

Выводы

1. Определены плотности теплового потока на зонд, при которых проявляется влияние температурного пограничного слоя на плотность ионного тока. Показано, что для определения температуры плотной плазмы по величине плотности ионного тока на зонд необходимо измерение и плотности конвективного теплового потока на поверхность зонда.

2. В работе обосновано допущение о применимости приближения «замороженной» диффузии в низкотемпературной зоне пограничного слоя инертных газов, что позволяет упростить расчет процессов рекомбинации ионов в этой зоне.

3. Получены зависимости температуры плазмы от плотности ионного тока и конвективного теплового потока на поверхность зонда, которые могут быть использованы для измерения температуры плазмы.

Список литературы

1. О зондовых измерениях при средних давлениях / В. М. Захарова, Ю. М. Каган, К. С. Мустафин, В. И. Пель

2. Ульянов К. Н. Теория электрических зондов в плотной плазме / К. Н. Ульянов // ЖТФ. – 1970. – № 4. – С. 790–798.
3. Паневин И. Г. Исследование прианодных процессов в сильноточных разрядах высокого давления / И. Г. Паневин, И. П. Назаренко А. В. Ершов // Экспериментальные исследования плазмотронов. – Новосибирск : Наука, 1977. – С. 340–357.
4. Ершов А. В. Оценка энергопереноса на анод дугового разряда в инертных газах. / А. В. Ершов, О. Г. Быковский // Автоматическая сварка.– 2004. – № 6 (614). – С. 11–14.
5. Гольдфарб В. М. Оптическое излучение / В. М. Гольдфарб // Очерки физики и химии низкотемпературной плазмы. – М. : Наука, 1971. – С. 169–232.
6. Кулик П. П. Упругие взаимодействия и явления переноса / П. П. Кулик // Очерки физики и химии низкотемпературной плазмы. – М. : Наука, 1971. – С. 5–56.
7. Kruger Ch. H. Nonequilibrium in Confined – Arc Plasma / Ch. H. Kruger // Phys of Fluids. – 1970. – Vol. 13. – N 7. – P. 1737–1746.

Одержано 09.03.2011

Єршов А.В., Сейдаметов С.В., Коцур І.М., Камель Г.І. Вплив пограничного шару на зондові вимірювання температури в густій плазмі аргону

Запропоновано фізичну модель впливу параметрів температурного граничного шару плоского зонду, яка по новому інтерпретує результати зондових вимірювань іонного струму у плазмі високого тиску. Наведено співставлення аналітичних залежностей з результатами числового розрахунку.

Ключові слова: іонізація, рекомбінація, амбіполярна дифузія, пограничний шар, парціальний тиск, рівноважна плазма.

Ershov A., Seidametov S., Kotsur G., Kamel I. The influence of boundary layer on probe measurements of temperature in dense plasma of argon

Physical model of boundary layer temperature parameters influence of plane probe that interprets in different way the results of probe measurements of the ion current in high pressure plasma has been proposed. The comparison of analytical relationship to the results of numerical computation was shown.

Key words: ionization, recombination, ambipolar diffusion, boundary layer, partial pressure, equilibrium plasma.

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 ТАНТАЛА НА СТРУКТУРУ И ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛИТЕЙНОГО ЖАРОПРОЧНОГО КОРРОЗИОННОСТОЙКОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА ЖСЗЛС

Исследовано влияние тантала в диапазоне легирования от 1,5 до 3,5 % по массе на структуру и механические свойства литейного жаропрочного коррозионностойкого никелевого сплава ЖСЗЛС. Приведены результаты металлографических исследований и механических испытаний опытных составов в сравнении с промышленным сплавом ЖСЗЛС без добавок тантала.

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

Введение

До настоящего времени повышение надежности работы турбин и увеличение эксплуатационного ресурса деталей осуществляется двумя основными направлениями. Первое направление – замена существующих промышленных жаропрочных сплавов на разработанные сплавы нового поколения. Второе направление – модернизация химического состава существующих промышленных марок путем легирования перспективными элементами (тантал, гафний, рений и др.), в результате чего обеспечивается повышение комплекса служебных характеристик в условиях длительного воздействия высоких температур и напряжений в агрессивных средах [1–4].

Международная практика показала, что в условиях общего мирового кризиса второе направление экономически более выгодно и имеет широкие перспективы, так как не требует длительного времени на объемные научные и технологические исследования, при этом не нуждается в больших объемах финансовых ресурсов по сравнению с первым направлением. Современный подход к легированию жаропрочных сплавов перспективными элементами приводит к компромиссу, который должен одновременно учитывать влияние данных элементов на уровень прочностных характеристик и структурную стабильность, с одной стороны, технологичность и экономическую целесообразность, с другой [3–5].

Во многих известных исследованиях указывается о положительном влиянии тантала на прочностные характеристики жаропрочных никелевых сплавов. При этом отмечалось, что для многокомпонентной системы легирования конкретного сплава введение оптимального количества данного элемента приводит к одновременному повышению как прочностных характеристик, так и термической стабильности фаз с замедлением диффузионных процессов по границам зерен [6–8].

В данной работе было исследовано влияние легирования танталом в диапазоне концентраций от 1,5 до 3,5 % по массе на структуру и механические свойства промышленного марочного сплава ЖСЗЛС для оптимизации содержания тантала с целью повышения уровня прочностных характеристик и структурной стабильности.

Таблица 1 – Химический состав плавок исследованных сплавов

Сплав №	Содержание легирующих элементов %, по массе											
	C	Cr	Al	Ti	Mo	W	Co	Ta	Ce	Zr	B	Ni
1	0,10	15,1	2,9	2,8	3,8	3,9	4,7	1,5	0,01	0,015	0,015	Осн.
2	0,11	15,5	3,0	3,0	3,9	4,1	4,5	2,0	0,01	0,015	0,015	Осн.
3	0,09	15,0	2,8	2,9	3,7	3,8	4,8	2,5	0,01	0,015	0,015	Осн.
4	0,08	15,4	3,0	2,7	4,1	4,0	4,6	3,0	0,01	0,015	0,015	Осн.
5	0,11	15,3	2,7	2,6	4,0	4,1	4,9	3,5	0,01	0,015	0,015	Осн.
ЖСЗЛС	0,12	15,9	2,6	2,6	3,8	3,8	5,5	–	0,01	0,015	0,015	Осн.

Постановка задачи

Образцы опытных составов № 1–№ 5 отливали на базе паспортной шихтовой заготовки сплава ЖСЗЛС с различным содержанием тантала в исследуемом диапазоне от 1,5 до 3,5 % с концентрационным шагом 0,5 % по массе.

Заливка образцов опытных составов № 1–№ 5, легированных танталом в исследованном диапазоне, а также образцов промышленного сплава ЖСЗЛС без добавок тантала 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 и ОСТ 1.90127-85. Спектральный химический анализ проводился на оптическом эмиссионном приборе ARL-4460 (квантометр одноименного многоканального анализа). Химические составы плавок опытных сплавов приведены в таблице 1.

Далее из литых заготовок образцов опытных составов № 1–№ 5 и сплава ЖСЗЛС изготавливались 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 температуре 950 °С.

Механические испытания образцов всех исследованных сплавов проводились после термической обработки.

Металлографические исследования структуры образцов опытных составов осуществлялось на нетравленных и травленных микрошлифах на световом оптическом микроскопе «Olympus IX-70» с цифровой видеокамерой «ExwaveHAD color video camera Digital Sony» при увеличении × 200.

Анализ результатов

С целью исследования влияния легирования танталом и оптимизации его содержания в сплаве ЖСЗЛС были проведены сравнительные механические испытания на кратковременную и длительную прочность.

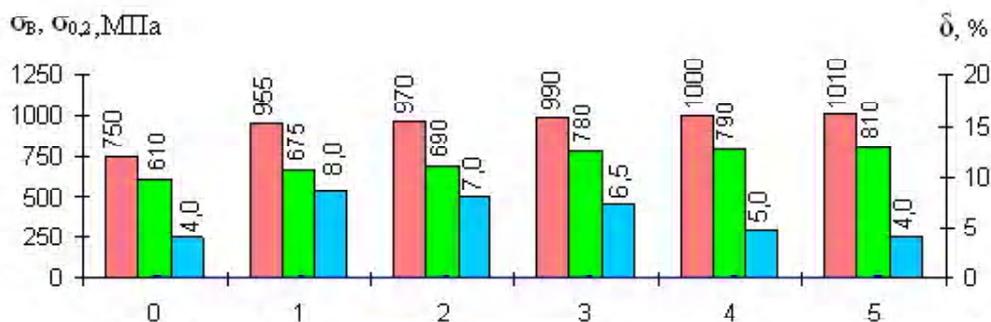


Рис. 1. Кратковременные механические свойства при 20 °С сплава ЖСЗЛС, легированного танталом:

- 0 – сплав ЖСЗЛС без тантала; 3 – сплав ЖСЗЛС с 2,5 % тантала;
 1 – сплав ЖСЗЛС с 1,5 % тантала; 4 – сплав ЖСЗЛС с 3,0 % тантала;
 2 – сплав ЖСЗЛС с 2,0 % тантала; 5 – сплав ЖСЗЛС с 3,5 % тантала

Опытные составы № 1, № 2, № 3, № 4 и № 5 содержат расчетное количество тантала 1,5 %, 2,0 %, 2,5 %, 3,0 % и 3,5 % по массе соответственно (табл. 1).

На рисунке 1 представлены результаты механических испытаний на кратковременную прочность при температуре 20 °С образцов опытных составов № 1–№ 5 с разным содержанием тантала в исследованном диапазоне, в сравнении с образцами промышленного сплава ЖСЗЛС без тантала.

Результаты сравнительных механических испытаний показали, что уровень кратковременной прочности сплава ЖСЗЛС, легированного танталом в исследованном диапазоне, постепенно возрастает и зависит от содержания тантала, однако не имеет экстремального характера.

Из рисунка 1 видно, что лучшие значения кратковременной прочности достигаются при содержании тантала 3,5 % по массе (сплав № 5), что, однако, не является оптимальным для многокомпонентной системы легирования сплава ЖСЗЛС из-за заметного снижения показателей пластичности.

Было установлено, что при увеличении содержания тантала до 3,5 % по массе в опытном сплаве № 5, по сравнению со сплавом ЖСЗЛС без тантала (сплав 0), повышаются показатели предела прочности σ_B на 260 МПа и предела текучести $\sigma_{0.2}$ на 200 МПа, однако при этом в 2 раза снижаются показатели пластичности δ по сравнению со сплавом ЖСЗЛС с 1,5 % тантала (сплав 1).

Сравнительные механические испытания показали, что оптимальное соотношение показателей кратковременной прочности и пластичности достигается при содержании тантала 2,5 % по массе (сплав № 3). Так, предел прочности σ_B образцов сплава ЖСЗЛС с оптимальным содержанием тантала 2,5 % по массе повысился на 240 МПа, т. е. с 750 МПа до 990 МПа по сравнению с образцами сплава ЖСЗЛС без добавок тантала (сплав 0), при этом наблюдалось одновременное повышение показателей пластичности с 4 % до 6,5 % (рис. 1).

На рисунке 2 представлены результаты механических испытаний на длительную прочность при температуре $t = 950$ °С и напряжении $\sigma = 120$ МПа образцов опытных сплавов № 1–№ 5 с различным содержанием

тантала в исследованном диапазоне в сравнении с образцами промышленного сплава ЖСЗЛС без тантала.

Результаты испытаний показали, что при увеличении содержания тантала во всем исследованном диапазоне легирования от 1,5 до 3,5 % по массе в образцах опытных сплавов № 1–№ 5 время до разрушения τ заметно увеличивается.

Зависимость длительной прочности сплава ЖСЗЛС от содержания тантала так же, как и при кратковременных испытаниях, не имеет экстремального характера (рис. 1, 2). Полученные результаты показали, что наиболее высокие значения кратковременной и длительной прочности достигаются при 3,5 % тантала по массе (состав № 5) при достаточно низком уровне пластичности.

Так, в опытном составе № 3, содержащем оптимальное количество тантала 2,5 % по массе, при температуре испытания $t = 950$ °С и напряжении $\sigma = 120$ МПа время до разрушения образцов увеличивается в 5,5–6 раз по сравнению со сплавом ЖСЗЛС без тантала.

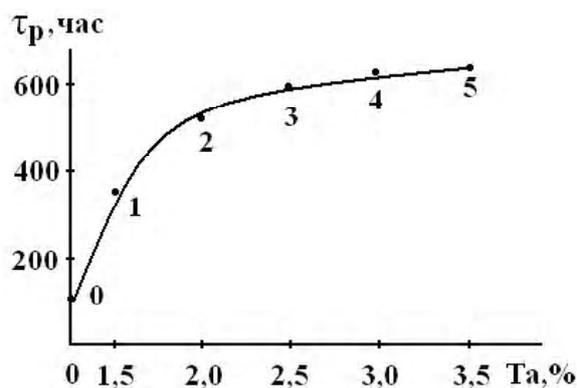


Рис. 2. Влияние легирования танталом сплава ЖСЗЛС на время до разрушения образцов, испытанных при температуре 950 °С и напряжении $\sigma = 120$ МПа:

- 0 – сплав ЖСЗЛС без тантала;
 1 – сплав ЖСЗЛС с 1,5 % тантала;
 2 – сплав ЖСЗЛС с 2,0 % тантала;
 3 – сплав ЖСЗЛС с 2,5 % тантала;
 4 – сплав ЖСЗЛС с 3,0 % тантала;
 5 – сплав ЖСЗЛС с 3,5 % тантала

Следует отметить, что все опытные составы № 1–№ 5, содержащие тантал в исследованном диапазоне, показали более высокую долговечность, чем образцы промышленного сплава ЖСЗЛС без тантала (рис. 2).

Исследование микроструктуры в литом состоянии показало, что легирование сплава ЖСЗЛС танталом способствует формированию глобулярных карбидов как по границам зерен, так и в теле зерен (рис. 3, б, в).

После термической обработки карбидные частицы глобулярной и сферической морфологии располагаются преимущественно в теле зерен (рис. 3, д, е).

Подобно титану, ниобию и гафнию, тантал является γ' -образующим элементом и частично замещает алюминий в основной упрочняющей γ' -фазе.

Металлографические исследования показали, что в структуре опытных сплавов № 1–№ 5, легированных разным количеством тантала, наряду с мелкодисперсными частицами γ' -фазы наблюдаются более крупные первичные выделения γ' -фазы, образующиеся при кристаллизации в межосных участках дендритов, что говорит об их эвтектическом происхождении. Поэтому тантал относится к числу наиболее сильно ликвирующих элементов в жаропрочных никелевых сплавах.

Исследование микроструктуры показало, что легирование сплава ЖСЗЛС оптимальным количеством тантала 2,5 % по массе способствует благоприятному выделению глобулярных карбидов как по границам зерен, так и в теле зерен (рис. 3, б).

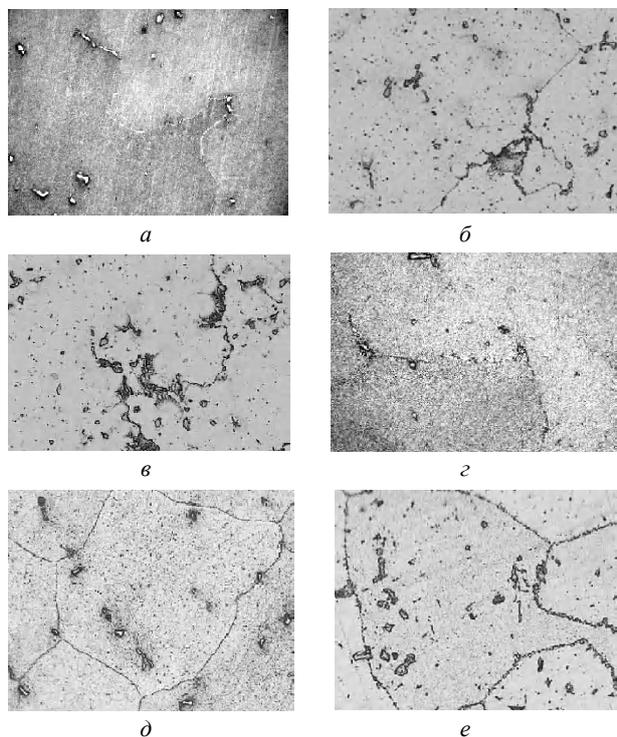


Рис. 3. Микроструктура сплава ЖСЗЛС, легированного танталом в литом состоянии (а–в) и после термической обработки (г–д) $\times 200$:

а, г – сплав ЖСЗЛС без тантала (состав 0);

б, д – сплав ЖСЗЛС с 2,5 % тантала (состав № 3);

в, е – сплав ЖСЗЛС с 3,5 % тантала (состав № 5)

После термической обработки карбидные частицы глобулярной и сферической морфологии располагаются преимущественно в теле зерен (рис. 3, д).

Увеличение содержания тантала до 3,5 % по массе способствует более заметному увеличению размеров карбидных частиц по сравнению со структурой промышленного сплава ЖСЗЛС без тантала (рис. 3, а, г). При этом с повышением содержания тантала до 3,5 % по массе в литой структуре сплава ЖСЗЛС было выявлено значительное количество более крупных частиц карбидной фазы неправильной формы (рис. 3, в).

После термической обработки в структуре наблюдаются отдельно расположенные группы карбидных частиц сферической и глыбообразной формы, которые несколько уменьшились в размерах по сравнению со структурой в литом состоянии (рис. 3, е).

Металлографические исследования показали, что повышение содержания тантала в сплаве ЖСЗЛС до 3,5 % по массе приводит к заметному увеличению в структуре количества эвтектических выделений $\gamma-\gamma'$ и огрублению ее морфологии по сравнению со структурой промышленного сплава ЖСЗЛС без тантала (рис. 3 а, г).

В литой структуре эвтектические выделения $\gamma-\gamma'$ имеют форму конгломератов, которые преимущественно выделяются по границам зерен (рис. 3, в).

Термическая обработка приводит к некоторому уменьшению размеров выделений эвтектики $\gamma-\gamma'$ (рис. 3, е). В целом, после термической обработки структура исследованных сплавов отличается большей структурной однородностью по сравнению с литым состоянием за счет частичного растворения эвтектических выделений $\gamma-\gamma'$ в γ -твердом растворе.

После испытаний образцов на длительную прочность металлографическими исследованиями было установлено, что в структуре сплава ЖСЗЛС с добавкой тантала в количестве 3,5 % (состав № 5) разрушение происходит как по границам зерен и границам эвтектических выделений (рис. 4, а), так и по внутренним порам (рис. 4, б).

Исследования показали, что после механических испытаний в структуре образцов сплава ЖСЗЛС с содержанием тантала до 3,5 % по массе (сплав № 5) из-за большей структурной неоднородности огрубляются границы фаз, что негативно повлияло как на характеристики кратковременной и длительной прочности, так и пластичности (рис. 1, 2).

Металлографический анализ и результаты механических испытаний показали, что для многокомпонентной системы легирования сплава ЖСЗЛС оптимальным содержанием тантала является 2,5 % по массе (состав № 3), при котором достигаются наиболее оптимальные суммарные показатели прочности и пластичности, а также структурные параметры.

Таким образом, оптимальное легирование танталом сплава ЖСЗЛС находится в пределах 2,0–3,0 % по массе, что наиболее эффективно способствует по-

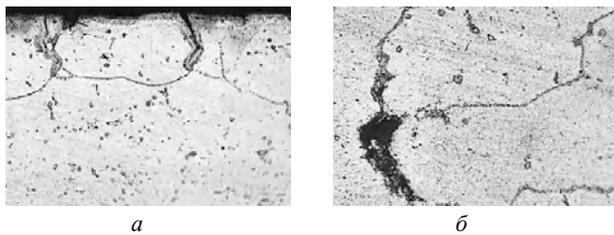


Рис. 4. Процесс разрушения образцов сплава ЖСЗЛС, легированного танталом в количестве 3,5 % по массе, испытанных на длительную прочность при температуре $t = 950\text{ }^{\circ}\text{C}$ и напряжении $\sigma = 120\text{ МПа}$ $\times 200$:

a – поверхностные трещины по границам зерен и эвтектики;
б – внутренние трещины по границам поры в зоне эвтектики

вышению прочностных характеристик. При этом положительное влияние легирования танталом сплава ЖСЗЛС заключается в дополнительном упрочнении как γ - твердого раствора, так и основной γ' - фазы, а также в повышении термодинамической стабильности фаз, особенно карбидной фазы и эвтектики γ - γ' , располагающихся преимущественно по границам зерен.

Выводы

1. Оптимальные суммарные прочностные и пластические характеристики в сплаве ЖСЗЛС достигаются при легировании танталом в пределах 2,0–3,0 % по массе. Дальнейшее повышение содержания тантала приводит к незначительному росту прочностных характеристик при заметном снижении уровня пластичности.

2. Оптимальное содержание в сплаве ЖСЗЛС тантала в количестве 2,5 % по массе (состав № 3) способствует повышению термической стабильности фаз и замедлению диффузионных процессов как по границам зерен, так и в теле зерен, что в целом положительно влияет на структурную стабильность сплава и обеспечивает повышение уровня жаропрочности.

3. Повышение содержания тантала до 3,5 % по массе в сплаве ЖСЗЛС приводит к общему урубле-

нию структуры и заметному снижению показателей пластичности. В структуре увеличивается общее количество эвтектических выделений γ - γ' , что повышает структурную неоднородность по сравнению со структурами образцов сплава ЖСЗЛС с 2,5 % тантала по массе (сплав № 3) и промышленного сплава ЖСЗЛС без тантала.

Список литературы

1. Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С. Т. Кишкина : науч.-техн. сб. : к 100-летию со дня рождения С. Т. Кишкина [Текст] / Под общ. ред. Е. Н. Каблова. – М. : Наука, 2006. – 272 с.
2. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия) [Текст] / Е. Н. Каблов; Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, Государственный научный центр Российской Федерации. – М. : МИСИС, 2001. – 632 с.
3. Каблов Е. Н. Перспективы применения литейных жаропрочных сплавов для производства турбинных лопаток ГТД [Текст] / Е. Н. Каблов, С. Т. Кишкин // Газотурбинные технологии. – 2002. – Январь-февраль. – С. 34–37.
4. Симс Ч. Т. Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок [Текст] / Ч. Т. Симс, Н. С. Столофф, У. К. Хагель ; пер. с англ. под ред. Р. Е. Шалина. – М. : Металлургия, 1995. – Кн. 1, 2. – 384 с.
5. Жаропрочные сплавы для газовых турбин. Материалы международной конференции [Текст] / [Д. Котсорадис, П. Феликс, Х. Фишмайстер и др.]; пер. с англ. под ред. Р. Е. Шалина. – М. : Металлургия, 1981. – 480 с.
6. Жаропрочность литейных никелевых сплавов и защита их от окисления [Текст] / [Б. Е. Патон, Г. Б. Строганов, С. Т. Кишкин и др.]. – К. : Наук. думка, 1987. – 256 с.
7. Булова Н. Н. Структурные особенности никелевых сплавов, легированных танталом [Текст] / Н. Н. Булова, С. Б. Масленков // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1979. – № 5. – С. 19–22.
8. Каблов Е. Н. Жаропрочность никелевых сплавов [Текст] / Е. Н. Каблов, Е. Р. Голубовский. – М. : Машиностроение, 1998. – 464 с.

Одержано 01.06.2011

Коваль А.Д., Андриєнко А.Г., Гайдук С.В., Кононов В.В. Вплив танталу на структуру і характеристики міцності ливарного жароміцного корозійностійкого нікелевого сплаву ЖСЗЛС

Досліджений вплив танталу в діапазоні легування від 1,5 до 3,5 % за масою на структуру і механічні властивості ливарного жароміцного корозійностійкого нікелевого сплаву ЖСЗЛС. Наведені результати металографічних досліджень і механічних випробувань дослідних складів порівняно з промисловим сплавом ЖСЗЛС без добавок танталу.

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

Koval A., Andrienko A., Gayduk S., Kononov V. Influence of tantalum on structure and strength properties of cast corrosion-resistant nickel-base superalloy ЖСЗЛС

Tantalum influence on structure and mechanical properties of cast corrosion-resistant nickel-base superalloy ЖСЗЛС has been investigated within alloying range from 1,5 to 3,5 % by mass. Metallographic and mechanical testing results for experimental compositions have been represented in comparison with commercial superalloy ЖСЗЛС free of tantalum.

Key words: cast corrosion-resistant nickel-base superalloys; multicomponent alloying system; heat-treatment; structure; phase morphology; short-term and long-term strength.