

УДК 669.245.018.044:620.193.53

Д-р техн. наук А. Д. Коваль, канд. техн. наук А. Г. Андриенко,
канд. техн. наук С. В. Гайдук, канд. техн. наук В. В. Кононов

Национальный технический университет, г. Запорожье

ВЛИЯНИЕ СООТНОШЕНИЯ ВОЛЬФРАМА К МОЛИБДЕНУ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СПЛАВА ЖСЗЛС, ОПТИМАЛЬНО ЛЕГИРОВАННОГО ГАФНИЕМ И ТАНТАЛОМ

Оценено влияние соотношения вольфрама к молибдену (W/Mo) в диапазоне от 1 до 7 на прочностные характеристики литейного жаропрочного коррозионностойкого сплава ЖСЗЛС, оптимально легированного гафнием и танталом. Приведены результаты механических испытаний на кратковременную и длительную прочность опытных составов в сравнении с некоррозионностойким промышленным сплавом ЖС6У.

Ключевые слова: литейные жаропрочные коррозионностойкие никелевые сплавы, многокомпонентная система легирования, оптимальное соотношение, механические испытания, кратковременная и длительная прочность.

Введение

Основная тенденция дальнейшего развития газотурбостроения заключается в повышении коэффициента полезного действия (КПД) за счет постоянного повышения температуры газа на входе в турбину. В свою очередь, это требует повышения служебных характеристик материалов горячего тракта турбины и, прежде всего, длительной прочности материала, т. е. его высокотемпературной работоспособности [1–7].

В настоящее время предприятия, выпускающие авиационные газотурбинные двигатели, проектируют и осваивают выпуск как авиационных, так и наземных газотурбинных двигателей нового поколения одновременно с модернизацией существующих газотурбинных установок разного назначения [8]. Так, на промышленных предприятиях ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс» и ОАО «Мотор Сич» освоен технологический процесс получения сопловых лопаток из сплава ЖС6У для стационарных газотурбинных двигателей разного типа. Однако, как показала практика, данный сплав не обеспечивает необходимого эксплуатационного ресурса лопаткам из-за низкой высокотемпературной коррозионной (ВТК) стойкости.

Взамен сплава ЖС6У рекомендовано использовать промышленный литейный жаропрочный коррозионностойкий никелевый сплав ЖСЗЛС, полностью удовлетворяющий требованиям к материалу сопловых лопаток, однако имеющий достаточно низкий уровень прочностных характеристик, что делает его применение как материала лопаток для газотурбинных двигателей нового поколения не перспективным. Поэтому возникла необходимость в разработке на основе промышленного литейного жаропрочного коррозионностойкого никелевого сплава ЖСЗЛС модернизированного состава с более высокими прочностными харак-

теристиками, приближающимися по уровню к промышленному литейному жаропрочному не коррозионностойкому никелевому сплаву ЖС6У.

В данной работе было исследовано влияние различного соотношения вольфрама к молибдену в диапазоне от 1 до 7 в сплаве ЖСЗЛС, легированного гафнием и танталом, на механические свойства для оптимизации границ легирования данного соотношения с целью обеспечения прочностных характеристик на уровне промышленного сплава ЖС6У.

Постановка задачи

На первом этапе было исследовано влияние гафния в диапазоне концентраций от 0,1 % до 0,9 % по массе на структуру и механические свойства промышленного сплава ЖСЗЛС и оптимизировано его содержание по лучшим показателям прочностных характеристик [9].

На втором этапе было исследовано влияние тантала в диапазоне концентраций от 1,5 % до 3,5 % по массе на структуру и прочностные характеристики сплава ЖСЗЛС, оптимально легированного гафнием, и оптимизировано содержание тантала по лучшим показателям механических свойств [10].

На третьем, заключительном этапе, исследовалось влияние соотношения вольфрама к молибдену в исследуемом диапазоне от 1 до 7 в сплаве ЖСЗЛС, оптимально легированного гафнием и танталом, для оптимизации данного соотношения по лучшим суммарным показателям прочностных характеристик.

Для этой цели на базе сплава ЖСЗЛС, оптимально легированного гафнием 0,3 % и танталом 2,5 % (состав 0) с разным соотношением вольфрама к молибдену в исследуемом диапазоне, были отлиты образцы опытных составов № 1–№ 5. Одновременно были отлиты образцы из промышленного сплава ЖС6У.

Заливка образцов исследуемых сплавов осуществлялась в вакуумно-индукционной печи марки УППФ-3М в соответствии с серийной технологией. Литые заготовки образцов имели цилиндрическую форму диаметром 16 мм и длиной 70 мм.

Химический анализ опытных плавок проводился стандартными методами, согласно требованиям ТУ 14-1689-73, ОСТ 1.90126-85 и ОСТ 1.90127-85. Спектральный химический анализ проводился на оптическом эмиссионном приборе ARL-4460 (квантометр одновременного многоканального анализа). Химические составы опытных плавок исследованных сплавов приведены в таблице 1.

Далее из литых заготовок были изготовлены цилиндрические образцы для сравнительных механических испытаний по стандартным методикам: на кратковременную прочность по ГОСТ 9651-73 при температуре 20 °С и длительную прочность по ГОСТ 10145-81 при температурах 950 °С и 975 °С. Механические испытания образцов проводились после термической обработки.

Анализ результатов

Для оценки влияния соотношения вольфрама к молибдену на прочностные характеристики сплава ЖСЗЛС, легированного гафнием и танталом, с целью оптимизации пределов данного соотношения были проведены механические испытания на кратковременную и длительную прочность образцов опытных составов № 1–№ 5 с разным соотношением W/Mo в исследованном диапазоне от 1 до 7, в сравнении со сплавом ЖСЗЛС, легированного гафнием и танталом, у которого соотношение вольфрама к молибдену соответствовало марочному W/Mo = 1 (сплав 0) и промышленным сплавом ЖС6У (табл. 1).

Испытания на кратковременную прочность проводили при 20 °С на образцах опытных составов №1–№5 с разным соотношением W/Mo в исследуемом диапазоне (рис. 1), в сравнении с промышленным сплавом ЖС6У.

Таблица 1 – Химический состав опытных плавок исследованных сплавов

Сплав №	Содержание легирующих элементов %, по массе													
	C	Cr	Al	Ti	W	Mo	Co	Nb	Ta	Hf	Ce	Zr	B	Ni
0	0,12	14,9	2,9	2,8	4,0	4,0	5,1	–	2,5	0,3	0,01	0,02	0,015	Осн.
1	0,10	14,7	3,1	3,0	5,0	3,0	4,5	–	2,5	0,3	0,01	0,02	0,015	Осн.
2	0,09	14,8	2,8	2,9	5,5	2,5	4,8	–	2,5	0,3	0,01	0,02	0,015	Осн.
3	0,08	14,6	3,0	2,7	6,0	2,0	4,6	–	2,5	0,3	0,01	0,02	0,015	Осн.
4	0,09	14,5	3,1	2,6	6,5	1,5	4,9	–	2,5	0,3	0,01	0,02	0,015	Осн.
5	0,11	14,4	2,9	2,8	7,0	1,0	4,7	–	2,5	0,3	0,01	0,02	0,015	Осн.
ЖС6У	0,18	9,0	5,4	2,6	10,5	1,5	9,8	1,0	–	–	0,02	0,04	0,025	Осн.

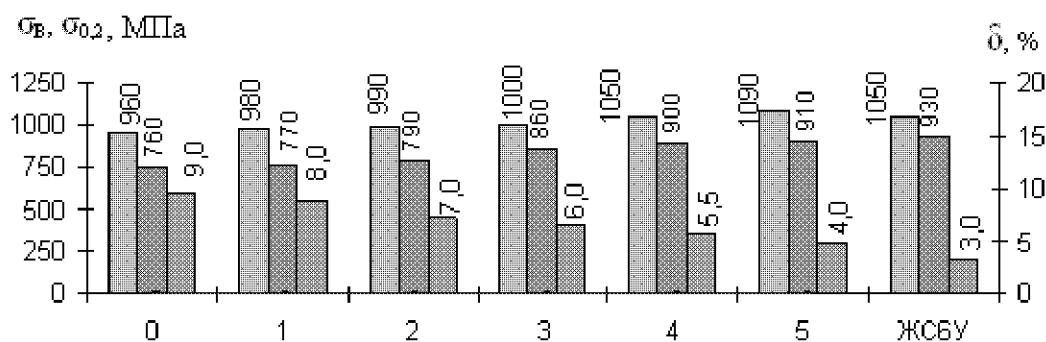


Рис. 1. Кратковременные механические свойства при 20 °С сплава ЖСЗЛС, легированного гафнием 0,3 % и танталом 2,5 % с переменным соотношением W/Mo:

- 0 – сплав ЖСЗЛС + 0,3 %Hf+2,5Ta с марочным соотношением W/Mo = 1,0;
- 1 – сплав ЖСЗЛС + 0,3 %Hf+2,5Ta с соотношением W/Mo = 1,7;
- 2 – сплав ЖСЗЛС + 0,3 %Hf+2,5Ta с соотношением W/Mo = 2,2;
- 3 – сплав ЖСЗЛС + 0,3 %Hf+2,5Ta с соотношением W/Mo = 3,0;
- 4 – сплав ЖСЗЛС + 0,3 %Hf+2,5Ta с соотношением W/Mo = 4,3;
- 5 – сплав ЖСЗЛС + 0,3 %Hf+2,5Ta с соотношением W/Mo = 7,0;
- ЖС6У – не содержит гафний и тантал с марочным соотношением W/Mo = 7,0.

Результаты испытаний на кратковременную прочность показали, что при увеличении соотношения вольфрама к молибдену прочностные характеристики опытных сплавов № 1–№ 5 повышаются, но при этом снижаются показатели пластичности.

Было установлено, что зависимость свойств сплава ЖСЗЛС, легированного гафнием и танталом, от величины соотношения вольфрама к молибдену в исследованном диапазоне не имеет экстремального характера. Из рисунка 1 видно, что наиболее высокие значения кратковременной прочности достигаются в сплаве ЖСЗЛС с 0,3% гафния и 2,5 % тантала при соотношении W/Mo = 7 (W = 7 %, Mo = 1 %) – опытный состав № 5. Испытания показали, что при увеличении соотношения W/Mo до 7 в образцах опытного сплава № 5 повышаются показатели предела прочности σ_B на 130 МПа и предела текучести $\sigma_{0,2}$ на 150 МПа, при этом снижаются показатели пластичности δ с 9,0 % до 3,5 %, т. е. в 2–2,5 раза, по сравнению со сплавом ЖСЗЛС с гафнием и танталом при соотношении W/Mo = 1 (состав 0). Механические испытания на кратковременную прочность показали, что оптимальное соотношение показателей прочности и пластичности достигаются в опытном составе № 4 при соотношении W/Mo = 4,3 (W = 6,5 %, Mo = 1,5 % по массе). Так, предел прочности σ_B образцов опытного сплава № 4 повысился на 110 МПа, предел текучести на 140 МПа, по сравнению с образцами сплава ЖСЗЛС, легированного гафнием и танталом с соотношением W/Mo = 1 (состав 0), но при этом менее интенсивно снижаются показатели пластичности δ с 9 % до 6,5 % (рис. 1).

На рисунке 2 представлены результаты испытаний на длительную прочность при температуре $t = 950$ °С и напряжении $\sigma = 200$ МПа образцов опытных сплавов № 1–№ 5 с различным соотношением W/Mo в исследованном диапазоне, в сравнении с образцами промышленного сплава ЖС6У.

Результаты испытаний на длительную прочность показали, что при увеличении величины соотношения вольфрама к молибдену от 1,7 до 7,0 долговечность образцов опытных сплавов № 1–№ 5 заметно возрастает. Установлено, что долговечность образцов сплава ЖСЗЛС, легированного гафнием и танталом (сплав 0) зависит от величины соотношения вольфрама к молибдену и так же, как в случае испытаний на кратковременную прочность, не имеет экстремального характера в исследованном диапазоне (рис. 2).

Полученные результаты показали, что наиболее высокие значения длительной прочности достигаются в сплаве ЖСЗЛС, легированного гафнием и танталом, при соотношении W/Mo = 7 (состав № 5), которое также имеет марочный промышленный сплав ЖС6У, но при более высоком уровне пластичности. Испытания показали, что образцы опытного состава № 4 с соотношением W/Mo = 4,3 имеют время до разрушения образцов в 3–4 раза больше, чем сплав ЖСЗЛС с гафнием и танталом при марочном соотно-

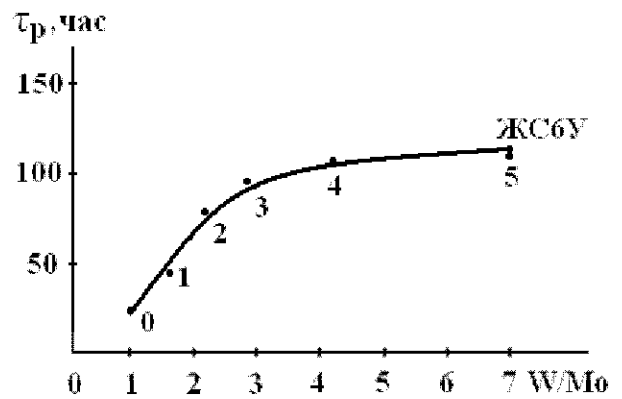


Рис. 2. Влияние соотношения W/Mo в сплаве ЖСЗЛС с гафнием и танталом на время до разрушения образцов, испытанных при температуре $t = 950$ °С и напряжении $\sigma = 200$ МПа:

- 0 – сплав ЖСЗЛС+0,3%Нf+2,5Та с марочным соотношением W/Mo = 1,0;
 - 1 – сплав ЖСЗЛС+0,3%Нf+2,5Та с соотношением W/Mo = 1,7;
 - 2 – сплав ЖСЗЛС+0,3%Нf+2,5Та с соотношением W/Mo = 2,2;
 - 3 – сплав ЖСЗЛС+0,3%Нf+2,5Та с соотношением W/Mo = 3,0;
 - 4 – сплав ЖСЗЛС+0,3%Нf+2,5Та с соотношением W/Mo = 4,3;
 - 5 – сплав ЖСЗЛС+0,3%Нf+2,5Та с соотношением W/Mo = 7,0;
- ЖС6У – не содержит гафний и тантал с марочным соотношением W/Mo = 7,0

шении W/Mo = 1 (состав 0), что обеспечивает повышение долговечности образцов до уровня сплава ЖС6У. Следует отметить, что все опытные составы № 1–№ 5, имеющие соотношение W/Mo > 1, показали более высокий уровень характеристик кратковременной и длительной прочности, чем сплав ЖСЗЛС с гафнием и танталом, но при марочном соотношении W/Mo = 1 (состав 0).

Таким образом, опытный состав № 4, в дальнейшем называемый сплав ЖСЗЛС-М, содержащий 0,3 % гафния и 2,5 % тантала по массе при соотношении W/Mo = 4,3, обладает оптимальными суммарными показателями прочности и пластичности. При этом его прочностные характеристики находятся на эквивалентном уровне, в сравнении с некоррозионностойким сплавом ЖС6У, но с более высоким уровнем пластичности.

В таблице 2 приведены результаты промышленной аттестации механических свойств разработанного сплава ЖСЗЛС-М по входному паспортному контролю для сплава ЖС6У.

Результаты промышленной аттестации механических свойств показали, что разработанный на основе промышленного сплава ЖСЗЛС литейный жаропрочный коррозионностойкий никелевый сплав ЖСЗЛС-М обеспечивает эквивалентный уровень как кратковременной, так и длительной прочности при значительно лучших показателях пластичности, в сравнении с некоррозионностойким жаропрочным сплавом ЖС6У.

Таблица 2 – Результаты промышленной аттестации механических свойств

Марка сплава	Состояние образца	Результаты механических испытаний			
		Кратковременная прочность при 20 °С			Длительная прочность
		σ_{B_s} МПа	$\sigma_{0,2s}$ МПа	δ_s %	$\sigma_{20}^{975} \geq 40$ часов
					τ , время до разрушения
ЖСЗЛС-М	После ТО	1090	910	8,0	44 ³⁰
		1075	905	10,0	40 ¹⁰
		1115	925	9,5	40 ¹⁵
		1125	930	10,0	43 ⁵⁵
		1120	940	9,0	45 ⁰⁰
		1115	915	8,5	41 ²⁰
		1110	910	7,5	40 ³⁰
		1085	900	7,0	42 ³⁰
ОСТ 1 90127-85 на сплав ЖС6У	После ТО	≥ 850	–	≥ 3	≥ 40

Финишная оптимизация химического состава разработанного модернизированного состава – сплава ЖСЗЛС-М– была достигнута тем, что при содержании углерода в пределах 0,08–0,12 %, хрома в пределах 14,0–15,0 %, алюминия 2,5–3,5 %, титана 2,5–3,5 %, молибдена в пределах 1,5–2,5 %, вольфрама в пределах 6,0–7,0 %, кобальта в пределах 4,0–5,0 %, тантала в пределах 2,0–3,0 %, гафния в пределах 0,2–0,4 %, циркония в пределах 0,010–0,020 %, бора в пределах 0,010–0,020 %, заметно улучшилась структурная стабильность и существенно повысились показатели кратковременной и длительной прочности, что обеспечило прочностные характеристики на эквивалентном уровне, в сравнении с жаропрочным некоррозионно-стойким промышленным сплавом ЖС6У при лучшей пластичности.

В целом улучшилась сбалансированность многокомпонентной системы легирования разработанного сплава ЖСЗЛС-М и, соответственно, снизилась вероятность выделения избыточных, топологически плотноупакованных (ТПУ) фаз неблагоприятной морфологии как при кристаллизации, так и в процессе термической обработки.

Выводы

1. Лучшие суммарные показатели прочности и пластичности достигаются при оптимальном соотношении W/Mo = 4,3 в сплаве ЖСЗЛС, легированном 0,3 % гафния и 2,5 % тантала по массе (состав № 4 – ЖСЗЛС-М). Дальнейшее повышение соотношения W/Mo до 7 приводит к заметному снижению показателей пластичности.

2. Увеличение в сплаве ЖСЗЛС-М соотношения вольфрама к молибдену с 1 до 4 при оптимальном легировании перспективными элементами гафнием и танталом, позволило заметно повысить высокотемпературную работоспособность сплава за счет повышения термодинамической стабильности фаз и улучшения их структурной морфологии.

Список литературы

1. Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С. Т. Кишкина : научн.-техн. сб. к 100-летию со дня рождения С. Т. Кишкина / Под общ. ред. Е. Н. Каблова. – М. : Наука, 2006. – 272 с.
2. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия) / Е. Н. Каблов. – Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, Государственный научный центр Российской Федерации. – М. : МИСИС, 2001. – 632 с.
3. Каблов Е. Н. Жаропрочность никелевых сплавов / Е. Н. Каблов, Е. Р. Голубовский. – М. : Машиностроение, 1998. – 464 с.
4. Каблов Е. Н. Перспективы применения литейных жаропрочных сплавов для производства турбинных лопаток ГТД / Е. Н. Каблов, С. Т. Кишкин // Газотурбинные технологии. – 2002. – № 1. – С. 34–37.
5. Жаропрочность литейных никелевых сплавов и защита их от окисления / [Б. Е. Патон, Г. Б. Строганов, С. Т. Кишкин и др.]. – К. : Наук. думка, 1987. – 256 с.
6. Жаропрочные сплавы для газовых турбин. Материалы международной конференции / [Д. Котсорадис, П. Феликс, Х. Фишмайстер и др.]; пер. с англ. под ред. Р. Е. Шалина. – М. : Металлургия, 1981. – 480 с.
7. Симс Ч. Т. Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / Симс Ч. Т., Столофф Н. С., Хагель У. К.; пер. с англ. под ред. Р. Е. Шалина. – М. : Металлургия, 1995. – Кн. 1, 2. – 384 с.
8. Каблов Е. Н. 75 лет. Авиационные материалы / Избранные труды «ВИАМ» 1932 – 2007. Юбилейный научно-технический сборник / Под общ. ред. акад. РАН Каблова Е. Н. – М. : ВИАМ. – 2007. – 438 с.
9. Влияние легирования гафнием на структурообразование жаропрочного коррозионно-стойкого никелевого сплава / [А. Г. Андриенко, С. В. Гайдук, В. В. Кононов, Т. В. Тихомирова] // Молодые специалисты авиационно-строительной отрасли «Молодежь в авиации: Новые решения и передовые технологии: V междунар. науч.-техн. конф., 16–20 мая 2011 г. : сб. тез. докл. – Запорожье–Алушта, 2011. – С. 172–174.

10. Влияние тантала на структуру и прочностные характеристики легкого жаропрочного коррозионно-стойкого никелевого сплава ЖСЗЛС / [А. Д. Коваль, А. Г. Андри-

енко, С. В. Гайдук, В. В. Кононов] // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – Запоріжжя, ЗНТУ. – 2011. – № 2. – С. 42–46.

Одержано 09.12.2011

Коваль А.Д., Андриєнко А.Г., Гайдук С.В., Кононов В.В. Вплив співвідношення вольфраму до молібдену на механічні властивості сплаву ЖСЗЛС, оптимально легovanого гафнієм і танталом

Оцінено вплив співвідношення вольфраму до молібдену (W/Mo) в діапазоні від 1 до 7 на характеристики міцності ливарного жароміцного корозійностійкого сплаву ЖСЗЛС, оптимально легovanого гафнієм і танталом. Наведено результати механічних випробувань на короткочасну і довготривалу міцність дослідного складу, порівняно з некорозійностійким промисловим сплавом ЖС6У.

Ключові слова: ливарні жароміцні корозійностійкі нікелеві сплави, багатокомпонентна система легування, оптимальне співвідношення, механічні випробування, короткочасна і довготривала міцність.

Koval A., Andrienko A., Gayduk S., Kononov V. Influence of tungsten to molybdenum ratio on mechanical properties of alloy ЖСЗЛС which is optimally alloyed with hafnium and tantalum

The influence of tungsten to molybdenum ratio (W/Mo) on the strength parameters of cast high-temperature corrosion-resistant alloy ЖСЗЛС which is optimally alloyed with hafnium and tantalum has been estimated within the range from 1 to 7. The short-term and long-term mechanical strength testing results of experimental chemical compositions have been represented in comparison with non-corrosion-resistant commercial alloy ЖС6У.

Key words: cast high-temperature corrosion-resistant nickel-base alloys, multi-component system of alloying, optimum ratio, mechanical tests, short-term and long-term strength.