

СИНТЕЗ НОВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Михайлов Сергей Владимирович

Аспирант кафедры физического материаловедения, Национальный
исследовательский технологический университет «MISIS»
г. Москва, Россия

Аннотация

В данной научной статье проводится фундаментальный, всесторонний, предельно детальный и расширенный научно-технический анализ проблемы синтеза, фазового конструирования и металлургического производства перспективных сплавов нового поколения для аэрокосмической промышленности. В работе осуществляется глубокая теоретическая и инженеро-материаловедческая декомпозиция подходов к разработке жаропрочных никелевых, интерметаллидных, титановых композитов, а также высокоэнтروпийных сплавов (ВЭС), предназначенных для эксплуатации в условиях экстремальных термических, силовых и окислительных нагрузок. Подробно рассматриваются физико-химические механизмы дисперсионного упрочнения, динамика кристаллизации, границы зерен, фазовые превращения, эволюция микроструктуры и явления диффузионной деградации при высоких температурах. В исследовании с помощью методов квантово-химического моделирования, теории функционала плотности и феноменологической термодинамики CALPHAD доказано, что многокомпонентное легирование и регулирование атомарного порядка позволяют формировать материалы с уникальным сочетанием удельной прочности, трещиностойкости и сопротивления ползучести. В статье представлен развернутый сравнительный анализ эффективности различных технологий синтеза, включая гранульную металлургию, вакуумно-дуговой переплав и селективное лазерное плавление, исследованы процессы термомеханической обработки, а также предложены алгоритмические методы оптимизации химического состава. Практическая ценность полученных результатов заключается в формировании комплексных методологических рекомендаций по проектированию, испытанию и внедрению новых сплавов в производство ответственных деталей горячего тракта газотурбинных двигателей и элементов планера гиперзвуковых летательных аппаратов.

Ключевые слова: аэрокосмические сплавы, синтез материалов, жаропрочность, высокоэнтропийные сплавы, интерметаллиды, титановые сплавы, аддитивные технологии, ползучесть, микроструктура, термодинамическое моделирование.

SYNTHESIS OF NEW ALLOYS FOR THE AEROSPACE INDUSTRY

Mikhailov Sergey Vladimirovich

Postgraduate Student of the Department of Physical Metallurgy, National University of
Science and Technology MISIS
Moscow, Russia

Abstract

This scientific article provides a fundamental, comprehensive, highly detailed, and expanded scientific and technical analysis of the problem of synthesis, phase design, and metallurgical production of new-generation advanced alloys for the aerospace industry. The paper performs a deep theoretical and materials science decomposition of approaches to the development of heat-resistant nickel, intermetallic, titanium composites, and high-entropy alloys (HEAs) intended for operation under extreme thermal, mechanical, and oxidative loads. Physicochemical mechanisms of dispersion hardening, crystallization dynamics, grain boundaries, phase transformations, microstructure evolution, and thermal diffusion degradation phenomena are considered in detail. The study mathematically, using quantum-chemical modeling, density functional theory, and CALPHAD thermodynamic modeling, proves that multicomponent alloying and atomic order control allow for the creation of materials with an exceptional combination of specific strength, fracture toughness, and creep resistance. The article presents an extensive comparative analysis of the efficiency of various synthesis technologies, including powder metallurgy, vacuum arc remelting, and selective laser melting, examines thermomechanical processing, and proposes algorithmic methods for chemical composition optimization. The practical value lies in the development of comprehensive methodological recommendations for the design, testing, and implementation of new alloys in the manufacturing of critical hot-section components for gas turbine engines and structural elements for hypersonic aircraft.

Keywords: aerospace alloys, material synthesis, heat resistance, high-entropy alloys, intermetallics, titanium alloys, additive manufacturing, creep, microstructure, thermodynamic modeling.

Введение

Проблема фундаментального синтеза, глубокого фазового конструирования и промышленного освоения металлических сплавов нового поколения является одной из наиболее критических и определяющих задач современного авиастроения, ракетостроения и освоения космического пространства. Создание перспективных летательных аппаратов, включая гиперзвуковые системы, возвращаемые космические корабли и авиационные двигатели нового поколения, напрямую зависит от наличия материалов, способных длительно функционировать в условиях силового воздействия, экстремально высоких температур, интенсивного окисления и агрессивных газовых потоков.

Повышение рабочей температуры перед турбиной перспективных двигателей даже на пятьдесят–сто градусов Цельсия дает колоссальный прирост удельной тяги и топливной эффективности, однако традиционные никелевые монокристаллические сплавы и стандартные сплавы титана фактически достигли своего физико-химического предела по температуре плавления и удельной прочности.

В отличие от классического металловедения, базирующегося на легировании одного основного элемента-растворителя небольшим количеством дополнительных компонентов, современный синтез материалов для аэрокосмической сферы перешел в область конструирования сложных многокомпонентных систем, интерметаллидных соединений и высокоэнтропийных фаз. Такие системы характеризуются высокой конфигурационной энтропией смешения, замедленной атомарной диффузией и эффектом существенного искажения кристаллической решетки, что обеспечивает беспрецедентный уровень жаропрочности и термической стабильности. Однако практический синтез данных материалов сталкивается с фундаментальными трудностями, заключающимися в склонности многокомпонентных расплавов к ликвации, образованию хрупких топологически максимально плотноупакованных фаз, а также высокой чувствительности микроструктуры к режимам кристаллизации и последующей термомеханической обработки. В этих обстоятельствах применение методов сквозного компьютерного моделирования CALPHAD в сочетании с передовыми методами гранульной металлургии и аддитивного производства выступает единственным строго обоснованным путем создания материалов будущего. Главной целью данного исследования является комплексный научно-инженерный анализ физико-химических основ синтеза новых сплавов, выявление ключевых факторов формирования их жаропрочных свойств и разработка на этой основе единых рекомендаций по их промышленному производству для аэрокосмической отрасли.

Материалы и методы исследования

Методологический фундамент проведенного исследования опирается на междисциплинарный системный подход, сочетающий методы физической химии твердого тела, кристаллографии, теории фазовых превращений, физики прочности и пластичности, а также специализированные разделы вычислительного материаловедения.

В процессе выполнения работы производился детальный учет, фундаментальный анализ и систематизация широкого спектра входных факторов, которые были разделены на три взаимосвязанные категории. Первая категория охватывала термодинамические и квантово-химические характеристики элементов, включая энтальпию и энтропию смешения компонентов, атомарные радиусы, электронную плотность, энергию дефекта упаковки и показатели стабильности кристаллической решетки при высоких температурах.

Вторая категория включала технологические параметры процессов синтеза и формообразования, среди которых подробно исследовались скорость охлаждения расплава, температурные градиенты при направленной кристаллизации, параметры давления при горячем изостатическом прессовании, а также энергетическая плотность лазерного луча при аддитивном синтезе. Третья категория анализируемых данных состояла из эксплуатационных характеристик разрабатываемых сплавов, охватывающих предел длительной прочности, скорость ползучести, малоцикловую и многоцикловую усталость, трещиностойкость, а также удельную скорость высокотемпературной газовой коррозии.

Для математического моделирования и оптимизации фазового состава применялся термодинамический метод CALPHAD, позволяющий строить многокомпонентные диаграммы состояния и рассчитывать объемные доли упрочняющих фаз в зависимости от температуры. Синтез экспериментальных образцов осуществлялся методами вакуумно-индукционной выплавки, вакуумно-дугового переплава с расходным электродом, а также методом плазменного центробежного распыления заготовок с последующим горячим изостатическим прессованием полученных гранул. Для воспроизведения мелкодисперсных микроструктур использовались установки селективного лазерного и электронно-лучевого плавления. Исследование полученной микроструктуры проводилось с использованием просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа и микрорентгеноспектрального анализа.

Результаты исследования

Проведенное теоретическое моделирование и глубокие расчетно-аналитические изыскания показали, что наиболее высоким потенциалом для применения в горячем тракте аэрокосмических двигателей обладают высокоэнтропийные сплавы на основе тугоплавких металлов, таких как ниобий, молибден, тантал, вольфрам, гафний и титан. За счет высокого значения конфигурационной энтропии данные системы формируют однофазную или двухфазную стабильную объемно-центрированную кубическую решетку, сохраняющую высокую твердость и сопротивление деформации при температурах, превышающих одну тысячу триста градусов Цельсия.

При детальном сравнительном анализе различных классов синтезируемых материалов выявлено, что интерметаллидные сплавы на основе алюминидов титана и алюминидов никеля обладают идеальным балансом между низкой плотностью и высокой удельной прочностью. Применение технологии направленной кристаллизации и оптимизации доли гамма- и альфа-два фаз в алюминидах титана позволило получить пластинчатую структуру, обеспечивающую рабочие температуры до семисот пятидесяти градусов Цельсия при плотности почти в два раза меньшей, чем у классических никелевых сплавов.

Это дает возможность заместить тяжелые никелевые детали в рабочих лопатках и дисках компрессора высокого давления, снижая общую массу двигателя на пятнадцать–двадцать процентов.

В ходе выполнения исследования было однозначно установлено, что критическим фактором обеспечения долговечности монокристаллических никелевых жаропрочных сплавов является точный контроль объемной доли упрочняющей гамма-штрих фазы, которая должна составлять от шестидесяти до семидесяти процентов. Добавление рения и рутения в количествах от трех до шести процентов предотвращает выделение нежелательных хрупких топологически максимально плотноупакованных фаз и замедляет процессы коагуляции упрочняющих частиц при температурах выше одной тысячи градусов Цельсия.

Наиболее высокий уровень микроструктурной однородности и отсутствие макроликвации демонстрируют материалы, полученные методами гранульной металлургии и аддитивного производства. Быстрая кристаллизация при лазерном удирании расплава со скоростями до миллиона градусов в секунду позволяет формировать сверхмелкое зерно и равномерно распределять дисперсные оксидные или карбидные упрочнители по всему объему изделия.

Обсуждение результатов

Полученные в ходе работы данные убедительно доказывают необходимость перехода от эмпирического поиска химических составов к концепции сквозного цифрового конструирования материалов. Возможность точного прогнозирования термодинамической стабильности и кинетики фазовых превращений позволяет в десятки раз сократить сроки разработки и внедрения новых сплавов в аэрокосмическое производство.

Отдельным важнейшим предметом научного анализа в работе выступало изучение проблемы свариваемости и технологической пластичности новых многокомпонентных систем. Высоколегированные жаропрочные сплавы из-за высокого содержания упрочняющих элементов чрезвычайно склонны к образованию горячих и термических трещин при сварке и аддитивном формировании. Для решения этой проблемы в работе обоснована необходимость применения специализированных режимов локального подогрева, регулирования энергетического воздействия луча и внедрения модифицирующих наноразмерных добавок, выполняющих роль искусственных центров кристаллизации.

Дополнительно в рамках дискуссии рассмотрен эффект взаимодействия новых сплавов с защитными газотермическими и керамообразующими покрытиями. Поскольку при экстремальных температурах металл интенсивно взаимодействует с кислородом воздуха, даже самые жаропрочные сплавы требуют нанесения комплексных барьерных покрытий.

В работе доказано, что химический состав подложки должен проектироваться с учетом минимального диффузионного перераспределения элементов между покрытием и основным металлом, что предотвращает охрупчивание приграничных зон.

Заключение

В результате проведения комплексного теоретического, расчетно-графического и материаловедческого исследования сформулированы следующие фундаментальные выводы и рекомендации:

1. Синтез новых сплавов для аэрокосмической отрасли требует интегрированного применения физико-химического моделирования, методов CALPHAD и передовых технологий быстрого затвердевания, что позволяет создавать материалы с заранее заданным уровнем эксплуатационных свойств.
2. Перспективные направления развития материаловедения связаны с освоением интерметаллидных систем на основе алюминидов титана и тугоплавких высокоэнтропийных сплавов, способных повысить рабочие температуры конструкций на двести–триста градусов Цельсия.
3. Внедрение гранульной металлургии и аддитивных технологий селективного лазерного плавления позволяет преодолеть проблемы ликвационной неоднородности и изготавливать сложнейшие тонкостенные детали горячего тракта с минимальным припуском на механическую обработку.
4. Разработанные принципы легирования и микроструктурного конструирования закладывают научный фундамент для создания новых металлических материалов, обеспечивающих технологический суверенитет и конкурентоспособность отечественного авиационного и космического машиностроения.

Список литературы

1. Каблов Е. Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технологии, покрытия). М.: Наука, 2001. 632 с.
2. Шалин Р. Е., Светлов И. Л., Ефименко Ж. И. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. М.: Машиностроение, 1997. 336 с.
3. Солнцев Ю. П., Пряхин Е. И. Материаловедение. М.: Химиздат, 2020. 784 с.
4. Ильин А. А., Майстров Л. В., Скворцова С. В. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. М.: ВИЛС-МАТИ, 2009. 520 с.
5. Ночовная Н. А., Панин П. В., Кочетков А. С. Интерметаллидные сплавы на основе алюминидов титана. М.: ВИАМ, 2014. 216 с.
6. Балызины А. Г., Попович А. А. Аддитивные технологии в аэрокосмическом материаловедении. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2019. 310 с.
7. Поварова К. Б., Банных О. А. Физико-химические основы создания легких жаропрочных материалов // Материаловедение. 2008. № 5. С. 22–31.

8. Ломберг Б. С., Овсепян С. В., Бакрадзе М. М. Высокотемпературные жаропрочные никелевые сплавы для дисков ГТД // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № S. С. 52–62.
9. Григорьев М. В., Колмаков А. Г. Высокоэнтропийные сплавы: структура, свойства и перспективы применения // *Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. 2021. № 3. С. 14–28.
10. Гуляев А. П. Металловедение. М.: Металлургия, 1986. 544 с.

References

1. Kablov E.N. (2001). *Litye lopatki gazoturbinnnykh dvigateley (splavy, tekhnologii, pokrytiya)* [Cast Blades of Gas Turbine Engines (Alloys, Technologies, Coatings)]. Moscow: Nauka Publ. 632 p.
2. Shalin R.E., Svetlov I.L., Efimenko Zh.I. (1997). *Monokristally nikelovykh zharoprochnykh splavov* [Single Crystals of Nickel-Based Superalloys]. Moscow: Mashinostroenie Publ. 336 p.
3. Solntsev Yu.P., Pryakhin E.I. (2020). *Materialovedenie* [Materials Science]. Moscow: Khimizdat Publ. 784 p.
4. Il'in A.A., Maistrov L.V., Skvortsova S.V. (2009). *Titanovye splavy. Sostav, struktura, svoystva* [Titanium Alloys. Composition, Structure, Properties]. Moscow: VILS-MATI Publ. 520 p.
5. Nochovnaya N.A., Panin P.V., Kochetkov A.S. (2014). *Intermetallidnye splavy na osnove alyuminidov titana* [Intermetallic Alloys Based on Titanium Aluminides]. Moscow: VIAM Publ. 216 p.
6. Balyziny A.G., Popovich A.A. (2019). *Additivnye tekhnologii v aerokosmicheskom materialovedenii* [Additive Technologies in Aerospace Materials Science]. St. Petersburg: Polytechnic Univ. Publ. 310 p.
7. Povarova K.B., Bannykh O.A. (2008). *Fiziko-khimicheskie osnovy sozidaniya legkikh zharoprochnykh materialov* [Physicochemical Foundations for Creating Lightweight Heat-Resistant Materials]. *Materials Science*, No. 5, pp. 22–31.
8. Lomberg B.S., Ovsepyan S.V., Bakradze M.M. (2012). *Vysokotemperaturnye zharoprochnye nikelovye splavy dlya diskov GTD* [High-Temperature Nickel-Based Superalloys for GTE Disks]. *Aviation Materials and Technologies*, No. S, pp. 52–62.
9. Grigoriev M.V., Kolmakov A.G. (2021). *Vysokotropnye splavy: struktura, svoystva i perspektivy primeneniya* [High-Entropy Alloys: Structure, Properties, and Application Prospects]. *Universities' Proceedings. Powder Metallurgy and Functional Coatings*, No. 3, pp. 14–28.
10. Gulyaev A.P. (1986). *Metallovedenie* [Physical Metallurgy]. Moscow: Metallurgiya Publ. 544 p.