

В результате длительного естественного старения (1 год) в структуре сплава В-1469-Т с содержанием 1,2% (по массе) Li сформированы зоны ГПБ – на кривых ДСК при нагреве 10 К/мин при температуре 122°C наблюдается эндотермический пик (А – см. рис. 1) растворения зон ГПБ.

Показано, что выделение стабильной  $\eta$ -фазы при старении сплава 1913 характеризуется в 2 раза меньшей энергией активации по сравнению с энергией выделения  $T_1$ -фазы при старении сплава В-1469.

Для сплавов, не прошедших низкотемпературную стадию старения, очевидно, энергия активации выделений метастабильных и стабильных фаз будет выше, о чем свидетельствует смещение пиков тепловых эффектов на кривых ДСК у свежезакаленных образцов исследованных сплавов В-1469 и 1913 в область более высоких температур.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Wei F., Zhao Z.K., Liu P.Y., Zhou T.T. Materials Forum. 2004. V. 28. P. 75.
2. Уэндландт У. Термические методы анализа. М.: Мир. 1978. 200 с.
3. Starink M.J., Gregson P.J. //Scr. Metall. Mater. 1995. V. 33. P. 893–900.
4. Истомин-Костровский В.В., Шамрай В.Ф., Грушко О.Е., Клочкова Ю.Ю., Рязанцева М.А. //Металлы. 2010. №5. С. 73–78.
5. Lukina E.A., Alekseev A.A., Antipov V.V. and etc. Proc. of the 12th Intern. Conf. on Aluminium Alloys, September 5–9, 2010, Yokohama, Japan //The Japan Institute of Light Metals. 2010. P. 1984–1989.
6. Fang W., Jinshan L., Rui H., Hongchao K. //Chinese Journal of Aeronautics. 2008. V. 21. P. 565–570.
7. Бокштейн С.З. Строение и свойства металлических сплавов. М.: Металлургия. 1971. 224 с.
8. Mukhopadhyay A.K., Tite C.N.J., Flower H.M., Gregson P.J., Sale F. //Journal de Physique. 1987. V. 48. 9. P. 439–446.

УДК 669.018.44:669.717

Н.А. Белов

### **ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННЫЕ ЖАРОПРОЧНЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ СПЛАВЫ: ПРИНЦИПЫ ОПТИМИЗАЦИИ ФАЗОВОГО СОСТАВА\***

*Представлены результаты анализа многокомпонентных фазовых диаграмм применительно к жаропрочным алюминиевым сплавам. На базе этого анализа обоснована принципиальная возможность создания экономнолегированных сплавов для получения деталей ответственного назначения, работающих при нагревах до 300–350°C. Предлагаются жаропрочные алюминиевые сплавы нового поколения: литейный системы Al–Fe–Mn–Ni–Zr и деформируемый системы Al–Cu–Mn–Zr. Эти сплавы существенно превосходят промышленные сплавы системы Al–Cu по совокупности служебных, технологических и экономических характеристик.*

**Ключевые слова:** *алюминиевые сплавы, многокомпонентные фазовые диаграммы, жаропрочность.*

Наиболее высокой жаропрочностью среди алюминиевых сплавов обладают сплавы системы Al–Cu: литейные типа АМ5 (ГОСТ 1583–93) и деформируемые типа 1201, Д16, АК4-1 (ГОСТ 4784–97) [1, 2]. Однако их рабочие температуры не превышают

\* По материалам доклада на научно-технической конференции «Создание и исследование конструкционных материалов для новой техники», посвященной 100-летию С.З. Бокштейна (Москва, ВИАМ, 18 января 2011 г.)

250°C, и повысить этот уровень для базовых композиций данных сплавов вряд ли возможно. С другой стороны, известно, что существенно улучшить жаропрочность алюминиевых сплавов можно путем легирования их переходными металлами (ПМ) с повышенной концентрацией [2]. Положительные результаты были достигнуты при использовании различных методов сверхбыстрого затвердевания расплава и последующих операций порошковой металлургии (так называемая RS/PM технология) [3].

С учетом высокой стоимости изделий, получаемых с помощью RS/PM технологий, в МИСиС автором и его коллегами были разработаны принципиально новые литейные и деформируемые жаропрочные алюминиевые сплавы, ориентированные на традиционные литейные технологии и имеющееся оборудование [4–6]. Разработке новых жаропрочных алюминиевых сплавов, предназначенных для получения фасонных отливок, предшествовало создание принципов их легирования на базе анализа многокомпонентных фазовых диаграмм [7–9]. Технологический цикл получения фасонных отливок и деформированных полуфабрикатов из новых сплавов намного короче по сравнению с технологией получения марочных сплавов системы Al–Cu (в частности, отсутствует операция закалки).

В качестве примера рассмотрен сплав AN4Mц2, относящийся к группе никалинов [4]. Базовая композиция, использованная при разработке этого сплава, впервые указана в патентах РФ №2001145 и №2001147 (публ. 15.10.1993, бюл. №37–38), а научная сущность оптимизации состава и структуры сплава AN4Mц2 отражена в работах [7, 8]. Получение тонкостенных фасонных кокильных отливок из никалина AN4Mц2 в производственных условиях ОАО «ВАСО» и ОАО «Ил» подтвердило их высокие литейные свойства на уровне безмедистых силуминов типа АК7ч. (т. е. гораздо выше, чем у сплавов типа АМ5). Сравнение характеристик сплава AN4Mц2 с марочными сплавами показывает, что в отличие от последних, которые при нагреве свыше 250°C сильно разупрочняются, свойства предлагаемого сплава при комнатной температуре после длительного нагрева до 350°C (включительно) полностью сохраняются. Однако никалин AN4Mц2 следует рассматривать скорее в качестве модельной композиции, поскольку в его составе предполагается низкое содержание железа, т. е. для его производства требуется алюминий высокой чистоты.

Для обоснования возможности разработки экономнолегированного жаропрочного никалина был проведен анализ фазового состава системы Al–Ni–Mn–Fe–Si–Zr. Этот анализ показал, что наличие железа и кремния существенно усложняет фазовый состав по сравнению с базовым сплавом AN4Mц2. С другой стороны, установлено, что с уменьшением концентрации никеля с 4 до 2% допустимая концентрация железа, при которой не образуются первичные интерметаллиды и обеспечивается высокая дисперсность эвтектики, увеличивается до ~0,5–0,7% (рис. 1). При этом интервал кристаллизации не превышает 10°C, что позволяет обеспечить высокие литейные свойства. Анализ фазовой диаграммы Al–Ni–Mn–Fe–Si–Zr также показал, что допустимая концентрация кремния должна быть существенно ниже, чем железа. Это связано с тем, что этот элемент значительно расширяет интервал кристаллизации, что увеличивает склонность сплава к образованию горячих трещин при литье (рис. 2).

Оптимизация фазового состава позволила разработать новый жаропрочный литейный никалин AN2ЖМц (заявка на пат. РФ 2010144164 от 29.10.2010), который по совокупности экономичности, технологичности и основных эксплуатационных свойств существенно превосходит наиболее жаропрочные марочные литейные алюминиевые сплавы типа АМ5. Этот сплав имеет доэвтектическую структуру, весьма близкую к распространенным силуминам типа АК7ч. Гетерогенизирующий отжиг приводит к образованию дисперсоидов Al<sub>6</sub>Mn и Al<sub>3</sub>Zr, которые обеспечивают удачное сочетание низко- и высокотемпературных механических свойств. Отливки из никалина AN2ЖМц

можно получать на имеющемся оборудовании, при этом их термообработка достаточно проста, так как включает в себя только отжиг. Особенно предпочтительны тонкостенные отливки сложной формы, поскольку в этом случае, с одной стороны, реализуются высокие литейные свойства сплава АН2ЖМц, а с другой – повышенная скорость охлаждения желательна с точки зрения дисперсности эвтектики и полного вхождения циркония в алюминиевый твердый раствор при кристаллизации.

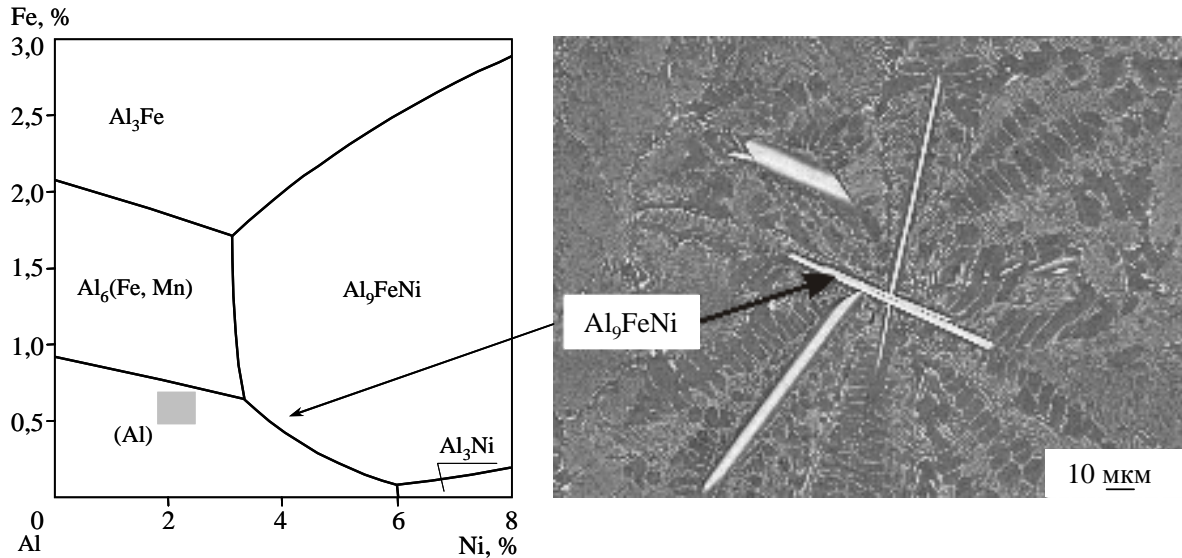


Рис. 1. Проекция ликвидус диаграммы Al–Ni–Mn–Fe при 1% Mn и микроструктура сплава Al–4%Ni–1%Mn–0,5%Fe

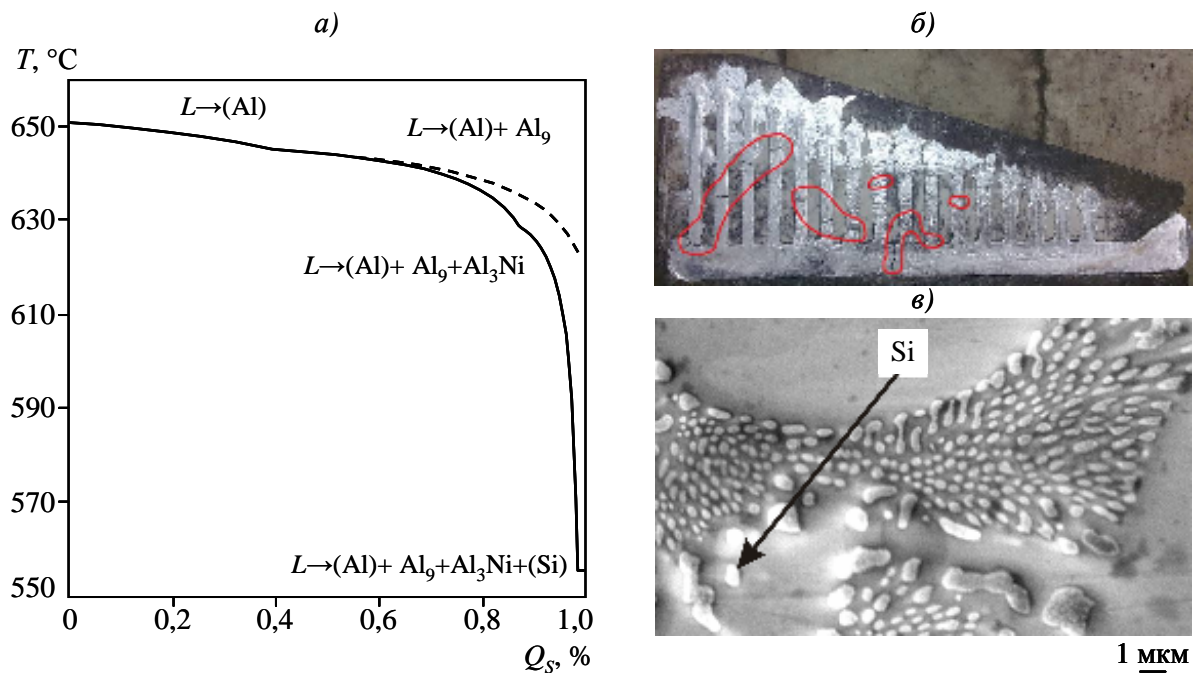


Рис. 2. Влияние примеси кремния на неравновесную кристаллизацию (а), горячеломкость (б) и микроструктуру (в) никалина АН2ЖМц

Деформируемые сплавы должны обладать высокой технологичностью при обработке давлением, при этом желательно исключить операцию гомогенизации слитков. Для того чтобы добиться сочетания высокой технологичности и необходимых требований к эксплуатационным свойствам, автором и его коллегами предложена принципи-

ально новая группа жаропрочных алюминиевых сплавов (далее АЛТЭК), которые предназначены для получения различных деформированных полуфабрикатов (листы, прутки, профили, панели, трубы, штамповки, поковки) [6]. Базовой системой для этих сплавов является система Al–Cu–Mn–Zr при содержании легирующих компонентов не более 5% (по массе) и обычных требованиях по примесям (в том числе по железу). По значению исходных механических свойств предлагаемые сплавы находятся приблизительно на одном уровне с известными жаропрочными сплавами типа 1201 ( $\sigma_B=350\text{--}450$  МПа). Особенностью предлагаемых сплавов является то, что технологический цикл получения деформированных полуфабрикатов существенно короче. В частности, отсутствуют операции гомогенизации (слитков) и закалки (полуфабрикатов).

Анализ фазовой диаграммы Al–Cu–Mn (рис. 3) показал, что оптимальная структура может быть достигнута в области концентраций 1–3% Cu и 1–2% Mn. При таких концентрациях количество эвтектических включений (в том числе  $\text{Al}_2\text{Cu}$ ) в литом состоянии минимально. Это означает, что практически все количество меди и марганца находится в алюминиевом твердом растворе. Такая почти однофазная структура, реализуемая в литых слитках сплава АЛТЭК, обеспечивает высокую пластичность (в том числе при холодной деформации). В процессе отжига холоднокатаных листов образуются дисперсоиды  $\text{Al}_{20}\text{Cu}_2\text{Mn}_3$  (их типичный размер в пределах 100–500 нм), которые существенно затрудняют рекристаллизацию и в значительной мере сохраняют деформационное упрочнение. С другой стороны, анализ фазовой диаграммы Al–Zr (в том числе применительно к неравновесным условиям) показал, что добавка циркония в количестве 0,4–0,6% позволяет повысить прочность вследствие образования дисперсоидов  $\text{Al}_3\text{Zr}$ , которые также формируются при отжиге листов, но обладают существенно меньшими размерами (<10 нм). Таким образом, технология получения полуфабрикатов упрощается до предела: литье слитков, деформация (в том числе без предварительного нагрева), отжиг полуфабрикатов при 300–450°C. При этом отжиг обеспечивает не только оптимальное сочетание механических свойств, но и стабилизирует структуру (т. е. при нагревах ниже температуры отжига структура, а, следовательно, и механические свойства не меняются).

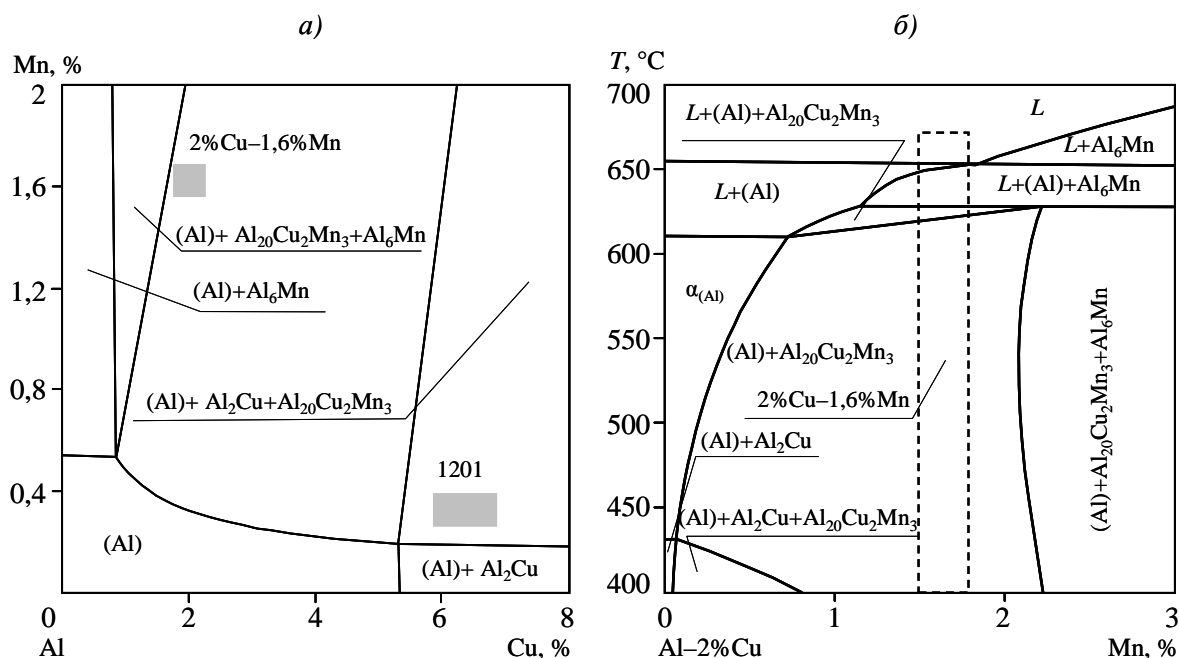


Рис. 3. Изотермическое при 540°C (а) и политермическое при 2% Cu (б) сечения диаграммы Al–Cu–Mn (■ – концентрационные области деформируемых алюминиевых сплавов 1201 и АЛТЭК)

Производство новых сплавов взамен марочных сплавов типа 1201 не требует специального оборудования. Для получения слитков и деформируемых полуфабрикатов можно будет использовать имеющееся оборудование.

Промышленное использование предлагаемых сплавов может принести следующие преимущества:

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

Проект, основанный на данной разработке, победил в 2008 г. в Международном конкурсе инноваций «Применение алюминия в транспорте», организованном ОК «Русал» и Международным институтом алюминия (IAI). В 2009 г. работа по разработке сплава АЛТЭК (пат. РФ 2287600, публ. 20.11.2006, бюл. №32) награждена дипломом лауреата выставки «Металл-Экспо» в 2009 г. В настоящее время прорабатывается проект по использованию этого сплава в нефтяной промышленности для изготовления ступеней погружного насоса, которые изготавливают в основном из специального никельсодержащего чугуна – нирезиста.

Таким образом, на базе анализа многокомпонентных фазовых диаграмм (применительно к жаропрочным алюминиевым сплавам) обоснована принципиальная возможность создания экономнолегированных сплавов для получения деталей ответственного назначения, работающих при нагревах до 300–350°C. Предложены жаропрочные алюминиевые сплавы нового поколения: литейный никалин АН2ЖМц системы Al–Ni–Mn–Fe–Zr и деформируемый сплав АЛТЭК системы Al–Cu–Mn–Zr. Эти сплавы существенно превосходят промышленные сплавы системы Al–Cu (типа АМ5 и 1201) по совокупности служебных, технологических и экономических характеристик.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Промышленные алюминиевые сплавы: Справ. изд. /С.Г. Алиева, М.Б. Альтман и др.– М.: Металлургия. 1984. 528 с.
2. Колобнев И.Ф. Жаропрочность литейных алюминиевых сплавов.– М. Металлургия. 1973. 320 с.
3. Добаткин В.И., Елагин В.И., Федоров В.М. Быстрозакристаллизованные алюминиевые сплавы.– М.: ВИЛС. 1995. 341 с.
4. Белов Н.А., Золоторевский В.С. Литейные сплавы на основе алюминия-никелевой эвтектики (никалины) как возможная альтернатива силуминам //Цветные металлы. 2003. №2. С. 99–105.
5. Белов Н.А., Алабин А.Н. Перспективные алюминиевые сплавы с добавками циркония и скандия //Цветные металлы. 2007. №2. С. 99–106.

6. Белов Н.А., Алабин А.Н. Перспективные алюминиевые сплавы с повышенной жаропрочностью для арматуростроения как возможная альтернатива сталям и чугунам // Арматуростроение. 2010. №2. С. 50–54.
7. Belov N.A. Principles of Optimising the Structure of Creep Resisting Casting Aluminium Alloys Using Transition Metals // Journal of Advanced Materials. 1994. 1 (4). P. 321–329.
8. Белов Н.А. Использование многокомпонентных диаграмм состояния для оптимизации структуры и состава высокопрочных литейных алюминиевых сплавов // Изв. вузов. Цветная металлургия. 1995. №1. С. 48–57.
9. Belov N.A., Alabin A.N., Eskin D.G., Istomin-Kastrovskiy V.V. Optimization of Hardening of Al–Zr–Sc Casting Alloys // Journal of Material Science. 2006. V. 41. P. 5890–5899.

УДК 669.018.44:669.24

*И.А. Тренингов, А.А. Алексеев, Д.В. Зайцев, Е.В. Филонова*

## **ИССЛЕДОВАНИЯ ФАЗОВЫХ И СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ, А ТАКЖЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ В СПЛАВЕ ВЖМ4\***

*Проведен системный анализ строения узлов обратного пространства кристаллической решетки. Определены кристаллографические плоскости (244) и (133), имеющие минимальные искажения, обусловленные остаточными напряжениями. Показано, что для определения периодов решеток  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -фаз целесообразно использовать эти плоскости. Исследован характер изменения структуры в процессе высокотемпературной ползучести сплава ВЖМ4. Показано, что начиная с выдержки 200 ч в  $\gamma$ -фазе формируется объемная дислокационная структура. При выдержках 400 и 500 ч она заполняет все пространство  $\gamma$ -фазы. В образцах после испытаний на высокотемпературную ползучесть выявлена дислокационная структура в  $\gamma'$ -фазе. При высокотемпературной ползучести выявлен процесс дополнительного распада, в результате которого выделяются наноразмерные ТПУ фазы. Определены остаточные напряжения в  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -фазах.*

**Ключевые слова:** жаропрочный никелевый сплав,  $\gamma$ - и  $\gamma'$ -фазы, ползучесть, монокристалл, рентгеновская дифракция, рафт, ПЭМ, РЭМ, напряжение.

Современные никелевые суперсплавы представляют собой твердые растворы на основе никеля с ГЦК неупорядоченной структурой:  $\gamma$ -фаза (матрица), упрочненная выделениями  $\gamma'$ -фазы, являющейся легированным твердым раствором на основе интерметаллида  $\text{Ni}_3\text{Al}$  с упорядоченной ГЦК кристаллической структурой ( $L1_2$ ) [1]. В настоящее время наиболее перспективными являются литые монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы, легированные рением и рутением (в частности ВЖМ4) так как они позволяют повысить уровень рабочих температур и ресурс деталей [2].

### **Системный анализ**

После полной термической обработки структура сплава ВЖМ4 представляет собой кубоидные частицы  $\gamma'$ -фазы, обрамленные прослойками  $\gamma$ -фазы. Для лучшего понимания дифракционной картины рентгеновских лучей проведен системный анализ

---

\* По материалам доклада на научно-технической конференции «Создание и исследование конструкционных материалов для новой техники», посвященной 100-летию С.З. Бокштейна (Москва, ВИАМ, 18 января 2011 г.)