

II КОНСТРУКЦІЙНІ І ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

УДК 669.245.018.044:620.193.53

Канд. техн. наук С. В. Гайдук, канд. техн. наук В. В. Кононов

Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГАФНИЯ НА ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ЛИТЕЙНОГО ЖАРОПРОЧНОГО КОРРОЗИОННОСТОЙКОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ПАССИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

С помощью компьютерного моделирования, основанного на расчетном методе CALPHAD, оценено влияние гафния в исследованном диапазоне легирования от 0,5 до 5,0 % (по массе) на фазовый состав многокомпонентной никелевой системы Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C. Представлены результаты расчетов фазового состава опытных сплавов с добавками гафния в сравнении с исходным составом без гафния.

Ключевые слова: литейные жаропрочные коррозионностойкие никелевые сплавы, система легирования, фазовый состав, γ -твердый раствор, γ' -фаза, карбиды, температуры растворения и выделения фаз.

Введение

В настоящее время по теории легирования многокомпонентных никелевых сплавов опубликовано достаточно много информации [1–8]. Вместе с тем, недостаточно полно освещены вопросы, связанные с оценкой влияния отдельных легирующих элементов, например гафния, на качественный и количественный фазовый состав таких сплавов. Поэтому, данная область исследований является актуальной для развития и совершенствования теории легирования как при разработке новых жаропрочных материалов, так и модернизации составов на основе известных промышленных никелевых сплавов с целью улучшения комплекса их служебных характеристик для конкретных технических условий эксплуатации.

В последнее время для изучения данных вопросов широко применяются методы компьютерного моделирования процессов кристаллизации (охлаждения) или нагрева многокомпонентных систем, основанные на расчетном методе CALPHAD.

Компьютерное моделирование данных процессов позволяет проводить достоверные прогнозирующие расчеты по оценке влияния конкретного легирующего элемента, например гафния, на качественный и количественный фазовый состав многокомпонентной никелевой системы с постоянным химическим составом, в сравнении с исходным составом без добавок гафния.

Эффективность расчетного метода CALPHAD заключается в достаточно быстром получении необходимого объема достоверной информации для проведения прогнозирующих термофизических расчетов, ос-

нованных на надежных физических принципах, которые имеют ряд значительных преимуществ по сравнению с результатами, получаемыми статистическими методами.

Постановка задачи

Целью настоящей работы является сравнительная оценка влияния гафния на качественный и количественный фазовый состав многокомпонентной системы Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C (сплав ЖСЗЛС, средний уровень легирования) с помощью расчетного метода CALPHAD [9].

Расчеты, полученные методом компьютерного моделирования, позволяют без многочисленных промежуточных экспериментальных плавок рассчитать температуры выделения и растворения фаз, тип, количество и состав фаз, оценить влияние гафния в исследуемом диапазоне легирования (0,5–5,0 %) на распределение легирующих элементов в составе фаз, а также с высокой степенью вероятности прогнозировать фазовый состав, который окончательно сформирует структуру после кристаллизации в опытных составах.

Анализ результатов

В таблицах 1 и 2 приведены данные, рассчитанные методом CALPHAD, по оценке влияния гафния в исследованном диапазоне легирования (0,5–5,0 %) на температуры выделения, тип и количество фаз, которые с наибольшей вероятностью могут сформироваться в структуре после кристаллизации сплава системы Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C.

Таблица 1 – Влияние гафния на тип и количество выделившихся фаз в сплаве системы Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C, рассчитанные методом CALPHAD для температуры 20 °С

Тип и объемная доля выделившихся фаз, % (масс.)					
Hf, %	γ	γ'	MC	$M_{23}C_6$	M_3B_2
0,0	59,33	38,20	0,53	1,76	0,18
0,5	58,45	39,07	0,82	1,48	0,18
1,0	58,31	39,21	1,11	1,19	0,18
1,5	58,29	39,23	1,41	0,89	0,18
2,0	58,30	39,22	1,51	0,79	0,18
2,5	58,31	39,21	1,54	0,76	0,18
3,0	58,33	39,19	1,56	0,74	0,18
3,5	58,31	39,21	1,57	0,73	0,18
4,0	58,24	39,28	1,57	0,73	0,18
4,5	58,11	39,41	1,57	0,73	0,18
5,0	57,98	39,54	1,58	0,72	0,18

Таблица 2 – Влияние гафния на температуры выделения фаз в системе Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C, рассчитанные методом CALPHAD

Температуры растворения и выделения фаз, °С					
Hf, %	γ	γ'	MC	$M_{23}C_6$	M_3B_2
0,0	1293,76	1055,35	1330,68	1042,87	1198,41
0,5	1283,50	1065,55	1323,52	1057,43	1192,00
1,0	1276,16	1070,25	1318,74	1050,00	1186,90
1,5	1270,79	1077,75	1319,01	956,09	1183,20
2,0	1244,55	1088,74	1318,64	813,89	1177,94
2,5	1208,09	1101,02	1317,92	726,71	1171,81
3,0	1173,76	1113,53	1317,03	727,58	1165,61
3,5	1129,29	1122,12	1316,05	728,92	1129,81
4,0	1126,95	1127,82	1315,01	730,35	1127,82
4,5	1125,89	1126,89	1313,95	731,77	1125,89
5,0	1124,19	1126,13	1312,87	733,14	1124,19

Результаты, приведенные в таблицах 1 и 2, показывают, что с повышением содержания гафния в исследованном диапазоне (0,5–5,0 %) в сплаве системы Ni-16Cr-5Co-3Al-3Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C количество основной упрочняющей γ' - фазы остается постоянным. Вместе с тем, при содержании гафния 5,0 % по массе наблюдается повышение ее температуры полного растворения в γ - твердом растворе более, чем на 70 °С по сравнению с исходным состоянием без гафния.

Установлено, что суммарное количество карбидной фазы практически не изменяется, однако увеличивается объемная доля карбидов типа MC почти в 3 раза, с 0,53 % в составе без гафния до 1,58 % в составе, содер-

жащем гафний 5,0 % (по массе). При этом в 2,5 раза уменьшается объемная доля карбидов типа $M_{23}C_6$.

Расчеты показывают, что с увеличением содержания гафния в исследованной многокомпонентной никелевой системе происходит изменение механизма карбидного упрочнения в сторону образования большего количества карбидов типа MC. При этом происходит торможение процесса образования менее термодинамически стойких карбидов типа $M_{23}C_6$ и выделение большего количества более благоприятных и термически стабильных карбидов типа MC (табл. 1).

Из табл. 2 и рис. 1 видно, что с повышением содержания гафния в исследованной многокомпонентной никелевой системе температуры выделения карбидов

типа MC и боридов типа M_3B_2 несколько снижаются, но остаются достаточно стабильными. При этом наблюдается заметное снижение температуры выделения карбидов типа $M_{23}C_6$ при содержании гафния более 1,0 % по массе. При этом расчеты также показывают, что в фазовом составе исследованных сплавов вероятно выделение незначительного количества (0,18 %) боридов типа M_3B_2 , температура выделения которых с увеличением содержания гафния до 5,0 % по массе снижается более, чем на 74 °C по сравнению с исходным составом без гафния. За счет влияния гафния на переохлаждение расплава в процессе кристаллизации температурные условия протекания теплофизических процессов выделения и растворения фаз могут изменяться, и вероятно, процессы образования карбидов типа $M_{23}C_6$ и боридов типа M_3B_2 происходят при более низких температурах.

В табл. 3–6 и на рис. 2–4 представлены результаты расчетов наиболее вероятного химического состава фаз после кристаллизации многокомпонентной системы Ni-16Cr-5Co-3Al-3Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C без гафния и с гафнием в исследованном диапазоне легирования (0,5–5,0 %).

Таблица 3 – Расчетный химический состав γ - твердого раствора сплава системы Ni-16Cr-5Co-3Al-3Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C без гафния и с гафнием

Hf, % (по массе)	Химический состав γ - твердого раствора при 20 °C, % (масс.)									
	Ni	Cr	Co	Al	Ti	Mo	W	Hf	C	B/Zr
0,0	62,08	23,13	7,43	0,51	–	3,89	2,96	–	–	–/–
0,5	61,73	23,54	7,57	0,50	–	3,79	2,87	–	–	–/–
1,0	61,34	23,98	7,73	0,50	–	3,69	2,76	–	–	–/–
1,5	60,94	24,44	7,90	0,50	–	3,58	2,64	–	–	–/–
2,0	60,49	24,93	8,08	0,50	–	3,47	2,53	–	–	–/–
2,5	60,03	25,43	8,26	0,50	–	3,37	2,41	–	–	–/–
3,0	59,53	25,96	8,45	0,50	–	3,26	2,30	–	–	–/–
3,5	59,16	26,25	8,66	0,50	–	3,20	2,23	–	–	–/–
4,0	58,89	26,28	8,86	0,50	–	3,20	2,24	–	–	–/–
4,5	58,84	26,27	8,95	0,50	–	3,15	2,29	–	–	–/–
5,0	58,70	26,26	9,05	0,50	–	3,11	2,34	–	–	–/–

Сравнительные результаты табл. 3 и рис. 2 показали, что с повышением содержания гафния в исследованном диапазоне (0,5–5,0 %) в сплаве системы Ni-16Cr-5Co-3Al-3Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C химический состав γ - твердого раствора практически не изменяется и остается стабильным. Так как гафний не является твердорастворным упрочнителем, то он не входит в состав γ - твердого раствора.

Результаты расчетов по распределению легирующих элементов в γ - твердом растворе на основе никеля (Ni) показали, что в его составе присутствуют: хром (23–26 %), кобальт (7–9 %), которые по своему содер-

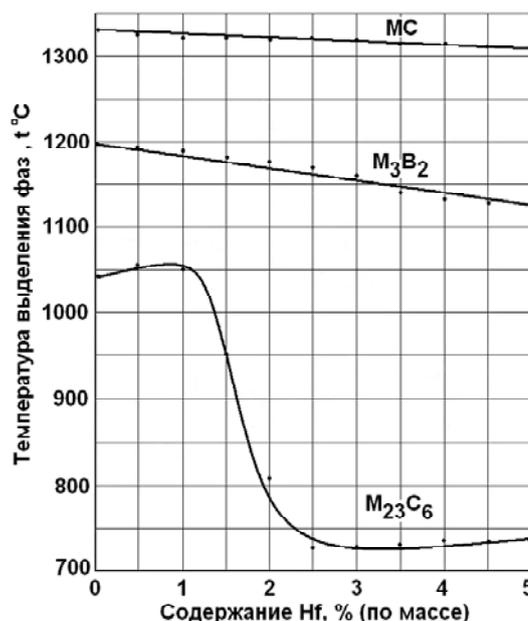


Рис. 1. Влияние гафния на температуры выделения карбидов и боридов в сплаве системы Ni-16Cr-5Co-3Al-3Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C

жанию в почти в 1,5–2 раза выше их содержания в сплаве (Cr – 14,5 %) и (Co – 4,5 %) соответственно. Содержание молибдена (Mo) и вольфрама (W) в твердом растворе приблизительно такое же или незначительно ниже, чем их содержание в составе сплава среднего уровня легирования (табл. 3).

Анализ результатов таблицы 4 и рисунка 3 показал, что с повышением содержания гафния в исследованном диапазоне (0,5–5,0 %) в сплаве системы Ni-16Cr-5Co-3Al-3Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C химический состав γ' - фазы изменяется.

Таблица 4 – Расчетный химический состав γ' - фазы

Hf,% (по массе)	Химический состав γ' - фазы при 20 °С, % (масс.)									
	Ni	Cr	Co	Al	Ti	Mo	W	Hf	C	B/Zr
0,0	78,29	2,67	1,90	6,32	6,97	0,60	3,25	–	–	–/–
0,5	77,68	2,62	1,90	6,21	6,82	0,55	3,05	1,17	–	–/–
1,0	77,53	2,63	1,93	6,21	6,81	0,52	2,97	1,40	–	–/–
1,5	77,49	2,65	1,97	6,23	6,81	0,50	2,90	1,45	–	–/–
2,0	77,47	2,67	2,01	6,24	6,82	0,48	2,83	1,48	–	–/–
2,5	77,45	2,69	2,05	6,26	6,83	0,45	2,76	1,51	–	–/–
3,0	77,43	2,70	2,09	6,28	6,83	0,43	2,70	1,54	–	–/–
3,5	77,38	2,71	2,14	6,30	6,84	0,42	2,65	1,56	–	–/–
4,0	77,31	2,70	2,20	6,31	6,83	0,42	2,66	1,57	–	–/–
4,5	77,26	2,70	2,22	6,31	6,81	0,42	2,71	1,57	–	–/–
5,0	77,22	2,69	2,24	6,31	6,79	0,41	2,77	1,57	–	–/–

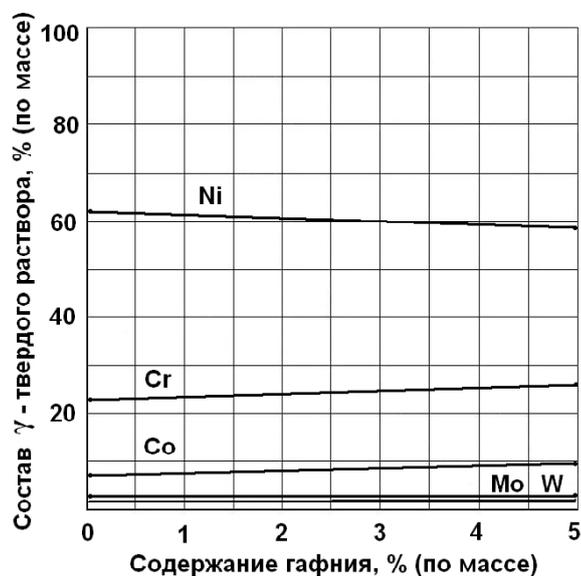


Рис. 2. Влияние гафния на распределение элементов в составе γ - твердого раствора сплава системы Ni-16Cr-5Co-3Al-3Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C

Расчеты показывают, что гафний, являясь γ' - образующим элементом, входит в состав γ' - фазы. При этом следует отметить, что не влияя на общее количество выделяющейся γ' - фазы в опытных составах (см. табл. 1), гафний заметно изменяет ее химический состав (табл. 4), тем самым улучшая термическую стабильность за счет повышения температуры полного растворения в γ - твердом растворе (табл. 2).

Так, с повышением содержания гафния (Hf) до 1,0 % по массе повышается его количество в составе γ' - фазы по сравнению с исходным составом без гафния. Дальнейшее увеличение содержания гафния в исследованном диапазоне легирования не приводит к заметному

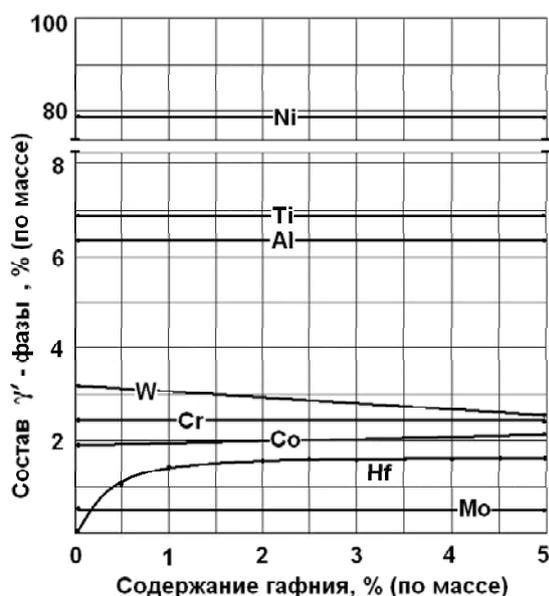


Рис. 3. Влияние содержания гафния на распределение элементов в составе γ' - фазы сплава системы Ni-16Cr-5Co-3Al-3Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C

повышению концентрации гафния в составе γ' - фазы. При этом количество никеля, хрома, алюминия, титана и молибдена (Ni, Cr, Al, Ti, Mo) остается стабильным, в то время как несколько повышается количество кобальта (Co) при постепенном снижении концентрации вольфрама (W).

Расчеты по распределению легирующих элементов в химическом составе γ' - фазе на основе интерметаллида Ni₃Al показали, что содержание алюминия (Al ~ 6,3%) и титана (Ti ~ 6,9%), основных γ' - образующих элементов, приблизительно в 2 раза выше, чем их содержание в составе сплава среднего уровня легирования (Al ~ 3,0 %) и (Ti ~ 3,0 %) соответственно. Наряду

Таблиця 5 – Расчетный химический состав карбидов типа МС

Hf, % (по массе)	Химический состав карбидов типа МС при 20 °С, % (масс.)									
	Ni	Cr	Co	Al	Ti	Mo	W	Hf	Zr	C
0,0	–	0,87	–	–	59,24	0,88	22,46	–	0,79	15,76
0,5	–	0,87	–	–	26,72	0,78	8,85	52,14	0,45	10,19
1,0	–	0,33	–	–	7,72	0,81	2,01	81,36	0,53	7,24
1,5	–	–	–	–	1,94	0,24	0,41	90,43	0,70	6,21
2,0	–	–	–	–	0,78	–	0,16	92,55	0,47	5,92
2,5	–	–	–	–	0,56	–	0,10	93,16	0,36	5,82
3,0	–	–	–	–	0,50	–	–	93,45	0,29	5,76
3,5	–	–	–	–	0,42	–	–	93,61	0,25	5,72
4,0	–	–	–	–	0,38	–	–	93,70	0,21	5,71
4,5	–	–	–	–	0,38	–	–	93,74	0,18	5,70
5,0	–	–	–	–	0,38	–	–	93,77	0,16	5,69

с кобальтом, в состав γ' - фазы входит вольфрам, содержание которого несколько ниже, чем в исходном составе без гафния. Установлено, что при содержании гафния 0,5 % по массе концентрация его в составе γ' - фазы заметно повышается и составляет 1,17 %. При дальнейшем увеличении содержания гафния в исследованном диапазоне (0,5–5,0 %) его концентрация в составе γ' - фазы незначительно повышается до 1,57 % (см. табл. 4, рис. 3).

Анализ результатов расчетов, приведенных в табл. 5 и на рис. 4 показал, что с повышением содержания гафния в исследованном диапазоне (0,5–5,0 %) в сплаве системы Ni-16Cr-5Co-3Al-3Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C химический состав карбидов типа МС существенно изменяется.

Расчеты показали, что гафний является мощным карбидообразующим элементом, так как составляет основу карбидов типа МС. При этом следует отметить, что влияя на объемную долю карбидов данного типа (см. табл. 1), гафний существенно изменяет их химический состав (табл. 5) и улучшает морфологию, что положительно влияет на показатели прочности и пластичности [10, 11].

Так, расчеты состава карбидов типа МС показали, что в их состав входят титан и вольфрам, концентрация которых заметно снижается при содержании гафния 0,5 % по массе. Дальнейшее увеличение содержания гафния в исследованном диапазоне легирования (1,0–5,0 %) приводит к постепенному снижению концентраций титана, вольфрама, а также углерода в составе карбидов типа МС, при этом гафний является основой карбидов данного типа.

Следует отметить, что с повышением содержания гафния в исследованном диапазоне легирования (0,5–5,0 %) его концентрация в составе карбидов типа МС на порядок выше, чем его содержание в опытных составах,

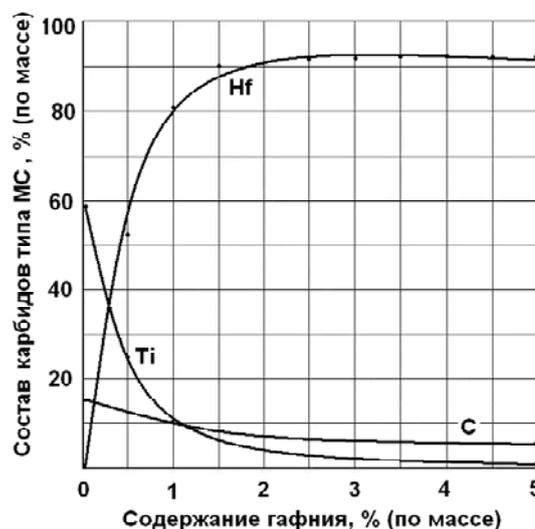


Рис 4. Влияние гафния на распределение элементов в составе карбидов типа МС в сплаве системы Ni-16Cr-5Co-3Al-3Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C

что подтверждает его мощную карбидообразующую способность к формированию карбидов типа МС.

Анализ результатов расчетов, представленных в таблице 6, показал, что с повышением содержания гафния в исследованном диапазоне (0,5–5,0 %) в сплаве системы Ni-16Cr-5Co-3Al-3Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C химический состав карбидов типа $M_{23}C_6$ не изменяется и остается стабильным. Гафний не входит в состав карбидов данного типа, хотя является мощным карбидообразующим элементом.

При этом следует отметить, что снижая объемную долю карбидов типа $M_{23}C_6$ и температуру их выделения (см. табл. 1, рис. 1), гафний не влияет на их химический состав (табл. 6). Так, при легировании гафнием в исследованном диапазоне (0,5–5,0%) химический состав кар-

Таблица 6 – Расчетный химический состав карбидов типа $M_{23}C_6$

Hf, % (по массе)	Химический состав карбидов типа $M_{23}C_6$ при 20 ⁰ C, % (масс.)									
	Ni	Cr	Co	Al	Ti	Mo	W	Hf	C	B/Zr
0,0	4,44	69,31	1,02	–	–	19,93	0,18	–	5,12	–/–
0,5	4,26	69,53	1,00	–	–	19,90	0,19	–	5,12	–/–
1,0	4,07	69,75	0,98	–	–	19,87	0,20	–	5,13	–/–
1,5	3,88	69,99	0,96	–	–	19,83	0,21	–	5,13	–/–
2,0	3,71	70,22	0,93	–	–	19,79	0,22	–	5,13	–/–
2,5	3,54	70,45	0,91	–	–	19,74	0,23	–	5,13	–/–
3,0	3,36	70,69	0,89	–	–	19,69	0,24	–	5,13	–/–
3,5	3,27	70,81	0,89	–	–	19,66	0,24	–	5,13	–/–
4,0	3,26	70,80	0,91	–	–	19,66	0,24	–	5,13	–/–
4,5	3,25	70,80	0,92	–	–	19,65	0,25	–	5,13	–/–
5,0	3,24	70,81	0,93	–	–	19,63	0,26	–	5,13	–/–

бидов типа $M_{23}C_6$ остается стабильным, при этом его основу составляют хром (~ 70 %) и молибден (~ 20 %), что говорит о сильной карбидообразующей способности хрома к формированию карбидов данного типа. При этом количество никеля, кобальта, вольфрама и углерода (Ni, Co, W, C) практически не изменяется.

Как отмечалось выше, в фазовом составе исследованных опытных сплавов возможно выделение небольшого количества (0,18 %) боридов типа M_3B_2 расчетного состава, которые содержат хром в пределах (19,95–20,15 %), молибден (71,60–71,34%) и бор (8,16–8,17 %).

Результаты приведенных расчетов согласуются с экспериментальными данными, полученными на других промышленных жаропрочных никелевых сплавах [2–4, 8, 10, 11].

Выводы

1. С повышением содержания гафния в исследованном диапазоне (0,5–5,0 %) в сплаве системы Ni-16Cr-5Co-3Al-3Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C количество γ' - фазы остается постоянным, при этом гафний изменяет ее химический состав, улучшая термическую стабильность за счет повышения температуры полного растворения в γ - твердом растворе более, чем на 70 °С.

2. Суммарное количество карбидной фазы в исследованной многокомпонентной никелевой системе практически не изменяется при легировании гафнием в исследованном диапазоне, однако за счет увеличения объемной доли более термически стойких карбидов типа MC уменьшается количество менее стойких карбидов типа $M_{23}C_6$.

3. С повышением содержания гафния в исследованном диапазоне легирования (0,5–5,0 %) его концентрация в составе карбидов типа MC на порядок выше, чем в составе сплава, что подтверждает мощную карбидообразующую способность гафния к образованию на своей основе карбидов типа MC.

4. При легировании гафнием в исследованном диапазоне (0,5–5,0 %) химический состав карбидов типа $M_{23}C_6$ не изменяется. Гафний не входит в их состав, а основу карбидов данного типа составляет хром, что говорит о его сильной карбидообразующей способности к формированию карбидов данного типа.

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. Кишкин С. Т. Литейные жаропрочные сплавы на никелевой основе / Кишкин С. Т., Строганов Г. Б., Логунов А. В. – М. : Машиностроение, 1987. – 116 с.
3. 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.
4. Симс Ч. Т. Суперсплавы II. Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / 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. Каблов Е. Н. Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С. Т. Кишкина : науч.-техн. сб. : к 100-летию со дня рождения С. Т. Кишкина / под общ. ред. Е. Н. Каблова. – М. : Наука, 2006. – 272 с.
6. Каблов Е. Н. Жаропрочность никелевых сплавов / Е. Н. Каблов, Е. Р. Голубовский. – М. : Машиностроение, 1998. – 464 с.
7. Каблов Е. Н. Перспективы применения литейных жаропрочных сплавов для производства турбинных лопаток ГТД / Е. Н. Каблов, С. Т. Кишкин // Газотурбинные технологии. – 2002. – №1–2. – С. 34–37.
8. 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.

9. Saunders N. The Application of CALPHAD Calculations to Ni-Based Superalloys / N. Saunders, M. Fahrmann, C. J. Small // In «Superalloys 2000» eds. K. A. Green, T. M. Pollock and R. D. Kissinger. – TMS. – Warrendale. – 2000. – 803 p.
10. Масленков С. Б. Влияние гафния на структуру и свойства никелевых сплавов / С. Б. Масленков, Н. Н. Бурова, В. В. Хангулов // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 1980. – № 4. – С. 45–46.
11. Исследование влияния гафния на структуру и свойства литейного жаропрочного коррозионностойкого никелевого сплава / А. Д. Коваль, А. Г. Андриенко, С. В. Гайдук, В. В. Кононов // *Вестник двигателестроения.* – 2012. – № 1. – С. 196–200.

Одержано 11.04.2014

Гайдук С.В., Кононов В.В. Дослідження впливу гафнію на фазовий склад ливарного жароміцного корозійностійкого нікелевого сплаву із застосуванням методу пасивного експерименту

За допомогою комп'ютерного моделювання, що базується на розрахунковому методі CALPHAD, оцінений вплив гафнію в дослідженому діапазоні легування від 0,5 до 5,0 % (за масою) на фазовий склад багатоконпонентної нікелевої системи Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C. Представлені результати розрахунків фазового складу дослідних сплавів з добавками гафнію порівняно з вихідним складом без гафнію.

Ключові слова: ливарні жароміцні корозійностійкі нікелеві сплави, система легування, фазовий склад, γ -твердий розчин, γ' -фаза, карбіди, температури розчинення і виділення фаз.

Gayduk S., Kononov V. Investigation of hafnium influence on phase composition high-temperature corrosion-resistant cast nickel alloy using passive experimental method

By means of computer modeling based on CALPHAD calculating method hafnium influence within alloying range from 0,5 to 5,0 % (by mass) on phase composition of multi-component nickel system Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C has been estimated. The calculated results of experimental alloy phase compositions with hafnium additions have been represented in comparison with initial composition, free of hafnium.

Key words: high-temperature corrosion-resistant cast nickel alloys, alloying system, phase composition, γ -solid solution, γ' -phase, carbides, temperatures of phase solution and precipitation.
