

УДК 621.74.045:669.245.018

Е. В. МИЛОНИН¹, Н. А. ЛЫСЕНКО¹, В. В. НАУМИК²¹ АО "Мотор – Сич", Запорожье, Украина² Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

НАПРАВЛЕННАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ ЛИТЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ОПЫТНОГО ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА НА БАЗЕ ЖС32-ВИ

Изучены состав, структура и свойства литых образцов, полученных из опытного жаропрочного никелевого сплава на базе ЖС32-ВИ, с повышенным содержанием тантала при пониженном содержании углерода, методом высокоскоростной направленной кристаллизации. Механические свойства исследованных образцов удовлетворительные и отвечают требованиям ТУ, длительная прочность опытного сплава более чем в 3 раза превышает средние значения для сплава ЖС32-ВИ. Данные проведенных исследований подтверждают положительное влияние повышенного содержания тантала на жаропрочность сплавов, применяемых в авиационном машиностроении и перспективность использования низкоуглеродистой модификации сплава на базе ЖС32-ВИ.

Ключевые слова: жаропрочный никелевый сплав, химический состав, тантал, углерод, направленная кристаллизация, термообработка, микроструктура, механические свойства, длительная прочность.

Введение

Для изготовления литых рабочих лопаток с направленной и монокристаллической макроструктурой широкое распространение получил жаропрочный никелевый сплав ЖС32-ВИ. Одним из основных легирующих элементов в его составе является тантал, который существенно повышает прочностные свойства никелевых сплавов и, кроме того, является умеренным по стоимости, в сравнении с таким элементом как рений.

Тантал [1] является одним из элементов, которые оказывают сильное влияние на термическую устойчивость выделений упрочняющей γ' -фазы.

Одной из основных характеристик, определяющих жаропрочность дисперсионно твердеющих сплавов, является термическая стойкость выделяющихся в них карбидов и степень их связи с металлической матрицей. Основные карбидообразующие элементы в жаропрочных никелевых сплавах – хром, ванадий, вольфрам, ниобий, а также тантал. Карбид хрома обладает большой склонностью к коагуляции и не позволяет получить большого упрочняющего эффекта при высоких температурах [2]. Кроме того снижение содержания хрома в γ -твердом растворе (за счет образования карбидов) приводит к повышению растворимости γ' -фазы.

Тантал повышает уровень механических свойств никелевых сплавов не только за счет упрочнения γ -твердого раствора и γ' -фазы, но и за счет образования монокарбида тантала, более прочно

связанного с матрицей по сравнению с другими видами карбидов [3]. Карбид тантала в дисперсионном упрочнении участия не принимает [2]. С повышением концентрации тантала в сплаве (или при уменьшении содержания титана) он принимает более интенсивное участие в образовании карбида MeC, частично вытесняя из него титан, вольфрам, молибден [1]. Связывание γ' -образующих элементов в карбиды приводит к снижению количества упрочняющей фазы и отрицательно сказывается на жаропрочности сплавов [2].

Целью данной работы является исследование качества материала образцов, отлитых методом высокоскоростной направленной кристаллизации (ВНК) на установке УВНК-9А из опытного жаропрочного никелевого сплава на базе ЖС32-ВИ, с повышенным содержанием Ta, без Nb, при пониженных содержаниях Co и C.

Основной материал исследования

Исследование проводили в сравнении с аналогичными образцами, отлитыми методом ВНК из сплава ЖС32-ВИ.

Химический состав исследованных опытных образцов из опытного сплава в сравнении со сплавом ЖС32-ВИ (ВНК) представлен в таблице 1.

Механические и жаропрочные свойства определяли на образцах (диаметром 15 мм, длиной 135 мм), отлитых методом направленной кристаллизации, после термообработки по режимам:

Таблица 1

Химический состав опытных литых образцов

Сплав	Содержание элементов, %								
	C	Cr	Co	W	Mo	Al	Nb	Ta	Re
Опытный сплав	0,050	4,24	5,89	7,51	2,13	7,16	-	7,38	3,03
	0,040	4,25	5,86	7,49	2,16	7,18	-	7,37	3,01
	0,056	4,22	5,89	7,59	2,11	7,24	-	7,32	3,10
	0,045	4,25	5,89	7,54	2,15	7,26	-	7,33	3,04
ЖС32-ВИ (ВНК)	0,15	4,85	9,43	8,68	1,17	5,85	1,55	4,10	3,80
Нормы ТУ1-92-177-91 для сплава ЖС32-ВИ	0,12...	4,5...	9,0...	8,1...	0,9...	5,7...	1,4...	3,7...	3,6...
	0,17	5,5	9,5	8,9	1,3	6,2	1,8	4,3	4,3

Продолжение табл. 1

Сплав	Содержание элементов, %								
	Si	Mn	Fe	S	P	Pb	Bi	O ₂	N ₂
Опытный сплав	0,060	-	0,05	0,003	0,002	0,0003	0,0002	0,00132	0,00066
	0,061	-	0,05	0,003	0,002	0,0003	0,0002	0,00127	0,00071
	0,054	-	0,05	0,003	0,002	0,0003	0,0002	0,00093	0,00046
	0,060	-	0,05	0,003	0,002	0,0003	0,0002	-	-
ЖС32-ВИ (ВНК)	<0,2	<0,3	<0,5	0,003	0,003	0,0003	0,0002	0,00123	0,00043
Нормы ТУ1-92-177-91 для ЖС32-ВИ	≤0,3	≤0,3	≤0,5	≤0,005	≤0,005	≤0,001	≤0,0005	≤0,002	≤0,002

Примечание. Церий, иттрий, лантан вводят по расчету и химическим анализом не определяют

– для образцов из опытного сплава: гомогенизация в вакууме при температуре 1255 ± 10 °С в течение 1 ч. 15 мин.;

– для образцов из сплава ЖС32-ВИ (ВНК): гомогенизация в вакууме при температуре 1270 ± 10 °С в течение 2 ч.

На стартовых конусах образцов с монокристаллической структурой, отлитых из опытного сплава и ЖС32-ВИ методом ВНК, определили кристаллографическую ориентацию (КГО). Установлено,

что значения отклонений направления [001] от оси Z в образцах, отлитых из опытного жаропрочного никелевого сплава, колеблются от 0,2 угл. град до 6,3 угл. град., а из сплава ЖС32-ВИ (ВНК) – от 2,0 угл. град до 7,1 угл. град. (при норме по ТУ для сплава ЖС32-ВИ (ВНК) – не более 20 угл. град.).

Остальные образцы имели направленную структуру с количеством кристаллов не более 3.

Результаты механических испытаний и испытаний на длительную прочность приведены в таблице 2.

Таблица 2

Механические и жаропрочные свойства опытных образцов

Материал сплава	макроструктура	Механические свойства при 20 °С			Длительная прочность		
		σ_b , кгс/мм ²	δ , %	Ψ , %	$T_{исп}$, °С	σ , кгс/мм ²	τ_p , час.
Опытный сплав	монокристаллическая	112,0	6,4	11,2	975	25	236,0
		114,6	6,0	7,8			226,0
		104,8	7,2	7,4	1000	28	65,0
		115,0	8,8	11,2			69,8 ⁵⁰
	направленная	95,9	14,8	14,3	975	25	207,5
		95,7	11,2	15,4			228,5
		112,0	8,0	13,5	1000	28	57,0 ⁰⁰
		109,4	8,4	13,1			54,0
ЖС32-ВИ (ВНК)	монокристаллическая	115,6	6,0	8,2	1000	28	86,5 ³⁰
		112,6	6,4	8,2			61,5
	направленная	96,0	7,6	-	975	25	64,0
		97,9	12,0	-			74,5
Нормы 500ТУМ-2		≥ 90,0	≥ 6,0	-	975	25	≥ 40,0
Нормы ТУ1-92-177-91; 18Т-ТУ-158 и 18Т-ТУ-187		≥ 90,0	≥ 6,0	-	1000	28	≥ 40,0

Из приведенных результатов видно, что механические и жаропрочные свойства исследуемых образцов, удовлетворительные и отвечают требованиям ТУ для сплава ЖС32-ВИ. При этом следует отметить, что значения длительной прочности образцов из опытного жаропрочного никелевого сплава, испытанных при температуре 1000 °С и напряжении 28 кгс/мм², находятся на уровне значений для сплава ЖС32-ВИ. При испытании при температуре 975 °С и напряжении 25 кгс/мм² длительная прочность опытного сплава более чем в 3 раза превышает средние значения для сплава ЖС32-ВИ (см. табл. 2). Приведенные данные подтверждают поло-

жительное влияние повышенного содержания Та на жаропрочность и перспективность применения низкоуглеродистой модификации сплава на базе ЖС32-ВИ.

При металлографическом исследовании не травленных микрошлифов в материале обнаружены микропоры и усадочная рыхлота, а также единичные оксидные включения размером, не превышающим 20 мкм (рис. 1 а, б, в, г). Кроме того, в сплаве имеются мелкие включения сферической формы светло-серого цвета (в отдельных случаях с розовыми вкраплениями) размером ~2...4 мкм, характерные для сложных окислов (рис. 1 д, е).

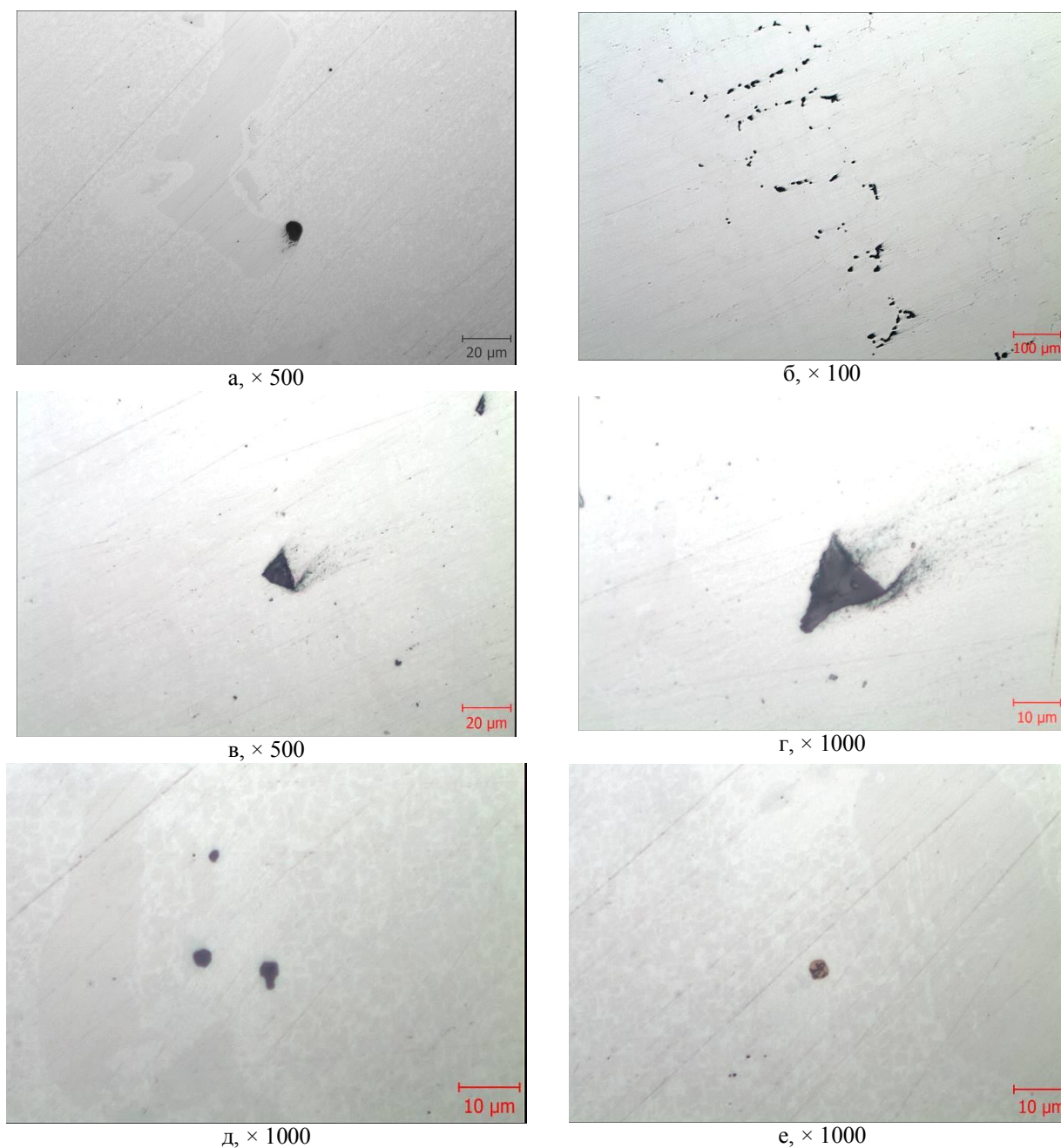


Рис. 1. Микропоры (а), усадочная рыхлота (б) и оксидные включения (в, г, д, е) в материале образцов из опытного жаропрочного никелевого сплава

Карбиды и карбонитриды методом оптической микроскопии при увеличениях до $\times 1000$ не обнаружены, что характерно для структуры низкоуглеродистого никелевого сплава ($C \leq 0,08\%$).

Основными структурными составляющими материала термически обработанных образцов из опытного жаропрочного никелевого сплава являются: γ -твердый раствор с наличием интерметаллидной γ' -фазы и эвтектической (γ - γ')-фазы (рис. 2 а, б, в, г). Структуры, характерные для перегретого состояния никелевого жаропрочного сплава, не обнаружены;

перегрева не обнаружены.

При сравнительном исследовании установлено, что в микроструктуре образцов, отлитых из опытного жаропрочного никелевого сплава, после проведения термообработки наблюдается большое количество не растворившейся в твердом растворе эвтектики (γ - γ'), а также размерная неоднородность частиц γ' -фазы в осях и междендритных пространствах вследствие недостаточного выравнивания химического состава в пределах дендритной ячейки (см. рис. 2 а, б, в, г). Тогда как, в сплаве ЖС32-ВИ (ВНК)

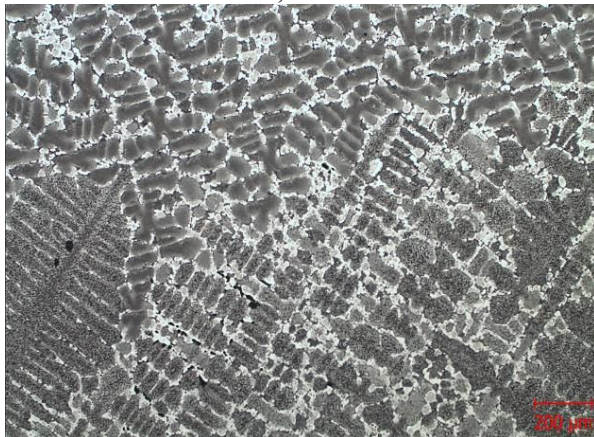
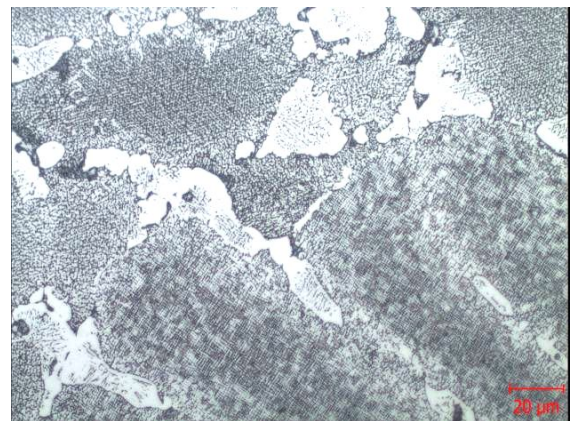
а, $\times 50$ б, $\times 500$ в, $\times 50$ г, $\times 500$ д, $\times 50$ е, $\times 500$

Рис. 2. Микроструктура образцов из опытного жаропрочного никелевого сплава (а, б, в, г) и ЖС32-ВИ (ВНК) (д, е) после термообработки: а, б, д, е – монокристаллическая структура; в, г – направленная структура

проведение стандартной термообработки способствует растворению значительного количества эвтектической (γ - γ')-фазы и уменьшению структурной неоднородности (рис. 2 д, е).

Повышенное содержание эвтектической фазы (γ - γ') в опытном сплаве, вероятно, обусловлено проведением термообработки при температуре значительно ниже температуры полного растворения (γ - γ')-фазы в твердом растворе, а также пониженным содержанием углерода (0,040...0,056%) вследствие чего в сплаве практически отсутствуют карбиды.

Параметры структурных составляющих в опытных образцах из опытного сплава в сравнении со сплавом ЖС32-ВИ (ВНК) представлены в таблице 3.

С целью уменьшения структурной неоднородности за счет более полного растворения эвтектической (γ - γ')-фазы в твердом растворе и выравнивания размеров γ' -фазы в осях и междендритных пространствах были дополнительно отобраны образцы опытного сплава с монокристаллической структурой

и термообработаны при более высокой температуре по режиму, предусмотренному для сплава ЖС32-ВИ (ВНК): гомогенизация в вакууме при температуре 1270 ± 10 °С в течение 2ч.

В микроструктуре термически обработанных по указанному выше режиму образцов наблюдается существенное выравнивание размеров γ' -фазы в осях и межосных пространствах дендритов, а также частичное растворение эвтектики (γ - γ') в γ -твердом растворе с заметной ее фрагментацией (рис. 3). Следов перегрева не обнаружено.

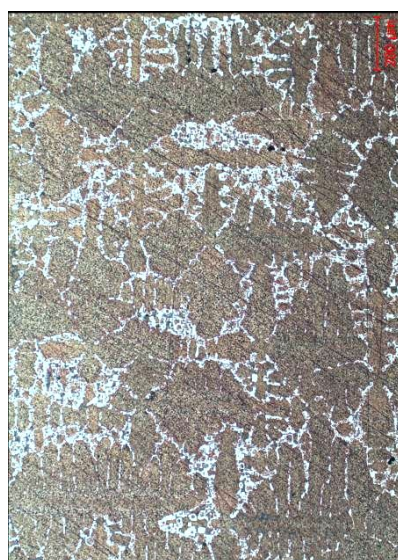
Механические и жаропрочные свойства монокристаллических образцов, термообработанных при температуре 1270 ± 10 °С в течение 2ч., приведены в таблице 4.

Из приведенных данных видно, что механические и жаропрочные свойства опытного сплава после термообработки по режиму, предусмотренному для сплава ЖС32-ВИ, удовлетворительные и отвечают требованиям ТУ для сплава ЖС32-ВИ (ВНК).

Таблица 3

Параметры структурных составляющих опытного жаропрочного никелевого сплава

Сплав	Размеры структурных составляющих, мкм					
	карбиды		эвтектика типа (γ - γ')	микропоры	Расстояние между осями дендритов	
	глобулярные типа МС	пластинчатые типа М ₆ С			І порядка	ІІ порядка
Опытный сплав	-	-	5...100 (единичные до 135)	до 20	309...388	50...65
	-	-	5...50	до 20	320...399	35...55
ЖС32-ВИ	2...18	10...35 (единичные до 50)	5...60 (единичные до 75)	10...80	250...350	70...85



а, × 50



б, × 200



в, × 1000

Рис. 3. Микроструктура образцов из опытного жаропрочного никелевого сплава после термообработки при температуре 1270 °С

Таблица 4

Механические и жаропрочные свойства опытного сплава после термообработки при температуре 1270 °С

Сплав	Кристаллографическая ориентация (КГО), угл. град	Механические свойства при 20°С			Длительная прочность		
		σ_b , кгс/мм ²	δ , %	Ψ , %	$T_{исп.}$, °С	σ , кгс/мм ²	τ_p , час.
Опытный сплав	1,0	118,1	10,0	8,6	975	25	220,5
	4,3	103,9	12,0	7,9	975	25	231,0
	6,3	91,8	30,0	23,4	1000	28	77,0
Нормы 500ТУМ-2		≥ 90,0	≥ 6,0	-	975	25	≥40,0
Нормы ТУ1-92-177-91; 18Т-ТУ-158 и 18Т-ТУ-187		≥ 90,0	≥ 6,0	-	1000	28	≥40,0

Проведение термообработки при более высокой температуре (1270 °С вместо 1255 °С) не привело к существенному повышению механических и жаропрочных свойств исследуемого сплава.

Выводы

Механические и жаропрочные свойства исследованных образцов опытного жаропрочного никелевого сплава, удовлетворительные и отвечают требованиям ТУ для сплава ЖС32-ВИ.

При этом следует отметить, что значения длительной прочности опытных образцов, испытанных при температуре 1000 °С и напряжении 28 кгс/мм², находятся на уровне значений для сплава ЖС32-ВИ. При испытании при температуре 975 °С и напряжении 25 кгс/мм² длительная прочность опытного сплава более чем в 3 раза превышает средние значения для сплава ЖС32-ВИ. Приведенные данные подтверждают положительное влияние повышенного содержания Та на жаропрочность и перспективность применения низкоуглеродистой модификации сплава на базе ЖС32-ВИ

Микроструктура термически обработанных образцов опытного сплава при температуре 1255°С характерна для литейных жаропрочных никелевых сплавов с наличием структурной неоднородности. Следов перегрева не обнаружено.

Повышенное содержание эвтектической фазы (γ - γ') и разноразмерность частиц γ' -фазы в осях и междендритных пространствах в опытном сплаве, вероятно, обусловлены проведением термообработки при температуре значительно ниже температуры полного растворения γ' и (γ - γ')-фаз в твердом растворе, а также пониженным содержанием углерода.

Гомогенизация при температуре 1270 °С по режиму предусмотренному для сплава ЖС32-ВИ, не

приводит к полному растворению эвтектической (γ - γ')-фазы в γ -твердом растворе, но способствует существенному выравниванию размеров γ' -фазы в осях и междендритных пространствах.

Проведение термообработки при более высокой температуре (1270 °С вместо 1255 °С) не привело к существенному повышению механических и жаропрочных свойств опытного сплава.

Литература

1. Физико-химический фазовый анализ сталей и сплавов [Текст] / Н. Ф. Лашко, Л. В. Заславская, М. Н. Козлова [и др.]. – М. : Металлургия, 1978. – 336 с.
2. Химушин, Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы [Текст] / Ф. Ф. Химушин. – М. : Металлургия, 1969. – 752 с.
3. Бурова, Н.Н. Структурные особенности никелевых сплавов, легированных танталом [Текст] / Н. Н. Бурова, С. Б. Масленков // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1979. – №5. – С. 19–22.

References

1. Lashko, N. F., Zaslavskaja, L. V., Kozlova, M. N. *Fiziko-himicheskij fazovyy analiz staley i splavov* [Physical-chemical phase analysis of steels and alloys]. Moscow, Metallurgija Publ., 1978. 336 p.
2. Himushin, F. F. *Zharoprochnyye stali i splavy* [Thermal resistant steels and alloys]. Moscow, Metallurgija Publ., 1969. 752 p.
3. Burova, N. N., Maslenkov, S. B. *Strukturnye osobennosti nikelovykh splavov, legirovannykh tantalom* [Structural distinctive features of nickel-base alloys casted by tantalum]. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov*, 1979, no. 5, pp. 19-22.

Поступила в редакцию 27.05.2016, рассмотрена на редколлегии 16.06.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Машины и технологии литейного производства» В. В. Лунёв, Запорожский национальный технический университет, Запорожье.

СПРЯМОВАНА КРИСТАЛІЗАЦІЯ ЛИТИХ ВИРОБІВ З ДОСЛІДНОГО ЖАРОМІЦНОГО СПЛАВУ НА БАЗІ ЖС32-ВІ

Є. В. Мілонін, Н. О. Лисенко, В. В. Наумик

Вивчено склад, структуру та властивості литих зразків, що були отримані з дослідного жароміцного нікелевого сплаву на базі ЖС32-ВІ, з підвищеним вмістом танталу при зниженому вмісті вуглецю, методом високошвидкісної спрямованої кристалізації. Механічні властивості досліджених зразків задовільні та відповідають вимогам ТУ, довготривала міцність дослідного сплаву більш ніж в три рази перевищують середнє значення для сплаву ЖС32-ВІ. Дані проведених досліджень підтверджують позитивний вплив підвищеного вмісту Та на жароміцність та перспективність застосування низько вуглецевої модифікації сплаву на базі ЖС32-ВІ.

Ключові слова: жароміцний нікелевий сплав, хімічний склад, тантал, вуглець, спрямована кристалізація, термообробка, мікроструктура, механічні властивості, довготривала міцність.

DIRECTIONAL SOLIDIFICATION CAST PRODUCTS OF EXPERIENCED SUPERALLOY BASE HAS32-VI

E. V. Milonin, N. A. Lysenko, V. V. Naumyk

It is studied the composition, structure and properties of the samples cast of experienced heat-resistant nickel alloy based HA32-VI, with a high content of tantalum at a reduced carbon-sort content by high-speed directional solidification. The mechanical properties of the test samples satisfactory and comply with specifications, an experienced long-term strength of the alloy is more than 3 times higher than the average values for the alloy HA32-VI. These studies under-confirms the positive impact of the increased content of tantalum in the heat resistance of alloys, prima nyaemyh in aeronautical engineering and prospects of the use of low-carbon alloy modification based HA32-VI.

Keywords: heat-resistant nickel alloy, chemical compound, tantalum, carbon, directed crystallization, heat treatment, microstructure, mechanical properties, long-term strength.

Мілонін Євгеній Владімірович – інженер, начальник цеха АО «Мотор-Сич», Запорожье, Украина, e-mail: milon7n@gmail.com.

Лысенко Наталия Алексеевна – инженер УГМет АО «Мотор-Сич», Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

Наумик Валерий Владіленович – д-р техн. наук, проф., учёный секретарь ЗНТУ, проф. каф. «Машины и технология литейного производства», Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина, e-mail: naumik@zntu.edu.ua; naumik@mail.ru.

Milonin Evgeny Vladimirovich - engineer, chief of department of JSC «Motor Sich», Zaporozhye, Ukraine, e-mail: milon7n@gmail.com.

Lysenko Natalia Alekseevna - UGMet engineer of JSC «Motor Sich», Zaporozhye, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com.

Naumik Valeriy Vladilenovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Scientific Secretary of ZNTU, professor of the Department "Machinery and Technology foundry", Zaporizhzhya National Technical University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: naumik@zntu.edu.ua; naumik@mail.ru.