

Количественный анализ параметров структуры деформируемых никелевых сплавов с применением стандартных образцов

Е. Б. ЧАБИНА, Е. В. ФИЛОНОВА, Д. В. ЗАЙЦЕВ

Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов,
Москва, Россия, e-mail: gammaprim@yandex.ru

Проведен количественный анализ микроструктуры двух образцов деформируемого никелевого сплава системы Ni–Co–Cr–Al–Ti–W–Mo–Nb. Исследования выполнены с использованием разработанных стандартных образцов состава и параметров структуры указанного сплава и методики измерений размеров частиц и фаз в нанометровом диапазоне. Показано, что в образце с более низким пределом прочности при растяжении размерные характеристики упрочняющей γ' -фазы не соответствуют параметрам эталонной структуры сплава.

Ключевые слова: деформируемые никелевые жаропрочные сплавы, структурно-геометрические характеристики, стандартный образец состава и параметров структуры.

The quantitative analysis of microstructure of two samples of deformable nickel superalloy with different mechanical properties with use of the developed composition and structure Ni–Co–Cr–Al–Ti–W–Mo–Nb system nickel alloy standard samples and the procedure of particle sizes and phases measurement in nanometer range was carried out. It has been shown that in the sample with the lower tensile strength limit the strengthening γ' -phase characteristics do not correspond with the reference alloy structure parameters.

Key words: deformable nickel base superalloys, structural and geometrical characteristics, standard sample of composition and structure.

Деформируемые никелевые жаропрочные сплавы являются основным материалом для изготовления дисков турбины. Свойства этих сплавов во многом определяют эксплуатационные характеристики газотурбинных двигателей и стационарных энергетических установок [1, 2].

Для обеспечения работоспособности дисков к материалу предъявляются следующие требования: высокий уровень длительной и кратковременной прочности и пластичность во всем диапазоне рабочих температур; отсутствие чувствительности к концентраторам напряжений при статическом нагружении; достаточно высокое сопротивление малоциклового усталости (порядка 900 МПа при 650 °C на базе 10^4 циклов) [2]. Практически все перечисленные параметры являются структурно-чувствительными, т. е. характеристики любого изделия из никелевых жаропрочных сплавов в конечном итоге определяются структурой сплава [3]. Подробное и всестороннее исследование локального и фазового состава материала дисков на всех стадиях производства позволяет формировать его структуру, а следовательно, получать оптимальный материал с заданными свойствами [4–6].

Структура деформируемых жаропрочных никелевых сплавов представляет зерна γ -твердого раствора (γ -фаза), упрочненные γ' -фазой (интерметаллидное соединение на основе Ni_3Al). В материале содержатся первичные карбиды, равномерно распределенные по объему. Границы зерен упрочнены вторичными карбидами и боридами. Содержание γ' -фазы в наиболее сложнотлегированных сплавах около 55–65 %. При этом в материале имеются частицы γ' -фазы разных размеров, формирующиеся путем сложной терми-

ческой обработки, включающей операции закалки и старения [4, 5].

В структуре рассматриваемых сплавов системы Ni–Co–Cr–Al–Ti–W–Mo–Nb присутствует упрочняющая интерметаллидная γ' -фаза трех размеров (первичная, вторичная и третичная — наноразмерная), выделяющаяся на различных стадиях штамповки [7]. Следует отметить, что в структуре менее легированных сплавов, разработанных в середине XX в., содержится γ' -фаза двух размеров (отсутствует наноразмерная) и составляет около 40 %. Повышение конструкционной прочности современных деформируемых жаропрочных никелевых сплавов обеспечивается увеличением объемной доли γ' -фазы путем усложнения легирования и выделения третичной наноразмерной (20–50 нм) γ' -фазы в прослойках γ -фазы в результате специальных технологических приемов.

Для углубленного исследования структурно-фазового состояния таких сплавов необходимы не только качественное описание созданной структуры, но и количественный анализ геометрических характеристик составляющих сплава. Другими словами, с разработкой и внедрением в практику новых видов наноструктурированных деформируемых жаропрочных никелевых сплавов появляются новые измерительные задачи контроля их структурно-геометрических характеристик [8]. Поставленные задачи для сплава указанной системы состоят в определении геометрических характеристик (длины, ширины, округлости, диаметра и т. д.) частиц γ' -фазы на изображениях, полученных методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и растровой электронной микроскопии (РЭМ), которые в настоящее время получили наибольшее распространение при измерениях в наномет-

Таблица 1

Механические свойства образцов из деформируемого никелевого сплава системы Ni–Co–Cr–Al–Ti–W–Mo–Nb

Номер образца	Испытания на прочность				
	кратковременную при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$				длительную при $T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\sigma = 1070\text{ МПа}$
	предел прочности σ_B , МПа	предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	относительное удлинение δ , %	относительное сужение ψ , %	время до разрушения, ч
1	1430	1200	9,8	10,0	91
2	1520	1104	16,2	15,0	168

ровом диапазоне. Методы ПЭМ и РЭМ позволяют измерять размеры частиц с неопределенностью не более 10 %. Основная составляющая неопределенности одного измерения обусловлена разрешением прибора (0,8—1,0 нм для ПЭМ и 3 нм для РЭМ), размытостью краев включений, дифракционными условиями визуализации частиц.

Исследования локального состава и идентификацию фаз сплава системы Ni–Co–Cr–Al–Ti–W–Mo–Nb проводили методом микрорентгеноспектрального анализа (МРСА). Для определения структурно-геометрических характеристик использовали аттестованную методику [9]. Измеряли линейные размеры частиц γ' -фазы и толщину прослоек между ними. Было установлено, что структура сплава в термообработанном состоянии, обеспечивающая заданные свойства, содержит зерна γ -фазы размером 20–40 мкм, также в ней наблюдается равномерное распределение крупных (3,0—5,0 мкм) частиц первичной γ' -фазы по границам зерен и первичных карбидов на основе ниобия и титана в объеме материала. Внутри зерна твердый раствор упрочнен мелкими частицами вторичной (0,1—0,3 мкм) и третичной наноразмерной (10—70 нм) γ' -фазы. Границы зерен упрочнены частицами зернограницной γ' -фазы, вторичными карбидами и боридами на основе Мо (по данным МРСА). Образцы сплавов с такой структурой были выбраны в качестве эталонных (рисунок).

В результате был создан комплект стандартных образцов (СО) состава и параметров структуры наноструктурированных деформируемых жаропрочных никелевых сплавов рассматриваемой системы. Нормированные метрологические характеристиками данного сплава — массовая концентрация Al, Ti, Cr, Co, Nb, Mo, W, размеры частиц вторичной и третичной (наноразмерной) γ' -фазы и прослоек γ -фазы. Разработанный комплект СО был аттестован как СОП (СО предприятия) [10]. С помощью СОП проведен количественный анализ микроstructures двух образцов деформируемого ни-

келевого сплава с разными механическими свойствами; химический состав образцов соответствовал требованиям нормативной документации на сплав (табл. 1). Результаты измерений параметров микроstructures материала приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры структуры образцов из деформируемого никелевого сплава системы Ni–Co–Cr–Al–Ti–W–Mo–Nb

Номер образца	Средний размер частиц γ' -фазы, мкм	
	первичной	вторичной
1	2,66	0,07
2	4,44	0,20
СО-08-11	3,00—5,00	0,10—0,30

Анализ параметров структуры сплава показал, что в образце № 1 с более низким пределом прочности при растяжении, чем у образца № 2, размерные характеристики упрочняющей γ' -фазы не соответствуют эталонной структуре сплава, определяемой СОП (см. табл. 2). В образце № 2 размеры частиц первичной и вторичной γ' -фаз находятся в рамках СО.

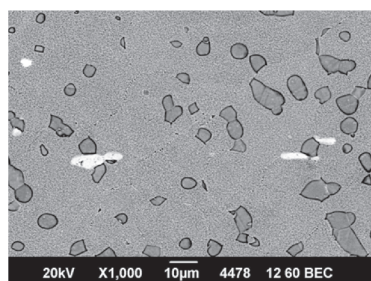
Созданные СО-08-11 для измерений характеристик наноструктурированных деформируемых жаропрочных никелевых сплавов можно применять для контроля качества штамповок из этих сплавов, используемых для производства газотурбинных двигателей авиационного и наземного применения.

Литература

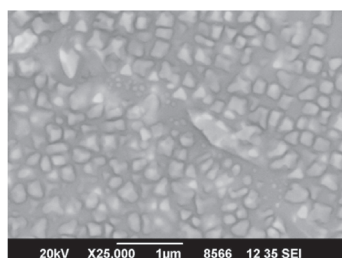
1. Каблов Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 7—17.

2. Ломберг Б. С. Жаропрочные сплавы и материалы для дисков ГТД // Авиационные материалы на рубеже XX—XXI веков. М.: ВИАМ, 1994. С. 258—264.

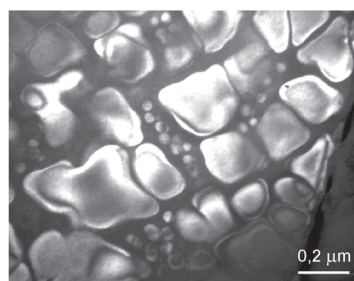
3. Ломберг Б. С., Бакрадзе М. М., Чабина Е. Б., Филонова Е. В. Взаимосвязь структуры и свойств высокожа-



а



б



в

Эталонная микроstructure деформируемого никелевого сплава системы Ni–Co–Cr–Al–Ti–W–Mo–Nb:

а — первичная γ' -фаза, карбиды (съемка на РЭМ в режиме обратноотраженных электронов); б — вторичная и наноразмерная (третичная) γ' -фаза (съемка на РЭМ в режиме вторичных электронов); в — наноразмерная (третичная) γ' -фаза (съемка на ПЭМ)

ропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2011. № 2. С. 25—30.

4. Каблов Е. Н., Оспенникова О. Г., Ломберг Б. С. Комплексная инновационная технология изотермической штамповки на воздухе в режиме сверхпластичности дисков из супержаропрочных сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 5. С. 129—141.

5. Ломберг Б. С., Овсепян С. В., Бакрадзе М. М. Особенности легирования и термической обработки жаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей нового поколения // Авиационные материалы и технологии. 2010. № 2. С. 3—8.

6. Чабина Е. Б., Алексеев А. А., Филонова Е. В., Лукина Е. А. Применение методов аналитической микроскопии и рентгеноструктурного анализа для исследования структурно-фазового состояния материалов // Труды ВИАМ. 2013. № 5. Ст. 06. [Офиц. сайт] <http://viam-works.ru/ru> (дата обращения 03.06.2015 г.)

7. Чабина Е. Б., Филонова Е. В., Ломберг Б. С., Бакрадзе М. М. Структура современных деформируемых никелевых сплавов // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2012. № 6. С. 22—27.

8. Метрологическое обеспечение нанотехнологий и продукции наноиндустрии / Под. общ. ред. В. Н. Крутикова. М.: ЛОГОС, 2011.

9. МИ 1.2.042—2011. Методика измерений размеров и геометрических характеристик на изображениях, полученных методами просвечивающей и растровой электронной микроскопии с помощью программы обработки изображений Image Expert Pro 3x.

10. Свидетельство № СО-08-11 об утверждении типа стандартного образца (СО) состава и параметров структуры наноструктурированных деформируемых жаропрочных никелевых сплавов категории стандартных образцов предприятия (комплект).

Дата принятия 03.08.2015 г.

