



УДК 669.85

**РЕДКИЕ МЕТАЛЛЫ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ -  
МАТЕРИАЛЫ СОВРЕМЕННЫХ И ВЫСОКИХ  
ТЕХНОЛОГИЙ БУДУЩЕГО**

Е.Н. Каблов

*доктор технических наук, академик РАН*

О.Г. Оспенникова

*кандидат технических наук*

А.В. Вершков

*кандидат технических наук*

**Февраль 2013**

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Статья подготовлена для опубликования в журнале «Труды ВИАМ»,  
№2, 2013 г.

*Е.Н. Каблов, О.Г. Оспенникова, А.В. Вершков*

## **РЕДКИЕ МЕТАЛЛЫ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ – МАТЕРИАЛЫ СОВРЕМЕННЫХ И ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ БУДУЩЕГО**

*Рассматриваются различные аспекты применения редких металлов и редкоземельных элементов (РЗЭ) при разработке новых авиационных материалов. Приведены результаты исследований по влиянию РЗЭ на конструкционные свойства разных классов авиационных материалов: алюминиевых сплавов, литейных и деформируемых жаропрочных сплавов, жаростойких и теплозащитных покрытий, магнитотвердых материалов, высокопрочных конструкционных сталей. Сделан вывод о необходимости восстановления и опережающего развития редкоземельной промышленности России и сформулированы основные элементы государственной поддержки этой задачи.*

**Ключевые слова:** *редкоземельные элементы, редкие металлы, алюминиевые сплавы, литейные жаропрочные сплавы, деформируемые жаропрочные сплавы, жаростойкие и теплозащитные покрытия, магнитотвердые материалы.*

*E.N. Kablov, O.G. Ospennikova, A.V. Vershkov*

## **RARE METALS AND RARE-EARTH ELEMENTS – MATERIALS FOR MODERN AND FUTURE HIGH TECHNOLOGIES**

*The article is devoted to various aspects of the application of rare metals and rare-earth elements (REE) in the development of new aviation materials. The results of studies on the impact of the structural properties of various classes of aviation materials: aluminum alloys, casting and wrought superalloys, heat-resistant and heat-protective coatings, magnetically hard materials, high-strength structural steels. The conclusion is made about the need to restore and advanced development of rare-earth industry of Russia and formulated the basic elements of the state support of this task.*

**Key words:** *rare-earth elements, rare metals, aluminum's alloys, high-temperature casting alloys, wrought superalloys, heat-resistant coatings, thermoprotective coatings, magnetically hard materials.*

В настоящее время в соответствии с требованиями научно-технического прогресса сохраняется устойчивый рост потребления и производства редкоземельных элементов (РЗЭ). Объемы производства и потребления РЗЭ в промышленно развитых странах мира уже на протяжении нескольких десятилетий являются показателями экономического развития и национальной безопасности. Поэтому возрождение российской промышленности в области производства РЗЭ – одна из важнейших задач современной российской экономики.

Редкоземельные элементы находят все более широкое применение в авиационных материалах. В качестве примера рассмотрим *легкие сплавы на основе алюминия*.

*Редкоземельные элементы* вносят определенный вклад в изменение структуры и свойств алюминиевых сплавов. Поскольку растворимость РЗЭ в алюминии предельно мала, то в сплавы редко добавляют >0,5% (по массе), но уже и эти малые добавки могут существенно повысить свойства алюминиевых сплавов. Наиболее исследованной легирующей добавкой для алюминиевых сплавов является скандий [1, 2]. При введении скандия измельчается литая структура – он лишь немногим уступает по своему модифицирующему действию титану, который традиционно используют в качестве модификатора при литье. Скандий образует с алюминием фазу  $Al_3Sc$  размером 10÷30 нм, которая вносит вклад в упрочнение. Это упрочнение может достигать 30-50% от уровня предела текучести основного материала, что особенно характерно для термически неупрочняемых сплавов системы Al-Mg (рис. 1). Все алюминийлитиевые сплавы последнего поколения содержат в своем составе скандий, что обеспечивает повышение их свойств, при этом скандий не ухудшает коррозионные свойства и свариваемость материалов. Скандий и другие РЗЭ эффективно блокируют процессы рекристаллизации в алюминиевых сплавах. Введение небольшого количества РЗЭ позволяет уменьшить средний размер зерна, а в сплавах некоторых систем полностью сохранить нерекристаллизованную структуру. С этой точки зрения наиболее эффективно вводить скандий совместно с цирконием.

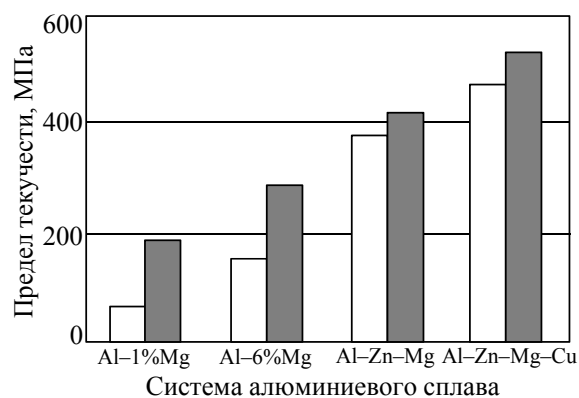


Рис. 1. Влияние скандия (□) на предел текучести алюминиевых сплавов (■ – сплав без скандия)

Церий используется в алюминиевой промышленности в качестве рафинирующей добавки. Многие промышленные сплавы при плавке слитков рафинируются церием или миш-металлом, содержащим церий и другие РЗЭ, что положительно влияет на конечное качество слитка.

Одним из перспективных РЗЭ для введения в алюминий является иттрий [3]. Его влияние на алюминий изучено не до конца, но на данном этапе ясно, что путем образования дисперсоидов с алюминием он также является барьером для рекристаллизации (рис. 2). В жаропрочных сплавах систем Al-Cu и Al-Cu-Mg иттрий обеспечивает повышение длительных характеристик на 10-15%.

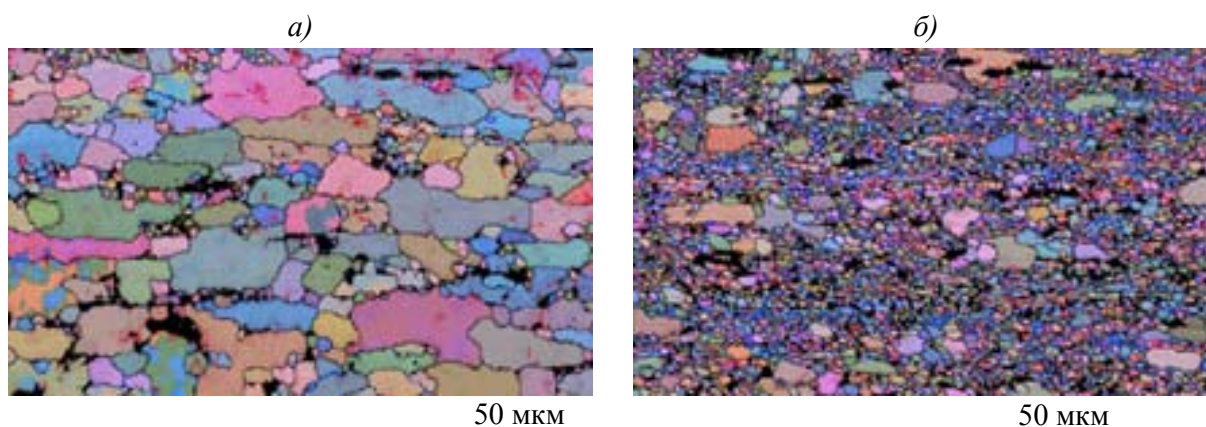


Рис. 2. Изменение кристаллической структуры (а □ без иттрия) при введении иттрия (б)

Следующий пример – использование РЗЭ в жаропрочных сплавах.

Известно, что, наряду с рафинированием металла в процессе выплавки и получением отливок для авиационных ГТД, имеется другой, не менее эффективный, технологический метод повышения свойств литейных жаропрочных сплавов – микролегирование РЗЭ (церием, иттрием, лантаном, скандием) [4, 5].

На основании проведенных исследований и полученных экспериментальных данных в ВИАМ создана современная технология микролегирования литейных жаропрочных никелевых сплавов РЗЭ при получении отливок с равноосной, направленной и монокристаллической структурами. Данная технология предусматривает выбор наиболее эффективных микродобавок РЗЭ и их оптимальных количеств, а также способа их введения в металл.

Необходимо отметить двойную роль легирующих добавок РЗЭ в литейных жаропрочных сплавах. С одной стороны, РЗЭ являются эффективными рафинирующими добавками, поскольку, вследствие своей высокой химической активности, они нейтрализуют вредное влияние примесей кислорода и серы, образуя с ними тугоплавкие химические соединения. С другой стороны, они как поверхностно-активные элементы располагаются на поверхностях раздела фаз (границы зерен, границы блоков, межфазные границы ( $\gamma/\gamma'$ )-фаз и др.), упрочняют эти поверхности и задерживают развитие на них диффузионных процессов. Поэтому РЗЭ оказывают положительное влияние на структурную стабильность сплавов, уменьшают их ликвационную неоднородность, предотвращают образование вредных структурных составляющих (ТПУ фазы,  $\mu$ -фазы и др.).

Введение РЗЭ в литейные жаропрочные сплавы, отливаемые как методом равноосной кристаллизации, так и методом монокристаллического литья, позволяет дополнительно повысить основные характеристики сплавов:

– долговечность при температурах 1000 -1100°С – в 1,5-2 раза, а для сплавов на основе интерметаллидов – в 2-3 раза. Особенно эффективно влияние РЗЭ на долговечность на больших базах испытаний (1000-1500 ч). На рис. 3 и 4 приведено влияние РЗЭ на жаропрочные свойства рений-рутенийсодержащего сплава ВЖМ4-ВИ и интерметаллидного ренийсодержащего сплава ВКНА25-ВИ [6];

– жаростойкость при рабочих температурах – в 1,5-2 раза (по изменению удельной массы). На рис. 5 и 6 приведено влияние РЗЭ на жаростойкость этих же сплавов. На рис. 7 показаны образцы из сплава ВЖМ4-ВИ без легирования и легированного после проведения испытаний на окисление на воздухе при 1100°С в течение 330 ч. Кроме того, введение РЗЭ позволяет также улучшить структуру отливок: получить в них карбиды металлов благоприятной глобулярной формы (вместо пластинчатых), измельчить дендритную структуру и уменьшить ликвацию легирующих элементов, замедлить процесс коагуляции упрочняющей  $\gamma'$ -фазы и растворение карбидов металлов под воздейст-

вием температур и напряжений, что повышает как механические характеристики, так и жаростойкость.

Разностороннее положительное влияние микродобавок РЗЭ позволяет совершенствовать существующие сплавы и создать новые сплавы для получения рабочих лопаток современных авиационных ГТД с уникальным сочетанием различных свойств. Использование РЗЭ для легирования деформируемых жаропрочных сплавов также дает существенное повышение характеристик [7, 8].

Для деформируемых жаропрочных никелевых промышленных сплавов применяют комплексное микролегирование РЗЭ (лантаном, церием, неодимом) и скандием. В экспериментальных сплавах (ВЖ175У) дополнительно использовался празеодим.

При выплавке микродобавки измельчают зерно и модифицируют выделения карбидов; удаляют вредные примеси (серу, фосфор и др.) из расплава, с границ зерен и фаз, связывая их в мелкодисперсные соединения. При этом повышается технологичность сплава при последующей обработке давлением.

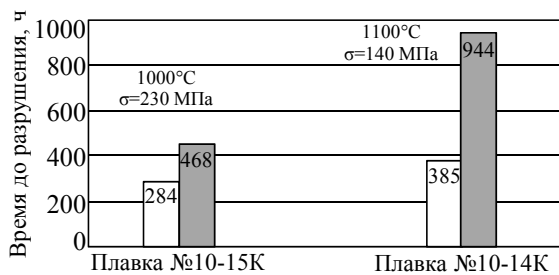


Рис. 3. Влияние РЗЭ на жаропрочность сплава ВЖМ4-ВИ двух плавков с содержанием лантана 0,1% (расчетн.) (□) и без лантана (■)

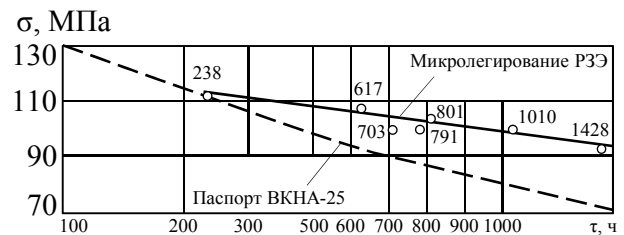


Рис. 4. Влияние РЗЭ на жаропрочные свойства сплава ВКНА-25-ВИ (МОНО <111>) при температуре 1100°C

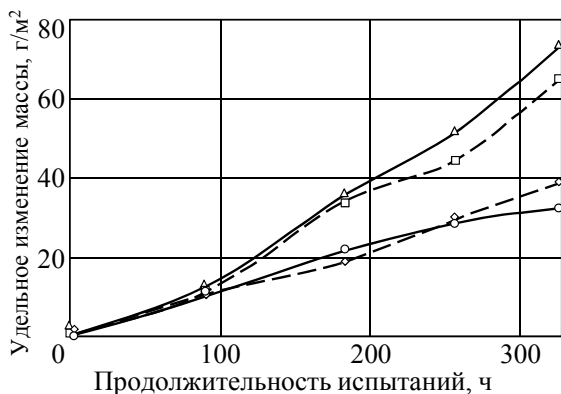


Рис. 5. Влияние РЗЭ на жаростойкость сплава ВЖМ4-ВИ (МОНО <001>) при температуре 1100°C в литом исходном состоянии с РЗЭ (○) и без (Δ) и после термообработки с РЗЭ (◆) и без (□)

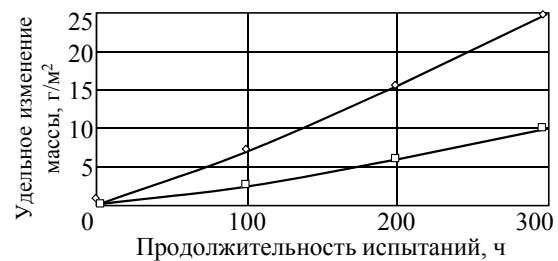


Рис. 6. Влияние микролегирования РЗЭ (◇) на жаростойкость сплава ВКНА-25-ВИ (МОНО <111>) при температуре 1100°C (□ без РЗЭ)

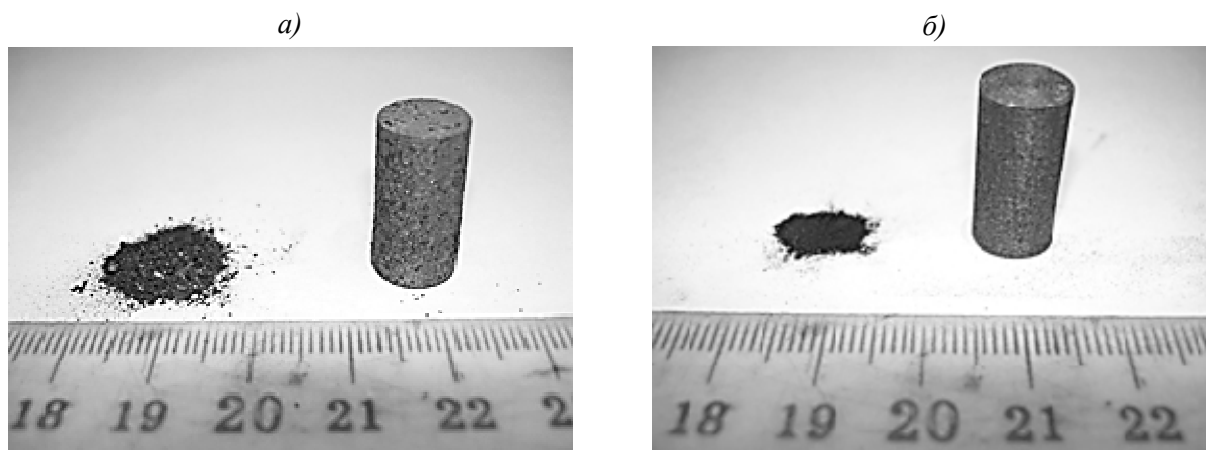


Рис. 7. Внешний вид образцов из сплава ВЖМ4-ВИ без РЗЭ (а) и с РЗЭ (б) в результате окисления на воздухе при 1100°С за 330 ч

После деформации, при термической обработке, микродобавки также концентрируются на поверхностях раздела – границах зерен и упрочняющей фазы, измельчая  $\gamma'$  и карбидные частицы.

На рис. 8 показано влияние добавок РЗЭ на структуру и свойства жаропрочного никелевого сплава типа ЭП975 (~60%  $\gamma'$ -фазы).

Изучалась структура поверхности гранул  $\varnothing 150$  мкм, полученных методом вращающегося электрода. Видно модифицирующее влияние лантана при кристаллизации – измельчаются оси дендритов второго и третьего порядка. Кроме того, при одинаковых условиях распыления размер самих гранул при введении лантана снижается. Стабильность структуры сплава с лантаном выше: меньшее изменение отношения площади частиц  $\gamma'$ -фазы к их периметру после 1000 ч выдержки при 900°С.

Добавки скандия влияют на жаропрочность сплава типа ЭП975. При оптимальном его содержании время до разрушения при температурах испытания от 850 до 975°С увеличивается более чем на 50% (рис. 9).

Также на повышение рабочих температур современных ГТД направлено применение *жаростойких и теплозащитных покрытий*, наносимых на детали двигательных установок.

Жаростойкие покрытия формируются методом ионно-плазменного нанесения [9, 10]. Наиболее широко в этой технологии используется иттрий, он является важным компонентом сплавов системы Me-Cr-Al-Y (где Me – Ni, Co, Re, Hf и др.), а также сплавов системы Al-Si-Y. Наличие иттрия в жаростойких покрытиях способствует повышению адгезии защитной оксидной пленки при термоциклировании лопаток с покрытием, образующейся на поверхности покрытия при работе лопатки в области высо-

ких температур (1000-1150°C). Исходный материал покрытия изготавливается в виде трубного катода  $\varnothing 180 \times 140$  мм и высотой 340 мм (масса катодов: ~25 кг на основе Ni, 11 кг – на основе Al). Содержание иттрия в никелевых катодах 0,3-0,6% (по массе), а в катодах на основе алюминия 1,1-2% (по массе). На рис. 10 и 11 приведены микроструктуры различных видов покрытий и график изменения жаростойкости сплава ЖС6У с покрытием и без.

Другим способом защиты лопаток от воздействия высоких температур являются *керамические теплозащитные покрытия* (ТЗП) [11, 12]. Такие покрытия формируются магнетронным среднечастотным осаждением керамических слоев. В этой технологии используются циркониевые мишени, содержащие итрий и другие РЗЭ (Gd, Pr, Nd и пр.). Суммарное содержание РЗЭ в мишени на основе циркония достигает значений – до 15% (по массе). В керамическом слое ТЗП оксиды редкоземельных металлов стабилизируют фазовый состав керамики и способствуют снижению коэффициента ее теплопроводности с 2-3 до 1 Вт/(м·К) и менее. Размеры мишени составляют  $400 \times 100 \times (8-9)$  мм. На рис. 12 и 13 приведены микроструктуры покрытий и график изменения жаростойкости различных сплавов с покрытием.

Создание и развитие высокоэффективных сложных технических систем во многом определяется совершенствованием навигационных приборов (акселерометры, гироскопы и т. д.). В большинстве этих приборов применяются магниты из *магнитотвердых материалов* типа ЮНДК и на основе  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ , которые известны более 40 лет, и возможности их совершенствования по основному показателю для приборов – температурному коэффициенту индукции (ТКИ) – физически исчерпаны. Кроме того, существует ряд технологических особенностей этих материалов, ограничивающих их применение в приборах: для ЮНДК – это низкое значение коэрцитивной силы ( $H_{cl}$ ) без возможности ее существенного повышения. Основным недостатком материалов на основе  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ , затрудняющим их применение в гироскопах, является невозможность изготовления цельных колец с радиальной текстурой.

В качестве замены перечисленных выше материалов в ВИАМ разработаны магнитотвердые материалы на основе интерметаллического соединения с тетрагональной структурой  $(\text{Tr}1_{1-x}\text{Tr}2_x)_2(\text{Fe}_{1-y}\text{Co}_y)_{14}\text{B}$ . Здесь Tr1 – один или несколько легких редкоземельных металлов (РЗМ): Nd, Pr, Ce и т. д., а Tr2 – один или несколько тяжелых РЗМ: Dy, Tb, Gd и т. д. Исследования, проведенные в ВИАМ, показали, что, изменяя значения  $x$  и  $y$ , можно получить любое значение ТКИ в диапазоне от -0,1 до +0,02%/°C (-60÷+80°C). Из материалов на основе интерметаллических соединений с тетрагональной структурой

могут быть изготовлены цельные кольцевые магниты с радиальной текстурой с размерами, необходимыми для современных динамически настраиваемых гироскопов [13–16].

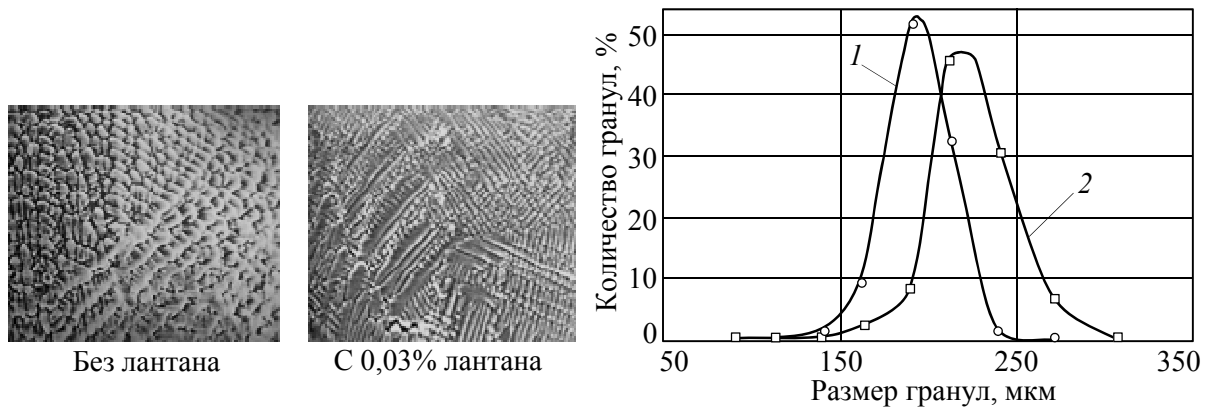


Рис. 8. Влияние микролегирования лантаном (1) на структуру и размер гранул при распылении сплава ЭП975 (2 – без La)

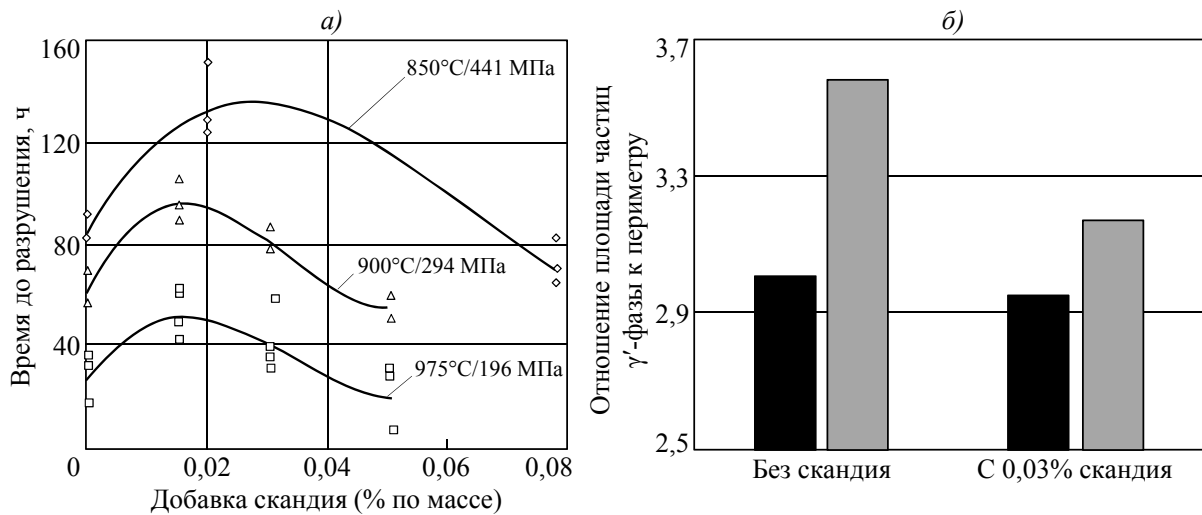


Рис. 9. Влияние добавки скандия на жаропрочность (а) и структурную стабильность (б) сплава ЭП975 в исходном состоянии (■) и после выдержки при 900°С в течение 1000 ч (■)

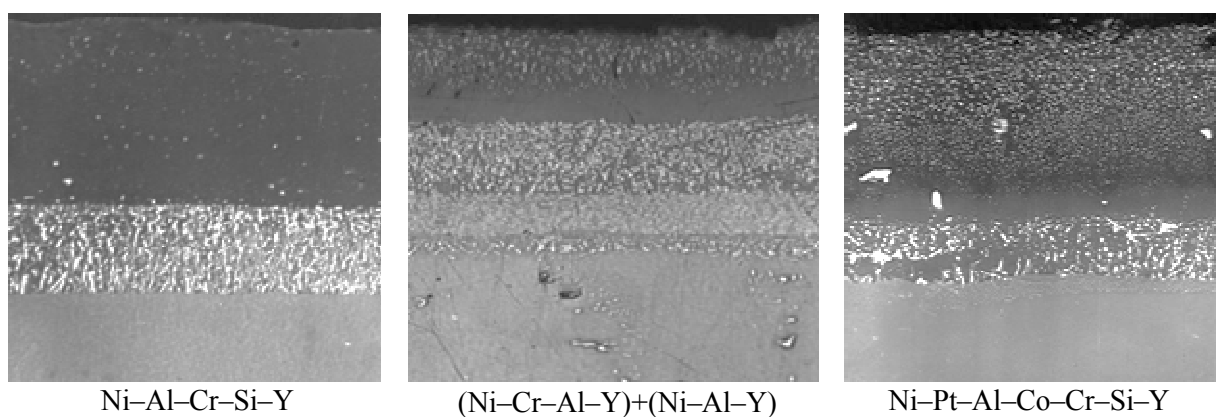


Рис. 10. Микроструктура жаростойких диффузионных покрытий

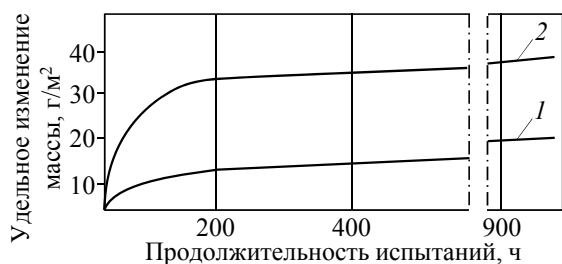


Рис. 11. Изменение жаростойкости при 1100°C сплава ЖС6У с покрытием (Ni-(18-22)С) + (Ni-(18-22) Cr-(8-15)Al-(Si,W,C)Y) толщиной 60 мкм (1) и без покрытия (2)

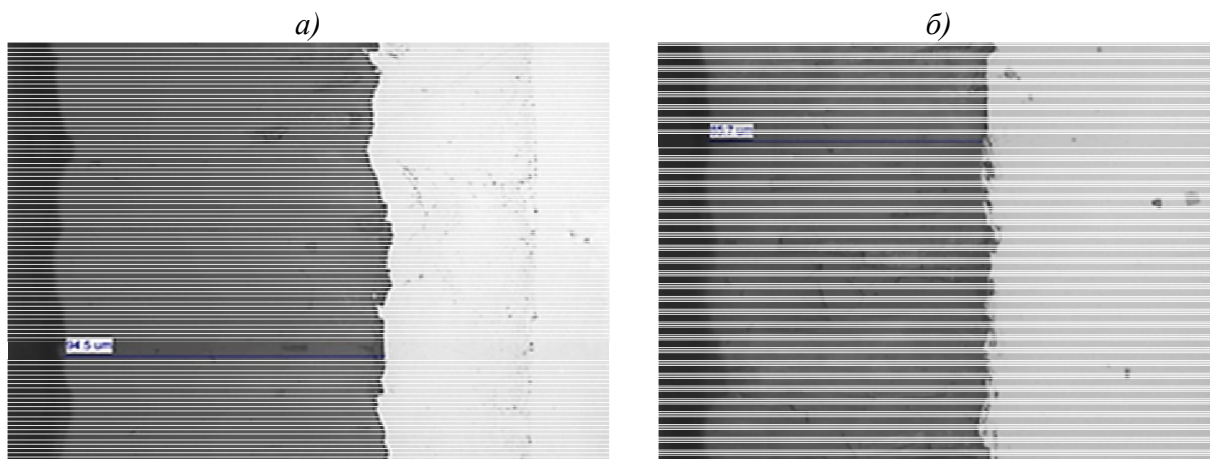


Рис. 12. Микроструктура жаростойких диффузионных покрытий на сплаве ЖС6У системы ВСДП-3+ВСДП-16+(ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Pr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (а) и на сплаве ЭИ435 системы ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (б)

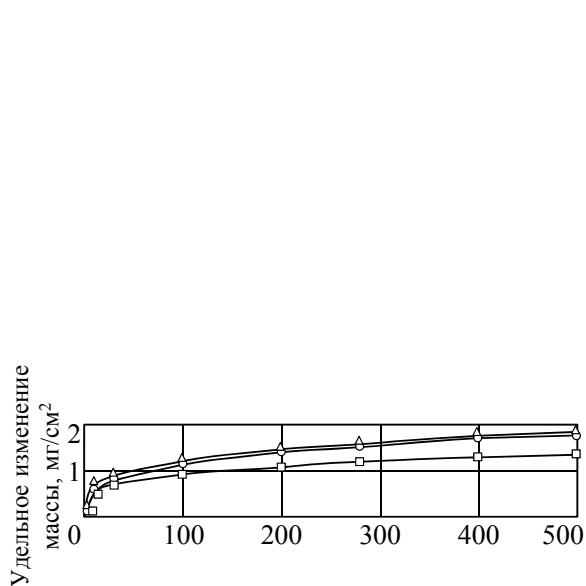


Рис. 13. Удельное изменение массы образцов из безуглеродистых жаропрочных сплавов ВЖМ4 (□), ВЖМ5 (Δ) и ЖС36 (○) с покрытием С+ГЦА+ВСДП-3+ВСДП-16+YSZ от времени выдержки при 1100°C

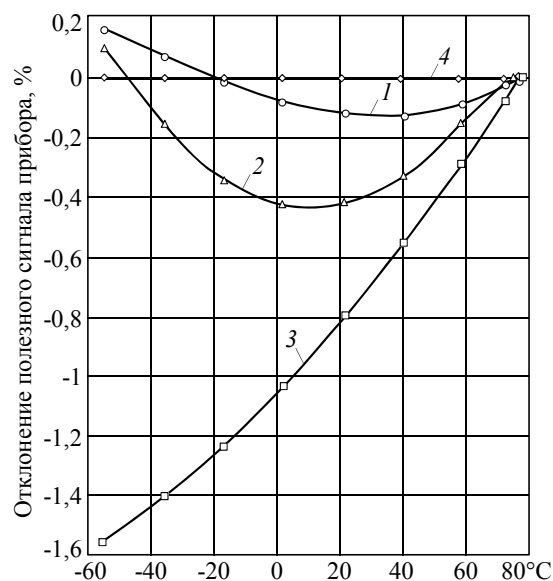


Рис. 14. Отклонение полезного сигнала прибора при изменении температуры на примере лучших приборных магнитных материалов (Pr, Dy)-(Fe, Co)-В (1), Sm-Co (2), ЮНДК (3) и перспективного материала (4)

Комплексные исследования термостабильных материалов на основе интерметаллидов с тетрагональной структурой впервые в мире начаты и проводятся в ВИАМ. Разработанные материалы не имеют аналогов в России и за рубежом. В настоящее время изучены закономерности формирования магнитных характеристик и фазового состава магнитотвердых материалов и разработаны материалы со следующими свойствами:  $B_R=0,7-0,9$  Тл; ТКИ:  $-0,015\div-0,04\%/^{\circ}\text{C}$ . Установлены области концентраций легирующих элементов, допускающие изготовление цельных кольцевых магнитов с радиальной текстурой. Разработана методика расчета температурной зависимости  $B_R$ , экспериментальная проверка данной методики проведена по значению ТКИ материалов.

На рис. 14 представлены остаточная магнитная индукция разработанного в ВИАМ магнитотвердого материала и сравнение его термической стабильности с используемыми в настоящее время материалами. Использование нового материала позволяет повысить характеристики точности навигационных приборов в 2 раза, а также уменьшить трудозатраты (в том числе и за счет исключения блока термостатирования) на изготовление прибора в 3-5 раз.

Перспективным способом улучшения свойств конструкционных материалов является микролегирование их редкоземельными элементами. Необходимое для этих целей количество РЗЭ невелико, но без их применения получить заданные свойства невозможно.

*Микролегирование мартенситостареющих сталей* (таких как ВКС-170, ВКС-180, ВКС-210) магнием, церием, иттрием или лантаном уменьшает хрупкость сталей, вызванную выделением вредных соединений серы, углерода и азота по границам зерен, а также повышает технологическую пластичность при горячей обработке давлением.

Установлено, что церий и итрий, введенные в сталь в количестве 0,02%, способствуют измельчению зерна от 1-2 до 3-4 балла после нагрева при 1200°C (рис. 15). Присадка 0,02% иттрия повышает сопротивление коррозионному растрескиванию стали ВКС-210 в 4-6 раз.

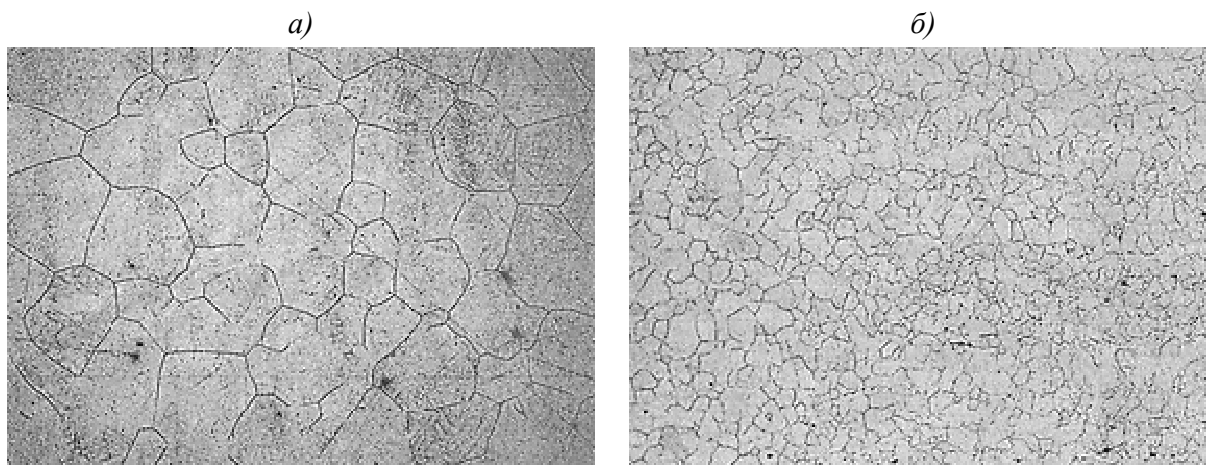


Рис. 15. Микроструктура стали ВКС-9 после закалки при 1200°С:  
*а* – без РЗЭ; *б* – с легированием РЗЭ

Существенно улучшает свойства *высокопрочных конструкционных сталей* (ВКС-9, ВКС-12) микролегирование редкоземельными (La, Ce) и щелочноземельными (Ca, Mg) элементами. Это происходит вследствие повышения степени раскисления, формирования глобулярных неметаллических включений размером <1 мкм. Микролегирование в комплексе с другими факторами позволяет получить высокие значения вязкости разрушения (вплоть до 100 МПа $\sqrt{м}$ ) при прочности стали ВКС-9: 1950-2100 МПа и приводит к меньшей скорости роста трещины усталости (СРТУ), равной 0,20 мм/кцикл (при  $\Delta K=31,4$  МПа), против 0,38 мм/кцикл – для стали 30ХГСН2А.

Микролегирование также используется для улучшения характеристик *титановых сплавов*. Так, разработанный в ВИАМ жаропрочный конструкционный титановый сплав ВТ38, относящийся к псевдо- $\alpha$ -сплавам, имеет схожую со сплавом ВТ18У систему легирования, но имеющую одно ключевое отличие: введение в качестве микролегирующей и модифицирующей добавки гадолиния.

Сплав ВТ38 по своим механическим характеристикам при 500 и 600°С на 40-50% превосходит лучший листовой отечественный сплав ВТ20, при этом может быть получена толщина листов 0,8 вместо 3 мм, что позволяет повысить весовую эффективность конструкций. Сплав ВТ38 рекомендован для применения при температуре до 600°С в конструкциях носовых обтекателей, обшивки, рулей управления и других модулей планера самолетов, в конструкциях двигателей и космических аппаратов, в композиционных материалах и конструкциях.

Данные примеры показывают особую важность использования редкоземельных элементов при производстве материалов авиационной техники, и в связи с их стратеги-

ческим значением производство РЗЭ не должно зависеть от внешних экономических и политических условий.

Переход российской промышленности к инновационной модели развития и решение вопросов обеспечения национальной безопасности требуют интенсивного повышения объемов добычи, переработки и промышленного использования РЗЭ. В условиях дефицита РЗЭ на мировом рынке необходимо активизировать усилия по развитию импортозамещающих производств. В качестве источников сырьевого обеспечения могут рассматриваться техногенные источники, уникальные в мировом масштабе месторождения из нераспределенного фонда участков недр, перспективные добывающие активы за пределами России. При этом развитие отечественной РЗЭ индустрии должно осуществляться в опережающем порядке по отношению к отраслям-потребителям РЗЭ. Наиболее сложными вопросами в рамках данной задачи являются преодоление накопленного технологического отставания и координация действий ключевых участников. Вместе с тем наличие у России большого исторического опыта и высокого научно-технического потенциала в области добычи, переработки и использования РЗЭ позволяет рассчитывать на успешное достижение поставленных целей при условии предоставления необходимой государственной поддержки.

Решение крупномасштабной задачи, направленной на возрождение РЗЭ промышленности, потребует эффективного применения механизмов государственно-частного партнерства в сочетании с программно-целевым планированием разрабатываемых технологий и создаваемых производств.

Основными элементами государственного контроля и поддержки должны стать:

- разработка современных технологий производства РЗЭ и продукции на их основе, отвечающих параметрам экономической эффективности, а также промышленной и радиоактивной безопасности; поддержка их на стадии опытно-промышленной эксплуатации;

- контроль и стимулирование сбалансированного развития всех элементов производственной цепочки, что позволит бизнесу сформировать инвестиционный ресурс и привлечь заемные средства для развития РЗЭ проектов;

- развитие и актуализация системы метрологического и нормативного правового обеспечения, гармонизированной с международными нормативными и методическими документами по обеспечению единства измерений, подтверждению соответствия продукции, регулированию безопасности добычи и разработки, производства и использо-

вания, стандартизации и управлению интеллектуальной собственностью, включая эффективную систему патентной охраны результатов интеллектуальной деятельности;

– создание условий для эффективной рыночной оценки накопленной и создаваемой интеллектуальной собственности и ее использования для повышения капитализации компаний, упрощение оборота нематериальных активов, вовлечение в экономическую деятельность объектов интеллектуальной собственности, созданных за счет бюджетных средств.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Оглодков М.С., Хохлатова Л.Б., Колобнев Н.И. и др. Влияние термомеханической обработки на свойства и структуру сплава системы Al-Cu-Mg-Li-Zn //Авиационные материалы и технологии. 2010. №4. С. 7-12.
2. Клочкова Ю.Ю., Грушко О.Е., Ланцова Л.П. и др. Освоение в промышленном производстве полуфабрикатов из перспективного алюминийлитиевого сплава В-1469 //Авиационные материалы и технологии. 2011. №1. С. 8-12.
3. Ри Хосен, Ри Э.Х., Химухин С.Н., Калугин М.Е. Влияние температурных режимов плавки и легирования сплавов алюминия на свойства отливок //Литейное производство. 2010. №8. С. 7-8.
4. Каблов Е.Н., Сидоров В.В. Микролегирование РЗМ – современная технология повышения свойств литейных жаропрочных никелевых сплавов //Перспективные материалы. 2001. №1. С. 23-34.
5. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий /В сб.: Авиационные материалы и технологии: Юбилейный науч.-технич. сб. (приложение к журналу «Авиационные материалы и технологии»). М.: ВИАМ. 2012. С. 19-36.
6. Сидоров В.В., Тимофеева О.Б., Калицев В.А., Горюнов А.В. Влияние микролегирования РЗМ на свойства и структурно-фазовые превращения в интерметаллидном сплаве ВКНА-25-ВИ //Авиационные материалы и технологии. 2012. №4. С. 8-12.
7. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М. Особенности легирования и термической обработки жаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2010. №2. С. 3-8.
8. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М. Новый жаропрочный никелевый сплав для дисков газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных установок (ГТУ) //Материаловедение. 2010. №7. С. 24-28.
9. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Луценко А.Н. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей //Металлы. 2007. №5. С. 23-34.
10. Мубояджян С.А., Галоян А.Г. Комплексные термодиффузионные жаростойкие покрытия для безуглеродистых жаропрочных сплавов на никелевой основе //Авиационные материалы и технологии. 2012. №3. С. 25-31.

11. Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Гаямов А.М., Смирнов А.А. Получение керамических теплозащитных покрытий для рабочих лопаток турбин авиационных ГТД магнетронным методом //Авиационные материалы и технологии. 2012. №4. С. 3-8.
12. Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Гаямов А.М., Матвеев П.В. Высокотемпературные жаростойкие покрытия и жаростойкие слои для теплозащитных покрытий //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 17-21.
13. Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Оспенникова О.Г. Литейные жаропрочные никелевые сплавы //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. №5. С. 15-19; №6. С. 16-21.
14. Пискорский В.П., Бурханов Г.С., Оспенникова О.Г. и др. Расчет температурного коэффициента индукции наноструктурированных магнитотвердых материалов Pr-Dy-Gd-Fe-Co-B методом молекулярного поля //Металлы. 2010. №1. С. 64-67.
15. Пискорский В.П., Бурханов Г.С., Оспенникова О.Г. и др. Влияние термической обработки наноструктурированных магнитотвердых материалов Pr-Dy-Fe-Co-B //Металлы. 2010. №3. С. 84-91.
16. Пискорский В.П., Валеев Р.А., Давыдова Е.А., Белоусова В.А. Расчет температурного коэффициента индукции материалов Pr-Dy-Fe-Co-B в приближении молекулярного поля //Перспективные материалы. Специальный выпуск. 2008. С. 329-331.