

І СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ. ОПІР РУЙНУВАННЮ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

УДК 669.245.018.044:620.193.53

Канд. техн. наук Глотка О. А.¹, канд. техн. наук Ключихін В. В.²,

д-р техн. наук Ольшанецький В. Ю.¹

¹Національний університет «Запорізька політехніка», ²АТ «Мотор Січ»;
м. Запоріжжя

ВТОРИННІ КАРБІДИ В БАГАТОКОМПОНЕНТНІЙ СИСТЕМІ Ni-13,5Cr-5Co-3,4Al-4,8Ti-7,3W-0,8Mo-0,015B-0,12C

Мета роботи. Вивчити специфіку розподілу легувальних елементів у вторинних карбідах в багатокомпонентній системі Ni-13,5Cr-5Co-3,4Al-4,8Ti-7,3W-0,8Mo-0,015B-0,12C за допомогою розрахункового методу прогнозування CALPHAD.

Методи досліджень. Для пошуку закономірностей та розрахунку закономірностей розподілу легувальних елементів в сплаві, було обрано новітній метод CALPHAD, та проведено моделювання термодинамічних процесів кристалізації фаз.

Отримані результати. результати термодинамічних розрахунків хімічного складу карбідів наведені в вигляді математичних залежностей. Отримано рівняння впливу легувальних елементів на температури розчинення (виділення) вторинних карбідів. Показано, що отримані залежності тісно корелюють з термодинамічними процесами, що відбуваються в системі.

Наукова новизна. Показано, що при підвищенні сумарної концентрації карбідоутворюючих елементів, ускладняється і хімічний склад карбідів типу $M_{23}C_6$. Вміст молібдену більше 2 % призводить до утворення ТЩП фази типу – P, а зі збільшенням його концентрації спостерігається перетворення карбіду MC в карбід типу M_6C . При концентрації вольфраму в складі сплаву більше 10 % помітно підвищується ймовірність виділення в структурі ТЩП фаз типу σ - і μ -, що чинить негативний вплив на механічні властивості і жароміцність.

Практична цінність. На основі комплексного підходу для багатокомпонентних ЖНС отримані нові регресійні моделі, що дозволяють адекватно прогнозувати хімічний склад вторинних карбідів за хімічним складом сплаву, це дозволило реалізувати рішення задачі розрахункового прогнозування складу карбідів за хімічним складом сплаву.

Ключові слова: ливарні жароміцні нікелеві сплави, система легування, метод CALPHAD, структура, склад карбідів.

Вступ

Відомо [1–3], що карбіди MC утворюються в процесі кристалізації (затвердіння) у вигляді дискретних частинок в міжзереном і внутрішньозереном просторі, а також в междендритних областях. Карбіди типу MC утворюються в рідині через сильну сегрегацію вуглецю, коли його кількість вище 0,05 %, а також при температурах трохи нижче температури затвердіння сплаву. При карбідних реакціях в сплавах вони служать основним джерелом вуглецю. У порядку зменшення стабільності в жароміцних нікелевих сплавах карбіди розташовуються в ряд HfC , TaC , NbC , TiC . Карбіди цього типу дуже стабільні при низьких температурах, але при більш високих температурах мають тенденцію до перетворення (деградації) у вторинні карбіди різних типів.

Метою роботи є вивчення специфіки впливу легувальних елементів на склад вторинних карбідів в структурі багатокомпонентної системи типу Ni-13,5Cr-5Co-3,4Al-4,8Ti-7,3W-0,8Mo-0,015B-0,12C за допомогою розрахункового методу прогнозування CALPHAD.

Матеріал і методика дослідження

Моделювання термодинамічних процесів, що протікають при кристалізації (охолодженні) або нагріванні в структурі сплавів здійснювалося методом CALPHAD [4].

В системі багатокомпонентного легування (Ni-13,5Cr-5Co-3,4Al-4,8Ti-7,3W-0,8Mo-0,015B-0,12C), що відповідала середньомарочному складу сплаву ЗМІ-3У [5], діапазон варіювання елементами був обраний з міркувань максимального і мінімального кількості елемента, що вводиться в жароміцні нікелеві сплави (ЖНС).

Таким чином, для дослідження було обрано карбідоутворювальні елементи в таких діапазонах легування: хром (1–35) %; молібден (1–6) %; вольфрам (1–16) % (тут і надалі відсотки позначаються по масі).

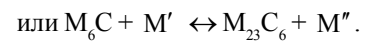
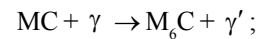
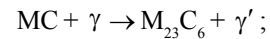
Отримані значення оброблялися в програмному комплексі Microsoft Office в пакеті EXCEL з отриманням кореляційних залежностей типу «параметр-властивість» та математичних рівнянь регресійних моделей, що оптимально описують ці залежності. Отримані залежності мають досить високі коефіцієнти критичної кореляції $R^2 \geq 0,9$ і можуть використовуватися для прогнозування розрахунків зазначених показників з відносною похибкою $\pm 3\%$.

Результати дослідження та їх обговорення

Проведення аналізу виділення фаз в процесі кристалізації дослідженого сплаву в температурному діапазоні (1600–20 °С) показало, що найбільш імовірним є утворення основних фаз в наступному порядку: карбіди типу MC; γ - твердий розчин; евтектика $\gamma + \gamma'$; інтерметаллід типу γ' - фази на основі (Ni_3Al); карбіди типу M_{23}C_6 [1, 2].

Карбіди M_{23}C_6 утворюються в сплавах з помірним або високим вмістом хрому під час низькотемпературної обробки і в процесі експлуатації при 760...980 °С внаслідок розпаду карбідів MC і «залишкового» вуглецю, розчиненого в матриці. Зазвичай вони розташовуються по межах зерен, іноді уздовж ліній двійників та на дефектах пакування, кінцях двійників і можуть бути центрами зародження пластин σ - фази. До складу карбідів цього типу входять також молібден і вольфрам. Внаслідок

несприятливого розташування на межі зерен карбіду M_{23}C_6 можуть чинити негативний вплив на межу тривалої міцності. Карбіди типу M_6C утворюються при температурах 815...980 °С в сплавах з більш високим вмістом тугоплавких елементів: вольфраму та молібдену. Переважно вони виділяються по межах зерен. У порівнянні з карбідами типу M_{23}C_6 карбіди M_6C більш стабільні при високих температурах. Перетворення карбідів типу MC з утворенням карбідів M_6C і M_{23}C_6 відбувається за відомими реакціями [3, 6]:



В роботах [7, 8] показано, що хром один з основних елементів, який підвищує характеристики корозійної стійкості сучасних промислових ЖНС. В середньому вміст хрому знаходиться на рівні 15 %, проте для збільшення жаростійкості його кількість може бути збільшено до 35 %. Крім корозійних властивостей, хром бере участь в утворенні одного з вторинних карбідів типу M_{23}C_6 , який присутній майже у всіх ЖНС. Хоча, хром і є елементом, що впливає на утворення вторинних карбідів, він має помітний вплив на температуру розчинення (виділення) первинних карбідів. Встановлено, що залежності (рис. 1) мають складний характер і описуються залежностями (таб. 1).

При вмісті хрому в сплаві до 5 % вторинний карбід не утворюється, тому їх температурна залежність розчинення (виділення) починається з 5 %.

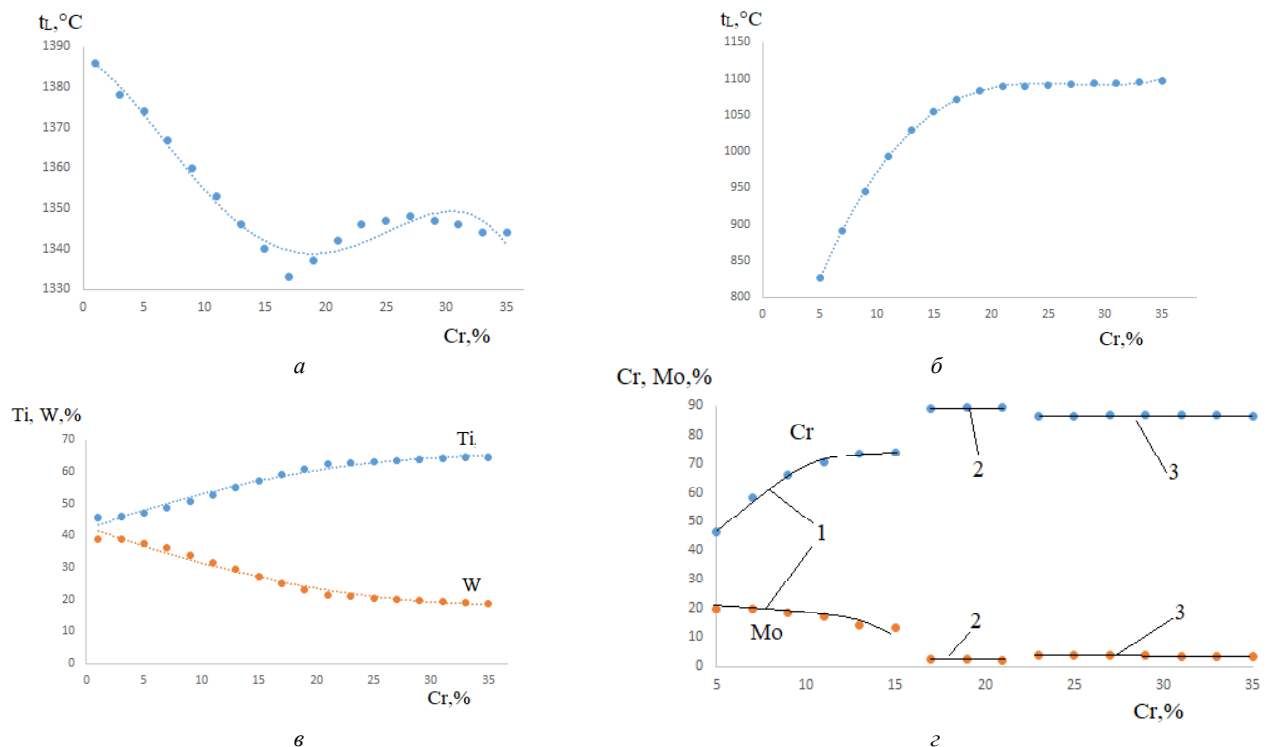


Рис. 1. Вплив вмісту хрому в складі сплаву на температуру розчинення (виділення) карбідів типу MC (а) і M_{23}C_6 (б), кількість титану і вольфраму первинного карбіду (в), хрому і молібдену вторинного карбіду (г)

Таблиця 1 – Математичні залежності температури розчинення (виділення) карбідів і вміст легуючих елементів у вторинних карбідах $M_{23}C_6$ від вмісту хрому, молібдену і вольфраму

Легуючий елемент	Температури розчинення (виділення) карбідів	Вміст елементів у вторинному карбіді
Cr	<p>первинні карбіди типу MC: $t_L, ^\circ C = -0,0004 \cdot (C_{Cr})^4 + 0,0255 \cdot (C_{Cr})^3 - 0,401(C_{Cr})^2 - 1,4112(C_{Cr}) + 1387,4;$</p> <p>вторинні карбіди типу $M_{23}C_6$: $t_L, ^\circ C = 0,0254(C_{Cr})^3 - 2,0774(C_{Cr})^2 + 56,13(C_{Cr}) + 592,74.$</p>	<p>первинні карбіди типу MC: $C_{Cr}(\% \text{ в карбіді}) = -0,0172(C_{Cr} \text{ в сплаві})^2 + 1,2582(C_{Cr} \text{ в сплаві}) + 42,195;$ $C_W(\% \text{ в карбіді}) = 0,0178(C_{Cr} \text{ в сплаві})^2 - 1,3222(C_{Cr} \text{ в сплаві}) + 42,957;$</p> <p>вторинні карбіди типу $M_{23}C_6$: $C_{Cr}(\% \text{ в карбіді}) = -0,3424(C_{Cr} \text{ в сплаві})^2 + 9,5524(C_{Cr} \text{ в сплаві}) + 7,5006;$ $C_{Mo}(\% \text{ в карбіді}) = -0,0512(C_{Cr} \text{ в сплаві})^2 + 0,3034(C_{Cr} \text{ в сплаві}) + 19,746$</p>
Mo	<p>первинні карбіди типу MC: $t_L^{MC}, ^\circ C = 1,7949 \cdot (C_{Mo})^2 - 12,11 \cdot (C_{Mo}) + 1356,8;$</p> <p>вторинні карбіди типу $M_{23}C_6$: $t_L^{M_{23}C_6}, ^\circ C = 14,455 \ln(C_{Mo}) + 1034,4$</p>	<p>первинні карбіди типу MC: $C_{Mo}(\% \text{ в карбіді}) = -0,0107(C_{Mo} \text{ в сплаві})^2 + 0,192(C_{Mo} \text{ в сплаві}) - 0,01;$ $C_{Cr}(\% \text{ в карбіді}) = -0,0028(C_{Mo} \text{ в сплаві})^3 + 0,0375(C_{Mo} \text{ в сплаві})^2 - 14,74(C_{Mo} \text{ в сплаві}) + 0,7139$</p> <p>вторинні карбіди типу $M_{23}C_6$: $C_W(\% \text{ в карбіді}) = -2,089 \cdot \ln C_{Mo}(\text{в сплаві}) + 3,6444;$ $C_{Ni}(\% \text{ в карбіді}) = 10,2722 \cdot (C_{Mo} \text{ в сплаві}) + 1,8327;$ $C_{Co}(\% \text{ в карбіді}) = 0,0896 \cdot (C_{Mo} \text{ в сплаві}) + 66,772;$ $C_{Cr}(\% \text{ в карбіді}) = -0,5755 \cdot (C_{Mo} \text{ в сплаві}) + 73,592;$ $C_{Mo}(\% \text{ в карбіді}) = 2,729 \cdot \ln C_{Mo}(\text{в сплаві}) + 15,174$</p>
W	<p>первинні карбіди типу MC: $t_L^{MC}, ^\circ C = 0,705 \cdot (C_W)^2 - 6,6189 \cdot (C_W) + 1354;$</p> <p>вторинні карбіди типу $M_{23}C_6$: $t_L^{M_{23}C_6}, ^\circ C = 3,8956(C_W) + 1003,7$</p>	<p>первинні карбіди типу MC: $C_W(\% \text{ в карбіді}) = -0,129(C_W \text{ в сплаві})^2 + 2,874(C_W \text{ в сплаві}) + 14,509;$ $C_{Cr}(\% \text{ в карбіді}) = 0,1018(C_W \text{ в сплаві})^2 - 2,2144(C_W \text{ в сплаві}) + 66,44$</p> <p>вторинні карбіди типу $M_{23}C_6$: $C_W(\% \text{ в карбіді}) = -0,2337 \cdot e^{1,4491 \cdot (C_W \text{ в сплаві})};$ $C_{Ni}(\% \text{ в карбіді}) = 0,0425(C_W \text{ в сплаві})^2 - 0,8234(C_W \text{ в сплаві}) + 5,6003$</p>

На розподіл елементів в карбіді MC (рис. 1а) хром впливає другорядно. Так, зі збільшенням вмісту хрому в сплаві в складі первинних карбідів змінюється концентрація титану до 65 %, що описується параболічною функцією (табл. 1)

На рисунку 1а, чітко простежується три ділянки, які концентраційно можна розділити на: 1 – до 15 %; 2 – 15–23 % і 23–35 % хрому в сплаві. Перша ділянка, як для хрому, так і для молібдену, вторинного карбіду описується параболічними залежностями (табл. 1).

Поява другої ділянки на рисунку 1а, а також перегин кривої на рисунку 1а, ймовірно пов'язано з утворен-

ням топологічно щільнопакованих (ТЩП) фаз типу σ - фази, що може чинити негативний вплив не тільки на механічні, а й на теплофізичні властивості, а також на розподіл елементів в фазах. При цьому, встановлено, що кількість хрому у вторинному карбіді зростає до 89 %, а молібдену знижується до 2,5 %. На другій ділянці, концентрація цих елементів не змінюється.

На рисунку 1а показано, що поява третьої ділянки так само корелює з перегином кривої на рисунку 1а, що скоріш за все пов'язано з виділенням в структурі сплаву α - твердого розчину на основі хрому. Так, при вмісті хрому більше 23 %, він повністю не розчиняється в нікелевої

матриці, а виділяється у вигляді окремих включень, що не є для даної композиції структурно оптимальним станом. Зміст хрому і молібдену на цьому етапі залишається постійним і становить 86,8 % і 3,6 %, відповідно.

Відомо [9, 10], що молібден, один з елементів який бере участь в утворенні вторинних карбідів і на його основі можуть формуватися карбіди типу M_6C , при цьому молібден може входити до складу карбідів типу $M_{23}C_6$. Оскільки в досліджуваній композиції утворення M_6C малоймовірно, то в подальшому буде розглянуто вплив молібдену на карбіди типу $M_{23}C_6$.

На рисунку 2 показано, що молібден робить складний вплив не тільки на температуру розчинення (виділення) вторинних карбідів, але і помітно впливає на температуру розчинення (виділення) первинних карбідів.

Вплив молібдену неоднозначний на температури утворення карбідів (карбідного ліквідусу), в першому випадку для первинних карбідів (рис. 2а) по параболічній залежності (табл. 1), при цьому, підвищуючи температуру виділення (розчинення) вторинних карбідів (рис. 2б) за логарифмічною залежністю (табл. 1). Слід зазначити, що в складі первинних карбідів молібден присутній в незначній концентрації (0,2 %) і його концентрація підвищується до 0,8 % зі збільшенням його вмісту в складі сплаву (рис. 2в).

Переважає концентрації молібдену в складі первинних карбідів відбувається при вмісті в сплаві 3,5–4 %. При цих же концентраціях спостерігається екстремум температури розчинення (виділення) первинних карбідів (рис. 2а). Збільшення вмісту молібдену в складі сплаву, призводить до зниження концентрації вольфраму і збільшення

кількості нікелю і кобальту у вторинних карбідах (рис. 2з), що описується такими залежностями (табл. 1).

Збільшення концентрації кобальту над вольфрамом в складі вторинних карбідів спостерігається при вмісті в сплаві молібдену 3,5–4 %, що збігається зі змінами, виявленими для первинних карбідів (рис. 2в). Концентрація хрому і молібдену в складі вторинних карбідів збільшується зі збільшенням вмісту молібдену в складі сплавів за такими залежностями (табл. 1).

Отже, збільшення концентрації молібдену, нікелю і кобальту в складі вторинних карбідів свідчить про перетворення карбідів типу $M_{23}C_6$ в карбіди типу M_6C , оскільки саме ці елементи характерні для карбіду M_6C . Однак встановлено, що вміст молібдену в складі сплаву 2 % і вище призводить до виділення ТЩП фаз типу Р- фази, яка негативно впливає на властивості матеріалу, істотно знижуючи рівень жароміцності, а також механічних властивостей, особливо пластичності.

Загальновідомо [10, 11], що вольфрам вводиться до складу ЖНС з метою підвищення рівня температур фазових перетворень і відповідно, жароміцності сплаву. Вміст вольфраму в сучасних жароміцних сплавах знаходиться в досить широких межах 1–16 %. Подальше збільшення вмісту вольфраму істотно підвищує ймовірність виділення в структурі ТЩП фаз, а також α твердого розчину на основі W. Так, вміст вольфраму до 10 % в складі сплаву практично не впливає на температуру розчинення (виділення) первинних карбідів типу MC (рис. 3а). Подальше його збільшення в складі сплаву сприяє помітному зростанню температури карбідного ліквідусу за такою залежністю (табл. 1).

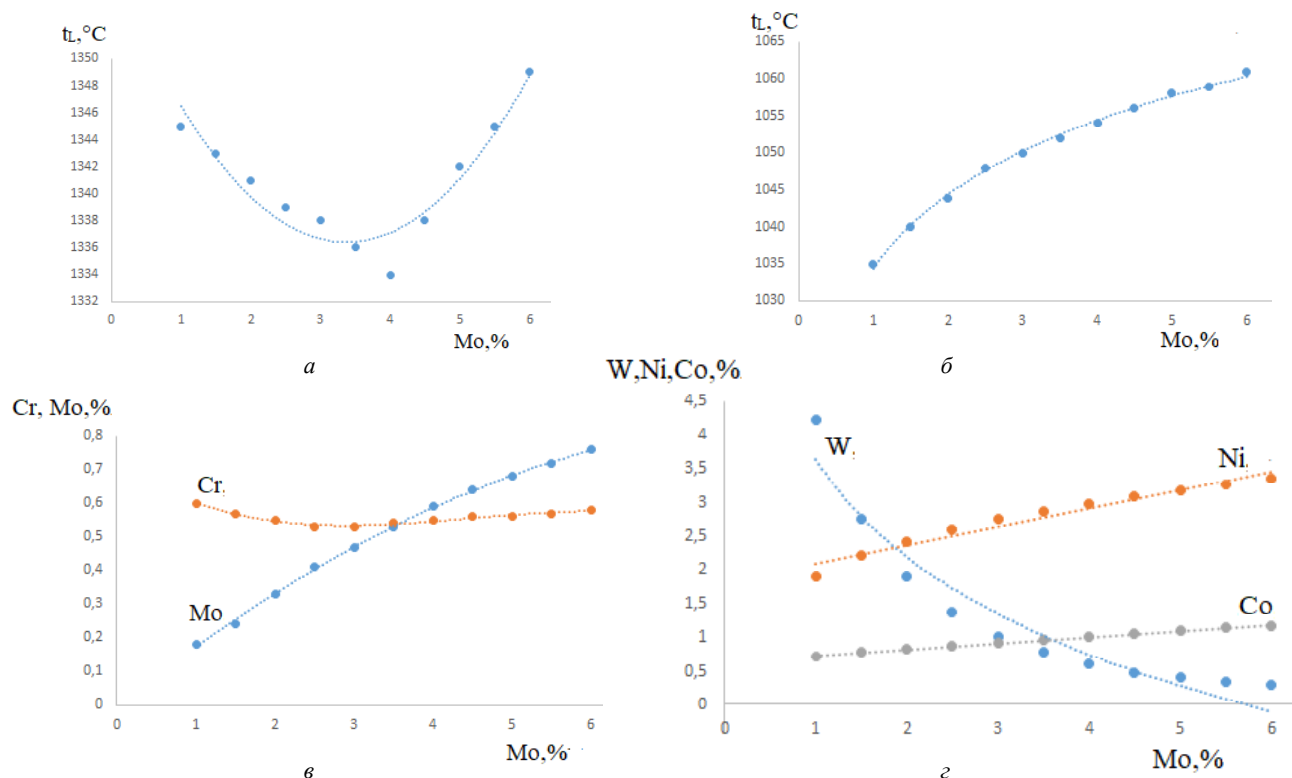


Рис. 2. Вплив вмісту молібдену в складі сплаву на температуру розчинення (виділення) карбідів типу MC (а) і $M_{23}C_6$ (б), кількість хрому і молібдену первинного карбіду (в), вольфраму, нікелю і кобальту вторинного карбіду (з)

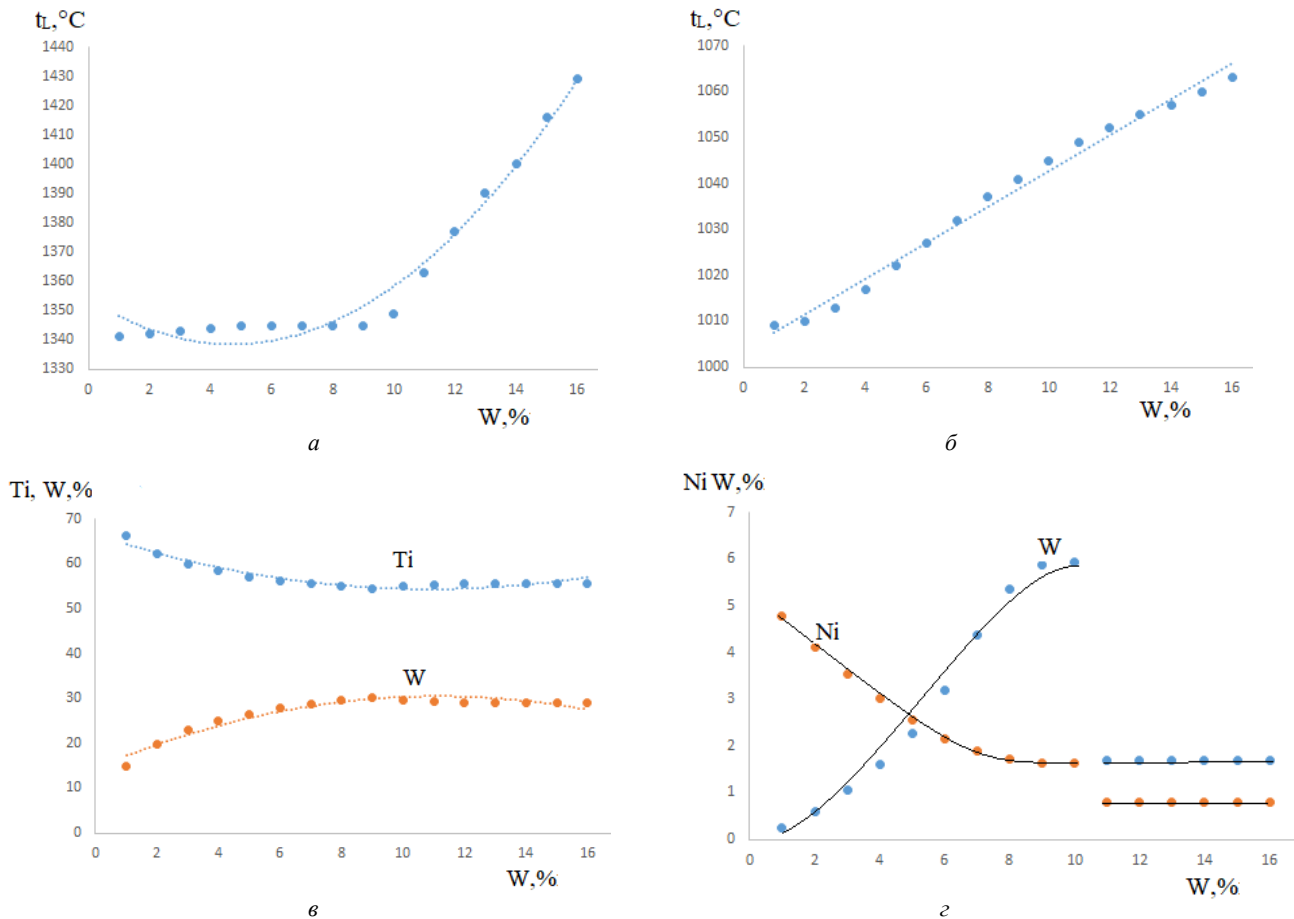


Рис. 3. Вплив вмісту вольфраму в складі сплаву на температуру розчинення (виділення) карбідів типу MC (а) і $M_{23}C_6$ (б), кількість титану і вольфраму у первинних карбідах (в), вольфраму і нікелю у вторинних карбідах (г)

Експериментально встановлено, що при збільшенні вмісту вольфраму в складі сплаву, більш ніж 10 %, в складі первинних карбідів його концентрація зростає до 29–30 % (рис. 3в), і описується параболічною залежністю (табл. 1). При концентрації вольфраму в складі сплаву 8 % і більше, титан практично не змінює свою концентрацію в складі первинних карбідів (рис. 3в). При цьому, в первинних карбідах концентрація титану знижується до 55 % по параболічній залежності (табл. 1).

Зміни концентрацій вольфраму і молібдену в складі первинних карбідів, можуть супроводжуватися утворенням ТЦП фази, типу Р, якщо в складі сплаву вміст вольфраму 8 % і більше. При цьому, в складі первинних карбідів концентрація хрому і молібдену знижується до 0,47 % і 0,06 %, відповідно.

Вміст вольфраму в складі сплаву робить істотний вплив на концентрацію легуючих елементів у вторинних карбідах. Так, при вмісті в складі сплаву вольфраму до 10 %, концентрація хрому і молібдену змінюється до 74 % і 12 % відповідно, а якщо вміст вольфраму в складі сплаву перевищує 10%, то знаходяться на рівні 89 % Cr і 1,9 % Mo.

Встановлено, що при концентрації вольфраму більше 10%, нікель і вольфрам в складі вторинних карбідів практично не змінюється і знаходяться на рівні

0,8 % і 1,8 % відповідно. При вмісті вольфраму 10 % в складі сплаву (рис. 3г), перегин залежностей, ймовірно, можна пов'язати з утворенням ТЦП фаз типу σ або μ , що може викликати збільшення структурної неоднорідності в результаті несприятливого перерозподілу елементів у фазах і чинити негативний вплив на характеристики міцності сплавів.

Висновки

1. На основі комплексного підходу для багатоконпонентних ЖНС отримані нові регресійні моделі, що дозволяють адекватно прогнозувати хімічний склад вторинних карбідів за хімічним складом сплаву, що дозволило реалізувати рішення задачі розрахункового прогнозування складу карбідів за хімічним складом сплаву.

2. Встановлено залежності впливу легуючих елементів на температуру розчинення (виділення) вторинних карбідів в сплаві системи Ni-13,5Cr-5Co-3,4Al-4,8Ti-7,3W-0,8Mo-0,015B-0,12C. Показано, що зміни у вигляді кривих, а також залежності температури від вмісту елемента добре корелюють з термодинамічними процесами, що відбуваються в системі, тобто на кривих спостерігаються екстремуми, які супроводжують зміну стехіометрії карбідів або виділення нових фаз.

3. Показано, що при підвищенні сумарної концентрації карбідоутворюючих елементів, ускладнюється і

хімічний склад карбідів типу $M_{23}C_6$. При збільшенні концентрації хрому карбід $M_{23}C_6$ прагне до утворення карбиду на основі хрому, однак при концентрації більше 15% підвищується ймовірність виділення ТЩП фаз різного типу. Вміст молибдену більше 2 % приводить до утворення ТЩП фази типу Р, а зі збільшенням його концентрації спостерігається перетворення карбиду МС в карбід типу M_6C . При концентрації вольфраму в складі сплаву більше 10 % помітно підвищується ймовірність виділення в структурі ТЩП фаз типу σ - і μ -, що призводить до негативного впливу на механічні властивості та жароміцність.

Список літератури

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. Кишкин С. Т. Литейные жаропрочные сплавы на никелевой основе / Кишкин С. Т., Строганов Г. Б., Логунов А. В. – М. : Машиностроение, 1987. – 116с.
4. Lizi He Effect of carbides on the creep properties of a Ni-base superalloy M963/ Lizi He, X. F. Sun, H. R. Guan // Materials Science and Engineering A. – 2005. – № 397(1). – P. 297–304. DOI: 10.1016/j.msea.2005.02.038
5. Паспорт на жаропрочный коррозионностойкий никелевый сплав ЗМИ-3У (ХН64ВМКЮТ) / А. Д. Коваль, С. Б. Беликов, А. Г. Андриенко и др. : утв. проректор по научной работе Н. С. Гамов. – Запорожье, 1995. – 30 с.
6. C. Sommitsch Microstructure control in processing nickel, titanium and other special alloys / C.Sommitsch, R.Radis, A.Krumphals, M.Stockinger, D.Huber// Microstructure Evolution in Metal Forming Processes. – 2012. – P. 337–383. <https://doi.org/10.1533/9780857096340.3.337>
7. Nowotnik A. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering/ A. Nowotnik. – Rzeszow University of Technology, Rzeszow, Poland, 2016. – 155. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.02574-1>
8. Hiroto Kitaguchi Microstructure-Property Relationship in Advanced Ni-Based Superalloys/ Hiroto Kitaguchi. – Open access peer-reviewed chapter, 2012. – 210 p. DOI: 10.5772/52011
9. B. G. Choi MC Carbide Decomposition during Thermal Exposure of Polycrystalline Ni-Base Superalloys / B. G. Choi // Solid State Phenomena. – 2007. – Vol. 124–126. – P. 1505–1508. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.124-126.1505>
10. Rui Hu Precipitation behavior of grain boundary M23C6 and its effect on tensile properties of Ni-Cr-W based superalloy/ Rui Hu, Jinshan Li, Guanghai Bai// Materials Science and Engineering A. – 2012. – № 548. – P. 83–88. DOI: 10.1016/j.msea.2012.03.092
11. Sisi Xiang Site preference of metallic elements in M23C6 carbide in a Ni-based single crystal superalloy / Sisi Xiang, Zhenju Shen, Shengcheng Mao// Materials & design. – 2017. – № 129. – P. 457-468. DOI: 10.1016/j.matdes.2017.05.023

Одержано 27.11.2020

Глотка А. А., Клочихин В. В., Ольшанецкий В. Ю. Вторичные карбиды в многокомпонентной системе Ni-13,5Cr-5Co-3,4Al-4,8Ti-7,3W-0,8Mo-0,015B-0,12C

Цель работы. Изучить специфику распределения легирующих элементов во вторичных карбидах в многокомпонентной системе Ni-13,5Cr-5Co-3,4Al-4,8Ti-7,3W-0,8Mo-0,015B-0,12C с помощью расчетного метода прогнозирования CALPHAD.

Методы исследований. для поиска закономерностей и расчета закономерностей распределения легирующих элементов в сплаве, был избран новый метод CALPHAD, и проведено моделирование термодинамических процессов кристаллизации фаз.

Полученные результаты. результаты термодинамических расчетов химического состава карбидов приведены в виде математических зависимостей. Получены уравнения влияния легирующих элементов на температуры растворения (выделения) вторичных карбидов. Показано, что полученные зависимости тесно коррелируют с термодинамическими процессами, происходящими в системе.

Научная новизна. Показано, что при повышении суммарной концентрации карбидообразующих элементов, осложняется и химический состав карбидов типа $M_{23}C_6$. Содержание молибдена более 2 % приводит к образованию ТЩП фазы типа Р, а с увеличением его концентрации наблюдается преобразование карбида МС в карбид типа M_6C . При концентрации вольфрама в составе сплава более 10 % заметно повышается вероятность выделения в структуре ТЩП фаз типа σ - и μ -, что оказывает отрицательное влияние на механические свойства и жаропрочность.

Практическая ценность. На основе комплексного подхода для многокомпонентных ЖНС получены новые регрессионные модели, позволяющие адекватно прогнозировать химический состав вторичных карбидов по химическому составу сплава, что позволило реализовать решение задачи расчетного прогнозирования состава карбидов по химическому составу сплава.

Ключевые слова: литейные жаропрочные никелевые сплавы, система легирования, метод CALPHAD, структура, состав карбидов.

Glotka O., Klochikhin V., Ol'shanetskii V. Secondary carbides in the multi-component system Ni-13,5Cr-5Co-3,4Al-4,8Ti-7,3W-0,8Mo-0,015B-0,12C

Purpose of work. To study the specifics of the distribution of alloying elements in secondary carbides in the multicomponent system Ni-13,5Cr-5Co-3,4Al-4,8Ti-7,3W-0,8Mo-0,015B-0,12C using the calculation method of CALPHAD prediction.

Research methods. To find regularities and calculate regularities of distribution of alloying elements in the alloy, the latest CALPHAD method was chosen, and modeling of thermodynamic processes of phase crystallization was carried out.

The obtained results. The results of thermodynamic calculations of the chemical composition of carbides are given in the form of mathematical dependences. The equation of the influence of alloying elements on the dissolution (separation) temperature of secondary carbides is obtained. It is shown that the obtained dependences are closely correlated with the thermodynamic processes occurring in the system.

Scientific novelty. It is shown that with increasing the total concentration of carbide-forming elements, the chemical composition of carbides of the $M_{23}C_6$ type becomes more complicated. The molybdenum content of more than 2 % leads to the formation of TSHP phase type P, and with increasing concentration there is a conversion of MC carbide to carbide type M_6C . When the concentration of tungsten in the alloy is more than 10 %, the probability of separation of phases of the σ - and μ - type in the structure of the TSP significantly increases, which has a negative effect on the mechanical properties and heat resistance.

Practical value. On the basis of an integrated approach for multicomponent ZHNS new regression models are obtained, which allow adequately predict the chemical composition of secondary carbides by the chemical composition of the alloy, this allowed to solve the problem of calculated prediction of carbide composition by chemical composition of the alloy.

Key words: cast heat-resistant nickel alloys, alloying system, CALPHAD method, structure, carbide composition.
