

**Разработка технологии получения слитков боралюминия, предназначенных для получения листового проката радиационно-защитного назначения, обеспечивающего прочность ( $\sigma_v$ ) не менее 300 МПа за счет наноразмерных фаз вторичного происхождения**

**(проект ФЦП, мероприятие 1.3)**

**Докладчик: проф. Белов Н.А.**

**Содокладчик: с.н.с. Самошина М.Е.**

**Тема проекта:** Разработка технологии получения слитков боралюминия, предназначенных для получения листового проката радиационно-защитного назначения, обеспечивающего прочность ( $\sigma_b$ ) не менее 300 МПа за счет наноразмерных фаз вторичного происхождения

**Получатель субсидии:** НИТУ «МИСиС»

**Индустриальный партнер:** Общество с ограниченной ответственностью Научно-производственное предприятие "Металл-Композит"

**Объем средств субсидии, млн**

	2014 год	2015 год	2016 год
Бюджет РФ	15	15?	15?
Внебюджет	15	15?	15?

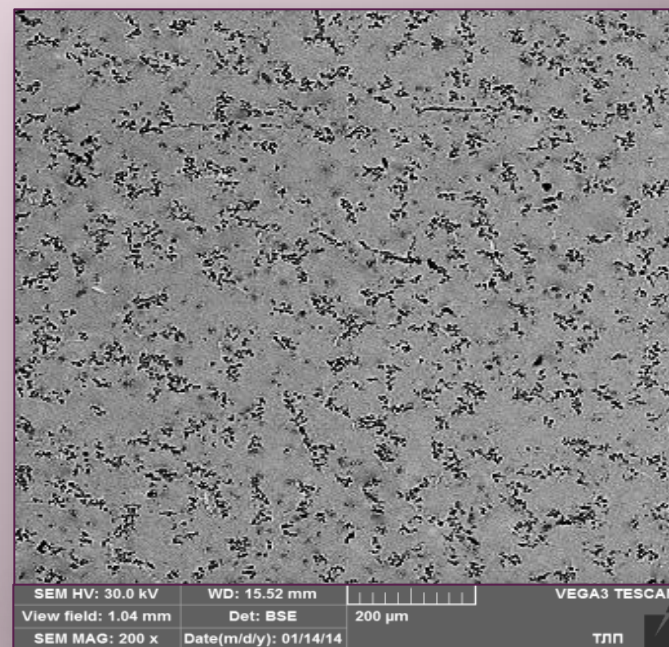
**Научный руководитель:** проф. д.т.н. Белов Н.А.

# Актуальность

□ Алюмо-матричные композиционные материалы, легированные бором, обладают уникальным сочетанием таких свойств, как низкая удельная плотность, прочность, коррозионная стойкость, хорошая теплопроводность, а также способность поглощать тепловые нейтроны. Это делает их незаменимыми в качестве радиационно-защитных конструкционных материалов в ядерной энергетике.

□ Вопрос технологии получения таких материалов до сих пор остается открытым. Выбор способа производства их обусловлен многими факторами, наиболее важными из которых являются: упрочение материала, получение заданного распределения армирующего компонента, хорошая связь между матрицей и наполнителем, отсутствие химического взаимодействия на границе раздела фаз.

□ Одним из перспективных методов получения борсодежащих Al-материалов (с точки зрения достижения заданного уровня свойств, цены конечной продукции и внедрения в условиях металлургического предприятия) является жидкофазная технология – рассматриваемая в настоящем проекте.



## Цель проекта

Разработка технологии получения нового вида материалов – высокопрочных бор-содержащих алюминиевых сплавов в виде слитков, предназначенных для получения листового проката радиационно-защитного назначения с заданным комплексом физико-механических свойств.

## Перспективы коммерциализации результатов проекта

В России до сих пор нет производства борсодержащих алюминиевых сплавов, при этом существует потребность в них. В частности, при транспортировке отработанных радиоактивных отходов, перевозка которых осуществляется в контейнерах, изготовленных из борнаполненной стали.

Результаты работы - разработанная технология (вся технологическая цепочка, включая производство слитков и их термо-деформационную обработку) будут использованы для производства листов с последующим их применением в ядерной энергетике.

## Требования к техническим качественным и (или) количественным характеристикам предполагаемых результатов ПНИ

Борсодержащие алюминиевые сплавы **в виде слитков** должны иметь:

- содержание бора, масс. % – не менее 2,0;
- средний размер бор-содержащих частиц, мкм - не более 30;
- плотность, г/см<sup>3</sup> – не более 2,8.

Борсодержащие алюминиевые сплавы **в виде листового проката**:

- толщина, мм - менее 0,3;
- предел прочности на растяжение при комнатной температуре ( $\sigma_B$  при 20 °С), МПа – не менее 300;
- относительное удлинение при комнатной температуре, % ( $\delta$  при 20 °С) – не менее 5;
- предел прочности на растяжение при комнатной температуре после нагрева до 300 °С и выдержке 3 ч, МПа – не менее 150
- коэффициент линейного температурного расширения (ТКЛР) в интервале температур 20 и 100 °С – не более  $24 \cdot 10^{-6}$  1/К;
- теплопроводность, Вт/м град – не менее 160;
- толщина нанесенного антикоррозионного покрытия, мкм – не менее 20;
- коэффициент ослабления нейтронного излучения на толщине 1 мм – не менее 15;
- средний поперечный размер вторичных выделений упрочняющей фазы, нм – не более 50.

# Задачи проекта

- Изучить влияние легирующих элементов на структуру, фазовый состав новых боралюминиевых материалов. Предложить химический состав новых материалов, способных обеспечить высокий уровень технологичности и эксплуатационных характеристик за счет присутствия в их структуре вторичных наноразмерных выделений. В результате проведенных исследований будут обоснованы химические составы новых боралюминиевых материалов, обеспечивающие требуемые эксплуатационные свойства.
- Разработать технологию плавки и литья для новых боралюминиевых сплавов (в виде слитков) на основе оптимизации параметров плавки. Технологические режимы плавки и литья, такие как очередность загрузки шихты, температура ликвидуса сплавов, оптимальная температура плавки и литья, скорость кристаллизации и др. будут определяться теоретически и подтверждаться экспериментально. Данные исследования позволят определить технологию плавки и литья боралюминиевых сплавов, которая в последствие может применяться в реальных условиях на производстве.
- Разработать технологию деформационно-термической обработки боралюминиевых слитков, обеспечивающую достижение заданного уровня эксплуатационных характеристик на листах. Будут проведены работы по детальному изучению технологических характеристик новых боралюминиевых материалов, изучению процессов при нагреве и высокотемпературной выдержке, которые должны включать определение механических характеристик при повышенных температурах, усилий деформации и производительности при деформации, способность к листовой прокатке. Будет изучена структура и эксплуатационные свойства листов после разных режимов деформационно-термической обработки. Данные исследования позволят определить технологию получения листового проката боралюминия, которая в последствие может применяться в реальных условиях на производстве. Химические составы сплавов, а также технологические режимы плавки, литья и деформационно-термической обработки будут являться объектами правовой охраны.

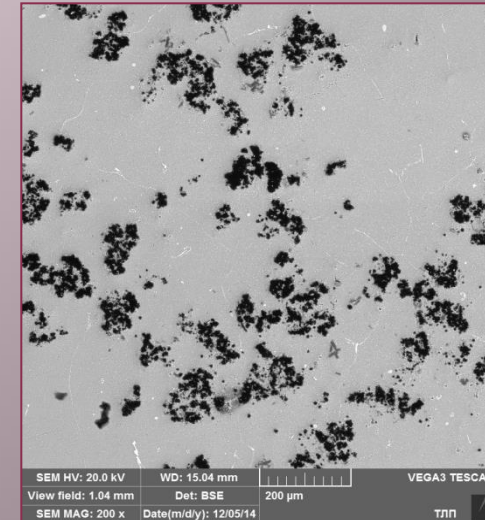
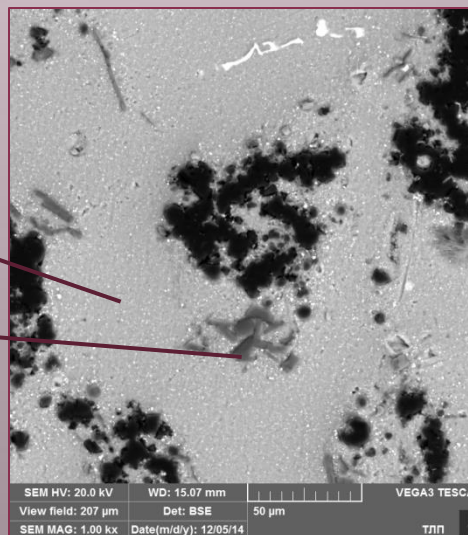
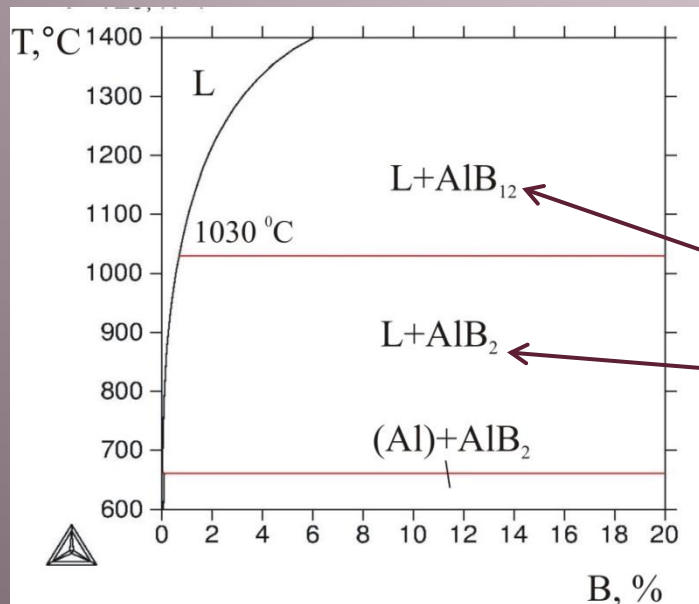
## Особенности плавки и литья алюминиевых сплавов, содержащих бор:

- Бор сильно повышает ликвидус алюминиевых сплавов.
- Разница плотностей алюминиевого расплава и борсодержащих частиц
- Высокая химическая активность бора

Строение двойной диаграммы предполагает, что **именно режим плавки и литья** должен в наибольшей степени определять конечную структуру боралюминия, поскольку из-за малой растворимости бора в алюминиевом твердом растворе какое-либо влияние термообработки на состав боридов представляется маловероятным.

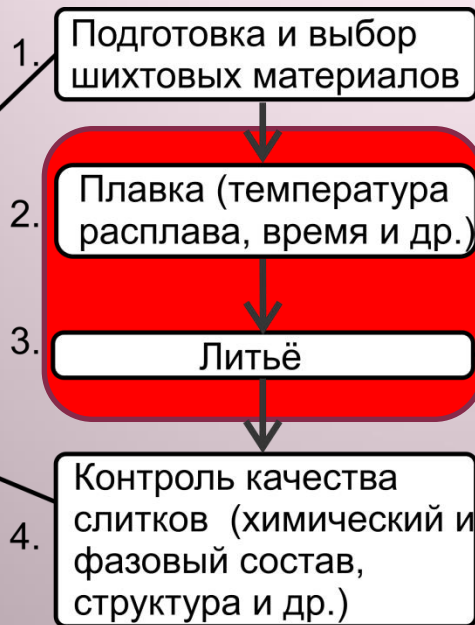
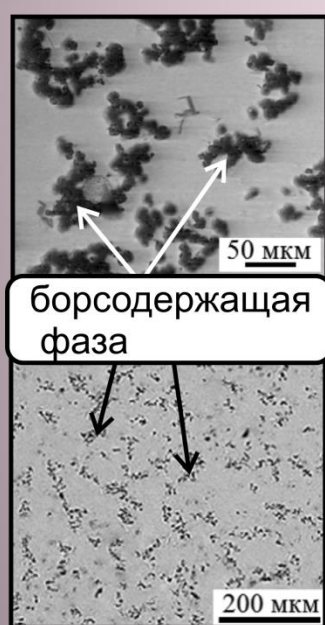
Характеристика	$AlB_2$	$AlB_{12}$
Содержание бора, масс. %	44,51	82,78
Плотность, г/см <sup>3</sup>	3,19	2,55

### Анализ фазового состава



Микроструктура двойной лигатуры Al-5% B

# Схема получения создания борсодержащих Al-сплавов, с использованием жидкофазных методов



Установлено, что при плавке сплавов в обычной печи сопротивления имеет место осаждение бор-содержащих частиц  
Поэтому для плавки сплавов была выбрана индукционная печь, которая обеспечивает интенсивное перемешивание расплава





# Основные методы



OES (ARL 4460)



OM (Axio Observer MAT)



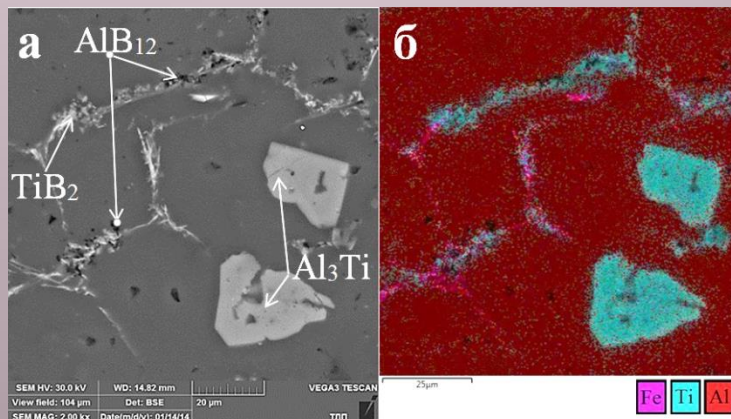
ПЭМ (JEM-2100)



Универсальная  
испытательная  
машина (Zwick Z250)



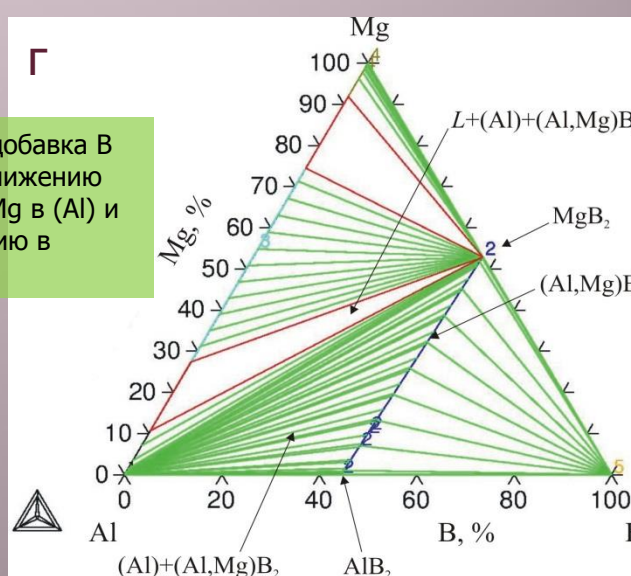
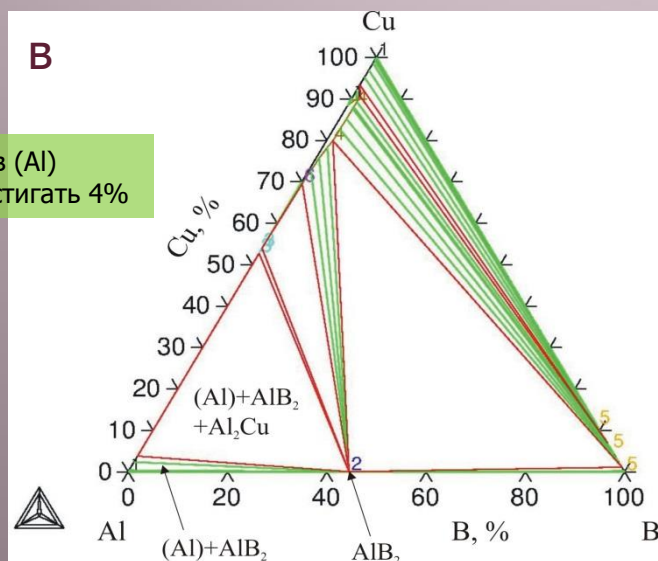
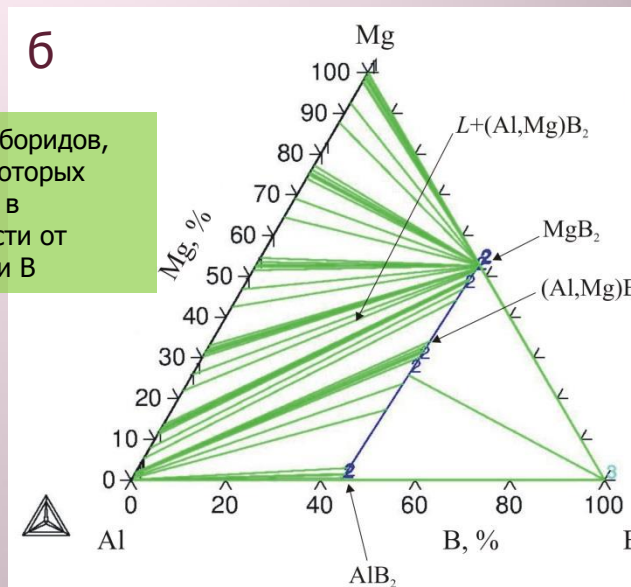
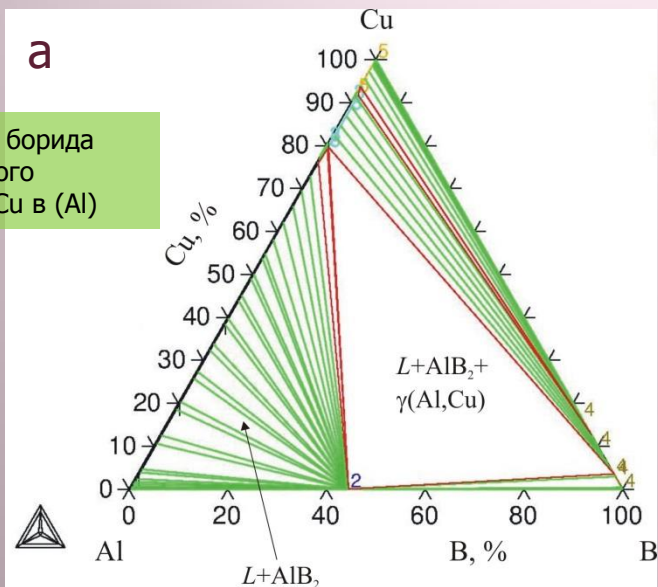
СЭМ (Tescan)



Микроструктура сплава Al-3%Ti-2%B - (а) Карта  
распределения Fe, Ti и Al – (б)

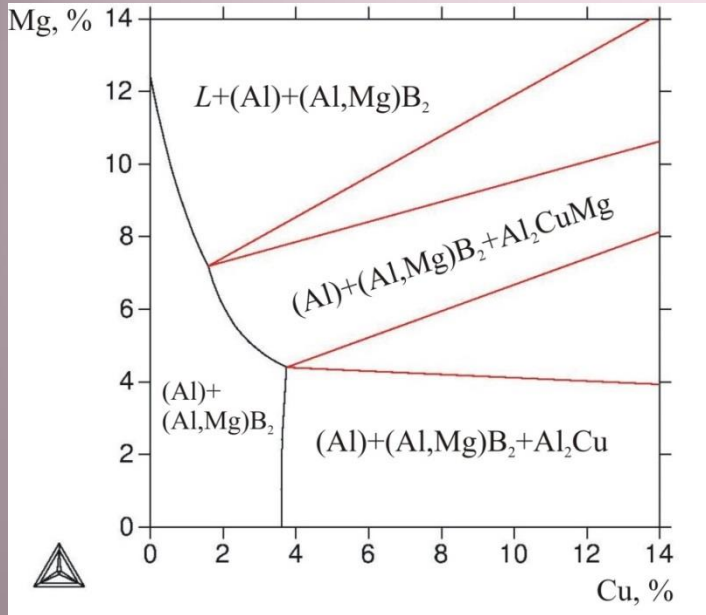
Необходим количественный анализ фазового состава  
многокомпонентных систем!

# Для расчета фазового состава экспериментальных использовали программу Thermo-Calc (база данных TCAL1)



Изотермические сечения тройных систем при 950 °С (а, б) и 500 °С (в, г)  
а, в) Al–B–Cu, б, г) Al–B–Mg

Фазовый состав сплава Al–2%B–4%Cu–1,5%Mg при разных температурах  
(расчет в программе Thermo-Calc)



T, °C	Фаза	Q <sub>M</sub> , масс.%	Концентрация, масс.%			
			B	Cu	Mg	Al
950 (плавка)	L	96,2	94,18	4,16	1,40	94,18
	(Al, Mg)B <sub>2</sub>	3,8	45,98	<0,01	30,41	3,62
500 (гомог.)	(Al)	95,0	<0,01	3,79	0,38	95,83
	(Al,Mg)B <sub>2</sub>	4,3	46,94	<0,01	50,18	2,88
отжиг)	Al <sub>2</sub> Cu	0,7	<0,01	52,75	<0,01	47,25

Изотермическое сечение системы Al–B–Cu–Mg при 2%B и 500 °C

Таким образом, при получении боралюминия на основе сплава системы Al–Cu–Mg концентрацию магния надо увеличить по сравнению с его содержанием в марочном сплаве (например, типа Д16), а концентрацию меди можно не корректировать. Предполагая получить матрицу, содержащую около 4%Cu и 1,5-2%Mg, концентрация последнего была увеличена до 2,5% с учетом его взаимодействия с соединением AlB<sub>2</sub>.

## Работы, проведенные в отчетном периоде

- ❑ проведен анализ научно-технической литературы
- ❑ проведен выбор и обоснование направления исследования, методов и средств изучения структуры и свойств.
- ❑ проведены работы по разработке фазового состава новых алюминиевых сплавов с использованием расчетных методов.
- ❑ проведены работы по разработке методов управления структурой борсодержащих алюминиевых сплавов в виде слитков с использованием жидкофазных технологий и свойствами листового проката.
- ❑ проведены работы по изготовлению модельных образцов различными способами.
- ❑ проведены структурные исследования модельных образцов в виде слитков.
- ❑ разработаны программы и методики исследовательских испытаний экспериментальных образцов в виде слитков и листового проката.
- ❑ Проведены патентные исследования в соответствии с ГОСТ Р 15.011-96.

# Научные результаты-1

С использованием экспериментальных и расчетных методик изучено влияние взаимодействия химических элементов и особенностей фазообразования в системе Al-B-Mg-Si-Cu в процессе плавки в диапазоне температур выдержки расплава от 800 до 1050 °С применительно к получению борсодержащих композитов на основе алюминиевой матрицы типа авиаль (АД33). Показано, что магний взаимодействует с бором уже при температуре плавки. Дополнительное введение магния (до ~1,5 %) в базовый сплав, легированный бором позволило разработать материал с высокими прочностными характеристиками ( $\sigma_B \geq 300 \text{ МПа}$ ), за счет дисперсионного упрочнения вторичными выделениями Mg-содержащих фаз. При этом повышение концентрации бора до 3,5 % не снижет механические свойства сплава.

## Научные результаты-2

С использованием программы Thermo-Calc рассчитан фазовый состав алюминиевых сплавов системы Al–B–Cu–Mg. Показано, что в отличие от меди магний способен полностью замещать алюминий в фазе AlB<sub>2</sub>. В результате этого концентрация магния в алюминиевом твердом растворе может быть существенно снижена.

Обоснована целесообразность использования в качестве матрицы боралюминия, получаемого с использованием жидкофазных технологий, сплавов системы Al–Cu–Mg (типа дуралюминов). При этом концентрация магния в сплаве должна быть выше, чем в марочных сплавах, а концентрация меди не требует значительной коррекции.

# Научные результаты

1. Установлено, что слитки боралюминия, содержащие до 3,5%В и дополнительно легированные магнием, кремнием, медью и марганцем, обладают хорошей технологичностью при прокатке, что позволяет получать из слитков листы со степенью деформации не менее 91%.

# Научные результаты-3

Установлено, что слитки боралюминия, содержащие до 3,5%В и дополнительно легированные магнием, кремнием, медью и марганцем, обладают хорошей технологичностью при прокатке, что позволяет получать из слитков листы со степенью деформации не менее 91%.



# Научные результаты

1. Установлено, что слитки боралюминия, содержащие до 3,5%В и дополнительно легированные магнием, кремнием, медью и марганцем, обладают хорошей технологичностью при прокатке, что позволяет получать из слитков листы со степенью деформации не менее 91%.

## ❑ Опубликованы 2 статьи в журнале «Цветные металлы» (Scopus)

- Н.А. Белов, А.Н. Алабин, А.А. Яковлев «Влияние меди на формирование литой микроструктуры алюминиевых сплавов, содержащих 1 масс.% Mn», Цветные металлы, 2014. № 7, С.66-71.
- Е.И. Курбаткина, Н.А. Белов, А.Н. Алабин, И.А. Сидун «Особенности плавки и литья бор-содержащих алюмоматричных композитов на основе сплавов бxxx серии», Цветные металлы, 2015. №1, С.85-90.

## ❑ Приняты к публикации 5 статей в журналах Scopus/WoS (Индикаторы 2015-2016гг.)

- N.A.Belov, A.N. Alabin, D.G.Eskin, I.A.Matveeva «Effect of zirconium additions and annealing temperature on electrical conductivity and hardness of hot rolled aluminum sheets» Transactions of Nonferrous Metals Society of China» 2015
- А.Н. Алабин, Н.А. Белов, Н.О.Короткова, И.А. Матвеева «Влияние отжига на электросопротивление и упрочнение низколегированных сплавов системы Al-Zr-Si», Металловедение и термическая обработка металлов, 2015
- Самошина М.Е., Белов Н.А., Алабин А.Н., Червякова К.Ю. «Структура и механические свойства листового проката сплава Al-3 масс% В, получаемого жидкофазным методом», Цветные металлы, 2015, №10
- Белов Н.А. , Самошина М.Е., Алабин А.Н «Влияние меди и магния на структуру и фазовый состав слитков боралюминия», Металлы ("Russian Metallurgy", Scopus) , 2016
- Н.А. Белов, Н.О.Короткова, А.М.Достаева, А.Н. Алабин «Влияние деформационно-термической обработки отжига на электропроводность алюминиевых сплавов, легированных цирконием», Цветные металлы, 2015, №10

## □ Состоялась предзащита кандидатской диссертации (Индикатор 2015 г.)

Яковлев А.А. «Исследование и разработка технологии получения слитков алюминиевых сплавов системы Al-Cu-Mn-Zr-Sc с целью получения из них деформированных полуфабрикатов без использования операций гомогенизации и закалки» Научный руководитель- проф. Белов Н.А.) июнь 2015

## □ Планируемые заявки на патент РФ 2014 (0) 2015 (1) 2016 (3)

Алабин А.Н., Белов Н.А., Самошина М.Е. «Способ получения слитков из боралюминия»  
Белов Н.А., Алабин А.Н., Самошина М.Е. «Сплав на основе алюминия, содержащий бор»  
Алабин А.Н., Белов Н.А. Самошина М.Е. «Способ получения листов из боралюминия»