

К.В. Обносів¹, В.Л. Грешта², О.А. Глотка², О.Ю. Дроль³

¹ Державний науково-дослідний інститут авіації, Київ

² Національний університет "Запорізька політехніка", Запоріжжя

³ Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

ОПТИМІЗАЦІЯ ФАЗОВОГО СКЛАДУ ЖАРОМІЦНОГО НІКЕЛЕВОГО СПЛАВУ, ЩО ВИКОРИСТОВУЄТЬСЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ НАПРАВЛЯЮЧИХ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ТА УСТАНОВОК

У статті наведено методичний підхід щодо встановлення залежностей між хімічним та фазовим складом монокристалічного жароміцного сплаву на нікелевій основі, який використовується в газотурбобудуванні. Як основною ознакою стійкості деталей, було встановлено залежності між кількістю легуючих елементів та жароміцністю (довготривалою міцністю) сплаву. При цьому для вказаних легуючих елементів були встановлені межі легування та показані зміни у складі зміцнюючої фази. Також запропоновано математичні моделі які описують вище згадані процеси.

За результатами теоретично отриманих моделей було проведено розрахунок промислового сплаву системи Ni-Al-Re-Ru-Cr-Co-W-Ta. Розрахункові дані порівнювали з результатами отриманими при енергодисперсійному аналізі на растровому електронному мікроскопі РЕМ-106І. Аналіз отриманих результатів показав гарну збіжність розрахункових і практично отриманих даних. Рекомендовано дану методику використовувати в промисловості для зниження кількості дослідів.

Ключові слова: жароміцний нікелевий сплав, монокристал, легуючі елементи, фазовий склад, структура.

Вступ

Постановка проблеми. У газотурбінних двигунах та установках направляючі лопатки необхідні для створення спрямованих потоків робочих газів. Застосування монокристалічних жароміцних нікелевих сплавів для виготовлення лопаток турбін високого тиску дозволило підвищити їхню міцність і ресурс. Удосконалення існуючих композицій призводить до підвищення температури експлуатації загалом на 25 градусів щороку. Для стабілізації фазового складу та зниження виділень топологічно щільно пакованих (ТЦП) фаз, монокристалічні сплави легують ренієм та рутенієм. Однак нераціональне введення цих елементів призведе не тільки до подорожчання виробу, але і виділення несприятливих фаз.

Аналіз останніх досліджень і публікацій свідчить, що використання матеріалів для розвитку авіабудування є високовартісним. Тому винахідники, інженери та технологи почали впроваджувати енергоефективні й заощадливі технології та матеріали [1...3]. Найдорожчими матеріалами в авіадвигунобудуванні є жароміцні сплави на основі нікелю. На жаль, в Україні не існує місць видобутку даного елемента, тому використання вказаних сплавів дуже обмежено.

Чимало робіт присвячено жароміцним сплавам, розроблених для виготовлення лопаток, з гетерофазною структурою ($\gamma'+\gamma$), де γ' -фаза – на основі інтерметаліду Ni₃Al, γ -фаза – твердий багатокомпонентний розчин [4...6]. Сплави такого класу, леговані алюмінієм, титаном, ренієм, рутенієм, танталом масова частка яких складає від 1 % до 10 %, та загальним вмістом більше 50 %. Об'ємна частка γ' -фази в яких може досягає 80 %...90 %. Вони відрізняються від інших сплавів стабільністю структурно-фазових характеристик, що забезпечує опір високотемпературної повзучості та окислення, а також працездатність матеріалу до 1250°C. Важливим напрямом удосконалення цих сплавів із метою підвищення їх експлуатаційних властивостей є метод комп'ютерного конструювання, який замінив існуючий раніше малоефективний метод підбору легуючих компонентів [6...12].

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

Мета статті – визначити залежності між хімічним та фазовим складом у монокристалічній системі Ni-Al-Re-Ru-Cr-Co-W-Ta та визначити

залежності жароміцності від вмісту легуючих елементів у сплаві.

Виклад основного матеріалу

Моделювання термодинамічних процесів утворення фаз здійснювали для системи Ni-Al-Re-Ru-Cr-Co-W-Ta, в якій змінювали покровоно γ' -утворюючі елементи в межах, наведених у таблиці 1. У системі багатокомпонентного легування, діапазон варіювання елементами був обраний з міркувань максимальної та мінімальної кількості елемента, що вводиться в жароміцні нікелеві сплави (ЖНС). Зміни фазового складу у процесі кристалізації (охлажденні) у структурі сплавів здійснювалося методом термодинамічного моделювання за допомогою CALPHAD методу в програмі JMatPro. Сутність методу полягає у встановленні енергії Гібса для кожної ймовірної фази у системі в залежності від температури.

Діапазон варіювання вмісту γ' -утворюючих елементів у системі Ni-Al-Re-Ru-Cr-Co-W-Ta наведений в таблиці 1.

Таблиця 1

Діапазон варіювання вмісту хімічних елементів

Вміст елементу, % за масою			
Re	Ta	Ru	Al
1...9	1...9	1...6	1...5

Джерело: розроблено авторами

Моделювання процесів дозволяє провести розрахункове прогнозування та порівняльну оцінку впливу легуючих елементів на склад γ - і γ' -фаз, на їх розподіл та фазовий склад у досліджуваних композиціях.

Моделювання процесу кристалізації сплаву здійснювалося від температури рідкого стану (1600°C) до кімнатної температури (20°C) з температурним кроком 10°C на усьому діапазоні, що дозволило визначити температурну послідовність виділення фаз у процесі кристалізації.

Прогнозуючі розрахунки проводилися за вихідним хімічним складом сплаву з визначенням найбільш імовірного утворення 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 прогнозування 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.2), який належить до системи, що досліджується.

Хімічний склад сплаву наведений в таблиці 2.

Таблиця 2

Хімічний склад сплаву

Вміст елементу, % за масою						
Re	Cr	Co	Al	Ru	Ta	W
5...6	2,5...3	6...7	6...7	4...5	4,5...5,5	4...5

Джерело: розроблено авторами.

Сплав термічно обробляють за таким режимом: гомогенізація 1285°C ... 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.

Значення якісного аналізу в кількісний перераховувалися автоматично за програмою приладу. Відносна похибка методу становить $\pm 0,1$ % (за масою).

У системі Ni-Al-Re-Ru-Cr-Co-W-Ta залежно від вмісту легуючих елементів можливе утворення велика кількість фаз, проте основними фазами для цієї системи залишаються такі: γ - твердий розчин; евтектика $\gamma+\gamma'$; інтерметалід типу γ' на основі (Ni_3Al). Основними елементами, які утворюють зміцнюючу γ' - фазу, є алюміній і тантал, іноді можлива їх заміна ренієм і рутенієм, але в основному реній і рутеній 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.

Введення алюмінію до 3 % у досліджувану систему призводить до розчинення його в γ - твердому розчині і не призводить до утворення γ' - фази. Тільки за перевищення 3 % алюмінію у сплаві утворюється зміцнювальна фаза у кількості 21 % і поступово зростає до 60 % за вмісту алюмінію 6 %. Температура розчинення γ' - фази так само прямолінійно 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 (рис. 1). Інші елементи практично не змінюють вміст: кобальт – 91 %; рутеній - 6 ± 1 %; вольфрам – 3 ± 1 %; реній – 5 ± 1 %; хром – 4 ± 1 %, крім танталу. Кількість Та одночасно зменшується і у твердому розчині, і у зміцнюючій фазі, що може бути пов'язане зі зростанням кількості γ' - фази.

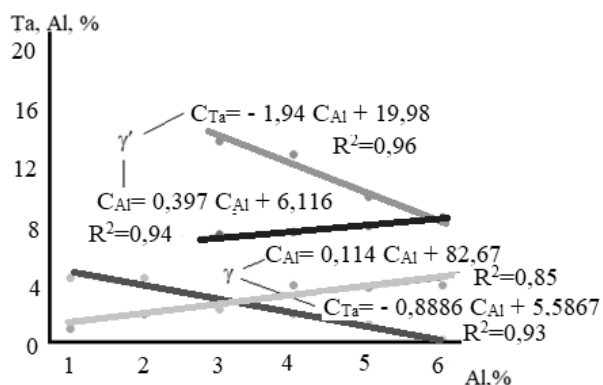


Рис. 1. Розподіл танталу та алюмінію між γ' - та γ - фазами при введенні алюмінію в систему
Джерело: розроблено авторами

Збільшення кількості танталу в системі призводить до зростання температури розчинення зміцнюючої фази (Рис. 2 а), що зв'язується збільшенням сили міжатомних зв'язків. Також зростає кількість γ' - фази зі збільшенням цього елемента (Рис. 2 б) і збільшується його переважання в зміцнюючій фазі при перевищенні 5 %. Таким чином, γ' - фаза збільшує у своїй основі кількість танталу. Інші легуючі елементи практично не змінюють свою присутність як у γ' - фазі так і в γ - твердому розчині.

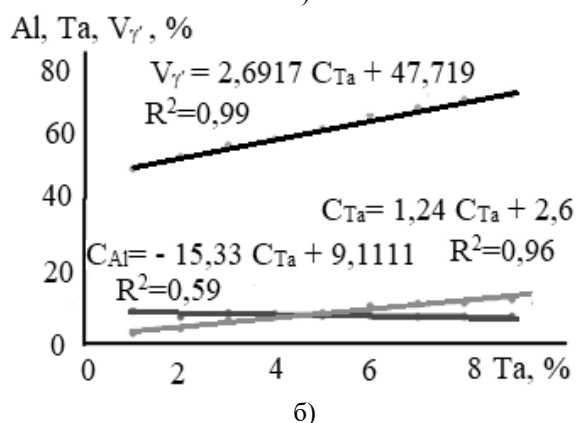
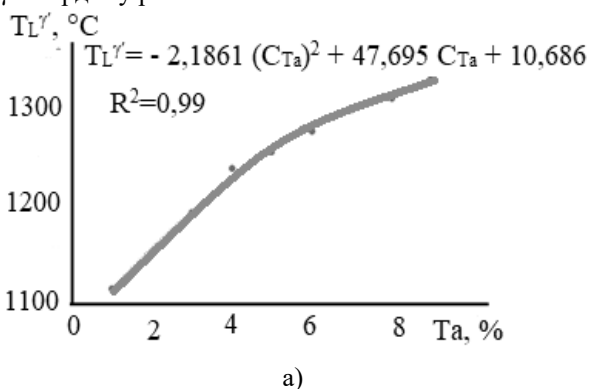


Рис. 2. Вплив кількості танталу:
а) - на температуру розчинення; б) - на кількість, хімічний склад γ' - фази
Джерело: розроблено авторами

Реній та рутеній практично не впливають на склад інших елементів у γ' - фазі або γ - твердому розчині, але сприяють виділенню ТЦП - фаз. Так, зі збільшенням у складі системи ренію, його кількість у γ' -фазі зростає з 0,14 % до 0,91 %, а обсяг γ' -фази з 57 % до 62 % (Рис. 3).

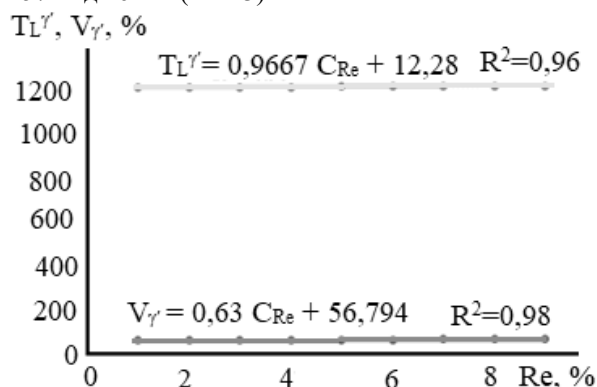


Рис. 3. Вплив ренію на кількість та температуру розчинення зміцнюючої фази
Джерело: розроблено авторами

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, 2,58 Mo) 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 ТЦП-фаз.

Вплив кількості ренію та кількості танталу на співвідношення параметрів кристалічних решіток γ' та γ - фаз за температури 20 °C пояснюється тим, що тантал присутній у γ' -фазі, що збільшує mismatch (невідповідність), а реній близько 9 % знаходиться в твердому розчині, що знижує mismatch. Між 5 % і 6 % ренію та танталу у сплаві спостерігається рівновага mismatch.

Отримані вище залежності проходили апробацію на промисловому жароміцному монокристалічному сплаві. За допомогою енергодисперсійного аналізу на растровому електронному мікроскопі РЕМ-1061 проведено дослідження мікроструктури (Рис. 4) та визначено хімічні склади фаз. Встановлено, що результат отриманий розрахунковим методом має добру збіжність з експериментальними даними (Табл. 3).

Хімічний склад γ' - та γ - фаз розрахований за отриманими залежностями та визначений експериментально методом енергодисперсійного аналізу за 20°C наведений в таблиці 3.

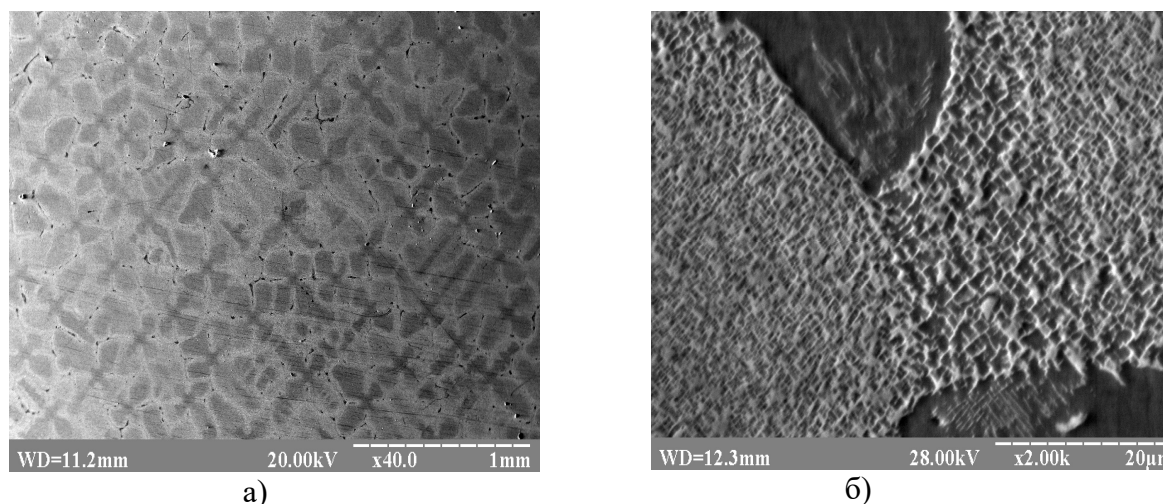


Рис. 4. Мікроструктура сплаву: а) – при збільшенні $\times 40$; б) – при збільшенні $\times 2000$
Джерело: розроблено авторами

Таблиця 3

Хімічний склад γ' - та γ - фаз

Метод отримання результатів	Вміст елементу, % мас.							
	Ni	Al	Ta	W	Co	Ru	Re	Cr
Розрахунковий склад γ' - фази	71,90	8,49	7,96	4,45	2,38	2,4	0,5	0,9
Розрахунковий склад γ - фази	64,12	3,15	0,8	3,42	10,36	7,35	7,56	4,26
Експериментальний склад γ' - фази	72,78	9,57	8,01	3,78	2,81	1,84	0,31	0,42
Експериментальний склад γ - фази	62,25	2,77	0,63	3,73	12,46	8,14	8,29	4,5

Джерело: розроблено авторами

Проведений аналіз таблиці 3 свідчить, що розрахункові та експериментальні дані добре узгоджуються між собою практично за всіма елементами. Спостерігається підвищений вміст вольфраму, кобальту, ренію та рутенію у твердому розчині та нікелю, алюмінію, танталу у γ' - фазі. Таким чином, розрахункові дані щодо визначення типу та хімічного складу фаз свідчать хорошу збіжність та узгодженість з експериментальними даними, отриманими методом електронної мікроскопії.

Висновки

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 із термодинамічними процесами, що відбуваються в системі, та супроводжуються 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 (HCP_A3), а за 6 % ренію (P-фаза) значно

знижують міцність сплаву. За вмісту ренію і танталу у сплаві від 5 % до 6 % спостерігається рівновага 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 розробки нових матеріалів.

Під час подальших досліджень щодо оптимізації хімічного складу жароміцних нікелевих сплавів, які використовуються в газотурбінних двигунах і установках пропонується визначити взаємозв'язок між хімічним складом сплаву, хімічним складом фаз, властивостями. Це дасть змогу збільшити термін експлуатації та міжремонтний ресурс, що знизить вартість кінцевого виробу.

Список літератури

1. Kvasnytska, Y.H. High-Temperature Salt Corrosion of a Heat-Resistant Nickel Alloy/ Y.H. Kvasnytska, L.M. Ivaskevych, O.I. Balytskyi // *Material Sciences*/ - 2020 - №56. – P. 432–440. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-020-00447-5>
2. Min, P.G. Development of Corrosion and Heat-Resistant Nickel Alloys and their Production Technology with the Aim of Import Substitution / P.G. Min, V.V. Sidorov, V.E. Vadeev // *Power Technol Eng.* – 2020. - №54. – P. 225–231. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10749-020-01195-x>
3. [Yonghua, R.](#) Characterization of M23C6 carbide precipitated at grain boundaries in a superalloy / [R. Yonghua, Hu. Geng, G. Yongxiang](#) // *Metallography*. – 1989. - №22(1). – P. 47-55. DOI: [10.1016/0026-0800\(89\)90021-9](https://doi.org/10.1016/0026-0800(89)90021-9).
4. Jadav, J. Effects of Strain Rate and Temperature on Tensile Properties, Deformation and Dynamic Strain Ageing Behavior of Ni-Base Superalloy / J. Jadav, K.V. Rajulapati, Rao. Bhanu Sankara // *INAE Letter.* – 2019. - №4. – P. 241–250. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41403-019-00083-9>
5. Chen, K. Microstructure and homogenization process of as-cast GH4169D alloy for novel turbine disk / K. Chen, Sy. Rui, F. Wang // *Int J Miner Metall Mater.* – 2019. - №26. – P. 889–900. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-019-1802-0>
6. Biroasca, S. Crystallographic Orientation Relationship with Geometrically Necessary Dislocation Accumulation During High-Temperature Deformation in RR1000 Nickel-Based Superalloy/ S. Biroasca // *Metall Mater Trans A.* – 2019. - №50. – P.534–539. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-018-5036-y>
7. Seidel, A. Additive Manufacturing of Powdery Ni-Based Superalloys Mar-M-247 and CM 247 LC in Hybrid Laser Metal Deposition / A. Seidel, T. Finaske, A. Straubel // *Metall Mater Trans A.* – 2018. - №49. – P.3812–3830. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-018-4777-y>
8. Ritt, P. Application of Plasma Spraying as a Precursor in the Synthesis of Oxidation-Resistant Coatings/ P. Ritt, O. Lu-Steffes, R. Sakidja // *J Therm Spray Tech.* – 2013. - №22. – P. 992–1001. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11666-013-9947-2>
9. 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>
10. 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>
11. Avila-Davila, E.O. Evaluation of Microstructural Deterioration for a Directionally Solidified Ni-Based Superalloy by X-ray Computed Tomography / E.O. Avila-Davila, L.M. Palacios-Pineda, F.O. Canto-Escajadillo // *J. of Materi Eng and Perform.* - 2021. - №56. – P. 235-267. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-020-05377-6>
12. Liang, T. Role of script MC carbides on the tensile behavior of laser-welded fusion zone in DZ125L/IN718 joints at 650 °C / T. Liang, L. Wang, Y. Liu // *J Mater Sci.* – 2020. - №55. – P.13389–13397. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-020-04931-w>

Надійшла до редколегії 31.10.2024

Схвалена до друку 13.11.2024

Відомості про авторів

Обносов Кирило Вікторович

гравітний науковий співробітник
Державного науково-дослідного інституту авіації,
Київ, Україна
<https://orcid.org/0009-0002-3955-9752>

Грешта Віктор Леонідович

кандидат технічних наук
ректор Національного університету
“Запорізька політехніка”,
Запоріжжя, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4589-6811>

Information about the authors

Kirill Obnosov

Leading Researcher
of State Research Institute of Aviation,
Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0009-0002-3955-9752>

Viktor Greshta

Candidate of Technical Science
Rector National University
“Zaporizhzhia Polytechnic”
Zaporizhzhia, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-4589-6811>

Глотка Олександр Анатолійович

кандидат технічних наук

доцент

доцент кафедри “Фізичне матеріалознавство”

Національного університету “Запорізька політехніка”,

Запоріжжя, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-3117-2687>

Olexander Glotka

Candidate of Technical Science

Associate Professor

Associate Professor “Physical Materials Science” Department

National University “Zaporizhzhia Polytechnic”,

Zaporizhzhia, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-3117-2687>

Дроль Олександр Юрійович

магістр

старший викладач

Харківського національного університету Повітряних Сил

імені Івана Кожедуба,

Харків, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-5472-208X>

Oleksandr Drol

Master

Senior Instructor

of Ivan Kozhedub

Kharkiv National Air Force University,

Kharkiv, Ukraine

<https://orcid.org/0000-0002-5472-208X>

OPTIMIZATION OF THE PHASE COMPOSITION OF A FLUID NICKEL ALLOY FOR GAS TURBINE ENGINES AND INSTALLATIONS

K. Obnosov, V. Greshta, O. Glotka, O. Drol

The article presents a methodical approach to establishing the relationships between the chemical and phase composition of a single-crystal heat-resistant nickel-based alloy used in gas turbine construction. As the main feature of the stability of the parts, the relationship between the number of alloying elements and the heat resistance (long-term strength) of the alloy was established. At the same time, alloying limits were established for the indicated alloying elements and changes in the composition of the strengthening phase were shown. Mathematical models describing the above-mentioned processes are also proposed.

Establishing dependencies will allow with high accuracy: to predict the phase composition and properties of alloys of a given class, to carry out the modernization of existing compositions, and will make it possible to develop new compositions of alloys with the lowest costs.

During the study, it was established that with an increase in the concentration of tantalum, the amount of the γ' -phase and the temperature of its complete dissolution increase. An increase in the content of rhenium to 3% leads to the formation of the TCP-phase (HCP_A3), and at 6% rhenium (P-phase), which significantly reduces the strength of the alloy. An equilibrium mismatch is observed between 5 and 6% of rhenium and tantalum in the alloy. An increase in the amount of rhenium and tantalum in the alloy leads to an increase in heat resistance

Based on the results of the research, new regression models were established that allow adequately predicting the chemical composition of the phases based on the chemical composition of the alloy. It is shown that the obtained dependences change depending on the content of the element and are closely correlated with the thermodynamic processes occurring in the system, which are accompanied by a change in the composition of the phases. The reliability of the obtained models is determined by the coefficient of determination, which was greater than 0.9 for all dependencies.

As an example, the industrial composition of the alloy was chosen and a comparison of calculated and practical data was carried out. Based on the results, a recommendation was put forward to implement the obtained dependencies in industry.

Keywords: nickel-based super alloy, single crystal, alloying elements, phase composition, structure.