

УДК 669.245.018.44.046.51

doi: 10.32620/aktt.2022.4sup2.16

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

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

МОРФОЛОГИЯ И ТОПОГРАФИЯ КАРБИДНОЙ ФАЗЫ ПРИ ЛЕГИРОВАНИИ СПЛАВА ЖСЗДК-ВИ ГАФНИЕМ И ТАНТАЛОМ

В статье представлены результаты исследования влияния модифицирования/микролегирования гафнием и легирования танталом на морфологию и распределение карбидной фазы в микроструктуре сплава ЖСЗДК-ВИ. Карбидная фаза, являясь неотъемлемой структурной составляющей микроструктуры никелевых жаропрочных сплавов, оказывает колоссальное влияние на прочностные характеристики материала. В связи с этим огромное значение имеет форма, размеры и распределение частиц этой фазы в микроструктуре. Формирование морфологии карбидных частиц в значительной степени зависит от технологических факторов литья: температуры керамической формы, скорости кристаллизации, температуры расплава и т.п. Т.е. чем выше температурные параметры и ниже скорость кристаллизации при литье, тем более грубая морфология и топография частиц карбидов формируется при затвердевании и, соответственно, ниже прочностные характеристики материала. Однако технологические параметры также влияют на геометрию отливки и изменить технологию не всегда возможно, поэтому единственной возможностью является применение модифицирования или легирования сплава при получении заготовки. Такие карбидообразующие элементы, как гафний и тантал, благодаря своей химической активности, вступают в реакцию с углеродом на этапе кристаллизации и формируют термостабильные первичные карбиды типа МС. Применение гафния в никелевых сплавах ограничено концентрацией 0,1%, так как при большей концентрации этот элемент и никель образуют эвтектическую фазу, температура плавления которой значительно ниже, чем температура гомогенизации сплавов. В связи с этим была изучена возможность долегиования сплава ЖСЗДК-ВИ танталом, с целью формирования благоприятной морфологии карбидной фазы. В результате работы в микроструктуре сплава ЖСЗДК-ВИ получены дисперсные карбидные частицы, в химическом составе которых преобладает тантал, и имеется в небольшом количестве гафний.

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

Введение

Карбидная фаза является неотъемлемой структурной составляющей микроструктуры никелевых жаропрочных сплавов, и несмотря на малую объемную долю 1,5...2,0 %, карбиды оказывают существенное влияние на прочностные характеристики материалов [1].

В процессе кристаллизации наибольшая доля углерода связывается в первичные карбиды, как правило это карбиды типа МС, которые являются наиболее стабильными и прочными и по степени снижения термостабильности располагаются в следующем порядке: ТаС, НfС, NbС, TiС [2]. Учитывая, что сплавы имеют сложную систему легирования, в реальных условиях формируются с участием нескольких карбидообразующих элементов, а также Wi Mo. Также кроме первичных карбидов в зависимости от системы легирования, образуются карбиды М₂₃С, М₆С.

Локализация карбидной фазы преимущественно происходит по границам зерен или в междендритных пространствах.

С одной стороны, карбидная фаза, будучи более стабильной в сравнении с γ' -фазой, благоприятно влияет на прочностные и жаропрочные свойства никелевых сплавов, повышая стабильность выше температур растворения упрочняющей фазы. С другой стороны, огромное влияние на характеристики материала оказывает морфология карбидной фазы и сложные карбидные реакции, происходящие при термообработке и/или высокотемпературной эксплуатации.

Морфология карбидной фазы зависит, в первую очередь, от условий кристаллизации: при снижении скорости кристаллизации формируются преимущественно частицы вытянутой формы, вплоть до формирования карбидной сетки. А так как карбидная фаза имеет слабую связь с матрицей никелевого сплава и меньший коэффициент линейного

расширения, имея неблагоприятную форму карбидные частицы могут стать концентраторами или источниками разрушения (рис. 1).

Исследуя различные плавки сплава ЖСЗДК-ВИ, была установлена связь между морфологией карбидной фазы и уровнем механических свойств [3]. Микроструктура материала плавки с неудовлетворительным уровнем свойств характеризуется выделением карбидов в виде пластинчатых частиц по междендритным пространствам и границам зерен (рис. 2, а). В микроструктуре материала плавки с удовлетворительным уровнем кратковременных характеристик карбиды представлены в виде глобулярных частиц (рис. 2, б).

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 [4].

Постановка задачи

При постановке цели работы учитывался имеющийся опыт изучения никелевых сплавов [4, 5], в том числе сплава ЖСЗДК-ВИ, технологические параметры получения отливки.

Так как при отливке некоторых деталей слив расплава выполняется в горячие керамические формы для обеспечения получения сложной конфигурации деталей, существует необходимость применения металлургических приемов, которые позволят повысить свойства внося изменения в формирование микроструктуры материала.

Одним из методов изменения микроструктуры является модифицирование/микролегирование сплава на этапе отливки детали. В качестве легирующих добавок выбраны гафний и тантал.

Основной целью данной работы является изучение влияния микролегирования гафнием и танталом на морфологию карбидной фазы и микроструктуры.



Рис. 1. Карбидная сетка, полученная на образце из сплава ЖСЗДК-ВИ при охлаждении

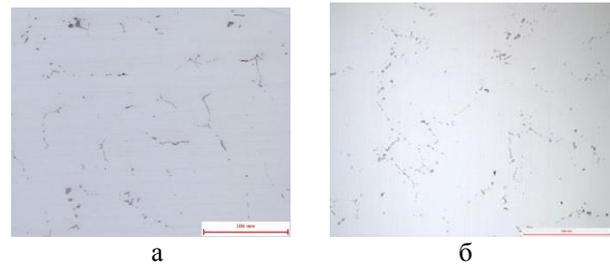


Рис. 2. Морфология карбидов в сплаве ЖСЗДК-ВИ: а – микроструктура образца с неудовлетворительными прочностными характеристиками, б – микроструктура образца с удовлетворительными прочностными характеристиками

Порядок выполнения работы

Для работы выбрана плавка сплава ЖСЗДК-ВИ, показавшая на этапе входного контроля неудовлетворительный уровень прочностных характеристик [3].

В данной статье, кроме исходной плавки сплава, рассмотрены плавки легированные гафнием в концентрации 0,15...0,25 %, и гафнием в концентрации 0,15...0,25 % и тантала 1 %, гафнием в концентрации 0,15...0,25 % и тантала 2 %. Микролегирование расплава всех плавки иттрием выполнено в концентрациях, рекомендуемых ОСТ 1 90126 – 0,01...0,015 % [1].

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

Исследование микроструктуры выполнено с применением оптической микроскопии (микроскоп AxioObserver 5), и электронной микроскопии (электронный растровый микроскоп JEOLIT 300LA).

Результаты исследования

Для микроисследования изготовлены шлифы в поперечных сечениях образцов.

При введении только гафния из расчета 0,15...0,25 % наблюдается изменение морфологии карбидной фазы в сравнении с исходным образцом: морфология более равномерна, однако частицы имеют как глобулярную, так и пластинчатую форму. Топография карбидной фазы также не равномерна: частицы расположены по границам зерен и в междендритных пространствах (рис. 4, б), формируя дендритный рисунок.

Микроструктура образцов, легированных гафнием и гафнием-танталом при увеличениях оптического микроскопа практически не имеет отличий: карбидные частицы на обоих образцах имеют преимущественно глобулярную форму, иногда выстраиваются цепочкой. Топография карбидной фазы образца, легированного 2 % тантала более равномерна, в сравнении с другими исследуемыми мик-

роструктурами в данной работе (рис. 3, в).

Результаты исследования, выполненного методом РСМА, показали (рис. 4, 5):

- формирование карбидной фазы происходит с участием нескольких карбидообразующих элементов;
- в микроструктуре образцов, модифицированных только гафнием, преобладают карбидные частицы на основе титана;
- в микроструктуре образцов, легированных гафнием и танталом, преобладают частицы на основе тантала.

Таким образом в результате проведенной работы установлено, что при условии слива расплава в горячие керамические формы, применяя только модифицирование гафнием, получена в микроструктуре сплава ЖСЗДК-ВИ получена более равномерная морфология карбидной фазы, с сохранением неравномерного ее распределения в микроструктуре с формированием дендритного рисунка.

Дополнительно легируя исследуемый сплав танталом без изменения других технологических параметров, в микроструктуре получена карбидная фаза в виде более дисперсных глобулярных частиц, которые равномерно распределены по сечению образца. Основным легирующим элементов дисперсных частиц данного образца является тантал, что подтверждает литературные данные активности элемента при формировании первичной карбидной фазы.

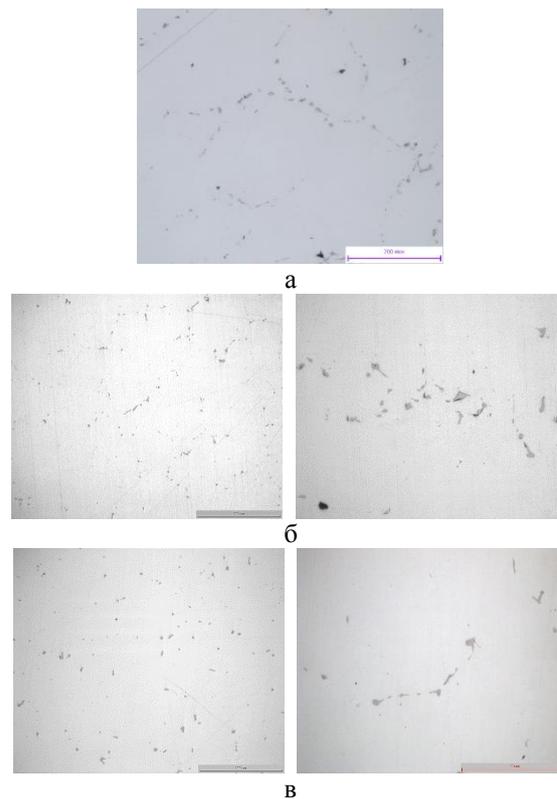
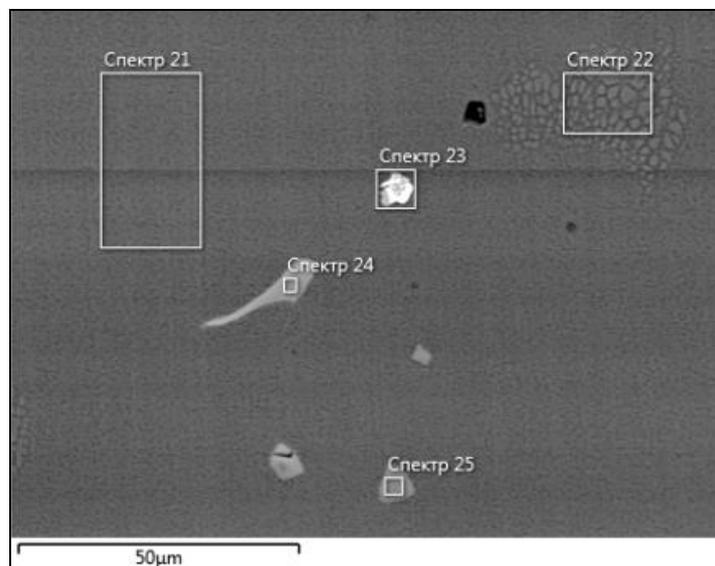
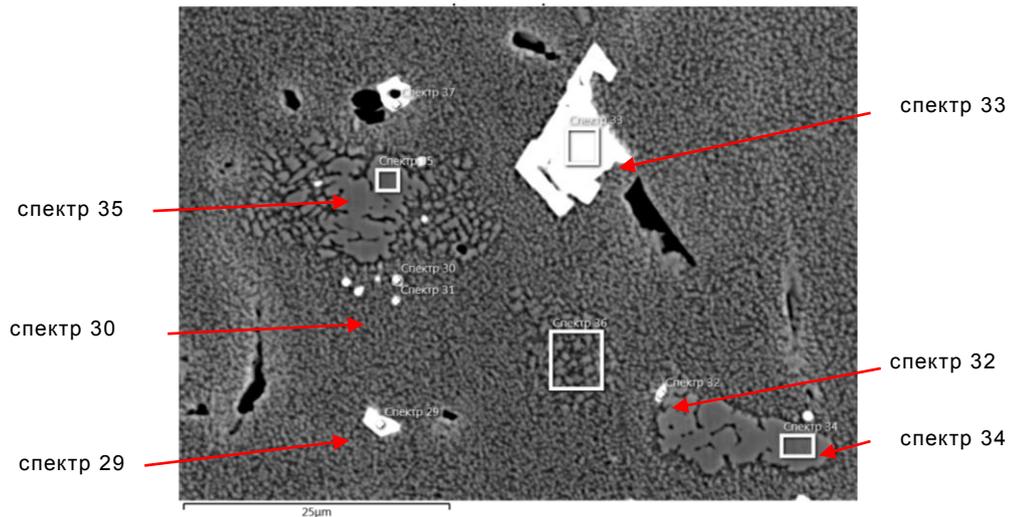


Рис. 3. Морфология карбидной фазы при различном легировании:
а – Hf 0,15...0,25 %, б – Hf 0,15...0,25 %, Ta 1 %, в – Hf 0,15...0,25 %, Ta 2 %



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. 4. Распределение химических элементов в режиме линейного сканирования в структурных составляющих сплава ЖСЗДК-ВИ, модифицированного гафнием



Спектр	C	Al	Ti	Cr	Co	Ni	Mo	Hf	Ta	W
29	12,4		23,3	0,87	0,6	3,57	6,46	2,65	44,3	5,9
30	12,1	1,15	13,7	3,8	2,9	19,15	2,8	7,87	33,7	2,95
32	10,2	0,7	17,7	2,4	1,7	13,4	3,8	7,5	39,4	3,2
33	12,85		24,4	0,7	0,5	2,45	8,1	-	43,4	7,7
34		7,2	5,4	3,75	6,2	69,56	0,9	-	4,4	2,5
35		7,2	5,3	3,9	6,2	69,3	1,1	-	4,0	3,0

Рис. 5. Распределение химических элементов в режиме линейного сканирования в структурных составляющих сплава ЖСЗДК-ВИ, модифицированного гафнием и танталом

Заклучение

Применение одновременного легирования танталом и микролегирования гафнием оказало благоприятное влияние на морфологию и распределение карбидной фазы в микроструктуре сплава ЖСЗДК-ВИ в виде дисперсных глобулярных частиц.

Литература

1. Симс, Ч. Т. *Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок* [Текст] : пер. с англ. / Ч. Т. Симс. – М. : Металлургия, 1995. – 384 с.
2. Шалин, Р. Е. *Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов* [Текст] / Р. Е. Шалин, И. Л. Светлов, Е. Б. Качанов и др. – М. : Машиностроение, 1997. – 336 с.
3. Тихомирова, Т. В. *Влияние микролегирования иттрием и гафнием на прочностные характеристики и морфологию карбидной фазы сплава ЖСЗДК-ВИ при замедленной кристаллизации* [Текст] / Т. В. Тихомирова, Е. И. Гордиенко, Р. В. Бехтер, А. В. Подобный // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2021. – № 4. – С. 125-131.
4. *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.

5. *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.

References

1. Sims, Ch. T. *Superalloys II: Zharoprochnye materialy dlja azerokosmicheskikh i promyshlennykh jenerougustanovok* [Superalloys II: Heat Resistant Materials for Aerospace and Industrial Power Plants]. Moscow, Metallurgy Publ., 1995. 384 p.
2. Shalin, R. E., Svetlov, I. L., Kachanov, E. B. et al. *Monocrystals nikelovykh zharoprochnykh spлавov* [Single crystals of Ni-based superalloy]. Moscow, Mashine building Publ., 1997. 336 p.
3. Tykhomova, T. V., Gordienko, O. I., Bekhter, R. V., Podobnyj, O. V. *Vliyanie mikrolegirovaniya ittriem i gafniem na prochnostnye harakteristiki s morfologiyu karbidnoy fazy splava ZHS3DK-VI pri zamedlennom ohlazhdenii* [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]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologija – Aerospace technic and technology*, 2021, no. 4, pp. 125-131.

4. Kudin, V. V., Samojlov, V. E., Kudin, V. T., Cvirko, E. I., Sazhnev, V. N. *Sovershenstvovanie tehnologii proizvodstva otlivok iz zharoprochnyh nikelovyh splavov* [Improvement of the technology of production of castings from heat-resistant nickel alloys]. *Engine messenger*, 2008, no. 1, pp. 143-146.

5. Koval', A. D., Andrienko, A. G., Gajduk, S. V., Kononov, V. V. *Issledovanie vlijaniya gafnija na strukturu i svojstva litejnogo zharoprochnogo korrozionnostojkogo nikelovogo 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.

Надійшла до редакції 22.04.2022, розглянута на редколегії 8.08.2022

МОРФОЛОГІЯ І ТОПОГРАФІЯ КАРБІДНОЇ ФАЗИ ПРИ ЛЕГУВАННІ СПЛАВА ЖСЗДК-ВІ ГАФНІЄМ І ТАНТАЛОМ

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

У статті наведені результати дослідження впливу модифікування/мікролегування гафнієм та легування танталом на морфологію та розподіл карбідної фази у мікроструктурі сплаву ЖСЗДК-ВІ. Карбідна фаза, будучи невід'ємною структурною складовою мікроструктури нікелевих жароміцних сплавів, має колосальний вплив на характеристики міцності матеріалу. У зв'язку з цим велике значення має форма, розміри та розподіл частинок цієї фази у мікроструктурі. Формування морфології карбідних частинок значною мірою залежить від технологічних факторів лиття: температури керамічної форми, швидкості кристалізації, температури розплаву тощо. Тобто, чим вище температурні параметри і нижче швидкість кристалізації при литті, тим більш груба морфологія і топографія карбідних частинок формується при затвердінні і, нижче характеристики міцності матеріалу. Однак технологічні параметри також впливають на геометрію відливки і змінити технологію не завжди можливо, тому єдиною можливістю є застосування модифікування або легування сплаву при отриманні заготовки. Такі карбідоутворюючі елементи як гафній та тантал, завдяки своїй хімічній активності вступають у реакцію з вуглецем на етапі кристалізації та формують термостабільні первинні карбіди типу МС. Застосування гафнію в нікелевих сплавах обмежено концентрацією 0,1 %, тому що при більшій концентрації цей елемент і нікель утворюють евтектичну фазу, температура плавлення якої є значно нижчою, ніж температура гомогенізації сплавів. У зв'язку з цим було вивчено можливість долегування сплаву ЖСЗДК-ВІ танталом, з метою формування сприятливої морфології карбідної фази. В результаті експерименту в мікроструктурі сплаву ЖСЗДК-ВІ отримано дисперсні карбідні частинки, в хімічному складі яких переважає тантал і є в невеликій кількості гафній.

Ключові слова: мікроструктура; морфологія; сплав; мікролегування; гафній; тантал; межа міцності; карбідна фаза.

MORPHOLOGY AND TOPOGRAPHY OF CARBIDE PHASE AFTER ALLOYING WITH HAFNIUM AND TANTALUM THE ZHS3DK-VI

*Tetiana Tykhomyrova, Olena Gordienko,
Ruslan Bekhter, Oleksandr Podobnyj*

This study describes the results of studying the effect of modification/micro alloying with hafnium and alloying with tantalum on the morphology and distribution of the carbide phase in the ZhS3DK-VI alloy microstructure. The carbide phase is an integral structural component of the microstructure of nickel heat-resistant alloys, has a tremendous impact on the strength characteristics of the material. In this regard, the shape, size, and distribution of particles of this phase in the microstructure are of great importance. The formation of the morphology of carbide particles largely depends on the technological factors of casting such as temperature of the ceramic mold, crystallization rate, melt temperature, etc. The higher the temperature parameters and the lower the crystallization rate during casting, the coarser the morphology and topography of carbide particles formed during solidification and, accordingly, the lower the strength characteristics of the material. However, technological parameters also affect the geometry of the casting and it is not always possible to change the technology; so the only possibility is the use of modification or alloying of the alloy upon receipt of the work piece. Such carbide-forming elements as hafnium and

tantalum, due to their chemical activity, react with carbon at the stage of crystallization and form thermally stable primary MC-type carbides. The use of hafnium in nickel alloys is limited to a concentration of 0.1 % since at a higher concentration, this element and nickel form a eutectic phase, the melting temperature of which is much lower than the homogenization temperature of the alloys. It is studied the possibility of doping the ZhS3DK-VI alloy with tantalum to form a favorable morphology of the carbide phase. The dispersed carbide particles are taken in the microstructure of the ZhS3DK-VI alloy after experimental work. The chemical composition of the particles is dominated by tantalum, and there is some hafnium.

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

Тихомирова Татьяна Владимировна – инженер ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

Гордиенко Елена Ивановна – начальник бюро металловедения ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

Бехтер Руслан Васильевич – Главный металлург ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

Подобный Александр Витальевич – Заместитель директора предприятия, Главный инженер, ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина.

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

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

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

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