

– при комбинированном диффузионном упрочнении поверхности формируются двух- или трехслойные диффузионные слои, придающие стали высокую контактную выносливость;

– наибольший прирост контактной выносливости получен при наличии на поверхности тонкого, хрупкого слоя толщиной 10–20 мкм;

– наличие на поверхности тонкого, хрупкого слоя снижает усталостную прочность цементованно-азотированной стали, что влечет за собой необходимость комплексного исследования контактной выносливости и усталостной прочности с поиском приемлемого конструктивно-технологического варианта использования комбинированного поверхностного упрочнения.

О.А. Базылева, А.А. Фомин, М.А. Воронцов

ЛИТЕЙНЫЙ СПЛАВ МАРКИ ВКНА-4УР ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОТЛИВОК С РАВНООСНОЙ СТРУКТУРОЙ

Одним из путей повышения эффективности газотурбинного двигателя является увеличение его рабочей температуры. При этом ужесточаются требования, предъявляемые к материалам, из которых изготавливаются детали двигателей, такие как сопловые лопатки и створки реактивного сопла. В настоящее время подобные детали изготавливаются методом точного литья по выплавляемым моделям из сплавов на основе никеля: ВЖЛ-12У, ЖС6У и других, рабочая температура которых ограничена 1000–1050°C. Поэтому необходимо изыскание новых материалов, предназначенных для литья деталей с равноосной структурой, с более высокой, нежели у никелевых сплавов, рабочей температурой.

Легированное интерметаллическое соединение на основе Ni_3Al , содержащее в своей кристаллической решетке тугоплавкие элементы, в особенности вольфрам, кристаллизуется по эвтектической реакции. На рис. 1 представлена псевдобинарная диаграмма состояния многокомпонентной системы Ni–Al–Cr–Mo–W в области фазы Ni_3Al . Микроструктура подобных сплавов отличается высокой термической стабильностью до температуры начала плавления. Другой причиной высокой термической ста-

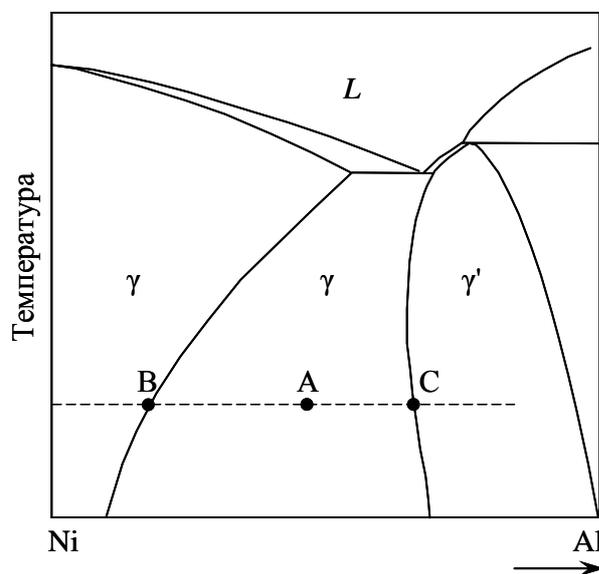


Рис. 1. Схематическое представление псевдобинарной фазовой диаграммы системы Ni–Al

бильности легированного соединения является незначительная растворимость тугоплавких элементов в основе сплава, что позволяет создавать конструкционные материалы, работоспособные при температурах до 1150–1200°C.

Ранее разработанный интерметаллидный сплав ВКНА-4У имеет стабильную структуру и может эксплуатироваться до температуры 1150°C с забросами до 1200°C. Сплав предназначен для получения отливок методом направленной кристаллизации. Сплав марки ВКНА-4УР является модификацией сплава ВКНА-4У и предназначен для литья деталей с поликристаллической равноосной структурой.

При изготовлении отливок с равноосной структурой, их жаропрочность резко снижается из-за низкой прочности границ зерен. Для повышения прочности границ зерен сплав дополнительно легируют некоторым количеством углерода и

циркония, образующих при кристаллизации первичные карбиды типа MeC, которые, выделяясь на границах зерен, повышают жаропрочность материала в интервале температур 900–1100°C. На рис. 2 представлена микроструктура сплава ВКНА-4УР.

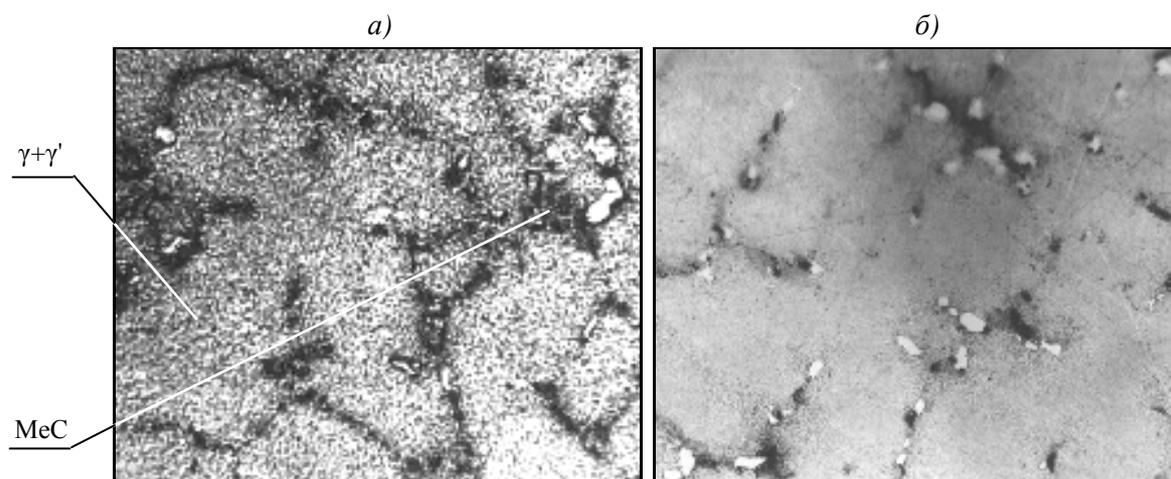


Рис. 2. Микроструктура сплава ВКНА-4УР:
а – протравленный шлиф (×100); б – шлиф без травления (×250)

В объеме зерен образуется эвтектика, состоящая из фаз γ и γ' , а на границах выделяются дисперсные частицы карбидов сложного состава типа MeC. Суммарное содержание γ' -фазы (Ni_3Al) в сплаве составляет 90–92%, γ -фазы (твердый раствор на основе никеля) – порядка 8–10%, а количество карбидной фазы составляет ~(1,5–2)% (по массе).

Эвтектическая структура в объеме зерна и наличие карбидных частиц на границах зерен характеризует высокий уровень прочности и жаропрочности в интервале температур 900–1200°C. При этом сплав сохраняет высокое сопротивление окислению до 1200°C и термическую стойкость (табл. 1–3).

Таблица 1

Механические свойства сплава ВКНА-4УР при комнатной и высоких температурах					
Свойства	Значения свойств при температуре испытаний, °С				
	20	900	1000	1100	1200
$\sigma_{0,2}$, МПа	550	590	480	305	150
σ_b , МПа	630	610	495	320	150
δ , %	3,0	1,5	1,5	2,0	10,5
ψ , %	2,0	0,5	2,0	5,0	14,0

Таблица 2

Жаропрочность сплава ВКНА-4УР			
Температура испытаний, °С	σ_{10}	σ_{100}	σ_{500}
	МПа		
900	260	180	125
1000	180	95	55
1100	110	50	25

Таблица 3

Жаростойкость сплава ВКНА-4УР	
Температура испытаний, °С	Привес за 100 ч, г/м ²
1100	6,0
1200	12,0

Термостойкость сплава (число теплосмен до появления трещины) при режиме $1200^{\circ}\text{C} \rightleftharpoons 200^{\circ}\text{C}$ ($\tau_{\text{н}} = \tau_{\text{охл}} = 1$ мин) составила 360 циклов.

Плотность сплава составляет 7910 кг/м^3 . Установлено, что сплав имеет удовлетворительные технологические свойства при литье фасонных деталей. В производственных условиях было проведено технологическое опробование сплава при литье створок реактивного сопла. Результаты опробования оказались положительными. В связи с этим разработаны технические условия на поставку шихтовой заготовки (ТУ 1-595-3-829–2004), дополнение к паспорту на сплав марки ВКНА-4У (№1598), а также технологическая рекомендация на литье фасонных деталей (ТР 1.595-1-505–2004). В лабораторных условиях отлиты качественные блоки сопловых лопаток (рис. 3).

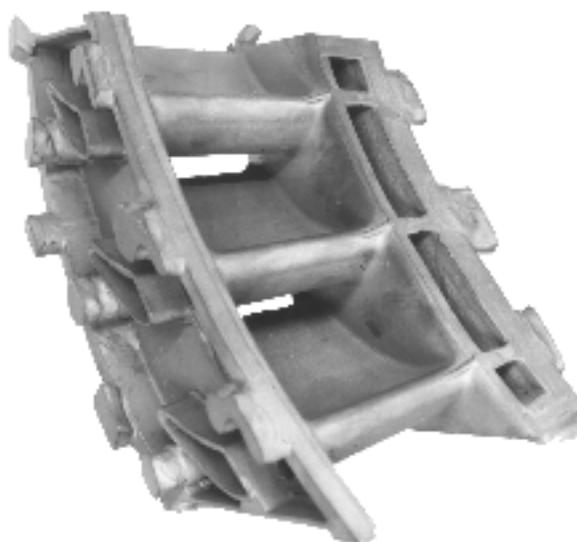


Рис. 3. Блок сопловых лопаток из сплава ВКНА-4УР

Для сплава ВКНА-4УР были определены литейные свойства (табл. 4), включающие критические точки при кристаллизации расплава, линейную и объемную усадку, а также трещиностойкость и жидкотекучесть.

Таблица 4

Литейные свойства сплава ВКНА-4УР

Температура, °С		Интервал кристаллизации ΔT , °С	Усадка, %	
солидус	ликвидус		линейная	объемная
1316	1366	50	1,82	4,3

Трещиностойкость определялась на технологической пробе, разработанной для оценки в условиях затрудненной усадки жидкого металла при кристаллизации. Показано, что трещиностойкость удовлетворительна при литье в податливые керамические формы.

Жидкотекучесть определялась при отливке тонкостенных деталей типа «створка» ($l=500$ мм). Жидкотекучесть удовлетворительна при соблюдении разработанных температурно-временных параметров литья.

С целью изучения вопроса о необходимости применения механической или термической обработки литых тонкостенных деталей была выпущена партия заготовок под образцы методом точного литья по выплавляемым моделям, проведен контроль ее качества и получены образцы в количестве 48 шт.

Для исследования образцы были обработаны тремя способами:

- вариант №1 – отжиг в вакууме при 1000°C в течение 4 ч;
- вариант №2 – галтовка керамическими гранулами в течение 8 мин со скоростью 125 об/мин с последующим отжигом в вакууме при 1000°C в течение 4 ч;
- вариант №3 – галтовка керамическими гранулами в течение 8 мин со скоростью 125 об/мин с последующим нанесением покрытия СДП-1 и отжигом в вакууме при 1000°C в течение 4 ч.

Влияние способов обработки образцов из сплава ВКНА-4УР на время до разрушения

Варианты обработки образцов	Время до разрушения, ч	
	при $T=975^{\circ}\text{C}$ и $\sigma=150$ МПа	при $T=1100^{\circ}\text{C}$ и $\sigma=50$ МПа
Эталонные свойства	$\geq 40,00$	
Вариант №1	20,67 7,00 39,83 12,50 36,34	23,27*
Вариант №2	37,50 31,50 5,25 34,92 28,92	27,62*
Вариант №3	53,25 37,50 55,00 43,58 73,42	52,55*
		52,5 127,5 144,0

* Средние значения.

Эталонные образцы из сплава ВКНА-4УР обладают ресурсом более 40 ч до разрушения при $T=975^{\circ}\text{C}$ и $\sigma = 150$ МПа. Сравнивая данные (табл. 5), можно отметить, что отжиг в вакууме, без нанесения покрытия, приводит к уменьшению времени до разрушения. Это может объясняться тем, что процесс «обеднения» поверхностного слоя в вакууме идет более интенсивно и без образования защитного оксидного слоя. Следовательно, можно предположить, что термическую обработку деталей следует проводить в атмосфере воздуха или аргона, где диффузия в поверхностном слое протекает с незначительной скоростью.

Обработка образцов по первым двум вариантам (см. табл. 5) не привела к ожидаемому увеличению ресурса до разрушения – напротив, данный параметр снизился в 1,7 и 1,4 раза соответственно. Обработка образцов по варианту №3 повышает ресурс до разрушения на 30%.

Таким образом, установлено, что применение сплава ВКНА-4УР для деталей горячего тракта ГТД, длительно эксплуатируемых при температурах до 1150°C , позволит:

- повысить рабочую температуру деталей на $50\text{--}100^{\circ}\text{C}$;
- увеличить срок службы и надежность деталей благодаря повышенной жаростойкости;
- снизить расход легирующих элементов.

Шихтовая заготовка нового сплава изготавливается и поставляется ВИАМ по ТУ 1-595-3-829–2004 «Шихтовая заготовка из литейного сплава марки ВКНА-4УР-ВИ».