

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

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПАССИВНОГО И АКТИВНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА К ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ ГАФНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО НИКЕЛЕВОГО СПЛАВА

Методами пассивного и активного эксперимента оценено влияние гафния на характеристические температуры многокомпонентной системы Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C. Представлены результаты расчетов методом CALPHAD в сравнении с экспериментальными данными, полученными методом дифференциального термического анализа (ДТА) для опытных составов с добавками гафния в исследованном диапазоне легирования и исходным составом без гафния.

Ключевые слова: литейные жаропрочные коррозионностойкие никелевые сплавы, система легирования, характеристические температуры, ликвидус, солидус, интервал кристаллизации.

Введение

Известно [1–6], что жаропрочность многокомпонентных сплавов на никелевой основе сильно зависит от количества и состава упрочняющей γ' -фазы, ее дисперсности, морфологии и характера сопряжения фазовой границы (матрица – упрочняющая фаза), легированности твердого раствора. Работоспособность материалов данного класса в значительной мере определяется термодинамической стабильностью γ' -фазы, температурой (конца) полного растворения ($t_{П.Р. \gamma'}$), а также другими характеристическими температурами сплава.

Во многих исследовательских работах показано, что введение оптимальных добавок гафния приводит к одновременному повышению как прочностных характеристик, так и показателей пластичности. При этом отмечается, что положительное влияние гафния заключается не только в измельчении дендритной структуры, но и в благоприятном изменении морфологии карбидной фазы, повышении термической стабильности основной упрочняющей γ' -фазы при замедлении скорости диффузионных процессов [4–8].

В работах [1–3, 8, 9] показано, что введение гафния повышает пластичность сплавов систем Ni-Cr-Fe и Co-Ni-Cr, а также благоприятно влияет на комплекс служебных характеристик жаропрочных никелевых сплавов. Так, в промышленное производство США были внедрены модернизированные составы, легированные гафнием: сплав В-1900+Hf под маркой ММ-007; сплав

Инко 713С+Hf под маркой ММ-004.

В исследованиях [7–9] отмечается, что в составе многокомпонентных жаропрочных коррозионностойких никелевых сплавах возможно снижение содержания хрома при одновременном введении оптимальных добавок гафния, что способствует повышению структурной стабильности, а также прочностных характеристик, при этом не снижаются параметры поверхностной стабильности при длительном воздействии высоких температур в агрессивных средах.

В настоящее время по теории легирования многокомпонентных никелевых систем достаточно много информации [10–14], однако, недостаточно освещены вопросы, связанные с оценкой влияния легирующих элементов на характеристические температуры растворения или выделения отдельных фаз в таких системах. Поэтому, данная область исследований важна и актуальна для развития теории легирования по разработке сплавов нового поколения, а также по совершенствованию составов известных промышленных марок литейных жаропрочных коррозионностойких никелевых сплавов с целью улучшения комплекса их служебных характеристик для конкретных технических условий эксплуатации.

Постановка задачи

Целью настоящей работы является сравнительная оценка влияния гафния на характеристические температуры выделения и растворения фаз в многокомпонентной системе Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C (сплав ЖСЗЛС, средний уровень легирования) с помо-

шью пассивного эксперимента расчетным методом CALPHAD [15] и активного эксперимента методом дифференциального термического анализа (ДТА) [16, 19].

Метод пассивного эксперимента заключается в компьютерном моделировании процессов кристаллизации (охлаждения) или нагрева, основанном на расчетном методе CALPHAD. Компьютерное моделирование данных процессов позволяет провести расчеты по оценке влияния гафния на характеристические температуры выделения или растворения отдельных фаз в опытных составах, в сравнении с исходным составом без добавок гафния.

Расчеты характеристических температур проводились индивидуально по каждому исследованному составу при введении гафния (Hf) в фиксированный многокомпонентный состав Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C с концентрационным шагом 0,5 % (по массе) внутри исследуемого диапазона 0,5–5,0 %.

Эффективность метода пассивного эксперимента заключается в получении достоверной информации при проведении прогнозирующих расчетов, основанных на надежных физических принципах и имеет ряд значительных преимуществ по сравнению со статистическими методами.

Расчеты, полученные путем компьютерного моделирования, позволяют без многократных промежуточных экспериментальных плавок определить характеристические температуры выделения или растворения отдельных фаз, а также температурные интервалы фазовых превращений, в зависимости от содержания гафния в исследуемом диапазоне легирования для приведенной выше многокомпонентной системы.

Результаты расчетов, полученные методом CALPHAD сравнивали с данными, полученными экспериментальным методом ДТА, которые в дальнейших исследованиях могут использоваться для расчетного прогнозирования других важных характеристик материала (физических, прочностных, технологических) и т. д.

Анализ результатов

При охлаждении (кристаллизации) или нагреве в многокомпонентных жаропрочных никелевых сплавах протекает ряд фазовых превращений, определяющих фазовый состав и конечную структуру. Химический состав отдельных фаз и структура в целом определяют температурные интервалы протекания основных фазовых превращений при нагреве, к которым относятся растворение частиц γ' - фазы в γ - твердом растворе, растворение или плавление неравновесных эвтектических выделений $\gamma + \gamma'$, плавление

γ - твердого раствора, растворение карбидов.

К негативным структурным изменениям, ведущим к снижению служебных свойств или потере работоспособности, могут приводить неблагоприятные фазовые превращения, протекающие в многокомпонентных сплавах при недостаточно сбалансированном химическом составе. При охлаждении (кристаллизации) из жидкого состояния указанные превращения протекают в обратном порядке [16–18].

Компьютерное моделирование процессов охлаждения (кристаллизации) для конкретного состава осуществлялось от температуры жидкого состояния (1400 °С) до комнатной температуры (20 °С) либо при нагреве в обратном порядке, с температурным шагом 10 °С внутри всего температурного диапазона, при фиксированной расчетной величине содержания гафния. Пошаговое легирование гафнием в исследуемом диапазоне 0,5–5,0 % (по массе) позволяет рассчитать и оценить влияние гафния на характеристические температуры выделения (растворения) фаз, а также температурные интервалы фазовых превращений индивидуально для конкретного опытного состава.

На рисунке 1 и в таблице 1 представлены результаты расчетов, полученные по определению характеристических температур в процессе охлаждения (кристаллизации), а также нагрева исходного состава без гафния и опытных составов с гафнием в исследованном диапазоне.

Данный подход позволил без проведения прямых экспериментов получить зависимость основных характеристических температур от содержания гафния в исследованном диапазоне для конкретной многокомпонентной системы: температуру полного расплавления ликвидус – (t_L); температуру плавления γ - твердого раствора солидус – (t_S); температуру эвтектических $\gamma' + \gamma$ - превращений – ($t_{ЭВТ}$); температурный интервал кристаллизации – (Δt_1); температуру начала растворения основной упрочняющей γ' - фазы) – ($t_{Н.Р.}^{\gamma'}$); температуру полного растворения γ' - фазы – ($t_{П.Р.}^{\gamma'}$); температурный интервал для проведения термической обработки на твердый раствор (гомогенизация) – (Δt_2).

Анализ результатов, представленных на рисунке 1 и в таблице 1 показывает, что с повышением содержания гафния в исследованном диапазоне снижаются характеристические температуры – t_L , t_S , $t_{ЭВТ}$, кроме температур начала растворения $t_{Н.Р.}^{\gamma'}$ и полного растворения $t_{П.Р.}^{\gamma'}$ основной упрочняющей γ' - фазы, которые постепенно повышаются.

Так, температура ликвидус (t_L) при содержании гафния 5,0% по массе снизилась почти на 40 °С; температура солидус (t_S) снизилась почти на 270 °С; температура эвтектических превращений ($t_{ЭВТ}$) снизилась более, чем на 65 °С, по сравнению с аналогичными характеристическими температурами для исходного состава без добавок гафния (см. табл. 1).

При этом, температурный интервал кристаллизации $\Delta t_1 = (t_L - t_S)$ расширился более, чем на 130 °С, что может повлечь за собой после кристаллизации увеличение структурной неоднородности за счет повышения дендритной ликвации. В то же время, температурный интервал для проведения гомогенизирующей термической обработки $\Delta t_2 = (t_{ЭВТ} - t_{П.Р. \gamma'})$ сужается, и при содержании гафния 3,5–4,0% (по массе) и более практически вырождается до отрицательных величин, что говорит о невозможности проведения гомогенизирующей термической обработки на твердый раствор (см. рис. 1, табл. 1).

Расчеты показали, что при повышении содержания гафния до 5,0% (по массе) повысились температуры начала растворения γ' - фазы - $t_{Н.Р. \gamma'}$ и температура полного растворения γ' - фазы - $t_{П.Р. \gamma'}$ на 25 °С и 70 °С соответственно, по сравнению с аналогичными характеристическими температурами исходного состава без добавок гафния.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что наиболее чувствительными характеристическими температурами, ограничивающими верхний предел границы легирования гафнием, являются температуры солидус

t_S и эвтектических превращений – $t_{ЭВТ}$, которые при содержании гафния 1,0 % по массе снижаются на 18 °С (1276,16 °С) и на 4 °С (1186,0 °С) соответственно, по сравнению с исходным составом без добавок гафния (табл. 1).

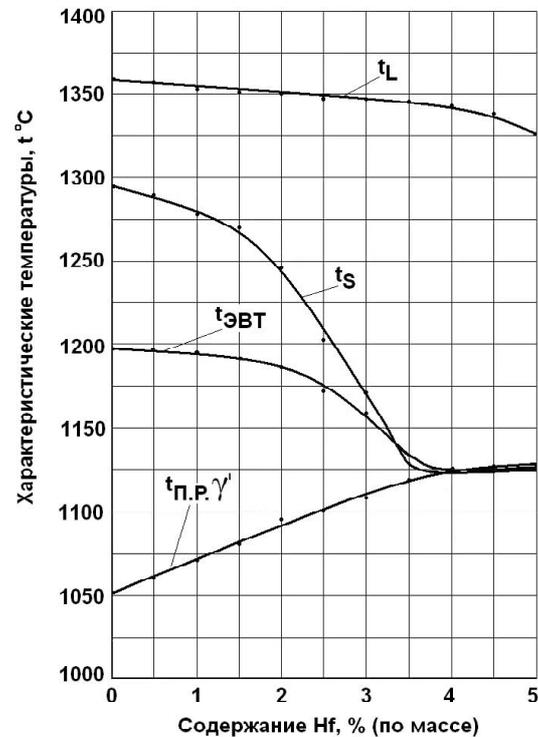


Рис. 1. Зависимости характеристических температур от содержания гафния для системы Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C, полученные расчетным методом CALPHAD

Таблица 1 – Значения характеристических температур для системы Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C, рассчитанные методом CALPHAD

Характеристические температуры, °С							
Hf, %	t_L	t_S	$t_{ЭВТ}$	$t_{Н.Р. \gamma'}$	$t_{П.Р. \gamma'}$	Δt_1	Δt_2
0,0	1365,10	1293,76	1190,00	845,39	1055,35	71,34	134,65
0,5	1361,51	1283,50	1190,00	855,41	1065,55	78,01	124,45
1,0	1357,88	1276,16	1186,00	860,01	1070,25	81,72	115,75
1,5	1354,19	1270,79	1182,00	865,24	1077,75	83,40	104,25
2,0	1350,45	1244,55	1177,94	865,06	1088,74	105,90	89,20
2,5	1346,66	1208,09	1171,81	865,11	1101,02	138,57	70,79
3,0	1342,83	1173,76	1164,56	865,59	1113,53	169,07	51,03
3,5	1340,00	1129,29	1129,29	865,78	1122,12	210,71	7,17
4,0	1335,00	1126,95	1124,95	865,15	1127,82	208,05	-2,87
4,5	1331,01	1125,89	1124,89	865,32	1126,89	205,12	-2,00
5,0	1325,97	1124,19	1124,19	865,85	1126,13	201,78	-1,94

В то же время, при содержании гафния 0,5% (по массе), температура эвтектических превращений $t_{ЭВТ}$ не снижается (1190,0 °С), а температура солидуса t_S снижается незначительно на 10 °С (1186,0 °С), по сравнению с аналогичными характеристическими температурами исходного состава без добавок гафния. При этом, повышаются на 10 °С температуры начала растворения γ' -фазы $t_{Н.Р.}^{\gamma'}$ (855,0 °С) и полного растворения упрочняющей γ' -фазы - $t_{П.Р.}^{\gamma'}$ (1065,55 °С), что говорит о повышении термической стабильности данной фазы. Повышение содержания гафния в составе до 1,0% (по массе) и более приводит к заметному снижению характеристических температур, особенно температуры солидуса t_S и температуры эвтектических превращений $t_{ЭВТ}$, что может приводить к существенному снижению структурной и фазовой стабильности сплава.

Анализ расчетных данных, полученных методом пассивного эксперимента показал, что для сравнения с результатами прямого активного эксперимента, вместо 11 экспериментальных плавок можно провести только 3 тестовые плавки опытных образцов. Одна плавка – исходный состав без гафния; вторая и третья плавки с содержанием гафния соответственно 0,5% и 1,0% (по массе) для экспериментального определения характеристических температур методом ДТА. Данный подход позволяет в 3–4 раза сократить количество экспериментов, дорогостоящие материалы, промышленные ресурсы, а также затраты времени на научные исследования. Таким образом, синтез расчетных и экспериментальных методов позволил с высокой достоверностью оценить влияние гафния на характеристические температуры и температурные интервалы образования отдельных фаз в опытных составах.

Исследования ДТА проводили на установке ВДТА-8М в среде гелия при постоянной скорости нагрева и охлаждения равной 80 °С/мин. В качестве эталона использовался термически инертный образец чистого вольфрама (W-эталон). С помощью метода ДТА выявлялись превращения, как в твердом, так и в жидком состоянии, связанные с изменением энтальпии в образце. С изменением температуры во времени сравнивали тепловые потоки в термически инертном эталоне (W) и исследуемом образце. В случае их равенства получали базовую линию на регистрирующем приборе без каких-либо изменений. При наличии в исследуемом образце каких-либо превращений, связанных с поглощением или выделением тепла (эндо- и экзотермические процессы соответственно), фиксировали отклонения от прямолинейного хода базовой линии в виде пиков на термической кривой в одну или другую

сторону. По числу, форме, величине и расположению этих пиков на термической кривой получали данные по пороговым значениям температур протекающих процессов, т. е. характеристические температуры исследуемых составов. Расшифровка термограмм, полученных в ходе экспериментов, проводили с учетом рекомендаций, указанных в работах авторов [16, 19, 20].

Максимальная температура нагрева образцов в установке ВДТА-8П – 1450 °С. Заполнение камеры гелием до 0,8–0,9 ат. проводилось после предварительной откачки камеры до разрежения не менее 10^{-5} мм. рт. ст. При этом операция «промыть» гелием повторялась дважды. Образцы исследуемых сплавов имели одинаковый размер (диаметр $d = 3$ мм; длина $l = 3$ мм) и массу (~1,45 г). В соответствии с методикой эксперимента нагрев или охлаждение каждого образца проводилось дважды в тигле из оксида циркония.

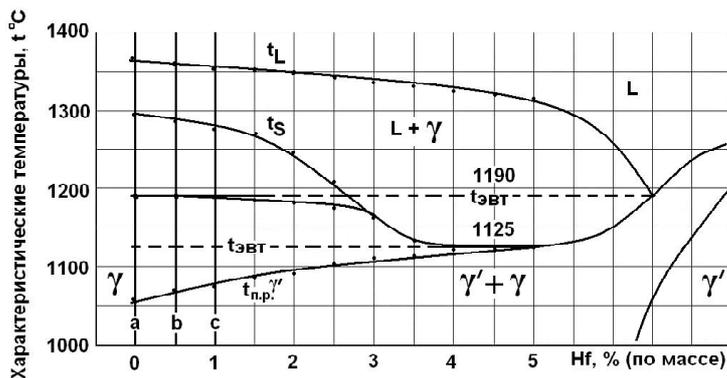
На основании расшифровки и анализа экспериментально полученных ДТА– кривых по определению характеристических температур фазовых превращений в опытных составах, на рисунке 2 схематически представлено политермическое сечение многокомпонентной диаграммы состояния в координатах: температура t °С – содержание Hf, % (по массе).

На рисунке 2 видно, что характеристические температуры: $t_{П.Р.}^{\gamma'}$, $t_{ЭВТ}$, t_S , t_L являются индивидуальными характеристическими температурами для каждого опытного состава: исходный состав «а» без добавок гафния, состав «b» с 0,5% гафния и состав «с» с 1,0% гафния (по массе).

Процесс растворения γ' -фазы в γ -твердом растворе контролируется кривой $t_{П.Р.}^{\gamma'}$, на которой видно, что увеличение содержания гафния в опытных составах «b» и «с» вызывает повышение температуры полного растворения $t_{П.Р.}^{\gamma'}$ γ' -фазы. Положение точек на температурной кривой полного растворения $t_{П.Р.}^{\gamma'}$ γ' -фазы непосредственно характеризуют термическую фазовую стабильность состава.

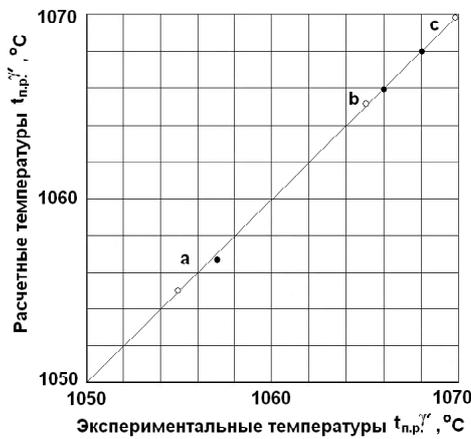
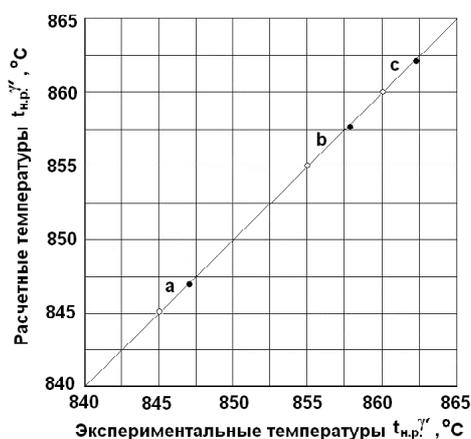
На рисунках 3 и 4 представлены результаты, полученные методом CALPHAD в сравнении с экспериментальными данными, полученные методом ДТА по определению влияния гафния на характеристические температуры многокомпонентной системы Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C (сплав ЖСЗЛС, средний уровень легирования).

Анализ результатов экспериментов методом ДТА, представленных на рисунках 3 и 4, а также в таблице 2 показывает, что в опытных составах, содержащих 0,5 %Hf (состав «b») и 1,0 %Hf (состав «с»), по сравнению с исходным составом без



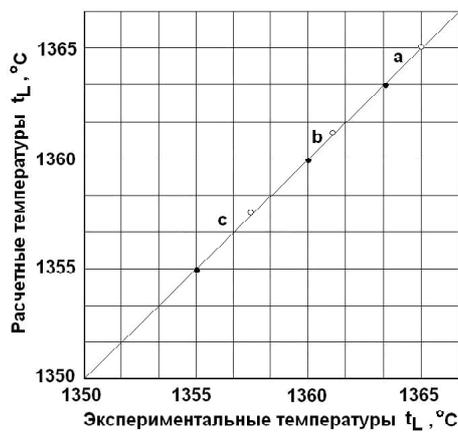
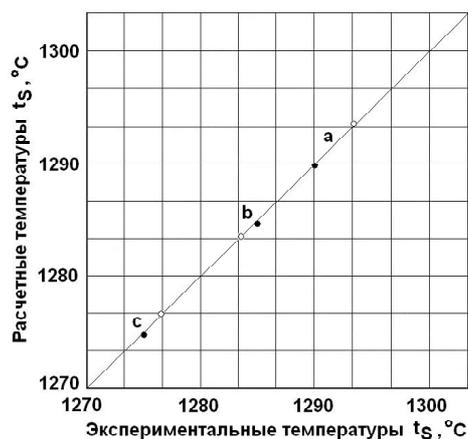
a – без добавок Hf; b – добавка 0,5% Hf (по массе); c – добавка 1,0% Hf (по массе)

Рис. 2. Политермическое сечение многокомпонентной диаграммы состояния системы Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C в координатах температуры t °C – содержание Hf,% (по массе)



○ - расчетные значения, полученные методом CALPHAD;
 • - экспериментальные значения, полученные методом ДТА
 a – состав без Hf; b – состав с 0,5 % Hf; c – состав с 1,0 % Hf (по массе)

Рис. 3. Сравнение расчетных и экспериментальных значений характеристических температур $t_{H.P.\gamma'}$ и $t_{П.Р.\gamma'}$ для системы Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C в литом состоянии



○ - расчетные значения, полученные методом CALPHAD;
 • - экспериментальные значения, полученные методом ДТА
 a – состав без Hf; b – состав с 0,5 % Hf; c – состав с 1,0 % Hf (по массе)

Рис. 4. Сравнение расчетных и экспериментальных значений характеристических температур солидус t_s и ликвидус t_L для системы Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C

Таблица 2 – Экспериментальные значения характеристических температур для системы Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C, определенные методом ДТА

Характеристические температуры, °С							
Hf, %	t_L	t_S	$t_{эвт.}$	$t_{Н.Р.} \gamma'$	$t_{П.Р.} \gamma'$	Δt_1	Δt_2
0,0	1364	1290	1195	847	1057	74	138
0,5	1362	1285	1190	857	1066	77	124
1,0	1358	1275	1185	862	1068	83	117

добавок Hf (состав «а»), снижаются характеристические температуры – t_L , t_S , $t_{эвт.}$, кроме температур начала $t_{Н.Р.} \gamma'$ и полного растворения основной упрочняющей γ' - фазы – $t_{П.Р.} \gamma'$, которые постепенно повышаются. Результаты экспериментов хорошо согласуются с результатами расчетов, полученных методом CALPHAD. Расхождение результатов составляет не более $\pm 1,5-3,0$ °С, что говорит о достоверности прогнозируемых расчетных данных (см. табл. 1).

Выводы

1. Синтез расчетных и экспериментальных методов позволяет эффективно и надежно прогнозировать результаты без проведения многочисленных промежуточных экспериментов.

2. Результаты расчета характеристических температур, полученные методом CALPHAD хорошо согласуются с результатами прямых экспериментов, полученных методом ДТА.

3. Для конкретной многокомпонентной системы Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C влияние гафния при содержании 0,5% по массе оценивается как положительное.

4. Увеличение содержания гафния более 0,5% по массе в исследованном диапазоне 0,5-5,0% приводит к снижению температур ликвидус, солидус, эвтектических превращений, расширению интервала кристаллизации и вырождению температурного интервала для проведения гомогенизирующей термообработки на твердый раствор.

5. Влияние гафния при содержании 1,0% по массе и более в исследованном диапазоне 0,5-5,0% для конкретной многокомпонентной системы оценивается как отрицательное, так как перелегирование гафнием может приводить к таким негативным последствиям, как снижение структурной стабильности за счет увеличения структурной неоднородности, что может приводить к существенному снижению прочностных характеристик.

Список литературы

1. Масленков С. Б. Влияние гафния на структуру и свойства никелевых сплавов / С. Б. Масленков, Н. Н. Бурова, В. В. Хангулов // Ме-

талловедение и термическая обработка металлов. – 1980. – № 4. – С. 45–46.

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. Патон Б. Е. 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. 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.
5. 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.
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. – Январь-февраль. – С. 34–37.
8. Котсорадис Д. 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. 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.
10. Никитин В. И. Коррозия и защита лопаток газовых турбин / Никитин В. И. – Л. : Машиностроение, 1987. – 272 с.
11. Никитин В. И. Влияние состава никелевых сплавов на их коррозионную стойкость в золе газотурбинного топлива / В. И. Никитин, М. Б. Ревзюк, И. П. Комисарова // Труды

- ЦКТИ им. И. И. Ползунова. – Л., 1978. – Вып. 158. – С. 71–74.
12. Коваль А. Д. Принципы легирования жаропрочных никелевых сплавов, стойких к высокотемпературной коррозии / А. Д. Коваль, С. Б. Беликов, Е. Л. Санчугов // *Металловедение и термическая обработка*. – 2001. – № 10. – С. 5–9.
 13. Научные основы легирования жаропрочных никелевых сплавов, стойких против высокотемпературной коррозии (ВТК) / [А. Д. Коваль, С. Б. Беликов, Е. Л. Санчугов, А. Г. Андриенко]. – Запорож. машиностр. ин-т, 1990. – 56 с. – (Препринт / КИЕВ УМК ВО; ЗМИ 1990).
 14. 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.
 15. Saunders N. The Application of CALPHAD Calculations to Ni-Based Superalloys / N. Saunders, M. Fahrman, C. J. Small // In «Superalloys 2000» eds. K.A. Green, T.M. Pollock and R.D. Kissinger. – TMS. – Warrendale. – 2000. – 803 p.
 16. Логунов А. В. Теплофизические свойства сплавов системы Ni-Cr / А. В. Логунов, А. И. Ковалев, Н. В. Петрушин // *Тепло- и массоперенос. Ин-т тепло- и массообмена*. – Минск. – 1972. – № 7. – С. 392–396.
 17. Беликов С. Б. О влиянии тантала на характеристические точки жаропрочных никелевых сплавов / С. Б. Беликов, С. В. Гайдук, В. В. Кононов // *Вестник двигателестроения*. – 2004. – № 3. – С. 99–102.
 18. Гайдук С. В. Особенности влияния тантала на структуру и свойства никелевых сплавов / С. В. Гайдук // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2004. – № 1. – С. 16–19.
 19. Вертоградский В. А. Исследование фазовых превращений в сплавах типа ЖС методом ДТА / В. А. Вертоградский, Т. П. Рыкова // *Жаропрочные и жаростойкие стали и сплавы на никелевой основе*. – М.: Наука, 1984. – С. 223–227.
 20. Fippen J.S. Using differential thermal analysis to determine phase change temperatures / J.S. Fippen, P.V. Sparks // *Metal Progr.* – 1979. – № 4. – P. 56–59.

Поступила в редакцию 03.04.2014

Гайдук С.В., Кононов В.В. Застосування методів пасивного і активного експерименту до оцінки впливу гафнію на характеристичні температури багатокомпонентного нікелевого сплаву

Методами пасивного і активного експерименту оцінений вплив гафнію на характеристичні температури багатокомпонентної системи Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C. Представлені результати розрахунків методом CALPHAD порівняно з експериментальними даними, отриманими методом диференційного термічного аналізу (ДТА) для дослідних складів з добавками гафнію в дослідженому діапазоні легування і вихідним складом без гафнію.

Ключові слова: ливарні жароміцні корозійностійкі нікелеві сплави; система легування; характеристичні температури; ліквідус; солідус; інтервал кристалізації.

Gayduk S., Kononov. V. Application of passive and active experimental methods for evaluation hafnium influence on critical temperatures of multi-component nickel alloy

By passive and active methods there has been evaluated hafnium influence on critical temperatures of multi-component system Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C. The results calculated by CALPHAD method have been represented in comparison with experimental data obtained by thermal-differential analysis (TDA) applied to experimental compositions with hafnium additions within investigated alloying range and initial composition, free of hafnium.

Key words: cast high-temperature corrosion-resistant nickel alloys; alloying system; critical temperatures; liquidus; solidus; crystallization temperature range.