

**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 ГУ1-595-3-893–2005 «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).

Микроструктурные исследования показали, что это связано с распадом  $\gamma$ -твердого раствора и выделением в объеме вторичных частиц  $\gamma'$ -фазы (рис. 1, табл. 1).

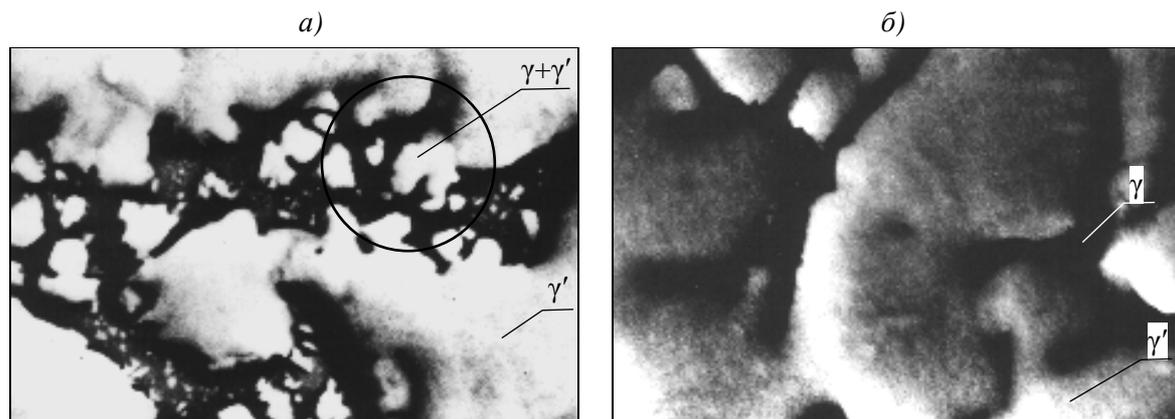


Рис. 1. Состояние прослоек  $\gamma$ -фазы ( $\times 10000$ ) в сплаве ВКНА-1В в литом состоянии (а) и после кратковременного нагрева при  $1250^{\circ}\text{C}$  и охлаждения на воздухе (б)

Таблица 1

Изменение тонкой структуры сплава ВКНА-1В после нагрева

Температура нагрева, $^{\circ}\text{C}$	Содержание фаз, %		Параметр кристаллической решетки, нм		Мисфит, %
	$\gamma'$	$\gamma$	$\gamma'$	$\gamma$	
Без нагрева (литое состояние)	88	12	0,3573	0,3581	0,233
1000	91,5	8,5	0,3573	0,3584	0,31
1100	89,0	11,0	0,3571	0,3585	0,41
1150	93,5	6,5	0,3572	0,3588	0,47
1200	93,5	6,5	0,3572	0,3588	0,45

Рентгеноструктурным анализом установлено, что с ростом температуры нагрева параметр кристаллической решетки  $\gamma'$ -фазы не изменяется, а параметр решетки  $\gamma$ -фаз при этом увеличивается. Это оказывает влияние на величину несоответствия параметров (мисфит) между фазами (см. табл. 1).

В процессе изготовления узлов и деталей из сплавов на основе интерметаллида  $\text{Ni}_3\text{Al}$  марки ВКНА они подвергаются различным технологическим нагревам. Так, проводится отжиг при температуре  $1150+10^{\circ}\text{C}$  в течение часа для устранения возможных поверхностных напряжений от механической обработки, при температурах 1000 и  $1050^{\circ}\text{C}$  соответственно в течение 4 и 2 ч – отжиг при нанесении диффузионных покрытий. В интервале температур  $1200\text{--}1250^{\circ}\text{C}$  проводится пайка и т. д.

В связи с этим целесообразно было оценить, как влияют технологические нагревы на свойства сплава марки ВКНА.

Исследование проводили на сплаве ВКНА-1В, который в настоящее время является наиболее востребованным на ряде предприятий отрасли.

Шихтовую заготовку сплава выплавляли в вакуумной индукционной печи в соответствии с действующими техническими условиями. После контроля качества отливали прутки диаметром 16 мм и длиной 150–180 мм методом направленной кристаллизации с использованием Ni–W затравок с кристаллографической ориентацией  $\langle 111 \rangle$ . Из прутков изготавливали стандартные образцы с отношением длины к диаметру, равным пяти.

После механической обработки готовые образцы отжигали в воздушной среде при температурах 1000, 1050, 1150 и  $1200^{\circ}\text{C}$  с выдержками, соответствующими применяемым технологическим процессам.

Термообработанные образцы испытывали на длительную прочность при температуре  $1000^{\circ}\text{C}$  при постоянной нагрузке 180 МПа.

В табл. 2 приведено время до разрушения образцов сплава ВКНА-1В после кратковременных нагревов и охлаждения при различных температурах.

Таблица 2

**Результаты испытания на длительную прочность образцов сплава ВКНА-1В после технологических нагревов**

Условия нагрева	Длительная прочность		
	$T, ^\circ\text{C}$	$\sigma, \text{МПа}$	Время до разрушения*, ч
Без нагрева (литое состояние)	1000	180	37,58/47,5
1000 $^\circ\text{C}$ , 4 ч	1000	180	34,73/53,5
1050 $^\circ\text{C}$ , 2 ч	1000	180	34,64/49
1150 $^\circ\text{C}$ , 1 ч	1000	180	74,115/94
1200 $^\circ\text{C}$ , 1 ч	1000	180	85,90/87

\* В числителе – значения, полученные при испытаниях; в знаменателе – средние значения по трем образцам.

Видно, что кратковременные нагревы литых образцов при температурах 1000 и 1050 $^\circ\text{C}$  не оказывают заметного влияния на время до разрушения, в то время как часовой отжиг при температурах 1150 и 1200 $^\circ\text{C}$  способствует его росту в 1,5 раза.

На рис. 2 показано, как влияют кратковременные отжики сплава ВКНА-1В на рост количества  $\gamma'$ -фазы и время до разрушения образцов, испытываемых при температуре 1000 $^\circ\text{C}$  и нагрузке 180 МПа.

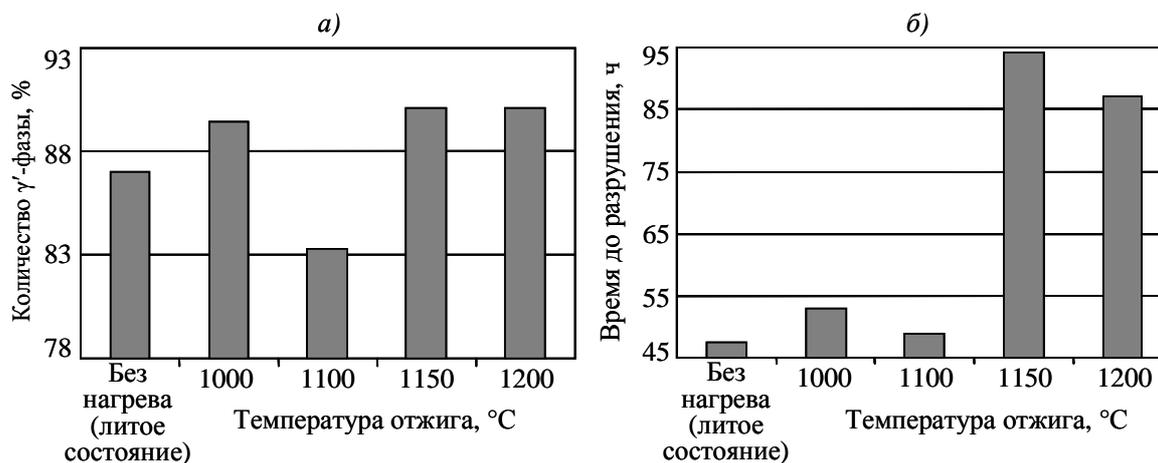


Рис. 2. Влияние кратковременного отжига на количество  $\gamma'$ -фазы (а) и на время до разрушения при испытании на длительную прочность (б – при  $\sigma=180$  МПа и 1000 $^\circ\text{C}$ ) сплава ВКНА-1В

Видно, что между этими характеристиками наблюдается корреляция, в особенности при высоких температурах.

Полученные результаты показывают, что рекомендуемый режим термической обработки деталей при температуре 1150 $^\circ\text{C}$  в течение одного часа не только благоприятно сказывается на устранении поверхностных напряжений, но и приводит к росту времени до разрушения при температуре 1000 $^\circ\text{C}$ . Предположительно это связано с упрочнением прослоек  $\gamma'$ -фазы за счет вторичных частиц  $\gamma'$ -фазы.

Приведенные данные позволяют сделать заключение о том, что после пайки, проводимой при температуре 1200–1250 $^\circ\text{C}$ , отжиг для снятия поверхностных напряжений можно не проводить. Однако после нанесения покрытий отжиг при температурах 1150–1200 $^\circ\text{C}$  необходим.

Результаты исследования позволяют оптимизировать очередность технологических нагревов при производстве литых полуфабрикатов и деталей из сплавов типа ВКНА.