

УДК 621.74.045:669.24:21.981

Н.А. ЛЫСЕНКО, вед. инженер ОАО «Мотор-Сич», г. Запорожье
В.В. КЛОЧИХИН, нач. бюро ОАО «Мотор-Сич», г. Запорожье
Д.А. ТЁМКИН, вед. инженер ОАО «Мотор-Сич», г. Запорожье

ВЛИЯНИЕ МОДИФИЦИРОВАНИЯ КАРБОНИТРИДОМ ТИТАНА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ЖСЗДК-ВИ С ПОНИЖЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ УГЛЕРОДА

Модифицирование жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ с пониженным содержанием углерода (0,02...0,04%) таблетками с ультрадисперсными частицами Ti(C,N) позволило повысить физико-механические и служебные характеристики, а также способствовало стабилизации значений механических и жаропрочных свойств.

Inoculation of heat-resistant low carbon alloy ЖСЗДК-ВИ (0,02...0,04%C) with superdispersed particle Ti(C,N) pellets has resulted in improvement of physical and mechanical and ancillary characteristics as well as made contribution to improving repeatability of mechanical and high-temperature property values.

Использование современных материалов для лопаток турбин с высокими показателями свойств обычно ограничивается тем, что увеличение прочности приводит к снижению пластичности. Данные по наноккомпозитам показывают, что уменьшение структурных элементов может привести к созданию новых типов материалов, сочетающих высокие прочностные и пластические характеристики. Действие комплексных модификаторов, содержащих карбидо- и нитридо-образующие элементы, сочетает модифицирование с микролегированием, обеспечивая измельчение зерна, твердорастворное и дисперсионное упрочнение при термообработке [1].

Несмотря на малое содержание, углерод в жаропрочных никелевых сплавах оказывает большое влияние на их структуру и свойства, так как образует не только труднорастворимый карбид титана, но и карбиды хрома типа Cr₂₃C₆; Cr₇C₃; а в присутствии вольфрама и молибдена – двойные карбиды типа Me₆C [2]. Содержание углерода в современных высокожаропрочных сплавах на никелевой основе с равноосной структурой не превышает 0,2 %. В некоторых случаях, когда необходимо обеспечить высокую пластичность, допустимое количество углерода в сплавах с равноосной структурой снижают до 0,03–0,07 %. Однако при этом наблюдается определенное падение прочности и долговечности [3].

Целью настоящего исследования является повышение физико-механических свойств материала рабочих лопаток турбин авиационных двигателей за счет применения при модифицировании наноразмерных порошков карбонитрида титана Ti(C,N), а также изучение влияния содержания углерода на структуру и физико-механические свойства сплава ЖСЗДК-ВИ.

В процессе получения образцов из жаропрочного литейного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ плавку проводили в печи УППФ-3М при температуре 1600^{±10} °C с последующей высокотемпературной термовременной обработкой расплава (ВТОР) при температуре 1700 °C в течении 7 минут. Модификатор Ti[Ti(C,N)] вводили в таблетированном состоянии в количестве 0,05 % (весовых) при температуре 1650^{±10} °C с выдержкой 1,0...1,5 мин.

Заливку расплава после введения модификатора осуществляли при температуре 1550^{±10} °C в нагретые до температуры 900 °C керамические формы.

Содержание компонентов в таблетке находится в следующем соотношении: Ti – 90 %; Ti(C,N) – 10 %.

Исследование проводили в сравнении со сплавом, полученным по серийной технологии без использования модификатора с проведением ВТОР с различным содержанием углерода.

Химический состав (без учета содержания углерода) исходного сплава ЖСЗДК-ВИ (варианты 1...4), а также с использованием в качестве модификатора ультрадисперсных частиц Ti[Ti(C,N)] (варианты 1_м...4_м), соответствует требованиям ОСТ1.90.126-91, табл. 1. При этом следует отметить, что в материале образцов, полученных по вариантам «1» и «2» (а также «1_м» и «2_м», соответственно), содержание углерода находится ниже требований ОСТа.

Таблица 1

Химический состав сплава ЖСЗДК-ВИ

Марка сплава	Вариант	Содержание элементов, %											
		C	Cr	Co	W	Al	Ti	Mo	Fe	Si	Mn	S	B
ЖСЗДК-ВИ	«1»	0,02	11,46	9,55	4,49	4,35	2,78	4,18	<2,0	<0,4	<0,4	0,002	0,012
	«2»	0,04	11,40	9,45	4,50	4,32	2,94	4,06	<2,0	<0,4	<0,4	0,002	0,017
	«3»	0,07	11,40	9,97	4,30	4,41	2,64	4,09	0,09	<0,4	<0,4	0,002	0,015
	«4»	0,10	11,73	9,45	4,48	4,51	2,93	4,05	<2,0	<0,4	<0,4	0,003	0,016
Нормы ОСТ1.90.126-91		0,06-0,11	11,0-12,5	8,0-10,0	3,8-4,5	4,0-4,8	2,5-3,2	3,8-4,5	≤ 2,0	≤ 0,4	≤ 0,4	≤ 0,015	≤ 0,020

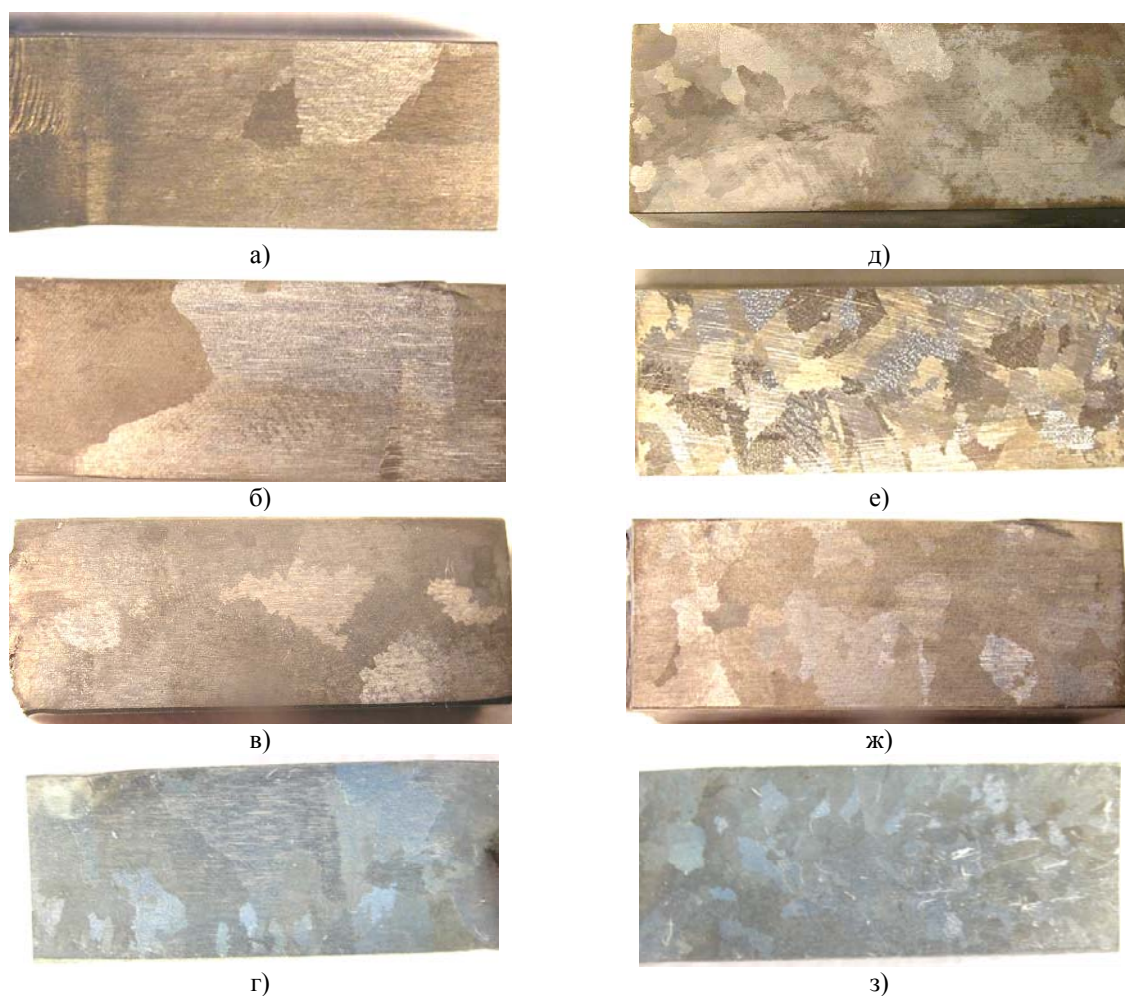
Варианты модифицирования в сравнении с серийным сплавом при различном содержании углерода приведены в таблице 2.

При изучении макроструктурного состояния установлено, что размер макрозерна образцов, модифицированных карбонитридными частицами, более чем в 2 раза меньше, чем в аналогичных образцах, отлитых по серийной технологии (рис. 1). Измельчению зерна также способствует повышение концентрации углерода в сплаве (как в серийном, так и в модифицированном).

Таблица 2

Варианты модифицирования при различном содержании углерода

Марка сплава	Состояние материала	Вариант	Содержание углерода в исходном сплаве, %
ЖСЗДК-ВИ	Серийный сплав ЖСЗДК-ВИ (без присадки модификатора)	«1»	0,02
		«2»	0,04
		«3»	0,07
		«4»	0,10
	Модифицирование Ti[Ti(C,N)]	«1 _м »	0,02
		«2 _м »	0,04
		«3 _м »	0,07
		«4 _м »	0,10



a – вариант «1»; *б* – вариант «2»; *в* – вариант «3»; *г* – вариант «4»; *д* – вариант «1_м»;
е – вариант «2_м»; *ж* – вариант «3_м»; *з* – вариант «4_м»

Рис. 1. Макроструктура образцов из сплава ЖСЗДК-ВИ без присадки модификатора (*a*, *б*, *в*, *г*) и модифицированного таблетками Ti[Ti(C,N)] (*д*, *е*, *ж*, *з*), $\times 2$

Все увеличивающееся использование охлаждаемых турбинных лопаток из никелевых сплавов показало, что крупные зерна, пронизывающие практически полностью их тонкие сечения, приводили к снижению кратковременной прочности и сопротивления ползучести. В то же время излишнее измельчение зерен чревато уменьшением механических и служебных показателей [4].

Механические и жаропрочные свойства определяли на отдельно отлитых пальчиковых образцах диаметром 12 мм после их термической обработки по стандартному режиму:

– гомогенизация при температуре 1210 °С (выдержка 3,5 часа), охлаждение на воздухе.

Результаты испытаний механических свойств при комнатной температуре представлены в таблице 3.

Таблица 3

Механические свойства сплава ЖСЗДК-ВИ после различных вариантов модифицирования

Состояние материала	Вариант	Содержание углерода в исходном сплаве, %	Механические свойства при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$		
			$\sigma_{\text{в}}$, МПа	δ , %	KCU , Дж/см ²
Серийный сплав ЖСЗДК-ВИ (без присадки модификатора)	«1»	0,02	<u>859,0–903,7</u> 881,4	<u>10,0–17,4</u> 13,7	<u>113,8–137,5</u> 125,7
	«2»	0,04	<u>925,0–1045</u> 985,0	<u>12,0–14,0</u> 13,0	<u>63,8–86,3</u> 75,1
	«3»	0,07	<u>950,0–1040,0</u> 985,7	<u>11,2–17,4</u> 15,3	<u>52,5–62,5</u> 57,9
	«4»	0,10	<u>952,0–1048,0</u> 998,3	<u>11,4–14,2</u> 12,7	<u>24,5–42,5</u> 36,4
Модифицирование Ti[Ti(C,N)]	«1 _м »	0,02	<u>975,0–985,0</u> 980,0	<u>9,6–10,8</u> 10,2	<u>55,0–71,3</u> 62,2
	«2 _м »	0,04	<u>1049,0–1066,0</u> 1057,5	<u>12,4–14,4</u> 13,4	<u>58,8–68,8</u> 63,8
	«3 _м »	0,07	<u>980,0–1079,0</u> 1058,7	<u>7,6–13,2</u> 10,3	<u>52,5–78,7</u> 59,1
	«4 _м »	0,10	<u>1027,5–1110,0</u> 1069,8	<u>11,9–14,0</u> 13,0	<u>39,8–62,5</u> 54,2
Нормы ОСТ1.90.126-91			$\geq 950,0$	$\geq 7,0$	$\geq 30,0$

Примечание. Числитель – минимальные-максимальные значения; знаменатель – средние значения.

Из данных, приведенных в таблице 3, видно, что модифицирование сплава ЖСЗДК-ВИ таблетками с ультрадисперсными частицами Ti(C,N), а также увеличение содержания углерода обуславливают повышение предела прочности сплава, при снижении пластических характеристик. Предел прочности серийного сплава с содержанием углерода 0,02...0,04 % не соответствует требованиям ОСТа. Присадка 0,05 % карбонитрида титана в сплав с 0,02...0,04 %C способствует повышению $\sigma_{\text{в}}$ до значений, превышающих требования ОСТа.

Снижение пластичности (KCU) в немодифицированном металле с повышением концентрации углерода с 0,02 % до 0,1 % достигает 3,5 раз. В некоторых образцах с 0,1 %C значения ударной вязкости находятся ниже норм ОСТа. Отрицательное влияние углерода в модифицированном металле заметно меньше – уменьшение величины ударной вязкости не превышает 15 %, см. в табл. 3.

В сплавах с 0,02 %C и 0,04 %C наблюдается падение жаропрочности до $\tau_p = 1^{55} \dots 5^{55}$ час., табл. 4. Модифицирование приводит к существенному увеличению времени до разрушения при температуре испытания 850 °C и напряжении 350 МПа сплава ЖСЗДК-ВИ от 204⁰⁰ час. до 309³⁰ час., соответственно, что в 4...6 раз превышает требования технической документации.

Жаропрочные свойства исследуемого сплава при содержании углерода 0,07 % и 0,1 %, как серийного сплава, так и модифицированного значительно превышают требования ОСТ1.90.126-91 и составляют 141⁵⁰...398⁰⁰ час. – в исходном сплаве и 297³⁵...787³⁰ час. – с присадкой 0,05 % Ti[Ti(C,N)].

Таким образом, модифицирование сплава ЖСЗДК-ВИ способствует получению более стабильных значений механических и жаропрочных свойств. При этом следует отметить, что введение в сплав 0,05 % Ti[Ti(C,N)] практически устраняет отрицательное влияние на физико-механические свойства пониженного содержания углерода.

Металлографическим исследованием установлено, что литейный жаропрочный сплав ЖСЗДК-ВИ имеет типичную дендритную структуру. Оси дендритов – никелевая матрица (ГЦК-твердый раствор), из которой при охлаждении выделяются частицы вторичной интерметаллидной γ' -фазы.

При содержании в серийном сплаве 0,02...0,04 %С выделение первичных карбидов типа MeC и карбонитридов незначительно (рис. 2а, б). Повышение концентрации углерода, а также введение модификатора Ti[Ti(C,N)] способствуют дополнительному образованию карбидов, карбонитридов и нитридов, увеличению их количества и размеров (рис. 2в...2з) (табл. 5). Первичные карбиды типа MeC в модифицированном сплаве с различным содержанием углерода (0,02...0,1 %) выделяются в виде дискретных частиц и равномерно распределены в объеме металла (см. рис. 2д, е, ж, з). Тогда как, в образцах с содержанием углерода 0,07...0,1 %, отлитых по серийной технологии, на границах зерен обнаружены полиэдрические, а также пленочные карбиды (см. рис. 2в, з).

Таблица 4
Жаропрочные свойства сплава ЖСЗДК-ВИ после различных вариантов модифицирования

Состояние сплава	Вариант	Содержание углерода в исходном сплаве, %	Длительная прочность $t = 20$ °С		
			$T_{исп.}$, °С	σ_b , МПа	τ_p , час.
Серийный сплав ЖСЗДК-ВИ (без присадки модификатора)	«1»	0,02	850	340	$\frac{2^{30} - 3^{40}}{3^{10}}$
	«2»	0,04	850	340	$\frac{1^{55} - 5^{55}}{3^{55}}$
	«3»	0,07	850	340	$\frac{288^{00} - 357^{00}}{327^{20}}$
	«4»	0,10	850	340	$\frac{141^{50} - 398^{00}}{309^{40}}$
Модифицирование Ti[Ti(C,N)]	«1 _м »	0,02	850	340	$\frac{204^{00} - 297^{00}}{250^{30}}$
	«2 _м »	0,04	850	340	$\frac{304^{00} - 309^{30}}{306^{40}}$
	«3 _м »	0,07	850	340	$\frac{465^{00} - 787^{30}}{577^{15}}$
	«4 _м »	0,10	850	340	$\frac{297^{35} - 437^{40}}{367^{20}}$
Нормы ОСТ1.90.126-91			850	340	$\geq 50,0$

Примечание. Числитель – минимальные-максимальные значения; знаменатель – средние значения.

Модифицирование сплава Ti[Ti(C,N)] приводит к уменьшению микропористости и измельчению дендритной структуры. При этом уменьшается расстояние между осями дендритов второго порядка и, соответственно, размер дендритной ячейки (см. табл. 5).

Анализ результатов микротвердости матрицы (оси дендритов) исследуемых сплавов после проведения термообработки показал, что повышение концентрации углерода в сплаве ЖСЗДК-ВИ способствует увеличению значений микротвердости (табл. 6). Наряду с этим, при модифицировании частицами Ti[Ti(C,N)] наблюдается тенденция к дополнительному упрочнению сплава (см. табл. 6).

Таблица 5

Размеры структурных составляющих в образцах из сплава ЖСЗДК-ВИ

Состояние сплава	Вариант	Размер карбидов, мкм	Размер нитридов, мкм	Размер микропор, мкм	Расстояние между осями дендритов 2 ^{го} порядка, мкм
Серийный сплав ЖСЗДК-ВИ (без присадки модификатора)	«1»	2...6	1...4 (редко)	до 70	50...75
	«2»	2...6 (един.-12)	~2 - редко	5...25 (един. -50)	30...75
	«3»	4...10 (един.-16)	~1 - редко	5...25 (един. -50)	50...75
	«4»	3...14 (един.-22)	практически отсутствуют		50...70
Модифицирование Ti[Ti(C,N)]	«1 _м »	2...8 (един.-18)	1...6	до 30	45...55
	«2 _м »	2...8 (един.-18)	1...6	до 20	40...50
	«3 _м »	2...8 (един.-20)	1...8	до 20	40...50
	«4 _м »	2...8 (един.-20)	1...6	до 20	40...50

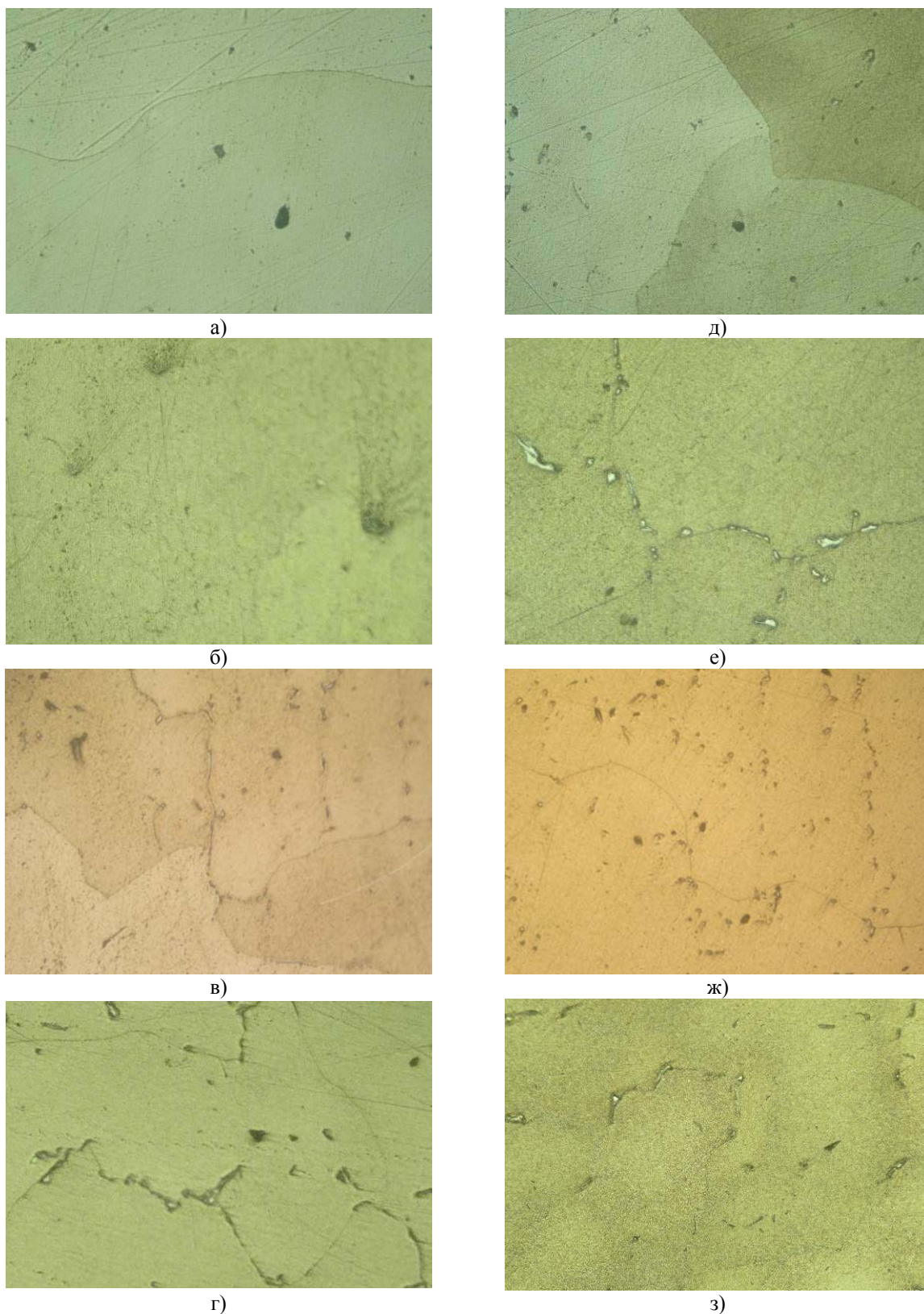
Примечание. В скобках представлены средние значения.

Таблица 6

Микротвердость образцов из сплава ЖСЗДК-ВИ после стандартной термообработки

Состояние сплава	Вариант	Микротвердость матрицы, HV, МПа
Серийный сплав ЖСЗДК-ВИ (без присадки модификатора)	«1»	4120,0...4470,0 (4295,0)
	«2»	4290,0...4470,0 (4380,0)
	«3»	5086,0...5320,0 (5241,0)
	«4»	5086,0...5320,0 (5241,0)
Модифицирование Ti[Ti(C,N)]	«1 _м »	4290,0...4663,0 (4476,5)
	«2 _м »	4290,0...4663,0 (4476,5)
	«3 _м »	5570,0...5839,0 (5654,5)
	«4 _м »	5570,0...5839,0 (5654,5)

Примечание. В скобках представлены средние значения микротвердости.



a – вариант «1»; *б* – вариант «2»; *в* – вариант «3»; *г* – вариант «4»;
д – вариант «1_м»; *е* – вариант «2_м»; *ж* – вариант «3_м»; *з* – вариант «4_м»

Рис. 2. Микроструктура образцов из сплава ЖСЗДК-ВИ без присадки модификатора (*a*, *б*, *в*, *г*) и модифицированного таблетками $Ti[Ti(C,N)]$ (*д*, *е*, *ж*, *з*), $\times 500$

Выводы

1. В исходном сплаве ЖСЗДК-ВИ с пониженным содержанием углерода (0,02...0,04 %) значения предела прочности при комнатной температуре, а также длительной прочности при температуре 850 °С и напряжении 350 МПа находятся ниже требований ОСТ1.90.126-91.

2. Модифицирование сплава ЖСЗДК-ВИ таблетками с ультрадисперсными частицами Ti(C,N) в количестве 0,05 % способствует получению более стабильных значений механических и жаропрочных свойств и практически устраняет отрицательное влияние на физико-механические свойства пониженного содержания углерода.

3. Присадка карбонитридов титана приводит к измельчению макрозерна и уменьшению микропористости. При этом уменьшается размер дендритной ячейки и расстояние между осями дендритов второго порядка.

4. В модифицированном сплаве наблюдается повышение количества карбонитридных частиц. Карбонитриды равномерно распределены в объеме металла. Первичные карбиды приобретают более благоприятную морфологию, выделяясь в виде дискретных глобулярных частиц.

Список литературы: 1. *Сабуров В.П.* Упрочняющее модифицирование стали и сплавов // Литейное производство. – 1988. – № 9. – С. 7. 2. *Химушин Ф.Ф.* Жаропрочные стали и сплавы. – М.: Металлургия, 1969. – С. 357-359. 3. *Каблов Е.Н.* Литые лопатки газотурбинных двигателей. – Сплавы, технологии, покрытия. – М.: МИСИС, 2001. – С. 40-41. 4. *Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных установок / под ред. Ч.Т. Симса, Н.С. Столоффа, У.К. Хагеля: Пер. с англ. в 2-х книгах. Кн. I / Под ред. Р.Е. Шалина.* – М.: Металлургия, 1995. – 384 с.

© Лысенко Н.А., Клочихин В.В., Тёмкин Д.А., 2010
Поступила в редколлегию 16.02.2010