

А.Г. Андриенко¹, С.В. Гайдук¹,
А.Б. Милосердов², Т.В. Тихомирова²

ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА ЖСЗЛС-ВИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОДЕРЖАНИЯ ГАФНИЯ

Исследовано влияние добавок гафния в диапазоне легирования от 0,1 до 0,9% (по массе) на структуру и механические свойства сплава ЖСЗЛС-ВИ. Приведены результаты механических испытаний и металлографических исследований опытных составов с разным содержанием гафния в исследованном диапазоне легирования в сравнении со сплавом ЖСЗЛС-ВИ без добавок гафния. Оптимальное легирование сплава ЖСЗЛС-ВИ гафнием способствует формированию благоприятной микроструктуры и повышению механических характеристик.

Ключевые слова: жаропрочные никелевые сплавы, гафний.

A.G. Andrienko¹, S.V. Gaiduk¹, A.B. Miloserdov², T.V. Tikhomirova²

VARIATION OF MECHANICAL PROPERTIES OF GS3LS-VI SUPERALLOY DEPENDING ON THE HAFNIUM CONTENT

The effect of hafnium additions in the alloying range from 0,1 to 0,9% (by weight) upon the structure and mechanical properties of GS3LS-VI alloy was studied. The results of mechanical tests and metallographical investigations are presented for the experimental compositions with the different hafnium content in the studied alloying range compared to GS3LS-VI alloy without hafnium additions. The optimum alloying of GS3LS-VI alloy by hafnium promotes the formation of the favourable microstructure and the mechanical characteristic increase.

Keywords: Ni-base superalloys, hafnium.

¹Запорожский национальный технический университет [Zaporizhzhya national technical university]
E-mail: rector@zntu.edu.ua

²Государственное предприятие «Запорожское машиностроительное конструкторское бюро "Прогресс" им. академика А.Г. Ивченко [Zaporozhye Machine-Building Design Bureau Progress State Enterprise named after Academician A.G. Ivchenko] E-mail: progress@ivchenko-progress.com progress@zmkb.com

Впервые в 60-х годах прошлого столетия было установлено, что добавки гафния заметно повышают пластичность сплавов систем Ni–Cr–Fe и Co–Ni–Cr. В более поздних исследованиях отмечалось благоприятное влияние гафния на служебные характеристики жаропрочных никелевых сплавов.

До настоящего времени одним из перспективных направлений повышения комплекса служебных характеристик литейных жаропрочных коррозионностойких никелевых сплавов является легирование гафнием. Введение гафния – при оптимальном его содержании для многокомпонентной системы легирования конкретного сплава – приводит к одновременному повышению характеристик как длительной прочности, так и пластичности [1–8].

В данной работе исследовано влияние легирования гафнием в диапазоне концентраций от 0,1 до 0,9% (по массе) на механические свойства промышленного марочного сплава ЖСЗЛС-ВИ с целью оптимизации его содержания для повышения уровня прочностных характеристик.

Образцы опытных сплавов 1–5 с добавками гафния в исследуемом диапазоне легирования от 0,1 до 0,9% с концентрационным шагом 0,2% (по массе) отливались на

базе паспортной шихтовой заготовки промышленного сплава ЖСЗЛС-ВИ. Гафний в опытные составы вводился по расчету в виде Ni–Hf лигатуры (85% Hf, 15% Ni).

Заливка образцов опытных составов 1–5 и образцов исходного марочного сплава ЖСЗЛС-ВИ без добавок гафния осуществлялась в вакуумно-индукционной печи марки УППФ-3М в соответствии с серийной технологией. Литые заготовки образцов длиной 70 мм имели цилиндрическую форму $\varnothing 16$ мм.

Химический анализ опытных плавок проводился стандартными методами согласно требованиям ТУ 14-1689–73 и ОСТ 1.90127–85. Спектральный химический анализ опытных плавок проводился на оптическом эмиссионном приборе ARL-4460 (квантометр одновременного многоканального анализа). Химические составы опытных плавок приведены в таблице.

Химический состав исследованных сплавов

Условный номер плавки	Содержание легирующих элементов, % (по массе)											
	C	Cr	Al	Ti	Mo	W	Co	Hf	Ce	Zr	B	Ni
1	0,11	15,4	2,9	2,8	3,9	4,1	4,6	0,1	0,01	0,02	0,015	Основа
2	0,10	15,1	3,1	3,0	4,0	4,0	5,0	0,3	0,01	0,02	0,015	Основа
3	0,09	15,3	3,0	2,9	4,1	3,9	4,9	0,5	0,01	0,02	0,015	Основа
4	0,11	15,2	2,8	3,1	3,8	3,8	4,7	0,7	0,01	0,02	0,015	Основа
5	0,10	15,5	2,9	2,7	3,7	4,1	4,8	0,9	0,01	0,02	0,015	Основа
ЖСЗЛС-ВИ	0,12	16,1	2,7	2,7	3,8	3,7	5,5	–	0,01	0,02	0,015	Основа

С целью оптимизации содержания гафния в сплаве ЖСЗЛС-ВИ по лучшим показателям механических характеристик проведены механические испытания образцов опытных составов 1–5, содержащих по расчету легирующие добавки гафния 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 и 0,9% (по массе) соответственно, в сравнении с образцами из сплава ЖСЗЛС-ВИ без гафния (см. таблицу).

Механические испытания образцов проводились после термической обработки по стандартным методикам: на кратковременную прочность при температуре 20°C (ГОСТ 9651–73) и длительную прочность при температуре 950°C (ГОСТ 10145–81).

На рис. 1 представлены результаты испытаний на кратковременную прочность при температуре 20°C образцов опытных составов 1–5 с различным содержанием гафния в исследованном диапазоне в сравнении с образцами марочного состава сплава ЖСЗЛС-ВИ без добавок гафния.

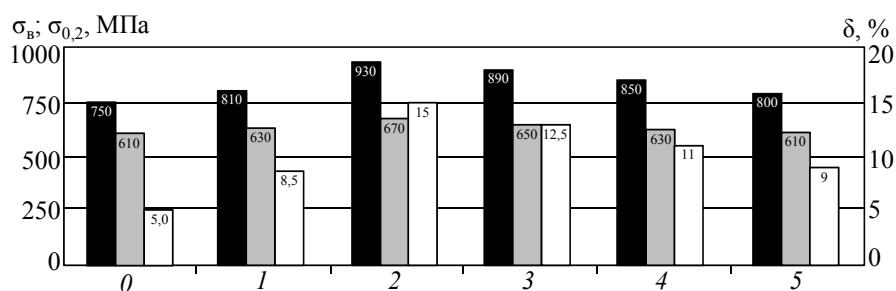


Рис. 1. Кратковременные механические свойства (■ – σ_b ; ■ – $\sigma_{0,2}$; □ – δ) при 20°C образцов из сплава ЖСЗЛС-ВИ (0 – без гафния), легированного гафнием в исследованном диапазоне, % (по массе): 0,1 (1); 0,3 (2); 0,5 (3); 0,7 (4); 0,9 (5)

Результаты испытаний на кратковременную прочность показали, что при увеличении содержания гафния в опытных сплавах 1–5 во всем исследованном диапазоне

легирования повышаются не только показатели предела прочности, но и показатели пластичности (по сравнению со сплавом ЖСЗЛС-ВИ без добавок гафния). Установлено, что уровень прочностных характеристик зависит от содержания гафния в сплаве ЖСЗЛС-ВИ и имеет ярко выраженный экстремальный характер.

Лучшая кратковременная прочность и пластичность достигаются при содержании гафния 0,3% (по массе), что является оптимальным для системы легирования сплава ЖСЗЛС-ВИ. Так, кратковременная прочность образцов из сплава ЖСЗЛС-ВИ с добавкой 0,3% гафния (состав 2) повысилась на 200–210 МПа по сравнению с образцами из сплава ЖСЗЛС-ВИ марочного состава без добавок гафния. Оптимальное легирование сплава ЖСЗЛС-ВИ гафнием 0,3% (по массе) способствовало повышению предела прочности σ_b с 730–750 МПа до 930–950 МПа, при этом показатели пластичности δ повысились в 2,5–3 раза в сравнении с образцами из сплава ЖСЗЛС-ВИ без гафния.

На рис. 2 представлены результаты испытаний на длительную прочность при температуре 950°C и напряжении $\sigma=120$ МПа образцов опытных составов 1–5 с различным содержанием гафния в сравнении с образцами из сплава ЖСЗЛС-ВИ без добавок гафния. Результаты испытаний показали, что при различном содержании гафния в опытных сплавах 1–5 во всем исследованном диапазоне легирования увеличилось время до разрушения образцов.

При испытаниях на длительную прочность образцов опытного состава 2 – с оптимальным содержанием гафния 0,3% (по массе), при температуре испытания 950°C и напряжении $\sigma=120$ МПа – время до разрушения образцов увеличилось в 3 раза в сравнении с образцами из сплава ЖСЗЛС-ВИ без гафния. При этом все опытные составы 1–5, легированные гафнием в исследованном диапазоне от 0,1 до 0,9% (по массе), показали более высокие значения прочностных и пластических характеристик, чем исходный марочный сплав ЖСЗЛС-ВИ без добавок гафния. Однако повышение содержания гафния с 0,5 до 0,9% (по массе) приводит к постепенному снижению в сплаве ЖСЗЛС-ВИ не только показателей кратковременной прочности и пластичности, но и долговечности по сравнению со сплавом ЖСЗЛС-ВИ, оптимально легированного гафнием (состав 2).

Металлографический анализ структуры показал, что лучшими структурными и прочностными характеристиками обладает сплав ЖСЗЛС-ВИ, оптимально легированный гафнием 0,3% (по массе) – состав 2. При этом оптимальное легирование сплава ЖСЗЛС-ВИ гафнием способствует благоприятному формированию глобулярных карбидов как по границам зерен, так и в теле зерен. Однако дальнейшее увеличение содержания гафния до 0,9% (по массе) в сплаве ЖСЗЛС-ВИ приводит к заметному огрублению структурных составляющих и увеличению размеров карбидных частиц (в сравнении со сплавом ЖСЗЛС-ВИ без гафния и с 0,3% (по массе) гафния). При этом в структуре с 0,9% (по массе) гафния происходит заметное увеличение количества эвтектических выделений $\gamma-\gamma'$ и огрубление ее морфологии, что и приводит к снижению прочности и пластичности.

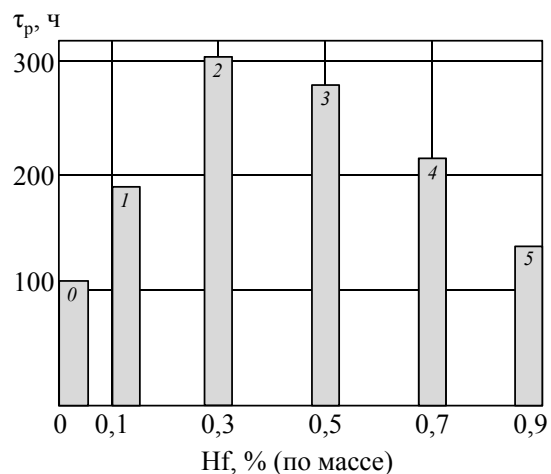


Рис. 2. Влияние легирования гафнием (% по массе) на время до разрушения (τ_p) образцов из сплава ЖСЗЛС-ВИ (0 – без гафния), испытанных при температуре 950°C и напряжении $\sigma=120$ МПа: 0,1 (1); 0,3 (2); 0,5 (3); 0,7 (4); 0,9 (5)

Таким образом, для многокомпонентной системы легирования сплава ЖСЗЛС-ВИ оптимальным содержанием гафния является 0,3% (по массе), при котором достигаются лучшие характеристики кратковременной и длительной прочности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Масленков С.Б., Бутова Н.Н., Хангулов В.В. Влияние гафния на структуру и свойства никелевых сплавов //МиТОМ. 1980. №4. С. 45–46.
2. Кишкин С.Т. Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина: Науч.-техн. сб.: к 100-летию со дня рождения С.Т. Кишкина. М.: Наука. 2006. 272 с.
3. Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). М.: МИСиС. 2001. 632 с.
4. Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р. Жаропрочность никелевых сплавов. М.: Машиностроение. 1998. 464 с.
5. Каблов Е.Н., Кишкин С.Т. Перспективы применения литейных жаропрочных сплавов для производства турбинных лопаток ГТД //Газотурбинные технологии. 2002. Январь–февраль. С. 34–37.
6. Патон Б.Е., Строганов Г.Б., Кишкин С.Т. и др. Жаропрочность литейных никелевых сплавов и защита их от окисления. К.: Наукова думка. 1987. 256 с.
7. Котсорадис Д., Феликс П., Фишмайстер Х. и др. Жаропрочные сплавы для газовых турбин. Материалы международной конференции: Пер. с англ. М.: Metallurgia. 1981. 480 с.
8. Симс Ч.Т., Столофф Н.С., Хагель У.К. Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок: Пер. с англ. М.: Metallurgia. 1995. Кн. 1, 2. 384 с.

REFERENCES LIST

1. Maslenkov S.B., Burova N.N., Hangulov V.V. Vlijanie gafnija na strukturu i svojstva nikel'evyh splavov [Effects of hafnium on the structure and properties of the nickel alloy] //MiTOM. 1980. №4. S. 45–46.
2. Kishkin S.T. Litejnye zharoprochnye splavy. Jeffekt S.T. Kishkina [Casting superalloys. Effect of S.T. Kishkin]: Nauch.-tehn. sb.: K 100-letiju so dnja rozhdenija S.T. Kishkina. M.: Nauka. 2006. 272 S.
3. Kablov E.N. Litye lopatki gazoturbinyh dvigatelej (splavy, tehnologija, pokrytija) [Alloy blades of gas turbine engines (alloys, technology, coverage)]. M.: MiSIS. 2001. 632 S.
4. Kablov E.N., Golubovskij E.R. Zharoprochnost' nikel'evyh splavov [Heat-resistant nickel alloys]. M.: Mashinostroenie. 1998. 464 s.
5. Kablov E.N., Kishkin S.T. Perspektivy primeneniya litejnyh zharoprochnyh splavov dlja proizvodstva turbinyh lopatok GTD [Prospects of application of high-temperature alloys for foundry production of turbine blades GTD] //Gazoturbinye tehnologii. 2002. janvar'–fevral'. S. 34–37.
6. Paton B.E., Stroganov G.B., Kishkin S.T. i dr. Zharoprochnost' litejnyh nikel'evyh splavov i zashhita ih ot okislenija [Heat resistance of nickel alloys and casting their protection from oxidation]. K.: Naukova dumka. 1987. 256 s.
7. Kotsoradis D., Feliks P., Fishmajster H. i dr. Zharoprochnye splavy dlja gazovyh turbin. materialy mezhdunarodnoj konferencii [Superalloys for gas turbines]: Per. s angl. M.: Metallurgija. 1981. 480 s.
8. Sims Ch.T., Stoloff N.S., Hagel' U.K. Supersplavy II. Zharoprochnye materialy dlja ajerokosmicheskikh i promyshlennyh jenergoustanovok [Superalloys II. Heat-resistant materials for aerospace and industrial power plants]: Per. s angl. M.: Metallurgija. 1995. Kn. 1, 2. 384 s.