

УДК 669.245.018.044

doi: 10.32620/aktt.2021.4sup1.17

Т. В. ТИХОМИРОВА, Е. И. ГОРДИЕНКО, Р. В. БЕХТЕР, А. В. ПОДОБНЫЙ

ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс» им. академика А.Г.Ивченко, Запорожье, Украина

ВЛИЯНИЕ МИКРОЛЕГИРОВАНИЯ ИТТРИЕМ И ГАФНИЕМ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И МОРФОЛОГИЮ КАРБИДНОЙ ФАЗЫ СПЛАВА ЖСЗДК-ВИ ПРИ ЗАМЕДЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Проанализированы плавки сплава ЖСЗДК-ВИ с различным уровнем прочностных характеристик и определены факторы, влияющие на их снижение, отличия в макро и микроструктуре сплава, влияние скорости кристаллизации при сливе расплава в горячие и холодные керамические формы. Так как при отливке деталей уровень свойств определяется на отдельно отлитых образцах, в технологии изготовления образцов должны быть соблюдены параметры отливки соответствующей детали и при повышении прочностных характеристик за счет изменения технологических параметров необходимо обязательно рассматривать возможность изменения технологии отливки деталей. Однако для деталей сложной конфигурации, отливаемых из жаропрочных никелевых сплавов, изменение технологии зачастую невозможно, поэтому единственным способом повлиять на свойства материала можно применяя микролегирующие редкоземельными элементами, например, иттрием и гафнием. Введение этих легирующих элементов в небольшом количестве оказывает положительное влияние на факторы, снижающие свойства сплава ЖСЗДК-ВИ, такие как неблагоприятная форма и топография карбидной фазы, или даже немного изменить химический состав карбидов. В статье проанализировано влияние микролегирующего гафнием и иттрием на морфологию и топографию карбидной фазы, отмечены позитивные изменения микроструктуры и прочностных характеристик при комнатной температуре жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ. Отработана технология микролегирующего расплава для получения удовлетворительных значений прочностных характеристик при испытаниях на растяжение и ударной вязкости при комнатной температуре. Микролегирующий сплав ЖСЗДК-ВИ гафнием в концентрации 0,15...0,25 % позволило повысить прочностные характеристики на образцах для механических испытаний на 10-15 % при условии слива расплава в горячие керамические формы и замедленном охлаждении. Более высокие концентрации гафния при медленной кристаллизации приводят к образованию нехарактерных для сплава ЖСЗДК-ВИ эвтектических фаз, требующих снижения температуры термообработки, что, соответственно, приводит к снижению уровня длительной прочности при 850°C.

Ключевые слова: микроструктура; сплав; микролегирующее; гафний; иттрий; предел прочности; ударная вязкость; карбидная фаза.

Введение

Периодически при входном контроле сплава ЖСЗДК-ВИ, как 100 % исходного сплава, так и при заливке с использованием 50 % возвратных материалов, выявляется несоответствие уровня кратковременных механических свойств при комнатной температуре требованиям технической документации: предела прочности, относительного удлинения и ударной вязкости.

При анализе причин несоответствия на металлургических предприятиях не была выявлена связь между содержанием химических элементов и уровнем свойств.

Сплав ЖСЗДК-ВИ выплавляется в вакуумных индукционных печах для получения литых прутковых заготовок, из которых в дальнейшем отливаются детали. На металлургическом предприятии, как

правило, приемо-сдаточный контроль механических свойств осуществляется на образцах, вырезанных из трефообразных слитков, полученных методом переплава литой прутковой заготовки в порционной печи ВИПЭ-3 и слива расплава в холодные керамические формы, температура которых – на уровне 300°C. При соблюдении такой технологии уровень механических свойств соответствует требуемому.

Однако по сложившейся технологии на предприятии при входном контроле осуществляется отливка пальчиковых образцов в горячие керамические формы (900 °C), что допускается и соответствует требованиям ОСТ 1 90126. При этом процент несоответствия прочностных характеристик при комнатной температуре значительно превышает результаты приемо-сдаточных испытаний. При сливе расплава в холодные формы образцов из сплава таких плавов без изменения других параметров

литься, как правило, получают свойства на уровне требований ТД.

Анализ причин снижения прочностных характеристик

При исследовании сплава ЖСЗДК-ВИ, с разным уровнем механических свойств установлено:

- микроструктура материала независимо от уровня прочностных характеристик характеризуется разнотернистостью и выраженной дендритной неоднородностью, которая полностью не удаляется при высокотемпературной термической обработке;

- микроструктура материала плавки с неудовлетворительным уровнем свойств характеризуется выделением карбидов в виде пластинчатых частиц по междендритным пространствам и границам зерен (рис. 1,а). В микроструктуре материала плавки с удовлетворительным уровнем кратковременных характеристик карбиды представлены в виде глобулярных частиц (рис. 1,б);

- химический состав рассмотренных плавки находился в интервале требований ОСТ 1 90126.

Известно, что быстрый теплоотвод в процессе кристаллизации жаропрочных никелевых сплавов благоприятен для формирования карбидов в виде глобулярных частиц и может помешать образованию сплошных охрупчивающих пленок из первичных карбидов по границам зерен [2].

На основании анализа проведенных исследований был сделан вывод, что основной причиной снижения прочностных характеристик сплава ЖСЗДК-ВИ является формирование карбидов неблагоприятной формы в виде пластинчатых частиц по границам зерен.

По результатам экспериментальной работы по исследованию формирования микроструктуры в условиях замедленного охлаждения с печью получена структура с пластинчатыми карбидами по границам зерен в виде «сетки» (рис. 2).

Для эксперимента выбрана плавка с изначально неудовлетворительными характеристиками, полученными при входном контроле. При рентгеноспектральном микроанализе (РСМА) микроструктуры, выполненном на электронном микроскопе JEOLIT 300LA АО «Мотор Сич», подтверждено, что удлиненные частицы по границам зерен и в междендритном пространстве являются карбидами (Ti, Mo, Cr) С (рис. 3).

При испытании на растяжение получено снижение предела прочности на ~20 %, пластичности и ударной вязкости в три раза.



а



б

Рис. 1. Форма карбидов в сплаве ЖСЗДК-ВИ:
а – микроструктура образца с неудовлетворительными прочностными характеристиками,
б – микроструктура образца с удовлетворительными прочностными характеристиками



Рис. 2. Карбидная сетка, полученная на образце из сплава ЖСЗДК-ВИ при охлаждении

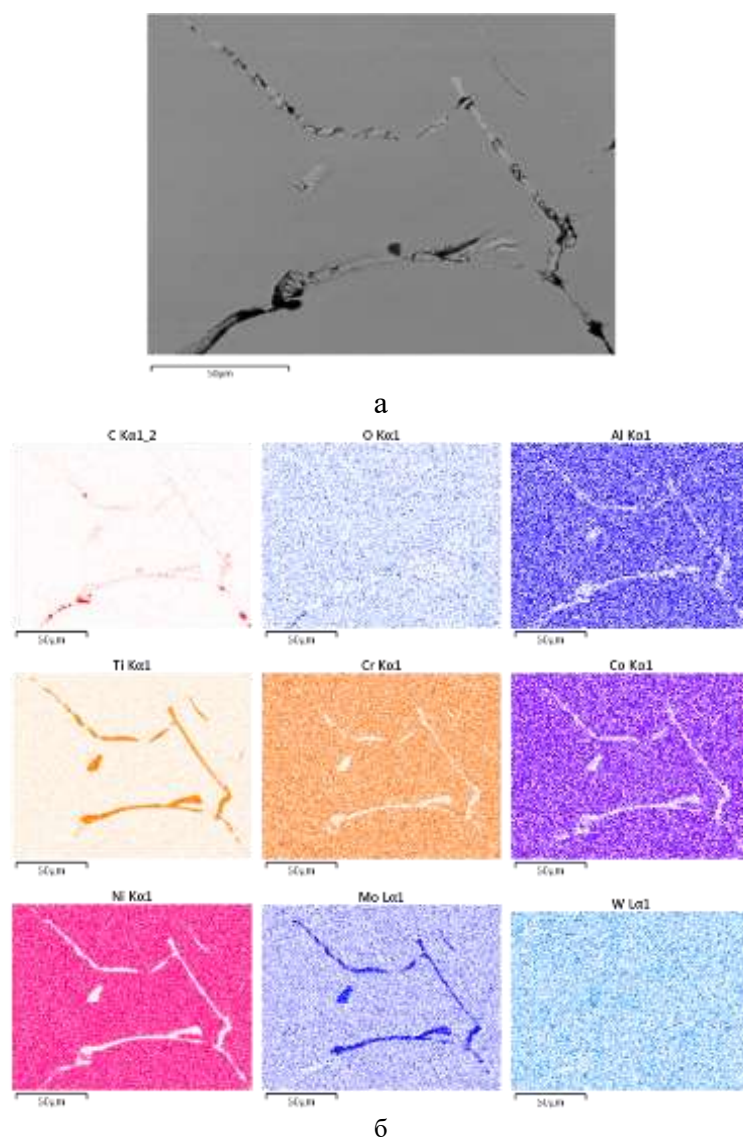


Рис. 3. Распределение химических элементов в микроструктуре сплава ЖСЗДК-ВИ: а – в режиме отраженных электронов, б – в режиме картирования карбидной фазы

Постановка задачи

При отливке деталей слив расплава ЖСЗДК-ВИ выполняется в горячие керамические формы для обеспечения получения сложной конфигурации деталей, а согласно требованиям ТД контроль прочностных характеристик необходимо определять на образцах, полученных по технологии, аналогичной получению детали. Соответственно, плавки со сниженным уровнем прочностных характеристик нельзя пропускать в производство, даже при получении удовлетворительных значений свойств за счет изменения технологии получения образцов – слива расплава в холодные формы.

Учитывая высокую стоимость жаропрочных никелевых сплавов и двусмысленное толкование требований ОСТ 1 90126, который допускает отливку образцов как в горячие формы, так и в холодные, существует необходимость изучить возможность

повышения прочностных характеристик сплава с неудовлетворительным уровнем прочностных характеристик при условии сохранения параметров технологии литья образцов и деталей.

Основной целью данной работы является изучение влияния микролегирования гафнием и иттрием на морфологию карбидной фазы и микроструктуры в целом, а также на уровень прочностных характеристик при комнатной температуре. Выбор перечисленных элементов связан с наличием многочисленных исследований их влияния на микроструктуру и свойства жаропрочных никелевых сплавов [2 – 4].

Порядок выполнения работы

Для работы выбрана плавка сплава ЖСЗДК-ВИ, показавшая на этапе входного контроля неудовлетворительный уровень прочностных характеристик (табл. 1).

Опробование микролегирования проводилось на цилиндрических образцах. Заливка образцов выполнялась в горячую форму 950°C. Гафний и иттрий вводились в виде лигатуры ГФН-10 и ИтН-1 за 1 минуту до слива расплава в форму. Далее керамическая форма охлаждалась с печью.

Микролегирование расплава гафнием выполнено в следующих концентрациях: 0,05...0,15 %, 0,15...0,25 %, 0,25...0,35 %. Микролегирование расплава всех плавов иттрием выполнено в концентрациях, рекомендуемых ОСТ 1 90126 – 0,01...0,015 % [1].

Все образцы прошли термообработку – гомогенизацию при температуре 1210°C, 4 часа

Далее выполнены испытания образцов при комнатной температуре на растяжение, определение ударной вязкости, длительной прочности и металлографические исследования с применением оптической микроскопии (микроскоп AxioObserver 5), и электронной микроскопии (электронный растровый микроскоп JEOL IT 300LA).

Результаты исследования

В таблице 1 приведены результаты испытания на растяжение и ударной вязкости при комнатной температуре образцов исходной плавки и образцов, отлитых с применением микролегирования. Значения длительной прочности для всех образцов оставались на уровне требований ОСТ 1 90126.

Таблица 1

Кратковременные прочностные характеристики при испытании на растяжение в зависимости от вводимой концентрации гафния

Вводимая концентрация гафния	σ_b , кгс/мм ²	δ , %	КСУ, кгс/см ²
0,05...0,15 %	81...92	17...27	3,5...4,5
0,15...0,25 %	94...98	10...11	3,5...4,3
0,25...0,35 %	81...83	9,5...10,5	1,9...2,3
Исходная плавка, входной контроль	77...91	8,6...11	3,0
ОСТ 1 90126	95	≥ 7	≥ 3

При микролегировании гафнием из расчета содержания 0,15...0,25 % получено повышение предела прочности на ~10 %, введение гафния в концентрациях 0,05...0,15 % и 0,25...0,35 % не оказало позитивного влияния на уровень свойств.

При металлографическом исследовании микроструктуры отмечены изменения морфологии карбидной фазы в зависимости от концентрации гафния:

- при введении 0,05...0,15 % гафния карбидная фаза представлена, как в виде глобулярных, так и пластинчатых частиц, расположенных в междендритных пространствах (рис. 4,а);

- при введении гафния из расчета 0,15...0,25 %

гафния карбиды представлены в виде глобулярных частиц, расположенных по границам зерен и в междендритных пространствах (рис. 4,б);

- при введении 0,25...0,35 % гафния получена наиболее благоприятная морфология карбидной фазы: карбидные частицы имеют глобулярную форму, по сечению шлифа расположены хаотично (рис. 4,в).

Однако при наиболее благоприятной морфологии карбидной фазы в микроструктуре произошло выделение нехарактерных для сплава ЖСЗДК-ВИ эвтектических фаз при участии гафния (рис. 4,в, 5), имеющих температуру плавления ниже 1190°C [5]. В процессе термообработки при 1210°C произошло оплавление этих фаз, что и послужило причиной снижения прочностных характеристик.



а



б

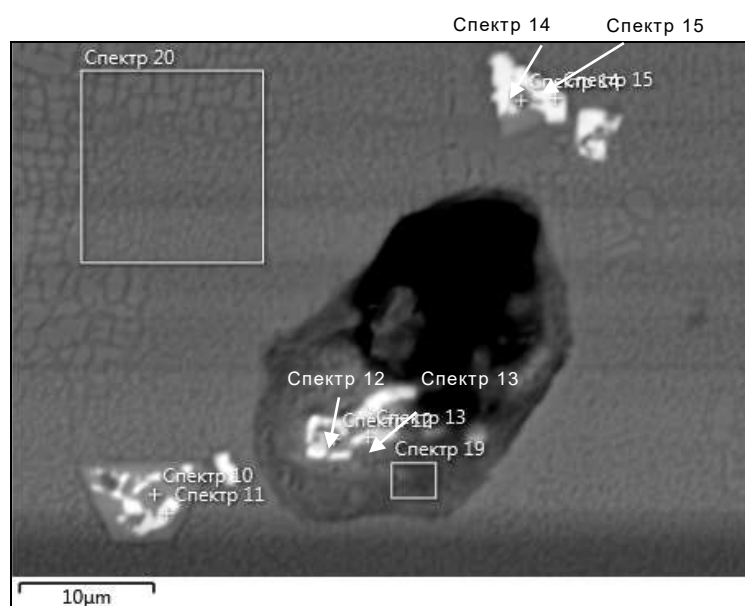


после химического травления

в

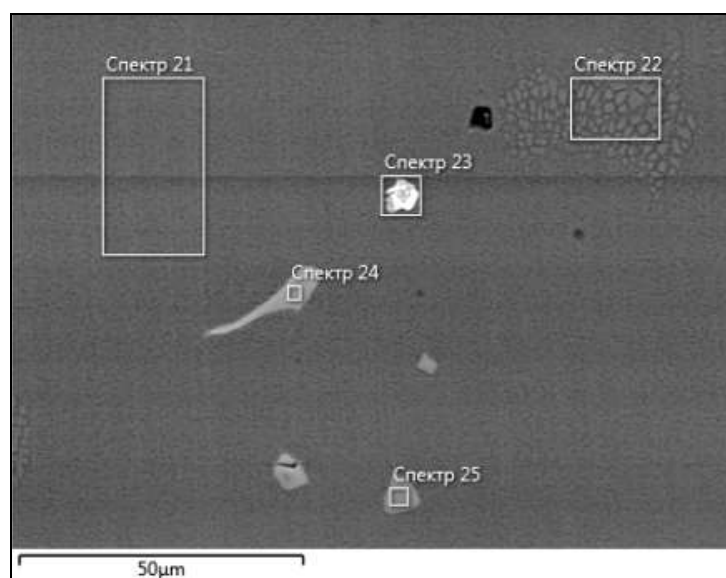
Рис. 4. Морфология карбидной фазы при различном содержании гафния: а – 0,05...0,15 %; б – 0,15...0,25 %; в – 0,25...0,35 %

Данные по распределению гафния в структуре сплава ЖСЗДК-ВИ, полученные РСМА, полностью согласуются с литературными данными [2]: гафний участвует в формировании глобулярных карбидных частиц, останавливая избыточное выделение карбидной фазы пластинчатой морфологии на основе молибдена и титана, границ зерен и γ' -фазы (рис. 6).



Спектр	Al	Ti	Cr	Fe	Co	Ni	Mo	Hf	W	Сумма
10	0,23	38,94	1,08		0,64	3,39	15,27	23,70	16,76	100,00
11	0,41	6,49	0,74		0,65	4,81	2,01	81,19	3,70	100,00
12	0,30	29,34	1,20		0,68	5,27	14,77	36,04	12,40	100,00
13	0,73	3,54	1,42	1,10	1,00	7,09	1,94	80,89	2,31	100,00
14	0,16	36,23	1,00		0,55	3,31	15,01	28,07	15,67	100,00
15	0,42	3,69	1,07		0,67	5,37	1,89	83,69	3,21	100,00
19	5,77	2,77	12,67	2,83	8,82	57,24	5,77	0,60	3,53	100,00
20	4,99	3,71	10,29		8,19	63,66	3,58	1,56	4,01	100,00

Рис. 5. Распределение химических элементов в режиме линейного сканирования нехарактерных структурных составляющих микроструктуры сплава ЖСЗДК-ВИ



Спектр	Al	Ti	Cr	Fe	Co	Ni	Mo	Hf	W	Сумма
21	4,69	3,18	11,42	0,17	8,74	63,03	4,32	0,18	4,28	100,00
22	5,58	4,20	8,70		7,60	65,63	3,25	1,48	3,57	100,00
23	2,12	12,47	6,88		4,73	35,86	7,25	24,17	6,51	100,00
24	0,19	44,37	1,12		0,28	2,50	23,44	12,69	15,42	100,00
25	0,16	45,78	1,23		0,48	2,68	22,97	8,58	18,13	100,00

Рис. 6. Распределение химических элементов в режиме линейного сканирования структурных составляющих сплава ЖСЗДК-ВИ

Заключення

1. Микрولهгування сплаву ЖСЗДК-ВІ гафнієм 0,15...0,25 % дозволило підвищити прочностні характеристики на образцях для механічних випробувань на 10...15 % при заливці в гарячі керамічні форми і замедленному охолодженні.

2. Микрولهгування гафнієм благотворно впливає на морфологію карбідної фази, забезпечуючи її в вигляді глобулярних частинок.

Література

1. ОСТ 1 90126-84. Сплавы жаропрочные никелевые вакуумной выплавки [Текст] – взамен ОСТ 1 90126-74 ; введ. 01.04.1988 – НПО ВИАМ, 1988. – 11 с.

2. Симс, Ч. Т. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок [Текст] : пер. с англ. / ред. Симса Ч. Т., Столофа Л. С., Хагеля У. К. – М. : Металлургия, 1995. – 384 с.

3. Совершенствование технологии производства отливок из жаропрочных никелевых сплавов [Текст] / В. В. Кудин, В. Е. Самойлов, В. Т. Кудин, Э. И. Цивирко, В. Н. Сажнев // Вестник двигателестроения. – 2008. – № 1 – С. 143-146.

4. Исследование влияния гафния на структуру и свойства литейного жаропрочного коррозионно-стойкого никелевого сплава [Текст] / А. Д. Коваль, А. Г. Андриенко, С. В. Гайдук, В. В. Кононов // Вестник двигателестроения. – 2012. – № 1. – С. 196-200.

5. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Том 2. [Текст] : Справочник / под ред.

Н. П. Лякишева. – М. : Машиностроение, 1997. – 1024 с.

References

1. OST 1 90126-84 *Splavy zharoprochnye nikel'evye vakuumnoj vyplavki* [Heat Resistant Nickel Vacuum Smelting Alloys]; vzamen OST 1 90126-74; vved. 01.04.1988. NPO VIAM, 1988. 11 p.

2. Sims, Ch. T. et al. *Supersplavy II: Zharoprochnye materialy dlja azerokosmicheskikh i promyshlennykh jenergoustanovok* [Superalloys II: Heat Resistant Materials for Aerospace and Industrial Power Plants]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1995. 384 p.

3. Kudin, V. V., Samojlov, V. E., Kudin, V. T., Civirko, E. I., Sazhnev, V. N. *Sovershenstvovanie tehnologii proizvodstva otlivok iz zharoprochnykh nikel'evykh splavov* [Improvement of the technology of production of castings from heat-resistant nickel alloys]. *Engine messenger*, 2018, no. 1, pp. 143-146.

4. Koval', A. D., Andrienko, A. G., Gajduk, S. V., Kononov, V. V. *Issledovanie vlijaniya gafnija na strukturu i svojstva litejnogo zharoprochnogo korrozionnostojkogo nikel'evogo splava* [Investigation of the hafnium effect on the structure and properties of cast heat-resistant corrosion-resistant nickel alloy]. *Engine messenger*, 2012, no. 1, pp. 196-200.

5. *Digrammy sostojanija dvojnykh metallicheskih sistem. Spravochnik: V 3 m.: Tom 2* [Diagrams of state of binary metal systems. In 3 vol. Directory. Vol. 2] pod red. N. P. Ljakisheva. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1997. 1024 p.

Надійшла до редакції 22.07.2021, розглянута на редколегії 16.08.2021

ВПЛИВ МІКРОЛЕГУВАННЯ ІТРІЄМ І ГАФНІЄМ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МІЦНОСТІ ТА МОФОЛОГІЮ КАРБІДНОЇ ФАЗИ СПЛАВУ ЖСЗДК-ВІ ПРИ СПОВІЛЬНЕНІЙ КРИСТАЛІЗАЦІЇ

Т. В. Тихомирова, О. І. Гордієнко, Р. В. Бехтер, О. В. Подобний

Проаналізовано плавки сплаву ЖСЗДК-ВІ з різним рівнем міцності і визначені фактори, що впливають на їх зниження, відмінності в макро і мікроструктурі сплаву, вплив швидкості кристалізації при зливці розплаву в гарячі і холодні керамічні форми. Так як при литві деталей рівень властивостей визначається на окремо відлитих зразках, в технології виготовлення зразків повинні бути дотримані параметри виливки відповідної деталі і при підвищенні міцності за рахунок зміни технологічних параметрів необхідно обов'язково розглядати можливість зміни технології лиття деталей. Однак для деталей складної конфігурації, що відливаються з жароміцних нікелевих сплавів, змінити технологію часто неможливо, тому єдиним способом вплинути на властивості матеріалу можна застосовуючи микрولهгування рідкоземельними елементами, наприклад, ітрієм і гафнієм. Введення цих легуючих елементів в невеликій кількості позитивно впливає на чинники, що знижують властивості сплаву ЖСЗДК-ВІ, такі як несприятлива форма і топографія карбідної фази, або навіть трохи змінити хімічний склад карбідів. У статті проаналізовано вплив микрولهгування гафнієм і ітрієм на морфологію і топографію карбідної фази, відзначені позитивні зміни мікроструктури і міцності при кімнатній температурі жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ. Відпрацьовано технологію микрولهгування розплаву для отримання задовільних значень міцності при випробуваннях на розтяг і ударну

в'язкість при кімнатній температурі. Мікролегування сплаву ЖСЗДК-VI гафнієм в концентрації 0,15...0,25 % дозволило підвищити характеристики міцності на зразках для механічних випробувань на 10...15 % за умови зливу розплаву в гарячі керамічні форми і уповільненому охолодженні. Більш високі концентрації гафнію в умовах повільної кристалізації призводять до утворення нехарактерних для сплаву ЖСЗДК-VI евтектичних фаз, що вимагають зниження температури термообробки, що, відповідно, призводить до зниження рівня тривалої міцності при 850 °C.

Ключові слова: мікроструктура; сплав; мікролегування; гафній; ітрій; межа міцності; ударна в'язкість; карбідна фаза.

INFLUENCE OF MICRO-ALLOYING WITH YTTRIUM AND HAFNIUM ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS AND MORPHOLOGY OF THE CARBIDE PHASE OF THE ZhS3DK-VI ALLOY DURING DELAYED CRYSTALIZATION

T. Tykhomyrova, O. Gordienko, R. Bekhter, O. Podobnyj

There are analyzed the melts of the ZhS3DK-VI alloy with different levels of strength characteristics and the factors influencing their reduction, differences in the macro and microstructure of the alloy, the effect of the crystallization rate when pouring the melt into hot and cold ceramic molds are determined. Since when casting parts, the level of properties is determined on separately cast samples, in the technology of manufacturing samples, the casting parameters of the corresponding part must be observed, and when increasing the strength characteristics due to changing technological parameters, it is imperative to consider the possibility of changing the technology of casting parts. However, for parts of complex configuration, cast from heat-resistant nickel alloys, it is often impossible to change the technology, therefore the only way to influence the properties of the material is to use microalloying with rare earth elements, for example, yttrium and hafnium. The introduction of these alloying elements in small amounts has a positive effect on factors that reduce the properties of the ZhS3DK-VI alloy, such as the unfavorable shape and topography of the carbide phase, or even slightly change the chemical composition of carbides. The article analyzes the effect of microalloying with hafnium and yttrium on the morphology and topography of the carbide phase; positive changes in the microstructure and strength characteristics at room temperature of the heat-resistant nickel alloy ZhS3DK-VI are noted. The technology of microalloying the melt has been developed to obtain satisfactory values of strength characteristics in tensile tests and impact toughness at room temperature. Microalloying the ZhS3DK-VI alloy with hafnium in a concentration of 0.15...0.25 % made it possible to increase the strength characteristics on samples for mechanical tests by 10...15 %, provided that the melt was drained into hot ceramic molds and slowed down. Higher concentrations of hafnium during slow crystallization lead to the formation of eutectic phases uncharacteristic for the ZhS3DK-VI alloy, requiring a decrease in the heat treatment temperature, which, accordingly, leads to a decrease in the level of long-term strength at 850 °C.

Keywords: microstructure; alloy; microalloying; hafnium; yttrium; ultimate strength; impact strength; carbide phase.

Тихомирова Тат'яна Владимировна – інженер ГП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

Гордієнко Елена Ивановна – начальник бюро металловедення ГП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

Бехтер Руслан Васильевич – Главный металлург ГП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

Подобный Александр Витальевич – Заместитель директора предприятия, Главный инженер, ГП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

Tetiana Tykhomyrova – engineer SE «Ivchenko-Progress», Zaporozhzhye, Ukraine,
e-mail: e.gordienko@ivchenko-progress.com, ORCID: 0000-0001-5174-0461.

Olena Gordienko – chef of department SE «Ivchenko-Progress», Zaporozhzhye, Ukraine,
e-mail: e.gordienko@ivchenko-progress.com, ORCID:0000-0003-1384-9823.

Ruslan Bekhter – Chef metallurgist SE «Ivchenko-Progress», Zaporozhzhye, Ukraine,
e-mail: 77@ivchenko-progress.com, ORCID: 0000-0002-1725-4811.

Oleksandr Podobnyj – Chef engineer SE «Ivchenko-Progress», Zaporozhzhye, Ukraine,
e-mail: progress@ivchenko-progress.com, ORCID: 0000-0002-3368-7641.