



УДК 669.018.44:669.017.165:

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИЦИЙ СИСТЕМЫ Ni–Al–Co ПРИ
РАЗРАБОТКЕ НОВОГО ЖАРОПРОЧНОГО
ДЕФОРМИРУЕМОГО ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА**

М.Н. Летников

Б.С. Ломберг

доктор технических наук

С.В. Овсебян

кандидат технических наук

Октябрь 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»,
№10, 2013 г.

УДК 669.018.44:669.017.165:

М.Н. Летников, Б.С. Ломберг, С.В. Овсепян

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИЦИЙ СИСТЕМЫ NI–AL–CO ПРИ РАЗРАБОТКЕ НОВОГО ЖАРОПРОЧНОГО ДЕФОРМИРУЕМОГО ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА

Представлены результаты исследований структуры, фазового состава и механических свойств экспериментальных композиций тройной системы Ni–Al–Co с целью разработки на их основе нового интерметаллидного жаропрочного сплава для дисков турбин.

Ключевые слова: *интерметаллидный жаропрочный сплав, система Ni–Al–Co, фазовый состав, механические свойства, ГТД.*

M.N. Letnikov, B.S. Lomberg, S.V. Ovsepyan

INVESTIGATION EXPERIMENTAL ALLOYS BASED ON NI–AL–CO TERNARY SYSTEM FOR DEVELOPMENT A NEW HIGH-TEMPERATURE INTERMETALLIC ALLOY FOR DISK APPLICATION

The result of studies of the structure, phase composition and mechanical properties of the experimental alloys based on ternary Ni–Al–Co system for development a new intermetallic disk alloy are presented.

Key words: *intermetallic alloy, ternary Ni–Al–Co system, phase composition, mechanical properties, gas turbine engine*

Анализ тенденций развития зарубежных газотурбинных двигателей для авиационной техники показывает, что при разработке ГТД нового поколения приоритетными целями на ближайшие 10–15 лет (программы VAATE, UEET, Lear-X) являются: улучшение топливной экономичности, увеличение тяги, снижение массы, уменьшение шума и вредных (NO_x , CO_2) выбросов в атмосферу. В России для создания конкурентоспособной авиационной техники приняты государственные и отраслевые программы, в которых поставлены аналогичные цели и задачи развития на перспективу до 2030 года [1, 2].

С точки зрения материаловедения поставленные задачи можно решать путем разработки новых более эффективных материалов и технологий их производства. Для

деталей горячего тракта, в том числе дисков турбины, в соответствии с намеченными целями наиболее важным является увеличение их рабочей температуры и снижение плотности при прочностных свойствах на уровне либо выше уровня этих свойств у существующих материалов.

В области жаропрочных дисковых сплавов за последнее десятилетие разработаны новые высокопрочные сплавы на никелевой основе:

- зарубежные – LHSR, Rene 104, RR 1000, Alloy 10;
- отечественные – деформируемый ВЖ175-ИД, а также гранульные ВВ750П и ВВ751П.

Состав, структура и технология производства таких сплавов постоянно совершенствуются. Например, в сплаве ВЖ175-ИД (разработчик ФГУП «ВИАМ») помимо тщательно сбалансированного состава применены новые подходы к формированию структуры заготовки диска, что позволило реализовать преимущество этого материала по ряду характеристик (МЦУ, кратковременной и длительной прочности) в сравнении с аналогами [3, 4].

Однако, несмотря на значительные успехи в улучшении комплекса прочностных характеристик, рабочие температуры новых дисковых жаропрочных никелевых сплавов не превышают 800°C, за исключением сплава ЭП975-ИД, разработанного для длительной эксплуатации до 850°C.

Существенное увеличение (на 100°C и более) рабочих температур жаропрочных никелевых сплавов возможно путем добавок рения и рутения, стабилизирующих γ -твердый раствор, которые используются в новом поколении литейных сплавов [5, 6]. Подобное дорогостоящее легирование для дисковых сплавов не применимо. В связи с вышесказанным, задача разработки принципиально новых материалов для дисков ГТД становится все более актуальной.

Поиск альтернативы жаропрочным никелевым сплавам ведется много лет. Известны исследования, направленные на разработку материалов дисперсионно-упрочняемых более термически стабильными частицами, чем γ' -фаза $[\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})]$. Так, предлагаются сплавы на основе кобальта, упрочняемые фазой $\text{Co}_3(\text{Al}, \text{W})$ [7, 8]; высокотемпературный сплав на основе тройной эвтектики с высоким содержанием ниобия [9]; сплавы на основе иридия, упрочняемые $\text{Ir}_3(\text{Al}, \text{W})$, $\text{Ir}(\text{Al}, \text{W})$ [10]. Однако такие материалы либо имеют высокую плотность, либо чрезвычайно дороги, а в случае легирования большим количеством ниобия требуют обязательного применения защитного покрытия.

Наиболее изученными высокотемпературными материалами являются интерметаллидные сплавы на основе Ni₃Al. Во ФГУП «ВИАМ» разработан ряд сплавов серии ВКНА для лопаток с рабочими температурами 900–1200°С и низкой плотностью [11, 12]. Однако такие материалы не являются деформируемыми и в качестве сплавов для дисков не применяются.

Одной из перспективных для разработки интерметаллидных деформируемых сплавов является система Ni–Al–Co, потенциал которой заключается в возможности широкого выбора различных комбинаций фаз ($\gamma+\beta$; $\gamma'+\beta$; $\gamma+\gamma'+\beta$; $\gamma+\gamma'$), где за счет интерметаллидов β (Ni, Co)Al и γ' (Ni, Co)₃Al возможно получить сочетание низкой плотности, высокой жаростойкости и прочности, а γ -твердый раствор (Co, Ni) придает пластичность всей композиции. Исследования различных сплавов на основе системы Ni–Al–Co показали, что приемлемую пластичность и прочность можно получить в сплавах со структурой $\beta/\gamma'/(Co, Ni)$, модифицированных титаном и бором [13, 14].

Целью данной работы является изучение возможностей композиций на основе системы Ni–Al–Co для создания нового жаропрочного деформируемого интерметаллидного сплава для дисков турбин с плотностью ≤ 8 г/см³ и рабочей температурой не менее 900°С.

Материалы и методики исследований

Расчетный состав экспериментальных композиций на основе системы Ni–Al–Co приведен в табл. 1. Содержание алюминия в сплавах выбиралось в пределах 15–21% (атомн.), где нижнее значение соответствует максимальной расчетной плотности 8 г/см³, верхнее – ограничивает содержание β -фазы на уровне 40–50%. В составе всех композиций также присутствует титан для легирования γ' -фазы и бор – в количестве 0,02% (по массе).

Таблица 1

Расчетный состав экспериментальных композиций на основе системы Ni–Al–Co

Условный номер состава	Содержание элементов, % (по массе)			
	Ni	Al	Co	Ti
1	41	19,7	37	2,3
2	35	19,7	43	2,3
3	37	17,7	43	2,3
4	33	14,7	51	2,3
5	44	14,7	40	2,3

**Механические свойства экспериментальных композиций сплава
на основе системы Ni–Al–Co**

Условный номер состава	Кратковременная прочность* при 20°C				Время до разрушения при 900°C и постоянно приложенном напряжении 100 МПа, ч
	σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	
	МПа		%		
1	849	623	8	6,9	<1
2	1275	687	17,5	11	1,3
3	1216	628	32	35,5	1,5
4	1069	584	37,75	61,5	31; 22; 26,5
5	1119	648	33,3	50,5	32,5

* Средние значения.

Выплавку проводили вакуумно-индукционным методом с последующим переплавом на установке направленной кристаллизации УВНК-14. Заготовки (диаметром до 250 мм и высотой 30–40 мм) получали деформацией на прессах с усилием 1600 и 630 тс с изотермическими установками нагрева штампов. Испытания для определения механических свойств образцов (табл. 2) проводили на растяжение при комнатной температуре и на длительную прочность – при 900°C. Локальный химический и фазовый состав определяли методом количественного микрорентгеноспектрального анализа, микроструктуру исследовали на растровом электронном микроскопе JSM-6490LV*.

Результаты исследований

В зависимости от химического состава экспериментальные композиции имели различную микроструктуру. В составах 1, 2 и 3 (Al \geq 17,7% атомн.) структура металла в литом состоянии представляет собой γ -матрицу с дисперсными частицами γ' -фазы и крупными включениями β -фазы неправильной формы, вокруг и внутри которых присутствуют γ' -частицы (рис. 1). Состав β -фазы неравновесный и при высокотемпературной обработке внутри β -зерен происходит выделение γ' -частиц, при этом исходные фазовые границы β - γ' не изменяются. С помощью металлографического анализа установлено, что количество неравновесной β -фазы в литом состоянии следующее:

Условный номер состава	Содержание β -фазы, %
1	~40
2	~32
3	~21.

* В работе принимали участие Е.Б. Чабина, Е.В. Филонова, Г.И. Морозова, Е.А. Давыдова.

Микроструктура композиций 4 и 5 ($Al \leq 14,7\%$ атомн.) представляет собой γ -твердый раствор с дисперсными частицами γ' -фазы. В составе 4 выявлены отдельные мелкие частицы (следы) β -фазы, в составе 5 она полностью отсутствовала.

В ходе работы установлено отрицательное влияние β -фазы на деформационную способность композиций. По цилиндрической поверхности слитков, в зоне наибольших растягивающих напряжений на разных стадиях деформации образовывались многочисленные трещины. Исследование микроструктуры таких дефектных областей выявило, что растрескивание в основном происходит по границе раздела фаз β/γ' (рис. 2) и наблюдается для всех исследованных композиций с β -фазой.

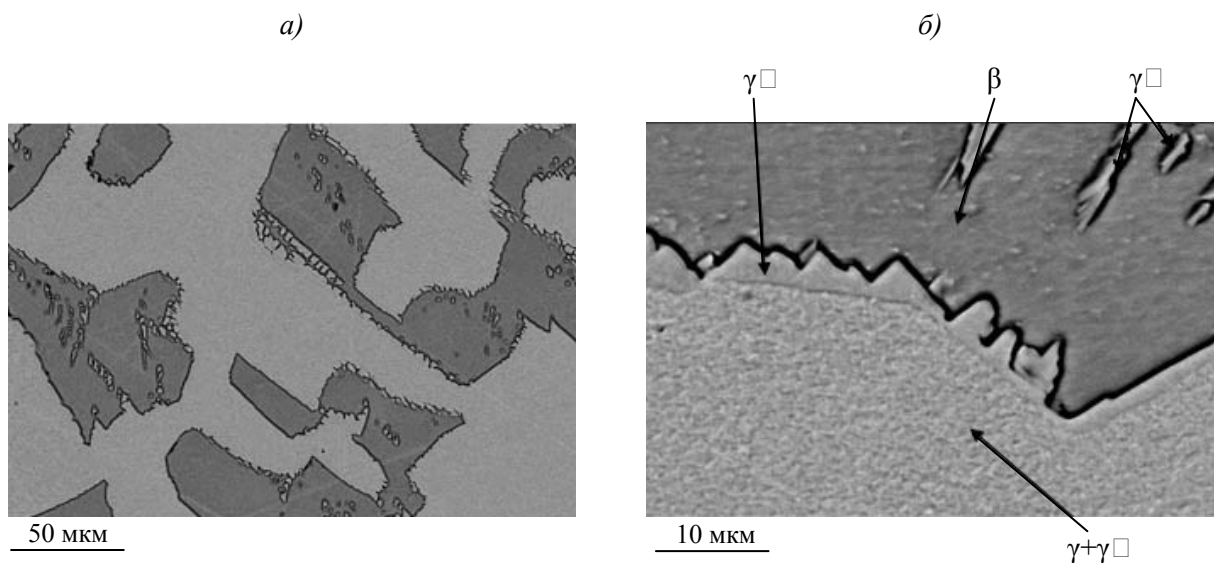


Рисунок 1. Микроструктура (а – $\times 500$; б – $\times 2500$) экспериментальных композиций в литом состоянии

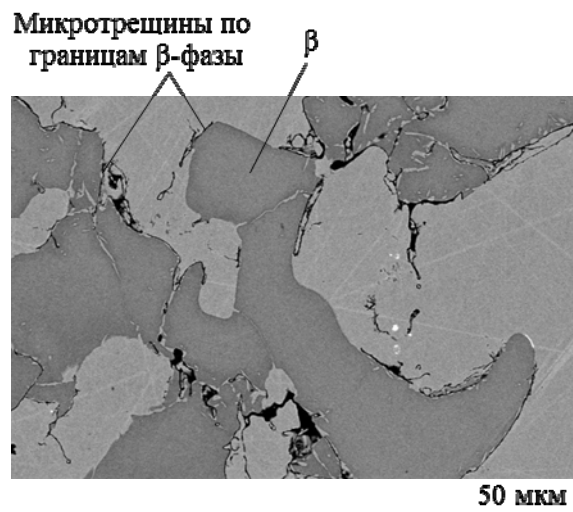


Рисунок 2. Микроструктура ($\times 500$) дефектной зоны композиции 1 после деформации

Результаты испытаний механических свойств подтвердили негативное влияние β -фазы (см. табл. 2). Так, состав 1 с наиболее высоким содержанием β -фазы показал неудовлетворительные свойства как при комнатной температуре, так и при испытаниях на длительную прочность. Составы с меньшей концентрацией β -фазы (2 и 3) показывают более высокие значения предела прочности, относительного удлинения и сужения, однако длительная прочность при 900°C остается крайне низкой. Составы без β -фазы (4 и 5) обладают избыточной пластичностью при несколько меньших значениях прочности, при этом время до разрушения при испытаниях на жаропрочность увеличилось и составило ~30 ч.

С учетом полученных результатов проведены исследования серии дополнительных композиций, не содержащих β -фазу. Расчетное содержание Al снижено до значений 7,2–8,5% (по массе). Учитывая невысокую прочность и избыточную пластичность, экспериментальные композиции дополнительно легировали танталом и совместно танталом и ниобием в соотношениях Ta/Nb, равных 1/2 и 1/3 соответственно (табл. 3).

Таблица 3

Расчетный состав экспериментальных композиций на основе системы Ni–Al–Co, легированных Ta и Nb

Условный номер состава	Содержание основных элементов, % (по массе)				Соотношение легирующих элементов Ta/Nb
	Ni	Al	Co	Ti	
6	50,6	8,4	38	2	1/–
7	49,6	8,4	37	2	1/2
8	47,2	7,8	37	2	1/2
9	48,5	7,5	36	2	1/3

Введение в экспериментальные композиции Ta и Nb привело к значительному увеличению количества γ' -фазы и появлению ее в виде крупных неравномерных выделений. Отжиг при температурах 1220–1240°C позволяет частично растворить эти γ' -частицы. В отсутствие в структуре β -фазы все композиции продемонстрировали хорошую пластичность при деформации из литого состояния.

Результаты испытаний составов 6–9 показали, что легирование танталом и ниобием не приводит к увеличению кратковременной прочности при 20°C, для всех сплавов она находится приблизительно на одном уровне (рис. 3). При этом сохраняется высокая пластичность (>35%). Однако жаропрочность по сравнению с составами 4 и 5 значительно возрастает (табл. 4). Наиболее заметное влияние на длительную прочность

оказывает тантал. Среди всех составов максимальное время до разрушения при 900°C показал состав 8, содержащий в сумме 6% Ta и Nb.

Таблица 4

Длительная прочность экспериментальных композиций на основе системы Ni–Al–Co, легированных Ta и Nb

Условный номер состава	Время до разрушения при 900°C и постоянно приложенном напряжении 100 МПа, ч
6	75; 65
7	67; 57; 52; 47
8	118; 108; 114; 106; 133
9	63; 50; 64

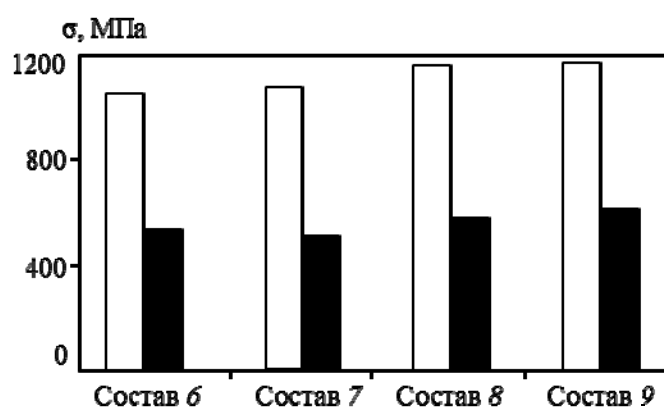


Рисунок 3. Пределы прочности (□) и текучести (■) при 20°C для экспериментальных композиций (6–9) на основе системы Ni–Al–Co

Исследования структурной и фазовой стабильности этого состава после выдержек при 900°C в течение 100 и 500 ч показали, что фазовый состав сплава не меняется. Структурные изменения в нем связаны с коагуляцией и сращиванием мелкодисперсных частиц γ' -фазы, которые проявляются уже после 100 ч выдержки (рис. 4).

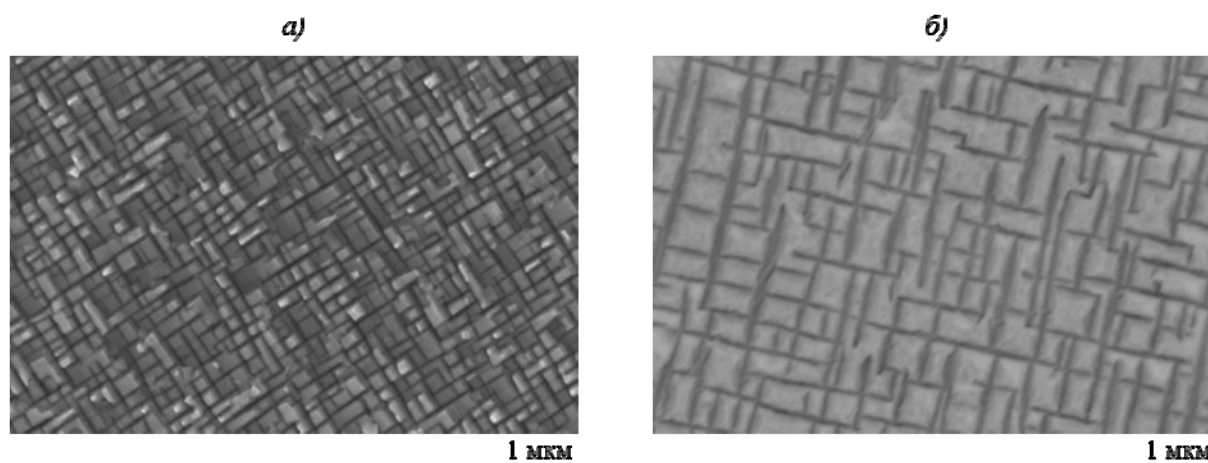


Рисунок 4. Морфология ($\times 10000$) γ' -фазы до (а) и после (б) выдержки в течение 100 ч при 900°C

Таким образом, проведены исследования экспериментальных композиций на основе тройной системы Ni–Al–Co с добавками титана, тантала, ниобия и бора. Выявлено негативное влияние β -фазы на механические свойства составов с тройной $(\gamma+\gamma'+\beta)$ -структурой. В двухфазных γ/γ' композициях благодаря добавкам тантала и ниобия возможно обеспечить жаропрочность при 900°C на базе 100 ч ($\sigma=100$ МПа). Для дальнейшего повышения свойств необходимо обеспечить дополнительное упрочнение γ -твердого раствора и повышение стабильности мелкодисперсных γ' -частиц при высоких температурах.

Результаты исследований показывают значительные потенциальные возможности композиций системы Ni–Al–Co, легированных титаном, танталом и ниобием, для создания интерметаллидных деформируемых жаропрочных сплавов нового класса для дисков турбин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
2. Оспенникова О.Г. Стратегия развития жаропрочных сплавов и сталей специального назначения, защитных и теплозащитных покрытий //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 19–36.
3. Ломберг Б.С., Овсепян С.В., Бакрадзе М.М., Мазалов И.С. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для деталей газотурбинных двигателей //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 52–57.
4. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Никелевые литейные сплавы нового поколения //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 36–52.
5. 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.
6. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Елютин Е.С. Монокристаллические жаропрочные сплавы для газотурбинных двигателей //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. №SP2. С. 38–52.
7. High temperature resistant cobalt base superalloy: pat. 2010/0061883 US; опубл. 11.03.2010.
8. Cobalt base alloy with high heat resistance and high strength and process for producing the same: pat. 2008/0185078 Japan; опубл. 07.08.2008.
9. Ternary nickel eutectic alloy: pat. 2009/0136381 UK; опубл. 28.05.2008.
10. Iridium-based alloy with high heat resistance and high strength and process for producing the same: pat. 2008/0206090 Japan; опубл. 28.08.2008.
11. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 57–60.
12. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высокотеплонагруженных деталей газотурбинных двигателей //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. №SP2. С. 13–19.

13. Kimura Y., Miura S., Suzuki T., Mishima Y. Microstructure and mechanical properties of two-phase alloys based on the B2-type intermetallic compound CoAl in the Co–Al–Ni ternary system //Materials Transactions. 1994. V. 35. №11. P. 800–807.
14. Kimura Y., Elmer H. Lee, Liu C.T. Microstructure, phase constitution and tensile properties of Co–Ni–Ti–Al base multi-phase alloys //Materials Transactions. 1995. V. 36. №8. P. 1031–1040.