

УДК 621.74.045:669.245.018.44

Е. В. МИЛОНИН<sup>1</sup>, П. Е. МАЛИНОВСКИЙ<sup>1</sup>, В. В. НАУМИК<sup>2</sup>, С. В. ГАЙДУК<sup>2</sup><sup>1</sup>АО "Мотор Сич", Запорожье, Украина<sup>2</sup>Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

## ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ОПЫТНОГО ЖАРОПРОЧНОГО НИКЕЛЕВОГО БЕЗРЕНИЕВОГО СПЛАВА ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВИ)

Изучены состав, структура и свойства литых образцов, полученных из опытного жаропрочного никелевого безрениевого сплава ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВИ), методом высокоскоростной направленной кристаллизации. Механические свойства, а также длительная прочность при температуре испытания 975 °С и напряжении 30 кгс/мм<sup>2</sup> соответствуют требованиям временных технических условий. Микроструктура опытных образцов после термообработки характерна для жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС. Опытный сплав 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.

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

### Анализ состояния вопроса

Экономические реалии современной Украины все более остро ставят вопрос снижения себестоимости производимых узлов и агрегатов. При этом наша страна остаётся одним из признанных лидеров в изготовлении энергетических установок.

Одним из ключевых элементов таких изделий являются литые лопатки турбин, обеспечивающие преобразование потенциальной энергии, образующейся в процессе сгорания топлива в кинетическую энергию вращающейся турбины, которая в дальнейшем может быть использована различными способами, в зависимости от назначения установки.

Одной из особенностей эксплуатации наземных установок в отличие от авиационных двигателей является гораздо более низкое качество используемого топлива. В результате используемые горючие материалы содержат гораздо большее количество агрессивных (сернистых и прочих) примесей, что выводит на первое место не прочностные характеристики материала литых изделий горячего тракта, а их способность сопротивляться высокотемпературной коррозии в условиях эксплуатации агрегата.

Ранее был проведен комплекс исследований [1], в результате 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, в отличие от последнего обеспечи-

вает достаточную для эксплуатации указанных изделий стойкость против высокотемпературной коррозии в агрессивных средах.

Указанный сплав характеризуется пониженным в два раза, по сравнению с ЖС32-ВИ, содержанием одного из самых дорогостоящих в его составе элементов – рения.

Однако 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 особенно, 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.

Разработан состав безрениевого жаропрочного никелевого сплава, содержащего повышенное количество тантала и вольфрама, предназначенного для изготовления турбинных лопаток наземных установок, получаемых методом высокоскоростной направленной кристаллизации.

Тантал [2] является одним из элементов, которые оказывают сильное влияние на термическую устойчивость выделений упрочняющей  $\gamma'$ -фазы.

Положительное влияние тантала на механические свойства никелевых сплавов объясняется не только тем, что он упрочняет  $\gamma$ -твердый раствор и  $\gamma'$ -фазу, но и тем, что при легировании этим элементом

образуется монокарбид тантала, более прочно связанный с матрицей по сравнению с другими видами карбидов [3]. 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 [2]. Легирование жаропрочных сплавов танталом обеспечивает их длительную работоспособность при повышенной температуре.

Введение W или Mo (или W и Mo вместе) в никелевые сплавы способствует дальнейшему повышению жаропрочности в интервале более высоких температур. Раздельное легирование никелевых сплавов различными элементами не столь эффективно, как комплексное.

Если содержание W и Mo невелико во многих сплавах с низким содержанием углерода не входят в состав упрочняющих фаз. Присутствуя в твердом растворе, эти элементы оказывают благоприятное влияние, повышая термической стойкость раствора путем торможения процессов разупрочнения при высоких температурах. Они повышают также температуру рекристаллизации твердого раствора, кроме того, молибден повышает энергию активации самодиффузии хрома в сплаве [4]. Вольфрам в жаропрочных хромоникелевых сплавах распределяется по осям дендритов, тогда как молибден и ниобий имеют тенденцию к распределению по границам зерен.

### Основной материал исследований

На установке FM-1-2-100 фирмы «ULVAC» изготовили опытный жаропрочный никелевый безрениевый сплав ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВИ).

Методом высокоскоростной направленной кристаллизации (ВНК) на установке УВНК-9А из опытного сплава были отлиты образцы. Скорость опускания в жидкометаллический охладитель составляла  $4 \pm 1$  мм/мин.

Химический состав полученных образцов из сплава ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВИ) представлен в табл. 1.

Из результатов, приведенных в таблице 1, видно, что содержание элементов (за исключением содержания вольфрама) в материале исследуемых образцов соответствует требованиям временных ТУ для сплава ЗМИ-М5.

Механические и жаропрочные свойства определяли на образцах ( $\varnothing 15$  мм;  $L = 135$  мм) после термообработки по следующему режиму:

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

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

Таблица 1  
Химический состав опытных образцов из жаропрочного сплава ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВИ)

Содержание элементов, % по массе	Источник	
	Образец ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВИ)	Нормы ВТУ для сплава ЗМИ-М5
C	0,05	0,04...0,08
Cr	5,29	4,7...5,3
Co	5,42	5,0...6,0
W	9,46	8,7...9,3
Mo	0,84	0,5...1,0
Al	5,76	5,7...6,3
Cu	0,009	$\leq 0,07$
Ta	9,0	8,7...9,3
Si	0,02	$\leq 0,3$
Mn	0,03	-
Fe	0,06	$\leq 1,0$
S	0,006	$\leq 0,010$
P	0,004	$\leq 0,010$
B	0,012	$\leq 0,020$
Ni	основа	основа

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

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

– охлаждение до  $70$  °С в среде аргона;

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

– охлаждение до  $70$  °С в среде аргона.

На стартовых конусах образцов с монокристаллической структурой, отлитых из сплавов ЗМИ-М5 методом ВНК, определили кристаллографическую ориентацию (КГО). Значения отклонений направления [001] от оси Z в образцах, колебались от  $9,1$  угл. град до  $54,7$  угл. град. (табл. 2).

Остальные образцы имели направленную структуру с количеством кристаллов  $\geq 3$ .

Результаты механических испытаний и испытаний на длительную прочность приведены в таблице 3.

Из данных, представленных в таблице 3, видно, что механические свойства, испытанные при темпе-

ратуре 20 °С, а также длительная прочность при температуре испытания 975 °С и напряжении 30 кгс/мм<sup>2</sup> соответствуют требованиям временных технических условий (ВТУ ЗНТУ).

Значения времени до разрушения при температуре испытания 1000 °С и напряжении 28 кгс/мм<sup>2</sup> нестабильны – находятся на уровне от 21 часа до 55 часов. Снижение значений  $\tau_p$  при 1000 °С, вероятно, обусловлено кристаллографическим направлением образцов. Установлено, что более высокие значения  $\tau_p$  (55 часов) имеют образцы с кристаллографической ориентацией [111].

На рис. 1, 2 показаны изломы образцов № 4 и 5 после испытания на длительную прочность при температуре 1000°С и напряжении 28 кгс/мм<sup>2</sup>.

Таблица 2

Кристаллографическая ориентация опытных образцов с монокристаллической структурой

№ п/п	Отклонение направления [001] от оси Z, угл. град.
1	35,2
2	47,4
3	24,9
4	9,1
5	44,9
6	17,2

Таблица 3

Механические и жаропрочные свойства опытного сплава ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВИ)

№ образца (КГО)	Механические свойства при 20 °С			Длительная прочность		
	$\sigma_b$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\Psi$ , %	$T_{исп.}$ °С	$\sigma$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\tau_p$ , час.
2 (47,4)	134,0	6,8	8,6	-	-	-
	139,6	5,2	8,6	-	-	-
4 (9,1)	-	-	-	975	30	60,5
				1000	28	21,0
5 (44,9)	-	-	-	975	30	95,15
				1000	28	55,0
6 (17,2)	-	-	-	975	30	90,5
				1000	28	26,25
Нормы ВТУ ЗНТУ	$\geq 100,0$	$\geq 6,0$	-	975	30	$\geq 40,0$
Нормы ТУ1-92-177-91 и 18Т-ТУ-158 (для сплава ЖС32-ВИ)	$\geq 90,0$	$\geq 6,0$	-	1000	28	$\geq 40,0$

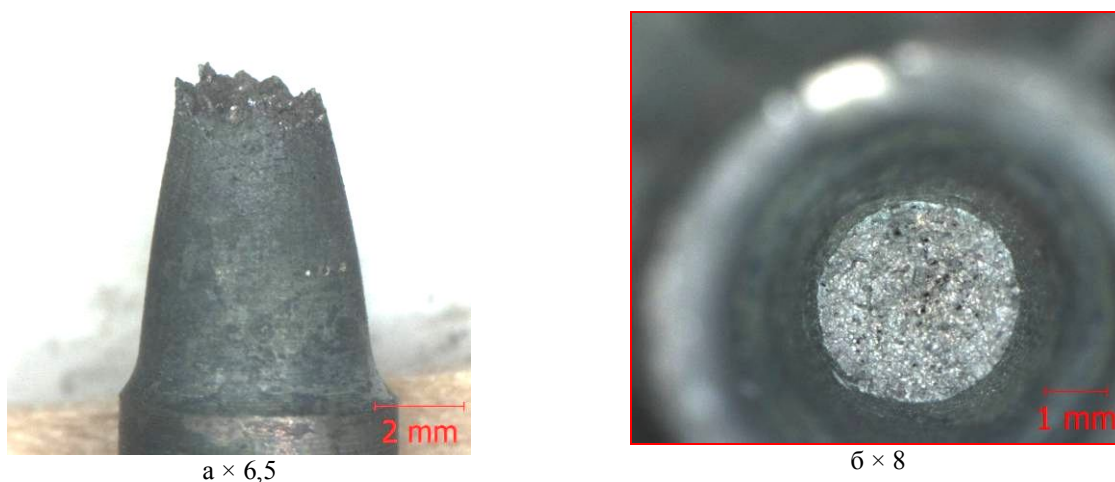


Рис. 1. Строение излома образца № 4 (КГО = 9,1 угл. град.) из сплава ЗМИ-М5 после испытания на длительную прочность при 1000 °С под нагрузкой 28 кгс/мм<sup>2</sup> ( $\tau_p = 21,0$  ч)

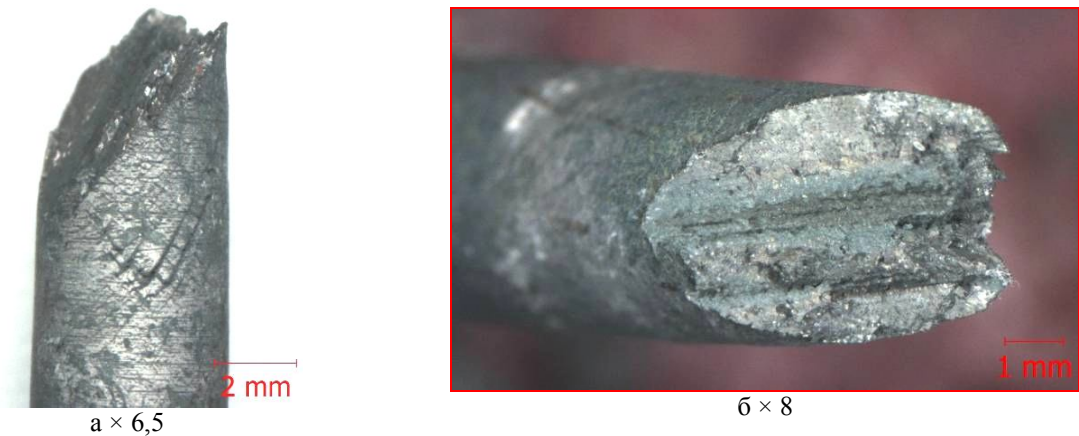


Рис. 2. Строение излома образца № 5 (КГО = 44,9 угл. град.) из сплава ЗМИ-М5 после испытания на длительную прочность при 1000 °С под нагрузкой 28 кгс/мм<sup>2</sup> ( $\tau_p = 55,0$  ч)

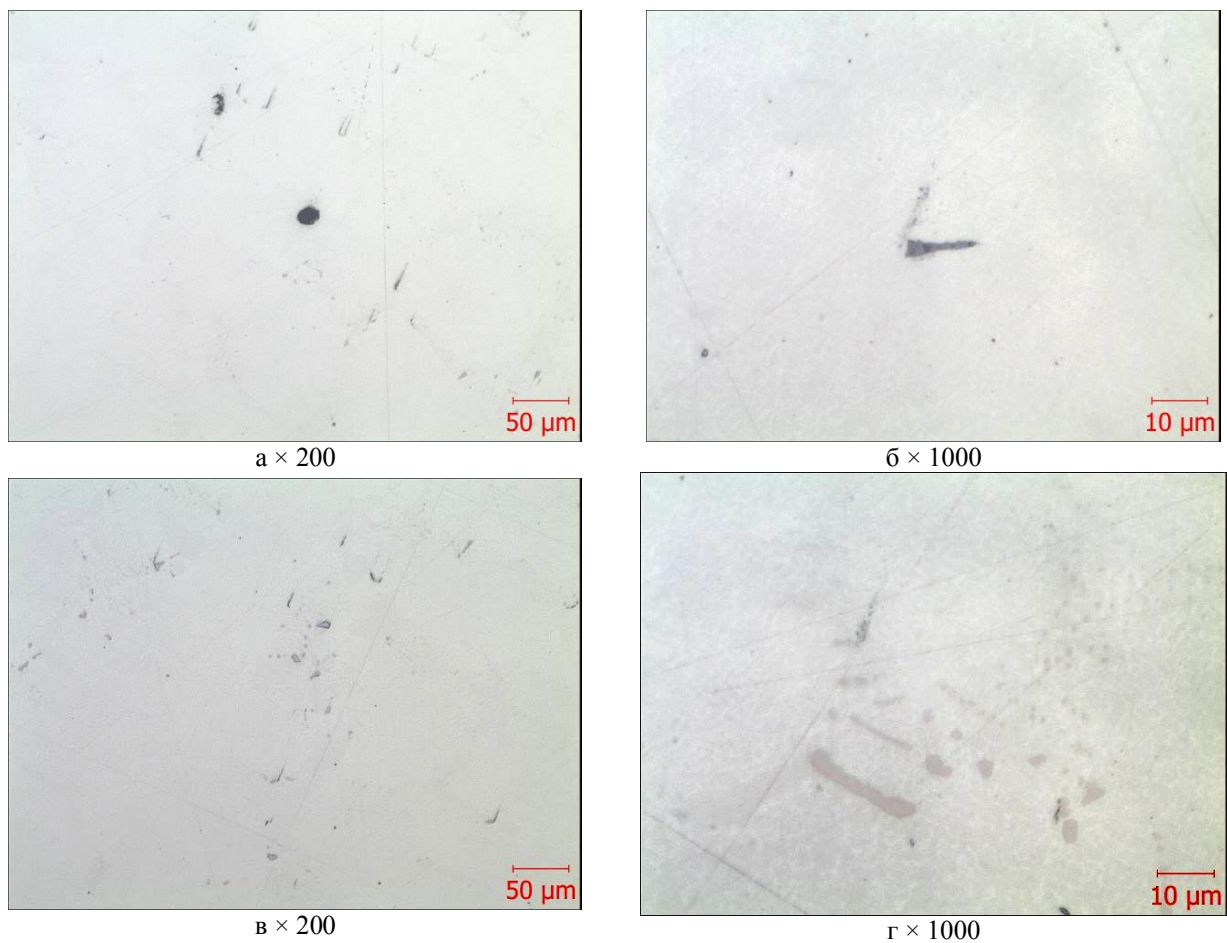


Рис. 3. Микропоры (а), оксидные включения (б) и карбиды (в, г) в опытных образцах из сплава ЗМИ-М5

При металлографическом исследовании не-травленных микрошлифов в материале опытных образцов обнаружено небольшое количество микропор размером до 15 мкм (рис. 3, а), единичные оксидные включения, размер которых не превышает до ~12 мкм (рис. 3, б), а также незначительное количество карбидов, что характерно для структуры низкоуглеродистого сплава ЗМИ-М5 ( $C \leq 0,08\%$ ) (рис. 3, в, г).

Микроструктура термообработанных образцов из сплава ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВИ) представляет собой  $\gamma$ -твердый раствор, упрочненный интерметаллидной  $\gamma'$ -фазой, с наличием эвтектической фазы ( $\gamma$ - $\gamma'$ ) и незначительного количества карбидов (рис. 4).

Проведение термообработки по указанному выше режиму способствовало некоторому уменьшению структурной неоднородности вследствие выравнивания химического состава в пределах

дендритной ячейки. При этом следует отметить, что термообработка по указанному режиму не привела к существенному уменьшению эвтектической ( $\gamma$ - $\gamma'$ )-фазы в металле. Замечено, что вблизи некоторых эвтектических выделений ( $\gamma$ - $\gamma'$ ) имеются зоны с наличием более мелких частиц  $\gamma'$ -фазы (рис. 5, а).

При изучении структурного состояния в материале исследованных образцов (как до, так и после термообработки) наряду с выделениями эвтектики ( $\gamma$ - $\gamma'$ ), имеющей округлую форму, обнаружено значительное количество удлиненных эвтектических частиц типа ( $\gamma$ - $\gamma'$ ) с соотношением длины и толщины  $\sim 8:1$  (рис. 5, б).

Структуры, характерные для перегретого состояния никелевого жаропрочного сплава, не обнаружены; перегрева нет.

ТПУ-фазы пластинчатой морфологии в структуре всех термообработанных образцов не обнаружены. Наличие ТПУ-фаз в сплаве ЗМИ-М5 нормативной документацией не регламентированы.

В структуре материала образца образца № 2 из сплава ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВИ) после термической обработки были выявлены небольшие количества карбидов: глобулярных типа МС размером 2...7 мкм и пластинчатых типа М6С размером 5...20 мкм; эвтектика типа ( $\gamma$ - $\gamma'$ ) размером 5...50 мкм.

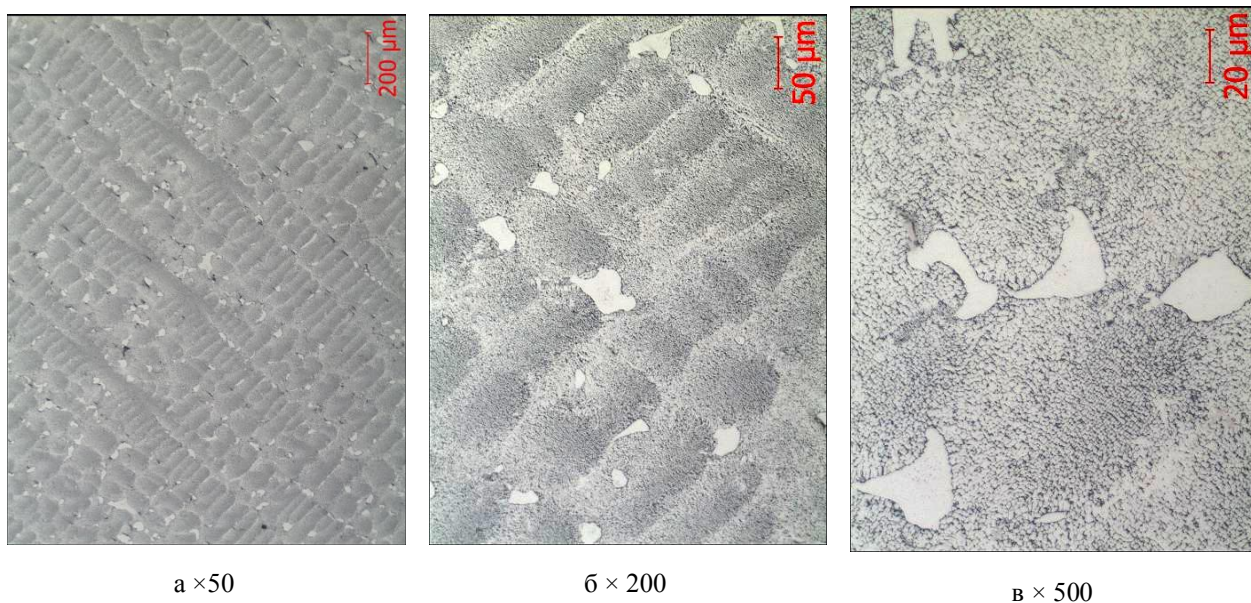


Рис. 4. Микроструктура образцов из сплава ЗМИ-М5 после термообработки (осевое сечение)

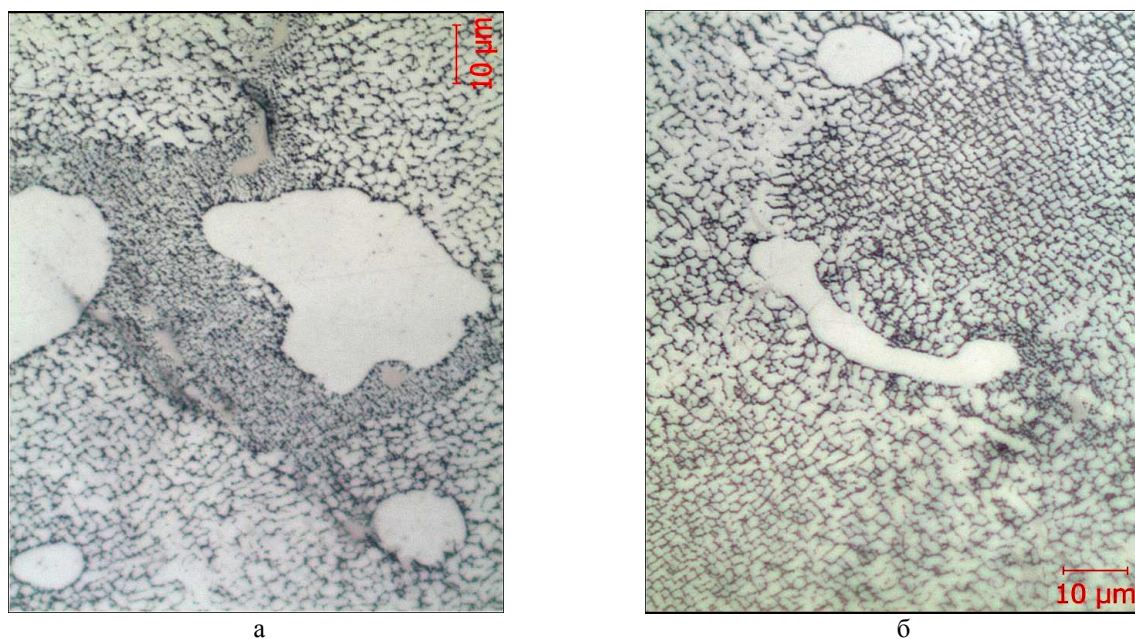


Рис. 5. Микроструктура образцов из сплава ЗМИ-М5 после термообработки (осевое сечение),  $\times 1000$

Расстояние между осями дендритов I порядка составляло 375...395 мкм, II порядка – 45...67 мкм. Также выявлены микропоры размером до 15 мкм.

### Выводы

Сплав ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВИ) по содержанию элементов (за исключением содержания вольфрама) соответствует требованиям временных технических условий (ВТУ).

Механические свойства, а также длительная прочность при температуре испытания 975 °С и напряжении 30 кгс/мм<sup>2</sup> соответствуют требованиям ВТУ ЗНТУ.

Значения времени до разрушения при температуре 1000 °С под нагрузкой 28 кгс/мм<sup>2</sup> нестабильны – колеблются от 21 до 55 часов. Снижение значений  $\tau_r$  при 1000 °С, вероятно, обусловлено кристаллографическим направлением образцов. Установлено, что более высокие значения  $\tau_r$  (55 часов) имеют образцы с кристаллографической ориентацией [111].

Микроструктура термообработанных образцов из сплава ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВИ) характерна для жаропрочных никелевых сплавов типа ЖС. Термообработка по указанному режиму 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. Гнатенко, О. В. Разработка экономнолегированного жаропрочного сплава для ответственных отливок [Текст] / О. В. Гнатенко, С. В. Гайдук, В. В. Наумик // *Вісник двигунобудування*. – 2012. – № 1. – С. 206 – 210.
2. Физико-химический фазовый анализ сталей и сплавов [Текст] / Н. Ф. Лашко [и др.]. – М. : *Металлургия*, 1978. – 336 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.
4. Химушин, Ф. Ф. Легирование, термическая обработка и свойства жаропрочных сталей и сплавов [Текст] / Ф. Ф. Химушин. – М. : *Оборонгиз*, 1962. – 334 с.

### References

1. Gnatenko, O. V., Gaiduk, S. V., Naumyk, V. V. Razrabotka ekonomnolegirovannogo zharoprochnogo splava dlya otvetstvennykh otlivok [Development of an economically alloyed high-temperature alloy for critical castings]. *Messenger of engine building*, 2012, no. 1, pp. 206 – 210.
2. Lashko, N. F. and others. Fiziko-himicheskiy fazovyy analiz staley i splavov [Physical-chemical phase analysis of steels and alloys]. Moscow, Metallurgy Publ., 1978. 336 p.
3. Burova, N. N., Maslenkov, S. B. Strukturnyye osobennosti nikelovykh splavov, legirovannykh tantalom [Structural features of nickel alloys doped with tantalum]. *Metallurgy and heat treatment of metals*, 1979, no. 5, pp. 19 – 22.
4. Khimushin, F. F. Legirovanie, termicheskaya obrabotka i svoystva zharoprochnykh staley i splavov [Alloying, heat treatment and properties of heat-resistant steels and alloys]. Moscow, Oborongiz Publ., 1962. 334 p.

Поступила в редакцию 12.05.2018, рассмотрена на редколлегии 25.07.2018

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ДОСЛІДНОГО ЖАРОМІЦНОГО НІКЕЛЕВОГО БЕЗРЕНІЕВОГО СПЛАВА ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВІ)

Є. В. Мілонін, П. Є. Малиновський, В. В. Наумик, С. В. Гайдук

Вивчено склад, структура та властивості литих зразків, отриманих з дослідного жароміцного нікелевого безренієвого сплаву ЗМИ-М5 (ЖС32Б-ВІ), методом високошвидкісної спрямованої кристалізації. Механічні властивості, а також тривала міцність при температурі випробування 975 °С і напрузі 30 гс/мм<sup>2</sup> відповідають вимогам тимчасових технічних умов. Мікроструктура дослідних зразків після термообробки характерна для жароміцних нікелевих сплавів типу ЖС. Дослідний сплав не містить ренію, має значно меншу вартість, при цьому забезпечує механічні властивості на рівні промислового сплаву ЖС32-ВІ і може бути використаний для виготовлення лопаток газотурбінних установок наземного призначення методом спрямованої кристалізації.

**Ключові слова:** жароміцний нікелевий сплав, хімічний склад, реній, спрямована кристалізація, термообробка, мікроструктура, механічні властивості, тривала міцність.

**INVESTIGATION OF THE QUALITY OF EXPERIMENTAL HEAT-RESISTANT  
RHENIUM-FREE ALLOY ZMI-M5 (ZHS32B-VI)**

*Ye. V. Milonin, P. E. Malinovsky, V. V. Naumyk, S. V. Gayduk*

One of the features of the operation of ground installations in contrast to aircraft engines is the much lower quality of the fuel used. As a result, the combustible materials used contain much more aggressive (sulfur and other) contaminants, which leads to the non-strength characteristics of the material of cast parts of the hot tract, and their ability to resist high-temperature corrosion in the operating conditions of the unit.

Analysis of the effect of alloying elements on the properties of high-temperature nickel alloys for ground installations leads to the conclusion that it is expedient to completely eliminate expensive rhenium from their composition and replace it with an increased content of relatively less expensive alloying elements, which simultaneously provide sufficiently high heat resistance and necessary resistance against high-temperature corrosion.

The composition, structure and properties of cast samples obtained from the experimental heat-resistant rhenium-free alloy ZMI-M5 (ZhS32B-VI), by high-speed directional crystallization were studied.

The alloy ZMI-M5 (ZhS32B-VI) according to the content of elements (with the exception of tungsten content) complies with the requirements of the temporary technical conditions.

Mechanical properties, as well as long-term strength at the 975 °C test temperature and 30 kgf/mm<sup>2</sup> loading meet the requirements of the temporary technical conditions.

The time to failure at a temperature of 1000 °C under a load of 28 kgf/mm<sup>2</sup> is unstable, ranging from 21 to 55 hours. The decrease in the  $\tau_p$  values at 1000 °C is probably due to the crystallographic direction of the samples. It is established that higher  $\tau_p$  values (55 h) have samples with a crystallographic orientation.

The microstructure of the samples after heat treatment is characteristic of high-temperature nickel alloys of the ZhS type. Heat treatment in this regime did not lead to a significant eutectic ( $\gamma$ - $\gamma$ ) phase reduction in the metal.

The experimental alloy ZMI-M5 (ZhS32B-VI) does not contain rhenium, it has a significantly lower cost, while it provides mechanical properties at the level of the industrial alloy ZhS32-VI and can be used for ground use gas turbine installations blades manufacturing by directional crystallization.

**Key words:** heat-resistant nickel alloy, chemical composition, rhenium, directed crystallization, heat treatment, microstructure, mechanical properties, long-term strength.

**Милонин Евгений Владимирович** – начальник цеха АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: milon7n@gmail.com.

**Малиновский Павел Евгениевич** – инженер-технолог АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: tiger19783@gmail.com.

**Наумик Валерий Владиленович** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры машин и технологии литейного производства, проректор Запорожского национального технического университета (ЗНТУ) по научной работе и международной деятельности, Запорожье, Украина, e-mail: naumik@zntu.edu.ua.

**Гайдук Сергей Валентинович** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. каф. «Физическое материаловедение», Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

**Milonin Evgeniy Vladimirovich** – Head of the shop JSC «Motor Sich», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: milon7n@gmail.com.

**Malinovsky Pavel Evgenyevich** – engineer-technologist JSC «Motor Sich», Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: tiger19783@gmail.com.

**Naumyk Valeriy Vladilenovich** – doctor of technical sciences, professor, professor of the Department of foundry machinery and technology, Vice-rector of Zaporizhzhia National Technical University (ZNTU) for scientific work and international activities, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: naumik@zntu.edu.ua.

**Gaiduk Sergey Valentinovich** – PhD, Senior Researcher dep. "Physical Materials Science", Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine.