

УДК 620.179.1

DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-41-48

Р.М. Назаркин¹**РЕНТГЕНОДИФРАКЦИОННЫЕ МЕТОДИКИ ПРЕЦИЗИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ РЕШЕТОК НИКЕЛЕВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ (КРАТКИЙ ОБЗОР)**

В работе описаны наиболее распространенные методики рентгеноструктурного анализа никелевых жаропрочных сплавов по данным отечественных и зарубежных литературных источников, показаны возможности и области применения современных методик прецизионного определения параметров кристаллических решеток γ/γ' -фаз никелевых жаропрочных сплавов. Отмечено влияние упругих внутренних напряжений в кристалле на расщепление рентгеновских дифракционных рефлексов и результаты рентгеновского структурного анализа. В обзоре представлены схемы расщепления рентгеновских дифракционных рефлексов и модели их интерпретации для определения параметров кристаллической решетки и мисфита (γ/γ')-фаз никелевых жаропрочных сплавов.

Ключевые слова: мисфит, никелевые жаропрочные сплавы, монокристаллы, параметр решетки.

The most widely used techniques of X-ray diffraction analysis of nickel-based superalloys described in Russian and foreign references are presented in this paper. In addition, fields of application and capabilities of modern techniques for precise determination of crystal lattice constants of γ/γ' -phases in Ni-based superalloys are demonstrated. An influence of internal elastic stresses in a crystal on X-ray diffraction reflexes splitting and results of X-ray diffraction analysis are discussed. Schemes of X-ray diffraction reflexes splitting and models of their interpretation for determination of crystal lattice constants and misfit of γ/γ' -phases in Ni-based superalloys are shown in the review.

Keywords: misfit, Ni-based superalloys, single crystals, lattice constant.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации

[Federal state unitary enterprise «All-Russian scientific research institute of aviation materials» State research center of the Russian Federation] E-mail: admin@viam.ru

Введение

Разработка современных монокристаллических жаропрочных сплавов для авиационных газотурбинных двигателей и наземных газотурбинных энергетических установок практически невозможна без знания характеристик металлического сплава как на макроуровне, так и на уровне микроструктуры и субструктуры [1, 2]. Фактором, характеризующим субструктуру жаропрочного материала, является параметр кристаллической структуры фазы γ -Ni (ГЦК-твердый раствор на основе никеля) и γ' -твердый раствор ($L1_2$ -фаза на основе интерметаллида Ni_3Al). Поскольку обе фазы являются когерентными, то имеет место несоответствие параметров кристаллических решеток γ - и γ' -фаз (мисфит). Известно, что мисфит связан со степенью концентрационного твердорастворного упрочнения фаз, с эффективностью дисперсионного упрочнения сплава, скоростью ползучести и другими высокотемпературными механическими свойствами кристаллов, что в итоге определяет поведение материала в условиях эксплуатации при рабочих температурах до 1200°C [1–8]. Процедура прецизионного определения параметра кристаллической решетки фазы либо химического соединения рентгеновским методом описана в литературе и не должна представлять затруднений [6, 9, 10]. Тем не менее при исполь-

зовании рентгеновских (либо нейтронных) дифрактометров различные исследовательские группы как в России, так и за рубежом, не пришли к единому общепризнанному стандарту определения параметров кристаллических решеток γ/γ' -фаз в никелевых жаропрочных сплавах и применяют различные методики определения мисфита (γ/γ')-фаз.

В данной работе кратко рассмотрены и сопоставлены наиболее часто используемые методики прецизионного определения параметров кристаллических решеток (γ/γ')-фаз.

Материалы и методы

Все существующие методы определения несоответствия параметров кристаллических решеток (γ/γ')-фаз (мисфита) по физической природе определяемого параметра можно разделить на две группы:

– определение истинного несоответствия параметров решеток фаз (обусловленного только различием их химической природы) с исключением влияния межфазных напряжений на данные эксперимента – так называемый «нестесненный» мисфит;

– определение несоответствия параметров решеток фаз (мисфита) без исключения влияния межфазных напряжений на данные эксперимента – так называемый «стесненный» мисфит.

По типу рентгеновского рефлекса, используемого для прецизионного определения мисфита (γ/γ')-фаз, можно выделить методики, базирующиеся на использовании рефлексов систем $(hk0)$, $(00h)$ и (hhh) . Выбор рефлекса, как правило, обосновывается схемой нагруженного состояния жаропрочного материала, удобством методики при практическом применении, более высоким порядком математической точности получаемых значений межплоскостных расстояний d/n , используемых для дальнейшего вычисления параметров кристаллической решетки (мисфита) (γ/γ')-фаз. Практически всеми отечественными авторами используется формула расчета мисфита в следующем виде:

$$\delta = [(\alpha_{\gamma} - \alpha_{\gamma'}) / \alpha_{\gamma}] \cdot 100\%, \quad (1)$$

где α_{γ} – параметр кристаллической решетки γ -твердого раствора, $\alpha_{\gamma'}$ – параметр кристаллической решетки интерметаллидной γ' -фазы [6, 11].

В зарубежных литературных источниках [12, 13] формула расчета мисфита, как правило, выглядит следующим образом:

$$\delta = [2(\alpha_{\gamma} - \alpha_{\gamma'}) / (\alpha_{\gamma} + \alpha_{\gamma'})] \cdot 100\%. \quad (2)$$

Рассмотрим методику прецизионного определения параметров кристаллической решетки γ - и γ' -фаз, основывающуюся на использовании рефлексов систем (hhl) и $(hk0)$: (331) и (420). В источнике [14] приводится пример расщепления совместного рефлекса (γ/γ')-фаз (420) на индивидуальные рефлексы γ - и γ' -фаз. Дифрактограмма рефлекса γ - и γ' -фаз (420) в нейтронном излучении (длина волны 0,136 нм) приведена на рис. 1.

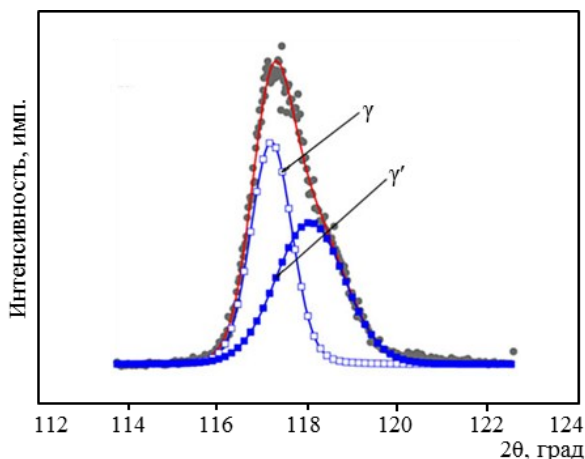


Рис. 1. Образец расщепления рефлекса (γ/γ')-фаз (420) при нейтронном излучении (• – экспериментальные точки)

Параметры кристаллической решетки вычисляются по стандартной формуле:

$$a = \lambda \frac{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}{2 \sin \theta}, \quad (3)$$

где a – параметр решетки кубической фазы, нм; λ – длина волны рентгеновского или нейтронного излучения, нм; h, k, l – кристаллографические индексы используемого дифракционного рефлекса; θ – угол дифракции для центра тяжести рефлекса фазы.

Особенностью данной методики является получение так называемого «стесненного» мисфита; для получения значений «нестесненного» мисфита следует учесть влияние межфазных напряжений на параметры кристаллической решетки. Данная методика также более подробно описана в работах [15, 16], где использовали рентгеновские рефлексы (220), (311) и (400). При анализе данных рентгеноструктурного анализа выявлено тетрагональное искажение кристаллической решетки γ -фазы, что указывает на наличие значительных упругих напряжений в материале; предложена и построена матрица напряженного состояния.

Группа исследователей ВИАМ также предложила оригинальную методику прецизионного определения параметров кристаллической решетки γ - и γ' -фаз, базирующуюся на исследовании рефлексов (420) и (331) [11, 17, 18]. Разработан способ определения остаточных напряжений в изделиях из монокристаллических материалов рентгеновским методом, заключающийся в том, что на поверхности контролируемого изделия выбирают необходимое направление, в котором будут определять остаточные напряжения, и кристаллографические плоскости, на которые воздействуют пучком рентгеновского излучения. Затем регистрируют дифракционную картину и определяют угловые положения рефлексов, по взаимному расположению которых рассчитывают остаточные напряжения.

Для определения остаточных напряжений (в выбранном и перпендикулярно выбранному направлениях) используют такие кристаллографические плоскости, рефлексы от которых находятся в прецизионной области и проекции нормалей которых на поверхность контролируемого изделия имеют минимальный угол отклонения от выбранного направления. Затем поочередно выводят выбранные плоскости в отражающее положение путем вращения и наклона образца, воздействуют параллельным рентгеновским пучком на контролируемое изделие. С помощью компьютера регистрируют рефлексы от выбранных плоскостей и обрабатывают рефлексы для определения угловых положений.

Истинные периоды кристаллических решеток каждой из фаз, неискаженные остаточными напряжениями, определяют из формулы

$$a_{\text{эсп}} = a_0 + \frac{K_1 - \mu K_2}{(1 + \mu)}, \quad (4)$$

где a_0 – истинный период кристаллической решетки фазы, неискаженный остаточными напряжениями; $a_{\text{эсп}}$ – экспериментально наблюдаемый параметр кри-

сталлической решетки; K_1 и K_2 – коэффициенты уравнения плоскости, определяемые по экспериментальным данным; μ – анизотропный коэффициент Пуассона.

Примеры дифрактограмм рентгеновских рефлексов γ - и γ' -фаз (420) и (331) в Си K_β -излучении приведены на рис. 2.

С другой стороны, учеными Казанского государственного технического университета и ВИАМ в работах [19, 20] предложено применять так называемый «стесненный» мисфит, определяемый по рентгеновским дифракционным рефлексам типа $(00h)$ и (hhh) , например (004) и (222), – для определения степени когерентности поверхности раздела (γ/γ')-фаз в никелевом жаропрочном сплаве и наблюдения изменений структурно-фазового состояния материала в процессе ползучести. В работе [21] также используют «стесненный» мисфит для определения состояния материала при высокотемпературных выдержках и определения упругих напряжений в сплаве аналитическим методом. Нейтронная дифрактограмма (длина волны 0,1–0,8 нм) дифракционной линии типа $(00h)$ – (002) приведена на рис. 3.

Появление эффекта «тетрагональности», т. е. наблюдаемое расщепление $(h00)$ рефлекса матричной γ -фазы на дифракционном пике (002) монокристаллического никелевого жаропрочного сплава марки SC16, в работе [22] объясняется наличием упругих искажений кристаллической решетки; отмечено также, что значения параметров кристаллических решеток γ - и γ' -фаз, определенные по дифракционным пикам (002), (004), (044) и (006), заметно различаются между собой. Для расчета значения мисфита γ - и γ' -фаз по экспериментальным данным предложена методика, учитывающая наличие двух фракций γ -твердого раствора:

$$\delta_{\text{общ}} = \frac{1}{3}\delta_{1/3} + \frac{2}{3}\delta_{2/3}, \quad (5)$$

где $\delta_{1/3}$, $\delta_{2/3}$ – мисфит фаз, определенный для фракции γ -твердого раствора с меньшим и большим значением параметра кристаллической решетки соответственно; $\delta_{\text{общ}}$ – средневзвешенное значение мисфита γ - и γ' -фаз.

Дифрактограмма рефлекса (002) с проявлением расщепления рефлекса матричной γ -фазы в монохроматическом синхротронном излучении приведена на рис. 4.

Коллектив авторов ИМЕТ РАН и Сибирского центра синхротронного излучения РАН использует методику «стесненного» мисфита [23] для прецизионного определения параметров кристаллических решеток γ - и γ' -фаз и объясняет появление «тетрагональности» кристаллической решетки при разделении дифракционного пика на синглеты не наличием упругих напряжений в сплаве, а двух типов γ' -фазы и двух типов γ -твердого раствора, которые локализованы соответственно в осях дендритов и межосном пространстве. Рас-

щепление экспериментального рефлекса (220) в синхротронном излучении (длина волны 0,15406 нм) показано на рис. 5.

В работе [24] указывается на отсутствие тетрагонального расслоения γ -твердого раствора в экномнолегированном никелевом жаропрочном сплаве Нимоник-80. В работе [25], напротив, указывается на сильное тетрагональное расслоение γ -твердого раствора в опытном монокристаллическом никелевом жаропрочном сплаве, содержащем 20% (Cr+W+Mo+Ta), 12% Co, 5% Re+3% Ru, что показывает определяющее влияние химического состава сплава на степень «тетрагональности» γ -твердого раствора.

Авторы [25] определяют значения параметров кристаллической решетки для всех фракций γ' -фазы ($a_{\gamma'_1}$, $a_{\gamma'_2}$) и твердого раствора (a_{γ_1} , a_{γ_2}). Определение параметров проводится по пяти дифракционным рефлексам: (010), (200), (220), (113) и (222). Затем вычисляется среднее арифметическое параметров кристаллической решетки для всех дифракционных пиков γ' -фазы ($a_{\gamma'_1}^{\text{cp}}$, $a_{\gamma'_2}^{\text{cp}}$) и твердого раствора ($a_{\gamma_1}^{\text{cp}}$, $a_{\gamma_2}^{\text{cp}}$). Среднее значение несоответствия кристаллических решеток (γ/γ')-фаз (мисфита) можно определить как

$$\delta_{\text{cp}} = \left[\frac{a_{\gamma_1}^{\text{cp}} - a_{\gamma_2}^{\text{cp}}}{a_{\gamma_1}^{\text{cp}}} \right] \cdot 100\%, \quad (6)$$

где $a_{\gamma_1}^{\text{cp}}$, $a_{\gamma_2}^{\text{cp}}$ – средний параметр кристаллической решетки двух фракций γ' -фазы и γ -твердого раствора соответственно.

Иностранцами исследователями в работе [26] предложена методика определения «нестесненных» параметров кристаллической решетки и мисфита (γ/γ')-фаз, которая заключается в записи и сравнительном анализе дифрактограмм от монолитного образца никелевого жаропрочного сплава и порошка γ' -интерметаллидной фазы, получаемого путем избирательного химического растворения γ -твердого раствора, т. е. химического изолирования γ' -интерметаллидной фазы. Рентгеновская дифрактограмма, иллюстрирующая методику, приведена на рис. 6.

Авторы предлагают собственные уравнения для определения значения «нестесненного» мисфита исходя из соотношения

$$\delta_{\text{стесн}} = \delta_{\text{нестесн}} + \delta_{\text{упр}}, \quad (7)$$

где $\delta_{\text{стесн}}$, $\delta_{\text{нестесн}}$ – «стесненный» и «нестесненный» мисфит соответственно; $\delta_{\text{упр}}$ – изменение мисфита, обусловленное наличием упругих искажений кристаллической решетки (γ/γ')-фаз в монолитном образце;

$$\delta_{\text{нестесн}} = \frac{a_{\text{стесн}\gamma'} - a_{\text{стесн}\gamma}}{a_{\text{стесн}\gamma}} - \frac{a_{\text{нестесн}\gamma'} - a_{\text{нестесн}\gamma}}{a_{\text{нестесн}\gamma}}, \quad (8)$$

где $a_{\text{стесн}\gamma}$, $a_{\text{стесн}\gamma'}$ – «стесненный» параметр кристаллической решетки для γ -твердого раствора и γ' -интерметаллидной фазы, определенный на монолитном образце; $a_{\text{нестесн}\gamma}$ – «нестесненный» параметр кристаллической решетки γ' -интерметаллидной фазы, определенный на порошке, выделенном химическим методом.

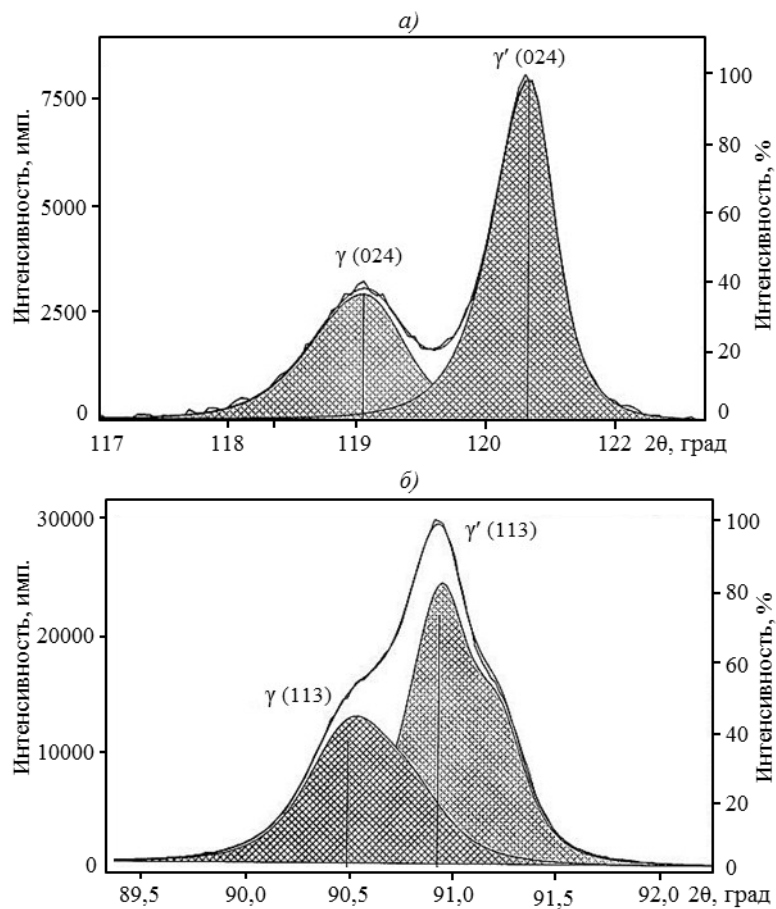


Рис. 2. Образец расщепления рефлексов (γ/γ')-фаз (420) (a) и (133) (б) при $\text{Cu } K_{\beta}$ -излучении

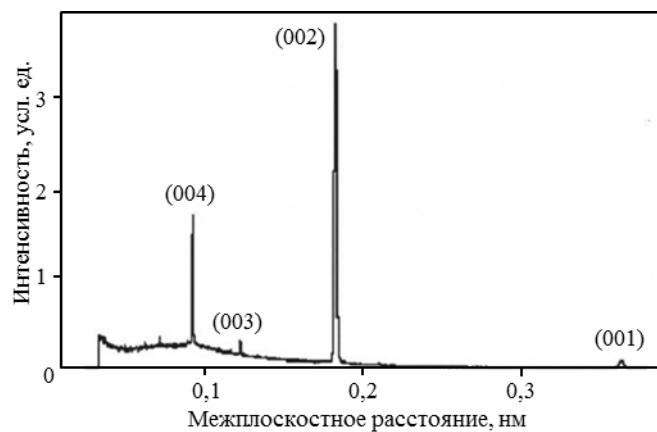


Рис. 3. Спектр нейтронной дифракции никелевого жаропрочного сплава марки PWA 1422

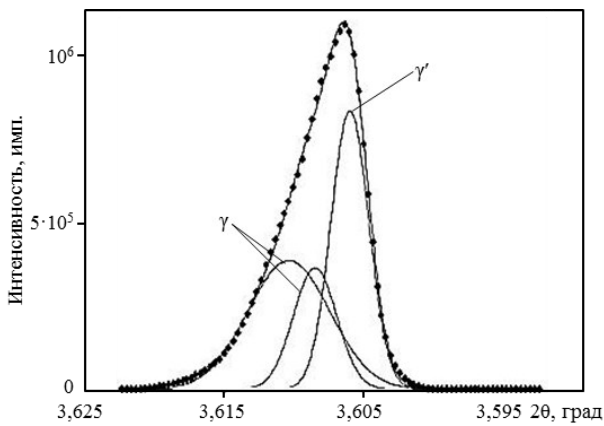


Рис. 4. Дифракционный пик (002) никелевого жаропрочного сплава марки SC16 с выявленным расщеплением рефлекса от γ -твердого раствора в монохроматическом синхротронном излучении (♦ – экспериментальные точки)

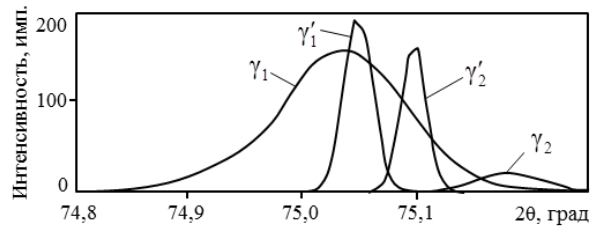


Рис. 5. Расщепление дифракционного пика (220) никелевого жаропрочного сплава

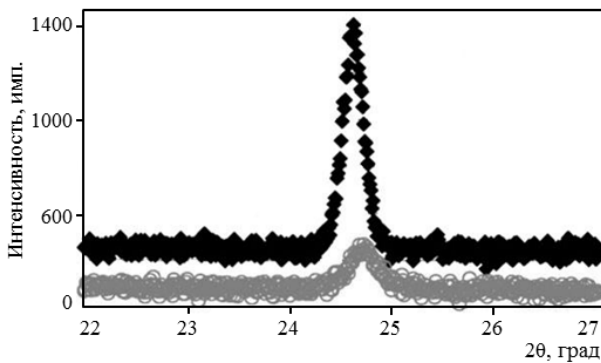


Рис. 6. Сопоставление дифрактограмм рентгеновских рефлексов (001) γ' -интерметаллидной фазы после избирательного растворения γ -твердого раствора (♦) и на монокристаллическом образце (○)

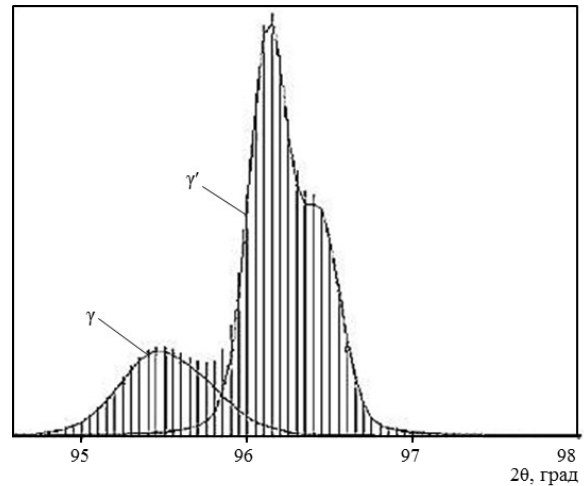


Рис. 7. Образец расщепления рентгеновского рефлекса (222) в K_{α} -излучении

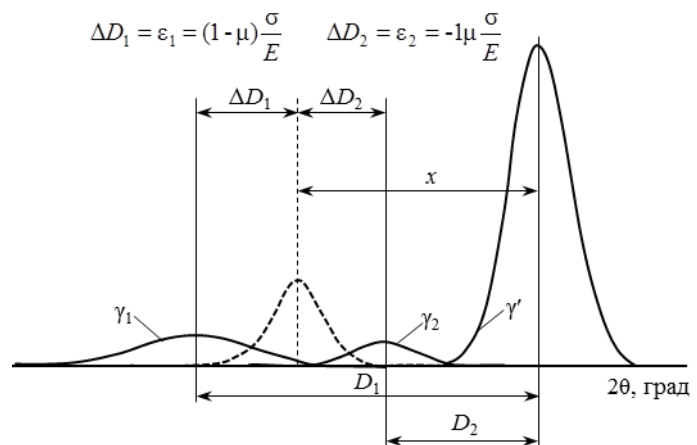


Рис. 8. Схема расщепления рентгеновского рефлекса типа (00h) под действием упругих межфазных напряжений

К достоинствам данного метода, несомненно, относится прямое определение «нестесненного» параметра γ' -фазы, однако для прямого определения параметра решетки γ -твердого раствора необходимы выплавка и рентгеноструктурный анализ модельной композиции с химическим составом, идентичным композиции γ -твердого раствора. Применение данной методики в повседневном анализе ограничивается достаточно высокой трудоемкостью и продолжительностью анализа.

Группой сотрудников ВИАМ под руководством А.И. Самойлова был разработан комплекс методик рентгеноструктурного анализа литейных никелевых жаропрочных сплавов для прецизионного определения параметров кристаллической решетки γ - и γ' -фаз [27]. Комплекс методик включает в себя как методику определения «стесненного» мисфита, так и методику определения «нестесненного» мисфита с получением значения истинного периода кристаллической решетки γ - и γ' -фаз, неискаженного остаточными напряжениями.

Методика определения «стесненного» мисфита подробно описана в работах [27, 28] и заключается в записи и анализе профиля моноиндексного рефлекса типа (hhh). Для примера рассмотрим специфику формирования рефлекса (222). Для этого направления характерно постоянство деформации вдоль плоскости [111] любой из граней кубической оболочки, что следует, во-первых, из идентичности напряженного состояния граней ($\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$); во-вторых – из равенства углов между направлением деформации [111] и плоскостями действия межфазных напряжений (100), (010) и (001), что указывает на идентичность отражений от всех трех плоскостей куба, т. е. на отсутствие расслоения рефлекса (222) от грани матричной γ -оболочки. Пример использования моноиндексного дифракционного пика – рефлекс (222) в Cu K_{α} -излучении – приведен на рис. 7.

Расчет значения мисфита проводится по уравнению (1). Использование моноиндексных рефлексов при определении мисфита никелевых жаропрочных сплавов позволяет избавиться от влияния на результаты разделения рефлексов межфазных напряжений, а следовательно, упростить процедуру обработки данных и повысить точность результатов рентгеноструктурного анализа. В работе [29] также используется моноиндексный рефлекс типа (hhh) – дифракционный пик (111) в монохроматизированном излучении Cu $K_{\alpha 1}$ для определения параметров кристаллической решетки γ -твердого раствора и γ' -фазы. Отмечено, что появления расслоения дифракционного пика γ -твердого раствора не наблюдается, и несоответствие параметров кристаллической решетки (γ/γ' -фаз (мисфит) легко рассчитывается по стандартной методике – как описано в уравнении (2) – после компьютерного разделения перекрывающихся рефлексов.

Методика определения «нестесненного» мисфита предложена в работе [30] и заключается в анализе профиля моноиндексных дифракционных пиков, таких как (311), (420) и (400), с выявлением расщепления рефлекса от γ -твердого раствора. Схема расщепления рентгеновского рефлекса приведена на рис. 8.

Окончательно «нестесненный» мисфит рассчитывается по формуле

$$X = \frac{2\mu D_1 + (1-\mu)D_2}{(1+\mu)}, \quad (9)$$

где D_1, D_2 – «стесненные» мисфиты для фракций γ_1 и γ_2 рефлекса γ - и γ' -фазы соответственно; X – «нестесненный» мисфит, свободный от влияния упругих искажений кристаллической решетки γ -твердого раствора; μ – коэффициент Пуассона γ -твердого раствора; E – модуль упругости γ -твердого раствора; σ – компонент упругих межфазных напряжений, действующих в γ -фазе; ε – относительная деформация.

Положительной особенностью описанной методики является относительно невысокая трудоемкость и экспрессность анализа в сочетании с достаточно высокой точностью получаемых результатов.

Обсуждение и заключения

Рассмотрев вышеперечисленные методики прецизионного определения параметров кристаллической решетки (γ/γ' -фаз, можно сделать вывод, что все описанные методики рентгеноструктурного анализа никелевых жаропрочных сплавов обеспечивают достаточно высокую точность и достоверность получаемых результатов.

Выбор методики в каждом конкретном случае обуславливается удобством применения, возможностями аппаратуры рентгеноструктурного анализа, сопоставимостью получаемых результатов с ранее полученными данными, трудоемкостью и продолжительностью анализа.

При необходимости определения параметров кристаллических решеток (γ/γ' -фаз в жаропрочных сплавах, содержащих сравнительно небольшое количество легирующих элементов (например – сплавы Нимоник-80, ЖС6), следует отдать предпочтение методикам определения «стесненного» мисфита, так как в сплавах данной категории эффект расщепления рефлекса γ -фазы незначителен и значения «стесненного» и «нестесненного» мисфита не будут существенно отличаться.

Для современных жаропрочных сплавов нового поколения (например – сплавы ВЖМ4, CMSX10), содержащих значительное количество легирующих элементов, включая рений и рутений, необходимо определение «нестесненного» мисфита в связи со значительным проявлением эффекта расщепления рефлекса γ -фазы под воздействием сравнительно высокого уровня меж-

фазных напряжений. Необходимо учитывать также разность параметров кристаллических решеток γ - и γ' -фаз в свободном состоянии и в монолитном сплаве при конструировании новых жаропрочных сплавов и оптимизации химического состава уже

разработанных никелевых жаропрочных сплавов. Кроме того, для сплавов данного типа представляет интерес и определение величины «стесненного» мисфита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сидоров В.В., Ригин В.Е., Тимофеева О.Б., Мин П.Г. Влияние кремния и фосфора на жаропрочные свойства и структурно-фазовые превращения в монокристаллах из высокожаропрочного сплава ВЖМ4-ВИ //Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 32–38.
2. Горюнов А.В., Сидоров В.В., Ригин В.Е., Зайцев Д.В. Формирование наноструктурированного состояния в литейном жаропрочном сплаве ВЖМ4-ВИ при микролегировании его лантаном //Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 39–43.
3. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А. Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных сплавов с монокристаллической и композиционной структурой //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 3–8.
4. Бондаренко Ю.А., Каблов Е.Н. Направленная кристаллизация жаропрочных сплавов с повышенным температурным градиентом //МирТОН. 2002. №7. С. 20–23.
5. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Петрушин Н.В. Никелевые жаропрочные сплавы для литья лопаток с направленной и монокристаллической структурой //Материаловедение. 1997. №4. С. 32–39.
6. Самойлов А.И., Назаркин Р.М., Моисеева Н.С. Определение мисфита во фрагментированных монокристаллах никелевых жаропрочных сплавов //Труды ВИАМ. 2013. №5. Ст. 02. (viam-works.ru).
7. Оспенникова О.Г. Перспективы развития жаропрочных литейных и деформируемых сплавов, защитных покрытий для деталей ГТД //Новости материаловедения. Наука и техника. 2013. №4 (materialsnews.ru).
8. Оспенникова О.Г., Орлов М.Р., Автаев В.В. Анизотропия упругопластических характеристик жаропрочных никелевых сплавов – основа конструирования монокристаллических турбинных лопаток //Новости материаловедения. Наука и техника. 2013. №4 (materialsnews.ru).
9. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. М.: МИСиС. 1994. 328 с.
10. Каблов Е.Н., Герасимов В.В., Висик Е.М., Демонис И.М. Роль направленной кристаллизации в ресурсосберегающей технологии производства деталей ГТД //Труды ВИАМ. 2013. №3. Ст. 01 (viam-works.ru).
11. Тренинков И.А., Алексеев А.А., Поляков С.Н. Методика определения остаточных напряжений в монокристаллах жаропрочных никелевых сплавов на дифрактометре широкого назначения с использованием $K\beta$ -излучения //Авиационные материалы и технологии. 2010. №1. С. 8–12.
12. Milhet X., Arnoux M., Pelosin V., Colin J. On the Dissolution of the γ' Phase at the Dendritic Scale in a Rhenium-Containing Nickel-Based Single Crystal Superalloy After High Temperature Exposure //Metallurgical and Materials Transactions A. 2013. V. 44A. №5. P. 2031–2040.
13. Le Graverend J.-B., Dirand L., Jacques A., Cormier J., Ferry O., Schenk T., Gallemeau F., Kruch S., Mendez J. In Situ Measurement of the γ/γ' Lattice Mismatch Evolution of a Nickel-Based Single-Crystal Superalloy during Non-isothermal Very High-Temperature Creep Experiments //Metallurgical and Materials Transactions A. 2012. V. 43A. №11. P. 3946–3951.
14. Erdong Wu, Jun Zhang, Bo Chen, Guangai Sun, Ji V., Hughes D., Pirling T. Neutron diffraction study of strain and stress induced by thermomechanical fatigue in a single crystal superalloy //Journal of Physics: Condensed matter. 2008. V. 20. (stacks.iop.org/JPhysCM).
15. Sun Guang-Ai, Chen Bo, Wu Er-Dong, Li Jin-Chao, Pirling T., Hughes D. Neutron Diffraction Measurements of a Thermally Fatigued Single Crystal Superalloy //Chin. Phys. Lett. 2009. V. 26. №8. (cpl.iphy.ac.cn)
16. Erdong Wu, Guangai Sun, Bo Chen, Jian Zhang, Ji V., Klosek V., Mathon M.-H. Neutron Diffraction Study of Strain/Stress States and Subgrain Defects in a Creep-Deformed, Single-Crystal Superalloy //Metallurgical and Materials Transactions A. 2014. V. 45A. №1. P. 139–146.
17. Способ определения остаточных напряжений в изделиях из монокристаллических материалов рентгеновским методом: пат. 2427826 Рос. Федерация; опубл. 11.05.2010.
18. Тренинков И.А., Алексеев А.А., Зайцев Д.В. Строение узлов обратной решетки монокристаллического жаропрочного никелевого сплава //Физика металлов и материаловедение. 2012. Т. 113. №10. С. 988–997.
19. Протасова Н.А., Светлов И.Л. Влияние деформации ползучести на характер структурно-фазового несоответствия в монокристаллах жаропрочных никелевых сплавов //Материаловедение. 2012. №7. С. 19–25.
20. Протасова Н.А., Светлов И.Л. Влияние отжига на характер структурно-фазового несоответствия в монокристаллах жаропрочных никелевых сплавов //Материаловедение. 2012. №5. С. 44–50.
21. Ma S., Seetharaman V., Majumdar B.S. CRSS of γ/γ' phases from in situ neutron diffraction of a directionally solidified superalloy tension tested at 900°C //Acta Materialia. 2008. V. 56. P. 4102–4113.

22. Bruno G., Schumacher G., Cavalcanti Pinto H., Schulze C. Measurement of the Lattice Misfit of the Nickel-Base Superalloy SC16 by High-Energy Synchrotron Radiation // *Metalurgical & Materials Transactions A*. 2003. V. 34A. №2. P. 193–197.
23. Падалко А.Г., Юрьев Г.С., Зубарев Г.И., Царев В.И., Таланова Г.В. Синхротронный рентгенодифракционный анализ литейного никелевого сплава после баротермической обработки // *Металлы*. 2011. №6. С. 40–47.
24. Yulai Xua Qiumin Jin, Xueshan Xiao, Xiuli Cao, Guoqing Jia, Yuemei Zhu, Huaijin Yin. Strengthening mechanisms of carbon in modified nickel-based superalloy Nimonic 80A // *Materials Science & Engineering A*. 2011. V. 528. P. 4600–4607.
25. Tan X.P., Liu J.L., Song X.P., Jin T., Sun X.F., Hu Z.Q. Measurements of γ/γ' Lattice Misfit and γ' Volume Fraction for a Ru-containing Nickel-based Single Crystal Superalloy // *Journal of Materials Science & Technology*. 2011. V. 27(10). P. 899–905.
26. Tiley J., Viswanathan G.B., Hwang J.Y., Shiveley A., Banerjee R. Evaluation of gamma prime volume fractions and lattice misfits in a nickel base superalloy using the external standard X-ray diffraction method // *Materials Science & Eng. A*. 2010. V. 528. P. 32–36.
27. Самойлов А.И., Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Назаркин Р.М., Моисеева Н.С. О природе расщепления γ -сателлитов рентгеновских дифракционных рефлексов жаропрочных монокристаллических никелевых сплавов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2010. Т. 76. №10. С. 26–29.
28. Самойлов А.И., Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Рошина И.Н. Размерное несоответствие кристаллических решеток γ - и γ' -фаз в никелевых ренийсодержащих жаропрочных сплавах / В сб. *Литейные жаропрочные сплавы. Эффект* С.Т. Кишкина. М.: ВИАМ. 2006. С. 131–141.
29. Hou J.S., Guo J.T., Wu Y.X., Zhou L.Z., Ye H.Q. Effect of hafnium on creep behavior of a corrosion resistant nickel base superalloy // *Materials Science and Engineering A*. 2010. V. 527. P. 1548–1554.
30. Самойлов А.И., Назаркин Р.М., Моисеева Н.С. Нестесненный мисфит в жаропрочных монокристаллических никелевых сплавах // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2011. Т. 77. №11. С. 36–38.