

## СОСТАВ, СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СПЛАВА ВКНА-25

Разработка конструкционных материалов с более высокой жаропрочностью и жаростойкостью при температурах до 1200°C, отличающихся пониженной плотностью и экономичным химическим составом, является весьма актуальной задачей для повышения технических и экономических показателей серийных и перспективных авиационных ГТД различного назначения.

Попытки создания высокотемпературных авиационных материалов на основе тугоплавких металлов и керамики не получили развития из-за нерешенных проблем повышения жаростойкости и снижения хрупкости.

В силу особенностей связи атомов в кристаллической структуре, их упорядоченного распределения и химического состава, интерметаллическое соединение Ni<sub>3</sub>Al обладает высокой температурой плавления (1385°C), пониженной плотностью (7,53 г/см<sup>3</sup>) и термической стабильностью структуры до начала плавления.

При исследовании физико-механических свойств легированных сплавов на основе соединения Ni<sub>3</sub>Al установлены некоторые закономерности, связывающие их состав, структуру и свойства. Было установлено, что наиболее высоким сопротивлением окислению при температурах 1200–1250°C обладает интерметаллическое соединение Ni<sub>3</sub>Al, в котором часть атомов никеля и алюминия замещены хромом, титаном, молибденом и вольфрамом. В системе сплавов Ni–Al–Cr–Ti–Mo–W разработана композиция, которая в литом виде отличается высокой жаростойкостью (привес при окислении на воздухе за 100 ч при температуре 1250°C не превышал 24–25 г/м<sup>2</sup>).

Установлено, что оптимальной жаропрочностью в интервале температур 900–1200°C среди сплавов на основе легированного интерметаллида Ni<sub>3</sub>Al этой системы отличаются сплавы, фазовый состав которых соответствует границе раздела γ'- и γ-фаз. На рис. 1 в качестве примера приведена псевдобинарная диаграмма состояния сплавов системы Ni–Al–Cr–Ti–W–Mo, на которой показаны область существования наиболее жаропрочных сплавов (точка C), а также особенности кристаллизации этого класса материалов.

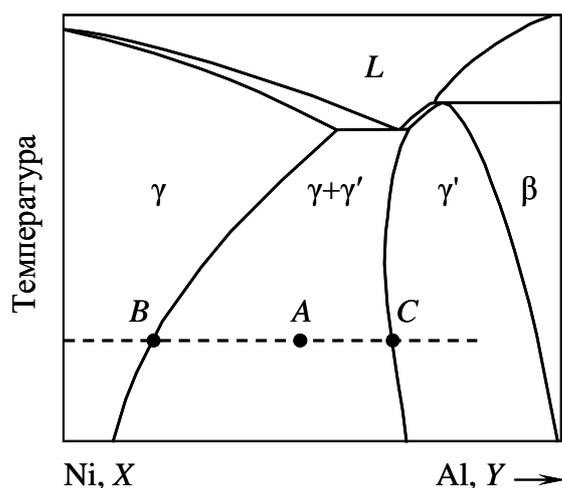


Рис. 1. Псевдобинарная диаграмма состояния сплавов системы Ni–Al–Cr–Ti–Mo–W в области литейных жаропрочных сплавов γ-γ' (точки A, B) и γ'-γ (точка C)

При исследовании литейных свойств установлено, что небольшие добавки кобальта (4–5% по массе) к оптимальной композиции значительно повышают жидкотекучесть при литье в вакууме, а также снижают склонность сплава к образованию горячих трещин.

Это позволило разработать и паспорттировать сплав на основе интерметаллида Ni<sub>3</sub>Al марки ВКНА-4У (паспорт № 1649). Сплав с положительным результатом опробован и находит применение для изготовления неохлаждаемых сопловых и рабочих лопаток ГТД. На рис. 2 приведена микроструктура жаропрочного сплава на основе никеля типа ЖС и интерметаллидного сплава. Диаграмма (см. рис. 1) позволяет понять

особенности образования микроструктуры сплавов. Образование частиц  $\gamma'$ -фазы в никелевом сплаве происходит при кристаллизации из твердого раствора. Частицы  $\gamma'$ -фазы в интерметаллидном сплаве кристаллизуются по эвтектической реакции непосредственно из жидкой фазы.

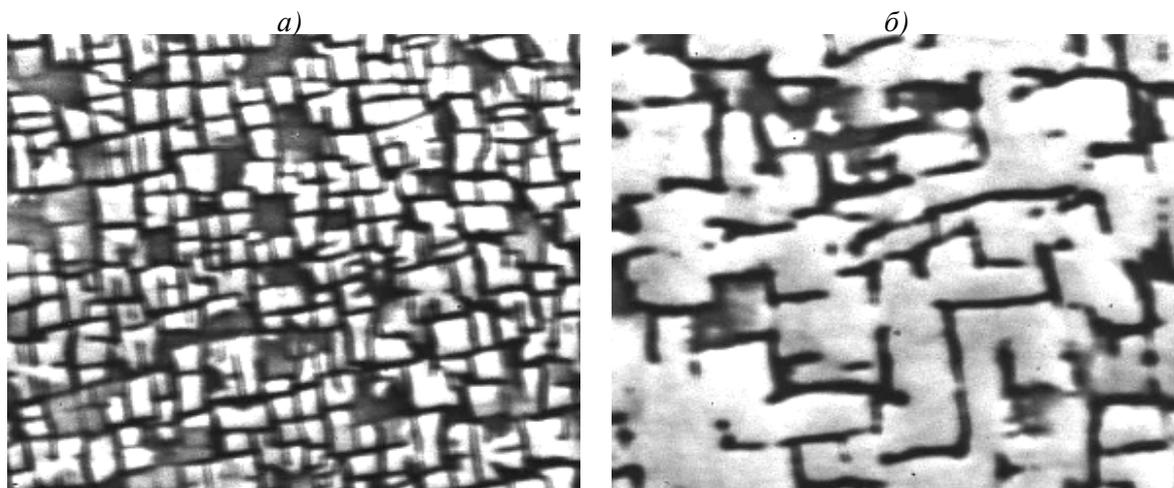


Рис. 2. Типичная микроструктура ( $\times 10000$ ) литейного жаропрочного сплава на основе никеля (а) и интерметаллида  $\text{Ni}_3\text{Al}$  (б)

При исследовании дислокационной структуры образцов сплава ВКНА-4У с монокристаллической структурой до и после испытания на длительную прочность при температуре  $1100^\circ\text{C}$  на различных базах испытания установлено, что дислокации наиболее интенсивно образуются в прослойках  $\gamma$ -фазы (темные области на рис. 2), расположенных вдоль приложенной нагрузки, в особенности в поверхностных слоях. Предположительно это отрицательно влияло на сопротивление ползучести и разрушение отливок из сплава ВКНА-4У при высоких температурах.

Для упрочнения прослоек  $\gamma$ -фазы матричный сплав ВКНА-4У легировали небольшим количеством рения, который в отличие от других тугоплавких элементов растворяется преимущественно в этой фазе и увеличивает ее стабильность.

В матричном сплаве, содержащем небольшое количество рения, значительно повышалась длительная прочность в интервале температур  $900\text{--}1150^\circ\text{C}$ .

Целью дальнейших исследований являлась оптимизация состава ренийсодержащего интерметаллидного сплава. В результате исследований разработан состав сплава, содержащий в основе  $1,2\text{--}1,6\%$  (по массе) Re. Установлено, что повышение содержания рения свыше  $1,6\%$  нецелесообразно из-за снижения длительной прочности и жаропрочности в результате образования нежелательных фаз.

В данной работе обсуждается фазовый состав нового литейного сплава ВКНА-25 оптимизированного состава для монокристаллических отливок, его механические свойства при комнатной и более высоких температурах, пределы длительной прочности на базах 10, 100, 500 и 1000 ч при температурах 900, 1000, 1100, 1150 и  $1200^\circ\text{C}$ , малоцикловая и многоцикловая усталость, жаростойкость и др.

Исследование микроструктуры и фазового состава показало, что сплав ВКНА-25 в литых отливках с монокристаллической структурой – трехфазный (табл. 1; рис. 3). Метастабильная фаза, располагающаяся по границам дендритов, состоит из сердцевин, содержащей в никелевой основе  $\sim 33\%$  (атомн.) алюминия ( $\beta$ -фаза переменного состава), и оболочки, содержащей  $\sim 18\%$  (атомн.) алюминия ( $\gamma'$ -фаза) – (см. рис. 3, а). В процессе нагрева при температуре  $1200^\circ\text{C}$  сердцевина растворяется, и в междендритных прослойках присутствуют белые включения  $\gamma'$ -фазы (см. рис. 3, б).

Фазовый состав сплава в литом состоянии и после нагрева при 1200°С

Состояние сплава	Содержание фаз, % (по массе)		
	$\gamma'$	$\gamma$	$\gamma'+\beta$
Литой	82	15,7	2,3
После нагрева при 1200°С, 10 ч	95	5	–

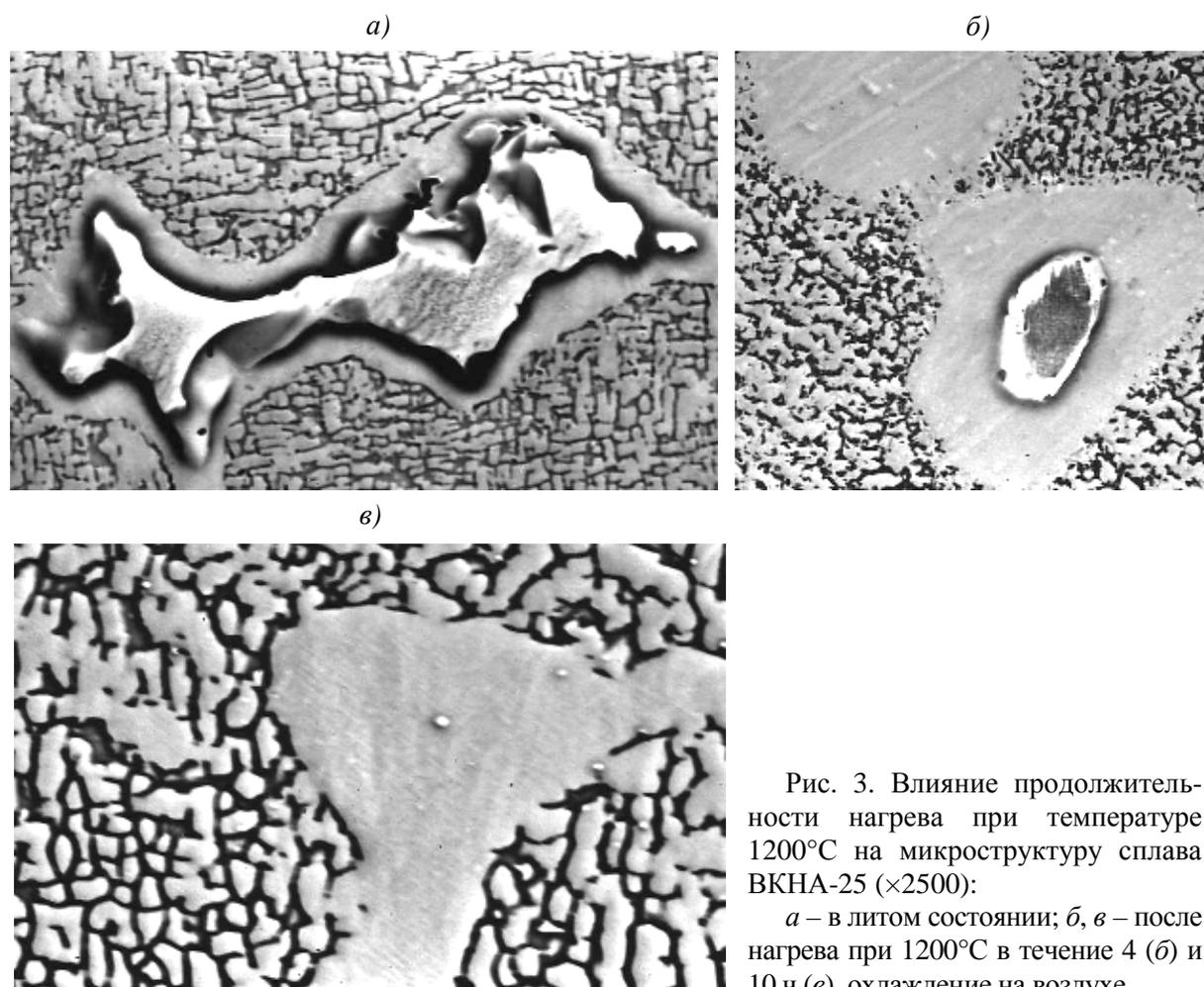


Рис. 3. Влияние продолжительности нагрева при температуре 1200°С на микроструктуру сплава ВКНА-25 ( $\times 2500$ ):

*a* – в литом состоянии; *б*, *в* – после нагрева при 1200°С в течение 4 (*б*) и 10 ч (*в*), охлаждение на воздухе

Сплав ВКНА-25 перед определением механических свойств подвергался отжигу при температуре 1000°С, 4 ч для устранения возможных литейных напряжений. По данным исследования микроструктуры, путем определения наличия в отливках метастабильной  $\beta$ -фазы переменного состава можно дать заключение о температуре нагрева образцов и деталей.

Сравнительные исследования монокристаллических отливок с кристаллографической ориентацией  $\langle 111 \rangle$  из двух сплавов (базовой композиции – ВКНА-4У и ВКНА-25), полученных по одинаковой технологии, показали, что интерметаллидный сплав ВКНА-25 имеет более высокий предел текучести и прочности при комнатной и высоких температурах (табл. 2).

**Сравнительные показатели температурной зависимости  
механических свойств сплавов ВКНА-4У и ВКНА-25**

Сплав	Температура испытания, °С	$\sigma_{0,2}$	$\sigma_B$	$\delta$	$\psi$
		МПа		%	
ВКНА-4У МОНО	20	680	1340	16	16
	800	700	780	38	38
	900	600	640	40	40
	1000	400	510	35	35
	1100	330	420	36	44
	1200	120	170	40	55
ВКНА-25 МОНО	20	880	1120	10	19
	800	910	950	11	11
	900	660	730	17	20
	1000	510	550	21	22
	1100	370	340	9,5	19
	1200	170	180	20	39

Видно (см. табл. 2), что легирование сплава ВКНА-4У небольшим количеством рения приводит к значительному росту пределов текучести и прочности при комнатной и высоких температурах. При этом в интервале температур 20–1200°С интерметаллидный сплав ВКНА-25 сохраняет высокие показатели относительного удлинения и сужения в интервале температур от 20 до 1200°С.

Исследование жаропрочности сплава в интервале температур 900–1150°С показывает (табл. 3), что новый материал имеет высокие показатели длительной прочности и сопротивления ползучести при остаточной деформации 0,2 и 0,5%. Длительные испытания на базах до 1000 ч в интервале температур 900–1150°С не приводят к охрупчиванию материала при испытании в воздушной среде без защитных покрытий.

Таблица 3

**Пределы характеристик жаропрочности сплава ВКНА-25 с КГО <111>**

Температура испытания, К (°С)	Продолжительность испытания $\tau$ , ч	$\sigma_{\tau}^*$ , МПа	$\varepsilon_p$ , %	$\sigma_{0,2/\tau}$	$\sigma_{0,5/\tau}$
				МПа	
1173 (900)	10	560/505	8	–	–
	100	420/370	15,5	290	315
	500	325/280	20	230	245
	1000	285/240	20,5	–	–
1273 (1000)	10	350/305	20,5	–	–
	100	240/195	21	160	170
	500	175/145	16,5	–	130
	1000	150/125	13,5	–	–
1373 (1100)	10	185/155	19	–	–
	100	130/110	10	–	–
	500	95/80	8,5	–	–
	1000	80/65	8,5	–	–
1423 (1150)	10	130/105	10	–	–
	100	85/70	9	–	–
	500	65/50	10	–	–
	1000	55/45	11	–	–

\* В числителе – минимальное значение, в знаменателе – среднее.

Сопротивление малоцикловой и многоцикловой усталости сплава в интервале температур 20–1100°С имеют высокие показатели (табл. 4).

## Характеристики усталости

Температура испытания, °С	МнЦУ: $\sigma$ , МПа, на базе $N=2 \cdot 10^7$ цикл		МЦУ: $\sigma_{\max}$ , МПа, на базе $N=10^4$ цикл (при $R=0,1$ ; $f=1$ Гц)	
	гладкие образцы	образцы с надрезом ( $r_n=0,5$ мм; $\alpha_\sigma=2,33$ )	гладкие образцы	образцы с надрезом ( $r_n=0,25$ мм; $\alpha_\sigma=3,35$ )
20	240	140	980	820
750	–	–	840	320
900	370	160	640	400
1100	160	–	–	–

Новый сплав не охрупчивается после длительных отжигов при температуре 1200°С. После 100-часового отжига при этой температуре прочность и пластичность образцов сплава сохранялась на уровне свойств в исходном состоянии.

Сплав отличается высоким сопротивлением окислению при температурах 1100 и 1200°С при испытании в воздушной среде. Привес за 100 ч при этих температурах не превышал соответственно 12,5 и 20 г/м<sup>2</sup>.

При температурах до 1000°С сплав склонен к сульфидной коррозии. Для защиты применяется покрытие марки СДП-1, которое не снижает механических свойств.

На образцах после испытания на длительную прочность (в воздушной среде при температурах 1100 и 1150°С и напряжениях растяжения 95 и 90 МПа соответственно) определяли глубину измененной поверхностной зоны материала.

Установлено, что глубина измененной зоны в рабочей части образцов не превышает 25–30 мкм. Определялись привес и глубина измененной зоны. Результаты свидетельствуют о высокой стойкости материала к окислению при температурах 1100 и 1200°С.

Комплекс исследованных свойств нового материала позволил выявить квоты превосходства перед его промышленным интерметаллидным аналогом ВКНА-4У МОНО. Это дало возможность провести исследование физико-механических, технологических и коррозионных свойств нового материала в объеме паспорта.

По результатам исследования разработан и утвержден паспорт № 1775 на интерметаллидный сплав марки ВКНА-25 (ВЖЛ-1).

В соответствии с паспортом сплав рекомендуется для сопловых лопаток ГТД с монокристаллической структурой с ориентацией <111>, длительно эксплуатируемых в интервале температур 900–1200°С.

Для технологического и эксплуатационного опробования нового материала разработаны технические условия ТУ1-595-3-893–2005 «Шихтовая заготовка из литейного интерметаллидного сплава марки ВКНА-25 (ВЖЛ-1)».

*В.П. Бунтушкин, О.А. Базылева, А.И. Самойлов, М.А. Воронцов*

### ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАГРЕВОВ НА ТОНКУЮ СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИДА Ni<sub>3</sub>Al

Литейные высокотемпературные сплавы на основе интерметаллида Ni<sub>3</sub>Al марки ВКНА (ВКНА-1В, ВКНА-4У, ВКНА-25) содержат в основе 85–90%  $\gamma'$ -фазы и 10–15%  $\gamma$ -фазы.

Наличие в структуре сплавов небольшого количества  $\gamma$ -фазы позволяет исключить их охрупчивание при температурах выше 1000°С.

При исследовании тонкой структуры интерметаллидных сплавов после кратковременных нагревов при температурах 1000, 1100, 1150, 1200 и 1250°С установлено, что содержание  $\gamma'$ -фазы по сравнению с литым состоянием увеличивается с 85 до 90–95% (по массе).