

УДК 621.74.045: 669. 24: 621.981

- Лысенко Н. А.** ведущий инженер управления главного металлурга АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com;
- Клочихин В. В.** начальник управления главного металлурга АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com;
- Наумик В. В.** проректор по научной работе и международной деятельности Запорожского национального технического университета (ЗНТУ), профессор кафедры машин и технологии литейного производства, д-р техн. наук, профессор, Запорожье, Украина, e-mail: naumik@zntu.edu.ua

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ОТЛИВОК

Проведено сравнительное исследование макро- и микроструктурного состояния, а также физико-механических характеристик низкоуглеродистых жаропрочных ренийсодержащих сплавов на никелевой основе ВЖМ5У-ВИ, SMSX-4 PLUS и ВЖМ4-ВИ (с Ru), предназначенных для монокристаллического литья деталей газотурбинных двигателей. Установлено, что исследуемые сплавы являются аналогами, характеризуются достаточно высокой чистотой по оксидно-сульфидным неметаллическим включениям вследствие низкого содержания кислорода и серы. Снижение углерода позволило повысить температуру плавления. Микроструктура материала образцов является типичной для жаропрочных никелевых сплавов, полученной методом высокоскоростной направленной кристаллизации. Термическая обработка (гомогенизация и двойное старение) по указанным режимам способствовала практически полному растворению эвтектики в твердом растворе, что оказывает благоприятное влияние на физико-механические свойства материалов. Значения длительной прочности при температуре 900 °С исследованных сплавов находятся примерно на одном уровне. Более высокая жаропрочность сплавов ВЖМ4-ВИ и SMSX-4 PLUS (по сравнению с ВЖМ5У-ВИ) проявляется при температурах 1000...1100 °С.

Ключевые слова: жаропрочные сплавы, структура, свойства, термическая обработка.

Введение

Повышение рабочих температур газотурбинных двигателей (ГТД), а следовательно, и температур материала деталей турбины, требует создания новых материалов, удовлетворяющих требованиям новых конструкций двигателей по жаропрочности и эксплуатационной надежности работы изделий при температурах 1000 °С и выше. В решении этих проблем большую роль продолжают играть жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС), являющиеся основными материалами элементов горячего тракта двигателя. Это может быть достигнуто совершенствованием структуры и оптимизацией состава жаропрочных сплавов с равноосной структурой, а также разработкой новых поколений сплавов с направленной столбчатой и монокристаллической структурой [1].

Монокристаллические никелевые суперсплавы являются практически безальтернативными материалами для лопаток ГТД пятого и шестого поколений. В первую очередь это относится к самым жаропрочным из них – монокристаллическим сплавам, легированным рением и танталом [2]. Было установлено, что

из всех легирующих элементов рений наиболее эффективно повышает длительную прочность никелевых сплавов [3,4].

Реализовать преимущества монокристаллических ЖНС позволили прогрессивные методы металлургии выплавки сплавов, обеспечившие снижение содержания примесей газов O₂, N₂ (менее 0,001%) и S (менее 0,0005%) [5], а также высокоградиентные технологии монокристаллического литья лопаток [6] и специальные режимы термической обработки. Кроме того, монокристаллические сплавы, как известно [1], позволяют не только исключить самый уязвимый в условиях высокотемпературной ползучести структурный элемент – границу зерна, но и реализовать в нужном направлении детали кристаллографическое направление с наиболее благоприятным сочетанием механических свойств, от которых зависит сопротивление разрушению сплава в условиях статического и циклического нагружения. Масштабный фактор прочности у монокристаллических материалов практически отсутствует. Поскольку в лопатках с монокристаллической структурой отсутствуют большеугловые границы зерен, то отпадает необходимость вводить в ЖНС легирующие эле-

менты (С, В, Zr, Hf), упрочняющие границы зерен. В частности, отсутствие С и В существенно повышает температуру плавления (1360 °С), сопротивление ползучести, а также механической и термической усталости, так как не образуются карбиды и бориды [7]. Таким образом, фазовый состав монокристаллических ЖНС состоит из сложнелегированного γ -твердого раствора на основе никеля и интерметаллидной фазы.

Заметное повышение уровня свойств литейных никелевых жаропрочных сплавов было достигнуто в результате осуществления многочисленных программ фундаментальных исследований, направленных на изучение структуры и процессов, протекающих при воздействии высоких температур и напряжений. К ним, в частности, относятся: углублённые исследования влияния легирования на степень и характер упрочнения основными интерметаллидными и карбидными фазами; изучение термостабильности упрочняющих фаз; исследование границ, являющихся наиболее слабым местом в сплавах; управление процессами образования границ (путём легирования, а также с помощью различных технологических процессов при равноосной и направленной кристаллизации). Проведенные исследования [1] позволили сделать некоторые обобщения и установить тенденции в легировании для получения жаропрочных сплавов с повышенными эксплуатационными свойствами.

Наряду со сплавами, легированными рением также были созданы ренийсодержащие материалы с добавками рутения, недостатком которых является их высокая стоимость. Так, стоимость жаропрочных никелевых сплавов последних поколений, содержащих рутений, возросла с ~50 тыс.USD/т до ~350...500 тыс.USD/т. Стоимость современных газотурбинных двигателей составляет ~1,5...2,0 тыс. USD за 1кг.

Таким образом, впервые в мировой практике складывается ситуация, когда удельные цены жаропрочных сплавов становятся соизмеримыми с удельными ценами на газотурбинные двигатели, что, учитывая интеллектуальный и трудовой вклад в создание и производство современных ГТД, делает создавшуюся ситуацию достаточно проблематичной [8].

В настоящей работе проведено сравнительное исследование микроструктуры и физико-механических характеристик низкоуглеродистых жаропрочных никелевых ренийсодержащих сплавов ВЖМ5У-ВИ, CMSX-4 PLUS и ВЖМ4-ВИ (с Ru), используемых для получения монокристаллических рабочих лопаток ГТД.

1. Методика проведения исследований

Литые монокристаллические образцы были получены на вакуумной установке УВНК-9А

методом высокоскоростной направленной кристаллизации (ВНК).

Химический состав сплавов определяли методами химического и спектрального анализов с использованием анализаторов фирмы «LECO» CS230 и TC500.

Исследование микроструктурного состояния выполняли на микрошлифах методами оптической (микроскоп «Axio Observer. Dlm») и растровой электронной микроскопии (сканирующий электронный микроскоп «JEOL JSM T-300»).

Термическую обработку образцов осуществляли по следующему режиму:

сплавы ВЖМ5У-ВИ и ВЖМ4-ВИ

- гомогенизация в вакууме при температурах – 1320 °С (10 ч.) - охлаждение до 850 °С со скоростью 80...100 °С/мин.;

- старение при температуре – 1100 °С (4 ч.) – охлаждение до комнатной температуры не менее 60 мин.;

- старение при температуре 870 °С (48 ч.) – охлаждение до комнатной температуры не менее 60 мин.;

сплав CMSX-4 PLUS

- гомогенизация в вакууме при температурах – 1316 °С(2ч.) + 1321 °С (2ч.)+ 1327 °С (2 ч.) + 1332 °С(6ч.) + 1338 °С (8ч.) + 1341 °С (4 ч.) – далее охлаждение;

- старение при температуре – 1163 °С (6 ч.) – охлаждение на воздухе;

- старение при температуре – 871 °С (20 ч.) – охлаждение на воздухе.

Механические свойства определяли при комнатной температуре на установке Р-5. Длительную прочность образцов с диаметром рабочей зоны 5мм – на установке ДСТ-500 при температурах: 900 °С, 975 °С, 1000 °С, 1050 °С и 1100 °С.

Определение кристаллографической ориентации (КГО) отливок образцов осуществляли методом рентгеноструктурного анализа при помощи дифрактометра ДРОН-3 на стартовых конусах, отрезанных от каждой отливки образца с монокристаллической структурой. При этом плоскость поперечного реза была перпендикулярна продольной оси отливки. Рентгеносъёмку проводили на поперечной поверхности шлифа конуса, протравленной для выявления дендритной микроструктуры.

2. Анализ и обсуждение полученных результатов

Химический состав материала образцов удовлетворительный и отвечает требованиям нормативной технической документации (НТД) для сплавов ВЖМ5У-ВИ, CMSX-4 PLUS и ВЖМ4-ВИ (табл. 1). В состав рений-

содержащего сплава ВЖМ4-ВИ также входит значительное количество рутения (до 4,3%). При этом следует отметить, что исследуемый высоколегированный ренийсодержащий Ni-Co-Ta-сплав ВЖМ5У-ВИ отличается от аналогичного сплава CMSX-4 PLUS, в основном, пониженным содержанием тантала. Содержание углерода в сплавах ВЖМ5У-ВИ и ВЖМ4-ВИ несколько выше, чем в CMSX-4 PLUS. Для исследуемых материалов характерно низкое содержание серы.

Для определения механических и жаропрочных свойств из прутковых заготовок Ø75 мм исследуемых сплавов были отлиты образцы (диаметром 15 мм; длиной 135 мм) методом

высокоскоростной направленной кристаллизации (ВНК).

Исследование макроструктуры и монокристалличности образцов проводили путём визуального осмотра после химического травления их поверхности.

Установлено, что на 8^{ми} из 12^{ти} образцов из сплава ВЖМ5У-ВИ получена монокристаллическая структура. Остальные образцы состояли из нескольких кристаллов, ориентированных в направлении оси Z. Значения отклонения направления [001] от оси Z при определении кристаллографической ориентации (КГО) монокристаллических образцов не превышали 2,4 угл.град.

Таблица 1. Химический состав никелевых жаропрочных сплавов ВЖМ5У-ВИ, CMSX-4 PLUS и ВЖМ4-ВИ

Марка сплава	Содержание элементов, %										
	C (ppm)	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Ta	Re	Ru	Fe
CMSX-4 PLUS	18	3,50	9,70	5,60	0,60	5,66	0,86	8,30	4,90	-	0,02
Нормы НТД	≤75	3,2... 3,5	9,3... 9,9	5,3... 5,7	0,5... 0,7	5,6... 5,8	0,8... 0,9	8,1... 8,3	4,7... 4,9	-	≤ 0,15
ВЖМ5У-ВИ	50	4,43	8,70	5,57	1,91	5,88	0,8	5,88	4,32	-	0,05
Нормы НТД	≤150	4,0... 5,0	8,0... 10,0	5,0... 6,2	1,7... 2,2	5,7... 6,2	0,6... 1,0	5,5... 6,5	4,0... 4,7	-	≤ 0,3
ВЖМ4-ВИ	44	2,9	6,18	3,88	4,22	6,11	-	4,41	5,91	4,18	0,007
Нормы НТД	≤80	2,1... 3,3	5,5... 6,5	3,7... 4,3	3,7... 4,3	5,75... 6,25	-	4,0... 5,0	5,7... 6,3	3,7... 4,3	≤ 0,5

продолжение таблицы 1

Марка сплава	Содержание элементов, %								
	Ni	Si	S (ppm)	P	Nb	Pb	Bi	O ₂ (ppm)	N ₂ (ppm)
CMSX-4 PLUS	основа	0,01	<4	0,0005	<0,05	0,0005	<0,0001	2	2
Нормы НТД	основа	≤0,04	≤4	≤0,002	≤ 0,1	≤0,0001	≤0,0002	≤4	≤5
ВЖМ5У-ВИ	основа	0,02	12	0,0012	<0,05	0,00001	0,00001	7	4
Нормы НТД	основа	≤0,2	≤50	≤0,010	≤ 0,05	≤0,0005	≤0,0001	≤10	≤10
ВЖМ4-ВИ	основа	<0,2	<4	0,0009	<0,05	0,00001	0,00001	9	3
Нормы НТД	основа	≤0,2	≤30	≤0,010	≤ 0,05	≤0,0005	≤0,0001	≤10	≤10

Тогда как, при заливке образцов из сплава CMSX-4 PLUS и ВЖМ4-ВИ монокристаллическая структура была получена только на 4^х из 12^{ти} образцов (КГО = 0,44,5 угл.град.).

На рис.1 показана макроструктура монокристаллических и направленно закристаллизованных образцов, отлитых методом высокоскоростной направленной кристаллизации.

Механические и жаропрочные свойства определяли на монокристаллических образцах после термической обработки (гомогенизация и двойное старение).

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

Из данных, представленных в таблице 2, видно, что механические и жаропрочные свойства сплавов соответствуют требованиям НТД.

Значения длительной прочности при температуре 900 °С сплавов находятся примерно на одном уровне. Более высокая жаропрочность сплавов ВЖМ4-ВИ и CMSX-4 PLUS (по сравнению с ВЖМ5У-ВИ) проявляется при температурах 1000...1100 °С.

Изломы образцов, отлитых из исследуемых сплавов методом ВНК, после испытаний на растяжение при комнатной температуре имеют идентичное складчатое строение (рис. 2).

При исследовании нетравленных микрошлифов установлено, что для обоих сплавов

характерно наличие микропор. Количество и размеры пор в сплаве ВЖМ5У-ВИ более, чем в 2 раза меньше по сравнению со сплавами CMSX-4 PLUS и ВЖМ4-ВИ (рис. 3). Кроме того, в сплавах имеются мелкие редко встре-

чающиеся включения оксинитридов и нитридов размером до ~ 3 мкм. Карбиды методом оптической микроскопии при увеличениях до $1000\times$ не обнаружены.

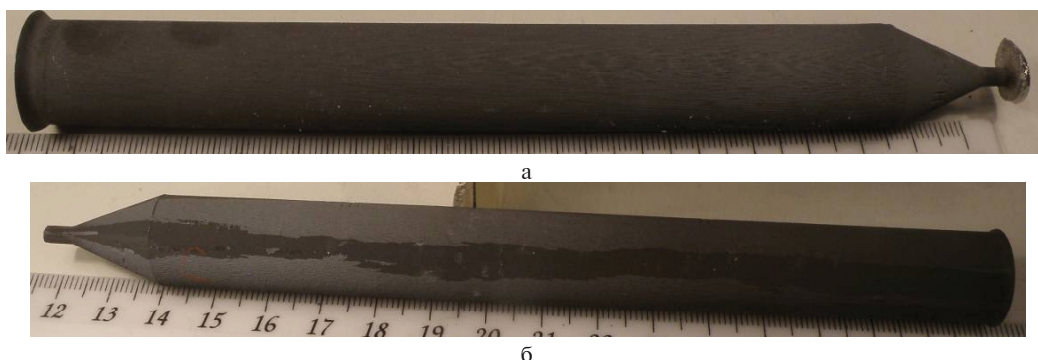


Рис. 1. Макроструктура монокристаллического (а) и направленно закристаллизованного (б) образцов, отлитых методом высокоскоростной направленной кристаллизации

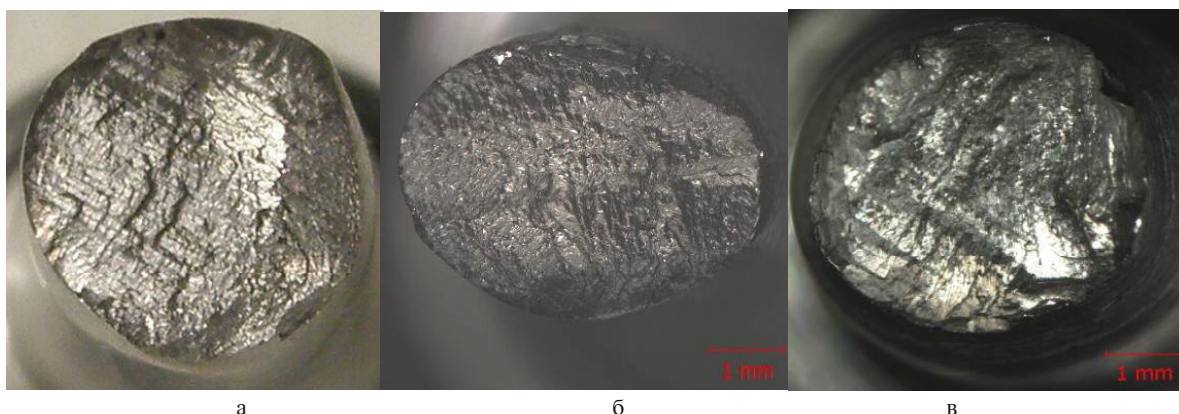


Рис. 2. Строение изломов монокристаллических образцов после испытаний на растяжение при комнатной температуре, $\times 10$: а – сплав ВЖМ5У-ВИ; б – сплав CMSX-4 PLUS; в – сплав ВЖМ4-ВИ

Таблица 2. Механические и жаропрочные свойства сплавов ВЖМ5У-ВИ, CMSX-4 PLUS и ВЖМ4-ВИ

Марка сплава	Механические свойства при $t = 20$ °С			Длительная прочность		
	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	$T_{исп.}$, °С	σ , МПа	Время до разрушения, τ_r , час.
ВЖМ5У-ВИ	1022	14,4	15,2	900	646	37,7
				975	347	84,0
				1000	260	185,9
				1000	310	81,8
				1100	157	73,4
Нормы НТД для сплава ВЖМ5У-ВИ	-	-	-	975	347	$\geq 40,0$
				1000	260	$\geq 100,0$
CMSX-4 PLUS	935	18,0	16,1	900	646	42,8
				1000	280	180,6
				1000	310	132,0
				1050	240	83,5
				1100	157	126,9
Нормы ТУ Cannon-Muskegon CMSX-4® Plus	≥ 900	$\geq 6,0$	$\geq 6,0$	1050	240	$\geq 45,0$
				1100	157	$\geq 100,0$
ВЖМ4-ВИ	1246	14,5	15,1	900	646	40,9
				975	392	87,5
				1000	300	163,5
Нормы НТД для сплава ВЖМ4-ВИ	-	-	-	975	392	$\geq 40,0$
				1000	300	$\geq 80,0$

Примечание. В таблице представлены средние значения механических и жаропрочных свойств

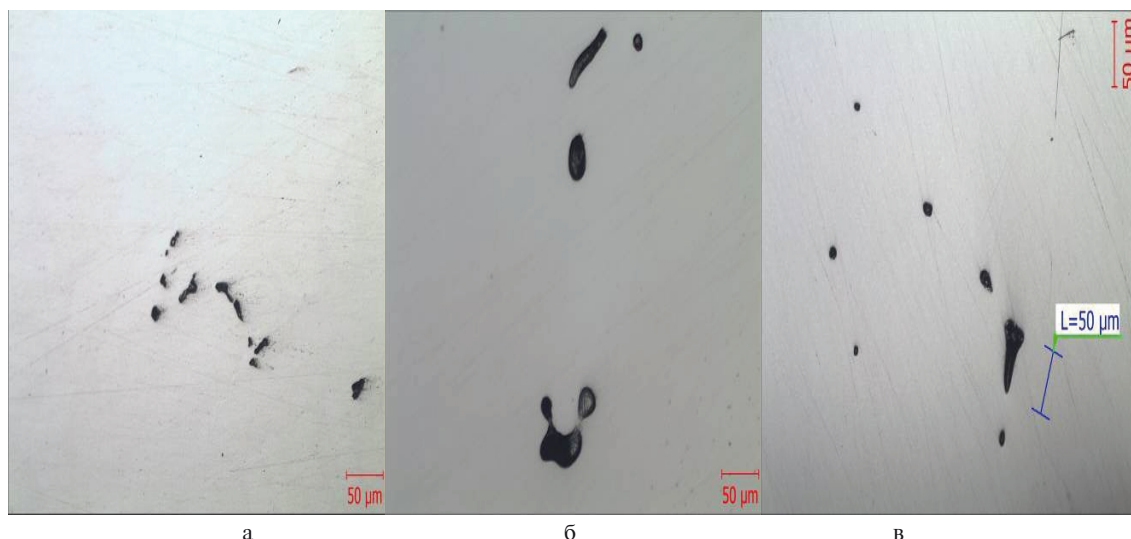


Рис. 3. Микропористость в образцах из сплавов ВЖМ5У-ВИ (а), CMSX-4 PLUS (б) и ВЖМ4-ВИ (в), $\times 200$

Микроструктура образцов $\varnothing 15$ мм из сплавов ВЖМ5У-ВИ, CMSX-4 PLUS и ВЖМ4-ВИ идентична. После литья (до проведения операции термообработки) — имеет дендритно-ячеистую структуру, сформированную дендритами первого и второго порядков (рис. 4). В литой структуре наблюдается размерная и морфологическая неоднородность частиц γ' -фазы. При этом размер и форма γ' -частиц в осях и междендритных областях различаются — в межосях частицы γ' -фазы заметно крупнее. В структуре также имеется значительное количество эвтектической фазы типа $(\gamma-\gamma')$, размер которой в сплавах ВЖМ5У-ВИ и ВЖМ4-ВИ в ~ 3 раза меньше, чем в CMSX-4 PLUS. Расстояние между осями дендритов первого и второго порядка в образцах из ВЖМ5У-ВИ и ВЖМ4-ВИ меньше $\sim 1,5$ раза.

Дендритно-ячеистое строение монокристаллических отливок и отливок с направленно-

закристаллизованной структурой (имеющих несколько кристаллов) является типичным для жаропрочных никелевых сплавов, полученных методом направленной кристаллизации.

Проведение термической обработки (гомогенизация и двойное старение — по указанным выше режимам) способствует повышению однородности сплава вследствие практически полного растворения в γ -твердом растворе эвтектической $(\gamma-\gamma')$ -фазы, а также выравнивания состава между осями и межосными пространствами дендритов (рис. 5). Интерметаллидные частицы γ' -фазы в осях и междендритных пространствах имеют примерно одинаковые размеры. Форма γ' -частиц — кубоидная; на малоугловых границах монокристаллов сформировались частицы γ' -фазы неправильной формы. Микроструктура исследуемых сплавов соответствует нормально термообработанному состоянию высоколегированных никелевых сплавов; перегрева нет.

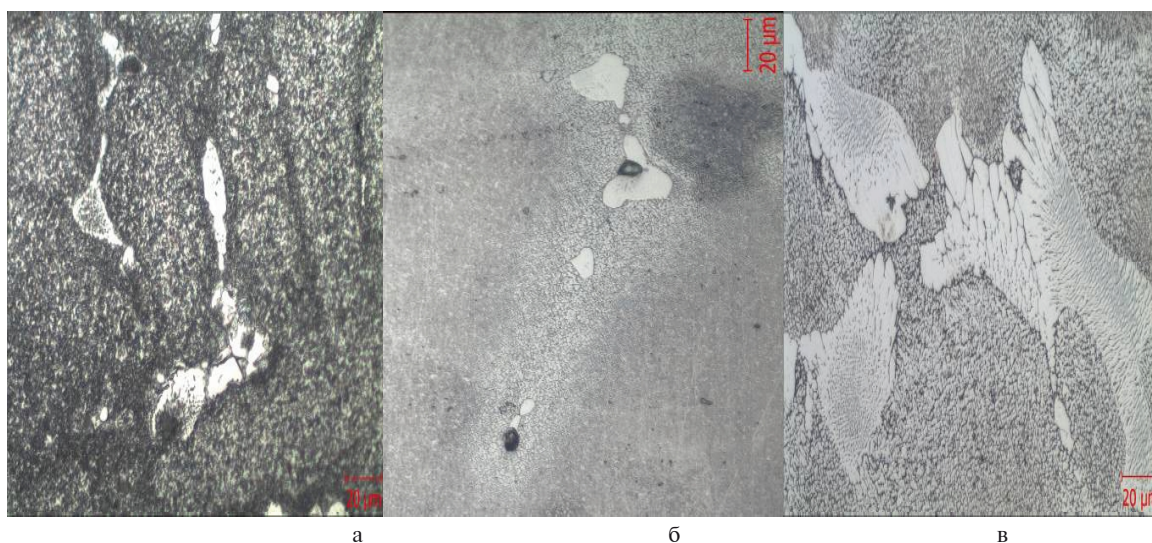


Рис. 4. Микроструктура образцов из сплавов ВЖМ5У-ВИ (а), CMSX-4 PLUS (б) и ВЖМ4-ВИ (в) — до термообработки, $\times 500$

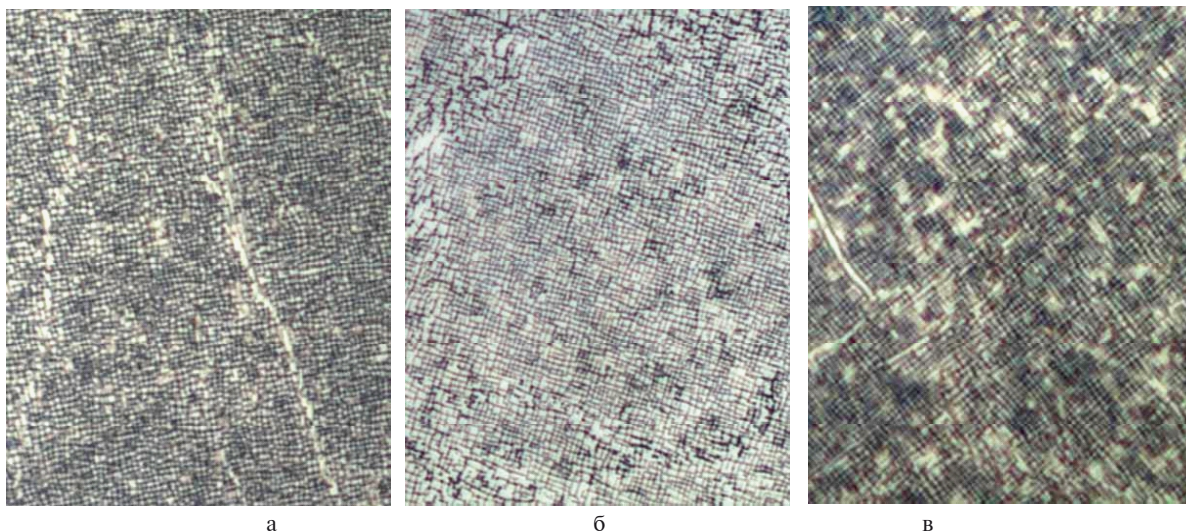


Рис. 5. Микроструктура образцов из сплавов ВЖМ5У-ВИ (а), CMSX-4 PLUS (б) и ВЖМ4-ВИ (в) — после термообработки, $\times 1000$

Выводы

1. Высоколегированный жаропрочный никелевый сплав ВЖМ5У-ВИ аналогичен сплаву ВЖМ4-ВИ, имеющему в составе рутений, а также сплаву CMSX-4 PLUS, отличаясь, в основном, более низким содержанием тантала (в $\sim 1,4$ раза).

2. Физико-механические свойства сплавов соответствуют требованиям нормативно-технической документации. Значения длительной прочности при температуре 900°C сплавов находятся примерно на одном уровне. Более высокая жаропрочность сплавов ВЖМ4-ВИ и CMSX-4 PLUS (по сравнению со сплавом ВЖМ5У-ВИ) проявляется при температурах $1000\dots 1100^{\circ}\text{C}$.

3. Микроструктура исследуемых образцов характерна для высоколегированных жаропрочных никелевых сплавов, характеризуется достаточно высокой чистотой по оксидно-сульфидным неметаллическим включениям, а также карбидам вследствие низкого содержания кислорода, серы и углерода.

4. Термическая обработка (гомогенизация и двойное старение) по указанным выше режимам способствует повышению однородности сплава вследствие практически полного растворения в γ -твердом растворе эвтектической (γ - γ')-фазы, а также выравнивания состава между осями и межосными пространствами дендритов.

5. С целью снижения пористости отливки из сплавов ВЖМ5У-ВИ, CMSX-4 PLUS и ВЖМ4-ВИ, полученные методом высокоскоростной направленной кристаллизации, целесообразно подвергать операции горячего изостатического прессования (ГИП).

Литература

1. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технологии, покрытия) [Текст] / Е.Н. Каблов. — М.: МИСИС. — 2001. — 632 с.

2. Каблов Е.Н. Монокристаллические никелевые ренийсодержащие сплавы для турбинных лопаток ГТД [Текст] / Е.Н. Каблов, В.Н. Толораия, Н.Т. Орехов // *Металловедение и термическая обработка металлов.* — 2002. — №7. — С. 109-115.

3. Шалин Р.Е. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов [Текст] / Р.Е. Шалин, И.Л. Светлов, Е.Б. Качанов [и др.] — М.: Машиностроение. — 1997. — 336 с.

4. Caron P. Superalloys 2000 [Text] / Eds T.M. Polloc, R.D. Kissinger, R.R. Bowman [et.al.] // *Champion (Pennsylvania).* — 2000. — P. 737.

5. Сидоров В.В. Авиационные материалы и технологии [Текст] / В.В. Сидоров, В.Е. Ригин, В.Т. Бурцев // *Вып. Высокореиниевые жаропрочные сплавы, технология и оборудование для производства сплавов и литья монокристаллических турбинных лопаток ГТД.* — М., — 2004. — С. 72-75.

6. Каблов Е.Н. Авиационные материалы и технологии [Текст] / Е.Н. Каблов, Ю.А. Бондаренко, В.А. Сурова // *Вып. Высокореиниевые жаропрочные сплавы, технология и оборудование для производства сплавов и литья монокристаллических турбинных лопаток ГТД* — М., — 2004. — С. 90-93.

7. Каблов Е.Н. Физико-химические особенности создания жаропрочных сплавов, содержащих рений [Текст] / Е.Н. Каблов // *Вестник московского университета, серия 2. Химия.* — 2005. Т. 46. — №3. — С. 155-167.

8. Логунов А.В. Методологические основы автоматизированного проектирования жаропрочных сплавов на никелевой основе [Текст] / А.В. Логунов, Ю.Н. Шмотин, Д.В. Данилов

// Технология металлов — М.,— 2014.— №7. — С.3-11.

Поступила в редакцию 11.05.2018

Н.О. Лисенко, В.В. Клочихін, В.В. Наумик. Структура та властивості низьковуглецевих нікелевих сплавів для монокристалічних відливок

Проведено порівняльне дослідження макро- і мікроструктурного стану, а також фізико-механічних характеристик низьковуглецевих жароміцних ренієвмісних сплавів на нікелевій основі ВЖМ5У-ВІ, CMSX-4 PLUS і ВЖМ4-ВІ (з Ru), призначених для монокристалічного лиття деталей газотурбінних двигунів. Встановлено, що досліджувані сплави є аналогами, характеризуються досить високою чистотою по окисно-сульфідних неметалічних включень внаслідок низького вмісту кисню і сірки. Зниження вуглецю дозволило підвищити температуру плавлення. Мікроструктура матеріалу зразків є типовою для жароміцних нікелевих сплавів, отриманих методом високошвидкісної спрямованої кристалізації. Термічна обробка (гомогенізація і подвійне старіння) за вказаними режимами сприяла практично повному розчиненню евтектики в твердому розчині, що сприятливо впливає на фізико-механічні властивості матеріалів. Значення тривалої міцності при температурі 900 °С досліджених сплавів знаходяться приблизно на одному рівні. Більш висока жароміцність сплавів ВЖМ4-В і CMSX-4 PLUS (в порівнянні з ВЖМ5У-ВІ) проявляється при температурах 1000 ... 1100 °С.

Ключові слова: жароміцні сплави, структура, властивості, термічна обробка.

N.A. Lysenko, V.V. Klochihin, V.V. Naumik. The structure and properties of low-carbon nickel alloy single-crystal castings

A comparative study of the macro and microstructural state, as well as the physical and mechanical characteristics of low-carbon, high-temperature rhenium-containing alloys on a nickel basis, ВЖМ5У-ВІ, CMSX-4 PLUS and ВЖМ4-ВІ (with Ru), intended for single-crystal casting of gas turbine engine parts. The rhenium-containing alloy with ruthenium (ВЖМ4-ВІ) additives has higher strength and heat-resistant properties, the disadvantage of which is its high cost. It is established that the investigated alloys are analogous, characterized by a sufficiently high purity in oxide-sulphide nonmetallic inclusions due to the low content of oxygen and sulfur. Decrease in carbon allowed to increase the melting point. Monocrystalline nickel superalloys are practically non-alternative materials for gas turbine engines of the fifth and sixth generations. The advantages of these materials were realized by progressive metallurgical methods of smelting, which reduced the content of harmful impurities, as well as high-gradient technologies for single-crystal casting of blades and special modes of heat treatment. Cast single-crystal samples were obtained on a vacuum unit УВНК-9А by high-speed directional crystallization. The microstructure of the sample material from the alloys ВЖМ5У-ВІ, CMSX-4 PLUS and ВЖМ4-ВІ is identical, typical of high-temperature nickel alloys obtained by high-speed directional crystallization. Thermal treatment (homogenization and double aging) in these regimes contributed to the almost complete dissolution of the eutectic in the solid solution, due to the almost complete dissolution of the eutectic (-) phase in the -solid solution, and also the alignment of the composition between the axes and the interdendrites spaces. This has a favorable effect on the physical and mechanical properties of materials. The mechanical and heat-resistant properties of alloys comply with the requirements of NTD. The values of the long-term strength at 900 °С of the alloys studied are approximately at the same level. Higher heat resistance of alloys ВЖМ4-ВІ and CMSX-4 PLUS (in comparison with ВЖМ5У-ВІ) appears at temperatures of 1000 ... 1100 °С.

Key words: high-temperature alloys, structure, properties, heat treatment.

References

1. Kablov Y.N. Lityye lopatki gazoturbinnnykh dvigateley (сплавы, технологии, покрытия) [Cast blades of gas turbine engines (alloys, technologies, coatings)]. Moscow, MISIS, 2001. 632 p.
2. Kablov Y.N., Toloraiya V.N., Orekhov N.T. Monokristallicheskiye nikelovyie

reniysoderzhashchiye сплавы для турбинных лопаток газотурбинных двигателей [Monocrystalline nickel rhenium-containing alloys for turbine blades of gas turbine engines]. Metallurgy and heat treatment of metals. Moscow, 2002. no. 7, pp.109-115.

3. Shalin R.Y., Svetlov I.L., Kachanov Y.B. [I dr.] Monokristally nikelovykh zharoprochnykh

splavov [Monocrystals of nickel high-temperature alloys]. Moscow, Mechanical engineering, 1997. 336 p.

4. Caron P., Polloc T.M., Kissinger R.D., Bowman R.R. [et.al.] Superalloys 2000. Champion (Pennsylvania), 2000. 737 p.

5. Sidorov V.V., Rigin V.Y., Burtsev V.T. Aviationnyye materialy i tekhnologii [Aviation materials and technologies]. Release. High-temperature high-temperature alloys, technology and equipment for the production of alloys and casting of single-crystal turbine blades of gas turbine engines. Moscow, 2004. pp. 72-75.

6. Kablov Y.N., Bondarenko Y.A., Surova V.A. Aviationnyye materialy i tekhnologii [Aviation materials and technologies]. Release. High-temperature high-temperature alloys, technology

and equipment for the production of alloys and casting of single-crystal turbine blades of gas turbine engines. Moscow, 2004. pp. 90-93.

7. Kablov Y.N. Fiziko-khimicheskiye osobennosti sozdaniya zharoprochnykh splavov, sodержashchikh reny [Physico-chemical features of the creation of high-temperature alloys containing rhenium]. Bulletin of the Moscow University, series 2. Chemistry, 2005. t. 46. no. 3. pp. 155-167.

8. Logunov A.V., Shmotin Y.N., Danilov D.V. Metodologicheskiye osnovy avtomatizirovannogo proyektirovaniya zharoprochnykh splavov na nikelovoy osnove [Methodological foundations of computer-aided design of high-temperature alloys on a nickel basis]. Technology of metals. Moscow, 2014. no. 7. pp. 3-11.