



Успешные примеры выполнения государственных программ при реализации новых разработок в машиностроении и металлургии

Николай Белов

Национальный исследовательский технологический университет “МИСиС”

Семинар

*Организация института легких материалов и технологий и
научно-технологического кластера для развития материалов
на основе алюминия и технологий их обработки*

г. Москва, Алюминиевая Ассоциация, Котельническая наб., д.17

Содержание презентации

- **Высокопрочные Al-сплавы**
- **Термостойкие Al-сплавы, упрочняемые без закалки**
- **Коррозионностойкие Al-сплавы с пониженной плотностью**
- **Боралюминиевые сплавы**
- **Гамма-сплавы на основе алюминидов титана**

Предпосылки успешной реализации проектов

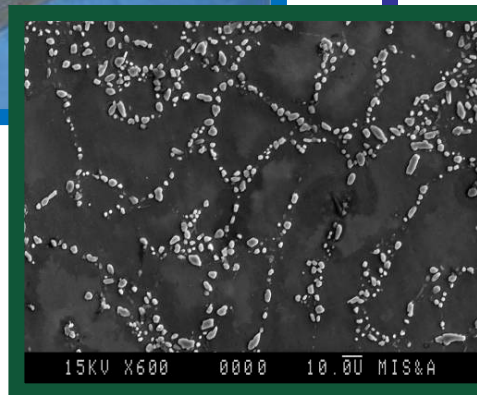
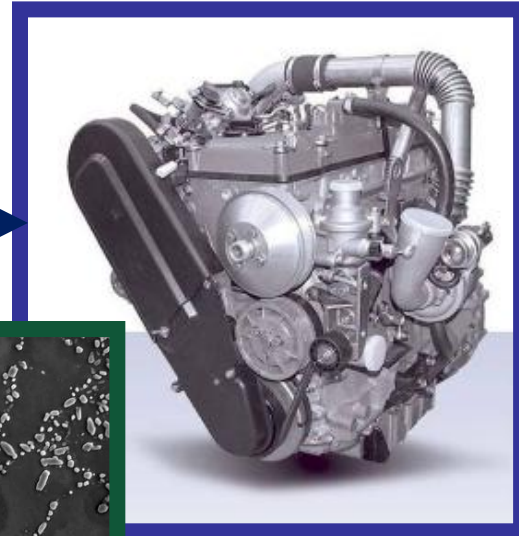
- АКТУАЛЬНОСТЬ
- СОТРУДНИЧЕСТВО С ИНДУСТРИАЛЬНЫМ ПАРТНЕРОМ
- **ЗАДЕЛ (научный и экспериментальный)**
- КАДРЫ (аспиранты, молодые ученые)
- МАТЕРИАЛЬНАЯ БАЗА (технологическое, испытательное и аналитическое оборудование)

Недостатки промышленных алюминиевых сплавов

- Не удовлетворяют по свойствам современным требованиям (разработки 1960-80-х годов)
- Многие содержат дорогостоящие добавки (часто ненужные и даже вредные)
- Технологические режимы получения фасонных отливок и деформированных полуфабрикатов часто слишком сложные (избыточное энергопотребление)

Новый экономнолегированный силумин АК8Ч для замены марочного АК8МЗЧ

Заказчик:
Литейный завод
«РосАЛит»
2006-2008 гг.



Снижение себестоимости на 30%:

- Исключение из состава добавки бериллия,
- Адаптация к серийной термообработке Т6:



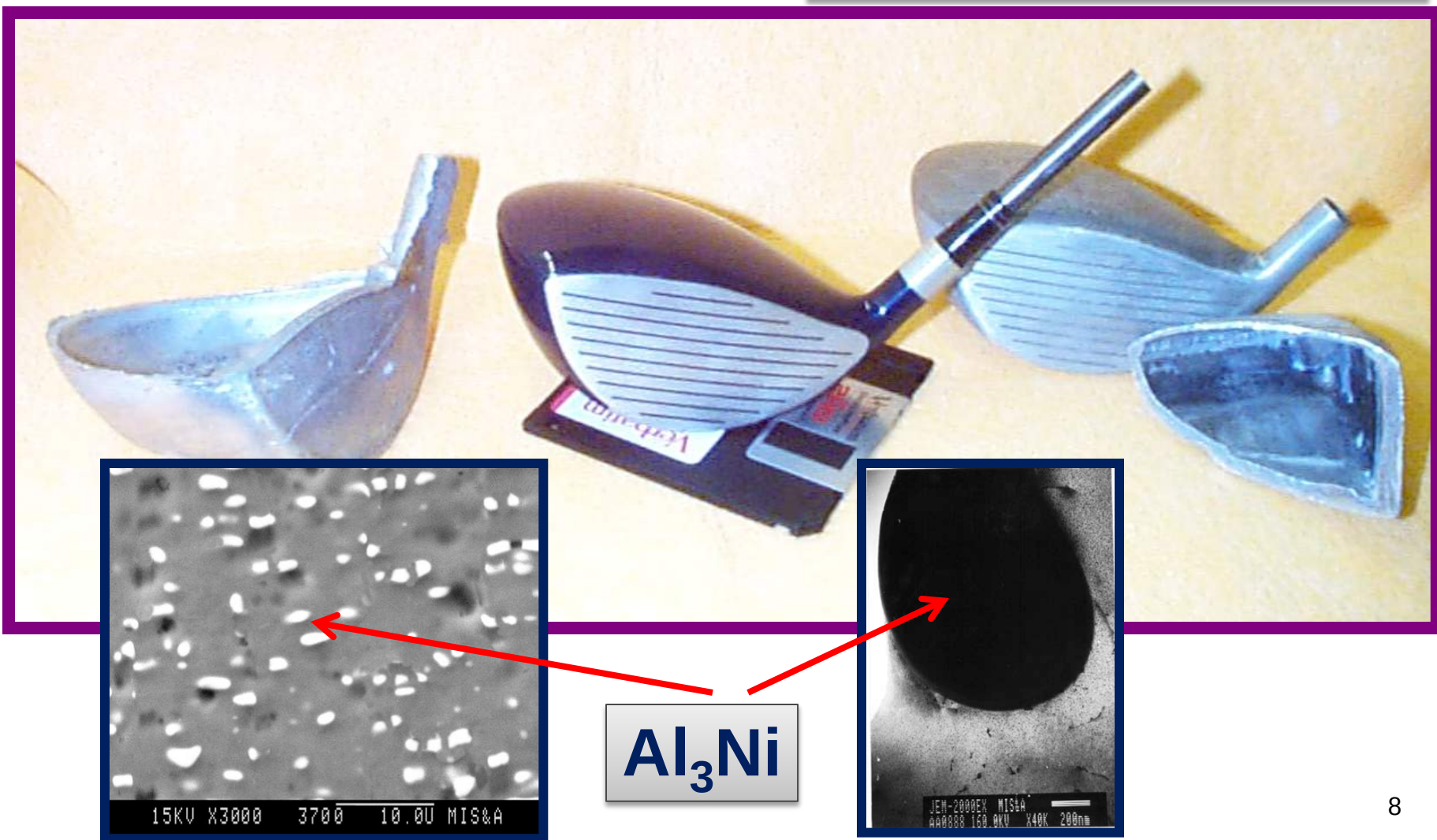
Высокопрочные алюминиевые сплавы

Разработка высокопрочных Al-сплавов с улучшенными литейными свойствами

- В 1970-80-х годах в МИСиС, ВИАМе и др. организациях были разработаны сплавы с улучшенными механическими свойствами по сравнению с силуминами
- АЛ24п (Al-Mg-Zn), ВАЛ10 (Al-Cu), ВАЛ11 (Al-Mg-Zn), ВАЛ12 (Al-Zn-Mg-Cu) и др
- Все они содержали малые добавки (Mn, Ti, Zr, Cr, Cd и др.)
- **НИЗКИЕ ЛИТЕЙНЫЕ СВОЙСТВА!!!**
- Альтернатива: Разработка принципов конструирования литейных сплавов с разными эвтектико-образующими элементами
- никель- **НИКАЛИНЫ**

1-ый никалин АЦ6Н4 (Al-Zn-Mg-Cu)-Ni

Эвтектика (Al)+Al₃Ni



Разработка технологии производства нового поколения экономнолегированных высокопрочных наноструктурированных алюминиевых сплавов, производимых с использованием алюминия, получаемого по технологии электролиза с инертным анодом

**Проект ФЦП 1.3, 14.578.21.0039, 2014-2016
Индустриальный партнер: ОАО «РУСАЛ
Красноярский Алюминиевый Завод»**

Цель проекта - разработка технологии производства нового вида материалов – высокопрочных экономнолегированных (от 0,5 до 1,5 %Fe) алюминиевых сплавов (ЭЛАС) для применения в виде легких конструкционных изделий, изготавливаемых из недорогих полуфабрикатов, получаемых с использованием алюминия, производимого по технологии электролиза с инертным анодом.

Новые сплавы должны сочетать высокий уровень эксплуатационных, технологических и экономических показателей, что принципиально отличает их от существующих марочных сплавов. Одновременно будет обоснована возможность использования алюминия, производимого по технологии электролиза с инертными анодами, для получения определенных групп марочных сплавов при сохранении требуемых характеристик последних.

Требования к высокопрочным ЭЛАС в виде фасонных отливок

Временное сопротивление при $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	не менее 500 МПа
Предел текучести при $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	не менее 450 МПа
Относительное удлинение при $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	не менее 5 %

Требования к высокопрочным ЭЛАС в виде деформированных полуфабрикатов

Временное сопротивление при $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	не менее 600 МПа
Предел текучести при $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	не менее 550 МПа
Относительное удлинение при $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$	не менее 5 %

Экспериментальные исследования

Плавка



Термообработка



Обработка давлением



Стандартная и фасонные отливки

Деформированные полуфабрикаты

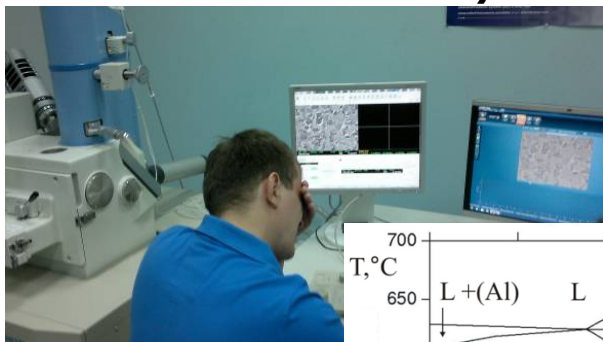


Структурный анализ и испытания

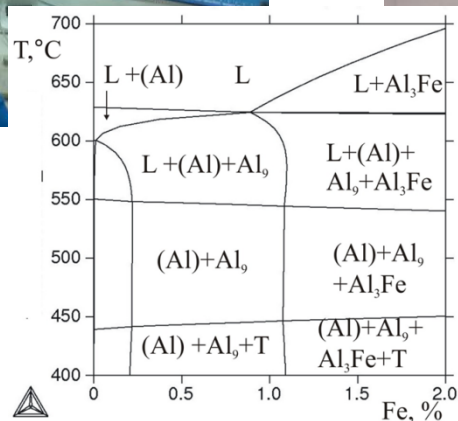
ОМ (Axio Observer MAT)



СЭМ (JSM-6610LV/
INCA SDD X-MAX)



Thermo-Calc



ARL 4460 OES



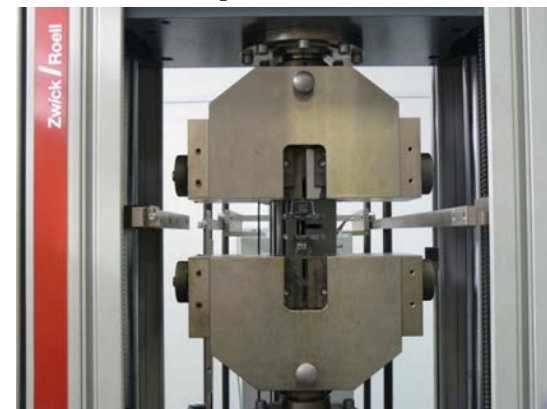
ПЭМ (JEM-2100))



Твердость
(Wilson Wolpert 930N)



Испытания на растяжение
(Zwick Z250)



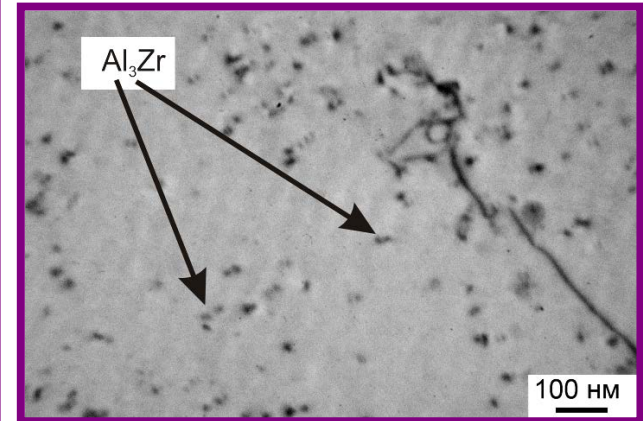
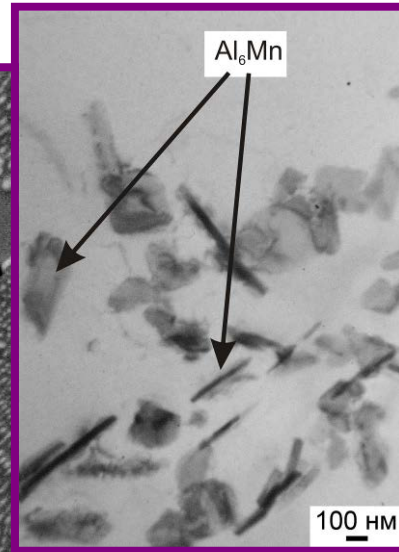
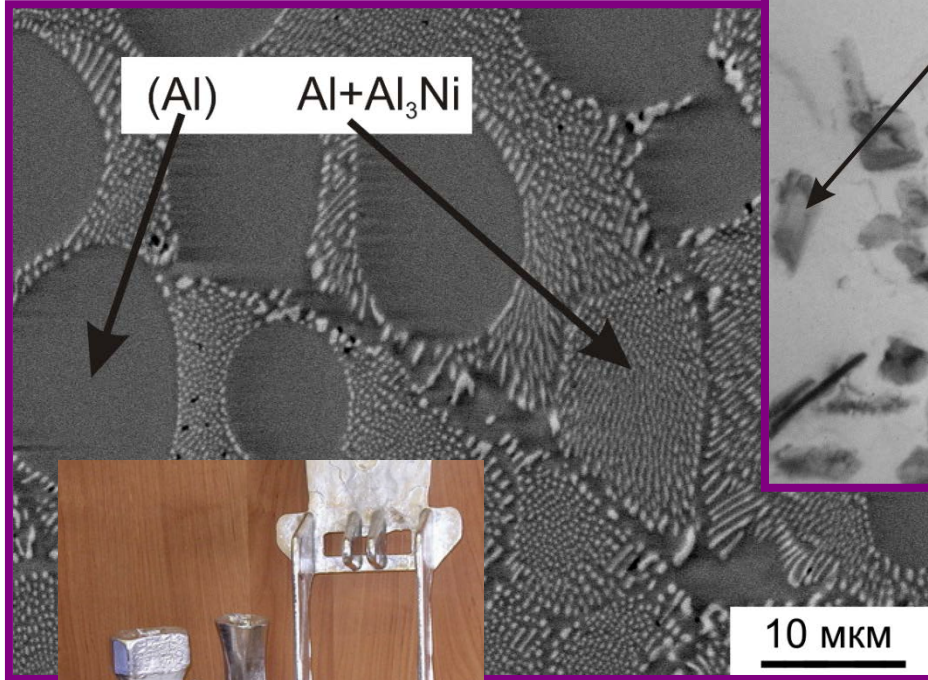
Термостойкие алюминиевые сплавы, упрочняемые без закалки

История разработки жаропрочных Al-сплавов

- Недостатки промышленных Al сплавов (Al-Cu):
 - рабочие температуры $< 250^{\circ}\text{C}$;
 - термообработка включает закалку;
- 1970-1980 гг – попытки создания жаропрочных Al-сплавов с использованием технологии RS/PM (быстрая кристаллизация/порошковая металлургия):
- ПМ1: **Zr**, Mn, Cr, V,....(вторичные выделения)
- ПМ2: Ni, Fe, Ce (PЗМ), ... (дисперсные эвтектики)
- **Результат: слишком высокая стоимость (требуется специальное оборудование...!!!)**
- **Альтернатива: разработка литейных Al-сплавов под существующее оборудование**

Литейный никалин АН4Мц2

Al-Ni-Mn-Zr(Sc)



US 2004/0261916 A1

(19) **United States**
 (12) **Patent Application Publication**
 Lin et al. (10) Pub. No.: US 2004/0261916 A1
 (43) Pub. Date: Dec. 30, 2004

(54) **DISPERSION HARDENABLE AL-NI-MN CASTING ALLOYS FOR AUTOMOTIVE AND AEROSPACE STRUCTURAL COMPONENTS**

(76) Inventors: Jen C. Lin, Exton, PA (US); Vadim S. Zolotarevsky, Moscow (RU); Michael V. Glanoff, Pittsburgh, PA (US); Shawn J. Martha, Monroeville, PA (US); Nicholas A. Belov, Moscow (RU)

Correspondence Address:
 ECKERT SEAMANS CHERIN & MELLOTT,
 L.L.C.
 ALCOA TECHNICAL CENTER
 100 TECHNICAL DRIVE
 ALCOA CENTER, PA 15069-0001 (US)

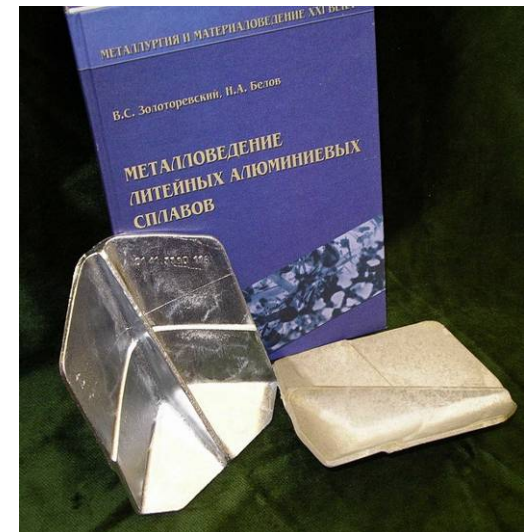
(21) Appl. No.: 10/891,480
 (22) Filed: Jul. 15, 2004

Related U.S. Application Data
 (63) Continuation-in-part of application No. 10/325,561, filed on Dec. 20, 2002, now Pat. No. 6,783,730.
 (60) Provisional application No. 60/345,182, filed on Dec. 21, 2001.

Publication Classification
 (51) Int. Cl.⁷ C22C 21/00
 (52) U.S. Cl. 148/549; 148/415; 420/530

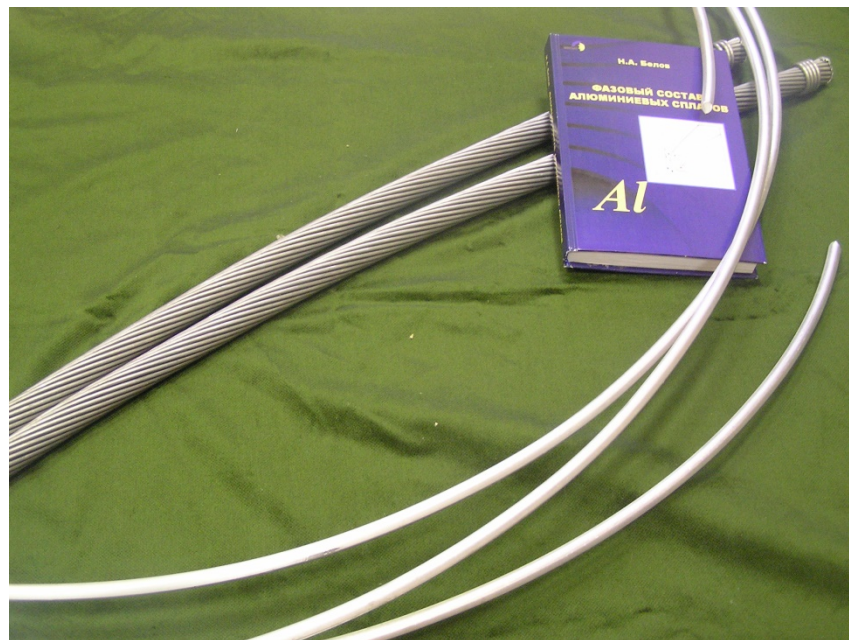
(57) **ABSTRACT**
 An aluminum casting alloy includes at least about 0.5 wt % Ni and 1.3 to 3.5% Mn, together with the zirconium or scandium, and is cast in a mold and then heat treated.

Alcoa

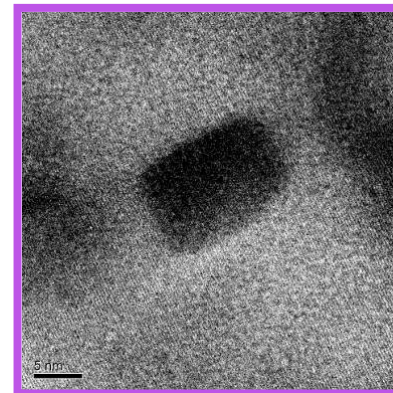
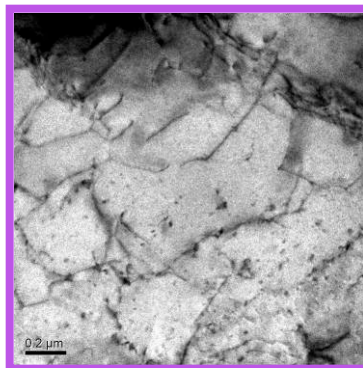


Проводниковый сплав АЦрЕ1

В МИСиС совместно с ОАО Кирскабель разработаны ТУ, по которым изготовлена партия провода из сплава АЦр1Е (2008-2009 гг)



Наночастицы фазы Al_3Zr



**Создание фундаментальных принципов
оптимизации структуры алюминиевых
сплавов нового поколения, упрочняемых
наночастицами Zr-содержащей фазы L12 и
предназначенных для получения фасонных
отливок и деформированных
полуфабрикатов»**

**АВЦП «Развитие научного потенциала
высшей школы», 2009-2011 гг.**

Проводниковые Al-Zr сплавы

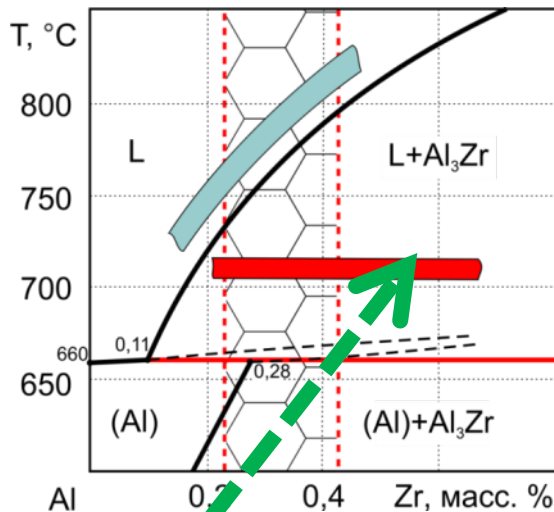
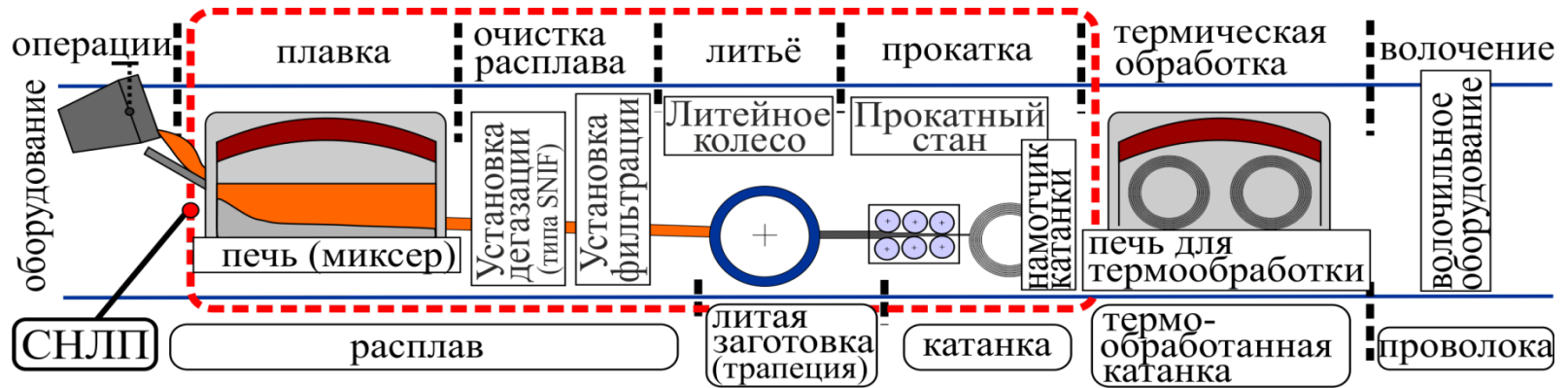
Технический алюминий (марки типа А5Е) широко используется в энергетике для производства проводов высоковольтных ЛЭП. Объем производства катанки из первичного алюминия **способом непрерывного литья и прокатки (СНЛП)** в РФ составляет около 250 тыс. тонн в год, основная часть которой идет на производство неизолированных проводов высоковольтных линий электропередач (ЛЭП).

Применение Al-Zr проволоки позволяет повысить рабочие температуры проводов до 200 – 300 °С без существенного снижения механических и других характеристик алюминиевого провода.

Достижение требуемых характеристик на Al-Zr проволоке (прежде всего удельного электрического сопротивления (УЭС – 28,7 мкОм*мм) и прочностных характеристик – сохранение предела прочности после нагрева – не менее 90%) определяется заданной микроструктурой катанки, формирование которой происходит при обеспечении заданных режимов плавки, литья и термической обработки.



Основные технологические этапы получения катанки и проволоки



Невыполнение хотя бы одного из этих условий не позволит получить заданную структуру катанки !!!

Параметры структуры Al-Zr сплавов

Требования, предъявляемые к структуре катанки:

- ✓ Минимальное содержание Zr в алюминиевом твердом растворе (Al);
- ✓ Наличие вторичных наночастиц фазы Al_3Zr (L_{12}).

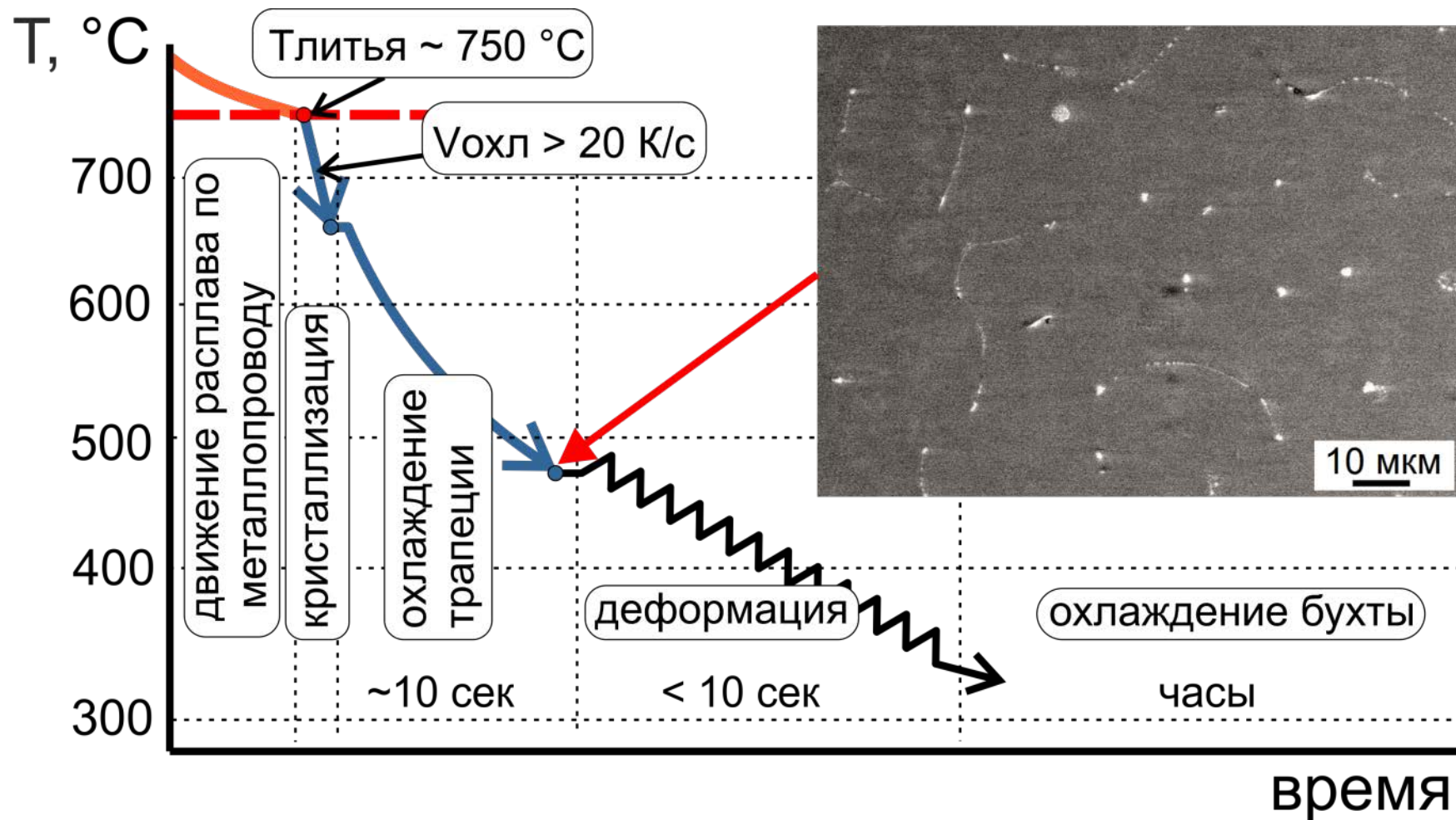
Пути достижения заданной структуры катанки:

- ✓ Температура литья должна быть выше линии начала появления первичных кристаллов Al_3Zr (D_{023});
- ✓ Скорость охлаждения должна быть высокой (достаточной для достижения пересыщенности (Al));
- ✓ Режим термической обработки должен обеспечивать максимальный распад (Al).

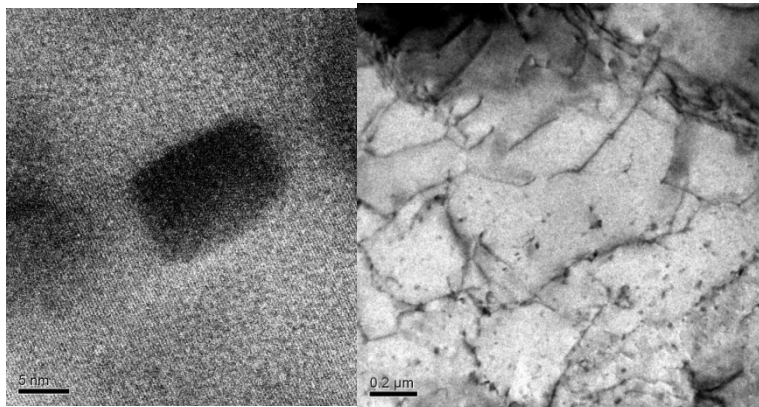
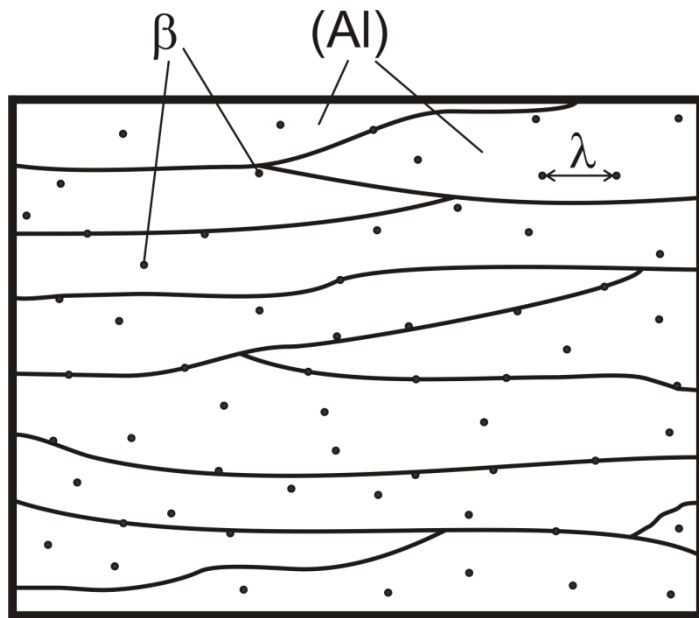
Температура литья при традиционной технологии получения Al-катанки:

- ✓ Литьё заготовки при температуре 720-750 °C – является недопустимым для сплавов Al-Zr, содержащих более 0,2 % Zr!!!

Температурно-технологическая схема получения катанки на примере ИркАЗ



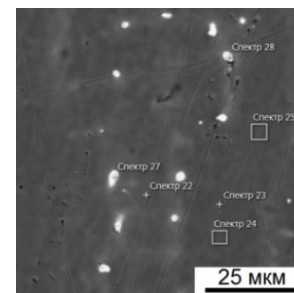
100 мкм проволока из низколегированного алюминиевого сплава с наночастицами Al_3Zr



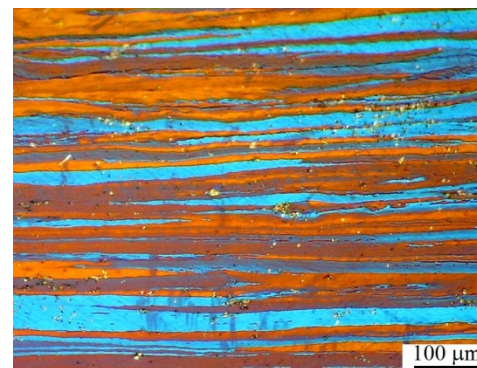
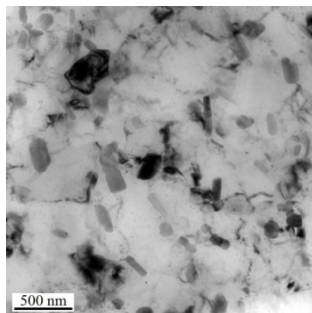
Обоснованы существенные
преимущества сплавов Al-Zr
перед сплавами Al-PЗМ (01417)

Идея конструирования жаропрочного деформируемого сплава на базе системы Al-Cu-Mn-Zr(Sc) (АЛТЭК)

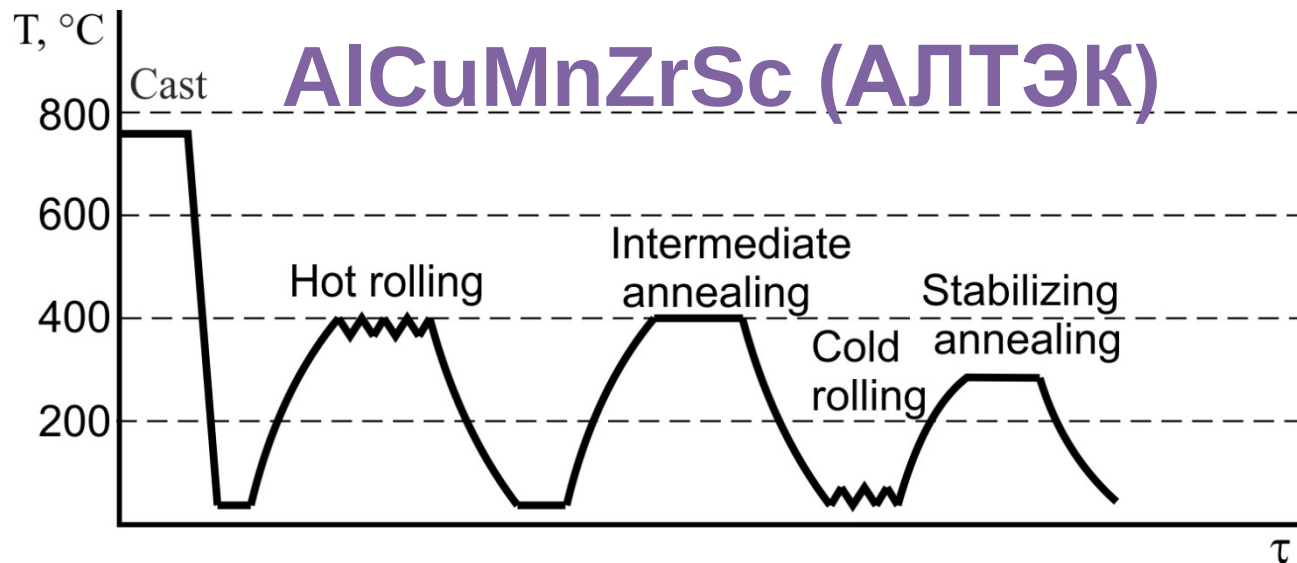
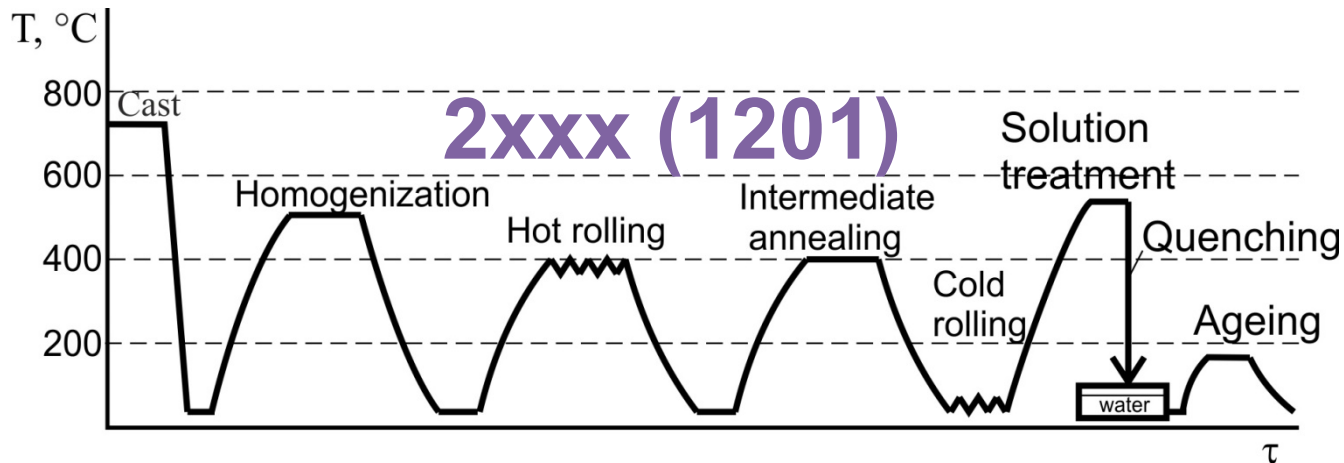
1) получить в литых слитках почти однофазную структуру (т.е. с минимальным количеством эвтектических включений фазы Al_2Cu)



2) получить в деформированных полуфабрикатах структуру с максимальным количеством дисперсоидов (в частности, $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$ и $\text{Al}_3\text{Zr-Li}_2$) вместо выделений фазы Al_2Cu ;

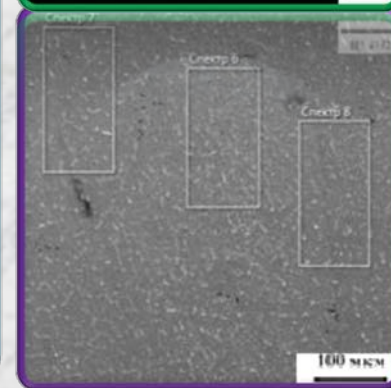
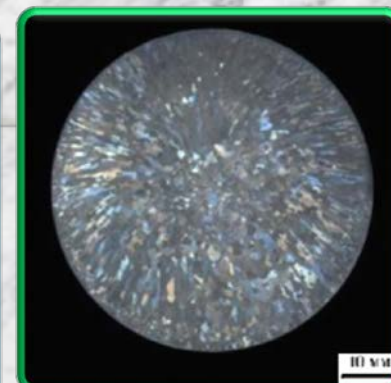


Упрощение технологии



Пат.РФ №2014149566 от 09.12.14 г, Заявки: **EP** 12889505.9 от 03.06.15,
US 14/650,001 от 05.06.15, **JP** 2015-546420 от 08.06.15, **KR** 10-2015-7018096 от 06.07.15

Деформационная технологичность слитков сплава АЛТЭК



Основные преимущества сплава АЛТЭК

- повышение производительности за счет сокращения технологического цикла получения деформированного полуфабриката;
- сокращение числа рабочих (в частности, занятых в процессе термообработки, а также в обслуживании печей);
- уменьшение потребления электроэнергии за счет сокращения времени термообработки и снижения температуры;
- сокращение вредных выбросов за счет сокращения времени работы печей;
- уменьшение брака (в частности, коробления деформируемых полуфабрикатов), возникающего при закалке, за счет устранения в технологическом цикле данной операции;
- возможность повышения рабочих температур работы изделий

Коррозионностойкие алюминиевые сплавы с пониженной плотностью

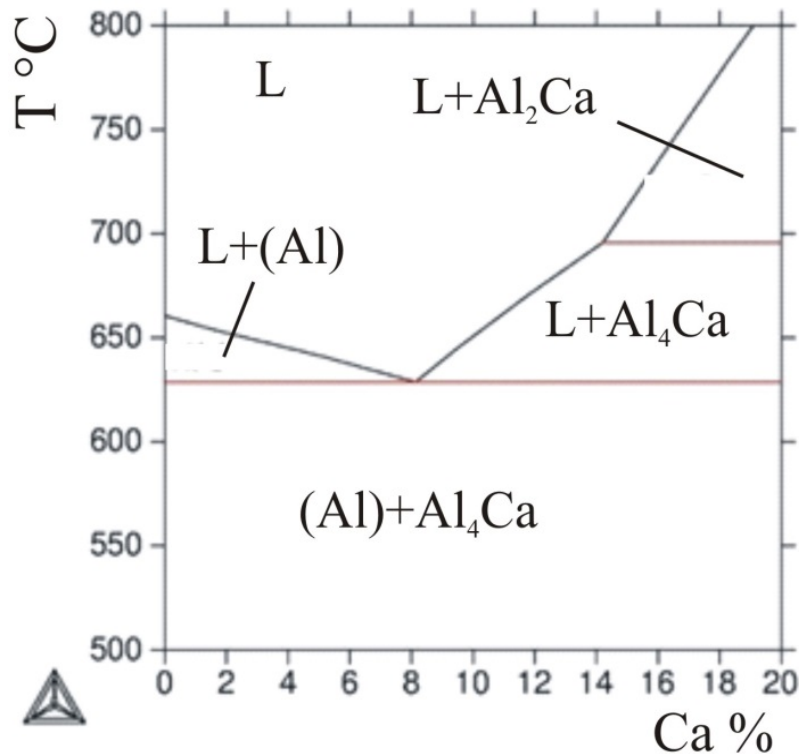
**«Разработка технологии получения
коррозионностойких алюминиево-
кальциевых сплавов, упрочняемых
наночастицами фазы L12 без использования
закалки»**

**Соглашение 14.578.21.0039, 2016-2018
Индустриальный партнер: ОАО «РУСАЛ ИТЦ»**

Цели проекта:

- Разработка технологии получения коррозионностойких **алюминиево-кальциевых** сплавов, упрочняемых **наночастицами фазы L12** без использования закалки, в виде фасонных отливок, предназначенных для изготовления облегченных изделий;
- Разработка технологии получения коррозионностойких **алюминиево-кальциевых** сплавов, упрочняемых **наночастицами фазы L12** без использования закалки, в виде деформированных полуфабрикатов, предназначенных для изготовления облегченных изделий.

Почему кальций?



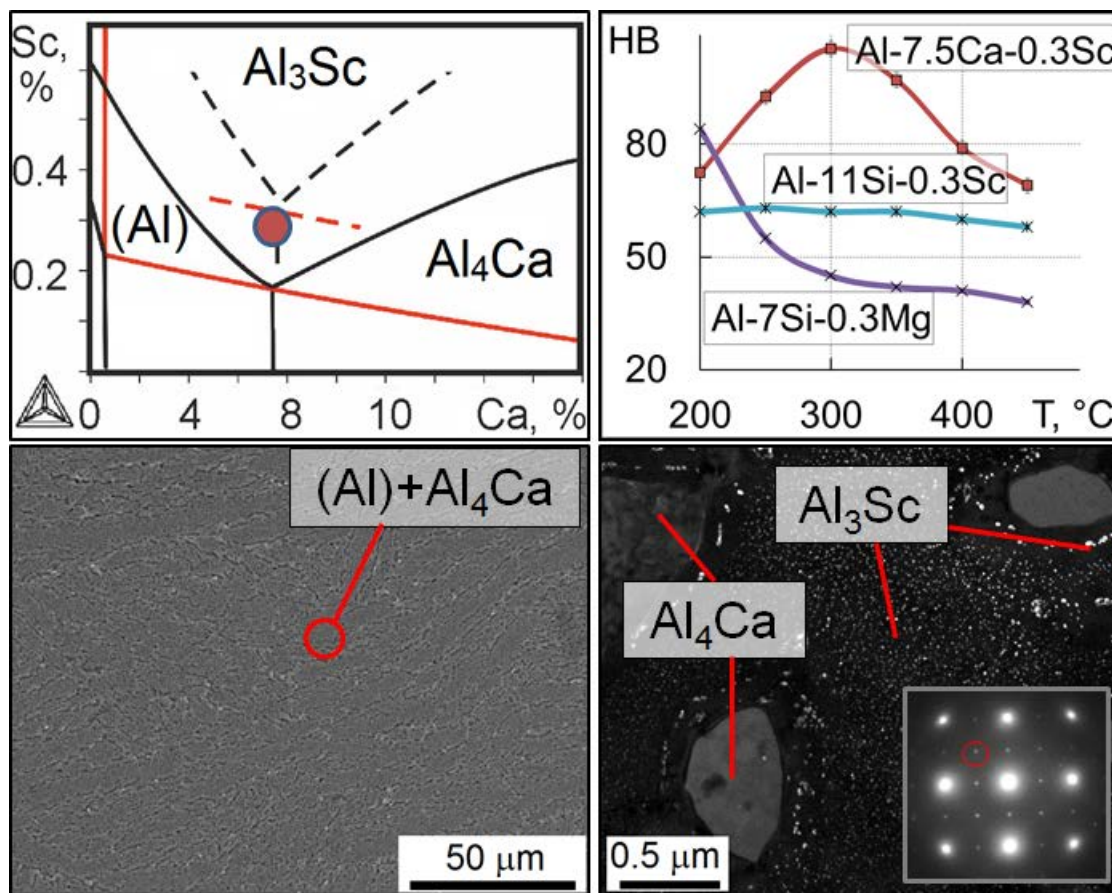
- По содержанию в земной коре (3,6 масс. %) **Ca** занимает 3 место среди всех металлов, уступая только Al и Fe. Его плотность составляет 1,542 г/см³, поэтому он способен облегчить вес изделий из алюминиевых сплавов
- Эвтектика **Al-Ca** обладает большей дисперсностью и долей 2-ой фазы (**30 об.%**) по сравнению с Al-Si эвтектикой, что позволяет реализовать наилучшее сочетание технологичности и эксплуатационных свойств.

**Научный задел проекта ФЦП создан в
рамках выполнения проекта**

**«Создание научных принципов легирования
алюминиевых сплавов нового поколения на
основе кальций-содержащих эвтектик,
упрочняемых наночастицами скандий-
содержащей фазы»,**

грант РФФ 14-19-00632, 2014-2016

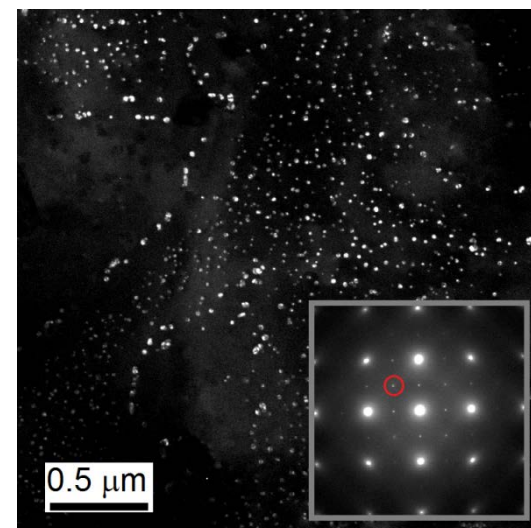
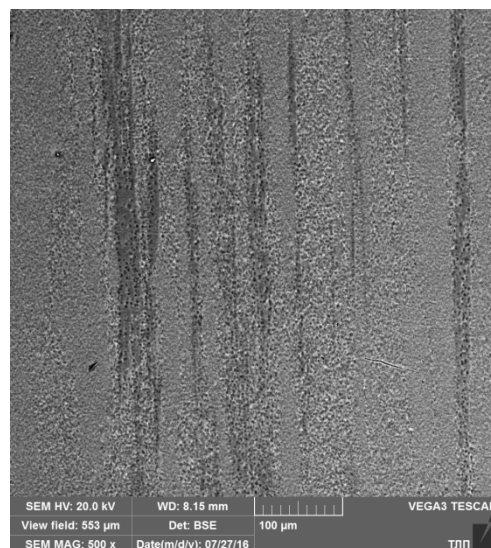
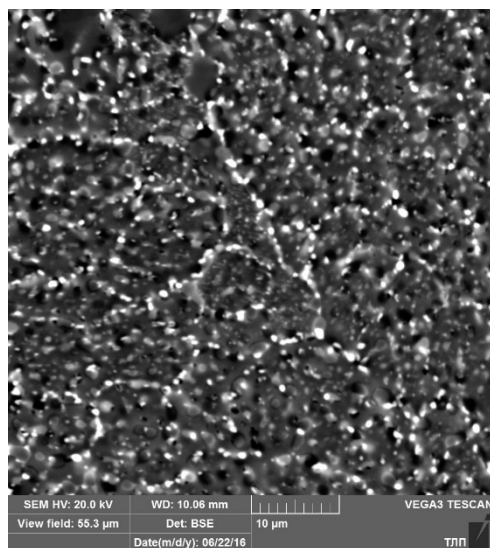
Сплав Al-7.6%Ca-0.3%Sc



N.A.Belov, E.A.Naumova, A.N.Alabin, I.A.Matveeva "Effect of Scandium on Structure and Hardening of Al–Ca Eutectic Alloys", Journal of Alloys and Compounds, 2015, vol.646, P.741-747

Разработка технологии получения деформированных полуфабрикатов из алюмоматричных эвтектических композитов, упрочняемых наночастицами фазы L12 без использования закалки

ГОСЗАДАНИЕ (проектная часть)
№ 11.2072.2017, 2017-2019



Боралюминиевые сплавы

Актуальность

Алюмо-матричные композиционные материалы, легированные бором (боралюминий), 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.

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.

Данная технология ориентирована **на серийное оборудование** (печи для плавки и термической обработки, прокатные станы), что делает ее более конкурентноспособной по сравнению с методами порошковой металлургии

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

**Соглашение 14.578.21.0004, 2014-2016
Индустриальный партнер:
ООО Научно-производственное предприятие
«Металл-Композит» (г.Ульяновск)**

Строение двойной диаграммы Al-B 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.

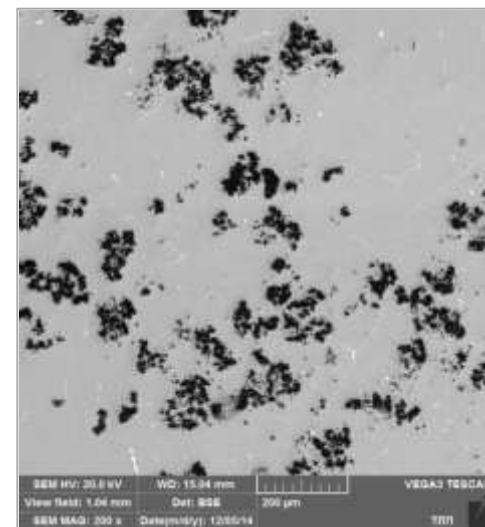
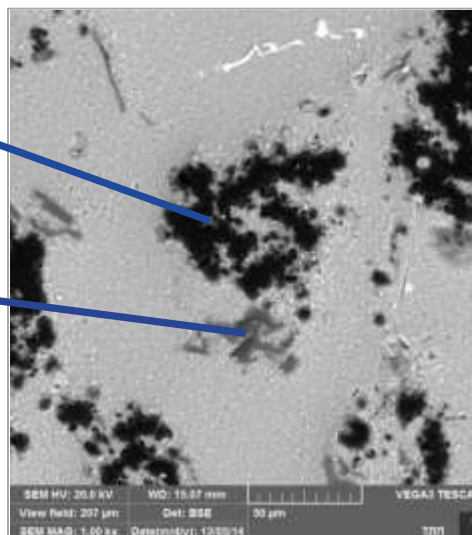
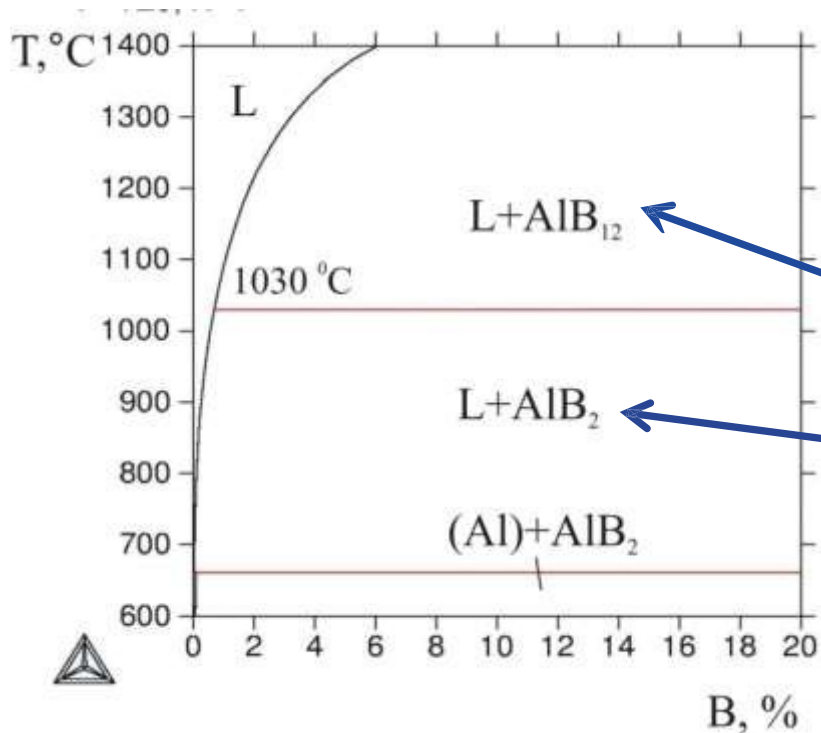


Схема получения создания борсодержащих Al-сплавов, с использованием жидкофазных методов

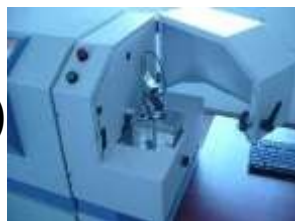


Основные методы

ОМ (Axio Observer MAT)



OES (ARL 4460)



ПЭМ (JEM-2100)



СЭМ (Tescan)



Растяжение (INSTRON 150LX)

Гамма-сплавы на основе алюминидов титана

Актуальность

Сплавы на основе алюминидов титана TiAl (гамма–сплавы) являются одними из наиболее перспективных материалов для получения лопаток газотурбинных двигателей нового поколения (в 2 раза легче никелевых суперсплавов).

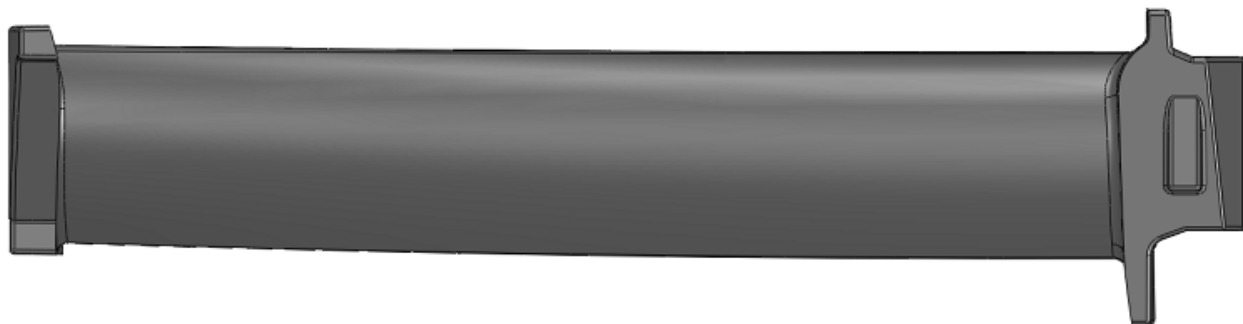
Гамма-сплавы должны обладать не только высокими технологическими свойствами (в частности, литейными), но необходимым комплексом механических свойств: прочностью, пластичностью, трещиностойкостью и, самое главное, жаропрочностью.

Особенностью гамма–сплавов является высокая чувствительность их фазового состава даже к небольшим изменениям концентраций легирующих элементов (Nb, Mo, Cr, W, Ta, Zr...).

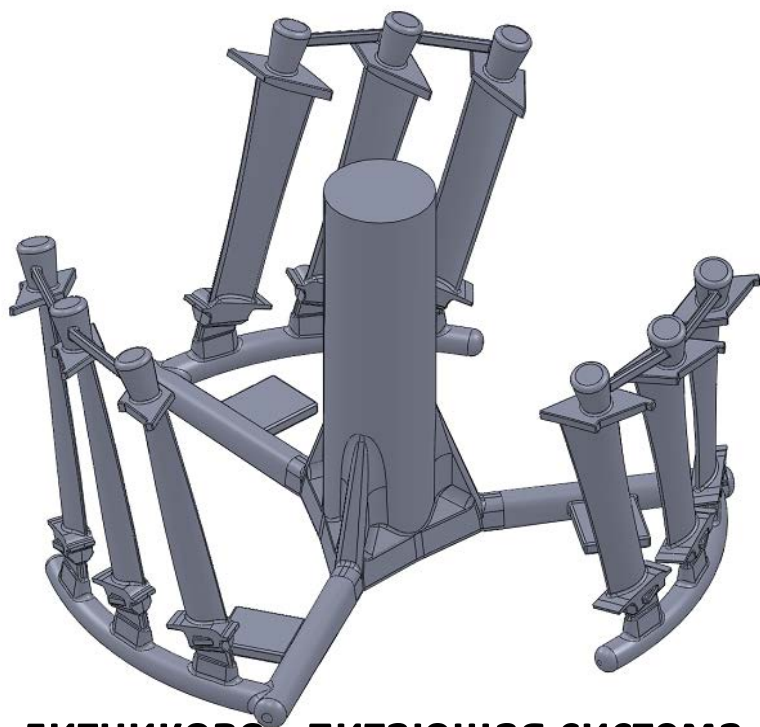
А поскольку фазовый состав определяет структуру сплавов и, в конечном итоге, свойства, то его контроль на количественном уровне необходим для обеспечения заданных эксплуатационных характеристик.

**«Разработка и внедрение новой технологии
изготовления лопаток турбины и компрессора
для перспективных газотурбинных
двигателей»**

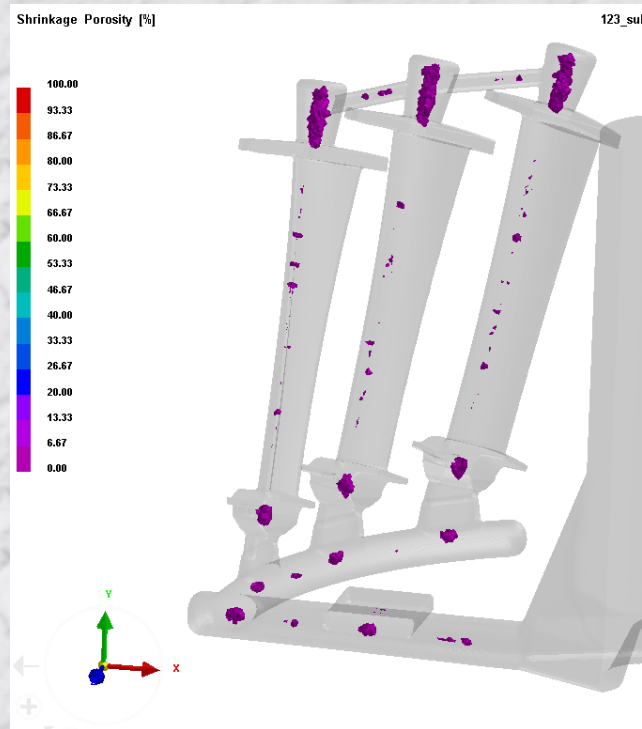
**Проект ФЦП 2.7 №14.527.12.0009, 2011-2013
Инициатор проекта: ОАО УМПО (г.Уфа)**



Технология получения литых лопаток из сплава TNM, разработанная в МИСиС



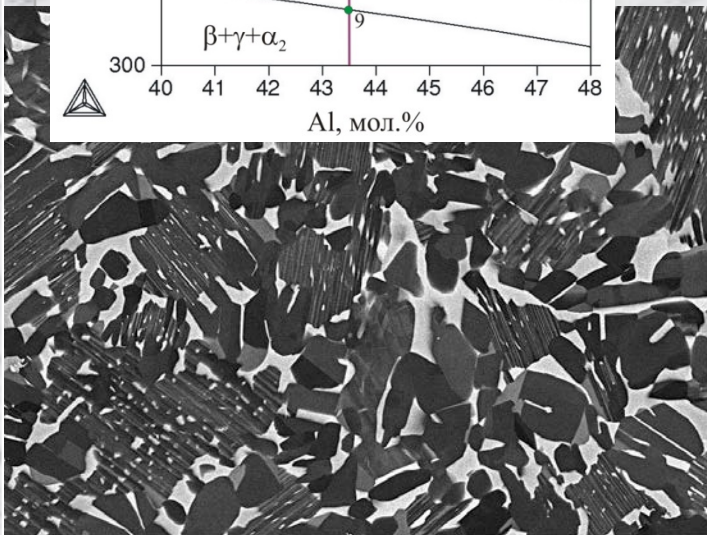
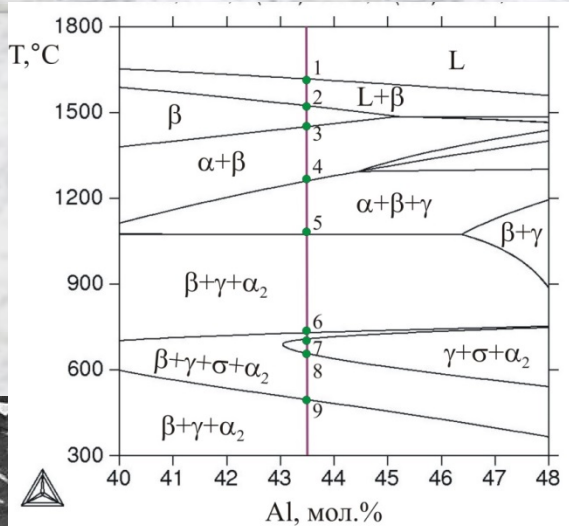
литниково - питающая система



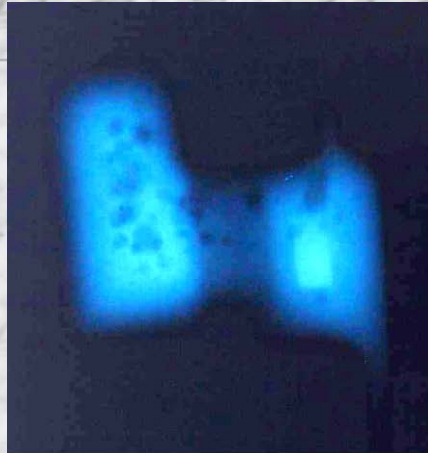
Результаты моделирования
(ProCast)

Трудности плавки и литья

Оптимизация термообработки, включая ГИП-обработку



SEM HV: 20.00 kV WD: 9.744 mm
SEM MAG: 2.00 kx Det: BSE
Date(m/d/y): 07/22/10
MIRA\\ TESCAN
BTU Cottbus



**Гамма-сплавы
перспективны
для 3D
технологий**

Спасибо за внимание!



nikolay-belov@yandex.ru