

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

## ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ СПЛАВА ЖСЗЛС, ЛЕГИРОВАННОГО ГАФНИЕМ И ТАНТАЛОМ

*Исследовано влияние различных режимов термической обработки на структуру и прочностные характеристики литейного жаропрочного коррозионностойкого сплава ЖСЗЛС, легированного гафнием и танталом. Приведены результаты металлографических исследований и сравнительных механических испытаний на кратковременную и длительную прочность.*

**Ключевые слова:** литейные жаропрочные коррозионностойкие никелевые сплавы, многокомпонентная система легирования; термическая обработка, структура, морфология фаз, механические испытания, кратковременная и длительная прочность.

### Введение

В настоящее время для увеличения ресурса работы деталей газотурбинных двигателей (ГТД) стали применять модернизированные составы, разработанные на основе известных промышленных жаропрочных никелевых сплавов. Известно, что жаропрочность сплавов зависит от количества и состава упрочняющей  $\gamma'$ - фазы, ее дисперсности, морфологии, степени легирования  $\gamma$ - твердого раствора. Эти параметры зависят как от химического состава, условий кристаллизации, так и от режимов термической обработки (ТО) [1–3].

Работоспособность таких сплавов в значительной мере определяется термодинамической стабильностью основной упрочняющей  $\gamma'$ - фазы. Фазовая и структурная стабильность существенным образом определяют долговечность и надежность работы изделий из жаропрочных никелевых сплавов. Поэтому для формирования оптимальной и стабильной структуры важным является правильный выбор режима ТО для конкретного сплава с учетом условий его эксплуатации. Постоянно возрастающие требования к жаропрочным материалам приводят к совершенствованию режимов их термической обработки (ТО) с целью повышения служебных характеристик как промышленных марок, так и модернизированных составов, разработанных на их основе [3–5].

До настоящего времени по выбору оптимальных режимов ТО для литейных жаропрочных коррозионностойких никелевых сплавов нет единого мнения. Существует мнение, что литейные жаропрочные никелевые сплавы вообще не следует подвергать термической обработке, так как распад  $\gamma$ - твердого раствора и формирование частиц упрочняющей  $\gamma'$ - фазы происходит в процессе кристаллизации сплава [4, 5].

Однако большинство исследователей считает, что в сплавах данного класса, не подвергшихся ТО, в процессе эксплуатации при воздействии высоких температур увеличивается ликвационная неоднородность и значительно снижается пластичность. В работах авторов [4–6] показано, что двухступенчатая ТО (гомогенизация + старение) обеспечивает для литейных жаропрочных никелевых сплавов наиболее высокий уровень прочностных характеристик.

В данной работе было исследовано влияние различных режимов ТО на структуру и механические свойства модернизированного состава – сплава ЖСЗЛС-М, разработанного на основе промышленного сплава ЖСЗЛС, легированного гафнием и танталом, с более высоким соотношением вольфрама к молибдену, с целью оптимизации температурного режима для обеспечения структурной стабильности и повышения уровня прочностных характеристик [7, 8].

### Постановка задачи

Для этой цели из сплава ЖСЗЛС-М, оптимально легированного гафнием 0,3 % и танталом 2,5 % с соотношением вольфрама к молибдену  $W/Mo = 4,3$  ( $W = 6,5$  %;  $Mo = 1,5$  %), были отлиты стандартные образцы. Заливка образцов 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 сплава ЖСЗЛС-М приведены в таблице 1.

**Таблица 1** – Химический состав опытных плавок сплава ЖСЗЛС-М

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

На первом этапе для 1-й партии образцов была проведена ТО по паспортному режиму для промышленного сплава ЖСЗЛС. Было исследовано влияние указанного режима ТО на структуру и механические свойства сплава ЖСЗЛС-М.

На втором этапе для 2-й партии образцов была проведена ТО по паспортному режиму для промышленного сплава ЖС6У. Было исследовано влияние данного режима ТО на структурообразование и прочностные характеристики сплава ЖСЗЛС-М.

На третьем этапе для 3-й партии образцов была проведена ТО по паспортному режиму для промышленного сплава ЖС6К. Было исследовано влияние данного режима ТО на структурные и прочностные характеристики сплава ЖСЗЛС-М.

Режимы штатных термических обработок для промышленных сплавов ЖСЗЛС, ЖС6У и ЖС6К, проведенных соответственно для каждой из трех партий образцов сплава ЖСЗЛС-М, представлены в табл. 2.

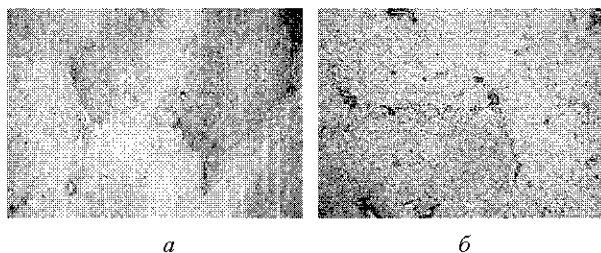
После проведения литым образцам соответствующего режима ТО далее из каждой партии были изготовлены цилиндрические образцы для сравнительных механических испытаний по стандартным методикам: на кратковременную прочность по ГОСТ 9651-73 при температуре 20 °С и длительную прочность по ГОСТ 10145-81 при температурах 950 °С и 975 °С.

Металлографические исследования структуры сплава ЖСЗЛС-М после разных режимов термообработки проводились на оптическом микроскопе «Olympus IX-70» с цифровой видеокамерой «Exwave HAD Sony» при увеличении 500.

### Анализ результатов

На рис. 1 приведены исходные структуры промышленного марочного сплава ЖСЗЛС в литом состоянии (до термообработки) и после штатной термической обработки. Видно, что в литой структуре марочного сплава ЖСЗЛС, не легированного гафнием и танталом, с марочным соотношением вольфрама к молибдену W/Mo = 1, наблюдаются скопления мелких частиц карбидной фазы по границам зерен в виде прерывистых цепочек (рис. 1, а). Термическая обработка по штатному

режиму приводит к повышению структурной однородности и образованию в структуре сплава более крупных одиночных карбидных частиц, при этом наблюдаются отдельные группы мелких карбидных частиц как по границам зерен, так и в теле зерен (рис. 1, б).



**Рис. 1.** Микроструктура промышленного сплава ЖСЗЛС, без гафния и тантала с соотношением по марке вольфрама к молибдену W/Mo = 1: а – структура в литом состоянии; б – структура после штатной термической обработки, × 500

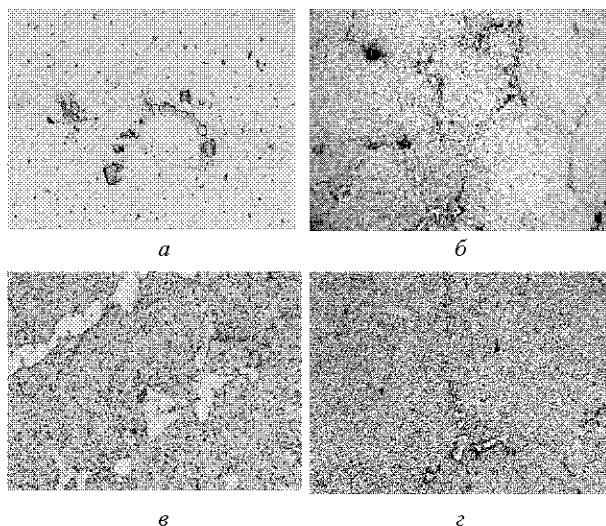
Исследование микроструктуры сплава ЖСЗЛС-М в литом состоянии показало, что оптимальное легирование гафнием 0,3 % и танталом 2,5 %, а также увеличение соотношения вольфрама к молибдену W/Mo с 1 до 4 позитивно влияет на структурообразование.

Металлографические исследования показали, что в структуре сплава ЖСЗЛС-М в литом состоянии (до термообработки) эвтектические выделения  $\gamma$ - $\gamma'$  наблюдаются в большем количестве (рис. 2, а), чем в структуре промышленного сплава ЖСЗЛС без гафния и тантала с марочным соотношением вольфрама к молибдену W/Mo = 1 (рис. 1, а). Эвтектические выделения имеют форму конгломератов, которые преимущественно выделяются в междендритных участках по границам зерен. Это, вероятно, связано с тем, что гафний и тантал являются элементами, которые наиболее сильно ликвируют в литейных жаропрочных никелевых сплавах.

На рис. 2, а видно, что в структуре сплава ЖСЗЛС-М в литом состоянии рядом с мелкодисперсными частицами основной упрочняющей  $\gamma'$ - фазы наблюдаются более крупные первичные выделения  $\gamma'$ - фазы, которые образуются при кристаллизации в межосевых участках дендритов, что говорит об их эвтектическом происхождении.

**Таблица 2** – Штатные режимы термообработки для промышленных сплавов

Марка сплава	Температура гомогенизации $t_{ГОМ}, ^\circ\text{C}$	Температура старения $t_{СТ}, ^\circ\text{C}$	Время выдержки, между ступенями, час	Среда охлаждения, между ступенями
ЖСЗЛС	1150	950	4	на воздухе
ЖС6У	1225	950	4	на воздухе
ЖС6К	1210	950	4	на воздухе



**Рис. 2.** Микроструктура сплава ЖСЗЛС-М, легированного гафнием и танталом с соотношением вольфрама к молибдену  $W/Mo = 4,3$ : *a* – структура в литом состоянии; *б* – структура после термической обработки по режиму сплава ЖСЗЛС; *в* – структура после термической обработки по режиму сплава ЖС6У; *г* – структура после термической обработки по режиму сплава ЖС6К;  $\times 500$

Вместе с тем, легирование сплава ЖСЗЛС гафнием и танталом при соотношении вольфрама к молибдену  $W/Mo = 4,3$  (сплав ЖСЗЛС-М) наиболее эффективно влияет на формирование структуры при кристаллизации. При этом, основное положительное влияние на формирование структуры в процессе кристаллизации сплава ЖСЗЛС-М, в сравнении со структурой промышленного сплава ЖСЗЛС без гафния и тантала, состоит в повышении термодинамической стабильности фаз, особенно эвтектики  $\gamma-\gamma'$ , улучшения морфологии карбидов и состояния границ зерен, так как структурная стабильность в первую очередь зависит от химического состава фаз, в которые входят гафний и тантал.

Для исследования влияния различных режимов ТО на структуру и прочностные характеристики сплава ЖСЗЛС-М, с целью оптимизации режима ТО, были проведены металлографические исследования и сравнительные механические испытания на кратковременную и длительную прочность трех партий образцов.

Термическая обработка образцов 1-й партии из сплава ЖСЗЛС-М по режиму для сплава ЖСЗЛС (табл. 2) приводила к образованию в структуре более крупных отдельных карбидных частиц в сравнении с литым состоянием, при этом в структуре наблюдались отдельные группы мелких карбидных частиц преимущественно по границам зерен. После термической обработки по режиму для сплава ЖСЗЛС структура образцов сплава ЖСЗЛС-М, легированного гафнием и танталом, заметно не отличается от структуры в литом состоянии, однако наблюдается некоторое повышение структурной однородности за счет более равномерного выделения частиц  $\gamma'$ - фазы и частичного

растворения эвтектики  $\gamma-\gamma'$ . При этом не наблюдается заметных изменений в морфологии и размерах частиц карбидной фазы, а также изменений морфологии эвтектических выделений  $\gamma-\gamma'$ , в сравнении со структурой в литом состоянии, что не обеспечивает оптимальных механических свойств (рис. 2, *б*). Таким образом, можно сделать вывод, что легирование сплава ЖСЗЛС гафнием и танталом, а также увеличение соотношения вольфрама к молибдену  $W/Mo = 4,3$  повышает оптимальную температуру гомогенизации для сплава ЖСЗЛС-М. Поэтому термообработка для сплава ЖСЗЛС-М по температурному режиму сплава ЖСЗЛС малоэффективна (табл. 2, рис. 2, *б*).

Термическая обработка образцов 2-й партии из сплава ЖСЗЛС-М по режиму для сплава ЖС6У приводила к повышению структурной неоднородности, в сравнении со структурой в литом состоянии, за счет частичного оплавления эвтектических выделений  $\gamma-\gamma'$  с образованием в этих зонах микропор, что негативно влияет на прочностные характеристики, особенно пластичность (рис. 2, *в*). При этом наблюдалась частичная коагуляция частиц  $\gamma'$ - фазы и карбидов и изменение их морфологии, а также частичное растворение и оплавление выделений эвтектики  $\gamma-\gamma'$ . В целом после термообработки по режиму для сплава ЖС6У структура образцов сплава ЖСЗЛС-М отличается от структуры в литом состоянии большей структурной неоднородностью, за счет частичного оплавления эвтектических выделений  $\gamma-\gamma'$  и общего огрубления структурных составляющих в результате перегрева при гомогенизации. Таким образом, для сплава ЖСЗЛС-М оптимальная температура гомогенизации находится ниже. Поэтому термообработка для сплава ЖСЗЛС-М по режиму сплава ЖС6У также не эффективна (табл. 2, рис. 2, *в*).

Термическая обработка 3-й партии образцов сплава ЖСЗЛС-М по режиму для сплава ЖС6К приводила к заметному повышению структурной однородности (рис. 2, *г*), в сравнении со структурой в литом состоянии (рис. 2, *а*), за счет более равномерного распределения частиц  $\gamma'$ - фазы в  $\gamma$ - твердом растворе. При этом наблюдалось некоторое уменьшение размеров карбидных частиц и благоприятные изменения их морфологии от полигональной до сферической, а также частичное растворение эвтектических выделений  $\gamma-\gamma'$  в  $\gamma$ - твердом растворе с дополнительным довыделением в этих зонах мелкодисперсных частиц основной упрочняющей  $\gamma'$ - фазы. После такого режима ТО карбидные частицы глобулярной и полигональной морфологии располагаются преимущественно в теле зерен, что способствует дополнительному упрочнению матрицы. Таким образом, для сплава ЖСЗЛС-М термическая обработка по режиму сплава ЖС6К является наиболее эффективной и оптимальной, что подтверждается сравнительными механическими испытаниями, в сравнении с образцами 1-й и 2-й партии сплава ЖСЗЛС-М, термообработанных по температурным режимам для сплавов ЖСЗЛС и ЖС6У (табл. 3).

Сравнительные механические испытания на кратковременную прочность проводили при 20 °С, на длительную прочность – при 950 °С. Результаты сравнительных механических испытаний представлены в табл. 3.

Результаты испытаний образцов сплава ЖСЗЛС-М на кратковременную прочность при 20 °С показали, что после ТО по режиму для сплава ЖС6К достигаются наиболее высокие значения предела прочности  $\sigma_B$  и предела текучести  $\sigma_{0,2}$ , при этом незначительно снижаются показатели пластичности  $\delta$  (табл. 3).

Механические испытания на кратковременную прочность показали, что наиболее оптимальным для сплава ЖСЗЛС-М является штатный температурный режим, соответствующий сплаву ЖС6К. Испытания показали, что в образцах сплава ЖСЗЛС-М, термообработанных по режиму сплава ЖС6К, показатели предела прочности  $\sigma_B$  и предела текучести  $\sigma_{0,2}$  выше на 30–40 МПа, чем при других режимах ТО, при этом показатели пластичности  $\delta$  снижаются с 9–10 % до 7–8 %, по сравнению с образцами сплава ЖСЗЛС-М, термообработанных по режимам ТО для сплавов ЖСЗЛС и ЖС6У.

Из таблицы 3 видно, что максимальные значения долговечности, т. е. времени до разрушения образцов  $\tau$ , достигаются в сплаве ЖСЗЛС-М также после ТО по режиму для сплава ЖС6К (см. табл. 2, 3). Механические испытания показали, что долговечность образцов сплава ЖСЗЛС-М зависит от температуры гомогенизации (I-я ступень ТО) и имеет экстремальный характер в исследованном температурном диапазоне (рис. 3).

Испытания показали, что образцы сплава ЖСЗЛС-М, термообработанные по режиму для сплава ЖС6К, имеют соответственно на 20 % и 40 % большее время до разрушения, по сравнению с образцами, термообработанными по режимам для сплавов ЖСЗЛС и ЖС6У. Таким образом, сплав ЖСЗЛС-М, содержащий 0,3 % гафния и 2,5 % тантала, по массе при соотношении W/Mo = 4,3 обладает оптимальными структурными параметрами и лучшими суммарными показателями прочности и пластичности после ТО по температурному режиму для сплава ЖС6К.

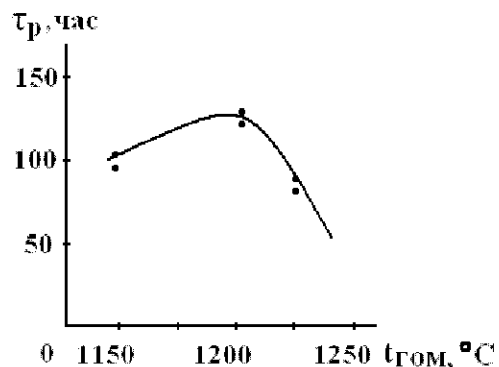


Рис. 3. Зависимость долговечности от температуры гомогенизации образцов сплава ЖСЗЛС-М, испытанных при температуре 950 °С и напряжении 200 МПа

### Выводы

1. Наиболее эффективной и оптимальной является термическая обработка образцов сплава ЖСЗЛС-М по режиму для сплава ЖС6К, которая обеспечивает повышение структурной однородности, в сравнении с литым состоянием, за счет более равномерного распределения упрочняющей  $\gamma'$ - фазы и карбидов, улучшения их морфологии, повышения термодинамической стабильности фаз, особенно эвтектических выделений  $\gamma-\gamma'$ .

2. После термической обработки образцов из сплава ЖСЗЛС-М по третьему температурному режиму для сплава ЖС6К достигаются лучшие показатели прочностных характеристик в сравнении с другими температурными режимами.

### Список литературы

1. 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.
2. 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.

Таблица 3 – Результаты механических испытаний образцов сплава ЖСЗЛС-М

Марка сплава	ТО по режиму сплава	Результаты механических испытаний			
		Кратковременная прочность при 20 °С			Длительная прочность
ЖСЗЛС-М	ЖСЗЛС	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_{200}^{950} \geq 100$ , часов
		$\tau$ , время до разрушения			
	ЖС6У	1090	910	8,0	101,0
		1075	905	10,0	97,7
		1115	925	9,5	105,0
	ЖС6К	1110	910	10,0	77,0
		1085	900	9,0	85,0
		1075	905	8,5	83,0
	ЖС6К	1125	930	7,5	131,5
1120		940	8,0	126,0	
1115		925	7,5	115,0	

3. Жаропрочность литейных никелевых сплавов и защита их от окисления [Текст] / [Б. Е. Пагон, Г. Б. Строганов, С. Т. Кишкин и др.]. – К. : Наук. думка, 1987. – 256 с.
4. Каблов Е.Н. Жаропрочность никелевых сплавов / Е. Н. Каблов, Е. Р. Голубовский. – М. : Машиностроение, 1998. – 464 с.
5. 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.
6. Ртищев В. В. Оптимизация режима термической обработки жаропрочных сплавов ЭП220ВД и ЭИ929ВД с целью повышения надежности лопаток ГТУ / В. В. Ртищев // Труды ЦКТИ им. И. И. Ползунова. – Л., 1982. – Вып. 194. – С. 92–100.
7. Влияние легирования гафнием на структурообразование жаропрочного коррозионностойкого никелевого сплава / [А. Г. Андриенко, С. В. Гайдук, В. В. Кононов, Т. В. Тихомирова] // Молодые специалисты авиамоторостроительной 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.
8. Влияние тантала на структуру и прочностные характеристики литейного жаропрочного коррозионностойкого никелевого сплава ЖСЗЛС / [А. Д. Коваль, А. Г. Андриенко, С. В. Гайдук, В. В. Кононов] // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – Запоріжжя, ЗНТУ. – 2011. – № 2. – С. 42–46.

Одержано 06.10.2011

**Коваль А.Д., Андриєнко А.Г., Гайдук С.В., Кононов В.В. Оптимізація режиму термічної обробки для сплаву ЖСЗЛС, легованого гафнієм і танталом**

*Досліджено вплив різних режимів термічної обробки на структуру і характеристики міцності ливарного жароміцного корозійностійкого сплаву ЖСЗЛС, легованого гафнієм і танталом. Наведено результати металографічних досліджень і порівняльних механічних випробувань на короткочасну і довготривалу міцність.*

*Ключові слова:* ливарні жароміцні корозійностійкі нікелеві сплави, багатоконпонентна система легування, термічна обробка, структура, морфологія фаз, механічні випробування, короткочасна і довготривала міцність.

**Koval A., Andrienko A., Gayduk S., Kononov V. Optimization of heat-treatment regime for alloy ЖСЗЛС alloyed with hafnium and tantalum**

*The influence of different heat-treatment regimes on structure and strength parameters of cast corrosion-resistant superalloy ЖСЗЛС alloyed with hafnium and tantalum has been studied. Metallographic investigation and comparative short-term and long-term mechanical testing results have been presented.*

*Key words:* cast corrosion-resistant nickel-base superalloys, multi-component system of alloying, heat-treatment, structure, phase morphology, mechanical tests, short-term and long-term strength.