

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТАНТАЛА НА КРИТИЧЕСКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЛИТЕЙНОМ СВАРИВАЕМОМ ЖАРОПРОЧНОМ НИКЕЛЕВОМ СПЛАВЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДИК

Методом компьютерного моделирования процессов кристаллизации (охлаждения) или нагрева, основанного на расчетном методе CALPHAD, оценено влияние тантала в исследованном диапазоне легирования от 1,0 до 10 % (по массе), в сравнении с исходным составом без тантала, на критические температуры многокомпонентной системы Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C. Представлены результаты расчетов в сравнении с экспериментальными данными, полученными на образцах тестовых плавок методом дифференциального термического анализа (ДТА).

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

Введение

В настоящее время повышение надежности работы материалов газовых турбин и увеличение эксплуатационного ресурса деталей из них, осуществляется двумя основными направлениями. Первое направление – замена существующих промышленных жаропрочных никелевых сплавов на разработанные новые сплавы. Второе направление – модернизация химического состава известных промышленных сплавов путем легирования перспективными элементами, например танталом, с оптимизацией его границ легирования внутри марки. В результате модернизированные составы – сплавы нового поколения, обеспечат повышение комплекса служебных характеристик материала, а следовательно, ресурса газотурбинных двигателей в условиях длительного воздействия высоких температур и напряжений в агрессивных средах [1–5].

Международная практика показывает, 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 нет необходимости в больших объемах промышленных и финансовых ресурсов, в сравнении с первым направлением. Современный подход к легированию литейных жаропрочных никелевых сплавов дорогостоящими элементами приводит к компромиссу, который должен одновременно учитывать влияние данных элементов как на прочностные характеристики, коррозионную стойкость, структурную стабильность, с одной стороны, так и технологичность, а также экономическую целесообразность, с другой [3–6].

Во многих исследованиях отмечается о положительном влиянии тантала на прочностные характеристики

и термическую стабильность фаз в литейных жаропрочных никелевых сплавах. При этом указывается, что в пределах марочного состава для различных сложнолегированных систем жаропрочных никелевых сплавов, оптимальные границы легирования для нового вводимого элемента тантала являются индивидуальными [1–6].

В данной работе с помощью компьютерного моделирования, основанного на расчетном методе CALPHAD [7] было оценено влияние легирования танталом в исследованном диапазоне от 1,0 до 10,0 % с концентрационным шагом 1 % по массе на критические температуры фазовых превращений в многокомпонентной никелевой системе Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C (сплав ЖСЗЛС среднего уровня легирования). Цель – оптимизация границ легирования танталом для повышения уровня физико-механических характеристик материала.

Наиболее оптимальные варианты опытных составов с нижним, средним и верхним уровнями легирования, а также без легирования танталом (исходный марочный состав ЖСЗЛС), экспериментально исследовались на образцах 4-х тестовых плавок методом дифференциального термического анализа (ДТА) [8, 9]. Экспериментальные данные сравнивались с результатами расчетов, полученными CALPHAD-методом.

В настоящее время по теории легирования многокомпонентных никелевых систем опубликовано достаточно большое количество информации [1–6, 8], однако недостаточно освещаются вопросы, связанные с оценкой влияния отдельных легирующих элементов на критические температуры растворения или выделения отдельных фаз в таких системах. Поэтому данная область исследований важна и актуальна для развития теории легирования как по разработке новых спла-

вов, так и по модернизации составов известных промышленных марок жаропрочных никелевых сплавов с целью улучшения комплекса их служебных характеристик для конкретных технических условий эксплуатации.

Постановка задачи

Целью настоящей работы является сравнительная оценка влияния тантала на критические температуры выделения и растворения фаз в многокомпонентной системе Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C с помощью пассивного эксперимента расчетным методом CALPHAD и активного эксперимента методом дифференциального термического анализа (ДТА).

Метод пассивного эксперимента заключается в компьютерном моделировании термодинамических процессов при кристаллизации (охлаждении) или нагреве, основанном на расчетном CALPHAD-методе [10–14]. Компьютерное моделирование данных процессов позволяет провести достоверные прогнозирующие расчеты по оценке влияния тантала на критические температуры выделения или растворения отдельных фаз в промежуточных опытных составах, в сравнении с исходным составом без тантала.

Расчеты критических температур проводились индивидуально по каждому исследованному составу при пошаговом введении тантала (Ta) в фиксированный состав многокомпонентной системы, приведенной выше, с концентрационным шагом 1,0 % (по массе) внутри исследуемого диапазона 1,0–10,0 %.

Эффективность расчетного метода CALPHAD заключается в достаточно быстром получении недостающей информации, основанной на надежных физических принципах, и имеет ряд значительных преимуществ, в сравнении с методами математической статистики: корреляционным, дисперсионным, регрессионным анализами. Расчеты методом CALPHAD, полученные путем компьютерного моделирования процессов кристаллизации (охлаждения) или нагрева, позволяют без многократных промежуточных прямых экспериментов определить критические температуры выделения или растворения отдельных фаз, а также температурные интервалы фазовых превращений, в зависимости от содержания тантала в исследуемом диапазоне легирования для приведенной выше сложнoleгированной системы на основе никеля. Результаты расчетов CALPHAD-методом сравнивались с данными активного эксперимента, полученными методом ДТА на образцах тестовых плавок.

Анализ результатов

При охлаждении (кристаллизации) или нагреве в многокомпонентных жаропрочных никелевых сплавах протекает ряд фазовых превращений, определяющих фазовый состав и конечную структуру. В целом, химический состав предопределяет температурные интер-

валы протекания основных фазовых превращений при кристаллизации (охлаждении) или нагреве, к которым относятся растворение или выделение частиц γ' - фазы в γ - твердом растворе, растворение или плавление неравновесной эвтектики $\gamma + \gamma'$, плавление γ - твердого раствора, выделение или растворение карбидов различного типа [9, 15, 16].

К негативным структурным изменениям могут приводить неблагоприятные фазовые превращения, ведущие к снижению служебных свойств и потере работоспособности сплава. Данные процессы возможны в многокомпонентных жаропрочных никелевых сплавах при недостаточно сбалансированном их химическом составе [17, 18].

Компьютерное моделирование процесса кристаллизации (охлаждения) 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 зафиксированной расчетной величине содержания тантала. Пошаговое легирование танталом в исследуемом диапазоне 1,0–10,0 % (по массе) позволило рассчитать и оценить влияние легирования танталом на критические температуры выделения (растворения) фаз, а также температурные интервалы фазовых превращений для каждого исследованного состава.

На рисунке 1 и в таблице 1 представлены результаты расчетов, полученные по определению критических температур в процессе кристаллизации (охлаждения), а также нагрева исходного состава без тантала и опытных составов с танталом в исследованном диапазоне легирования. Данный подход позволил без проведения прямых экспериментов получить зависимость основных критических температур от содержания тантала 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 γ' - фазы – ($t_{Н.Р.}^{\gamma'}$); температуру (конца) полного растворения γ' - фазы – ($t_{П.Р.}^{\gamma'}$); температурный интервал для проведения гомогенизирующей термической обработки на γ - твердый раствор – (Δt_2).

Анализ результатов, представленных на рисунке 1, показывает, что с повышением содержания тантала в исследованном диапазоне легирования критические температуры – t_L , t_S снижаются, при этом температура эвтектических превращений $t_{ЭВТ}$ остается стабильной, постепенно повышаясь на 20 °С. Вместе с тем, температура ликвидус (t_L) при содержании тантала 10,0 % по массе снизилась более, чем на 60 °С; температура солидус (t_S) снизилась более, чем на 65 °С, по сравнению с аналогичными критическими температурами для исходного состава без тантала (табл. 1).

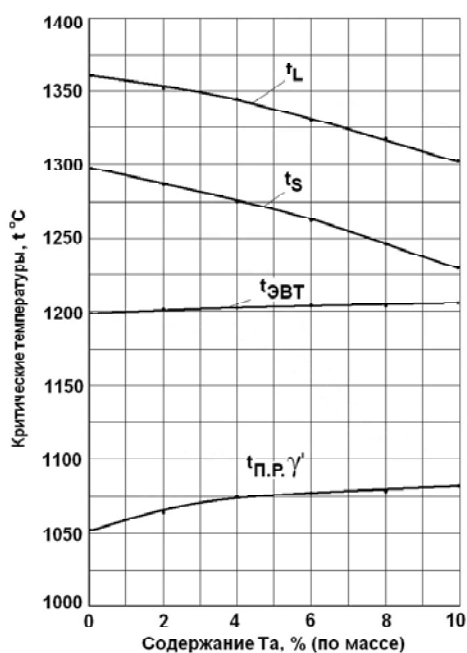


Рис. 1. Зависимости критических температур от содержания тантала для системы Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C, полученные расчетным методом CALPHAD

Температуры начала растворения $t_{H.P.}^{\gamma'}$ и полного растворения $t_{П.Р.}^{\gamma'}$ γ' - фазы в составе без тантала (~ 855 °С), (~1055 °С) повысились в составе с 6,0 % тантала до (~ 870 °С), (~ 1078 °С) соответственно. В диапазоне легирования танталом 6,0–8,0 % по массе температура $t_{П.Р.}^{\gamma'}$ стабилизируется, и при 10,0 % тантала наблюдается ее снижение до ~ 1073 °С (табл. 1).

При этом, температурный интервал кристаллизации $\Delta t_1 = (t_L - t_S)$ остается стабильным и находится в преде-

лах ± 4 °С, в сравнении с исходным составом без тантала. Аналогичное поведение температурного интервала для проведения гомогенизирующей термической обработки $\Delta t_2 = (t_{ЭВТ} - t_{П.Р.}^{\gamma'})$, который находится в пределах ± 5 °С (см. табл. 1).

Расчеты показали, что при повышении содержания тантала до 6,0 % (по массе) температура полного растворения γ' - фазы $t_{П.Р.}^{\gamma'}$ повышается на 23 °С, по сравнению с аналогичной критической температурой для исходного состава без тантала.

Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о том, что наиболее чувствительной критической температурой, ограничивающей верхний предел границы легирования танталом, является температура солидуса t_S , которая не должна быть ниже значения 1280 °С (технические требования для сплавов данного класса). При содержании тантала 3,0 % по массе температура солидуса t_S составляет 1281,51 °С, при содержании тантала 4,0 % по массе температура солидуса снижается на ~ 18 °С (1275,90 °С), что ниже технических требований (см. табл. 1). При этом, на ~ 17 °С повышается температура полного растворения упрочняющей γ' - фазы – $t_{П.Р.}^{\gamma'}$ (1071,63 °С), что говорит о повышении термической стабильности основной упрочняющей γ' - фазы. Повышение содержания тантала в диапазоне от 3,0 до 10,0 % (по массе) приводит к заметному снижению критических температур, особенно температуры солидуса t_S на ~ 54 °С и температуры ликвидуса t_L на ~ 45 °С, что может приводить к повышению дендритной ликвации, а следовательно, к увеличению структурной неоднородности и снижению фазовой стабильности сплава.

Анализ расчетных данных, полученных методом пассивного эксперимента, показал, что для сравнения с результатами прямого активного эксперимента, вместо 11 экспериментальных плавок достаточно провес-

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

Критические температуры, °С							
Ta, %	t_L	t_S	$t_{ЭВТ}$	$t_{H.P.}^{\gamma'}$	$t_{П.Р.}^{\gamma'}$	Δt_1	Δt_2
0,0	1365,10	1293,76	1190,00	855,00	1055,35	71,34	134,65
1,0	1360,00	1290,42	1198,00	865,00	1061,67	69,58	136,33
2,0	1354,53	1286,35	1201,15	870,00	1067,13	68,18	134,02
3,0	1348,95	1281,51	1201,75	870,00	1071,63	67,44	130,12
4,0	1343,16	1275,90	1202,54	870,00	1075,09	67,26	127,45
5,0	1337,16	1269,55	1202,94	870,00	1077,47	67,61	125,47
6,0	1330,94	1262,48	1203,25	870,00	1080,00	68,46	123,25
7,0	1324,49	1254,74	1204,52	870,00	1081,01	69,75	123,51
8,0	1317,81	1246,37	1205,85	870,00	1082,21	71,44	123,64
9,0	1310,89	1237,38	1208,11	870,00	1083,56	73,51	124,55
10,0	1303,72	1227,80	1210,01	875,00	1085,00	75,92	125,01

ти 4 тестовые плавки опытных образцов. Первая тестовая плавка – образцы исходного состава без тантала; вторая, третья и четвертая тестовые плавки – образцы с нижним, средним и верхним уровнем оптимального содержания тантала, соответственно 1,0 %, 2,0 % и 3,0 % (по массе). Данный подход позволил существенно сократить количество экспериментов, дорогостоящие материалы, промышленные ресурсы, а также затраты времени на проведение объемных научных исследований. Таким образом, синтез расчетных и экспериментальных методик обеспечил высокую эффективность, информативность и достоверность при интерпретации данных по оценке влияния тантала на критические температуры, а также температурные интервалы существования отдельных фаз в исследованных 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. критические температуры исследуемых составов. Расшифровка термограмм, полученных в ходе экспериментов, проводили с учетом рекомендаций, указанных в работах авторов [8, 9].

Максимальная температура нагрева образцов в установке ВДТА-8П – 1450 °С. Заполнение камеры гелием до 0,8–0,9 ат. проводилось после получения 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 кристаллизацию (охлаждение) и нагрев каждого образца проводилось дважды в тигле из оксида циркония.

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

На рисунке 2 видно, что температуры $t_{п.р.}^{\gamma'}$, $t_{эвт.}$, t_S , t_L являются индивидуальными критическими температурами для каждого опытного состава: исходный состав «а» – без добавок тантала; состав «b» – 1,0 % тантала; состав «с» – 2,0 % и состав «d» – 3,0 % тантала (по массе). Следует отметить, что содержание тантала в образцах реальных тестовых плавки незначительно отличалось от расчетного: состав «b» – 1,1 % тантала; состав «с» – 1,9 % и состав «d» – 3,1 % тантала (по массе). Поэтому для сравнения полученных результатов содержание тантала в исследованных опытных составах приводилось расчетное.

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

На рис. 3 и 4 представлены результаты, полученные CALPHAD-методом в сравнении с экспериментальными

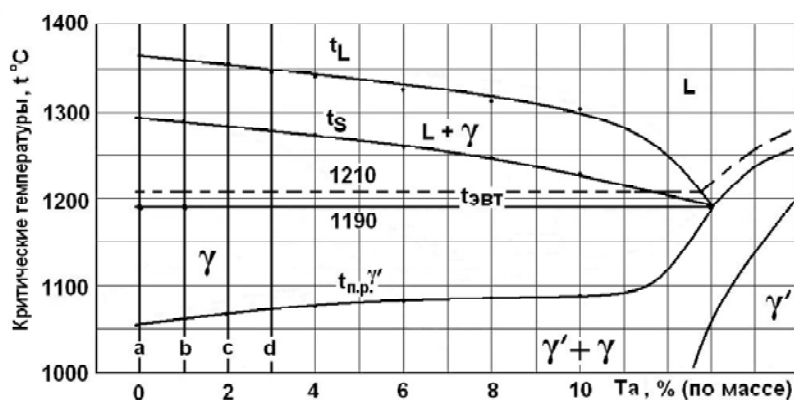


Рис. 2. Политермическое сечение многокомпонентной диаграммы состояния системы Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C в координатах температура t °С – содержание Ta, % (по массе): а – состав без Ta (ЖСЗЛС); б – состав с 1,0 % Ta; с – состав с 2,0 % Ta; d – состав с 3,0 % Ta (по массе)

данными, полученными на образцах тестовых плавок методом ДТА по оценке влияния тантала на критические температуры многокомпонентной системы Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C.

Анализ результатов экспериментов методом ДТА, представленных на рисунках 3 и 4, а также в таблице 2 показывает, что в опытных составах, содержащих 1,0 %Ta (состав «b»), 2,0 % Ta (состав «c») и 3,0 %Ta (состав «d»), по сравнению с исходным составом без Ta (состав «a»), критические температуры $-t_L, t_S$ снижаются, кроме температур начала $t_{Н.Р.}^{\gamma'}$ и (конца) полного растворения основной упрочняющей γ' - фазы $-t_{П.Р.}^{\gamma'}$, которые постепенно повышаются.

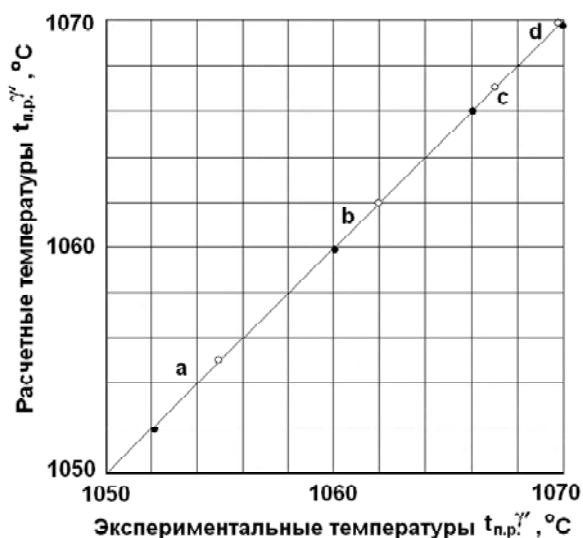
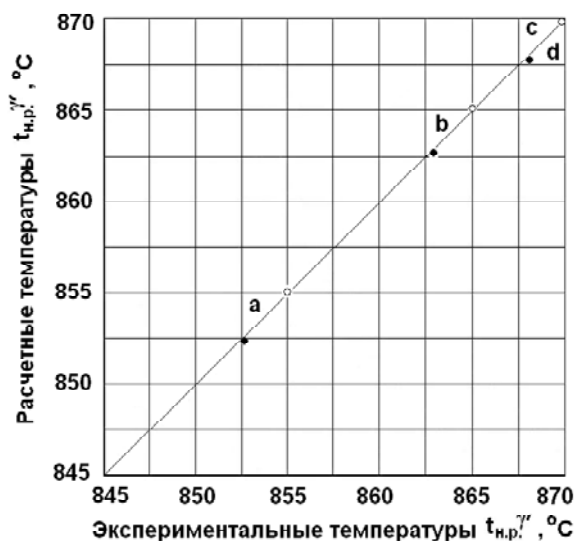


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные значения критических температур $t_{Н.Р.}^{\gamma'}$ и $t_{П.Р.}^{\gamma'}$ для системы Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C (литое состояние):

- – расчетные значения, полученные CALPHAD-методом;
- – экспериментальные значения, полученные методом ДТА;
- a – состав без Ta (ЖСЗЛС); b – состав с 1,0 % Ta;
- c – состав с 2,0 % Ta; d – состав с 3,0 % Ta (по массе)

Видно, что данные экспериментов хорошо согласуются с результатами расчетов, полученных CALPHAD-методом. Расхождение результатов составляет не более $\pm 1,5-3,0$ °C, что говорит о достоверности прогнозирующих расчетов и хорошей согласованности с экспериментальными данными, полученными методом ДТА (см. табл. 1, 2). Следует также отметить, что приведенные в данной работе данные находятся также в хорошей согласованности с расчетными и экспериментальными данными, приведенными авторами работ [1–4, 8–16] на других промышленных сплавах.

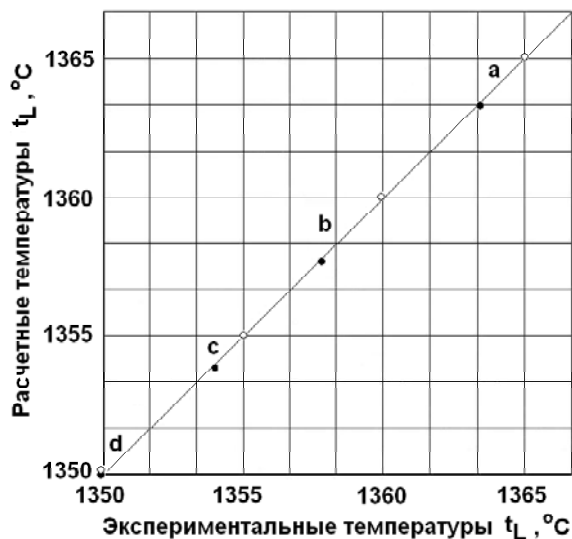
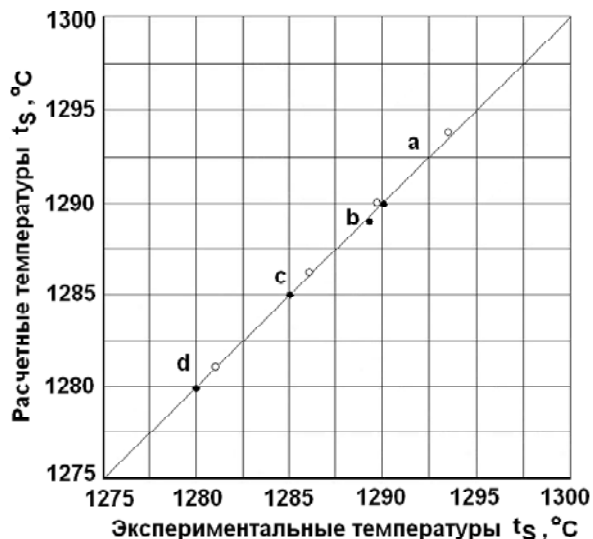


Рис. 4. Расчетные и экспериментальные значения критических температур солидус t_S и ликвидус t_L для системы Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C (литое состояние):

- – расчетные значения, полученные CALPHAD-методом;
- – экспериментальные значения, полученные методом ДТА;
- a – состав без Ta (ЖСЗЛС); b – состав с 1,0 % Ta;
- c – состав с 2,0 % Ta; d – состав с 3,0 % Ta (по массе)

Выводы

1. Расчеты, полученные CALPHAD-методом, позволяют эффективно и надежно прогнозировать результаты без проведения многочисленных промежуточных и дорогостоящих прямых (активных) экспериментов. Результаты расчета критических температур, полученные методом CALPHAD (пассивный эксперимент), хорошо согласуются с результатами экспериментов на образцах тестовых плавок, полученных методом ДТА (активный эксперимент).

2. Для многокомпонентной системы Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C содержание тантала до 3,0 % по массе оценивается как позитивное. Увеличение содержания тантала более 3,0 % по массе в исследованном диапазоне 1,0–10,0 % приводит к снижению температуры ликвидус, и особенно температуры плавления γ - твердого раствора солидус ниже, чем 1280 °C, что нежелательно для литейных жаропрочных никелевых сплавов, работающих при температурах 1000 °C и выше.

3. Влияние тантала при содержании 4,0 % по массе и более, в исследованном диапазоне 1,0–10,0 %, для исследованной многокомпонентной системы оценивается как негативное, так как перелегирование танталом может приводить к таким нежелательным последствиям, как увеличение структурной неоднородности и снижение фазовой стабильности за счет выделения вредных ТПУ- фаз, что может приводить к резкому снижению прочностных характеристик, особенно пластичности, и потери работоспособности материала.

Список литературы

1. 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.
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. 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. Кишкин С. Т. Литейные жаропрочные сплавы на никелевой основе / Кишкин С. Т., Строганов Г. Б., Логунов А. В. – М. : Машиностроение, 1987. – 116 с.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Fippen J. S. Using differential thermal analysis to determine phase change temperatures / J. S. Fippen, P. B. Sparks // Metal Progr. – 1979. – № 4. – P. 56–59.
9. 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.
10. Попов В. В. Анализ растворимости карбидов, нитридов и карбонитридов в сталях методами компьютерной термодинамики. I. Описание термодинамических свойств. Метод расчета / В. В. Попов, И. И. Горбачев // Физика металлов и металловедение. – 2004. – Т. 98. – № 4. – С. 11–21.
11. Попов В. В. Анализ растворимости карбидов, нитридов и карбонитридов в сталях методами компьютерной термодинамики II. Растворимость карбидов, нитридов и карбонитридов в системах Fe-V-C, Fe-V-N и Fe-V-C-N / В. В. Попов, И. И. Горбачев // Физика металлов и металловедение. – 2005. – Т. 99. – № 3. – С. 69–82.
12. Горбачев И. И. Анализ растворимости карбидов, нитридов и карбонитридов в сталях методами компьютерной термодинамики. III. Растворимость карбидов, нитридов и карбонитридов в системах Fe-Ti-C, Fe-Ti-N и Fe-Ti-C-N / И. И. Горбачев, В. В. Попов // Физика металлов и металловедение. – 2009. – Т. 108. – № 5. – С. 1–12.
13. Горбачев И. И. Термодинамическое моделирование системы Fe-V-Nb-C-N на основе CALPHAD-метода / И. И. Горбачев, В. В. Попов // Физика металлов и металловедение. – 2011. – Т. 111. – № 5. – С. 518–525.
14. Горбачев И. И. Термодинамическое моделирование карбонитридообразования в сталях C-V-N-Ti / И. И. Горбачев, В. В. Попов, А. Ю. Пасынков // Физика металлов и металловедение. – 2012. – Т. 113. – № 10. – С. 1226–1035.
15. Беликов С. Б. О влиянии тантала на критические точки жаропрочных никелевых сплавов / С. Б. Беликов, С. В. Гайдук, В. В. Кононов // Вестник двигателестроения. – 2004. – № 3. – С. 99–102.
16. 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.
17. Морозова Г. И. Сбалансированное легирование жаропрочных никелевых сплавов / Г. И. Морозова // Металлы. – 1993. – № 1. – С. 38–41.
18. Морозова Г. И. Компенсация дисбаланса легирования жаропрочных никелевых сплавов / Г. И. Морозова // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2012. – № 12. – С. 52–56.

Одержано 06.11.2014

Гайдук С.В., Кононов В.В. Оцінка впливу танталу на критичні температури в ливарному зварюваному жароміцному нікелевому сплаві із застосуванням розрахункових і експериментальних методик

Методом комп'ютерного моделювання процесів кристалізації (охолодження) або нагріву, заснованого на розрахунковому методі CALPHAD, оцінений вплив танталу в дослідженому діапазоні легування від 1,0 до 10 % (за масою), порівняно з вихідним складом без танталу, на критичні температури багатокомпонентної системи Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C. Представлені результати розрахунків порівняно з експериментальними даними, отриманими на зразках тестових плавок методом диференційного термічного аналізу (ДТА).

Ключові слова: ливарні жароміцні нікелеві сплави, система легування, критичні температури, ліквідус, солідус, інтервал кристалізації.

Gayduk S., Kononov V. Estimation of tantalum influence on the critical points of cast weldable high-temperature nickel-base alloy by calculating and experimental methods

Using computer modeling of alloy solidification (cooling) or heating based on calculating method CALPHAD there has been estimated the influence of tantalum within the alloying range from 1 to 10 %, by mass in comparison with the initial composition free of tantalum on the critical points of multi-component system Ni-16Cr-5Co-2,7Al-2,7Ti-4W-4Mo-0,015Zr-0,015B-0,09C. The calculated results have been represented in comparison with the experimental data obtained by differential thermal analysis (DTA) applied for the as cast tested specimens.

Key words: high-temperature nickel-base cast super alloy, alloying system, critical points, liquidus, solidus, crystallization temperature range.
