

УДК 669.245.018.044:620.193.53

Глотка О.А.¹, Грешта В.Л.², Обносів К.В.³

¹ канд. техн. наук, доцент, НУ «Запорізька політехніка», Запоріжжя

² канд. техн. наук, професор, НУ «Запорізька політехніка», Запоріжжя

³ аспірант, НУ «Запорізька політехніка», Запоріжжя

УДОСКОНАЛЕННЯ СКЛАДУ ЗМІЦНЮЧОЇ ФАЗИ ЖАРОМІЦНОГО НІКЕЛЕВОГО СПЛАВУ

На теперішній час, в умовах обмежених можливостей використання коштовних матеріалів для розвитку авіабудування, є нерациональним. Тому винахідники, інженери та технологи почали впроваджувати енергоефективні та заощадливі технології та матеріали. Найдорожчими матеріалами в авіадвигунобудуванні є жароміцні сплави на основі нікелю. Нажаль, в Україні не існує місць видобутку даного елемента, тому використання вказаних сплавів дуже обмежено. Важливим напрямом вдосконалення цих сплавів з метою підвищення їх експлуатаційних властивостей є метод комп'ютерного конструювання, який замінив існуючий раніше малоефективний спосіб підбору легуючих компонентів методом [1-2].

Отже, вирішення проблеми вдосконалення хімічного та фазового складу монокристалічних жароміцних нікелевих сплавів є актуальним науково-технічним завданням.

Прогнозуючі розрахунки проводилися за вихідним хімічним складом сплаву з визначенням найбільш ймовірного фаз, а також їх хімічного складу після моделювання процесу кристалізації. Отримані залежності мають досить високі коефіцієнти детермінації $R^2 \geq 0,9$ і можуть використовуватись для прогнозуючих розрахунків. Експериментально склад фаз визначали на растровому електронному мікроскопі РЕМ-106І з системою енергодисперсійного рентгеноспектрального мікроаналізу. Даним методом вивчали морфологію і хімічний склад фаз, що виділилися в структурі сплаву. Для перевірки теоретичних залежностей було обрано сплав (таб.1), який відноситься до системи, що досліджується.

Таблиця 1 – Хімічний склад сплаву

Вміст елемента, % за масою						
Re	Cr	Co	Al	Ru	Ta	W
5.0-6.0	2.5-3.0	6.0-7.0	6.0-7.0	4.0-5.0	4.5-5.5	4.0-5.0

Сплав термічно обробляють за наступним режимом: гомогенізація 1285-1320°C, витримка 26 годин, двоступінчасте старіння 1130°C та 870°C по 32

години витримка. Така обробка суттєво зменшує кількість ($\gamma+\gamma'$) евтектики та збільшує кількість зміцнюючої фази.

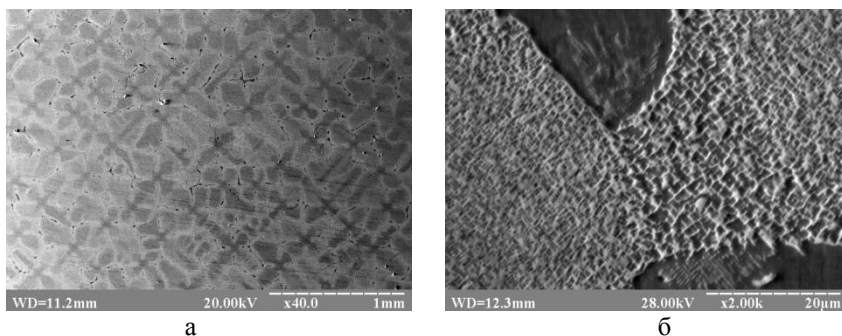
У системі Ni-Al-Re-Ru-Cr-Co-W-Ta залежно від вмісту легуючих елементів можливе утворення безліч фаз, проте основними фазами для цієї системи залишаються такі: γ - твердий розчин; евтектика $\gamma+\gamma'$; інтерметалід типу γ' на основі (Ni3Al). Основними елементами, які утворюють зміцнюючу γ' - фазу, є алюміній і тантал, іноді можлива їх заміна ренієм і рутенієм, але в основному ці елементи знаходяться в γ - твердому розчині. Надалі розглянемо вплив хімічного складу системи на хімічний склад γ - і γ' - фаз, кількість γ' - фази та вплив фазового складу на властивості.

При введенні алюмінію до 3% у досліджувану систему призводить до розчинення його в γ - твердому розчині і не призводить до утворення γ' - фази. Тільки при перевищенні 3% алюмінію у сплаві утворюється зміцнювальна фаза у кількості 21% і поступово зростає до 60% при вмісті алюмінію 6%. Температура розчинення γ' - фази так само пряmlinійно зростає від 863°C до 1235°C відповідно. Порівнюючи зміни легуючих елементів у фазах, можна стверджувати, що збільшення алюмінію в системі призводить до збільшення його в обох фазах. Інші елементи практично не змінюють вміст: кобальт - 91%; рутеній - $6\pm 1\%$; вольфрам - $3\pm 1\%$; реній - 5 ± 1 ; хром - $4\pm 1\%$, крім танталу. Кількість Ta одночасно зменшується і у твердому розчині, і в зміцнюючій фазі, що може бути пов'язане зі зростанням кількості γ' - фази

Незважаючи на збільшення температури розчинення γ' - фази в системі утворюються ТЦП- фази при 3% ренію (HCP_A3: 47.7 Ru, 40.9 Re, 5.0 Co, 2.58Mo) і при 6% ренію (P фаза: 55 Re, 4 Ru, 30 W, 5.8 Ni, 2.4 Co, 1.99 Cr) які значно знижують міцність сплаву. При цьому збільшення кількості рутенію в системі призводить до збільшення кількості γ' - фази всього на 3 % і практично не впливає на температуру її розчинення, проте його кількість зростає з 0.59 до 3.5% у γ' - фазі та з 1.25 до 8.2% у твердому розчині. Додавання рутенію в сплав не призводить до утворення ТСП-фаз.

Вплив ренію та танталу на співвідношення параметрів кристалічних решіток γ' - та γ - фаз (mismatch) при температурі 20°C пояснюється тим, що тантал присутній у γ' -фазі, що збільшує mismatch, а реній великою кількістю знаходиться в твердому розчині, що знижує mismatch. Між 5 і 6% ренію та танталу в сплаві спостерігається рівноваги mismatch.

Отримані вище залежності проходили апробацію на промисловому жароміцному монокристалічному сплаві. За допомогою енергодисперсійного аналізу на растровому електронному мікроскопі РЕМ-106І проведено дослідження мікроструктури (Рис. 1) та визначено хімічні склади фаз. Встановлено, що результат розрахунковим методом має добру збіжність з експериментальними даними.



Риунок 1- Мікроструктура сплаву при збільшенні $\times 40$ (а) та $\times 2000$ (б)

На основі комплексного підходу до системи Ni-Al-Re-Ru-Cr-Co-W-Ta отримані нові регресійні моделі, що дозволяють адекватно прогнозувати хімічний склад фаз по хімічному складу сплаву. Показано, що отримані залежності змінюються від вмісту елемента і тісно корелюють з термодинамічних процесів, що відбуваються в системі, що супроводжують зміною складу фаз.

Встановлено, що при збільшенні концентрації танталу збільшується кількість γ' - фази та температура її повного розчинення. Збільшення вмісту ренію до 3% призводить до утворення ТЩП-фази (НСР_А3), а при 6% ренію (Р-фаза) які значно знижують міцність сплаву. Між 5 і 6% ренію та танталу в сплаві спостерігається рівноваги mismatch. А збільшення кількості ренію та танталу в сплаві призводить до збільшення жароміцності.

Проведено порівняльну оцінку розрахункових результатів, отриманих за регресійними моделями та експериментальними даними, отриманими методом рентгенівської спектроскопії. Аналіз результатів дав хорошу збіжність, що дає можливість рекомендувати їх для використання під час прогнозування структурних складових як у промислових сплавах, так і при розробці нових матеріалів.

Список використаних джерел

1. Glotka O.A. Modelling the composition of carbides in nickel-based superalloys of directional crystallization / O.A. Glotka O.A. // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2020. - № 102/1. – P. 5-15. DOI: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.6324>
2. Glotka, A.A. Distribution of Alloying Elements in the Structure of Heat-Resistant Nickel Alloys in Secondary Carbides / A.A. Glotka, S.V. Gaiduk // J Appl Spectrosc. – 2020. - №87. – P.812–819. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10812-020-01075-2>