

Е.В. Милонин¹, нач. цеха

Н.А. Лысенко¹, вед. инженер

П.Е. Малиновский¹, инженер-технолог

В.В. Наумик², д-р техн. наук, проф., проректор, e-mail: naumik@zntu.edu.ua

С.В. Гайдук², канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник

¹АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина

²Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

Выбор рационального режима термической обработки опытного безрениевого сплава для монокристаллического литья

Проведены исследования по выбору рационального режима термической обработки для разработанного жаропрочного литейного монокристаллического сплава ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВИ), не содержащего в своем составе дорогостоящего импортного рения. Показано, что механические и жаропрочные свойства монокристаллических образцов из опытного сплава после термообработки по режиму, предусмотренному для сплава ВЖМ-4, соответствуют требованиям нормативно-технической документации на сплав ЖС32-ВИ. Таким образом, сплав ЗМИ-М5 имеет значительно меньшую стоимость, обеспечивает необходимый комплекс свойств и может быть использован для изготовления лопаток газотурбинных установок наземного назначения методом направленной кристаллизации.

Ключевые слова: жаропрочный никелевый сплав, лопатка, рений, кристаллографическая ориентация, термическая обработка, карбиды, микроструктура, механические свойства, жаропрочность.

Состояние вопроса. Украина остается одним из признанных лидеров в изготовлении энергетических установок. При этом, в современной политико-экономической обстановке вопрос снижения себестоимости производимых узлов и агрегатов стоит для нашего государства особенно остро.

Литые лопатки газовых турбин, как авиационных, так и наземного использования, изготавливают из жаропрочных никелевых сплавов методом высокоскоростной направленной кристаллизации.

Одной из особенностей эксплуатации наземных установок является гораздо более низкое качество используемого топлива по сравнению с авиационными двигателями. Такое топливо содержит гораздо большее количество агрессивных примесей, и особое значение приобретают не только жаропрочные характеристики материала литых изделий горячего тракта, а и их стойкость против высокотемпературной коррозии.

На сегодня широко распространены лопаточные жаропрочные никелевые сплавы ЖС26-ВИ и ЖС32-ВИ. Сплав ЖС26-ВИ [1] не соответствует требованиям к материалу рабочих лопаток по жаропрочности. Высокожаропрочный сплав ЖС32-ВИ [2] отвечает всем требованиям по механическим и жаропрочным свойствам, предъявляемым к материалу лопаток, но в системе легирования содержит особенно дорогой импортный элемент – рений и, соответственно, характеризуется высокой стоимостью, при этом не обладает коррозионной стойкостью, вследствие чего на лопатки дополнительно наносят антикоррозионное покрытие.

Ранее был разработан состав экономнолегированного жаропрочного никелевого сплава, который превосходит по комплексу характеристик известный сплав ЖС26-ВИ, не уступает по прочностным и пластическим свойствам сплаву ЖС32-ВИ и при этом обеспечивает достаточную для эксплуатации указанных изделий стойкость против высокотемпературной коррозии в агрессивных средах [3]. Данный сплав гораздо дешевле, поскольку содержание рения в нем в два раза ниже по сравнению с ЖС32-ВИ.

Анализ влияния легирующих элементов на свойства жаропрочных никелевых сплавов приводит к логичному выводу о целесообразности полного исключения из их состава, в случае эксплуатации на наземных установках, дорогостоящего рения и замены его повышенным содержанием относительно менее дорогостоящих легирующих элементов, позволяющих одновременно обеспечить достаточно высокие показатели жаропрочности и необходимую стойкость против высокотемпературной коррозии. Такими элементами могут быть вольфрам и тантал.

Основной материал исследований. АО «Мотор Сич» совместно с Запорожским национальным техническим университетом с использованием расчетно-аналитических методов был разработан состав безрениевого жаропрочного никелевого сплава для изготовления литых лопаток наземных турбин методом высокоскоростной направленной кристаллизации [4]. Данному сплаву присвоена марка ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВИ) и разработаны временные технические

условия (ВТУ) для использования на стадии опробования и подготовки к внедрению.

Для обеспечения требуемого комплекса физико-механических и эксплуатационных свойств данного сплава необходимо проведение соответствующей термической обработки. Для отработки ее рационального режима был проведен комплекс исследований.

Были проведены две плавки по изготовлению опытного жаропрочного никелевого безрениевого сплава ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВИ):

– на установке FM-1-2-100 фирмы «ULVAC» (массой 50 кг);

– на установке УППФ-3М (массой 10 кг) с проведением высокотемпературной термовременной обработки расплава (ВТОР) при температуре 1850 °С в течение 6 минут.

Химический состав полученного сплава ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВИ) представлен в табл. 1.

Из результатов, приведенных в табл. 1, видно, что содержание элементов (за исключением содержания вольфрама, а для плавки на установке УППФ-3М – и хрома) в материале исследуемых образцов соответствует требованиям временных ТУ для сплава ЗМИ-М5.

Литые образцы из опытного сплава ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВИ) для определения механических и жаропрочных свойств (\varnothing 15 мм; $L = 135$ мм) получали методом высокоскоростной направленной кристаллизации на установке УВНК-9А.

Из металла плавки на установке FM-1-2-100 фирмы «ULVAC» – по серийной методике с использованием керамических геликоидов.

Из металла плавки на установке УППФ-3М был залит один блок (6 шт. образцов) с проведением низкотемпературной термовременной обработки (НТВО) расплава при температуре 1650–1680 °С в течение 8–10 минут.

Заливку металла в процессе опытных плавки производили при температуре 1560 + 20 °С (температура на верхнем нагревателе составляла 1560 + 20 °С, на нижнем – 1620–1630 °С).

Скорость перемещения блока в жидкометаллический охладитель (ЖМО) составляла:

– 15 мм до жидкометаллического охладителя с маршевой скоростью;

– далее – 4 ± 1 мм/мин.

На стартовых конусах образцов с монокристаллической структурой определяли кристаллографическую ориентацию (КГО).

Установлено, что значения отклонений направления [001] от оси Z в образцах, отлитых из опытного сплава ЗМИ-М5, колеблются от 0,2 до 54,7 угл. град.

Остальные образцы имели направленную структуру с количеством кристаллов ≥ 3 .

При металлографическом исследовании нетравленных микрошлифов в материале исследованных образцов обнаружены микропоры размером до ~ 27 мкм, а также единичные оксидные включения – до ~ 10 мкм.

Карбиды выделяются в незначительном количестве, что характерно для структуры низкоуглеродистого сплава ЗМИ-М5 ($C \leq 0,08 \%$), в виде мелких дискретных глобулярных частиц MeC (рис. 1, а), а также в виде «китайских иероглифов» с наличием тонких пластин эвтектических карбидов типа Me_6C (рис. 1, б); располагаются преимущественно в междендритных пространствах. Толщина пластин эвтектических карбидов составляет ~ 0,3–0,7 мкм.

Микроструктура образцов из сплава ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВИ) до термообработки представляет собой (рис. 2) γ -твердый раствор с наличием интерметаллидной γ' -фазы, эвтектической фазы (γ - γ') и незначительного количества карбидов. В литой структуре наблюдается размерная и морфологическая неоднородность частиц γ' -фазы. Размер и форма γ' -частиц в осях и междендритных областях различны – в осях частицы γ' -фазы мельче и имеют более правильную кубическую морфологию (рис. 3).

Термообработку проводили по трем вариантам.

I Образцы из металла плавки FM-1-2-100 «ULVAC» по стандартному режиму, предусмотренному для сплава ЖС32-ВИ (ВНК): гомогенизация в вакууме при температуре 1270 ± 10 °С в течение 2,0 ч – динамический вакуум.

II Образцы из плавки на установке УППФ-3М по режиму с увеличенным временем выдержки:

– нагрев в вакууме со скоростью не более 20 °С/мин до температуры 1275 ± 10 °С; выдержка в течение 4 часов в вакууме при остаточном давлении 0,133–0,00133 Па;

– охлаждение до комнатной температуры со средней скоростью 80–100 °С в течение не менее 60 мин.

III Образцы из металла плавки FM-1-2-100 «ULVAC» по режиму, предусмотренному для сплава ВЖМ-4 (ВНК):

– нагрев в вакууме до 1000 ± 50 °С со скоростью 6–8 °С/мин; выдержка при температуре 1000 ± 50 °С в течение 30–45 мин в вакууме при остаточном давлении 0,133–0,00133 Па;

– нагрев до 1280⁺¹⁰₋₅ °С со скоростью 5 °С/мин в динамическом вакууме при остаточном давлении 1,33–0,133 Па; выдержка при температуре 1280⁺¹⁰₋₅ °С в течение 1 ч 15 мин–1 ч 30 мин в динамическом вакууме 1,33–0,133 Па;

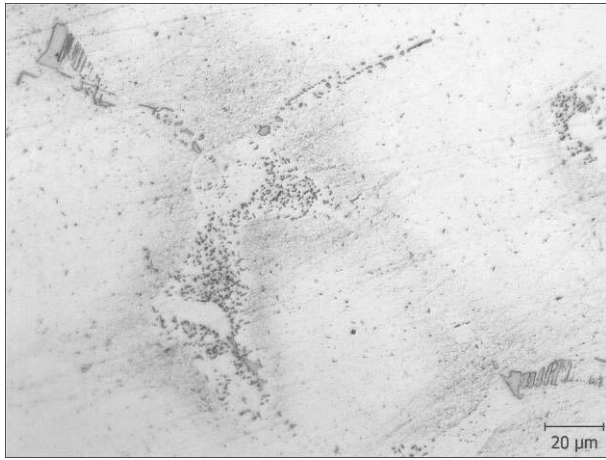
Таблица 1

Химический состав опытного жаропрочного никелевого сплава ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВИ)

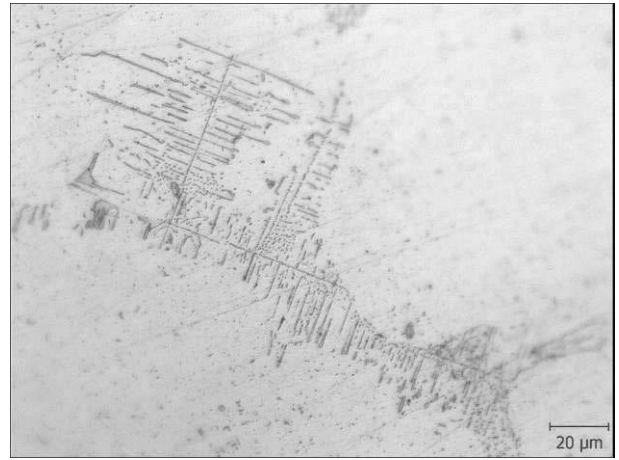
Плавка	Содержание элементов, %мас.						
	C	Cr	Co	W	Al	Ta	Mo
FM-1-2-100	0,05	5,29	5,42	9,46	5,76	9,0	0,84
УППФ-3М	0,064	5,35	5,51	9,53	5,88	8,72	0,84
Нормы ВТУ	0,04–0,08	4,7–5,3	5,0–6,0	8,7–9,3	5,7–6,3	8,7–9,3	0,5–1,0

Окончание таблицы 1

Плавка	Содержание элементов, %мас.						
	Cu	Si	Mn	Fe	B	S	P
FM-1-2-100	0,009	0,02	0,03	0,06	0,012	0,006	0,004
УППФ-ЗМ	0,009	0,10	0,03	0,06	0,011	0,005	0,004
Нормы ВТУ	≤ 0,07	≤ 0,3	–	≤ 1,0	–	≤ 0,010	≤ 0,010

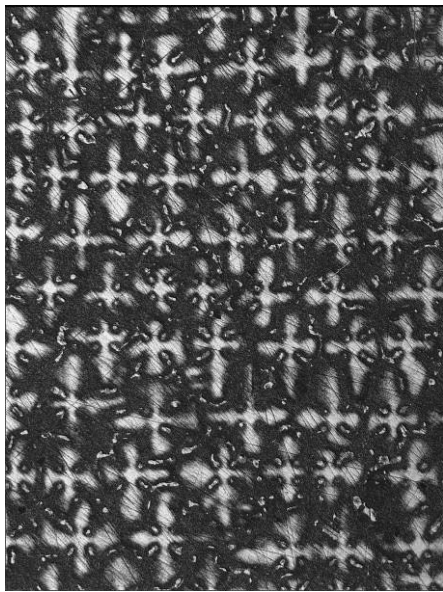


а

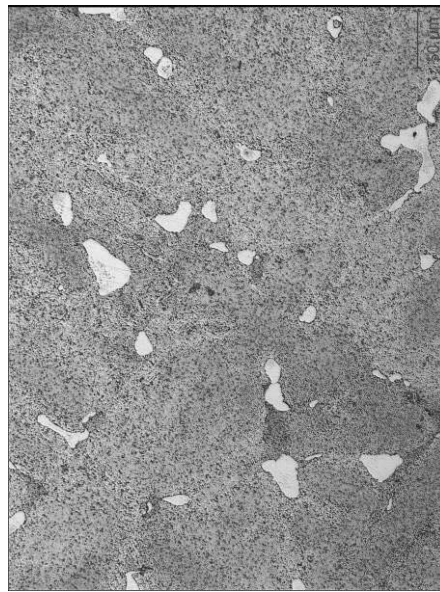


б

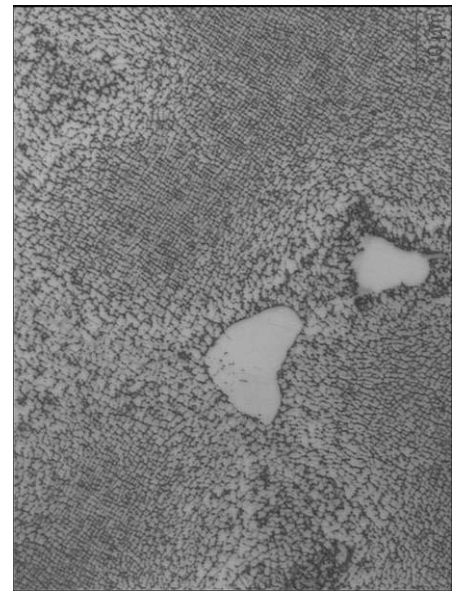
Рис. 1. Карбиды в образцах из сплава ЗМИ-М5 до термообработки, × 500



а × 50



б × 200



в × 1000

Рис. 2. Микроструктура образцов из сплава ЗМИ-М5 до термообработки

– охлаждение до 70 °С с избыточным давлением 0,1 бар;

– нагрев до 1030 ± 10 °С со скоростью 6–8 °С/мин в динамическом вакууме 1,33–0,133 Па, выдержка при температуре 1030 ± 10 °С в течение 4 ч;

– охлаждение до 70 °С в среде аргона;

– нагрев до 870 ± 10 °С со скоростью 6–8 °С/мин в динамическом вакууме при остаточном давлении 1,33–0,133 Па, выдержка при температуре 870 ± 10 °С в течение 28 ч;

– охлаждение до 70 °С в среде аргона.

В результате механических испытаний и испытаний на длительную прочность образцов (∅ 15 мм;

$L = 135$ мм), отлитых из опытного жаропрочного никелевого сплава ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВИ) методом высокоскоростной направленной кристаллизации (ВСНК), установлено, что образцы с направленной макроструктурой (3 и более кристалла) всех вариантов плавок и режимов термообработки не соответствуют требованиям ВТУ ЗНТУ для сплава ЗМИ-М5 и требованиям ТУ1-92-177-91 и 18Т-ТУ-158 (для сплава ЖС32-ВИ).

Результаты механических испытаний и испытаний на длительную прочность опытных образцов с монокристаллической макроструктурой приведены в табл. 2.

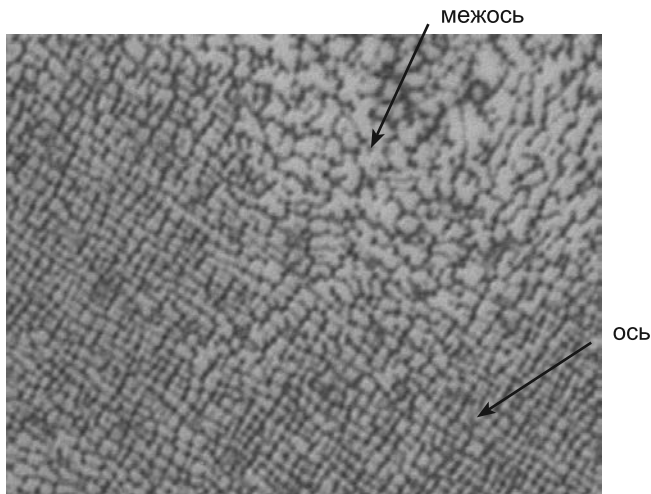


Рис. 3. Морфология частиц интерметаллидной γ -фазы в образцах из сплава ЗМИ-М5 до термообработки, $\times 1500$

Из результатов, представленных в табл. 2, видно, что механические свойства исследуемых опытных образцов из сплава ЗМИ-М5 с монокристаллической структурой после термообработки по стандартному режиму, предусмотренному для сплава ЖС32-ВИ (ВНК), удовлетворительные и отвечают требованиям ВТУ ЗНТУ.

Значения длительной прочности опытных образцов после такой термообработки (испытанных при температуре 975 °С и напряжении 32 кгс/мм², а также

при температуре 1000 °С и напряжении 28 кгс/мм²) не соответствуют требованиям ВТУ ЗНТУ для сплава ЗМИ-М5 и требованиям ТУ1-92-177-91 и 18Т-ТУ-158 (для сплава ЖС32-ВИ).

В результате увеличения выдержки при гомогенизации до 4 часов получены значения предела прочности (σ_B) ниже уровня требований ВТУ, при относительном удлинении более чем в 3 раза превышающем эти требования. При этом значения времени до разрушения при испытании длительной прочности материала при $T_{исп} = 975$ °С, $\sigma = 28$ кгс/мм² и 30 кгс/мм² удовлетворяют требованиям ВТУ, а при $T_{исп} = 1000$ °С, $\sigma = 28$ кгс/мм² – находятся ниже требований ТУ, предусмотренных для сплава ЖС32-ВИ.

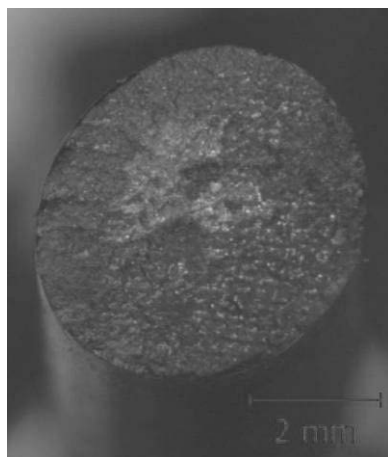
Исследование качества опытного жаропрочного сплава ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВИ) после термообработки по стандартному режиму, предусмотренному для сплава ВЖМ-4, показало, что механические свойства при температуре 20 °С, а также длительная прочность при температуре испытания 975 °С и напряжении 30 кгс/мм² соответствуют требованиям временных технических условий (ВТУ ЗНТУ).

Значения времени до разрушения при температуре испытания 1000 °С и напряжении 28 кгс/мм² нестабильны – находятся на уровне от 21 до 55 часов. Снижение значений τ_p при 1000 °С, вероятно, обусловлено кристаллографическим направлением образцов. При этом стоит отметить, что более высокие значения τ_p (55 часов) имеют образцы с кристаллографической ориентацией [111].

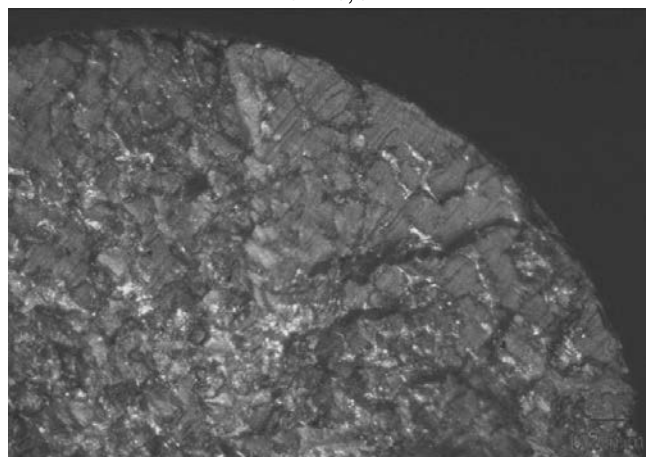
Таблица 2

Механические и жаропрочные свойства опытных образцов из сплава ЗМИ-М5 с монокристаллической макроструктурой

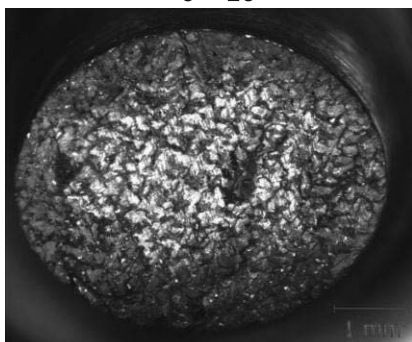
Термообработка	КГО, угл. град.	Механические свойства при 20 °С			Длительная прочность		
		σ_B , кгс/мм ²	δ , %	ψ , %	$T_{исп}$ °С	σ , кгс/мм ²	τ_p , ч
Стандартная для ЖС32-ВИ (гомогенизация при 1270 ± 10 °С, 2,0 ч)	3,6	111,2	8,0	6,7	975	32	19,0
	0,7	115,2	7,6	–			19,3
	19,0	114,2	8,0	4,2			20,5
	18,5	–	–	–			55,5
	18,5	–	–	–			38,0
	0,8	–	–	–			30
	6,5	–	–	–	1000	28	27,8
Гомогенизация при 1270 ± 10 °С, 4,0 ч	15,5	83,5	20,8	23,4	975	30	77,5
	0,2	–	–	–	975	30	56,5
	1000	28	26,0	–	–	–	–
Стандартная для ВЖМ-4	47,4	134,0	6,8	8,6	–	–	–
		139,6	5,2	8,6	–	–	–
	9,1	–	–	–	975	30	60,5
		–	–	–	1000	28	21,0
	44,9	–	–	–	975	30	95,15
		–	–	–	1000	28	55,0
	17,2	–	–	–	975	30	90,5
–		–	–	1000	28	26,25	
Нормы ВТУ ЗНТУ		≥ 100,0	≥ 6,0	–	975	30	³ 40,0
Нормы ТУ1-92-177-91 и 18Т-ТУ-158 (для ЖС32-ВИ)		≥ 90,0	≥ 6,0	–	1000	28	³ 40,0
					975	30	³ 40,0



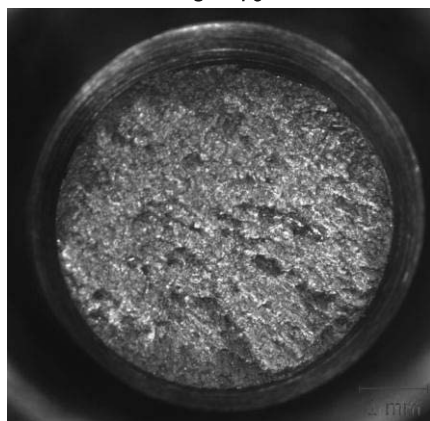
а × 6,5



б × 25



в × 10



з × 10

Рис. 4. Строение изломов опытных монокристаллических образцов из сплава ЗМИ-М5, прошедших различные виды термической обработки после испытания на растяжение при температуре 20 °С: а, б – термообработка по стандартному режиму, предусмотренному для сплава ЖС32-ВИ (ВНК); в, з – термообработка с увеличенной до 4 часов выдержкой при температуре 1275 ± 10 °С

На рис. 4 показаны изломы опытных образцов, прошедших различные виды термической обработки после испытания на растяжение при температуре 20 °С.

Следует отметить, что для жаропрочных сплавов на никелевой основе характерным является хрупкий межзеренный излом.

На образце после термообработки по стандартному режиму, предусмотренному для сплава ЖС32-ВИ (ВНК), отсутствуют зоны волокнистого излома и долома. Практически вся поверхность излома состоит из фасеток хрупкого межзеренного разрушения (рис. 4, а, б). Размеры отдельных фасеток соизмеримы с элементами дендритной макроструктуры.

Строение изломов после испытания на растяжение при комнатной температуре образцов с монокристаллической и направленной макроструктурой, прошедших термообработку с увеличенной до 4 часов выдержкой при температуре 1275 ± 10 °С, также имеет хрупкий межкристаллитный характер. Эллипсообразная форма поверхности излома связана с выходом магистральной трещины под углом к осевой линии растяжения. Эти образцы (рис. 4, в) имеют более низкие значения предела прочности и более высокую пластичность в сравнении с образцом, разрушение которого произошло по плоскости, перпендикулярной направлению растяжения (рис. 4, з).

На рис. 5 показаны изломы образцов с отклонениями направления [001] от оси Z на 9,1 и 44,9 угл. град. после испытания на длительную прочность при температуре 1000 °С и напряжении 28 кгс/мм². Отклонение от оси Z на 9,1 угл. град. привело к незначительному отклонению плоскости излома от направления, перпендикулярного оси растяжения. Макроизлом хрупкий, межзеренный, отсутствуют волокнистая зона и зона долома.

Отклонение направления [001] на 44,9 угл. град. оказало существенное влияние на образование трещин и формирование плоскости излома. Характерно наличие на боковой поверхности образца большого количества трещин, расположенных под углами, соизмеримыми с отклонениями направления [001] (рис. 5, в). Плоскость излома также расположена под углом порядка 45° (рис. 5, з).

Микроструктура образцов из сплава ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВИ) после термообработки по опробованным режимам представляет собой γ-твердый раствор, упрочненный интерметаллидной γ'-фазой, с наличием эвтектической фазы (γ-γ') и незначительного количества карбидов (рис. 6).

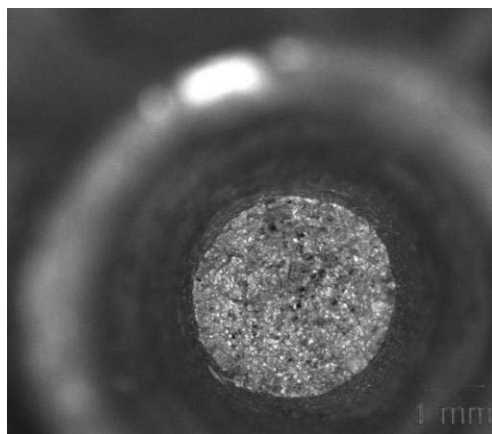
Проведение термообработки по различным режимам способствовало некоторому уменьшению структурной неоднородности вследствие выравнивания химического состава в пределах дендритной ячейки (рис. 6).

Установлено, что проведение термообработки по всем опробованным режимам не привело к заметному уменьшению эвтектической (γ-γ') фазы в металле. При этом замечено, что вблизи эвтектических выделений (γ-γ') имеются зоны с наличием более мелких частиц γ'-фазы (рис. 6, в, е, и).

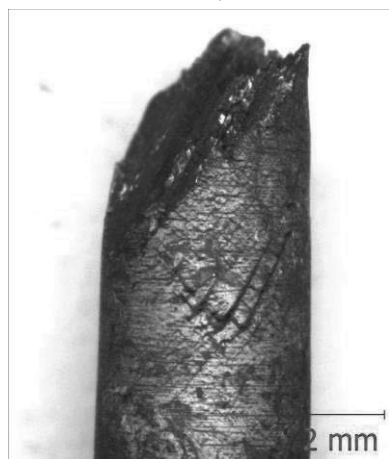
Исследованиями установлено, что форма частиц интерметаллидной γ'-фазы в структуре образцов



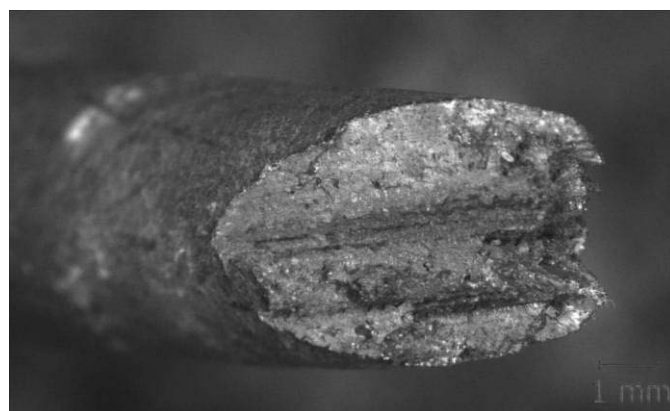
a × 6,5



б × 8



в × 6,5



г × 8

Рис. 5. Строение излома образцов из сплава ЗМИ-М5, термообработанных по режиму, предусмотренному для сплава ВЖМ-4 (*а, б* – КГО = 9,1 угл. град., время до разрушения $\tau_p = 21,0$ ч; *в, г* – КГО = 44,9 угл. град., время до разрушения $\tau_p = 55,0$ ч) после испытания на длительную прочность при 1000 °С под нагрузкой 28 кгс/мм²

после термообработки по режиму, предусмотренному для сплава ЖС32-ВИ, преимущественно глобулярная (рис. 7, *а*).

В опытных образцах, прошедших термообработку по режиму, предусмотренному для сплава ВЖМ-4, установлена кубическая форма частиц γ' -фазы (рис. 7, *б*).

Известно [5], что жаропрочность сплавов зависит не только от объемного содержания упрочняющей γ' -фазы, но также и от величины и знака размерного несоответствия параметров кристаллических решеток γ - и γ' -фаз, причем ее оптимальные значения находятся на уровне 0,15–0,35 %. В этом случае упрочняющая γ' -фаза имеет четко выраженную кубическую форму и обладает наибольшим упрочняющим действием. Если значения параметра кристаллической решетки упрочняющей фазы больше величины этого параметра γ -твердого раствора или они будут равны, то γ' -фаза принимает сферическую форму, а ее эффективность как упрочняющей фазы будет значительно ниже [6].

Таким образом, можно предположить, что снижение свойств исследуемого сплава (ЗМИ-М5), в особенности жаропрочных, обусловлено формированием структуры с крупными (до 3,5 мкм) γ' -частицами упрочняющей фазы глобулярной морфологии, характеризующейся меньшим упрочняющим действием, в сравнении с кубической формой дисперсных

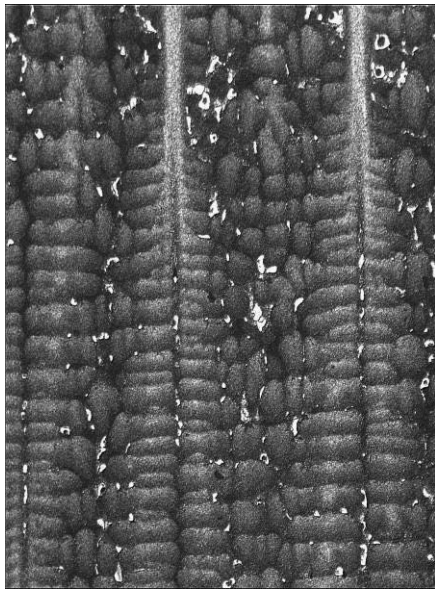
γ' -фазы размером ~ 0,5 мкм. Способствующим фактором получения нестабильных результатов также можно считать наличие структурной неоднородности вследствие образования локальных объемов с мелкими частицами γ' -фазы, размер которых в ~ 4 раза меньше, чем в основной матрице, а также выделение значительного количества эвтектической (γ - γ') фазы в виде удлиненных частиц неблагоприятной морфологии.

Параметры структурных составляющих в монокристаллических образцах из сплава ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВИ) до и после термообработки по режиму, предусмотренному для сплава ВЖМ-4, представлены в табл. 3.

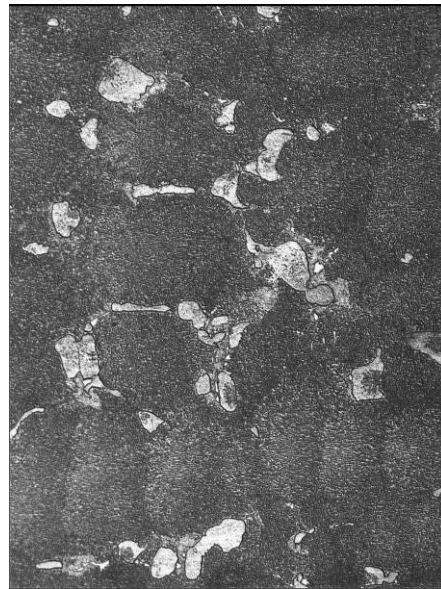
Выводы

Сплав ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВИ) по содержанию элементов (за исключением несколько завышенного содержания вольфрама, а для плавки на установке УППФ-3М – и хрома) соответствует требованиям временных технических условий (ВТУ).

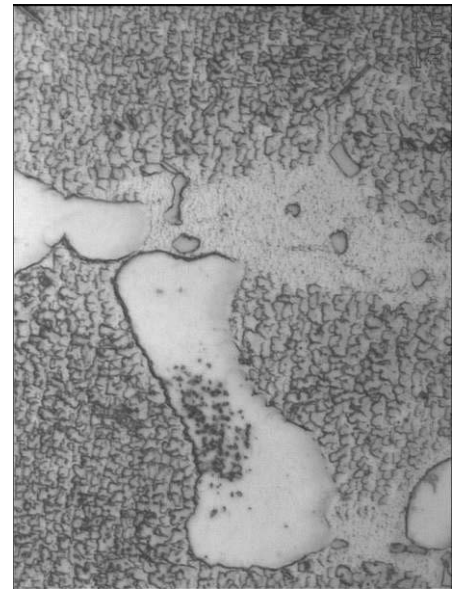
Механические свойства, а также длительная прочность при температуре испытания 975 °С и напряжении 30 кгс/мм² монокристаллических образцов после термообработки по режиму, предусмотренному для сплава ВЖМ-4, соответствуют требованиям ВТУ ЗНТУ.



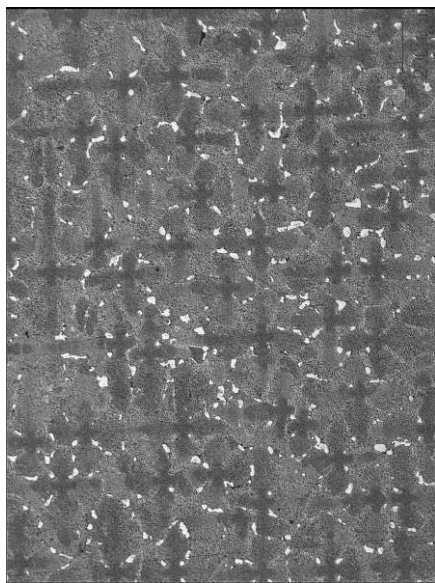
a × 50



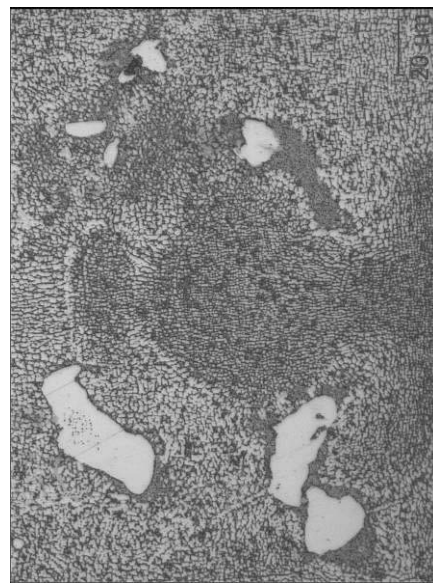
б × 200



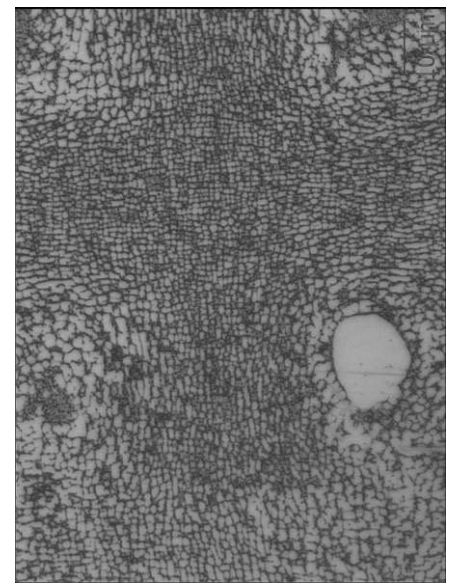
в × 1000



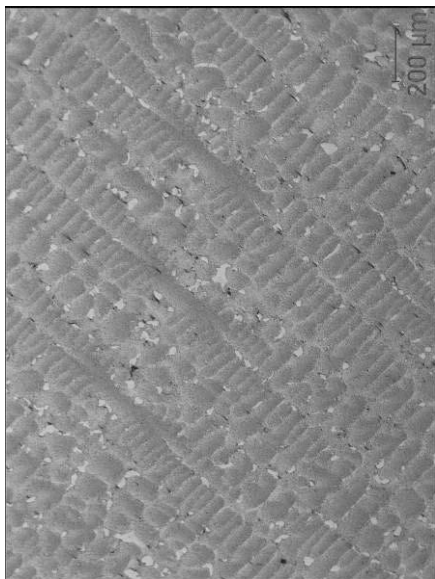
г × 50



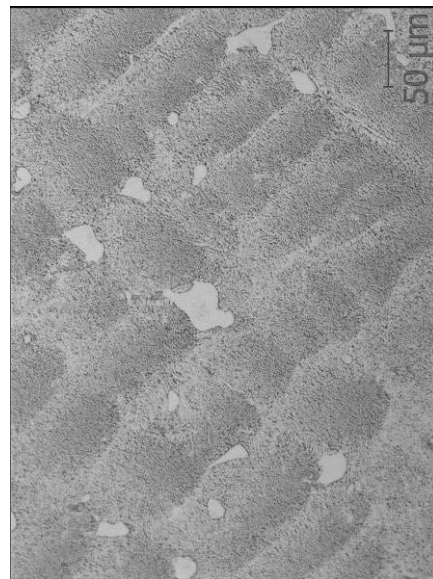
д × 200



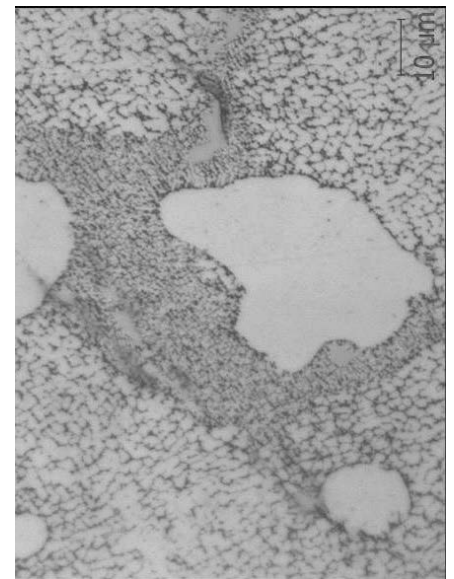
е × 1000



ж × 50

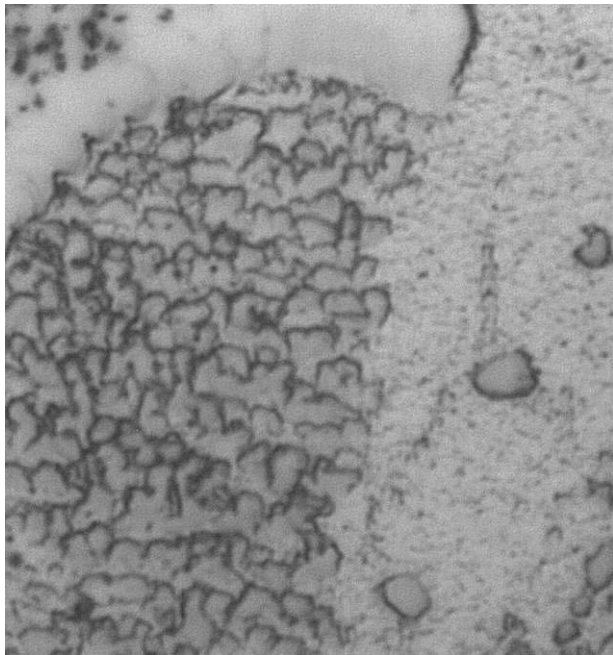


з × 200

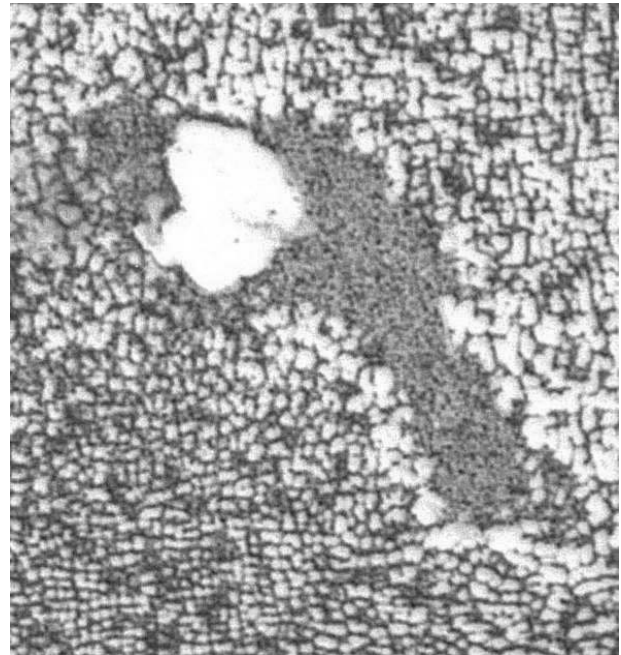


и × 1000

Рис. 6. Микроструктура образцов из сплава ЗМИ-М5, прошедших различные виды термической обработки: *а, б, в* – термообработка по стандартному режиму, предусмотренному для сплава ЖС32-ВИ (ВНК); *г, д, е* – термообработка с увеличенной до 4 часов выдержкой при температуре 1275 ± 10 °С; *ж, з, и* – термообработка по режиму, предусмотренному для сплава ВЖМ-4



а



б

Рис. 7. Состояние интерметаллидной γ' -фазы в монокристаллических образцах из сплава ЗМИ-М5 после термообработки по различным режимам $\times 1500$: а – предусмотренному для сплава ЖС32-ВИ; б – предусмотренному для сплава ВЖМ-4

Таблица 3

Размеры структурных составляющих, мкм, сплава ЗМИ-М5 с монокристаллической макроструктурой

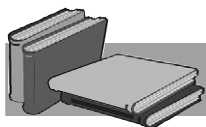
Состояние материала	Карбиды		Эвтектика типа ($\gamma-\gamma'$)	Микропоры	Расстояние между осями дендритов	
	глобулярные типа МС	пластинчатые типа М ₆ С			I порядка	II порядка
без т/о	0,5–3,0	3–32	5–40	до 27	180–245	50–80
после т/о по режиму ВЖМ-4	2–12	5–30	5–43	до 35	175–250	50–80

Значения времени до разрушения при температуре 1000 °С под нагрузкой 28 кгс/мм² нестабильны – колеблются от 21 до 55 часов. Снижение значений τ_p при 1000 °С, вероятно, обусловлено кристаллографическим направлением образцов. Отмечено, что более высокие значения τ_p (55 часов) имеют образцы с кристаллографической ориентацией [111].

Микроструктура термообработанных образцов из сплава ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВИ) характерна для жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС. Термообра-

ботка по опробованным режимам не привела к существенному уменьшению эвтектической ($\gamma-\gamma'$)-фазы в металле.

Таким образом, опытный сплав ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВИ) не содержит рения, имеет значительно меньшую стоимость, при этом обеспечивает механические свойства на уровне промышленного сплава ЖС32-ВИ и может быть использован для изготовления лопаток газотурбинных установок наземного назначения методом направленной кристаллизации.

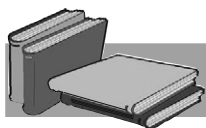


ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия) // Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, Государственный научный центр Российской Федерации. – М.: МИСИС, 2001. – 632 с.
2. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов / Р.Е. Шалин, И.Л. Светлов, Е.Б. Качанов и др. – М.: Машиностроение, 1997. – 336 с.
3. Гнатенко О.В., Гайдук С.В., Наумик В.В. Разработка экономнолегированного жаропрочного сплава для ответственных отливок // Вісник двигунобудування. – 2012. – № 1. – С. 206–210.
4. Заявка u2018 02749 Україна МПК (2006) С22С 19/00 Ливарний жароміцний нікелевий сплав / Є.В. Мілонін, П.Д. Жемаюк, С.В. Гайдук та ін. Заявник та патентовласник ПАТ «Мотор Січ»; заявлено 19.03.2018.

5. Физико-химический фазовый анализ сталей и сплавов / Н.Ф. Лашко, Л.В. Заславская, М.Н. Козлова и др. – М.: Металлургия, 1978. – 336 с.
6. Бурова Н.Н., Масленков С.Б. Структурные особенности никелевых сплавов, легированных танталом // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1979. – № 5. – С. 19–22.

Поступила 18.09.2018



REFERENCES

1. *Kablov, E.N.* (2001). Cast blades of gas turbine engines (alloys, technology, coatings). All-Russian Research Institute of Aviation Materials, State Research Center of the Russian Federation. Moscow: MISIS, 632 p [in Russian].
2. *Shalin, R.E., Svetlov, I.L., Kachanov, E.B.* et al. (1997). Single crystals of nickel heat-resistant alloys. Moscow: Mashinostroenie, 336 p. [in Russian].
3. *Gnatenko, O.V., Gayduk, S.V., Naumyk, V.V.* (2012). Development of an economically alloyed high-temperature alloy for responsible castings. *Visnyk dvygunobuduvannia*, no. 1, pp. 206–210 [in Russian].
4. Application u2018 02749 Ukraine MPK (2006). C22C 19/00 Casting heat-resistant nickel alloy / E.V. Milonin, P.D. Zhemanyuk, S.V. Gayduk et al. The applicant and the patent owner Motor Sich JSC; stated on March 19, 2018 [in Ukrainian].
5. *Lashko, N.F., Zaslavskaya, L.V., Kozlova, M.N.* et al. (1978). Physical-chemical phase analysis of steels and alloys. Moscow: Metallurgiiia, 336 p. [in Russian].
6. *Burova, N.N., Maslenkov, S.B.* (1979). Structural features of nickel alloys doped with tantalum. *Metallovedenie i termicheskaia obrabotka metallov*, no. 5, pp. 19–22 [in Russian].

Received 18.09.2018

Анотація

Є.В. Мілонін¹, нач. цеху; **Н.О. Лисенко¹**, пров. інженер;
П.Є. Малиновський¹, інженер-технолог; **В.В. Наумик²**, д-р техн. наук,
проф., проректор, e-mail: naumik@zntu.edu.ua; **С.В. Гайдук²**, канд. техн.
наук, ст. наук. співробітник

¹АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна

²Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна

Вибір раціонального режиму термічної обробки дослідного безренивого сплаву для монокристалічного литва

Проведено дослідження з вибору раціонального режиму термічної обробки для розробленого жароміцного ливарного монокристалічного сплаву ЗМІ-М5 (ЖС32Б-ВІ), що не містить в своєму складі дорогого імпортованого ренію. Показано, що механічні і жароміцні властивості монокристалічних зразків з дослідного сплаву після термооброблення за режимом, передбаченим для сплаву ВЖМ-4, відповідають вимогам нормативно-технічної документації на сплав ЖС32-ВІ. Таким чином, сплав ЗМІ-М5 має значно меншу вартість, забезпечує необхідний комплекс властивостей і може бути використаний для виготовлення лопаток газотурбінних установок наземного призначення методом спрямованої кристалізації.

Ключові слова

Жароміцний нікелевий сплав, лопатка, реній, кристалографічна орієнтація, термічне оброблення, карбіди, мікроструктура, механічні властивості, жароміцність.

Summary

E.V. Milonin¹, Plant Superintendent; **N.A. Lysenko**¹, Lead Engineer;
P.E. Malinovsky¹, Industrial Engineer; **V.V. Naumyk**², Doctor of Engineering
Sciences, Prof., vice-principal, e-mail: naumik@zntu.edu.ua;
S.V. Gaiduk², Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher

¹*Motor Sich JSC, Zaporizhzhia, Ukraine*

²*Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine*

Choice of the heat treatment rational mode of the experimental rhenium-free alloy for monocrystalline casting

The studies on the choice of a rational heat treatment mode for the developed high-temperature casting single-crystal alloy ZMI-M5 (ZhS32B-VI), which does not contain expensive imported rhenium in its composition were carried out. It is shown that the mechanical and heat-resistant properties of single-crystal samples from the experimental alloy after heat treatment according to the regime for the VZHM-4 alloy meet the normative and technical documentations requirements for the ZhS32-VI alloy. Thus, the ZMI-M5 alloy has a significantly lower cost, provides the required set of properties and can be used for the manufacture of blades of gas turbine installations for surface use by directional crystallization.

Keywords

Heat-resistant nickel alloy, blade, rhenium, crystallographic orientation, heat treatment, carbides, microstructure, mechanical properties, heat resistance.