



# Сплав на основе интерметаллида $Ni_3Al$ – перспективный материал для лопаток турбин

Е.Н. Каблов

Б.С. Ломберг

В.П. Бунтушкин

Е.Р. Голубовский

С.А. Мубояджян

Февраль 2002

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ) – 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 30 научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в 4 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 «Металловедение и термическая обработка металлов», №7, 2002г.

Электронная версия доступна по адресу: [www.viam.ru/public](http://www.viam.ru/public)

## **Сплав на основе интерметаллида $Ni_3Al$ – перспективный материал для лопаток турбин**

Е.Н. Каблов, Б.С. Ломберг, В.П. Бунтушкин,  
Е.Р. Голубовский, С.А. Мубояджян

*Всероссийский институт авиационных материалов*

*Рассмотрены структура и свойства литейного интерметаллидного сплава марки ВКНА-4У-МОНО с монокристаллической структурой в интервале температур 20–1250°C. Исследовано влияние длительного нагрева при 1200°C на стабильность механических характеристик сплава. Показаны преимущества литейного сплава на основе легированного интерметаллида  $Ni_3Al$ , приведены его технологические и физические свойства.*

### **Введение**

Никелевые жаропрочные сплавы являются основным материалом для лопаток авиационных и промышленных турбин, получаемых методами точного литья по выплавляемым моделям. Они имеют высокий уровень жаропрочности и хорошие технологические свойства, обеспечивающие при литье получение тонкостенных фасонных деталей с регламентированной структурой.

Литейные сплавы на основе легированного интерметаллида  $Ni_3Al$  не уступают никелевым жаропрочным сплавам по технологичности при литье фасонных деталей и имеют по сравнению с ними ряд преимуществ, основными из которых являются следующие [1, 2].

– При одинаковом уровне жаропрочности содержат значительно меньшее количество тугоплавких дорогостоящих легирующих элементов.

– Имеют меньшую плотность и, как следствие, более высокую удельную прочность и жаропрочность.

– Структура и свойства сплавов на основе  $Ni_3Al$  термически стабильны после длительных нагревов.

– Сплавы являются двухфазными ( $\gamma'$ -фаза – основа; прослойки –  $\gamma$ -твердый раствор), не имеют упрочняющих фаз и поэтому не требуют сложной термической обработки.

Эти особенности позволяют прогнозировать значительный экономический и технический эффект при замене никелевых жаропрочных сплавов на сплавы на интерметаллидной основе.

Цель настоящей работы – создать сплав на основе интерметаллида никеля, как альтернативу литейным никелевым жаропрочным сплавам.

### ***Результаты исследований и их обсуждение***

В табл. 1 приведены химический состав и плотность сплавов ВКНА-4У-МОНО, ЖС6У и ЖС26ВНК, имеющих близкий уровень жаропрочности в интервале температур 900–1100°C [3]. Видно, что сплав ВКНА-4У-МОНО по сравнению со сплавами ЖС6У и ЖС26ВНК имеет меньшее количество вольфрама, кобальта и не содержит ниобия, ванадия. В пересчете на 1 т сплава ВКНА-4У-МОНО экономия вольфрама и кобальта составляет соответственно 75–92 и 60–50 кг при одновременном увеличении массы молибдена на 32–40 кг.

Таблица 1.

Содержание тугоплавких элементов  
в жаропрочных сплавах и их плотность  $\rho$

Сплав	Содержание тугоплавких элементов, %					$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
	W	Mo	Nb	V	Co	
ЖС6У	10,0	1,8	1,0	–	10,0	8400
ЖС26ВНК	11,7	1,0	1,6	1,0	9,0	8500
ВКНА-4У-МОНО	2,5	5,0	–	–	4,0	7910

В табл. 2 приведены фазовый состав и характеристики структуры отливок из сплава ВКНА-4У-МОНО. На рис. 1 показана типичная микроструктура этого сплава: белые крупные включения (рис. 1, а) – первичные частицы  $\gamma'$ -фазы; белые прослойки (рис. 1, б) –  $\gamma$ -фаза (легированный твердый раствор

на основе никеля), темное поле – вторичные частицы  $\gamma'$ -фазы. Такая структура обладает высокой термической стабильностью, не вызывает разупрочнения сплава и потери пластичности после длительных нагревов при высоких температурах. Это иллюстрируют данные табл. 3, в которой приведены механические характеристики (при 20°C) сплава ВКНА-4У-МОНО в исходном состоянии и после отжига при 1200°C, 500 ч. Значения характеристик кратковременной прочности и пластичности определяли по ГОСТ 1497, длительной прочности – по ГОСТ 10145, сопротивления усталости – по ГОСТ 25.502 на монокристаллических образцах, ось которых направлена по кристаллографической ориентации  $\langle 111 \rangle$ , отклонение от этой ориентации не превышало 10 град. Из данных табл. 3 следует, что сплав ВКНА-4У-МОНО имеет высокий модуль упругости, сохраняет запас прочности и пластичности до 1250°C.

Таблица 2.

Структура литого и термически обработанного сплава на основе легированного интерметаллида  $\text{Ni}_3\text{Al}$

Состояние сплава	$\gamma'$	$\gamma$	$V_{\gamma'}$ , %	$d_{\gamma'}^I$	$d_{\gamma'}^{II}$	$d_{\gamma'}^{III}$	$d_{\gamma'}^{IV}$	$b$ , мкм	$P_{\gamma'}$	$\Delta a/a$
	%									
Литое	90	10,0	17	21,5	Нет	Нет	Нет	0,18	0,37	0,027
Отжиг при 1150°C, 1 ч, воздух	99	1,0	11	29,1	4,6	0,16	0,015	0,42	0,88	0,018

Обозначение:  $V_{\gamma'}$  – объемная доля первичных выделений  $\gamma'$ -фазы;  $d_{\gamma'}^I$ ,  $d_{\gamma'}^{II}$ ,  $d_{\gamma'}^{III}$ ,  $d_{\gamma'}^{IV}$  – средний размер первичных, вторичных, третичных и четвертичных частиц  $\gamma'$ -фазы соответственно;  $b$  – средняя ширина прослоек  $\gamma$ -фазы;  $P_{\gamma'}$  – параметр дальнего порядка  $\gamma'$ -фазы;  $\Delta a/a$  – несоответствие кристаллических решеток  $\gamma'$ - и  $\gamma$ -фаз.

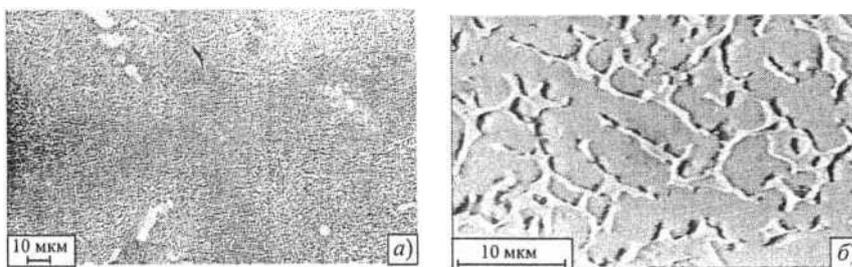


Рисунок 1. Микроструктура сплава ВКНА-4У-МОНО

Таблица 3.

Механические свойства сплава ВКНА-4У-МОНО  
при различных температурах

T, °C	E	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B$	$\delta$	$\psi$	$\sigma_{100}$	$\sigma_{500}$	$\sigma_{1000}$	$\sigma_{-1}$	$\sigma_{-1}^H$
	МПа			%		МПа				
20	230000	680	1320 (1200–1400)	14,0 (14–16)	15,0 (16–17)	–	–	–	230	130
800	215000	700	770	30,0	29,0	540	480	–	–	–
900	210000	590	680	38,0	38,0	380	280	260	310	210
1000	155000	390	480	35,0	34,0	220	140	125	–	–
1100	120000	320	410	36,0	43,0	110 ( $\geq 110$ )	90	80	150	90
1200	80000	110	165	38,0	53,0	50	28	22	–	–
1250	–	–	80	45,0	55,0	–	–	–	–	–

Примечания: 1. Испытания на усталость проводили на базе  $10^7$  циклов.

2. В скобках даны свойства сплава после отжига заготовок при 1200°C, 500 ч.

Сплав имеет высокое сопротивление механической и термической усталости. Сопротивление термической усталости сплава определяли по методике ГНЦ ЦИАМ при  $\Delta\sigma=60$  МПа,  $T=100\leftrightarrow 1100^\circ\text{C}$ ,  $\tau=1,6$  мин. Установлено, что среднее число теплосмен до появления первой трещины составляет 1600 циклов.

Необходимо отметить, что во всем рассмотренном температурно-временном диапазоне значения длительной пластичности (по ГОСТ 10145) сплава ВКНА-4У-МОНО соответствовали  $\varepsilon_p > 5\%$ . Это обстоятельство подчеркивает еще одно преимущество интерметаллидного сплава перед сплавом ЖС6У.

Результаты, представленные в табл. 3, позволяют сделать вывод о том, что прочностные и пластические характеристики сплава после продолжительного высокотемпературного нагрева не изменяются по сравнению с исходными значениями. Эти данные свидетельствуют также о том, что даже продолжительные выдержки при температурах до 1200°C не должны оказывать влияние на уровень свойств деталей из интерметаллидного сплава при длительной эксплуатации.

Среди жаропрочных сплавов сплав ВКНА-4У-МОНО имеет наиболее высокое сопротивление окислению. Увеличение массы образцов сплава при окислении в воздушной среде при 1100 и 1200°C за 100 ч не превышает 6–12 и 16–90 г/м<sup>2</sup> соответственно (в зависимости от шероховатости поверхности

образцов). Высокая жаростойкость интерметаллидного сплава объясняется низким содержанием в нем тугоплавких элементов и оптимальным сочетанием количества Al и Cr, что обеспечивает формирование на поверхности сплава плотной оксидной пленки на основе алюминия. Сплав по своей природе термодинамически устойчив в контакте с жаростойкими диффузионными, конденсированными и конденсационно-диффузионными покрытиями, основу которых составляет  $\beta$ -фаза (NiAl) с различным содержанием Al (от 9 до 24%). Высокая термостабильность сплава при 1000–1200°C позволяет формировать на нем ионно-плазменные диффузионные и конденсационно-диффузионные покрытия в указанном интервале температур. Это обеспечивает получение покрытий заданной пластичности (с требуемым содержанием Al), что важно для лопаток турбин теплонапряженных ГТД. При этом для лопаток турбин, работающих при температурах 1000–1100°C и ресурсе до  $(3-5) \cdot 10^3$  ч, могут быть использованы одно- или двухстадийные диффузионные легированные алюминидные покрытия. Эти покрытия имеют внешний слой на основе сплава ВСДП-11(ВП) системы Al–Si–Y и внутренний конденсированный слой на основе сплавов системы M–Cr–Al–Y (здесь M – Ni или Ni+Co). Для лопаток, эксплуатирующихся при более высоких температурах и (или) ресурсе выше  $(5-15) \cdot 10^3$  ч, можно рекомендовать конденсационно-диффузионные покрытия: внешний слой на основе системы Al–Ni–Y типа ВСДП-16(ВП) [4], конденсированный слой – на основе сплавов системы M–Cr–Al–Y типа СДП-2 или ВСДП-8(ВП).

Для длительной защиты поверхности внутренней полости лопаток турбин из сплава ВКНА-4У-МОНО могут быть использованы одно- или двухстадийные алюминидные слои, получаемые газовым циркуляционным алитированием [4].

Использование защитных покрытий на интерметаллидном сплаве ВКНА-4У-МОНО обеспечивает повышение его жаростойкости на больших базах испытаний (более 300 ч) в 8–10 раз и термостойкости композиции

сплав–покрытие в 2–2,5 раза. При этом жаропрочность сплава в области температур 900–1150°C не снижается.

По физическим свойствам сплав ВКНА-4У-МОНО (табл. 4) близок к традиционным никелевым жаропрочным сплавам. Теплопроводность интерметаллидного сплава несколько выше за счет повышенного содержания в нем алюминия.

Таблица 4.

Физические свойства сплава ВКНА-4У-МОНО

Свойства	Температура, °С												
	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
$\lambda$ , Вт/м·град	9,9	11,8	12,9	14,4	15,4	16,7	18,3	20,4	22,7	25,1	27,5	31,4	39
$C$ , кДж/кг·град	0,48	0,54	0,573	0,575	0,58	0,58	0,59	0,61	0,63	0,665	0,723	0,825	1,03
Свойства	Интервал температур, °С												
	20–100	20–200	20–300	20–400	20–500	20–600	20–700	20–800	20–900	20–1000	20–1100	20–1200	20–1300
$\alpha \cdot 10^6$ , град <sup>-1</sup>	12,1	12,3	12,5	12,8	13	13,1	13,4	13,3	13,4	13,9	14,9	16,1	18,2
Свойства	Интервал температур, °С												
	20–100	100–200	200–300	300–400	400–500	500–600	600–700	700–800	800–900	900–1000	1000–1100	1100–1200	1200–1300
$\alpha \cdot 10^6$ , град <sup>-1</sup>	12,1	12,5	13	13,5	13,9	13,6	15,1	12,4	14,5	18,8	24,0	29,8	43,4

Как показали технологические исследования, сплав не требует специального оборудования и технологической оснастки для литья фасонных деталей.

На рис. 2 приведены пределы длительной прочности при 1000°C сплава ВКНА-4У-МОНО и сплавов ЖС6У и ЖС26ВНК, применяемых для лопаток турбины ГТД. Видно, что уровень жаропрочности сплава ВКНА-4У-МОНО при 1000°C выше, чем у никелевых сплавов ЖС6У и ЖС26ВНК.

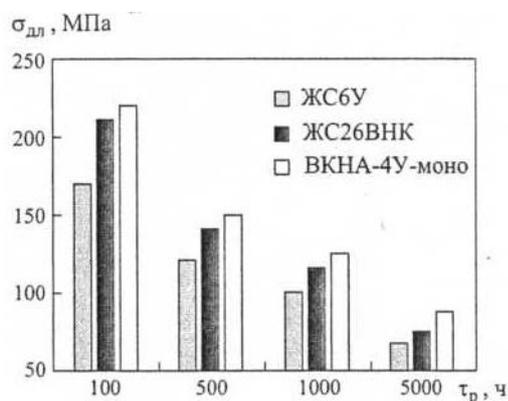


Рисунок 2. Пределы длительной прочности  $\sigma_{дл}$  (испытания при 1000°C) сплавов ЖС6У, ЖС26ВНК и ВКНА-4У-МОНО

Сплав ВКНА-4У-МОНО опробован для лопаток серийного авиационного ГТД. Для этого были изготовлены три комплекта неохлаждаемых рабочих лопаток турбины высокого давления, которые подвергали испытаниям на термоциклирование, имитирующее запуск двигателя. Лопатки выдержали без замечаний 10000 термоциклов. При запусках температура на свободном торце и в горячем сечении на входных кромках лопаток кратковременно достигала 1100°C. Аналогичные лопатки из сплава ЖС6У повреждались после 2500 термоциклов. Дефектоскопия опытных лопаток после эквивалентно-циклических испытаний в составе двигателя за 5000 ч не выявила обгара и разрушения их кромок.

Таким образом, использование интерметаллидного сплава ВКНА-4У-МОНО вместо сплава ЖС6У для изготовления рабочих лопаток позволило увеличить срок их службы в 3 раза при одновременном повышении рабочей температуры на 60°C [5].

Применение интерметаллидного сплава ВКНА-4У-МОНО для литых лопаток турбин вместо жаропрочных сплавов-аналогов обеспечит повышение ресурса лопаток и даст значительный технико-экономический эффект за счет снижения стоимости сплава (экономное легирование) и трудоемкости изготовления лопаток, а также позволит сэкономить значительное количество вольфрама и кобальта.

## **Вывод**

Разработанный легированный сплав на основе  $Ni_3Al$  и технология литья деталей с регламентированной монокристаллической структурой могут быть основой принципиально нового направления в металловедении при создании высокожаропрочных литейных сплавов для рабочих лопаток ГТД, конкурентоспособных с традиционными жаропрочными никелевыми сплавами типа ЖС6У, ЖС26ВНК и MAR-M200 (зарубежный аналог).

## Список литературы:

1. Каблов Е.Н., Бунтушкин В.П., Поварова Н.Б. и др. Малолегированные легкие жаропрочные высокотемпературные материалы на основе интерметаллида  $Ni_3Al$  // Металлы. 1999. №1. С. 58–65.
2. Бунтушкин В.П., Каблов Е.Н., Базылева О.А., Морозова Г.И. Сплавы на основе алюминидов никеля // МиТОМ. 1999. №1. С. 32–34.
3. Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р. Жаропрочность никелевых сплавов. М.: Машиностроение, 1998.
4. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. Защитные покрытия лопаток турбин ГТД // Газотурбинные технологии. 2001. №3(12). С. 30–32.
5. Бахарев В.Г., Костокрыз В.Г., Миронов В.Н. Опыт применения интерметаллидного сплава ВКНА-4У на рабочих лопатках турбины // Авиационная промышленность. 2001. №4.