

ПРОЧНОСТЬ И ПЛАСТИЧНОСТЬ

УДК 669.245:539.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ ЖАРОПРОЧНОСТИ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

© 2021 г. А. Г. Тягунов^а, Д. А. Тарасов^а *, О. Б. Мильдер^а

^аУральский Федеральный Университет, ул. Мира, 32, Екатеринбург, 620002 Россия

*e-mail: datarasov@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.10.2020 г.

После доработки 25.02.2021 г.

Принята к публикации 04.03.2021 г.

Для ресурсного проектирования газотурбинных двигателей большую актуальность имеет информация о характере изменения жаропрочности никелевых сплавов, из которых изготавливаются наиболее ответственные детали. Методом машинного обучения получены модель изменения жаропрочности и аналитическое выражение, позволяющее определять параметр термостабильности для каждого состава сплава. Аппроксимация и экстраполяция предела длительной прочности осуществлена с применением температурно-временной зависимости Ларсона–Миллера. Адекватность полученной модели подтверждена удовлетворительной сходимостью экспериментальных и расчетных результатов.

Ключевые слова: жаропрочные никелевые сплавы, жаропрочность, фазовая стабильность, моделирование

DOI: 10.31857/S0015323021070123

ВВЕДЕНИЕ

Жаропрочные сплавы на основе никеля (ЖНС), представляя собой сложную композицию, легированную Cr, Co, Mo, W, Al, Ti, Nb, V, Fe, Y, Zr, Ta, Re, Ru, Ni, Ce, La, Si, Mn, Mg, Hf, Cu, Bi, Pb, Ir. Применяются для изготовления наиболее ответственных деталей газотурбинных двигателей в авиации, судов, насосов газо- нефтеперекачивающих станций и энергетических установок. Поскольку изделия эксплуатируются в условиях температур, близких к плавлению, и высоких растягивающих напряжений, к сплавам предъявляются повышенные требования к упрочнению структуры. Необходимый комплекс свойств достигается за счет гетерофазности структуры. Основной вклад в упрочнение вносит частично когерентная связь основных упрочняющих γ' -(Ni₃Al, Ti...) или γ'' -(NiAl) вторичных фаз кубоидной морфологии с γ -матрицей. Твердый раствор атомов легирующих элементов в ГЦК-решетке никеля вносит свой вклад в общее упрочнение. В дополнительном упрочнении структуры некоторых сплавов могут участвовать карбиды MC и бориды MB. Длительная эксплуатация изделий в условиях высоких температур приводит к деградации исходной структуры и снижению прочностных свойств.

Разупрочнение структуры и возникновение топологически плотноупакованных фаз приводит в итоге к разрушению металла. Чем позже и мед-

ленней происходят процессы деградации структуры, тем выше фазовая стабильность сплава.

Составление химического состава ЖНС производится методами компьютерного проектирования [1–12]. В основу этих расчетов заложена теория Поллинга о резонансе химической связи [13] и методы регрессионных моделей. После проведения опытных плавок и испытаний обосновывается химический состав сплава, соответствующий заданным свойствам.

Среди всех характеристик ЖНС особый интерес вызывает динамика изменения жаропрочности и временной ресурс эксплуатации изделий.

Очевидно, что проектирование сплавов, оценка ожидаемого срока службы и динамика изменения жаропрочности тесно взаимосвязаны [14–25].

Жаропрочность – это способность материала выдерживать нагрузку при повышенных температурах, не подвергаясь деформации или разрушению. Основной показатель жаропрочности ЖНС это предел длительной прочности (наибольшее механическое напряжение, которое выдерживает материал без разрушения при заданных температуре, длительности испытания). Структурная (фазовая) стабильность – это способность материала сохранять неизменными морфологию и количество исходных фазовых составляющих, следовательно, и основные служебные свойства в течение заданного периода эксплуатации. Фазовая стабильность оценивается температурой полного

растворения основной упрочняющей γ' - или γ'' -вторичной фазы. [6, 14, 16, 19]. Поскольку в структуру ЖНС входят и другие составляющие, это параметр должен быть уточнен.

В связи с этим в работе поставлена следующая задача: смоделировать динамику изменения жаропрочности сплавов на основе никеля в максимально возможных температурно-временных интервалах, соответствующих условиям эксплуатации, а также предложить новый параметр для оценки фазовой стабильности ЖНС.

Комплекс температурно-временных параметров испытаний удобно представлять в моделях одной переменной. Для учета температуры и времени испытаний при определении предела длительной прочности используется параметр Ларсона–Миллера (P_{LM}) [21, 26–29]:

$$P_{LM} = T \times (20 + \lg \tau) \times 10^{-5}, \quad (1)$$

где τ и T – время и температура испытаний.

В большинстве источников, публикующих достижения ЖНС, график зависимости предела длительной прочности σ от параметра Ларсона–Миллера представляется в виде прямой, где предел длительной прочности уменьшается с ростом значений параметра Ларсона–Миллера, хотя процессы деградации структуры должны формировать нелинейный характер этой зависимости [19, 21, 22].

Для получения модели изменения свойств жаропрочных сплавов на основе никеля был выбран метод машинного обучения, по аналогии с похожими задачами моделирования составов и свойств никелевых сплавов [23, 30]. Ранее такой метод уже применяли для анализа сплавов на основе никеля [31–45]. Задачи, поставленные в этих работах, заключались в следующем: синтез новых химических составов жаропрочных сплавов [31, 34, 36, 44, 45]; моделирование изменений коэффициента термического расширения [37, 41]; моделирование энергетического гистерезиса [38]; предсказание энергии малоциклового усталости [39]; моделирование развития усталостных трещин [40]; прогнозирование возникновения дефектов материалов [42]; моделирование времени до разрушения [43].

В основном все расчеты посвящены какой-то одной марке сплава. Информации по моделированию жаропрочности на основании установления корреляций между химическим составом сплава и экспериментально полученными значениями длительной прочности при растяжении не обнаружено.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Для решения поставленных задач была подготовлена база данных, содержащая информацию о химических (плавочных) составах и значениях длительного предела прочности порядка 300 отечественных и зарубежных марок жаропрочных никелевых сплавов.

Полученная база послужила массивом входных данных для моделирования выбранным методом. Машинное обучение – класс методов искусственного интеллекта, решающих задачи не прямым способом, как в случае проектирования химических составов ЖНС, а в процессе анализа готовых решений многих схожих задач.

Программой средой послужил известный пакет Matlab 2014a. Использована классическая сеть прямого действия типа многослойный перцептрон. Обучение искусственной нейронной сети осуществляли программно-аппаратным поиском закономерностей между плавочными составами ЖНС и соответствующими им значениями предела длительной прочности, выражающихся в функциональной зависимости. Использован широко известный алгоритм обучения Левенберга–Марквардта с Байесовской регуляризацией [30].

В результате получена корреляционная модель, отражающая взаимосвязь между химическим составом ЖНС и их жаропрочностью. Искомая модель представляет собой многомерные матрицы, объединенные в искусственную нейронную сеть. Обучение сети происходило на массиве данных 308 сплавов и 24 их параметров: химический состав, значения длительного предела прочности на разрыв, полученного при различных температурно-временных условиях испытаний.

Для повышения точности модели входные параметры были преобразованы в соответствии с методами математической статистики [23, 30]. Концентрации легирующих элементов пронормированы на содержание никеля. В результате эти параметры получили одинаковый десятичный формат со значениями от 0 до 1. Поскольку значения длительного предела прочности (σ , МПа) в экспериментах охватывает диапазон в несколько порядков (от одного до тысяч МПа), использовано преобразование $y = -\lg \sigma$. Использование логарифмической зависимости также делает ошибки прогнозирования относительными. Целевые значения (y) для обратного преобразования $\sigma = 10^{-y}$ исключают возможность появления отрицательных значений σ , которые физически невозможны. Все это улучшает прогнозную способность модели.

Структура полученной ИНС – сеть прямого распространения типа многослойный перцептрон с 13 нейронами в единственном скрытом слое и алгоритмом обучения байесовской регуляризации. На вход модели подавали химический состав сплавов (23 элемента за исключением никеля) и параметры Ларсона–Миллера для известных испытаний (входной массив 24×308). На выходе сети – значение y (вектор–столбец 1×308).

Готовая ИНС предоставляет возможность моделировать зависимости предела длительной прочности от параметра Ларсона–Миллера для

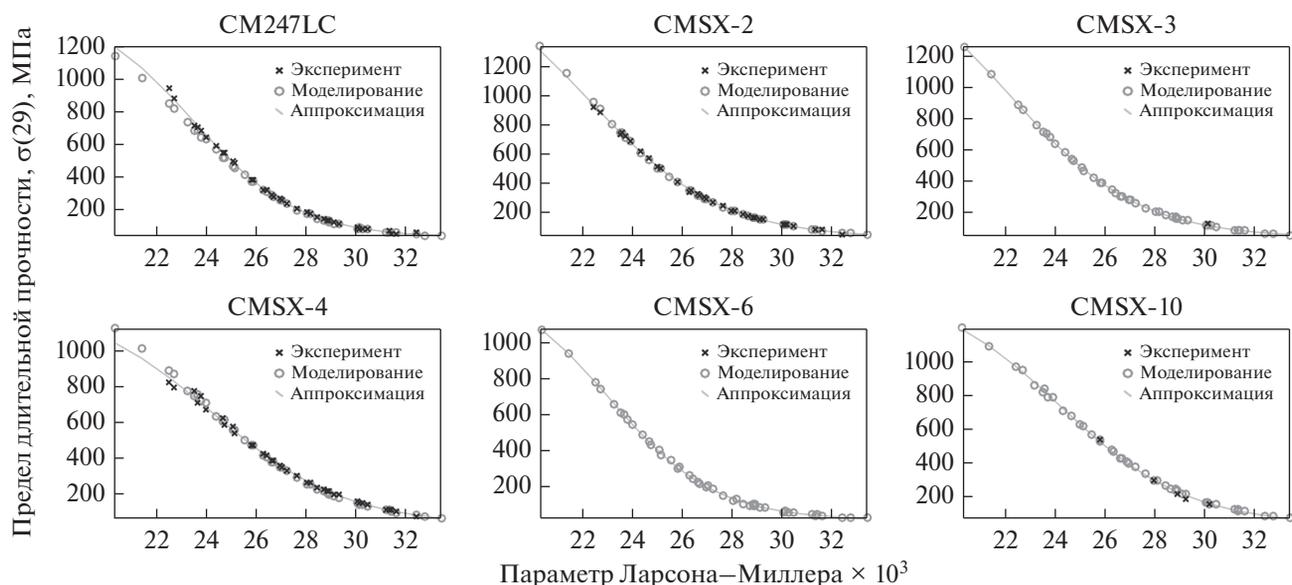


Рис. 1. Экспериментальные данные, результаты моделирования и сигмоидальная аппроксимация предела длительной прочности для шести сплавов контрольной выборки.

всех плавочных составов из базы данных, а также для любого состава, не входящего в базу.

Для оценки точности работы модели были подобраны шесть плавочных составов ЖНС (табл. 1) с большим количеством экспериментально определенных значений предела длительной прочности. Выбранные составы жаропрочных никелевых сплавов не входили в исходную базу данных и не участвовали в получении модели. Среднеквадратичная относительная ошибка составила 16%. В результате моделирования с использованием созданной ИНС были получены графики зависимости $\sigma(P_{LM})$ для контрольной группы (рис. 1). Приведенные результаты свидетельствуют об одинаковом нелинейном характере изменения предела длительной прочности от температурно-временных условий испытаний, но при этом имеются особенности, характерные индивидуально для каждого состава сплава. Следует отметить удовлетворительную сходимость экспериментальных значений с модельными, что характеризует надежность получаемых результатов.

Моделирование при помощи описанного подхода позволило интерполировать недостающие значения пределов длительной прочности сплавов, что позволило аппроксимировать полученные зависимости.

АППРОКСИМАЦИЯ

Поскольку структура никелевых сплавов является гетерофазной, процесс ее деградации при длительных термических нагрузках является многостадийным из-за различной температурной стабильности структурных компонентов. Для большинства сплавов зависимость $\sigma(P_{LM})$ демонстрирует заметную нелинейность и асимптотическую тенденцию σ к нулю с P_{LM} , большим 30. С другой стороны, при относительно низких температурах и коротких временах ($P_{LM} < 20$) σ немного уменьшается и остается почти постоянной до определенного критического значения P_{LM} . В диапазоне значений P_{LM} от 20 до 30 все сплавы имеют практически линейное уменьшение σ . Подобная зависи-

Таблица 1. Сплавы контрольной выборки и их композиции, концентрации элементов в мас. %

Сплав	Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Nb	Ta	Re	Ru	Hf	C	B	Zr
CM247LC	8.0	9.3	0.5	9.5	5.6	0.7	3.2	—	—	—	1.4	0.07	0.015	0.010
CMSX-2	8.0	5.0	0.6	8.0	5.6	1.0	6.0	—	—	—	—	—	—	—
CMSX-3	8.0	4.8	0.6	8.0	5.6	1.0	6.3	—	—	—	0.1	—	—	—
CMSX-4	6.5	9.6	0.6	6.4	5.6	1.0	6.5	—	3.0	—	0.1	—	—	—
CMSX-6	10.0	5.0	3.0	—	4.8	4.7	6.0	—	—	—	0.1	—	—	—
CMSX-10	2.0	3.0	0.4	5.0	5.7	0.2	8.0	—	6.0	—	0.03	—	—	—

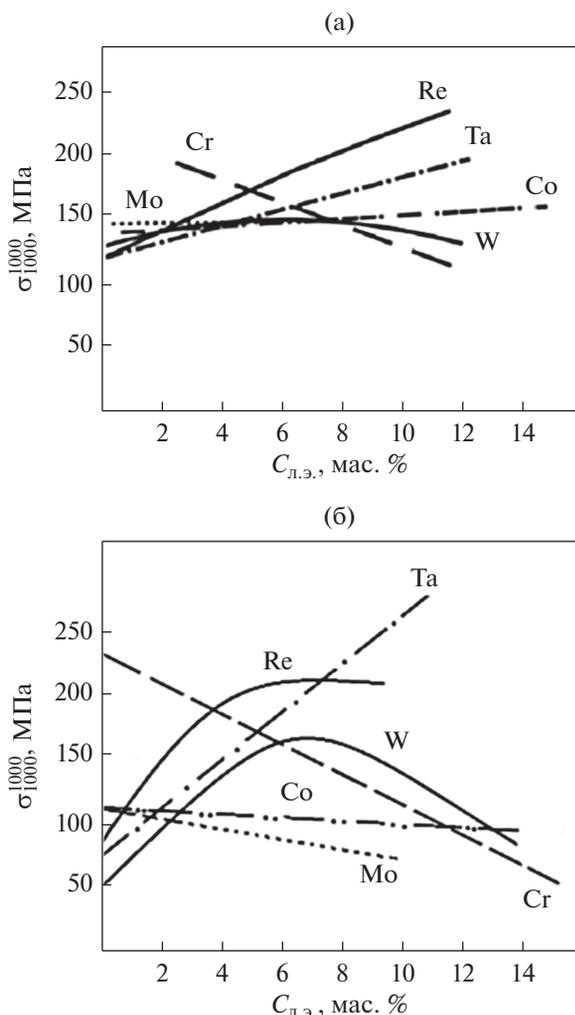


Рис. 2. Анализ влияния содержания некоторых легирующих элементов на предел длительной прочности. а – Экспериментальные значения [1]; б – смоделированные значения.

мость может быть наиболее оптимально описана логистической сигмоидальной функцией вида (2), при $x \equiv P_{LM}$.

$$\sigma(x) = \sigma_2 + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{1 + \exp\left(\frac{x - x_0}{p}\right)}, \quad (2)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, x_0, p$ – параметры, подбираемые при аппроксимации; σ_2 – уровень асимптотического стремления σ к 0 при $P_{LM} > 30$; σ_1 – уровень практически постоянной σ при $P_{LM} < 20$; x_0 – точка перегиба, геометрически соответствующая середине диапазона линейного уменьшения σ . Наиболее важным параметром в модели (2) является коэффициент наклона линейного участка p , зависящий от фазовой стабильности сплавов. Чем выше значение p , тем медленнее идет процесс температурно-временной деградации структуры сплава.

Для проверки адекватности модели сравнивали результаты влияния содержания Mo, Cr, Re, Ta, Co, W на предел длительной прочности, полученный экспериментально на базах 1000 ч при 1000°C [19] (рис. 2а) и аналогичные результаты, смоделированные ИНС (рис. 2б). Характер влияния содержания приведенных легирующих элементов совпадает, за исключением кобальта, что объясняется различиями в исходных базах данных. Созданная модель отличается адекватностью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований методом машинного обучения получена модель изменения жаропрочности сплавов на основе никеля от температурно-временных показателей испытаний, соответствующих эксплуатационным. Модель представляет собой совокупность данных о химическом составе жаропрочных никелевых сплавов и результатов испытаний на предел длительной прочности, а также искусственной нейронной сети, построенной на корреляциях между изменениями химических составов ЖНС и соответствующих изменениях жаропрочности. Применением ИНС смоделированы зависимости жаропрочности от температурно-временных параметров для порядка 300 плавоочных составов жаропрочных никелевых сплавов, входящих в базу данных. Большинство полученных зависимостей имеют одинаковый сигма-образный характер изменения $\sigma(P_{LM})$. Такой ход кривой объясняется многоэтапным характером деградации структуры и свойств сплавов в период длительных изотермических выдержек. Анализ литературных данных и наши исследования позволяют сформировать наиболее общую характеристику структурных изменений, происходящих в образцах в период испытаний на предел длительной прочности. В γ -твердом растворе под воздействием температуры и приложенной нагрузки образуется рафт-структура и возникают дислокации. Выделения основных упрочняющих γ' - и γ'' -фазы кубоидной морфологии коагулируют, отдельные частицы срастаются между собой, происходит рост блоков. Значительно снижается когерентность решеток матрицы и выделений основной упрочняющей фазы. При выдержках свыше 1100°C понижается количество γ' - и γ'' -фаз. Выделения карбоборидных и карбонитридных эвтектик уменьшаются в размерах и замещаются колониями округлых, более дисперсных частиц. Карбиды эвтектического происхождения типа МС шрифтовой морфологии распадаются на колонии округлых частиц и также растворяются в матрице. В результате карбидных реакций по границам глобулярных выделений МС возникают выделения двух новых карбидов M_6C и $M_{23}C_6$, относящихся к ТПУ-фазам. Карбид M_6C иглообразной морфологии разруша-

ет как основную упрочняющую интерметаллидную фазу, так и разрезает ее когерентную связь с матрицей. Карбид $M_{23}C_6$ является основой для возникновения других ТПУ фаз: μ , σ , Лавеса и др. [6, 16, 19, 46–49]. Перечисленные структурные изменения приводят к многостадийному разупрочнению исходной структуры, что отражено ходом кривой на рис. 1.

Каждый состав сплава имеет характерные особенности хода этой зависимости, выявляемые аппроксимацией. Угол наклона участка с интенсивным уменьшением значений предела длительной прочности интерпретируется с фазовой стабильностью сплава. Для описания зависимости $\sigma(P_{LM})$ предложена логистическая сигмоидальная функция (2). Адекватность полученной модели подтверждается удовлетворительной сходимостью экспериментальных и смоделированных значений жаропрочности валидационной группы сплавов, не задействованных в создании модели. Кроме того, модель оценена в результате подтверждения известных фактов о влиянии некоторых легирующих элементов на жаропрочность сплавов на основе никеля.

Предложенный метод можно успешно использовать для предсказания значений длительного предела прочности жаропрочного никелевого сплава и его структурной стабильности по заданному химическому составу с различным содержанием следующих химических элементов: Cr, Co, Mo, W, Al, Ti, Nb, V, Fe, Y, Zr, Ta, Re, Ru, V, Ce, La, Si, Mn, Mg, Hf, Cu, Bi, Pb, Ir. Использование других элементов предусматривает получение новой модели, но аналогичным способом.

Прогноз химической композиции ЖНС под заданные свойства возможен решением обратной задачи, что представляет наши перспективные цели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авраменко Д.С. Прогнозирование длительной прочности жаропрочности никелевых сплавов методом базовых диаграмм // Детали аэрокосмических летательных аппаратов. 2005. № 8. С. 26–28.
2. Кривенюк М.М. Прогнозирование длительной прочности жаропрочных никелевых сплавов // Металл и литье Украины. 2009. № 11–12. С. 20–25.
3. Morinaga M., Yukawa N., Adachi H., Ezaki H. New phase and its application to alloy design. In Super-alloys // The Minerals, Metals & Materials Society. 1984. P. 523–532.
4. Логунов В.А., Шмотин Ю.Н., Лещенко И.А., Старков Р.Ю. Моделирование и разработка новых жаропрочных сплавов // Двигатель. № 5(89). 2013. С. 24–27.
5. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В. Компьютерный метод конструирования литейных жаропрочных никелевых сплавов // Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина. М.: Наука, 2006. С. 56–78.
6. Каблов Е.Н. Физико-химические и технологические особенности создания жаропрочных сплавов, содержащих рений // Вестник московского ун-та. Сер. 2. Химия. Т. 46. № 3. 2005. С. 154–155.
7. Самойлов А.И., Морозова Г.И., Афоничева О.С. Аналитический метод оптимизации легирования жаропрочных никелевых сплавов // Материаловедение. 2000. № 2. С. 14.
8. Данилов Д.В., Логунов А.В., Шмотин Ю.Н. Методологические основы автоматизированного проектирования жаропрочных сплавов на никелевой основе. Часть I // Технология металлов. 2014. № 5. С. 3–10.
9. Данилов Д.В., Логунов А.В., Шмотин Ю.Н. Методологические основы автоматизированного проектирования жаропрочных сплавов на никелевой основе. Часть II // Технология металлов. 2014. № 6. С. 3–10.
10. Данилов Д.В., Логунов А.В., Шмотин Ю.Н. Методологические основы автоматизированного проектирования жаропрочных сплавов на никелевой основе. Часть III // Технология металлов. 2014. № 7. С. 3–11.
11. Firsk K., Gustafson P.W. An assessment of the Cr–Mo system // Calphad: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry, 1988. V. 12. P. 247–254.
12. Zhou, S.H. Wang Y., Chen L.Q., Liu Z.K., Napolitano R.E. Solution-based thermodynamic modeling of the Ni–Ta and NiMo–Ta systems using first-principle calculation // Calphad: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry. 2009. V. 33. P. 631–641.
13. Паулинг Л. Природа химической связи / Пер. с англ. М.Е. Дяткиной. Под ред. проф. Я.К. Сыркина. М.: Госхимиздат, 1947. 440 с.
14. Kishkin S.T., Kablov E.N. Casting heat-resistant alloys for turbine blades. Aviation materials. fav. tr. viam (anniversary collection). MISiS, VIAM, 2002. С. 48–58. (in Russian).
15. Walston S., Cetel A., Mac Kay R., O'Hara K. et al. Joint development of a fourth generation single crystal superalloy. In Supralloy 2004 ed. // Publ. Minerals, Metals & Materials Society. Seven springs Mountain Resort, Pen. 15–24.
16. Kablov E.N., Toloraya V.N., Orehov N.G. Single-crystal rhenium-containing Nickel alloys for turbine blades of GTE // Sci. of Metals Treatm. Met. 2002. № 7. P. 274–278. (in Russian).
17. Gaiduk S.V. Design foundry high-temperature corrosion resistant alloy for the manufacture of turbine blades by the method of directed (mono) crystallization // Structural and functional materials. New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering. 2016. №1. (in Russian).
18. Argimbaeva E.B. Bazyleva O.A., Turenko E I. Intermetallic alloys based on Ni_3Al // All material. Encyclopedic reference book. 2012. № 5. (in Russian).
19. Каблов Е.Н. Литье лопатки газотурбинных двигателей. Сплавы, технология, покрытия. М.: МИСИС, 2001. 632 с.
20. Бабурина Е.В., Должанский Ю.М., Ломберг Б.С., Чуткина В.Н., Зоркина В.В. Структурная стабильность жаропрочных никелевых сплавов и ее повышение путем оптимального легирования // Авиационная промышленность. 1987. № 5. С. 62–63.

21. *Larson R.R., Miller J.* Time-temperature relationship for rupture creep stress // *Trans ASME*. 1952. V. 74. № 5. P. 765–775.
22. *Sinayski B.N., Belyaev M.S., Zhukov N.D., Pantelev A.D.* Temperature-time approach to approximation and extrapolation of characteristics of resistance of high-cycle nickel alloys to high-cycle fatigue // *Strength problems*. 1989. № 3. P. 44–50. (in Russian).
23. *Haykin S.O.* *Neural Networks and Learning Machines*. 3rd Ed. // *McMaster University, Ontario Canada*. 2009. 906 p.
24. *Yoo Y.S., Kim I.S., Kim D.H., Jo C.Y., Kim H.M., Jones C.N.* The application of neural network to the development of single crystal superalloys // *Superalloys 2004*. Edited by K.A. Green, T.M. Pollock, H. Harada, T.E. Howson, R.C. Reed, J.J. Schirra, and S. Walston TMS (The Minerals, Metals & Materials Society).
25. *Muhammad H Hasan, Muataz Al Hazza, Mubarak W. ALGraf, Zubair Imam Syed.* ANN Modeling of Nickel Base Super Alloys for Time Dependent Deformation // *J. Automat. and Control Eng.* 2014. V. 2. № 4. P. 353–356.
26. *Nurgayanova O.S., Ganeev A.A.* Mathematical modeling of the effect of alloying elements on the heat resistance of nickel alloys with a single crystal structure // *Bulletin of Ufa State Aviation Technical University*. 2006. V. 8. № 4. P. 91–95. (In Russian).
27. *Nurgayanova O.S., Ganeev A.A.* Computer-aided design of cast nickel superalloys with a single-crystal structure. *Polzunovsky almanac*. 2006. № 3. P. 22–26. (In Russian).
28. *Nurgayanova O.S., Ganeev A.A.* Neural network approaches to the design of new heat-resistant nickel casting alloys // *Neurocomputers: development, application*. 2007. № 10. P. 70–74. (In Russian).
29. *Nurgayanova O.S., Ganeev A.A.* Synthesis of cast nickel superalloys for castings with directional and single-crystal structure // *Bulletin of Ufa State Aviation Technical University*. 2007. V. 9. № 1. P. 160–169. (In Russian).
30. *Саймон Хайкин.* *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. М.: Вильямс, 2017. 1104 с.
31. *Bano N., Nganbe M.* Modeling of Thermal Expansion Coefficients of Ni based Superalloys using Artificial Neural Networks // *J. Mater. Eng. Perform.* 2013. V. 22. Issue 4. P. 952–957.
32. *Bano N., Nganbe M.* Neural Network Approach for Modeling the Hysteresis Energy of Ni based Superalloys // *Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering and Mechatronics, Ottawa, Canada, August 2012*.
33. *Bano N., Fahim A., Nganbe M.* Neural Network Model to Predict Low Cycle Fatigue Failure Energy of Rene77 // *Proceedings of the AES-ATEMA'2010 Fifth International Conference, Montreal, Quebec, Canada*. 2010. P. 123–126.
34. *Bano N., Fahim A., Nganbe M.* Fatigue Crack Initiation Life Prediction of IN738LC using Artificial Neural Network, *Proceedings of the AES-ATEMA'2010 Fifth International Conference, Montreal, Quebec, Canada*. 2010. P. 117–121.
35. *Bano N., Fahim A., Nganbe M.* Determination of Thermal Expansion Coefficient of IN738LC with Duplex Size Gamma Prime using Neural Network, *Proceedings of the Conference of Metallurgists, Winnipeg, August 2008*.
36. *Shuo Feng, Huiyu Zhou, Hongbiao Dong.* Using deep neural network with small dataset to predict material defects // *Mater. & Design*. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.11.060>
37. *Muhammad H Hasan, Muataz Al Hazza, Mubarak W. ALGraf, Zubair Imam Syed.* ANN Modeling of Nickel Base Super Alloys for Time Dependent Deformation // *J. Autom. Control Eng.* 2014. V. 2. № 4. P. 353–356. <https://doi.org/10.12720/joace.2.4.353-356>
38. *Нургаянова О.С., Ганеев А.А.* Нейросетевые подходы к проектированию новых жаропрочных литейных никелевых сплавов // *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*. 2007. № 10. С. 70–74.
39. *Нургаянова О.С., Ганеев А.А.* Синтез литейных никелевых жаропрочных сплавов для отливок с направленной и монокристаллической структурой // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического ун-та*. 2007. Т. 9. № 1. С. 160–169.
40. *Feng S., Zhou H., Dong H.* Using deep neural Regularization of Neural Networks. In *Livingstone D.J. (eds) Artificial Neural Networks. Methods in Molecular Biology™*. Humana Press, 2019. V. 458.
41. *Sinayski B.N., Belyaev M.S., Zhukov N.D.* Pantelev network with small dataset to predict material defects // *Mater. & Design*. 1989. V. 162. P. 300–310.
42. *Burden F., Winkler D.* Bayesian Regularization of Neural Networks. In: *Livingstone D.J. (eds) Artificial Neural Networks. Methods in Molecular Biology™*. Humana Press, 2008. V. 458.
43. *Нургаянова О.С.* Применение искусственных нейронных сетей в задачах классификации многокомпонентных сплавов. Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений. (ITIDS'2018) // *Труды VI Всероссийской конференции*. 2018. Уфа–Ставрополь, 28–31 мая 2018 г. С. 21–26.
44. *Нургаянова О.С., Ганеев А.А.* Система автоматизированного проектирования литейных никелевых жаропрочных сплавов с монокристаллической структурой // *Ползуновский альманах*. 2006. № 3. С. 22–26.
45. *Нургаянова О.С., Ганеев А.А.* Математическое моделирование влияния легирующих элементов на жаропрочность никелевых сплавов с монокристаллической структурой // *Вестник Уфимского государственного авиационного технического ун-та*. 2006. Т. 8. № 4. С. 91–95.
46. *Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Елютин Е.С.* Монокристаллические жаропрочные сплавы для газотурбинных двигателей // *Вестник МГТУ. Сер. "Машиностроение"*. 2011. № SP2. С. 38–52.
47. *Чжоу Ш.П., Ли Ю.С., Ян Л.З., Лю В.С., Чжу Л.Х.* Кинетика перекрывающихся процессов выделения вторичных фаз и распределение частиц по размерам фазы Ni₃Al // *ФММ*. 2019. Т. 120. № 4. С. 372–380.
48. *Tyagunov A.G., Baryshev E.E., Kostina T.K., Baum B.A., Lesnikov V.P., Semenova I.P.* The effect of long-term high-temperature heat treatment at 950°C on the structure and mechanical properties of the zhs6u superalloy // *Phys. Met. Metal.* 1998. Т. 86. № 1. С. 65–69.
49. *Кузнецов В.П., Лесников В.П., Попов Н.А.* Структура и свойства жаропрочных никелевых сплавов. *Изд-во Уральского ун-та*. 2016, 164 с.