

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 669.245.018:620.193.53

А. А. ГЛОТКА^{1*}, В. Е. ОЛЬШАНЕЦКИЙ², С. В. ГАЙДУК³

^{1*}Каф. «Физическое материаловедение», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063, тел. +38 (096) 427 56 51, эл. почта Glotka-alexander@ukr.net, ORCID 0000-0002-3117-2687

²Каф. «Физическое материаловедение», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063, тел. +38 (067) 145 67 21, эл. почта olshan@zntu.edu.ua, ORCID 0000-0002-9485-4896

³Каф. «Физическое материаловедение», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, Запорожье, Украина, 69063, ORCID 0000-0002-5724-9566

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СВОЙСТВ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Цель. Основной целью данной работы является получение прогнозирующих регрессионных моделей, с помощью которых можно адекватно рассчитывать механические свойства жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС), без проведения предварительных экспериментов. **Методика.** Для проведения исследований были выбраны промышленные сплавы для равноосного литья отечественного и зарубежного производства. Значения обработаны методом наименьших квадратов с получением корреляционных зависимостей и математических уравнений регрессионных моделей, которые оптимально описывают эти зависимости. **Результаты.** После обработки экспериментальных данных впервые предложено соотношение легирующих элементов K_{γ} которое может быть использовано для оценки механических свойств с учетом комплексного влияния основных компонентов сплава. Поскольку размерное несоответствие параметров решетки связано со степенью концентрационного твердорастворного упрочнения γ - и γ' -фаз, эффективностью дисперсионного упрочнения сплава, скоростью ползучести и другими свойствами, то соотношение K_{γ} позволяет связать эти свойства с многокомпонентными системами. Приведены регрессионные модели, с помощью которых возможно рассчитать размерное несоответствие, прочность, жаропрочность, количество γ' -фазы и плотность сплавов с высокой точностью. Установлены закономерности влияния состава на свойства равноосных жаропрочных никелевых сплавов. Показано, что для многокомпонентных никелевых систем можно с высокой достоверностью прогнозировать мисфит, который оказывает существенное влияние на прочностные характеристики сплавов данного класса. Для ЖНС снижение значения мисфита сопровождается сокращением количества элементов, находящихся в γ -твердом растворе при значении $K_{\gamma} = 1,5-2$. Однако увеличение K_{γ} больше 2 сопровождается ростом мисфита, поскольку объемная доля γ' -образующих элементов значительно возрастает и начинает преобладать. Установлена корреляционная связь между удельной плотностью и средней атомной массой сплавов. **Научная новизна.** Определено, что с увеличением атомной массы удельная плотность сплавов повышается, поскольку элементы с высокой атомной массой, повышающие удельную плотность, относятся к элементам, которые преимущественно упрочняют γ -твердый раствор и не оказывают заметного влияния на интерметаллидное упрочнение сплавов. **Практическая значимость.** Показано перспективное и эффективное направление в решении задачи прогнозирования основных характеристик, влияющих на комплекс служебных свойств сплавов как при разработке новых ЖНС, так и при совершенствовании составов известных промышленных марок данного класса.

Ключевые слова: жаропрочные никелевые сплавы (ЖНС); размерное несоответствие (γ/γ' -мисфит); прочность; жаропрочность

Введение

Разработка новых и оптимизация существующих литейных сплавов для изготовления лопаток газотурбинных двигателей различного назначения является важной научно-технической проблемой. Из-за чувствительности фазовых составляющих к концентрации легирующих элементов возникают трудности в оценке ожидаемого комплекса свойств лопаток от оптимизации химического состава или структурного состояния сплавов [5, 9, 10]. Для современных газотурбинных двигателей указанные детали, имеющие сложную форму, изготавливают из многокомпонентных жаропрочных сплавов на основе никеля, кобальта и железа методами специального, направленного либо монокристаллического литья [4, 8, 11].

Разработки последних лет сосредоточены на исследовании лопаточных материалов с низким содержанием дорогостоящих элементов для авиадвигателей. Одной из проблем такого типа материалов является повышение их прочностных свойств. Для прироста жаропрочности в сплавах увеличивают содержание хрома. Однако высокое содержание хрома в сплаве может явиться причиной появления в структуре отливки топологических плотноупакованных фаз типа μ , σ , что в результате их нестабильности будет способствовать хрупкому разрушению деталей [6, 7]. Упрочнение сплава γ' -фазой обеспечивает длительное сохранение высокой температурной работоспособности изделия данного класса в широком интервале температур, вплоть до 1150 °С. Следовательно, важнейшая роль в сопротивлении высокотемпературной ползучести жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) принадлежит таким характеристикам, как периоды кристаллических решеток γ - и γ' -фаз и их размерное несоответствие δ или γ/γ' (мисфит), которое рассчитывают по формуле:

$$\delta = 2 \cdot ((a_{\gamma'} - a_{\gamma}) / (a_{\gamma} + a_{\gamma'})) \cdot 100 \%,$$

где a_{γ} и $a_{\gamma'}$ – периоды решеток γ - и γ' -фаз соответственно [4, 7].

Цель

Основной целью работы является получение регрессионных соотношений для расчета уровня механических свойств жаропрочных никелевых сплавов в зависимости от их легирования.

Методика

Для исследований были использованы промышленные жаропрочные никелевые сплавы отечественного и зарубежного производства. Марки сплавов приведены в соответствии с требованиями национальных стандартов: ЖС6У, ЖС6К, ВЖЛ12У, ВЖЛ12Э, В1900, IN 100, MAR M200, MAR M246, TRW NASA 6A, WAZ16, U500, U700, ЖСЗДК, ЖСЗЛС, ВХ4Л, ЧС88У, ЧС104, RENE77, IN939, IN738LC, CM681, RENE220, NFP1916, ЧС70С, CM939WELDABLE. Выборка сплавов позволила учесть разнообразие составов (систем легирования), которые по содержанию основных химических элементов охватывают широкий диапазон легирования.

Полученные значения обработаны в программном комплексе Microsoft Office в пакете EXCEL методом наименьших квадратов с получением корреляционных зависимостей типа «параметр – свойство». Полученные регрессионные модели удовлетворительно описывают указанные зависимости с построением линий трендов. Зависимости имеют достаточно высокий коэффициент детерминации ($R^2 \geq 0,85$) и пригодны для определения температурных характеристик ЖНС.

Результаты

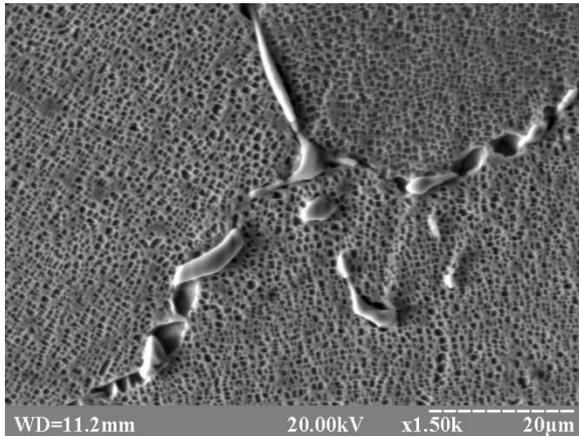
С учетом того, что роль в сопротивлении высокотемпературной ползучести жаропрочных никелевых сплавов принадлежит такому структурному параметру, как размерное несоответствие δ (γ/γ'), которое зависит от системы легирования, актуальной задачей следует считать получение оптимальной регрессионной модели для расчета конкретной характеристики на основе химического состава ЖНС и условий его (равноосной) кристаллизации [4].

Все компоненты, используемые при легировании ЖНС, можно условно разделить на три группы: растворяющиеся в γ -твердом растворе

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

(Co, Cr, Mo, W, Re), розстворяючися переважно в γ' -фазі (Al, Ti, Ta, Hf) і карбидоутворюючі елементи (Ti, Ta, Hf, Nb, V, W, Mo, Cr). Типичні мікроструктури сплавів ЖС6К і ЗМІ-3У з рівноосної структурою представлені на рис. 1. Їх основними фазовими складовими є γ -твердий розчин, упрочнююча γ' -фаза і карбиди (первичні і вторинні).

a – a



b – b

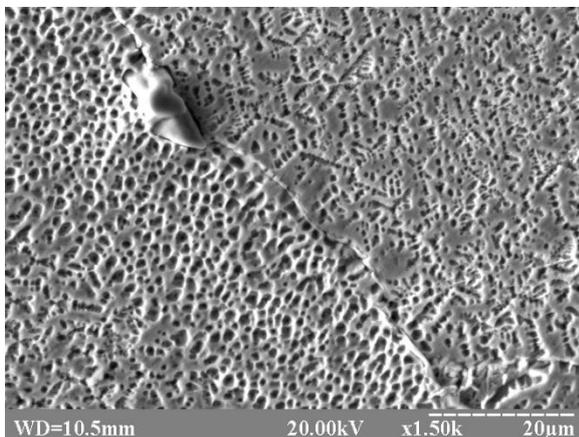


Рис. 1. Типична структура жаропрочних сплавів ЖС6К (а) і ЗМІ-3У (б)

Fig. 1. Typical structure of heat-resistant alloys ZhS6K (a) and ZMI-3U (b)

С другої сторони, в склад γ' -фази можуть входити багато елементів: Al, Ti, Nb, Cr, Co, Mo, W, V і др. Однак, їх концентрація в γ' -фазі по-різному впливає на її об'ємну частку в структурі сплаву. Це впливає пов'язано зі способно-

стю елементів утворювати з нікелем стабільні інтерметаліди типу Ni_3Me . Отсюда следует, что мисфит и механические свойства сплавов определяются не только элементами, которые являются γ' -образующими, но и теми, которые классифицируются как γ -твердорастворные упрочнители [8, 10].

В результате анализа экспериментальных данных предложено соотношение (калибровочный коэффициент 5 был определен эмпирически), позволяющее оценить механические свойства в зависимости от легирующих элементов сплава. Поскольку размерное несоответствие параметров решетки связано с γ - и γ' -фазами, способностью к дисперсионному упрочнению, скоростью ползучести и другими свойствами сплава, величина K_γ указывает на зависимость свойств аналогично многокомпонентным системам [1–3].

Установлено, что размерное несоответствие δ имеет параболические зависимости (рис. 2, а, б) с соотношениями:

$$\delta^{20} = 0,1001(K_\gamma)^2 - 0,3257(K_\gamma) + 0,4789;$$

$$\delta^{1000} = 0,0953(K_\gamma)^2 - 0,3427(K_\gamma) + 0,0325.$$

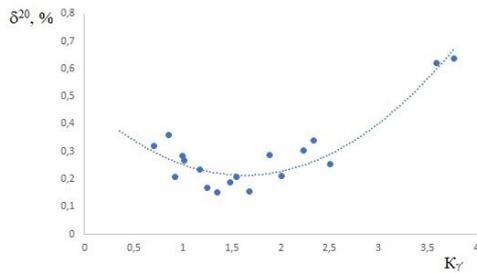
Увеличение величины K_γ приводит к снижению мисфита и образованию экстремума при значениях 1,5–2, это связано с сокращением количества элементов находящихся в γ -твердом растворе, которые в наибольшей мере увеличивают период решетки (Mo, W, Nb, Ta и др.). При значениях K_γ больше 1,5–2 наблюдается увеличение мисфита, поскольку объемная доля γ' -образующих элементов значительно возрастает и начинает преобладать. Значение прочности при увеличении показателя соотношения K_γ подчиняется линейному закону и имеет тенденцию к постоянному возрастанию (рис. 2, в), так как с увеличением соотношения количество элементов, образующих упрочняющую фазу, возрастает.

Показано, что при температуре испытаний 1 000 °С, зависимость пределов 100- и 1000-часовой длительной прочности от величины мисфита (рис. 2, а, б) оптимально описывается полученными моделями (рис. 3, а, б). Эти зависимости свидетельствуют, что при увеличении

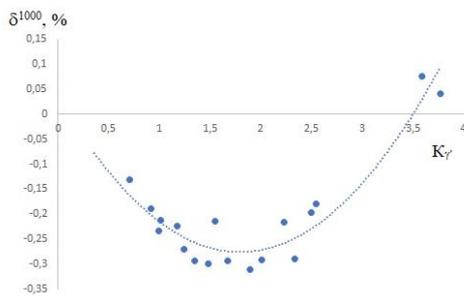
МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

коэффициента K_{γ} длительная прочность сплавов возрастает прямо пропорционально, так как количество γ' -образующих элементов возрастает, а следовательно, увеличивается объёмная доля γ' -фазы в сплаве.

a – a



b – b



v – c

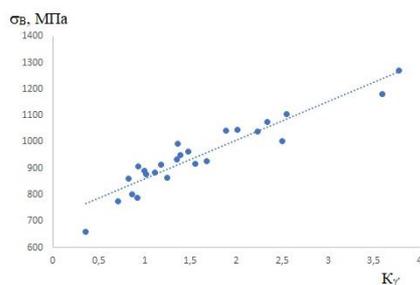
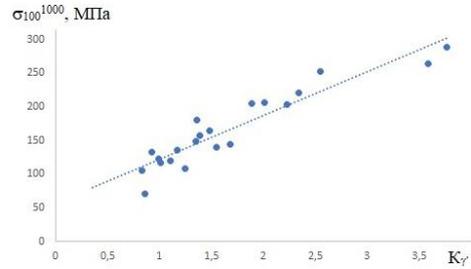


Рис. 2. Корреляционные соотношения свойств равноосных ЖНС от K_{γ} :
a – мисфита (δ^{20}); *b* – δ^{1000} ;
v – предела кратковременной прочности (σ_v)

Fig. 2. Correlation relations of properties of equiaxed heat-resistant nickel alloys from K_{γ} :
a – misfit (δ^{20}); *b* – δ^{1000} ;
c – short-term strength limit (σ_v)

a – a



b – b

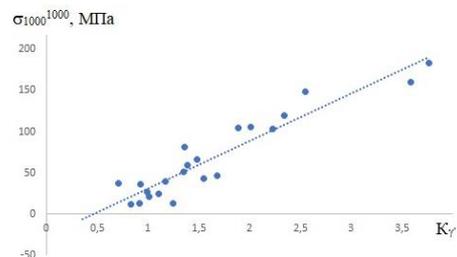


Рис. 3. Корреляционные соотношения для длительной прочности равноосных ЖНС от K_{γ} : σ_{100}^{1000} *a*, и σ_{1000}^{1000} *b*

Fig. 3. Correlation relations for long-term strength of equiaxed heat-resistant nickel alloys from K_{γ} : σ_{100}^{1000} *a*, and σ_{1000}^{1000} *b*

Установлено, что предложенное соотношение для K_{γ} имеет тесную корреляцию с объёмной долей γ' -фазы в равноосных ЖНС (рис. 4). Все эти зависимости имеют линейный характер с положительным угловым коэффициентом и погрешностью не более $\pm 3,8$ %. Такое поведение объясняется тем, что с увеличением K_{γ} возрастает объёмное количество основных упрочняющих элементов, которые образуют γ' -фазу. Наблюдаемый эффект имеет место как при комнатной, так и повышенной температурах (рис.3, *a*). Более того, полученный результат следует рассматривать как свидетельство ожидаемого повышения пределов кратковременной (рис. 2, *v*) и длительной прочности (рис. 3) сплавов в условиях близких к эксплуатации лопаток двигателя.

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

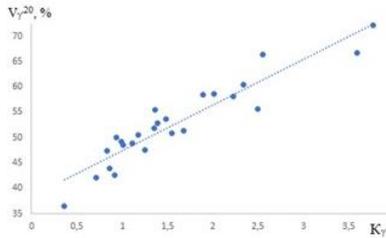
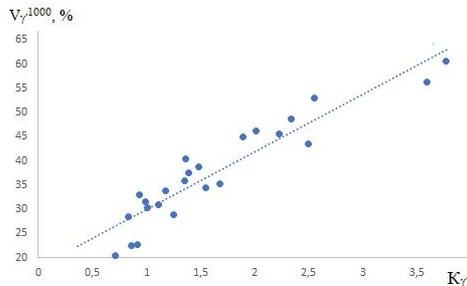
a – a*b – b*

Рис. 4. Корреляционные соотношения объёмной доли γ' -фазы в равноосных ЖНС от K_γ :
a – объёмна доля γ' -фазы при комнатной температуре (V_γ^{20}); *b* – при 1 000 °C (V_γ^{1000})

Fig. 4. Correlation ratios of the volume fraction of the γ' -phase in equiaxed heat-resistant nickel alloys from K_γ :
a – is the volume fraction of the γ' -phase at room temperature (V_γ^{20}); *b* – at 1000°C (V_γ^{1000})

Для исключения влияния объёмных диффузионных процессов при высоких температурах в состав ЖНС вводят дорогостоящие легирующие элементы, такие как вольфрам, молибден, рений и рутений, что значительно увеличивает плотность сплавов, а, следовательно, и массу готового изделия.

Используя известное корреляционное соотношение между плотностью сплава (ρ) и его атомной массой (A_c), авторы разработали регрессионную модель. Такой подход позволил оценить характер изменения плотности исследуемых сплавов в зависимости от легирования при погрешности не более 1 % (рис. 5).

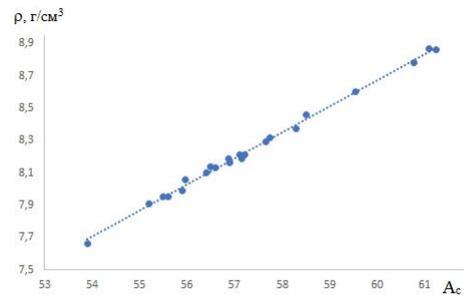


Рис. 5. Корреляционное соотношение плотности равноосных ЖНС от атомной массы сплава

Fig. 5. Correlation ratio of the density of equiaxed heat-resistant nickel alloys on the atomic mass of the alloy

На рис. 5 показана зависимость удельной плотности от средней атомной массы сплавов. Линейный характер зависимости указывает, что пропорционально приросту количества элементов с высоким значением атомной массы будет возрастать плотность равноосных сплавов. Такая тенденция проявляется из-за того, что химические элементы с высокой атомной массой обладают высокой температурой плавления. Использование таких химических элементов для легирования упрочняет γ -твёрдый раствор и не оказывает заметного влияния на (дисперсионное) интерметаллидное упрочнение сплавов. Полученные регрессионные зависимости дают возможность для различной степени легирования оценивать пределы кратковременной и длительной прочности с помощью величины K_γ . Предложенные соотношения могут быть использованы для разработки новых и усовершенствования известных промышленных жаропрочных никелевых сплавов.

Научная новизна и практическая значимость

В результате исследования по влиянию количества легирующих элементов на свойства жаропрочных никелевых сплавов предложены соотношения, позволяющие оценивать эффективность предлагаемых усовершенствований. Соотношения учитывают влияние комплексного легирования на механические и служебные

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

свойства сплавов, приближенные к реальным условиям их использования. Опробование соотношений осуществлено на примерах сплавов, используемых для изготовления лопаток газотурбинных авиационных двигателей.

Выводы

1. На основе анализа процессов выделения фаз при легировании предложены соотношения по прогнозированию пределов жаропрочности различной длительности для сплавов на основе никеля.

2. Установлена корреляционная связь между удельной плотностью и средней атомной массой сплавов. Для повышения плотности сплава следует использовать химические элементы с высокой атомной массой, которые упрочняют γ -твер-

дый раствор с минимальным эффектом от присутствия в структуре частиц интерметаллидных соединений.

3. Использование соотношения для оценки K_γ позволяет прогнозировать величину размерного несоответствия (γ/γ'), пределы кратковременной и длительной (100- и 1000-часовой) прочности жаропрочных никелевых сплавов.

4. Обнаруженный экстремум на зависимости для K_γ (интервал значений 1,5–2) связан с уменьшением количества легирующих элементов в γ -твердом растворе, которые увеличивают период кристаллической решетки сплава. При значениях K_γ больше 1,5–2 прирост мисфита обусловлен повышением концентрации химических элементов, образующих γ' -фазу.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Гайдук С. В., Глотка О. А., Дорогокупля А. С. Моделивання термодинамічних процесів для оцінки впливу танталу на критичні температури і структуроутворення багатокомпонентних нікелевих систем. *Математичне моделювання*. 2018. № 1 (40). С. 139–149. DOI: [https://doi.org/10.31319/2519-8106.1\(40\)2019.166188](https://doi.org/10.31319/2519-8106.1(40)2019.166188)
2. Глотка А. А., Гайдук С. В. Прогнозирование свойств монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 2 (80). С. 91–100. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/165876>
3. Глотка А. А., Гайдук С. В. *Проектирование литейных жаропрочных сплавов на никелевой основе*. Palmarium Academic Publishing, 2019. 245 с.
4. Aliofkhazraei M. *Superalloys*. IntechOpen, 2015. 835 p. DOI: <https://doi.org/10.5772/59358>
5. Caron J. L., Sowards J. W. Weldability of Nickel-Base Alloys. *Comprehensive Materials Processing*. 2014. Vol. 6. P. 151–179. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00615-4>
6. Min P. G., Goryunov A. V., Vadeev V. E. Modern nickel superalloys and the efficient resource-saving technologies of their production. *Russian Metallurgy (Metally)*. 2015. Vol. 2015. Iss. 13. P. 1060–1068. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036029515130182>
7. Montakhab M., Balicki E. Integrated Computational Alloy Design of Nickel-Base Superalloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2019. Vol. 50. Iss. 7. P. 3330–3342. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-019-05252-7>
8. Naffakh-Moosavy H. Microstructural evolution and castability prediction in newly designed modern third-generation nickel-based superalloys. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2016. Vol. 23. Iss. 5. P. 548–562. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-016-1266-4>
9. Satyanarayana D. V. V., Eswara Prasad N. *Nickel-Based Superalloys*. Aerospace Materials and Material Technologies, 2017. P. 199–228. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-2134-3_9
10. Wu B., Li L., Wu J., Wang Z., Wang Y., Chen X., ... Li J. Microstructure and stress rupture properties of polycrystal and directionally solidified castings of nickel-based superalloys. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2014. Vol. 21. Iss. 1. P. 58–64. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-014-0865-1>
11. Xie J., Ma Y., Xing W., Ou M., Zhang L., Liu K. Microstructure and mechanical properties of a new cast nickel-based superalloy K4750 joint produced by gas tungsten arc welding process. *Journal of Materials Science*. 2019. Vol. 54. Iss. 4. P. 3558–3571. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-018-3081-y>

О. А. ГЛОТКА^{1*}, В. Ю. ОЛЬШАНЕЦЬКИЙ², С. В. ГАЙДУК³¹Каф. «Фізичне матеріалознавство», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. + 38 (096) 427 56 51, ел. пошта Glotka-alexander@ukr.net, ORCID 0000-0002-3117-2687²Каф. «Фізичне матеріалознавство», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, тел. +38 (067) 145 67 21, ел. пошта olshan@zntu.edu.ua, ORCID 0000-0002-9485-4896³Каф. «Фізичне матеріалознавство», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063, ORCID 0000-0002-5724-9566

МАТЕМАТИЧНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЖАРОМІЦНИХ НІКЕЛЕВИХ СПЛАВІВ

Мета. Основною метою цієї роботи є отримання прогнозних регресійних моделей, за допомогою яких можна адекватно розраховувати механічні властивості жароміцних нікелевих сплавів (ЖНС), без проведення попередніх експериментів. **Методика.** Для проведення досліджень були обрані промислові сплави для рівноважного лиття вітчизняного й зарубіжного виробництва. Значення оброблено методом найменших квадратів з отриманням кореляційних залежностей та математичних рівнянь регресійних моделей, які оптимально описують ці залежності. **Результати.** Після обробки експериментальних даних уперше запропоновано співвідношення легувальних елементів K_γ яке може бути використане для оцінки механічних властивостей з урахуванням комплексного впливу основних компонентів сплаву. Оскільки розмірна невідповідність параметрів решітки пов'язана зі ступенем концентраційного твердорозчинного зміцнення γ - і γ' -фаз, ефективністю дисперсійного зміцнення сплаву, швидкістю повзучості й іншими властивостями, то співвідношення K_γ дозволяє пов'язати ці властивості з багатокомпонентними системами. Наведено регресійні моделі, за допомогою яких можливо розрахувати розмірну невідповідність, міцність, жароміцність, кількість γ' -фази і щільність сплавів із високою точністю. Установлено закономірності впливу складу на властивості рівноважних жароміцних нікелевих сплавів. Показано, що для багатокомпонентних нікелевих систем можна з високою вірогідністю прогнозувати місфіт, який істотно впливає на характеристики міцності сплавів цього класу. Для ЖНС зниження значення місфіту супроводжується скороченням кількості елементів, що знаходяться в γ -твердому розчині зі значенням $K_\gamma = 1,5-2$. Однак збільшення K_γ понад 2 супроводжується зростанням місфіту, оскільки об'ємна частка γ' -утворювальних елементів значно зростає та починає переважати. Установлено кореляційний зв'язок між питомою щільністю та середньою атомною масою сплавів. **Наукова новизна.** З'ясовано, що зі збільшенням атомної маси питома щільність сплавів підвищується, оскільки елементи з високою атомною масою, що підвищують питому щільність, належать до елементів, які переважно зміцнюють γ -твердий розчин і не мають помітного впливу на інтерметалідне зміцнення сплавів. **Практична значимість.** Показано перспективний та ефективний напрям у розв'язанні задачі прогнозування основних характеристик, що впливають на комплекс службових властивостей сплавів як під час розробки нових ЖНС, так і під час вдосконалення складів відомих промислових марок цього класу.

Ключові слова: жароміцні нікелеві сплави (ЖНС); розмірна невідповідність (γ -місфіт); міцність; жароміцність

О. А. ГЛОТКА^{1*}, В. Ю. ОЛЬШАНЕЦЬКИЙ², С. В. ГАЙДУК³¹Dep. «Physical Materials Science», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskoho St., 64, Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, tel. + 38 (096) 427 56 51, e-mail Glotka-alexander@ukr.net, ORCID 0000-0002-3117-2687²Dep. «Physical Materials Science», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskoho St., 64, Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, tel. +38 (067) 145 67 21, e-mail olshan@zntu.edu.ua, ORCID 0000-0002-9485-4896³Dep. «Physical Materials Science», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskoho St., 64, Zaporizhzhia, Ukraine, 69063, ORCID 0000-0002-5724-9566

MATHEMATICAL PREDICTION OF THE PROPERTIES OF HEAT-RESISTANT NICKEL ALLOYS

Purpose. The purpose of this work is to obtain predictive regression models, with the help of which it is possible to adequately calculate the mechanical properties of heat-resistant nickel alloys, without conducting preliminary experiments. **Methodology.** Industrial alloys for equiaxed casting of domestic and foreign production were selected for research. The values were processed by the least squares method with obtaining correlation dependences with obtaining mathematical equations of regression models that optimally describe these dependences. **Findings.** As a result of processing experimental data, the ratio of alloying elements K_{γ} was proposed for the first time, which can be used to assess the mechanical properties, which takes into account the complex effect of the alloy main components. Since the dimensional mismatch of the lattice parameters is associated with the degree of concentration solid solution hardening of the γ - and γ' -phases, the efficiency of precipitation hardening of the alloy, the creep rate, and other properties, the K_{γ} ratio makes it possible to relate these properties to multicomponent systems. Regression models are presented, with the help of which it is possible to calculate the dimensional mismatch, strength, heat resistance, the amount of γ' phase and the density of alloys with high accuracy. The regularities of the influence of the composition on the properties of equiaxed heat-resistant nickel alloys are established. It is shown that for multicomponent nickel systems, it is possible to predict with high reliability misfit, which has a significant effect on the strength characteristics of alloys of this class. For heat-resistant nickel alloys, a decrease in the misfit value is accompanied by a decrease in the number of elements in the γ -solid solution at a value of $K_{\gamma} = 1.5$ –2. However, an increase in K_{γ} greater than 2 is accompanied by an increase in misfit, since the volume fraction of γ' -forming elements significantly increases and begins prevail. A correlation has been established between the specific density and the average atomic mass of the alloys. **Originality.** It is shown that with an increase in the atomic mass, the specific density of alloys increases, since elements with a high atomic mass, which increase the specific density, belong to the elements that predominantly strengthen the γ -solid solution and do not have a noticeable effect on the intermetallic hardening of alloys. **Practical value.** A promising and effective direction is shown in solving the problem of predicting the main characteristics that affect the complex of service properties of alloys both in the development of new heat-resistant nickel alloys and in the improvement of the compositions of well-known industrial brands of this class.

Keywords: heat-resistant nickel alloys; dimensional mismatch (γ -misfit); strength; heat resistance

REFERENCES

- Haiduk, S. V., Glotka, O. A., & Dorogokuplya, A. S. (2018). Modeling of thermodynamic processes for the evaluation of the influence of tantalum on critical temperatures and the structure of multi-component nickel systems. *Mathematical modeling*, 1(40), 139-149. DOI: [https://doi.org/10.31319/2519-8106.1\(40\)2019.166188](https://doi.org/10.31319/2519-8106.1(40)2019.166188) (in Ukrainian)
- Glotka, O. A., & Haiduk, S. V. (2019). Prediction of the properties of single-crystal heat-resistance nickel alloys. *Science and Transport Progress*, 2(80), 91-100. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/165876> (in Russian)
- Glotka, O. A., & Haiduk, S. V. (2019). *Proektirovanie litynykh zharoprochnykh splavov na nikelevoy osnove*. Palmarium Academic Publishing. (in Russian)
- Aliofkhazraei, M. (2015). *Superalloys*. IntechOpen. DOI: <https://doi.org/10.5772/59358> (in English)
- Caron, J. L., & Sowards, J. W. (2014). Weldability of Nickel-Base Alloys. *Comprehensive Materials Processing*, 6, 151-179. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00615-4> (in English)
- Min, P. G., Goryunov, A. V., & Vadeev, V. E. (2015). Modern nickel superalloys and the efficient resource-saving technologies of their production. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2015(13), 1060-1068. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0036029515130182> (in English)
- Montakhab, M., & Balikci, E. (2019). Integrated Computational Alloy Design of Nickel-Base Superalloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 50(7), 3330-3342. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-019-05252-7> (in English)
- Naffakh-Moosavy, H. (2016). Microstructural evolution and castability prediction in newly designed modern third-generation nickel-based superalloys. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 23(5), 548-562. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-016-1266-4> (in English)
- Satyanarayana, D. V. V., & Eswara Prasad, N. (2017). *Nickel-Based Superalloys*. Aerospace Materials and Material Technologies (pp. 199-228). DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-2134-3_9 (in English)

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

10. Wu, B., Li, L., Wu, J., Wang, Z., Wang, Y., Chen, X., ... & Li, J. (2014). Microstructure and stress rupture properties of polycrystal and directionally solidified castings of nickel-based superalloys. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 21(1), 58-64. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-014-0865-1> (in English)
11. Xie, J., Ma, Y., Xing, W., Ou, M., Zhang, L., & Liu, K. (2018). Microstructure and mechanical properties of a new cast nickel-based superalloy K4750 joint produced by gas tungsten arc welding process. *Journal of Materials Science*, 54(4), 3558-3571. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-018-3081-y> (in English)

Надійшла до редколегії: 06.03.2020

Прийнята до друку: 07.08.2020