

УДК 669.245.018.044:620.193.53

Гончаренко Д.А.<sup>1</sup>, Глотка О.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>студ гр. ІФ - 211м НУ «Запорізька політехніка»

<sup>2</sup>канд. техн. наук, доц. НУ «Запорізька політехніка»

## МАТЕМАТИЧНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ

Одна з ключових проблем сучасного авіаційного двигунобудування - підвищення робочої температури газу. За останні 50 років розвитку реактивної авіації температура водневомісний газу на вході в турбіну зросла з 1200 До в двигунах другого покоління до 1800-1950 К в двигунах п'ятого покоління. Приблизно 70% цього приросту було отримано за рахунок вдосконалення систем повітряного охолодження лопаток газових турбін, а 30% - в результаті підвищення рівня механічних властивостей жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС) [1 - 3].

Мета даної роботи - отримання прогнозують регресійних моделей, за допомогою яких, можна адекватно розраховувати критичні температури для ЖНС равноосной кристалізації, без проведення попередніх експериментів.

Для експериментально-теоретичних досліджень температурної працездатності сформована робоча вибірка сплавів, що складається з відомих промислових ЖНС для рівновісного лиття вітчизняного і зарубіжного виробництва, наступних марок: ЖС6У, ЖС6К, ВЖЛ12У, ВЖЛ12Е, В1900, IN 100, MAR M200, MAR M246, TRW NASA 6A , WAZ16, U500, U700, ЖСЗДК, ЖСЗЛС, ВХ4Л, ЧС88У, ЧС104, RENE77, IN939, IN738LC, СМ681, RENE220, NFP1916, ЧС70С, СМ939WELDABLE. Вибірка сплавів була зроблена з позиції різноманітності хімічних складів (систем легування), які за змістом основних елементів мають широкий діапазон легування.

Отримані значення оброблялися в програмному комплексі Microsoft Office в пакеті EXCEL методом найменших квадратів з отриманням кореляційних залежностей типу «параметр-властивість» з отриманням математичних рівнянь регресійних моделей, які оптимально описують ці залежності і побудовою ліній трендів. Залежності мають досить високий коефіцієнт детермінації  $R^2 \geq 0,85$  і придатні для визначення температурних характеристики ЖНС.

З огляду на те, що жароміцність сплавів в значній мірі визначається термодинамічної стабільністю фаз, яку пропонують оцінювати по температурах  $t_{LD}$ ,  $t_{EBT}$ ,  $t_S$ , і  $t_L$  розробка методики розрахунку цих значень від хімічного складу сплаву є актуальним завданням. Всі компоненти, що використовуються при легуванні ЖНС, можна умовно розділити на три групи: розчиняються головним чином в  $\gamma$ -твердому розчині (Co, Cr, Mo, W, Re), розчиняються переважно в  $\gamma'$ -фазі (Al, Ti, Ta, Hf) і карбідоутворюючі елементи (Ti, Ta, Hf, Nb, V, W, Mo, Cr).

З іншого боку, до складу  $\gamma'$ - фази можуть входити багато елементів: Al, Ti, Nb, Cr, Co, Mo, W, V і ін. Але їх вміст в  $\gamma'$ - фазі і вплив на її кількість в структурі різному. Це вплив пов'язано зі здатністю елементів утворювати з

нікелем стабільні інтерметалідним фази типу  $Ni_3Me$ . Звідси, на критичні температури сплавів впливають не тільки елементи, які відносяться до  $\gamma'$ -утворюючим, а й ті, які класифікуються як  $\gamma$ -твердорозчинні зміцнювачі.

За допомогою побудованих регресійних моделей можна з високою точністю прогнозувати критичні температури сплавів без попередніх експериментів методом диференціального термічного аналізу, а також розраховувати ширину температурного інтервалу для ефективного гомогенізуючого відпалу в залежності від вмісту легуючих елементів в сплаві.

Однак зв'язок співвідношення  $K\gamma'$  з температурою ліквідусу виявилася неоднозначною. Початкова залежність мала низький коефіцієнт детермінації ( $R^2 \geq 0,1$ ). Це пояснюється тим, що при температурах близьких до температури плавлення, в структурі присутній дві фази, рідина і  $\gamma$ -твердий розчин. Температура ліквідус пов'язана з термодинамічної стабільністю твердого розчину, на яку впливають тугоплавкі елементи, що в ньому знаходяться, вони розчиняються переважно в  $\gamma$ -твердому розчині і істотно підвищують термодинамічну стабільність фаз в ЖНС через низький коефіцієнта дифузії, що призводить до гальмування рухливості атомів в  $\gamma$ -фазі. Тому, обробивши експериментальні дані, і слідуючи вище викладеним судженням, вперше запропоновано наступне співвідношення елементів: , яке дає можливість досить точно прогнозувати температуру ліквідус і температурний інтервал кристалізації ЖНС. З підвищенням значення  $K\gamma$  спостерігається деяке збільшення температури ліквідус, але максимальні значення при цьому не спостерігаються. Протилежна поведінка спостерігається в інтервалі гомогенізації ЖНС, при значеннях  $K\gamma > 5$ ,  $\Delta t_{кр}$  значно збільшується і досягає максимальних значень.

### **СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ 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. P. Jonšta Structural characteristics of nickel super alloy INCONEL 713LC after heat treatment / P. Jonšta, Z. Jonšta, J. Sojka, L. Čížek, A. Hernas // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2007. Vols. 21. – PP. 29-32.

3. С. В. Резник Расчетно-экспериментальное исследование механического и теплового контактов керамических лопаток с металлическим диском в газотурбинных двигателях / В. Резник, Д. В. Сапронов, П. В. Просунцов //Инженерно-физический журнал. – 2018. – Том 91, №6 – С. 1438-1444