1}{2} \cup B_{2}E_{2}; \quad \angle \delta = \frac{1}{2} \cup E_{2}E_{1}; \quad \angle \gamma = \frac{1}{2} \cup B_{1}B_{2};$$

$$\angle \varphi = \frac{1}{2} \cup (B_{1}B_{2} - E_{2}E_{1}).$$

$$(4.6)$$

Следует обратить внимание на то, что в данных равенствах фигурирует не длина дуг, а их угловая мера, совпадающая с величиной соответствующего центрального угла. Поэтому выражения (4.6) можно представить в следующем виде:

$$\beta_{1} = \frac{1}{2}(\gamma + 2\beta_{2} + \delta) = \beta_{2} + \frac{\gamma + \delta}{2} = \beta_{2} + \gamma - \varphi;$$

$$\varphi = \frac{\gamma - \delta}{2}; \quad \delta = \gamma - 2\varphi; \quad \psi = \beta_{2} + \gamma.$$

$$(4.7)$$

Далее составляем уравнения равновесия для рычага  $AB_2C_2M_2$  прижимного устройства, принимая во внимание условие, что проекция активных сил, действующих на нормаль к оси прокатки (ось  $x_I$ ) должна равняться нулю, а их проекция на ось прокатки соответствовать заданному усилию прижима матрицы  $P_M = P_{IIP} \cos \gamma$ :

$$P_{HP}\sin\gamma + P_K\cos\alpha - P_{\alpha}\sin\psi = 0; \tag{4.8}$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n} m_{A}(F_{i}) = P_{\Pi P} \cdot l_{1} - P_{K} \cdot l_{1} \sin(\alpha - \gamma) - P_{\partial} \cdot l_{2} \cos \beta_{2} = 0; \\ \sum_{i=1}^{n} F_{ix_{2}} = -R_{AX} + P_{K} \cos(\alpha - \gamma) - P_{\partial} \sin \beta_{2} = 0; \\ \sum_{i=1}^{n} m_{C_{2}}(F_{i}) = R_{AY} \cdot l_{1} + P_{\partial} \cdot l_{2} \cos \beta_{2} = 0. \end{cases}$$

$$(4.9)$$

Отсюда найдем, что:

$$P_{K} = \frac{P_{o}\sin\psi - P_{\Pi P}\sin\gamma}{\cos\alpha};$$
(4.10)

$$P_{\mathcal{A}} = \frac{P_{\mathcal{H}P}[\cos\alpha + \sin\gamma\sin(\alpha - \gamma)]}{\sin\psi\sin(\alpha - \gamma) + l_2/l_1\cos\alpha\cos\beta_2};$$
(4.11)

$$R_{AX} = P_K \cos(\alpha - \gamma) - P_{\partial} \sin \beta_2; \quad R_{AY} = -P_{\partial} \cdot l_2 / l_1 \cos \beta_2. \tag{4.12}$$

Рассмотрим следующий случай, когда матрица располагается дальше от точки C рычага ABCM (в точке  $M_2$ ) от рассмотренного положения матрицы в точке  $M_1$  (рис.4.5).

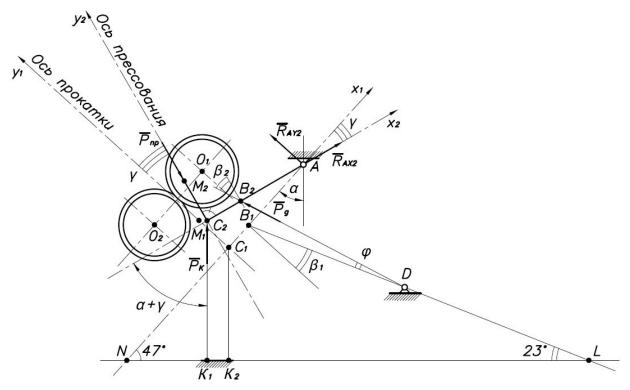


Рисунок 4.5 – Структурная схема прижимного узла при несовпадении осей прессования и прокатки и другом расположении матрицы

Условия задачи остаются прежними, и так же, как и в предыдущем случае, для ее решения вначале установим, как изменится угол  $\beta_2$ . Для этого рассмотрим схему, приведенную на рис. 4.6.

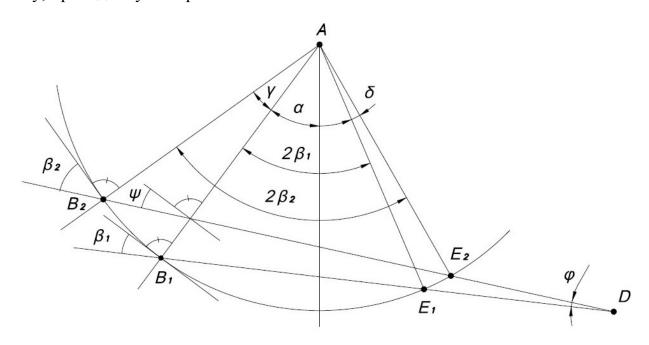


Рисунок 4.6 – Положения углов при несовпадении осей прессования и прокатки и другом расположении матрицы

Из геометрических соотношений получим:

$$\angle \beta_{1} = \frac{1}{2} \cup B_{1}E_{1}; \quad \angle \gamma = \frac{1}{2} \cup B_{2}B_{1}; \quad \angle \delta = \frac{1}{2} \cup E_{1}E_{2};$$

$$\angle \beta_{2} = \frac{1}{2} \cup B_{2}E_{2} = \frac{1}{2} \cup (B_{2}B_{1} + B_{1}E_{1} + E_{1}E_{2});$$

$$\angle \varphi = \frac{1}{2} \cup (B_{2}B_{1} - E_{1}E_{2}).$$

$$(4.13)$$

или в угловых мерах:

$$\beta_{2} = \frac{1}{2}(\gamma + 2\beta_{1} + \delta) = \beta_{1} + \frac{\gamma + \delta}{2} = \beta_{1} + \gamma - \varphi;$$

$$\varphi = \frac{\gamma - \delta}{2}; \quad \delta = \gamma - 2\varphi; \quad \psi = \beta_{2} - \gamma.$$

$$(4.14)$$

Составим уравнения равновесия для рычага  $AB_2C_2M_2$  прижимного устройства, принимая во внимание условие, что проекция активных сил, действующих на

нормаль к оси прокатки (ось  $x_I$ ) должна равняться нулю, а их проекция на ось прокатки – соответствовать заданному усилию прижима матрицы  $P_{M}=P_{IIP}\cos\gamma$  :

$$P_{\Pi P}\sin\gamma + P_K\cos\alpha - P_{\partial}\sin\psi = 0; \tag{4.15}$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n} m_{A}(F_{i}) = P_{\Pi P} \cdot l_{1} - P_{K} \cdot l_{1} \sin(\alpha + \gamma) - P_{\partial} \cdot l_{2} \cos \beta_{2} = 0; \\ \sum_{i=1}^{n} F_{ix_{2}} = R_{AX} + P_{K} \cos(\alpha + \gamma) - P_{\partial} \sin \beta_{2} = 0; \\ \sum_{i=1}^{n} m_{C_{2}}(F_{i}) = R_{AY} \cdot l_{1} + P_{\partial} \cdot l_{2} \cos \beta_{2} = 0. \end{cases}$$

$$(4.16)$$

Отсюда найдем, что:

$$P_{K} = \frac{P_{o}\sin\psi + P_{\Pi P}\sin\gamma}{\cos\alpha};\tag{4.17}$$

$$P_{\mathcal{A}} = \frac{P_{\mathcal{A}P}[\cos\alpha - \sin\gamma\sin(\alpha + \gamma)]}{\sin\psi\sin(\alpha + \gamma) + l_2/l_1\cos\alpha\cos\beta_2};$$
(4.18)

$$R_{AX} = -P_K \cos(\alpha + \gamma) + P_{\partial} \sin \beta_2; \quad R_{AY} = -P_{\partial} \cdot l_2 / l_1 \cos \beta_2. \tag{4.19}$$

Нетрудно убедиться, что при  $\gamma = 0$  полученные выражения (4.10)-(4.12) и (4.17)-(4.19) принимают один и тот же вид, что подтверждает правильность решения поставленной задачи.

При анализе силовых условий процесса СЛиПП по расчетным зависимостям в качестве исходных условий были приняты следующие конструктивные и технологические параметры, соответствующие условиям опытно-промышленных испытаний установки СЛиПП-2,5:

- радиусы валков: по выступу  $R_{\rm l}=241\,$  мм; по дну ручья  $R_{\rm 2}=197\,$  мм; по реборде  $R_{\rm 3}=224\,$  мм;
- размеры заготовки  $h_0 \times b_0 \times l_0 = 40 \times 40 \times 400$  мм;
- высота калибра в наименьшем сечении  $h_1 = 20$  мм;
- высота матрицы в месте перекрытия валков  $h_{\scriptscriptstyle M}=34\,$  мм;
- углы наклона гидроцилиндров CK и  $B\mathcal{A} \alpha = 42^0$  и  $\beta = 20^0$ , соответственно.

— диаметр пресс-изделия из сплава алюминия с цирконием  $d_{TP} = 9.5$  мм.

Результаты расчетов представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Силовые условия процесса СЛиПП для обработки сплава 9

No	Расчетные параметры силовых условий СЛиПП								
варианта	$P_{\scriptscriptstyle M}$	$P_{{\it \Pi}{\it P}}$	$P_{\scriptscriptstyle \partial}$	$P_{\scriptscriptstyle K}$	$R_{\scriptscriptstyle A}$	α	$oldsymbol{eta}$	γ	
	кН	кН	кН	кН	кН	град	град	град	
1	235		470	0	198	42	20	0	
2		327	326	150	80	42	20	0	
3			340	141	240	42	18	3	
4			313	160	215	42	22	3	

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

Несовпадение осей прокатки и прессования в установке СЛиПП-2,5 приводит к увеличению в 2,7-3,0 раза реакции опоры рычага прижимного устройства.

Создание компенсирующего усилия в 1,38-1,50 раза снижает усилие прижима в наклонном гидроцилиндре прижимного устройства матрицы к валкам и почти в два раза реакцию опоры в шарнире рычага прижимного устройства, что существенно повышает конструктивную надежность установки.

Применение компенсирующего усилия, приложенного к рычагу прижимного устройства матрицы к валкам для созданной конструкции опытнопромышленной установки СЛиПП-2,5 с помощью вертикального гидроцилиндра, позволяет исключить неравномерное силовое воздействие на рабочие валки во время ее работы и гарантирует регламентируемую толщину заусенца из деформируемого металла на валках.

Таким образом, использование дополнительного компенсирующего устройства в созданной конструкции опытно-промышленной установки СЛиПП-2,5 способствует улучшению ее эксплуатационных характеристик. На основании полученных аналитических зависимостей предложено устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования цветных металлов и сплавов [158], описанное более подробно в разделе 4.3.

# 4.2. Экспериментальные исследования структуры и свойств полуфабрикатов, полученных из сплавов системы Al-Zr с применением способа совмещенного литья и прокатки-прессования

Исследования проводили с использованием методик и оборудования, описанных в разделе 2. Совмещенное литье и прокатку-прессование проводили при следующих технологических параметрах: температура плавления  $T_{\Pi\Pi} = 850$  - 900 °C; температура расплава перед заливкой в калибр валков составляла  $T_{3A\Pi} = 780$  °C; температура валков  $T_B = 20$  °C, степень деформации при прокатке  $\varepsilon = 50\%$ ; коэффициент вытяжки при прессовании  $\mu = 4,5$  (диаметр прутка 9 мм); число оборотов валков n = 4 об/мин; скорость деформации  $\xi = 0,74$  с<sup>-1</sup>. 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.

Микроструктура прутков и проволоки, приведеная на рис.4.7, представляет α-твердый раствор на основе алюминия и избыточных фаз, содержащих Fe и Si.

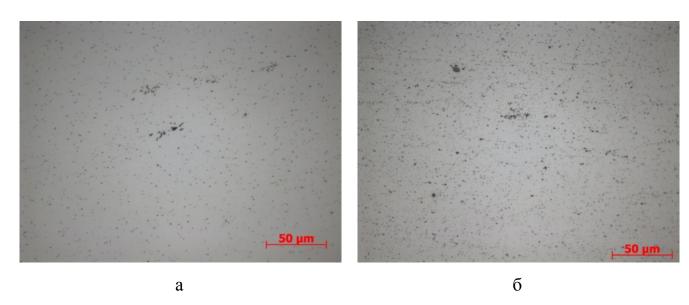


Рисунок 4.7 – Микроструктура деформированных полуфабрикатов из сплава 23, полученных способом СЛиПП:

а - пруток (диаметр 9 мм); б - проволока (диаметр 2 мм)

Структура образцов, полученных СЛиПП, характеризуется неоднородным распределением фаз ПО сечению алюминиевого твердого раствора (рис. 4.7 а и б), причем в отличие от прутков, полученных способом СПП, здесь наблюдаются грубые скопления железосодержащих частиц и алюминидов циркония. Кроме того, в прутках обнаружены частицы Al<sub>3</sub>Zr, вытянутые вдоль направления деформации, чего не наблюдалось в деформированных полуфабрикатах, полученных способом СПП. Выделение некоторого количества включений Al<sub>3</sub>Zr, по-видимому, связано с более низкой температурой при заливке расплава в валки, которая составляла 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<sub>3</sub>Zr, в результате чего они образуют строчки из мелких частиц, близких к округлой форме, тогда как в соответствующих прутках, большинство частиц имеет пластинчатую форму. Неравномерность распределения структурных составляющих наследуется и в структуре проволоки.

Результаты исследования физико-механических характеристик деформированных полуфабрикатов представлены в таблицах 4.2 и 4.3. Измерение микротвердости на полученных полуфабрикатах показало, что уровень значений HV составляет 35-44 микротвердости для прутков и 41-46 HV — для проволоки. Таким образом, значения микротвердости полуфабрикатов после СЛиПП несколько ниже, чем у полуфабрикатов, полученных способом СПП, а с увеличением степени деформации также наблюдается небольшое повышение микротвердости.

Диапазон изменения значений временного сопротивления разрыву  $\sigma_B$  прутков в исследуемом интервале по содержанию циркония составляет 110-140 МПа, что ниже значений  $\sigma_B$  для прутков, полученных СПП в среднем на 3-6 %, тогда как значения относительного удлинения  $\delta$  выше в среднем на 7-10 %. Холодное волочение приводит к упрочнению проволоки при этом значения  $\sigma_B$  лежат в диапазоне до 180 — 220 МПа, а пластические свойства проволоки по  $\delta$ , полученной при степени деформации порядка 90%, находятся в диапазоне 2 - 4%, что показывает высокую технологичность при обработке таких полуфабрикатов.

Таблица 4.2 – Механические и электрофизические свойства прутков из сплавов системы Al-Zr, полученных СЛиПП

№	Zr,	Fe,	Тпл,	t <sub>B</sub> ,	Тзал,	$\sigma_{0,2}$ ,	$\sigma_{\scriptscriptstyle B},$	δ,	HV,	ρ,
спл	%	%	°C	МИН	°C	МΠа	МПа	%	кгс/мм <sup>2</sup>	$Om \cdot mm^2/m$
23	0,15	0,20	900	10	780	94	121	21,1	35,9±0,7	-
	0,15	0,20	900	10	780	92	106	28,8	39,9±0,6	-
	0,15	0,20	900	10	780	92	121	28,6	43,5±1,9	-
24	0,28	0,26	850	10	750	102	128	28,8	-	0,03101
	0,28	0,26	850	10	780	95	126	27,4	-	0,03115

Таблица 4.3 — Механические и электрофизические свойства проволоки в деформированном состоянии из сплавов системы Al-Zr, полученной волочением прутка после СЛиПП

$N_{\underline{0}}$	Zr,	Fe,	Тпл,	t <sub>в</sub> ,	Тзал,	$\sigma_{0,2}$ ,	$\sigma_{\scriptscriptstyle B},$	δ,	HV,	ρ,
спл	%	%	°C	МИН	°C	МПа	МПа	%	кгс/мм <sup>2</sup>	$Om \cdot mm^2/m$
23	0,15	0,20	900	10	780	126	193	3,0	41,9±1,4	0,02840
	0,15	0,20	900	10	780	158	212	3,0	45,5±1,2	0,02844
	0,15	0,20	900	10	780	142	209	2,9	45,9±1,7	0,02804
24	0,28	0,26	850	10	750	159	202	1,7	-	0,03290
	0,28	0,26	850	10	780	140	200	2,3	-	0,03201

Полученные значения удельного электрического сопротивления УЭС для деформированных полуфабрикатов находятся: для прутков (Zr 0.28~%) на уровне  $0.031~\mathrm{Om}\cdot\mathrm{mm}^2/\mathrm{m}$ ; для проволоки (Zr 0.15-0.28~%) — 0.0284- $0.032~\mathrm{Om}\cdot\mathrm{mm}^2/\mathrm{m}$ , что несколько ниже по отношению к деформированным полуфабрикатам, полученным с применением технологии СПП.

Проведение двухступенчатого отжига проволоки диаметром 2 мм, полученной холодным волочением, дает возможность восстановить пластические свойства металла и снизить значения удельного электросопротивления (табл. 4.4, 4.5).

Таблица 4.4 – Механические характеристики проволоки до и после отжига

№ спл. Тпл, °С		t <sub>в</sub> , Т <sub>зал</sub> ,		деформ. состояние		отжиг при 300°C, 12 ч. + 450 °C, 32 ч.		
JNº CIIJI.	1 пл, С	МИН	°C	$\sigma_{B_s} M\Pi a$	δ, %	$\sigma_{B,} M\Pi a$	δ, %	
	900	10	780	193	3	73	36	
23	900	10	780	212	3	80	34	
	900	10	780	209	3	79	31	

Таблица 4.5 – Электрические свойства проволоки в различном состоянии

No own	т ос	t <sub>в</sub> , мин	Тзал,	Удельное электросопротивление проволоки, Ом·мм <sup>2</sup> /м				
№ спл.	епл. Тпл, °С		°C	деформ.	отжиг 300 °C	отжиг 300°C + 450 °C		
	900	10	780	0,02840	0,02769	0,02748		
23	900	10	780	0,02944	0,02822	0,02821		
	900	10	780	0,03104	0,02987	0,02969		

Таким образом, применение способа СЛиПП, несмотря на неоднородное распределением фаз по сечению алюминиевого твердого раствора, дает возможность получить достаточно хорошее сочетание прочностных, пластических и электрофизических свойств, а применение двухступенчатого отжига позволяет улучшить пластические и электрофизические характеристики деформированных полуфабрикатов.

## 4.3. Новые технические решения для совершенствования способа совмещенного литья и прокатки-прессования

Конструкция устройства по патенту РФ № 2486027 [157] позволяет повысить производительность способа совмещенного литья и прокатки-прессования и качество пресс-изделий за счет повышения эффективности охлаждения инструмента (рис. 4.8).

С этой целью в матрице, установленной на выходе из калибра, имеются охлаждаемые каналы, выполненные на наружной ее поверхности. Охлаждаемые каналы снабжены сквозными отверстиями, проходящими через боковые, наружные поверхности матрицы, сообщающиеся с каналами для подвода и отвода хладагента, а снаружи охлаждаемые каналы герметично закрыты пластинами, при этом площади поперечных сечений отверстий и сообщающихся с ними каналов для подвода и отвода хладагента соответственно равны между собой, но площадь поперечного сечения канала для отвода хладагента больше чем площадь поперечного сечения канала для подвода хладагента более чем в 1,5 раза, а предельная скорость подвода хладагента в охлаждаемые каналы определяется из соотношения:

$$v_B \le \frac{\rho_{\Pi} v_{\Pi} F_{\Pi}}{\rho_R F_R},\tag{4.20}$$

где  $\rho_{\!\scriptscriptstyle B},\,\rho_{\!\scriptscriptstyle \Pi}$  - плотности жидкости и пара хладагента;  $v_{\!\scriptscriptstyle B},\,v_{\!\scriptscriptstyle \Pi}$  - скорости движения жидкости и пара хладагента;  $F_{\!\scriptscriptstyle B},\,F_{\!\scriptscriptstyle \Pi}$  - площади поперечного сечения каналов для подвода и отвода хладагента.

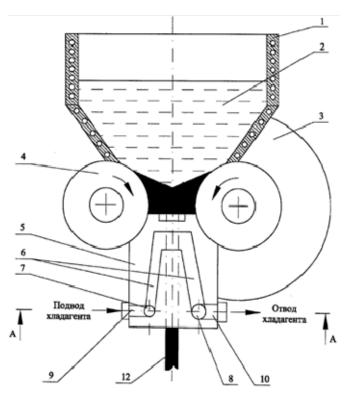


Рисунок 4.8 – Общий вид устройства по патенту РФ №2486027 [157]:

1 — печь-миксер; 2 — расплав металла; 3, 4 — валки; 5 — матрица 6, 7, 8 - охлаждаемые каналы; 9 — каналы для подвода хладагента;10 - каналы для отвода хладагента; 11 — пластины; 12 — пресс-изделие

Выполнение герметичных, закрытых с помощью пластин, охлаждаемых каналов на наружной поверхности матрицы, находящейся в контакте с валками, не влияет на интенсивность отвода тепла непосредственно из очага деформации, и при этом будет также происходить одновременное охлаждение как матрицы, так и валков. При этом исключается возможность попадания заусенца из деформируемого металла в охлаждаемые каналы и, как следствие, выход из строя системы

охлаждения, т.е. повысится надежность и бесперебойность работы предлагаемого устройства при осуществлении процесса СЛиПП.

Кроме того, выполнение конструкции каналов с соблюдением следующих условий, что площади поперечных сечений сквозных отверстий и сообщающихся с ними каналов для подвода и отвода хладагента соответственно равны между собой, при этом площадь поперечного сечения канала для отвода хладагента больше, чем площадь поперечного сечения канала для подвода хладагента более чем в 1,5 раза, обеспечит реализацию испарительного охлаждения матрицы.

Предельная скорость подачи хладагента в зону охлаждения должна определяться из соотношения (4.20), что связано с ограничением по гидродинамическому запиранию пароотводящего канала при достижении паром скорости звука. В противном случае нарушается направленная циркуляция хладагента и резко снижается интенсивность охлаждения.

Следует отметить, что при испарительном охлаждении отводимое тепло в основном затрачивается на образование пара. Поскольку теплота парообразования велика, то при испарительном охлаждении интенсивность теплоотвода при одной и той же скорости подачи может быть на два порядка больше, чем при проточном охлаждении. Положительной особенностью испарительного охлаждения является также то, что процесс теплообмена, несмотря на его интенсивность, в достаточной мере становится управляемым, так как интенсивность отвода тепла почти линейно зависит от скорости подачи хладагента в зону охлаждения, т.е. повышается эффективность охлаждения и управления тепловыми условиями процесса СЛиПП.

Устройство работает следующим образом. Расплавленный металл 2 заливается в печь-миксер 1, при этом начинается его кристаллизация на поверхностях валков 3 и 4. Далее закристаллизовавшийся металл захватывается валками 3 и 4, деформируется в закрытом калибре между валками 3 и 4 и выдавливается через рабочий канал матрицы 5 в виде пресс-изделия 12. В момент попадания расплава в печь-миксер 1 хладагент подается в охлаждаемые каналы 6 матрицы 5.

Образование заусенца на поверхности валков в заявляемом устройстве практически не влияло на интенсивность охлаждения рабочего инструмента, т.к.

снаружи охлаждаемые каналы были герметично закрыты пластинами. Процесс СЛиПП с использованием данного устройства происходил стабильно в течение длительного времени и был остановлен после переработки всего расплавленного металла в миксере. При этом за счет испарительного охлаждения матрицы удалось повысить производительность процесса до 30% и при этом удерживать температуру прессования на требуемом постоянном уровне 540±5°C, а на поверхности катанки отсутствовали какие-либо дефекты.

Основной задачей технического решения по патенту РФ №128529 [158] является повышение производительности способа совмещенного литья и прокатки-прессования и качества пресс-изделий. Теоретическое обоснование полезности его применения приведено в разделе 4.1.

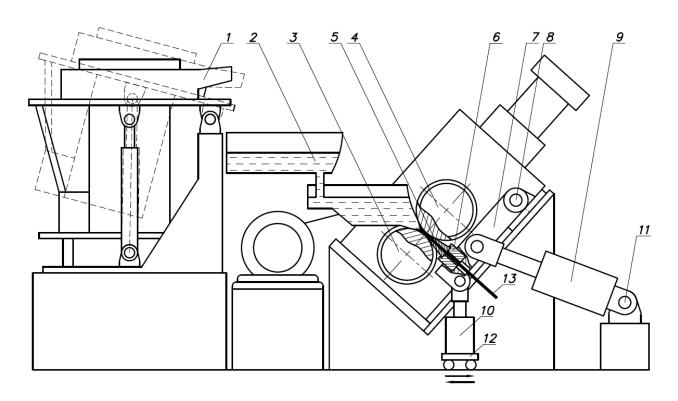


Рисунок 4.9 – Общий вид устройства по патенту РФ №128529 [158]:

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 – наклонный гидроцилиндр; 10 – вертикальный гидроцилиндр

Выполнение поставленной задачи достигается тем, что в устройстве для совмещенного литья и прокатки-прессования цветных металлов и сплавов (рис. 4.9), включающем основание, печь-миксер, деформирующий узел, состоящий из охлаждаемых валков с ручьем и с выступом, образующих закрытый рабочий калибр, на выходе из которого установлен матрицедержатель с прижимным устройством и охлаждаемая матрица, валки расположены в наклонной плоскости, а прижимное устройство выполнено в виде наклонного и вертикального гидроцилиндров, установленных на основании, и кронштейна, шарнирно соединенного с их штоками.

Наклонный и вертикальный гидроцилиндры выполнены с возможностью создания усилия  $P_{\theta}$  прижима матрицы к валкам для фиксации матрицы в заданном положении и усилия прокатки  $P_{\Pi P}$  удовлетворяющих следующему соотношению:

$$P_{K}\cos\alpha = P_{\partial}\sin\beta; \quad P_{\partial} = \frac{P_{\Pi P}\cos\alpha}{\sin\alpha\sin\beta + l_{2}/l_{1}\cos\alpha\cos\beta}; \quad P_{K} = \frac{P_{\Pi P}\sin\beta}{\sin\alpha\sin\beta + l_{2}/l_{1}\cos\alpha\cos\beta}$$
(4.21)

где  $P_{\scriptscriptstyle K}$  - компенсирующее усилие, необходимое для поддержания матрицы в заданном положении и обеспечения совпадения осей прессования и прокатки;

 $P_{\delta}$  - требуемое усилие прижима матрицы к валкам для фиксации матрицу в заданном положении;  $P_{\Pi P}$  - усилие, действующее на матрицу со стороны прокаткипрессования;  $\alpha$  и  $\beta$  - углы наклона штоков вертикального и наклонного гидроцилиндров с кронштейном соответственно;  $l_1$  и  $l_2$  - расстояния от места крепления кронштейна с помощью неподвижного шарнира до контакта штоков наклонного и вертикального гидроцилиндров с кронштейном, соответственно.

Прижимное устройство, выполненное в виде наклонного и вертикального гидроцилиндров, установленных на основании позволяет оперативно управлять силой прижима матрицы, расположенной в матрицедержателе, к валкам. Соблюдение вышеприведенных условий создаст необходимое усилие прижима  $P_{\phi}$  от кронштейна прижимного устройства, что позволит удерживать матрицу в заданном положении, обеспечит совпадение осей прессования и прокатки и равномерное нагружение на рабочие валки, что сведет до минимума образование заусенца

из деформируемого металла на валках и появление разной его толщины на валках. Все это обеспечит стабильное протекание технологического процесса, позволит повысить выход годного, производительность непрерывного литья, прокатки и прессования и качество пресс-изделий.

Устройство работает следующим образом. Вначале технологического процесса матрица 5 устанавливается в матрицедержатель 6 и на ее боковую, контактную с валками 3 и 4, поверхность устанавливается пластина (например, из алюминиевого сплава, из которого изготавливается пресс-изделие) толщиной равной рациональному зазору между валками и матрицей. Далее начинается вращение валков, а в наклонный 9 и вертикальный 10 гидроцилиндры подается давление, рассчитанное по формулам (4.21). Матрица, расположенная в пазу матрицедержателя 6, с помощью прижимного устройства устанавливается в заданном положении в закрытом рабочем калибре. После чего включается охлаждение валков и матрицы. Далее расплавленный металл выливается из печи-миксера 1 на валки через систему лотков 2, где начинается его кристаллизация на поверхностях валков. Потом закристаллизовавшийся металл захватывается валками, деформируется в закрытом рабочем калибре между ними и выдавливается через матрицу 5 в пресс-изделие 13.

При использовании предлагаемого устройства процесс шел стабильно, толщина заусенца была минимальной и равномерной на валках, и остановка процесса происходила после того, когда весь металл был переработан. При этом давление в наклонном и вертикальном гидроцилиндрах и выходная температура прессизделия оставались практически без изменений. Полученное пресс-изделие по всей длине имело требуемое качество.

#### 4.4. Выводы по главе

Таким образом, выполнена аналитическая оценка силовых условий процесса совмещенного литья и прокатки-прессования с использованием уравнений равновесия сил, решение которых позволило установить, что для установки СЛиПП-2,5 необходимо применять схему прижимного узла с наклонным и вертикальным гидроцилиндрами по патенту РФ №128529, так как это позволяет повысить стабильность работы оборудования при обработке сплавов системы Al-Zr.

С использованием результатов теоретических исследований спроектирована и изготовлена установка совмещенной обработки СЛиПП-2,5. На ней проведены экспериментальные исследования способа совмещенного литья и прокаткипрессования и получены опытные образцы деформированных полуфабрикатов в виде прутков и проволоки из исследуемых сплавов.

В результате выполнения работ сделаны следующие выводы:

- применение СЛиПП 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, что позволяет применять высокие суммарные степени деформации при волочении (до 95%) без использования промежуточных отжигов;
- уровень значений удельного электросопротивления прутков и проволоки, полученной для аналогичных химических составов, ниже в среднем на 6 %, а применение окончательного двухступенчатого отжига позволяет улучшить электрические и технологические свойства полуфабрикатов, так временное сопротивление разрыву проволоки диаметром 2 мм составило 190-200 МПа, относительное удлинение в отожженном состоянии 31-36 %, а удельное электросопротивление 0,02748-0,02969 Ом·мм²/м;
- разработаны и запатентованы новые технические решения, которые позволяют повысить стабильность обработки алюминиевых сплавов способом СЛиПП.

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 (Приложение Б). В соответствии с этим регламентом произведены опытные партии катанки и проволоки из сплавов системы Al-Zr различного химического состава, механические и электрофизические свойства которых соответствуют стандартам (Приложение В, Г). В настоящее время разработанные составы сплавов и технологические режимы их обработки проходят промышленную апробацию в условиях Иркутского алюминиевого завода (Приложение Д).

#### 5. РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВ И ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА СОВМЕЩЕННОЙ ОБРАБОТКИ И ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Al-Zr

Результаты исследований, представленные в данной главе, включают моделирование способов совмещенной обработки и интенсивной пластической деформации (ИПД), разработку технических решений и технологических рекомендаций по обработке сплавов системы Al-Zr данным способом. Результаты исследований приведены в работах [159-160].

# 5.1. Моделирование процесса обработки сплавов системы Al-Zr с применением способов совмещенной обработки и интенсивной пластической деформации в программном комплексе DEFORM® 3D

Процессы интенсивной пластической деформации (ИПД) в настоящее время являются предметом изучения широкого круга современных ученых, что обусловлено наличием сдвиговых деформаций при обработке металлов и сплавов данными способами. Они обеспечивают повышенный уровень механических характеристик и формирование ультрамелкозернистой структуры деформируемых полуфабрикатов.

Обзор научно-технической литературы показал, что довольно часто в качестве такого способа используется равноканальное угловое прессование (РКУП). Он достаточно просто реализуется на практике и приводит к повышению не только прочностных, но и пластических характеристик деформированных полуфабрикатов из различных сплавов.

В связи с этим в работе решалась задача исследования процессов совмещенной обработки и РКУП, объединенных в одном технологическом цикле. Для подготовки и планирования экспериментальных исследований было принято решение провести компьютерное моделирование такого способа в программном комплексе DEFORM® 3D, который широко используется для приближенной оцен-

ки энергосиловых параметров и условий реализации процессов обработки металлов [54-59, 62].

Для реализации задачи в Deform<sup>®</sup> 3D были приняты следующие допущения:

- валки и матрица несжимаемые;
- материал заготовки изотропный;
- показатель трения по Зибелю на валках  $\psi_B = 0.9$ , а на матрице  $\psi_M$  от 0.4 до 0.7;
- количество элементов составило: для валка с выступом 22533; валка с канавкой 23615; заготовки 23139; матрицы 14715;
- реологические характеристики были выбраны для сплава 9 (см. рис. 3.3).

Моделирование процессов совмещенной обработки и РКУП проводили с использованием геометрических параметров установки СЛиПП-2,5 (см. раздел 2.2): радиус валка с выступом составлял 241 мм, валка с канавкой – 197 мм, число оборотов валков n=4 об/мин; степень деформации при прокатке  $\epsilon=20\%$ ; коэффициент вытяжки при прессовании  $\mu=3$ . Размеры заготовки составляли 14x14x250 мм, диаметр прутка 9 мм

В первом случае моделировали процесс с применением матрицы, имеющей продольный канал, во втором – с применением матрицы с пересекающимися каналами. Компьютерная модель представлена на рис. 5.1.

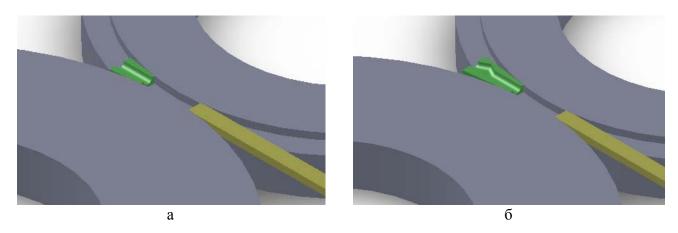


Рисунок 5.1 – Компьютерная модель инструментальной оснастки установки СЛиПП-2,5 (разрез): а – матрица с продольным каналом; б – матрица с пересекающимися каналами

Исходя из обзора научно-технической литературы выявлено, что значительное измельчение структуры и рост механических характеристик в процессе обработки способом РКУП достигаются при холодной деформации и углах пересечения каналов 110-135 °, температуру заготовки и рабочего инструмента (валков и матрицы) принимали равной 20°C, а угол пересечения каналов 125 °.

В связи с симметричностью процесса проводили моделирование половины очага деформации, что позволило сократить время расчета. Результаты моделирования представлены на рис. 5.2 - 5.6.

На рис. 5.2 показано распределение температуры при обработке исследуемым способом, а на рис. 5.3 – изменение крутящих моментов М, возникающих на валках, в зависимости от времени обработки заготовки и формы канала матрицы.

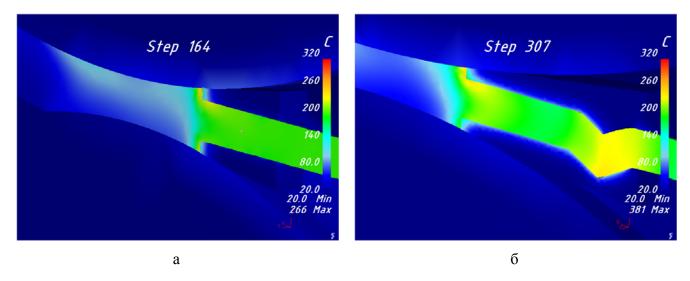


Рисунок 5.2 — Изменение температурных полей в процессе обработки способом совмещенной обработки и РКУП при значениях показателя трения  $\psi_B = 0.9$  и  $\psi_M = 0.5$ ; а — матрица с продольным каналом, б — матрица с пересекающимися каналами

В процессе обработки наблюдается рост температуры заготовки, однако последняя не превышает 200 °C на выходе из матрицы с продольным каналом и 240°C для матрицы с пересекающимися каналами.

Из графиков на рис. 5.3 видно, что с течением времени максимальные значения моментов, при использовании матрицы с продольным каналом составляют:

на валке с выступом  $M_B = 6,2$  кНм, на валке с канавкой  $M_K = 2,4$  кНм. Момент  $M_B$  в среднем в 2,5 раза больше, чем  $M_K$ .

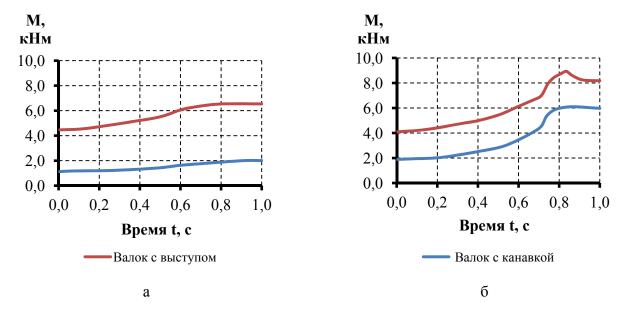


Рисунок 5.3 – Изменение крутящих моментов M на валках при обработке способом совмещенной обработки и РКУП от времени обработки

при 
$$\psi_B = 0.9$$
,  $\psi_M = 0.5$  и  $n = 4$  об/мин

Использование матрицы с пересекающимися каналами приводит к увеличению значений моментов на валках до значений 8,8 кНм на валке с выступом и до 6,0 кНм на валке с канавкой.

С учетом того, что моделировали половину очага деформации, суммарные моменты на валках при прессовании через обычную матрицу с продольным каналом составят  $M_B = 12,4$  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.

Изменение значений моментов в зависимости от показателя трения  $\psi_M$  на матрице для процесса совмещенной обработки и РКУП, отражено на рис. 5.4. Повышение показателя трения на матрице приводит к увеличению моментов, а их максимальные значения достигаются при значении  $\psi_M = 0.7$  и составляют  $M_B = 18.0$  кНм и  $M_K = 12.6$  кНм.

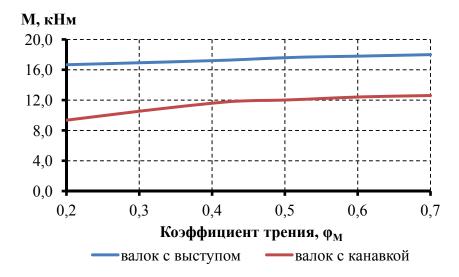


Рисунок 5.4 – График зависимости моментов на валках от показателя трения на матрице  $\psi_{M}$  при совмещенной обработке и РКУП

Максимальное усилие, действующее на матрицу, по результатам расчета составило 140 кН при значении показателя трения  $\psi_{\rm M}$  = 0,7.

По полученным в результате моделирования данным был установлен характер течения метала (рис. 5.5), а также получены графики изменения скорости течения металла при различных условиях трения на матрице, представленные на рис. 5.6 и 5.7.

Анализ полученных данных показывает, что скорость течения металла изменяется в зависимости от стадии осуществления процесса. При прокатке она увеличивается (стадия 1), затем происходит ее небольшое снижение на стадии распрессовки (стадия 2) и резкое увеличение в момент начала прессования металла в продольном канале матрицы (стадия 3). Далее при прохождении металла через участок пересечения каналов (стадия 4) скорость снижается до некоторой постоянной величины, зависящей от показателей контактного трения на валках  $\psi_{\rm B}$  и матрице  $\psi_{\rm M}$ . Таким образом при условиях трения на контакте металла с валками и матрицей на уровне, соответственно,  $\psi_{\rm B}=0.9$  и  $\psi_{\rm M}=0.5$ , скоростью истечения прутка, при осуществлений процесса совмещенной обработки и РКУП, составит порядка  $V_{\rm M}=70$  мм/с.

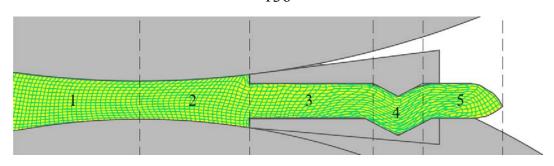


Рисунок 5.5 – Характер течения металла при обработке способом совмещенной обработки и РКУП

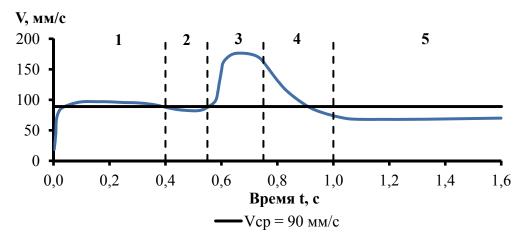


Рисунок 5.6 – Изменение скорости течения металла  $V_T$  во времени при значениях показателей трения на валках  $\psi_B = 0.9$  и матрице  $\psi_M = 0.5$ : Vcp - средняя линейная скорость вращения валков; 1 – зона прокатки; 2 – зона распрессовки; 3 – зона прессования в продольном канале; 4 – зона прессования в пересекающихся каналах, 5 – зона сформировавшегося прутка

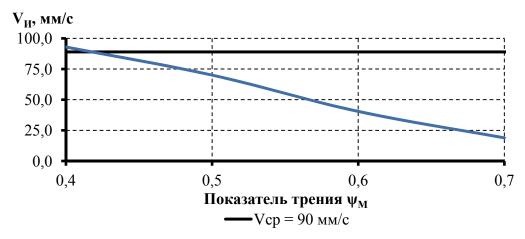


Рисунок 5.7 – Изменение скорости истечения прутка  $V_{U}$  при различных значениях показателя трения на матрице  $\psi_{M}$ :  $V_{CP}$  – средняя линейная скорость вращения валков

Если обеспечить максимальные условия трения на контакте металла с валками ( $\psi_B = 0.9$ ) и минимальные на матрице ( $\psi_M = 0.4$ ), то можно создать условия для стабильного осуществления процесса совмещенной обработки и РКУП со скоростью истечения прутка  $V_{\rm H} = 90~{\rm mm/c}$ .

Таким образом, проведенное компьютерное моделирование позволило провести оценку возможности осуществления процесса совмещенной обработки и равноканального углового прессования, которая показала принципиальную возможность объединения указанных способов обработки в одном технологическом цикле. При этом разработаны компьютерные модели исследуемых процессов, которые могут применяться для расчета энергосиловых и температурно-скоростных параметров обработки при различных условиях контактного трения. Результаты моделирования позволили выбрать технологические параметры при проведении экспериментальных исследований по получению деформированных полуфабрикатов из сплавов системы Al-Zr и определению их свойств в зависимости от способа обработки.

# 5.2. Экспериментальные исследования структуры и свойств полуфабрикатов, полученных из сплава системы Al-Zr с применением способа совмещенной обработки и интенсивной пластической деформации

Целью экспериментальных исследований являлась оценка влияния интенсивных пластических деформаций на структуру, механические и электрические свойства деформированных полуфабрикатов из сплава 9 (см. табл. 2.1), полученных с применением способов совмещенной обработки и интенсивной пластической деформации (ИПД).

Для реализации поставленной задачи проводили процесс совмещенного литья прокатки-прессования сплава 9 на установке СПП-200 с использованием матрицы с пересекающимися каналами при следующих технологических параметрах: размеры заготовки 14x14x250мм, температура плавки  $T_{\Pi \Pi} = 850$  °C; температура расплава перед заливкой в калибр валков составляла  $T_{3A\Pi} = 780$  °C; температура валков  $T_B = 20$  °C, степень деформации при прокатке  $\varepsilon = 50\%$ ; коэффициент вы-

тяжки при прессовании  $\mu = 4,5$  (диаметр прутка 9 мм); число оборотов валков n = 4 об/мин; угол пересечения каналов  $\alpha = 90$  °.

Результаты эксперимента показали, что активных сил трения, создаваемых на контакте заготовки с валками, достаточно для выдавливания метала через пересекающиеся каналы матрицы, однако стойкость матрицы при этом оказалась невысокой, что повлияло на стабильность процесса. На рис. 5.8 представлено, полученное в результате опытов, изделие.



Рисунок 5.8 – Экспериментальный образец после СЛиПП-ИПД

Таким образом, реализации данного способа деформации требует дальнейших исследований, в том числе и по увеличению стойкости прессового инструмента. В связи с этим было принято решение разделить во времени процессы СЛиПП и ИПД для установления влияния сдвиговых деформаций на физикомеханические характеристики полуфабрикатов из сплавов системы Al-Zr. С этой целью прутки из сплава 9, полученные способом СЛиПП, подвергали холодной деформации путем равноканального углового прессования на установке РКУП-К (см. рис 1.11). Технологические параметры РКУП были следующими: температура прутка  $20~^{\circ}$ С; величина истинной деформации порядка e=4; угол пересечения каналов  $\alpha=125~^{\circ}$ .

В результате получали прутки диаметром 9, которые подвергали волочению до 2 мм. Результаты исследования микроструктуры деформированных полуфабрикатов, полученных способом СЛиПП, представлены на рис. 5.9, а механических свойств и удельного электросопротивления прутка и проволоки различных диаметров – в табл. 5.1.

Металлографические исследования прутков и проволоки показали, что микроструктура состоит из  $\alpha$ -твердого раствора и эвтектических включений фаз, типа Al-Fe-Si и Mg<sub>2</sub>Si.

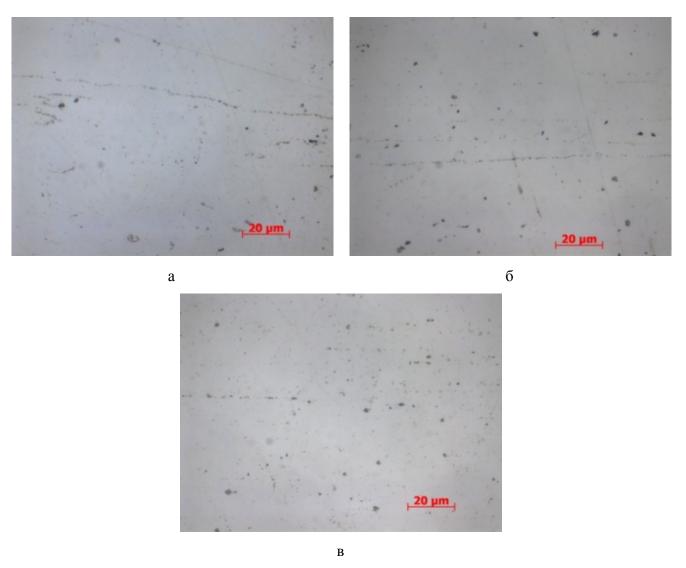


Рисунок 5.9 – Микроструктура прутков (а) и проволоки (б, в) из сплава 9, полученных СЛиПП и последующим волочением: а – диаметр 9 мм; б – диаметр 3,9 мм; в – диаметр 2 мм

Исследования механических свойств показали, что средние значения временного сопротивления разрыву прутка диаметром 9 мм составляет 145 МПа, относительное удлинение – 26 %, значение микротвердости – 42 HV. Увеличение степени холодной деформации при волочении приводит к повышению прочностных характеристик до 250 МПа, микротвердости 63 HV и снижению 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 диаметром 2 мм.

Таблица 5.1 — Средние значения механических и электрофизических свойств деформированных полуфабрикатов из сплава 9 после СЛиПП

Полуфабрикат		Свойства	l	Удельное
	σ <sub>в</sub> , МПа	δ,%	HV, кгс/мм <sup>2</sup>	электросопротивление, Ом∙мм²/м
Пруток диаметром 9,5 мм	145	25,9	42±1,7	0,0335
Проволока диаметром 3,9 мм	206	3,4	-	-
Проволока диаметром 2,0 мм	249	2,6	63±1,2	0,0342

Исследуемый сплав характеризуется повышенными значениями УЭС, тогда как по международному стандарту IEC 62004 - 2007 требуемое значение этого по-казателя не должно превышать 0,02875-0,0313 Ом·мм²/м. Поэтому экспериментальные образцы прутков, полученные способом СЛиПП, подвергали термической обработке с целью снижения электросопротивления, и только после этого — 4 циклам обработки способом РКУП при комнатной температуре. Угол пересечения каналов при прессовании составлял 125°.

Микроскопический анализ методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) показал, что после обработки прутков способом РКУП формируется ультрамелкозернистая (УМЗ) структура сплава (рис. 5.10), а проведенный количественный анализ тонкой структуры позволил оценить средний размер зерен после ИПД, который составил 647 нм (рис. 5.11).

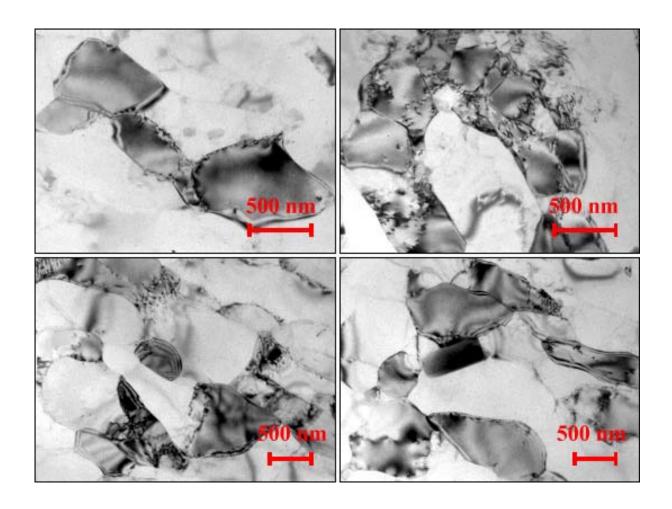


Рисунок 5.10 — Микроструктура прутка, полученного из сп<br/>лва 9 способом СЛиПП-РКУП

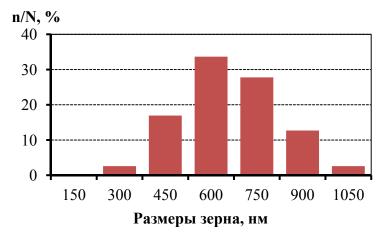


Рисунок 5.11 — Распределение зерен по размерам в образцах после обработки РКУП

Подобное измельчение зерна в свою очередь приводит к существенному упрочнению прутков (рис. 5.12 и табл. 5.2). Дальнейшая обработка прутка, полученного СЛиПП способом РКУП, приводит к повышению прочности на 33 % и снижению пластичности на 5-6 %. 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.

Таблица 5.2 – Средние значения механических свойств и электросопротивления деформированных полуфабрикатов, полученных по разным режимам обработки

Режим обработки	σ <sub>в</sub> , МПа	δ, %	ρ, Om·mm²/m
СЛиПП	145	28	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

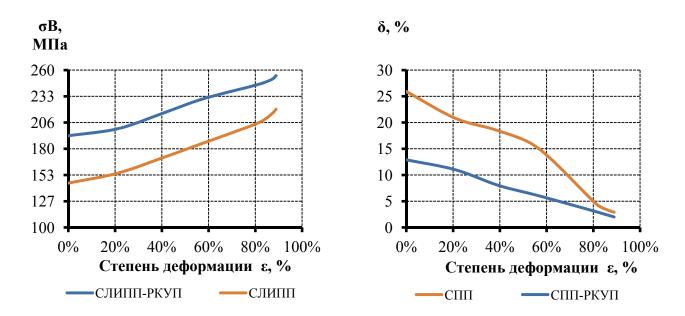


Рисунок 5.12 — Влияние ИПД на механические характеристики прутков и проволоки из сплава 9 (Al-0,20%Zr-0,30%Mg)

Следует отметить, что проволока полученная по маршруту СЛиПП+ТО+РКУП из указанного сплава удовлетворяет требованиям стандарта IEC 62004 по типу провода AT2 с повышенной прочностью.

Таким образом, описанные выше режимы обработки при совместном использовании способов СЛиПП и РКУП можно рекомендовать для разработки технологии изготовления проволоки, соответствующей типу AT2, отличающихся повышенными требованиями по прочности.

Проведенные экспериментальные исследования показывают принципиальную возможность получения деформированных полуфабрикатов с требуемым сочетанием физико-механических характеристик. Применение способа СЛиПП обеспечивает получение заготовок с высоким уровнем механических характеристик деформированных полуфабрикатов при заметном повышении технологической эффективности обработки за счет сокращения количества переходов обработки, по сравнению с традиционными способами литья-прокатки на ЛПА. Использование в дальнейшем способа РКУП, отличающегося более высокой интенсивностью пластической деформации, позволяет добиться дополнительного упрочнения прутков и проволоки за счет формирования в них УМЗ структуры.

Введение магния в исследуемый сплав с содержанием 0,2% Zr и 0,2 Fe в количестве 0,3-0,4 % позволяет добиться дополнительного упрочнения деформированных полуфабрикатов при достаточной проводимости и прочности за счет твердорастворного упрочнения.

## 5.3. Новые технические решения для реализации способа совмещенной обработки и интенсивной пластической деформации металла

Механические свойства горячепрессованных полуфабрикатов, особенно при производстве катанки для электропроводников, не всегда удовлетворяют требованиям потребителей, так как повышение прочностных характеристик продукции является одной из задач производства. В связи с эти приходится дополнительно применять многопроходные операции обработки (волочение или сортовой про-

катки) для упрочнения металла, однако при этом резко снижаются пластические свойства заготовки. Вместе с тем известно, что применение способов интенсивной пластической деформации, таких, например, как равноугловое прессование, равноугловое волочение и др. [55, 62] приводят к получению однородного деформированного состояния и нанометрической или ультрамелкозернистой структуры изделий, что, в конечном счете, обеспечивает высокий уровень и однородность механических свойств металла.

Технической задачей являлось создание установки, позволяющей совместить процессы непрерывного прессования и равноуглового волочения, обеспечивающих высокий уровень механических свойств изделий.

Поставленная задача достигается тем, что предлагаемая установка для непрерывного литья, прокатки, прессования и волочения цветных металлов и сплавов, содержащая печь-миксер с раздаточной коробкой, кристаллизатор роторного типа, два водоохлаждаемых валка, один из которых выполнен с ручьем, другой с выступом, образующих закрытый калибр, на выходе из которого установлена водоохлаждаемая матрица, охлаждающее устройство и моталку, дополнительно снабжена роликами, расположенными на выходе из охлаждающего устройства, образующими открытый калибр, размеры и форма которого соответствует размерам и форме калибрующего отверстия матрицы, в котором дополнительно установлена волока с рабочим каналом, площадь сечения которого относится к площади калибра в наименьшем сечении в пределах 0,9-1,0. Кроме того, согласно изобретению, волока выполнена с переменным сечением канала по длине, имеющим не менее двух прямолинейных участков, оси которых пересекаются под углом 90-120°.

Наличие двух роликов с открытым калибром позволяет задать охлажденную заготовку после прокатки-прессования в волоку и осуществить последующее волочение. При этом форма открытого калибра и его размеры соответствуют форме и размерам поперечного сечения пресс-изделия, выходящего из матрицы. Реализация процесса волочения в роликах с открытым калибром и перекрывающей его волокой с соотношением площади поперечного сечения рабочего канала волоки и

площади открытого калибра в наименьшем сечении в пределах 0,9 - 1,0, позволяет осуществить непрерывный процесс обработки металла на установке. При отношении этих площадей больше 1,0 возможна остановка роликов из-за больших степеней обжатия в калибре. При отношениях площадей меньше 0,9 возможен изгиб заготовки в рабочем канале волоки, что приводит к неосуществимости технической реализации непрерывного процесса обработки металла на установке.

Выполнение волоки с переменным сечением рабочего канала по длине, имеющим два и более прямолинейных участка, которые пересекаются под углом 90-120°, дает возможность осуществлять интенсивную сдвиговую пластическую деформацию металла, обеспечивая при этом более высокий уровень однородности накопленной деформации и, как следствие более высокий уровень механических свойств изделий. Выполнение угла более 120° снижает эффективность измельчения структуры металла и получения высоких механических свойств. Выполнение угла менее 90° приводит к неосуществимости процесса деформации.

На рис. 5.13, а показан общий вид устройства, а на рисунке 5.13, б - ролики с открытым калибром и волока в разрезе. Установка для непрерывного литья, прокатки, прессования и волочения металла включает печь-миксер 1 с раздаточной коробкой 2, водоохлаждаемый роторный кристаллизатор 3, деформирующий узел прокатки-прессования 4, охлаждающее устройство 5, деформирующий узел волочения 6 и моталку 7.

Кристаллизатор состоит из колеса кристаллизатора 8, образующего с бесконечной лентой 9, проходящей через направляющие ролики 10, литейную канавку 11. Для охлаждения ленты 9 на кристаллизаторе 3 смонтированы форсунки 12.

Деформирующий узел прокатки-прессования 4 установки включает задающие ролики 13, валок 14 с выступом и валок 15 с ручьем, образующие закрытый калибр 16, водоохлаждаемую матрицу 17 с калибрующим отверстием, опирающуюся на матрицедержатель 18 и имеющую возможность поджатия к валкам с помощью гидроцилиндра 19.

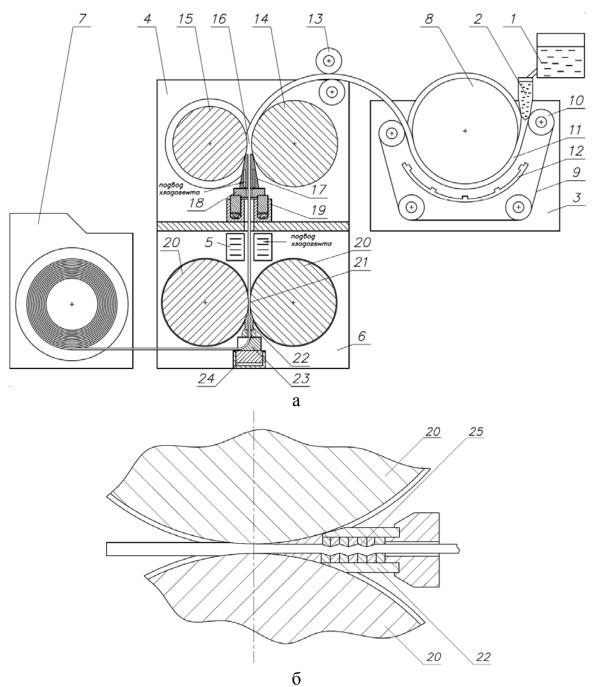


Рисунок 5.13 — Установка для непрерывного литья, прокатки, прессования и волочения цветных металлов и сплавов: 1 - печь-миксер; 2 — раздаточная коробка; 3 — кристаллизатор; 4 — деформирующий узел прокатки-прессования; 5 — охлаждающее устройство; 6 — деформирующий узел волочения; 7 — моталка; 8 — колесо кристаллизатора; 9 — стальная лента; 10 — направляющие ролики; 11 — литейная канавка; 12 — форсунки; 13 - задающие ролики; 14 — валок с выступом; 15 — валок с ручьем; 17 - водоохлаждаемая матрица; 18 — матрицедержатель; 19, 24 — гидроцилиндры; 20 — ролики с открытым калибром; 21 — открытый калибр; 22 — волока; 23 — направляющая, 24 - гидроприжим; 25 — прямолинейные участки волоки

Деформирующий узел волочения 6 включает два ролика 20 с открытым калибром 21, волоку 22, перекрывающую калибр, и поджатую к роликам через склиз 23 с помощью гидроприжима 24. Канал волоки 22 имеет, как минимум, два прямолинейных участка 25, которые пересекаются под углом 90-120°.

В процессе работы расплавленный металл из печи-миксера 1 подается в раздаточную коробку 2 с регулированием уровня в автоматическом режиме. Затем, попадая в канавку 11 колеса роторного кристаллизатора, перекрытую бесконечной стальной лентой 9, проходящей через направляющие ролики 10 и охлаждаемой при помощи форсунок 12, закристаллизовавшийся слиток через задающие ролики 13 направляется в закрытый калибр 16, образованный валком 14 с выступом и валком 15 с ручьем. Далее заготовка подвергается пластической деформации и готовое пресс-изделие экструдируется через матрицу 17, поджатую через матрицедержатель 18 поршнем гидроцилиндра 19, затем после прохождения охлаждающего устройства 5 задается в деформирующий узел волочения 6, проходит через ролики 20 с открытым калибром 21, деформируется на участках 25 волоки 22 и в виде проволоки или прутка сматывается в бухту на моталке 7.

Таким образом, использование предложенного технического решения позволяет в значительной мере снизить трудо- и энергоемкость процесса получения длинномерных деформированных полуфабрикатов и существенно улучшить их механические свойства за счет получения ультрамелкозернистой структуры металла, полученной путем применения способов совмещенной обработки и интенсивной пластической деформации.

### 5.4. Выводы по главе

Разработана компьютерная модель совмещенной обработки и РКУП в программном комплексе DEFORM<sup>®</sup> 3D, которая позволила установить температурноскоростные условия устойчивого осуществления процесса совмещенной обработки и ИПД, рассчитать его энергосиловые параметры для сплава 9.

Проведены экспериментальные исследования по обработке исследуемого сплава с применением различных вариантов использования методов совмещенной обработки и РКУП.

Результаты исследований позволили сделать следующие выводы:

- установлено, что стабильное протекание процесса можно обеспечить при определенных условиях контактного трения, а именно: показателе трения на валках на уровне 0.9 и показателе трения на матрице в пределах  $\psi_{\rm M} = 0.4$  0.6;
- максимальные значения крутящих моментов на валках лежат в пределах 12,6 18,0 кНм, а усилие на матрице составляет 140 кН, что позволит проводить обработку данным методом на установке СЛиПП-2,5;
- экспериментальные исследования структуры и свойств деформированных полуфабрикатов из сплава 9, полученных с применением способов совмещенной обработки, термической обработки и РКУП, показали, что обработка данными методами приводит к формированию УМЗ структуры и повышению прочностных характеристик до 254 МПа при достаточной электропроводности, что соответствует требованиям стандарта IEC 62004-07 для проволоки типа АТ2.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Производство длинномерных изделий продукции В виде электротехнического назначения для изготовления кабельной продукции имеет стойкую тенденцию к росту, что подтверждают данные статистических исследований. Однако этот рост сдерживается из-за наличия парка устаревшего оборудования и отсутствия технологических разработок для внедрения в производство алюминиевых сплавов с повышенными механическими электрофизическими свойствами. В связи с этим была выполнена настоящая диссертационная работа, включающая создание комплекса новых технических и технологических решений на базе применения совмещенных процессов обработки сплавов системы Al-Zr и их научное обоснование.

С учетом вышеизложенного на основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований сделаны выводы и получены следующие основные результаты.

- 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.
- **DEFORM**® 3D комплекса помощью программного созданы компьютерные модели и проведено моделирование процесса СПП и совмещенной обработки с последующей интенсивной пластической деформацией, 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 компенсирующего устройства дополнительного 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 (Приложение Б).
- 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 (Приложение В, Г).
- 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 AT1 по стандарту IEC 62004-07 без термической обработки, а также 0,25 0,30% Zr и 0,2 0,25% Fe для состояния проволоки AT3 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 IEC 62004-07 по типу AT2.
- 10. Результаты исследований внедрены в учебный процесс СФУ (Приложение А) и проходят промышленную апробацию на установке СЛиПП в условиях Иркутского алюминиевого завода (Приложение Д).

## Список используемых источников

- 1. Официальный сайт Открытого акционерного общества ОК «РУСАЛ» [Электронный ресурс]: сайт. URL: <a href="http://www.rusal.ru/aluminium/">http://www.rusal.ru/aluminium/</a> (дата обращения 17.08.2013).
- 2. Горбунов, Ю.А. Развитие производства проката и кабельно-проводниковой продукции из алюминиевых сплавов на заводах РФ / Цветные металлы 2013: сб. докладов пятого международного конгресса. Красноярск: ООО «Версо», 2013. С. 573-577.
- 3. Белый, Д.И. Алюминиевые сплавы для токопроводящих жил кабельных изделий / Кабели и Провода, 2012. №1. С. 8-15.
- 4. Пешков, И.Б. Состояние и перспективы применения алюминия в кабельной промышленности / Кабели и Провода, 2009. №1. С. 7-9.
- 5. Официальный сайт НП Ассоциация «Электрокабель» [Электронный ресурс]: сайт. URL: <a href="http://www.elektrokabel.ru/programs/analitic/">http://www.elektrokabel.ru/programs/analitic/</a> (дата обращения 15.11.2013).
- 6. Пешков, И.Б. Кабельная промышленность России и стран СНГ. Этапы развития, новые задачи / Кабели и Провода, 2009. №5. С. 4-10.
- 7. Уваров, Е.И. Кабельное производство в 2011 году. Итоги работы предприятий Ассоциации «Электрокабель» / Кабели и Провода, 2012. №1. С. 3-6.
- 8. Официальный сайт Федеральной службы по тарифам [Электронный ресурс]: сайт. URL: <a href="http://www.fstrf.ru/about/activity/prognoz">http://www.fstrf.ru/about/activity/prognoz</a> (дата обращения 15.11.2013).
- 9. Официальный сайт предприятия «Сим-Росс-Ламифил» [Электронный ресурс]: сайт. URL: <a href="http://www.simross-lamifil.com/">http://www.simross-lamifil.com/</a> (дата обращения 16.11.2013).
- 10. Баринов, В.А. Перспективы развития электроэнергетики России на период до 2030 г / Кабели и Провода. -2010. №3. C. 13-20.
- 11. Официальный сайт Открытого акционерного общества «Россети» [Электронный ресурс]: сайт. URL: <a href="http://www.rosseti.ru/about/company/">http://www.rosseti.ru/about/company/</a> (дата обращения 16.11.2013).

- 12. Горбунов, Ю.А. Некоторые аспекты развития алюминиевых сплавов для проводников тока и припоев / Цветные металлы 2012: сб. докладов четвертого международного конгресса. Красноярск: ООО «Версо», 2012. С. 828-833.
- 13. Васечко, Д.Ю. Конъюнктура мировых рынков меди и алюминия / Кабели и Провода, 2011. №2. С. 10-12.
- 14. Мещанов, Г.И. Анализ основных тенденций в развитии мирового производства кабелей и проводов / Кабели и Провода. 2012. №4. С. 3-8.
- 15. ГОСТ 13843-1978. Катанка алюминиевая. Технические условия. Москва: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1978. С.17.
- 16. Официальный сайт компании «Southwire» [Электронный ресурс]: сайт. URL: <a href="http://www.southwire.com/SCR.htm">http://www.southwire.com/SCR.htm</a> (дата обращения 12.05.2014).
- 17. Официальный сайт компании «Properzi» [Электронный ресурс]: сайт. URL: http://www.properzi.com/index.html (дата обращения 12.05.2014).
- 18. Белый, Д.И. ООО «Элкат» Более 20 лет успешной работы / Кабели и Провода, 2012. №1. С. 23-29.
- 19. Информационный технический портал «Tehno Articles» [Электронный ресурс]: сайт. URL: <a href="http://www.tehnoarticles.ru/lumuniy/index.html">http://www.tehnoarticles.ru/lumuniy/index.html</a> (дата обращения 09.06.2014).
- 20. Мондольфо, Л. Ф. Структура и свойства алюминиевых сплавов / Л. Ф. Мондольфо, пер. с англ. под ред. Ф. И. Квасова, Г.Б. Строганова, И.Н. Фридляндера. М.: Металлургия, 1979.-640 с.
- 21. Алюминий: свойства и физическое металловедение / У.Х. Энтони, Ф.Р. Эштон, М.Д. Болл, Дж. Е. Хэтч [и др.] М.: Металлургия, 1989. 422 с.
- 22. Гранулируемые алюминиевые сплавы / В.И.Добаткин, В.И. Елагин М.: Металлургия, 1981. 176 с.
- 23. ASTM B94-05. Standard Specification for Heat Resistant Aluminium-Zirconium Alloys Wire for Electrical Purposes. Copyright American Society for Testing and Materials International, West Conshohocken, Pennsylvania, USA. 2005. 4 p.

- 24. IEC 62004-07. Thermal-resistant aluminum alloys wire for overhead line conductor. Copyright International Commission, Geneva, Switzerland. 2007. 13 p.
- 25. 3M Aluminium Conductor Composite Reinforced / Technical Notebook. V1.1 3M Center, Saint Paul, Minnesota, USA. 2003. 22 p.
- 26. Официальный сайт компании «J-Power Systems» [Электронный ресурс]: сайт. URL: <a href="http://www.jpowers.co.jp/english/product/oerhead\_alum.html">http://www.jpowers.co.jp/english/product/oerhead\_alum.html</a> (дата обращения 06.03.2014).
- 27. Обзор новых технологий в энергетике / Департамент технического развития ОАО «МРСК Центра», 2008. Выпуск 1. 11 с.
- 28. Мещанов, Г.И. Перспективы и направления развития производства кабелей и проводов энергетического назначения / Кабели и Провода, 2007. №2. —С. 22-27.
- 29. Алексеев, Б.А. Повышение пропускной способности воздушных линий электропередачи и применение проводов новых марок / Электро, 2009. №3. С. 45-50.
- 30. ТУ 16.К03-51-2010. Проволока из термостойкого проводникового алюминиевого сплава АЦр1Е. Технические условия: ЗАО «Управляющая компания «УНКОМТЕХ». 2010. С.11.
- 31. Сидельников, С.Б. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов: монография / С.Б.Сидельников, Н.Н. Довженко, Н.Н. Загиров М.:МАКС Пресс, 2005. 344 с.
- 32. Фастыковский, А. Р. Развитие научных основ и разработка совмещенных методов обработки металлов давлением, обеспечивающих экономию материальных и энергетических ресурсов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Фастыковский Андрей Растиславович. Новокузнецк, 2011. 38 с.
- 33. Matveeva, I. Development and research of new aluminium alloys with transition and rare-earth metals and equipment for production of wire for electrotechnical applications by methods of combined processing / I.Matveeva, N.Dovzhenko, S.Sidelnikov, L.Trifonenkov, V.Baranov, E.Lopatina // TMS Light Metals 2013 At the TMS 2013 Annual Meeting and Exhibition, 2013. P. 443-447.

- 34. Физическая механика гидростатической обработки материалов / Я.Е. Бейгельзимер, В.Н. Варюхин, Б.М. Эфрос Донецк: Дон-ФТИ НАНУ. 2000. 196 с.
- 35. Некоторые вопросы больших пластических деформаций металлов при высоких давлениях / Б.И. Береснев, Л.Ф. Верещагин, Ю.Н. Рябинин, Л.Д. Лив-шиц.— М.: Изд-во АН СССР. 1960. 58 с.
- 36. Пью, Х.Л. Механические свойства материалов под давлением / Под ред. Х.Л. Пью. М.: Мир.— 1973. — т.2. — 374 с.
- 37. Колмогоров, В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. М.: Металлургия, 1970.—230 с.
- 38. Ресурс пластичности при обработке металлов давлением / А.А. Богатов, О.И. Мижирицкий, С.В. Смирнов. М.: Металлургия, 1984. 150 с.
- 39. Огородников, В.А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением. Киев: Выш. школа. 1983. 175 с.
- 40. Богатов, А.А. О разрушении металлов при обработке давлением / Кузнечно-штамповочное производство, 1997. №8. С.2-7.
- 41. Колмогоров, В.Л. К вопросу построения обобщенной феноменологической модели разрушения при пластической деформации металлов / В.Л. Колмогоров, Б.А. Мигачев, В.Г. Бурдуковский // Металлы, 1995. №6. С.133-141.
- 42. Рыбин, В.В. Большие пластические деформации и разрушение металлов. М.: Металлургия. 1986. 224 с.
- 43. Дисклинации в кристаллах / В.И., Владимиров, А.Е Романов. Л.: Нау- ка. 1986. 223 с.
- 44. Кооперативные деформационные процессы и локализация деформации / В.А. Лихачев, В.Е. Панин, Е.Э. Засимчук [и др.] / Отв. ред. Немошкаленко В.В. Киев: Наукова думка, 1989.— 320 с.
- 45. Поры в твердом теле / П.Г Черемской., В.В.Слезов, В.И. Бетехтин М.: Энергоатомиздат. 1990.– 376 с.

- 46. Конева, Н.А.Физическая природа стадийности пластической деформации / Н.А. Конева, Э.В. Козлов // Известия ВУЗов. Физика, 1990. №2. С. 89–106
- 47. Границы зерен и свойства металлов / О.А. Кайбышев, Р.З. Валиев. М.: Металлургия. 1987. 214 с.
- 48. Карты механизмов деформации / Г.Дж. Фрост, М.Ф. Эшби. Челябинск: Металлургия. 1989. 482 с.
- 49. Процессы пластического структурообразования металлов / Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И. Минск: Наука и техника, 1994.
- 50. Gleiter, H. Nanocrystalline materials / Progress in Materials Science, 1989. Vol.33 P. 223-315.
- 51. Ma, E. Eight Routes to Improve the Tensile Ductility of Bulk Nanostructured Materials and Alloys / National Johnson-O'Malley Association, 2006. 58. N.4. P. 49-53
- 52. Логинов, Ю.Н. Оценка неравномерности деформации и давлений при угловом прессовании / Ю.Н. Логинов, С.П. Буркин // Кузнечно-штамповочное производство, 2001. №3. С. 29-33.
- 53. Segal, V.M. Severe plastic deformation: simple shear versus pure shear / Materials Science and Engineering, 2002. P. 331-344.
- 54. Экк, А.Э. Формирование металла при непрерывном равноканальном угловом прессовании / А.Э. Экк, М.Ю. Семашко, В.Г. Шеркунов // Вестник ЮурГУ, 2006. №11. С. 143-147.
- 55. Шеркунов, В.Г. Поведение заготовки и формоизменение металла при непрерывном равноканальном угловом прессовании с радиусами в углах пересечения канала / А.Е. Экк, В.Г. Шеркунов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова, 2007.  $N \ge 1$ . С. 51-54.
- 56. Спусканюк, В.З. Влияние условий равноканального углового прессования на скорость деформации заготовок / В.З. Спусканюк, А.Н. Гангало, А.А. Давиденко // Физика и техника высоких давлений, 2010. Т.20. №4. С. 134-137.

- 57. Камалетдинов, И.Ш. Исследоваие процесса равноканального углового прессования / И.Ш. Камалетдинов, В.С. Юсупов // Физико-химия и технология неорганических материалов: сб. материалов VII Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов, 2010. С. 1-6.
- 58. Спусканюк, В.З. Исследование процесса равноканального Т-образного прессования методом конечных элементов / В.З. Спусканюк, А.Н. Гангало, А.А. Давиденко, А.П. Латаев // Восточноевропейский журнал передовых технологий, 2009. Т.З. № 7 (39). С. 23-28.
- 59. Фахретдинова, Э.И. Сравнительный анализ математического и физического моделирования нового метода интенсивной пластической деформации мульти-ркуп-конформ / Э.И. Фахретдинова, Г.И. Рааб // Цветные металлы 2014: сб. докладов шестого международного конгресса. Красноярск: ООО «Версо», 2014. С. 1207-1212.
- 60. Рааб, Г.И. Равноканальное угловое прессование длинномерных заготовок / Г.И. Рааб, Р.З. Валиев // Цветная металлургия. 2000. №5. С. 50-53.
- 61. Рааб, Г.И. Развитие научных основ технологий интенсивной пластической деформации и создание оборудования по схеме равноканального углового прессования для получения ультрамелкозернистых металлических полуфабрикатов: дис. . . . д-ра техн. наук / Рааб Гергий Иосифович. Уфа, 2009. 36 с.
- 62. Рааб, Г.И. Разработка и исследование метода СЛиПП-ИПД для получения алюминиевых полуфабрикатов высокого качества / Г.И. Рааб, Э.И. Фахретдинова, Р.З. Валиев // Журнал Сибирского Федерального университета. Серия: техника и технологии. Красноярск, 2014. Т.7. №3. С. 309-315.
- 63. Adedokun, S.T. Characteristics of an Aluminum Alloy after Generation of Fine Grains Using Equal Channel Angular Extrusion Process / S. T. Adedokun, Y. K. Chou // Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences, ISSN: 2141-7016, 2011. P. 289-293.
- 64. Бродова, И.Г. Особенности измельчения структуры алюминиевых сплавов с переходными металлами / И.Г. Бродова, И.Г. Ширинкина, А.Н. Петрова // Письма о материалах, 2011. Т.1. С. 32-35.

- 65. Пат. 282653 Российская Федерация, МПК С22С21/02. Коррозионностойкий сплав на основе алюминия / Г.Б. Строганов, В.М. Платонов, М.Б. Альтман [и др.]; опубл 28.09.1970 Бюл. №30.
- 66. Пат. 289138 Российская Федерация, МПК C22C21/04. Литейный сплав на основе алюминия / Н.Н. Белоусов, В.А. Корчагов, Т.И. Полянская [и др.]; опубл. 08.12.1970 Бюл. №1.
- 67. Пат. 324287 Российская Федерация, МПК С22С21/00. Сплав на основе алюминия / А.С. Шпигель, Д.С., Гилыур, Г.М. Губенко; опубл. 01.01.1972.
- 68. Пат. 433233 Российская Федерация, МПК С22 С21/02. Алюминиевый сплав / Ю.П. Гук, А.Н. Малинкович, Т.К. Смирнова [и др.]; опубл. 25.06.74 Бюл. №23.
- 69. Пат. 464641 Российская Федерация, МПК С22С21/04. Сплав на основе алюминия / Б.И. Емлин, Д.В. Ильинков, М.И. Гасик [и др.]; опубл. 25.03.1975. Бюл. №11.
- 70. Пат. 473759 Российская Федерация, МПК C22C21/00. Сплав на основе алюминия / В.И. Добаткин, В.И. Елагин, В.М. Федорова [и др.]; опубл. 14.06.1975 Бюл. №22.
- 71. Пат. 514906 Российская Федерация, МПК C22C21/02. Сплав на основе алюминия / Г.Е. Гольдбухт, Л.Н. Морозов, С.Н. Ананьин, В.Г. Мигалева; опубл. 25.05.1976.
- 72. Пат. 2001147 Российская Федерация, МПК C22C21/00. Литейный сплав на основе АН6T4 / Н.А. Белов; опубл. 15.10.1993.
- 73. Пат. 2001146 Российская Федерация, МПК C22C21/00. Литейный сплав на основе АН6Т3 / Н.А. Белов; опубл. 15.10.1993.
- 74. Пат. 2001145 Российская Федерация, МПК С22С21/00. Литейный сплав на основе алюминия / Н.А. Белов; опубл. 15.10.1993.
- 75. Пат. 2001144 Российская Федерация, МПК С22С21/00. Литейный сплав на основе алюминия / Н.А. Белов; опубл. 15.10.1993.
- 76. Пат. 2081933 Российская Федерация, МПК С22С21/06. Алюминиевый сплав / И.Н. Фридляндер, В.Н. Ельцов, С.Ф. Данилов; опубл. 20.06.1997.

- 77. Пат. 2252975 Российская Федерация, МПК С22С21/00. Материал на основе алюминия / Н.А. Белов, В.С. Золоторевский, А.Н. Алабин; опубл. 27.05.2005.
- 78. Пат. 2419663 Российская Федерация, МПК С22С21/10. Высокопрочный алюминиевый сплав на основе алюминия / Н.А. Белов, В.Д. Белов, В.В. Чеверкин, С.С. Мишуров; опубл. 27.05.2011.
- 79. Пат. 2441090 Российская Федерация, МПК C22C21/00. Проводниковый термостойкий сплав на основе алюминия / Н.А. Белов, А.Н. Алабин, А.Ю. Прохоров; опубл. 27.01.2012.
- 80. Пат. 2010131318 Российская Федерация, МПК Н01В5/08. Провод неизолированный для воздушных линий электропередачи (варианты) / А.Ю. Прохоров, Н.А. Белов, А.Н. Алабин; 10.02.2012.
- 81. Пат. 2446222 Российская Федерация, МПК C22C21/14, C22F1/057. Термостойкий сплав на основе алюминия и способ получения из него деформированных полуфабрикатов / Н.А. Белов, А.Н. Алабин; опубл. 27.03.2012.
- 82. Пат. 2458151 Российская Федерация, МПК С21С1/02. Алюминиевый сплав / Баранов В.Н., Биронт В.С., Довженко Н.Н., Падалка В.А., Сидельников С.Б. [и др.]; опубл. 10.08.2012.
- 83. Горбунов, Ю.А. Основные характеристики и перспективы развития сплавов алюминия с высокой дисперсностью фаз легирующих элементов / Цветные металлы 2013: сб. докладов пятого международного конгресса. Красноярск: ООО «Версо», 2013. С. 585-590.
- 84. Григорьев, В.М. Исследование цирконий содержащих сплавов алюминия / Известия вузов: Цветная металлургия, 2011. №3. С.30 39.
- 85. Белов, Н.А. Перспективные алюминиевые сплавы с добавками циркония и скандия / Н.А. Белов, А.Н. Алабин // Цветные металлы, 2007. №2. С. 99-106.
- 86. Михайловская, А.В. Влияние добавок циркония, хрома и никеля на структуру и показатели сверхпластичности сплавов системы сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu / А.В. Михайловская, В.С. Левченко, Т.Б. Сагалова, В.К. Портной // Известия вузов: Цветная металлургия, 2008. №4. С. 39-44.

- 87. Белов, Н.А. Влияние добавки циркония на прочность и электросопротивление холоднокатаных алюминиевых листов / Н.А. Белов, А.Н. Алабин, А.Ю. Прохоров // Известия вузов: Цветная металлургия, 2009. №4. С. 42-47.
- 88. Белов, Н.А. Влияние отжига на электросопротивление и механические свойства холоднодеформированного сплава Al − 0,6% (мас.) Zr / H.A. Белов, А.Н. Алабин, А.Ю. Прохоров // Цветные металлы, 2009. №10. С.65-68.
- 89. Белов, Н.А. Перспективные алюминиевые сплавы с повышенной жаропрочностью для арматуростроения как возможная альтернатива сталям и чугунам / Н.А. Белов, А.Н Алабин // Actual Conference 2 (65), 2010. С. 50-53.
- 90. Прохоров, А.Ю. Особенности технологии плавки и литья слитков проводниковых алюминиево-циркониевых сплавов в промышленных условиях / А.Ю. Прохоров, Н.А. Белов // Литейщик России, 2010. №4. С. 30-34.
- 91. Белов, Н.А. Влияние железа и кремния на фазовый состав и структуру термостойких литейных никалинов, упрочняемых наночастицами  $Al_3Zr$  ( $Ll_2$ ) / Н.А. Белов, А.Н. Алабин, С.С. Мишуров // Известия вузов: Цветная металлургия, 2011. №3. C. 40 48.
- 92. Белов, Н. А. Особенности микроструктуры и фазовый состав литейных сплавов системы Al-Ce-Fe-Ni-Zr / Н. А. Белов, В. С. Золоторевский // Журнал Российского химического общества им. Д.И.Менделеева, 2001. т. XLV. № 5-6. С. 15-22.
- 93. Белов, Н.А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов: монография / Н.А. Белов. М.: Изд. Дом МИСиС, 2010. 551 с.
- 94. Матвеева, И.А. Исследование и разработка технологии производства алюминиевой катанки с добавкой циркония способом непрерывного литья и прокатки с целью получения из нее термостойких проводов ЛЭП: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Матвеева Ирина Артуровна Москва, 2014. 24 с.
- 95. Информационный технический портал «Svarkainfo» [Электронный ресурс]: сайт. URL: <a href="http://www.svarkainfo.ru/rus/lib/tech/aluminum\_alloy/">http://www.svarkainfo.ru/rus/lib/tech/aluminum\_alloy/</a> (дата посещения 18.06.2014).

- 96. ГОСТ 839-80. Провода неизолированные для воздушных линий электропередачи. Технические условия. Москва: межгосударственный стандарт, 1980. C.22.
- 97. Дроздова, Т.Н. Термическая обработка сплавов системы Al-Zr для достижения заданного комплекса свойств катанки электротехнического назначения / Т.Н. Дроздова, Л.П. Трифоненков, Т.А. Орелкина, В.А. Бернгардт [и др.] // Цветные металлы 2013: сб. докладов пятого международного конгресса. Красноярск: ООО «Версо», 2013 г. С. 544-548.
- 98. Дроздова, Т.Н. Разработка режимов отжига катанки из сплавов системы Al-Zr для достижения заданного комплекса свойств / В.А. Бернгардт, Т.Н.Дроздова, Т.А. Орелкина, С.Б. Сидельников [и др.] // Журнал Сибирского Федерального университета. Серия: техника и технологии. Красноярск, 2014. Т.7.  $\mathbb{N}_{2}$ 5. С. 587-595.
- 99. Официальный сайт акционерной холдинговой компании «ВНИИМЕТ-МАШ им. А.И. Целикова» [Электронный ресурс]: сайт. URL: <a href="http://www.vniimetmash.ru/produktsiya">http://www.vniimetmash.ru/produktsiya</a> (дата посещения 20.07.2014).
- 100. Горохов, Ю.В. Основы проектирования процессов непрерывного прессования металлов: монография / Ю.В. Горохов, В.Г. Шеркунов, Н.Н. Довженко [и др.] Красноярск: Сибирский Федеральный ун-т, 2013. 224 с.
- 101. Довженко, Н.Н. Прессование алюминиевых сплавов: моделирование и управление тепловыми условиями: монография / Н.Н. Довженко, С.В. Беляев, С.Б. Сидельников [и др.] Красноярск: Сибирский Федеральный ун-т т, 2009. 256 с.
- 102. Грищенко, Н.А. Механические свойства алюминиевых сплавов: монография / Н.А. Грищенко, С.Б. Сидельников, И.Ю. Губанов [и др.] Красноярск: Сибирский Федеральный ун-т, 2012. 196 с.
- 103. Пат. 1667979 Российская Федерация, МПК B21C25/08. Инструмент для прессования изделий из алюминиевых сплавов / В.Н. Корнилов, Сидельников С.Б., Алферов В.Н. [и др.]; опубл. 07.08. 1991.

- 104. Пат. 1785459 Российская Федерация, МПК В21С25/00. Устройство для непрерывного прессования металла / Н.Н. Довженко, С.Б. Сидельников, Н.Н. Загиров; опубл. 30.12.1992.
- 105. Пат. 1801040 Российская Федерация, МПК В21С23/08. Устройство для непрерывного прямого выдавливания / Н.Н. Довженко, В.Н. Алферов, С.Б. Сидельников [и др.]; опубл 07.03.1993.
- 106. Пат. 2100113 Российская Федерация, МПК B21C23/08. Устройство для непрерывного прессования труб / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, Ешкин А.В., Гилевич Ф.С.; опубл. 27.12.1997.
- 107. Пат. 2100136 Российская Федерация, МПК B22D11/06. Установка для непрерывного литья и прессования металла / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, А.В. Ешкин; опубл. 27.12.1997.
- 108. Пат. 29675 Российская федерация, МПК B21C25/00. Устройство для непрерывного прессования металлов / Е.Ю. Сырямкина, С.Б. Сидельников, Ю.А. Клейменов [и др.]; опубл. 27.05.2003.
- 109. Пат. 2200644 Российская Федерация, МПК B22D11/06. Устройство для непрерывного литья и прессования полых профилей / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, А.И. Гришечкин, Е.С. Сидельникова; опубл. 20.03.2003.
- 110. Пат. 67492 Российская Федерация, МПК B22D11/06. Установка для непрерывного литья, прокатки и прессования металла / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, В.Н. Тимофеев [и др.]; опубл. 27.10.2007.
- 111. Пат. 68387 Российская Федерация, МПК B22D11/06. Устройство для непрерывного литья и прессования полых профилей / С.В. Беляев, С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко [и др.]; опубл. 27.11.2007.
- 112. Пат. 70828 Российская Федерация, МПК B21C25/00. Устройство для непрерывной прокатки и прессования профилей / С.В. Беляев, Н.Н. Довженко, С.Б. Сидельников [и др.]; опубл. 20.02.2008.
- 113. Пат. 73245 Российская Федерация, МПК В21С3/00. Устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования цветных металлов и сплавов / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, Е.С. Лопатина [и др.]; опубл. 20.05.2008.

- 114. Пат. 2334574 Российская Федерация, МПК B21C25/00. Устройство для непрерывной прокатки и прессования / С.В. Беляев, Н.Н. Довженко, С.Б. Сидельников [и др.]; опубл. 27.09.2008.
- 115. Пат. 2335376 Российская Федерация, МПК B22D11/06. Устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования профилей / С.В. Беляев, Н.Н. Довженко, С.Б. Сидельников [и др.]; опубл. 10.10.2008.
- 116. Пат. 101390 Российская Федерация, МПК B21C23/00. Устройство для непрерывной прокатки и прессования / С.В. Беляев, С.Б. Сидельников, И.Н. Довженко [и др.]; опубл. 20.01.2011.
- 117. Пат. 102313 Российская Федерация, МПК B21C23/08. Устройство для непрерывной прокатки и прессования профилей / С.В. Беляев, С.Б. Сидельников, И.Н. Довженко [и др.]; опубл 27.02.2011.
- 118. Пат. 102542 Российская Федерация, МПК B21C23/00. Устройство для непрерывной прокатки и прессования профилей / С.В. Беляев, С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко [и др.]; опубл. 10.03.2011.
- 119. Пат. 102550 Российская Федерация, МПК B22D11/06. Установка для непрерывного литья, прокатки и прессования металла / С.В. Беляев, С.Б. Сидельников, И.Н. Довженко [и др.]; опубл. 10.03.2011.
- 120. Пат. 2457914 Российская Федерация, МПК B21C3/00. Устройство для непрерывного литья. Прокатки и прессования цветных металлов и сплавов / В.Н. Баранов, Д.С. Ворошилов, Р.И. Галиев [и др.]; опубл. 10.08.2012.
- 121. Пат. 2519078 Российская федерация, МПК B22D11/06. Способ совмещенного литья, прокатки и прессования и устройство для его реализации / Г.И. Рааб, С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, Э.И. Гималтдинова; опубл. 10.06.2014.
- 122. Пат. 48836 Российская Федерация, МПК. Устройство для непрерывного литья слитков в электромагнитном поле / М.В. Первухин, В.Н. Тимофеев, Р.М. Христинич [и др.] Опубл. 10.11.2005. Бюл. №31.
- 123. ГОСТ 7229-76. Кабели, провода и шнуры. Метод определения электрического сопротивления токопроводящих жил и проводников: ИПК Издательство стандартов 1976. 16 с.

- 124. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. Москва: ИПК Издательство стандартов 1986. 24 с.
- 125. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных на-конечников. Москва: ИПК Издательство стандартов 1977. 34 с.
- 126 Трифоненков, Л.П. Опытно-промышленное освоение производства катанки из алюминиево-циркониевых сплавов / Л.П. Трифоненков, Н.Н Довженко, С.Б. Сидельников [и др.] // Цветные металлы 2011: сб. докладов третьего международного конгресса. Красноярск: ООО «Версо», 2011. С. 560-564.
- 127. Беспалов, В.М. Исследование структуры и свойств прутков из низколегированных сплавов системы Al-Zr / В.М. Беспалов, А.Л. Трифоненков, Л.С. Шадрина // XII Международной научно-технической конференции Уральская школа-семинар молодых ученых металловедов: сб. научных трудов. Екатеринбург: УрФУ, 2011. С. 202-204.
- 128. Довженко, Н.Н. 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.
- 129. Бернгардт, В.А. 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 школасеминар молодых ученых металловедов: сб. научных трудов. Екатеринбург: УрФУ, 2012. С. 326-328.
- 130. Sidelnikov, S.B. 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.

- 131. Федорова, О.В. Исследование технологии изготовления проволоки электротехнического назначения с повышенными эксплуатационными свойствами / О.В. Федорова, В.А. Бернгардт, Беспалов В.М // XIII Международная научнотехническая Уральская школа-семинар молодых ученых металловедов: сб. научных трудов. Екатеринбург: УрФУ, 2013. С. 250-252.
- 132. Федорова, О.В. Исследование влияния химического состава и параметров литья на свойства полуфабрикатов электротехнического назначения / О.В. Федорова, Беспалов В.М., В.А. Бернгардт, Т.Н. Дроздова // Молодежь и наука: сб. материалов X Юбилейной Всероссийской НТК студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 80-летию образования Красноярского края, [Электронный ресурс] / отв. ред. О. А. Краев. Красноярск: Сибирский Федеральный ун-т. 2014.
- 133. Трифоненков, А.Л. 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, посвященной 80-летию образования Красноярского края [Электронный ресурс] / отв. ред. О. А. Краев. Красноярск: Сибирский Федеральный ун-т. 2014.
- 134. Бернгардт, В.А. Разработка составов сплавов Al-Zr-Fe для изготовления термостойких проводов линий электропередачи / В.А. Бернгардт, В.А. Дроздова, Л.П. Трифоненков, В.Ф. Фролов, О.В. Федорова, В.М. Беспалов // Цветные металлы 2014: сб. докладов шестого международного конгресса. Красноярск: ООО «Версо», 2014. С. 1061-1066.
- 135. Пат. 2429943 Российская Федерация, МПК B22F3/18. 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.
- 136. 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.

- 137. Пат. 122315 Российская Федерация, МПК B21C23/00. 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.
- 138. Пат. 138590 Российская Федерация, МПК B21C23/08. 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.
- 139. Пат 139085 Российская Федерация, МПК B21C23/08. 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.
- 140. Агеев, Л.М. Теоретическое сравнение расхода энергии и коэффициента полезного действия процессов прокатки-волочения и обычной прокатки / Л.М. Агеев, Л.М. Сухарев // Обработка металлов давлением: сб. трудов Вузов Российской Федерации. Свердловск, изд. УПИ им. С.М. Кирова, 1974. Вып. 2. С. 45-52.
- 141. Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением: учебник для вузов. Екатеринбург: УГТУ УПИ, 2001 836с.
- 142. Смирнов, В. К. Калибровка прокатных валков / В. К. Смирнов,
  В. А. Шилов, Ю. В. Инатович: учебное пособие для вузов. 2-е изд. перераб. и доп.
   М.: Теплотехник, 2010. 490 с.
- 143. Перлин, И.Л. Теория прессования металлов / И.Л. Перлин, Л.Х. Райтбарг М.: Металлургия, 1975.-448 с.
- 144. Падалка, В.А. 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, Л.И. Мамина [и др.] // Литейщик России, Москва. 2011. №.5. С. 33-36.
- 145. Беспалов, В.М. Исследование механических свойств новых сплавов алюминия с переходными металлами / Беспалов В.М., Р.Е. Соколов, А.С. Сидель-

- ников // Молодежь и наука: материалы HTK / отв. за выпуск О.А. Краев. Красноярск: Сибирский Федеральный ун-т, 2011. Т.3. С. 161-165.
- 146. Сидельников, С. Б. Исследование возможности повышения эффективности производства электропроводников из алюминиевых сплавов / С. Б. Сидельников, Л.П. Трифоненков, Е.С. Лопатина, Р.И. Галиев // Дни науки: сб. научых трудов по итогам VIII Международной научно-практической конференции: Технические науки / Издательский дом «Education and Science». Прага, 2012. Ч.89. С. 34-38.
- 147. Довженко, Н.Н. 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.
- 148. Довженко, Н.Н. 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.
- 149. Сидельников, С.Б. 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.
- 150. Бернгардт, В.А. Исследование электрофизических и механических свойств проволоки из сплавов системы Al-Zr / В.А. Бернгардт, Беспалов В.М., Л.С. Шадрина // Молодежь и наука: сб. материалов VIII Всероссийской НТК студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 155-летию со дня рождения К.Э.Циолковского [Электронный ресурс] / отв. ред. О.А.Краев. Красноярск, 2012.
- 151. Федорова, О.В. Исследование влияния вида и режима обработки на свойства деформированных полуфабрикатов электротехнического назначения / О.В. Федорова, В.М. Беспалов, В.А. Бернгардт // XIII Международная научно-

- техническая Уральская школа-семинар молодых ученых металловедов: сб. научных трудов. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – С. 268-270.
- 152. Рудницкий, Э.А. Технологические режимы волочения проволоки из сплава системы алюминий-цирконий / Э.А. Рудницкий, Беспалов В.М., А.А. Роговой, А.Л. Трифоненков // Цветные металлы 2012: сб. докладов четвертого конгресса. Красноярск: ООО «Версо», 2012. С. 842-845.
- 153. Довженко, Н.Н. 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 им. Г.И. Носова, 2012. В.38. С. 6-10.
- 154. Сидельников, С.Б. 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.
- 155. Сидельников, С.Б. Сравнительная оценка прочностных характеристик деформированных полуфабрикатов из сплавов системы A1 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.  $N_{2}$ .1 C. 86-90.
- 156. Свидетельство. 2012611852 Российская Федерация. Моделирование температурно-скоростных режимов при совмещенном литье и прокатке прессовании (СЛиПП) цветных металлов и сплавов / Н.Н. Довженко, С.В. Беляев, Н.Н. Загиров, В.М. Беспалов [и др.]; опубл 17.02.2012.
- 157. Пат. 2486027 Российская Федерация, МПК B22D11/06. 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.

- 158. Пат. 128529 Российская Федерация, МПК B22D11/06. 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.
- 159. Сидельников, С.Б. 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 им. Г.И. Носова, 2014. В.20. С. 12-20.
- 160. Сидельников, С.Б. 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.
- 161. Пат. 145114 Российская Федерация, МПК B2211/06, B21C23/00. Установка для непрерывного литья, прокатки, прессования и волочения цветных металлов и сплавов / Н.Н. Довженко, С.Б. Сидельников, С.В. Беляев, Р.И. Галиев, Л.В. Галиева; опубл. 10.09.2014.



Настоящим актом подтверждается, что нижеперечисленные технические решения внедрены в учебный процесс института цветных металлов и материаловедения, применяются при обучении студентов специальности 150106 «Обработка металлов давлением», бакалавров и магистров направления «Металлургия» и аспирантов специальности 05.16.05 «Обработка металлов давлением» и используются при проведении занятий в рамках разработанных УМКД «Основы технологических процессов обработки металлов давлением», «Непрерывное литье и обработка цветных металлов и сплавов», «Производство ювелирных изделий», а также при выполнении научно-исследовательских курсовых и дипломных работ, магистерских и кандидатских диссергаций, что позволяет существенно повысить эффективность обучения.

- 1. Сплав на основе палладия. Патент РФ №2392339, 2010 г.
- 2. Сплав на основе золота. Патент РФ №2391425, 2010 г.
- 3. Сплав на основе золота белого цвета 585 пробы. Патент РФ № 2430982, 2011 г.
- 4. Устройство для непрерывной прокатки и прессования. Патент РФ №101390, 2011 г.
- Устройство для непрерывной прокатки и прессования профилей. Патент РФ №102313, 2011 г.
- 6. Установка для заливки металла в изложницы. Патент РФ №102314, 2011 г.
- 7. Устройство для непрерывной прокатки и прессования профилей. Патент РФ №102542, 2011 г.
- 8. Устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования металла. Патент РФ №102550, 2011 г.
- Устройство для исследования модифицирующей способности лигатур. Патент РФ №104297, 2011 г.
- 10. Матрица для прессования изделий. Патент РФ №105602, 2011 г.
- 11. Устройство для получения проволоки и профилей из некомпактных материалов. Патент РФ №2429943, 2011 г.
- 12. Устройство для непрерывной прокатки и прессования профилей. Патент РФ №119267, 2012 г.
- 13. Припой для пайки ювелирных изделий из сплава палладия 850 пробы. Патент №2447170, 2012 г.
- 14. Припой на основе серебра. Патент РФ №2496625, 2013 г.
- 15. Литейный ювелирный сплав белого цвета на основе палладия. Патент РФ №2479656, 2013 г.
- 16. Сплав на основе палладия 500 пробы. Патент РФ №2479655, 2013 г.
- 17. Механоактивированный спеченный железографитовый композит для пресс-матриц совмещенного литья и прокатки прессования. Патент РФ №2471881, 2013 г.
- 18. Установка для испытания на скручивание. Патент РФ №130708, 2013 г.
- 19. Установка для непрерывного литья, прокатки и прессования цветных металлов и сплавов. Патент РФ №128529, 2013 г.

Директор ИЦМиМ

BEalf

В.Н. Баранов



# ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ Троизволство катанум из а поминица и его сплавов на пабора:

Производство катанки из алюминия и его сплавов на лабораторной установке СЛиПП-2,5

# Редакция 01

для комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства с участием российского высшего учебного заведения по теме:

«Разработка технологии получения алюминиевых сплавов с редкоземельными, переходными металлами и высокоэффективного оборудования для производства электротехнической катанки»

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель проекта ООО «РУСАЛ ИТЦ»

Л.П. Трифоненкова

РАЗРАБОТАНО:

Ответственный исполнитель проекта

\_С.Б. Сидельников

Ответственный исполнитель

В.А. Падалка

# 1 Назначение и область применсния

- 1.1 Настоящий технологический регламент разработан в развитие положений ТИ «Производство катанки из алюминиевых сплавов» в рамках договора «Разработка технологии получения алюминиевых сплавов с редкоземельными, переходными металлами и высокоэффективного оборудования для производства электротехнической катанки» предоставления субсидий на государственную поддержку развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства, утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218.
- 1.2 Настоящий технологический регламент устанавливает требования к процессу приготовления алюминиевых сплавов системы Al–Zr и Al–P3M для производства катанки электротехнического назначения.
- 1.3 Требования настоящего технологического регламента распространяются на технологический персонал литейного отделения Института цветных металлов и материаловедения ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет».

# 2 Нормируемые технологические параметры

2.1 Перечень нормируемых технологических параметров процесса приготовления сплавов и требования к их контролю приведены в карте контроля (таблица 1).

Таблица 1. Карта контроля

	таолица 1. Карта контроля									
Nº		Средства контроля:	Контролируе-	Ед.	Значение пара-	Объем и пе-	Метод	Метод анализа	Порядок выполне-	
		оборудование, ос-	мый параметр,	физ.	метра характе-	риодичность	отбора	/ измерения	ния операций кон-	
		настка, инструмент	характеристика	вел	ристики	контроля	пробы		троля	
	Масса ших- товых мате- риалов, Zr, P3M	Весы	Macca Zr, P3M	КГ	В соответствии с расчетным значением	Каждая плавка		Содержание Zr, РЗМ в ли- гатуре в соот- ветствии с сер- тификатом Zr, РЗМ	Взвешивание лига- туры Zr, РЗМ после проведения расчета	
2	Загрузка алю-	Весы, оптико- эмиссионный спек- трометр	Химический со- став алюминия	%	Содержание Si ≤ 0,08; SV, Cr, Mn ≤ 0,01	Каждая за- валка	По сер- тификату произво- дителя	_	При поступлении в ЛО	
3	Присаживание лигатуры Zr, P3M	Визуально	Последователь- ность введения лигатуры Zr, РЗМ		Растворение	Каждая плавка		Визуальный контроль	После расплавления и нагрева алюминия до 800–850 для Zr, 740–760 °C для РЗМ	
4	Перемешива- ние расплава	Визуально, часы	Время переме- шивания	мин	10	Каждая плавка	_	Визуальный контроль	Перемешивание 5 мин — выдержка 10 мин, далее перемешивание 5 мин — выдержка 20 мин (при Т не менее 800	

173

Продолжение таблицы

	<del></del>	<del>, · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·</del>				T		T	
[]	Объект	Средства контроля:	Контролируе-	[ Ед. [	Значение	Объем и пе-	Метод	Метод анализа	Порядок выполне-
	контроля	оборудование, ос-	мый параметр,	физ.	параметра	риодичность	отбора	/ измерения	ния операций кон-
	}	настка, инструмент	характеристика	вел	характери-	контроля	пробы		троля
					стики	[ [	_	<u> </u>	
	Установка СЛиПП	Тахометр	Скорость вра- щения	об/мин	3–5	Постоянно	-	контроль	Контроль произво- дить в течение про- цесса разливки
	Установка СЛиПП	Расходометр	Расход воды	м <sup>3</sup> /ч	0,4-0,8	Постоянно	~	Визуальный контроль	Контроль производить в течение процесса разливки

# Приложение В



AKT

об испытаниях опытных бухт катанки сплавов системы АІ-ПМ весом до 200 кг.

#### Комиссия в составе:

Председателя – руководителя проекта, профессора, д.т.н. С.Б. Сидельникова; и членов комиссии: доцента кафедры ОМД, к.т.н. Р.Е. Соколова;

нов комиссии: доцента кафедры Омд, к.т.н. Р.с. Соколова;

доцента кафедры ЛП В.А. Падалка;

заведующего кафедрой МиТОМ, д.х.н В.П. Жереба;

руководителя проекта ООО «РУСАЛ ИТЦ» Л.П. Трифоненкова;

начальника ОЛП ООО «РУСАЛ ИТЦ» В.Ф. Фролова

в период с 01.03.2012 г по 23.03.2012 г провела испытания качества катанки из сплавов системы Al-ПМ бухтах весом до 200 кг в соответствии с календарным планом работ согласно дополнительному соглашению №3 от 28.07.2011 г к договору № 9110R028 от 15.07.2010 г.

## Результаты испытаний:

- 1. Получены бухта катанки из сплава Al-0,1%Zr весом 208 кг и бухта катанки из сплава Al-0,2%Zr весом 212 кг
- 2. Химический состав сплавов используемых для получения катанки указан в таблице 1.
- 3. Физические свойства катанки полученной в бухтах весом по 200 кг по режимам согласно ТР «Производство катанки из алюминия и его сплавов на лабораторной установке СЛиПП-2,5», редакция 01 от 05 марта 2012 г. указаны в таблице 2.

Таблица 1. Химический состав.

Марка	Содержание элементов, % масс								
	Zr	Fe	Si	Mg	Cu	Ga	Pb	∑Ti, V, Cr, Mn	
Al-0,1%Zr	0,0987- 0,1022	0,186- 0,191	0,067- 0,072	0,0014- 0,0019	<0,0010	<0,006	<0,0010	0,0072- 0.0079	
Al-0,2%Zr	0,1943- 0,2019	0,132- 0,148	0,069- 0.074	0,0015- 00018	<0,0010	<0,006	<0,0010	0,0073- 0.0078	

Таблица 2. Физические свойства катанки.

Сплав	Место отбора	Уд. эл. сопр.	Предел прочно-	Рабочая темпе-
}	образца по дли-	при 20°C,	сти,	ратура,
	не бухты	Ом*мм <sup>2</sup> /м	МПа.	°C.
Al-0,1%Zr	начало	0,0284	132,2	150
	середина	0,0282	125,4	150
	конец	0,0282	126,8	150
Al-0,2%Zr	начало	0,0285	148,3	150
	середина	0,0284	144,6	150
	конец	0,0284	143,5	150

## Выводы:

1. Физические свойства катанки из сплава Al-0,2%Zr, полученной в бухтах весом по 200 кг соответствует требования ТЗ.

Председатель комиссии Члены комиссии:

С.Б. Сидельников

Р.Е. Соколов

В.А. Падалка

В.П. Жереб
Л.П. Трифоненков
В.Ф. Фролов



Россия, 634059, г. Томск, ул. Смирнова, 3 тел./факс: (3822) 49-89-89, cable@tomskcable.ru

УТВЕРЖДАЮ: Главный технолог ЗАО «Томсккабель» Е.В.Лазарев

#### AKT

#### технологического испытания в пехе

от 17 мая 2012 г.

материала катанка из сплава алюминия и циркония марка <u>АЦЕ 6 № партии 3687</u>, вес нетто <u>538 кг</u> поступил <u>10.05.2012</u> поставщик <u>ИрКаз</u> оборудование: <u>TS 45/13</u> Изделие, на которое перерабатывали: проволока диаметром 4,10 мм, проволока диаметром 3,15 мм, проволока диаметром 1,70 мм (в тестовом режиме).

Режим переработки: волочение со скольжением, скорость волочения для 4,10 мм - 9 м/сек, для проволоки 3,15 м -13м/сек, маршрут волочения для диаметра 4,10 мм : 8,238; 7,155; 6,231; 5,427; 4,726; 4,128, для диаметра 3,15мм : 8,238; 7,155; 6,231; 5,427; 4,726; 4,128; 3,607мм; 3,156мм, для диаметра 1,70мм : 8,238; 7,155; 6,231; 5,427; 4,726; 4,128; 3,607мм; 3,156мм; 2,770; 2,436; 2,151; 1,902; 1,72, скрутка токопроводящей жилы для провода марки СИП -2 95мм² (7х4,10) с уплотнением в алмазном калибре на машине сигарного типа МS 63/1+6.

Результаты испытаний: В процессе волочения дефектов на проволоке не выявлено, обрывов не зафиксировано. Волочение осуществлялось по действующему маршруту, применяемому при технологии волочения алюминиевой проволоки. Заправка катанки производилась после переработки катанки АКЛП-ПТ-5Е-9 методом горячей сварки концов бухт. Для опробования волочения проволоки из сплава АЦЕ-6 диаметром 1,7мм было изготовлено в тестовом режиме 500м проволоки, Обрывов проволоки также не зафиксировано.

После перезаправки линии на диаметр 4,10мм было изготовлено 4000м проволоки, с последующей размоткой на 7 равных длин для скрутки токопроводящей жилы сечением 95 мм<sup>2</sup> (7х4,10мм) с уплотнением. Отклонений технологического режима в

процессе скрутки не выявлено. Жилу планируется использовать в качестве несущей в проводе СИП-2.

Остаток катанки был проволочен в проволоку диаметром 3,15мм.

Заключение: <u>Катанка из сплава АЦЕ-6 признана технологичной на действующих режимах волочения и скрутки, затруднений при переработке не зафиксировано.</u>
<u>Испытания образов катанки и проволоки из сплава АЦЕ-6 проводились в лаборатории ООО «НИНИЦ».</u>

<u>Протоколы испытаний № 73, №73/1, № 73/2, 73/3 прилагаются.</u>

Инженер – технолог

Батурин Е.А.

Менеджер ОЛП ИТД АП Сальников А.В.



УТВЕРЖДАЮ: Главный технолог ЗАО, «Томсккабель» **Е**.В.Лазарев *05* 2012 г.

#### АКТ

#### технологического испытания в цехе

от 17 мая 2012 г.

материала катанка из сплава алюминия и циркония марка АЦЕ-7 № партии 3689, вес нетто 487 кг поступил 10.05.2012 поставщик ИрКаз оборудование: TS 45/13.

Изделие, на которое перерабатывали: проволока диаметром 3,15 мм.

Режим переработки: волочение со скольжением, маршрут волочения 8,238; 7,155; 6,231; 5,427; 4,726; 4,128; 3,607мм; 3,156мм, скорость волочения -13 м/сек, скрутка токопроводящей жилы для провода марки СИП -2 54,6мм2 (7х3,15) без уплотнения на машине сигарного типа MS 63/1+6.

Результаты испытаний: В процессе волочения дефектов на проволоке не выявлено, обрывов не зафиксировано. Волочение осуществлялось по действующему маршруту, применяемому при технологии волочения алюминиевой проволоки. Заправка катанки производилась после переработки сплава АЦЕ-6 методом горячей сварки концов бухт.

Скрутка токопроводящей жилы для провода марки СИП -2 54,6мм<sup>2</sup> (7х3,15) производилась с использованием проволоки из сплавов АЦЕ-6 и АЦЕ-7. Отклонений технологического режима в процессе скрутки не выявлено. Жилу планируется использовать в качестве несущей в проводе СИП-2.

Заключение: Катанка из сплава АЦЕ-7 признана технологичной на действующих режимах волочения и скрутки, затруднений при переработке не зафиксировано. Испытания образов катанки и проволоки из сплава АЦЕ-6 проводились в лаборатории ООО «НИНИЦ». Протоколы испытаний № 74, №74/1 прилагаются.

> Инженер - технолог Менеджер ОЛП ИТД АП

Батурин Е.А. АП Сальников А.В.

#### ОТЗЫВ

по результатам промышленного опробования технических решений по созданию новых алюминиевых сплавов и конструкций оборудования для их обработки методом совмещенного литья, прокатки и прессования

В рамках выполнения проекта «Поддержка ведущих российских вузов» по кооперации вузов и промышленных предприятий по Постановлению Правительства РФ №218 (договор с Минобрнауки России №13.G25.31.0083) учеными института цветных металлов и материаловедения Сибирского федерального университета и сотрудниками ООО «РУ-САЛ ИТЦ» разработаны технические решения на составы новых алюминиевых сплавов и конструкции оборудования для их обработки методом совмещенного литья, прокатки и прессования (СЛИПП). Данные технические решения защищены в 2012 г. патентами:

- 1. Алюминиевый сплав. Патент РФ №2458151;
- 2. Алюминиевый сплав. Патент РФ №2458170;
- 3. Устройство для непрерывного литья, прокатки и прессования цветных металлов и сплавов. Патент РФ № 2457914;
- 4. Устройство для непрерывной совмещенной прокатки и прессования длинномерных изделий. Патент РФ №122315.

Из новых алюминиевых сплавов с переходными и редкоземельными металлами получены опытные партии электротехнической катанки, часть из которых прошли промышленную апробацию на ряде заводов компании «РУСАЛ», при этом установлено, что катанка имеет повышенные пластические и прочностные свойства, технологична и позволяет получать проволоку диаметром до 2 мм без промежуточных отжигов.

В настоящее время на базе технических решений на устройства созданы модельная установка СЛИПП-2,5, размещенная в лаборатории СФУ, и опытно-промышленная установка СЛИПП-4, которая проходит стадию апробации и внедрения на Иркутском алюминиевом заводе.

Применение указанных технических решений позволит получать в промышленных масштабах электротехническую катанку с повышенными характеристиками механических свойств и термостойкостью, снизить трудо- и энергоемкость производства алюминиевых пресс-изделий и применять для промышленного внедрения конструкцию оборудования для совмещенной обработки сплавов на основе алюминия.

Генеральный директор ООО «РУСАЛ ИТЦ»

