



УДК 669.245:669.018.44

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-11-1-1

**МЕЖФАЗНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИТЕЙНЫХ НИКЕЛЕВЫХ
ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВАХ**

Н.С. Моисеева

Р.М. Назаркин

Ноябрь 2014

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

Н.С. Моисеева¹, Р.М. Назаркин¹

МЕЖФАЗНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИТЕЙНЫХ НИКЕЛЕВЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВАХ

Рассмотрены субструктура литейных жаропрочных никелевых сплавов и применение модели напряженного состояния структурных составляющих. Показана невозможность применения стандартной методики рентгеновской тензометрии внутренних напряжений « $\sin^2 \psi$ » для монокристаллических и направленно-кристаллизованных образцов сплавов. Предложены структурная модель жаропрочного сплава и методика оценки межфазных напряжений в монокристаллических жаропрочных никелевых сплавах с применением рентгеновского структурного анализа и данных о мисфите (несоответствии параметров кристаллических решеток γ - и γ' -фаз).

Ключевые слова: *рентгеноструктурный анализ, никелевые жаропрочные сплавы, монокристаллы, мисфит, межфазные напряжения, тензометрия.*

N.S. Moiseeva, R.M. Nazarkin

INTERPHASE STRESSES IN CAST SINGLE-CRYSTAL NI-BASED SUPERALLOYS

In this article the substructure of cast Ni-based superalloys and application of stress condition model of structural components are described. The inapplicability of standard technique of x-ray tensometry « $\sin^2 \psi$ method» was shown for single-crystal and directionally solidified samples of superalloys. A structural model of superalloy and the technique of calculation of interphase tension in single-crystal Ni-based superalloys are offered. This structural model is working with x-ray diffraction analysis and experimental data on the crystal lattice misfit (i.e. mismatch of γ - and γ' -phases crystal lattice constants).

Keywords: *x-ray diffraction analysis, Ni-based superalloy, single-crystals, lattice misfit, interphase stresses, tensometry.*

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

Важнейшими материалами для авиационного двигателестроения являются жаропрочные сплавы на основе никеля, обладающие рядом уникальных свойств, способствующих их широкому применению в производстве деталей горячего тракта газотурбинных двигателей и установок, в частности рабочих и сопловых лопаток турбины. Никелевые жаропрочные сплавы отличаются технологичностью, высокой жаропрочностью, возможностью широкого варьирования химического состава сплава для достижения требуемых механических, физических и химических свойств [1]. В настоящее время для изготовления наиболее термически нагруженных рабочих и сопловых лопаток турбины высокого давления применяются литейные сплавы на основе никеля, полученные методами направленной кристаллизации и монокристаллического литья [2, 3]. Ряд научных работ посвящен проблеме зависимости механических свойств никелевых жаропрочных сплавов от термической обработки, субструктуры материала, дефектов кристаллической структуры [4–6]. Во многих научных трудах [7, 8] рассмотрены также методические проблемы прецизионного определения характеристик субструктуры (параметров кристаллических решеток γ - и γ' -фаз) посредством рентгеноструктурного анализа, что имеет важное значение и для решения задачи определения межфазных напряжений в монокристаллических материалах.

Материалы и методы

Одним из весьма важных факторов, влияющих на прочность изделий из металла, является наличие остаточных внутренних напряжений, т. е. напряжений, которые существуют в материале после устранения внешних деформирующих сил [9]. Такие напряжения могут возникать по различным причинам. Например, в результате неоднородного теплового расширения в металлах могут возникать локальные сильно напряженные области, в которых происходит пластическая деформация, вызывающая появление периодически распределенных локальных напряжений большой величины [10, 11].

Определение межфазных напряжений в конструкционных материалах, и в никелевых жаропрочных сплавах в частности, является одной из наиболее трудных методических проблем материаловедения и физического металловедения. Наиболее эффективным методом определения межфазных напряжений является рентгеновский дифракционный анализ, позволяющий благодаря своей селективности оперировать отдельными фазами [9, 10]. При использовании рентгеновской дифракционной методики деформацию материала определяют по изменению межплоскостных расстояний напряженного

кристалла. Наиболее высокая чувствительность к изменениям межплоскостных расстояний имеется в области так называемых обратных отражений, когда брегговский угол дифракции θ близок к 90 град. Однако данный метод обладает усредняющим характером, что определяется не столько технически ограниченными возможностями рентгеновской аппаратуры, сколько высокой проникающей способностью характеристического рентгеновского излучения. Это ведет к усреднению дифракционных эффектов от отдельных сложно напряженных элементов структуры по глубине зоны облучения [9, 10, 12, 13].

В случае образования когерентных с матрицей выделений избыточных фаз (с однотипной кристаллической решеткой и близкими параметрами) в материале могут возникать структурные или когерентные микронапряжения. Обратимость таких напряжений не позволяет бороться с ними традиционными методами температурной релаксации.

Достигая высокого уровня, эти напряжения снижают механические свойства материалов, стимулируют процессы разупрочнения, вызывают коробление, местную пластическую деформацию и т. д. Природа межфазных напряжений заложена в различии всего комплекса теплофизических и физико-механических характеристик фаз. Обратимость межфазных напряжений в цикле «нагрев–охлаждение» неразрывно связана с различием коэффициентов теплового расширения фаз, а в цикле «растворение–выделение фазы» обратимость напряжений связана с разностью удельных объемов фаз. Борьба с межфазными напряжениями и их отрицательным проявлением не может быть успешной без надежных методов их определения [12–14].

На точность определения компонентов напряжений на деталях ГТД методом рентгеновского структурного анализа влияют структура и фазовый состав сплава. В точность измерений также вносят вклад метрологические параметры исследовательского оборудования, геометрия детали и шероховатость поверхности. Поэтому методики определения компонентов напряжений методами рентгеновского структурного анализа должны обеспечивать единую методологию обработки экспериментальных данных с учетом указанных факторов на точность измерения напряжений.

Результаты

В данной работе проблема рентгеновской экспериментальной оценки межфазных напряжений рассматривается в отношении простейшей равноосной структуры – кубической.

Включения кубической формы, статистически равномерно распределенные и одинаково ориентированные в матрице в пределах одного кристалла, образуют кубиче-

скую структурную модель (рис. 1). Кубическая структурная модель представлена, в частности, обширным классом никелевых литых жаропрочных сплавов, в структуре которых кубические включения интерметаллида типа $Ni_3(Al, Ti)$ распределены в матричном твердом растворе. Обе фазы кристаллизуются, образуя ГЦК решетку с близкими параметрами, и прифасовываются друг к другу однотипными гранями, образованными кристаллографическими плоскостями $\{001\}$ [12].

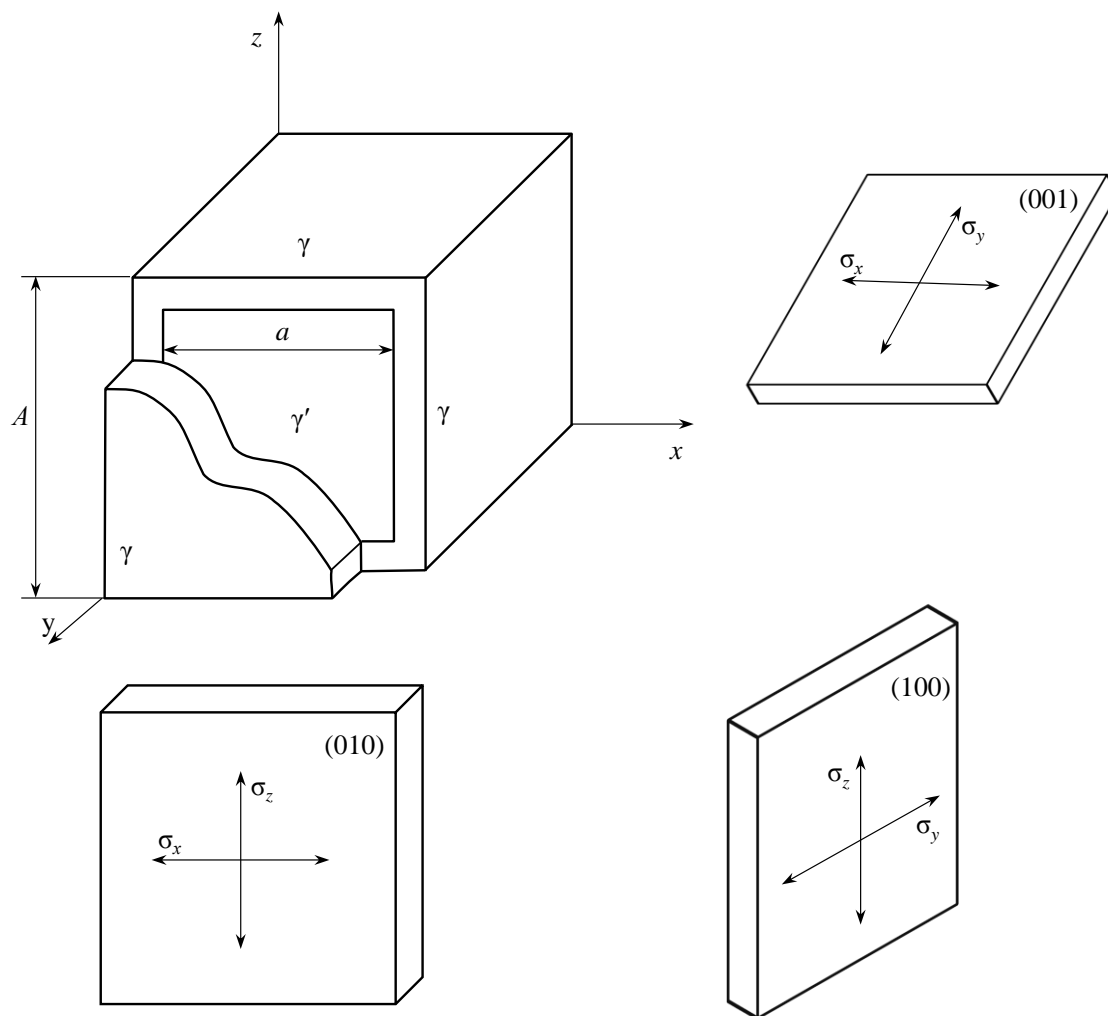


Рисунок 1. Структурно-фазовая модель никелевого жаропрочного сплава

Для определения уровня внутренних напряжений в металлах, сплавах и покрытиях, имеющих поликристаллическую структуру, наибольшее распространение на практике получил метод « $\sin^2\psi$ » [15–17]. Суть метода состоит в сравнении данных двух рентгеновских дифрактограмм при постоянном угле дифракции 2θ и меняющемся угле поворота образца ψ , более подробно метод описан в работе [18]. Напряженное состояние определяется тремя главными нормальными напряжениями, действующими в трех основных направлениях. Связь между деформацией в этих направлениях описывается обобщенным законом Гука:

$$\begin{cases} E\varepsilon_1 = \sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3) \\ E\varepsilon_2 = \sigma_2 - \nu(\sigma_1 + \sigma_3) \\ E\varepsilon_3 = \sigma_3 - \nu(\sigma_1 + \sigma_2) \end{cases} \quad (1)$$

где $E = \frac{1}{S_{11}}$; $\nu = -\frac{S_{12}}{S_{11}}$; S_{11} , S_{12} – упругие модули податливости; E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона.

В сферических системах координат:

$$\begin{cases} t_1 = \cos \varphi_{HKL} \sin \psi_{HKL} \\ t_2 = \sin \varphi_{HKL} \sin \psi_{HKL} \\ t_3 = \cos \psi_{HKL} \end{cases} \quad (2)$$

где t_1 , t_2 , t_3 – направляющие косинусы вектора, в направлении которого ищется деформация $\varepsilon_{\varphi, \psi}$ относительно осей главных деформаций ε_1 , ε_2 , и ε_3 , определяющих эллипсоид деформации (рис. 2) [13].

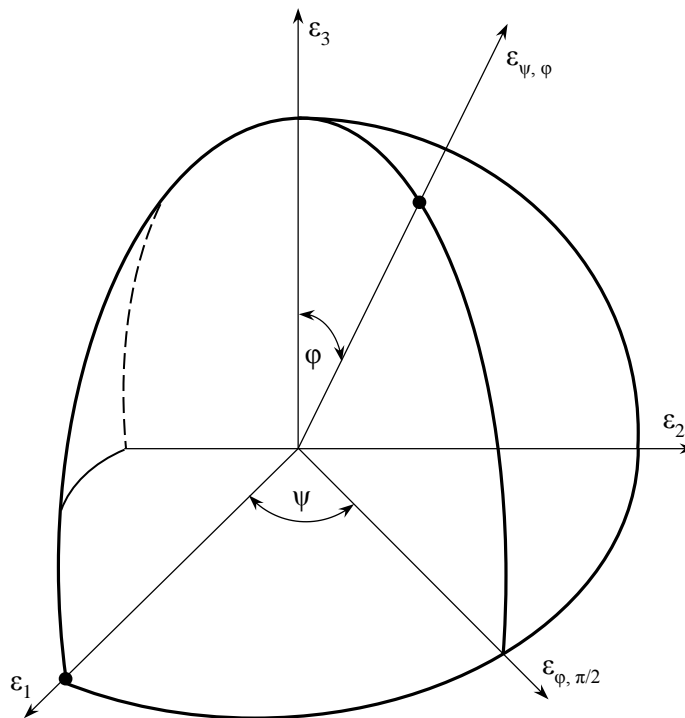


Рисунок 2. Эллипсоид деформации никелевого жаропрочного сплава

При однородной упругой деформации сферический элемент объема изотропного тела деформируется в эллипсоид, а деформация в любом направлении, составляющем углы φ и ψ с ε_1 и ε_3 , равна:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{HKL} &= \bar{t} \bar{\varepsilon} \bar{t}; \\ \varepsilon_{\varphi, \psi} &= t_1^2 \varepsilon_1 + t_2^2 \varepsilon_2 + t_3^2 \varepsilon_3;\end{aligned}$$

$$\varepsilon_{\varphi, \psi} = \varepsilon_1 \cos^2 \varphi_{HKL} \sin^2 \psi_{HKL} + \varepsilon_2 \sin^2 \varphi_{HKL} \sin^2 \psi_{HKL} + \varepsilon_3 \cos^2 \psi_{HKL}. \quad (3)$$

Ограничимся, в частности, случаем плосконапряженного состояния: $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$; $\sigma_3 = 0$ (рис. 3).

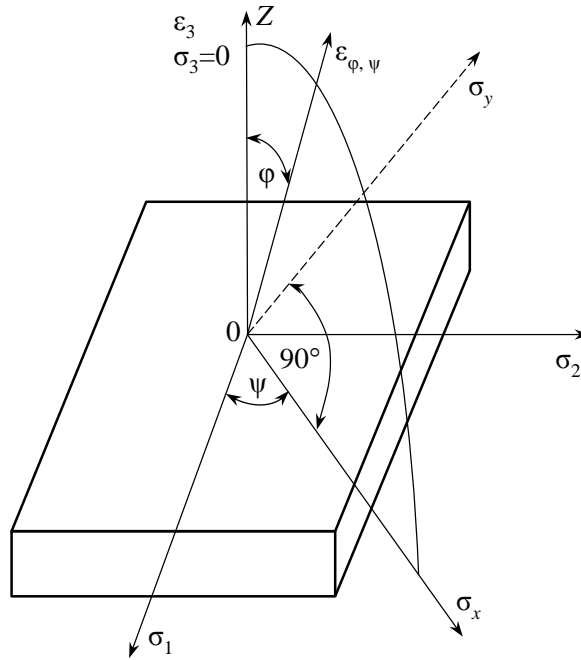


Рисунок 3. Плосконапряженное состояние никелевого жаропрочного сплава

Тогда, решая уравнение (3) с учетом уравнений (1) и (2), получим выражение для определения деформации в общем виде:

$$\varepsilon_{\varphi, \psi} = \frac{1}{E} [\sigma \sin^2 \psi (1 + \nu) - 2\nu \sigma]. \quad (4)$$

Значение « $\sin^2 \psi$ » можно найти из кристаллографической зависимости:

$$\sin^2 \psi = 1 - \cos^2 \psi = 1 - \left(\frac{Hh + Kk + Ll}{\sqrt{H^2 + K^2 + L^2} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \right)^2, \quad (5)$$

где H, K, L, h, k, l – индексы Миллера.

Подставляя уравнение (5) в уравнение (4), с учетом того, что для всесторонне сжатого включения кубоидной формы γ' -фазы напряжение $\sigma = \text{const}$, получим:

$$\varepsilon_{\varphi, \psi} E = (1 - 2\nu) \sigma_{\gamma'}, \quad (6)$$

где $\sigma_{\gamma'}$ – напряжение в γ' -фазе.

Из уравнения (6) видно, что в условиях изотропности напряженного состояния γ' -фазы отсутствует зависимость ε от ψ . Поэтому для монокристаллов классический метод рентгеновской тензометрии « $\sin^2\psi$ » не может быть применен [13].

Обсуждение и заключения

В данной работе предпринята попытка на основе результатов рентгеновского анализа мисфита кристаллических решеток фаз оценить межфазные напряжения в γ - и γ' -фазах.

В настоящее время мисфит считается важнейшим параметром при оптимизации и конструировании состава сплавов типа ЖС при использовании расчетных методов [1, 19, 20]. Мисфит – разность параметров кристаллических решеток основных γ - и γ' -фаз:

$$D = \frac{a_\gamma - a_{\gamma'}}{a_\gamma}, \quad (7)$$

где $a_\gamma, a_{\gamma'}$ – параметры кристаллических решеток фаз.

Величина мисфита для сплавов указанного класса мала и обычно не превышает $\pm(0,1-0,6\%)$ [1, 14, 19].

В настоящее время предлагается несколько методик прецизионного определения параметров решетки γ - и γ' -фаз в никелевых жаропрочных сплавах. В публикациях [12, 13] авторами сообщается о преимуществах моноиндексного рефлекса типа (hhh) при визуализации фазовых γ/γ' -синглетов. Часто [14, 21] мисфит в никелевых жаропрочных сплавах определяют, анализируя записанные дифрактограммы рефлексов со смешанными индексами ($h00$), ($hk0$) и др.

Как было указано выше, в работе рассматривается структурная модель «куб в кубе». Грани оболочки γ -фазы однотипны, равноразмерны, идентично напряжены, но по-разному ориентированы относительно вектора измеряемой деформации. При использовании рентгеновского рефлекса (400) на дифрактограмме можно выделить один синглет от γ' -фазы и два синглета γ -фазы (γ_1 и γ_2) (рис. 4), являющиеся результатом расслоения γ -синглета под действием межфазных напряжений. Эффект расслоения вызван влиянием межфазных напряжений, обусловленных различием коэффициентов термического расширения γ - и γ' -фаз. Используя подобное разложение могут быть получены два значения мисфита (D_1 и D_2), которые не дают представления об истинном мисфите для данного материала. Если использовать разность ($D_1 - D_2$), то можно говорить о чисто деформационной части мисфита, связанной с действием межфазных напряжений [12].

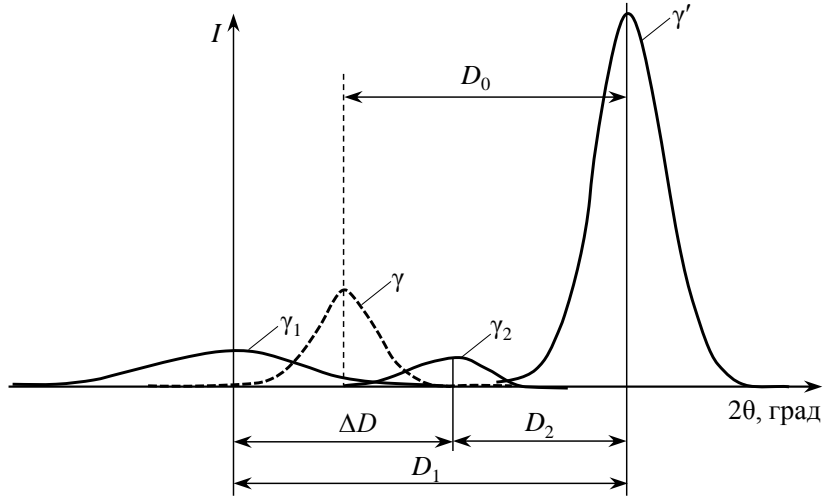


Рисунок 4. Расслоение дифракционного рефлекса (004) под действием межфазных напряжений (схема)

Для предложенной в работе структурно-фазовой модели, вызванные межфазными напряжениями деформации ε^+ граней (100), (010) и ε^- грани (011) имеют вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon^+ &= D_1 - D_0, \\ \varepsilon^- &= D_0 - D_2. \end{aligned} \quad (8)$$

Из формул (8) следует, что

$$\varepsilon^+ + \varepsilon^- = D_1 - D_2. \quad (9)$$

Оценку напряжений σ_γ , вызвавших расслоение, рассчитывали по обобщенному закону Гука (6) для каждой грани:

$$\begin{aligned} E\varepsilon_{(010)/(004)} &= \sigma_\gamma^2 - \nu\sigma_\gamma^x = (1-\nu)\sigma_\gamma; \\ E\varepsilon_{(100)/(004)} &= \sigma_\gamma^2 - \nu\sigma_\gamma^y = (1-\nu)\sigma_\gamma; \\ E\varepsilon_{(001)/(004)} &= -\nu\sigma_\gamma^x - \nu\sigma_\gamma^y = -2\nu\sigma_\gamma. \end{aligned} \quad (10)$$

Из уравнений (10) следует, что элементы γ -фазы (несмотря на равенство компонентов напряжений) представляют собой зоны различной деформации по величине и знаку. Равенство напряжений в каждой зоне (грани) определяется кубической симметрией модели, различие деформаций – ориентировкой ее граней по отношению к направлению измерения деформации – [001].

Таким образом, рассматриваемая структурная модель представляет собой конструкцию, в которой γ' -куб объемно-равноосно сжат γ -оболочкой. Оболочка из прослоек γ -твердого раствора, в свою очередь, испытывает плосконапряженное растяжение с теми же силовыми компонентами, которые действуют в объеме куба, но меньшей величины.

Так как деформации ε^+ и ε^- противоположны по знаку, из выражений (9) и (10) можно получить выражение для напряжения σ_γ :

$$\sigma_\gamma = \frac{(D_1 - D_2)E}{1+\nu} \quad (11)$$

Подставляя в полученное выражение (11) значения D_1 и D_2 , найденные для сплава ВЖМ4, а также значения упругих констант, соответствующие кристаллографическому направлению $\langle 001 \rangle$: $E=130$ ГПа, $\nu=0,38$, получаем величину напряжений для данного материала 716 МПа. Полученный результат близок к указанному в работе [9] значению межфазных напряжений в сплаве ЖС6К, определенному по методу анализа полуширины сверхструктурного (300) рефлекса. Все монокристаллы анизотропны и их модули упругости, как и модули сдвига, зависят от направления, в котором они измерены. Это следует учитывать в расчетах.

Показано, что жаропрочные никелевые сплавы находятся в сложном структурно-напряженном и деформированном состоянии, что необходимо учитывать при конструировании.

Доказана невозможность применения традиционного рентгеновского метода тензометрии « $\sin^2\psi$ » для определения межфазных напряжений в монокристаллических никелевых жаропрочных сплавах.

Предложена математическая модель межфазного напряженного состояния для субструктуры никелевых жаропрочных сплавов, а также способ оценки межфазных напряжений с использованием данных о параметре несоответствий кристаллических решеток (мисфита).

Авторы статьи выражают благодарность д.т.н. А.И. Самойлову за консультации по полученным результатам рентгеновского структурного анализа и предложенные идеи по определению межфазных напряжений в монокристаллах, а также к.т.н. Г.И. Морозовой за рекомендации по проведению пробоподготовки образцов никелевых сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б. и др. Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов. М.: Машиностроение. 1997. 336 с.
2. Горюнов А.В., Ригин В.Е. Современная технология получения литейных жаропрочных никелевых сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2014. №2. С. 3–7.
3. Бондаренко Ю.А., Каблов Е.Н. Направленная кристаллизация жаропрочных сплавов с повышенным температурным градиентом //МиТОМ. 2002. №7. С. 20–23.
4. 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.
5. Connor L.D., Stone H.J., Collins D.M., Preuss M., Hardy M.C., Rae C.M.F. The Effect of Cooling Rate from Solution on the Lattice Misfit during Isothermal Aging of a Ni-Base Superalloy //Metallurgical and Materials Transactions. A. 2014. V. 45. P. 2436–2444.
6. Jing-Yang Chen, La-Mei Cao, Ming Xue, Li-Jun Liu. Microstructure and stress-rupture property of an experimental single crystal Ni-base superalloy with different heat treatments //Rare Metals. 2014. V. 33(2). P. 144–148.
7. 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).
8. Самойлов А.И., Бронфин М.Б., Тимофеева О.Б., Бунтушкин В.П., Рощина И.Н. Дифрактометрический и электронно-микроскопический анализы субструктуры никелевых и интерметаллидных жаропрочных сплавов //Авиационные материалы и технологии. 2008. №2. С. 20–23.
9. Самойлов А.И., Игнатова И.А., Козлова В.С., Кривко А.И. Определение межфазных напряжений в псевдомонокристаллических структурах с взаимной кристаллографической ориентировкой фаз //Заводская лаборатория. 1980. Т. 46. №5. С. 414–417.
10. Самойлов А.И., Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Рощина И.Н. Размерное несоответствие кристаллических решеток γ - и γ' -фаз в никелевых ренийсодержащих жаропрочных сплавах /В сб. Авиационные материалы и технологии. Вып. «Высокорениевые жаропрочные сплавы, технология и оборудование для производства сплавов и литья монокристаллических турбинных лопаток ГТД». М.: ВИАМ. 2004. С. 48–57.
11. Хачатурян А.Г. Теория фазовых превращений и структура твердых растворов. М.: Наука. 1974. 384 с.
12. Самойлов А.И., Назаркин Р.М., Петрушин Н.В., Моисеева Н.С. Мисфит как характеристика уровня межфазных напряжений в монокристаллических жаропрочных никелевых сплавах //Металлы. 2011. №3. С. 71–77.

13. Самойлов А.И., Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Назаркин Р.М., Моисеева Н.С. О природе расщепления сателлитов рентгеновских дифракционных рефлексов жаропрочных монокристаллических никелевых сплавов //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2010. Т. 76. №12. С. 26–29.
14. Протасова Н.А., Светлов И.Л., Бронфин М.Б., Петрушин Н.В. Размерное несоответствие периодов кристаллических решеток γ - и γ' -фаз в монокристаллах жаропрочных никелевых сплавов //Физика металлов и металловедение. 2008. Т. 106. №5. С. 512–519.
15. Косьмин А.А., Будиновский С.А., Гаямов А.М., Смирнов А.А. Жаростойкое покрытие для нового перспективного интерметаллидного сплава ВИНЗ //Труды ВИАМ. 2014. №4. Ст. 01 (viam-works.ru).
16. Гаямов А.М., Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Косьмин А.А. Выбор жаростойкого покрытия для жаропрочного никелевого рений-рутенийсодержащего сплава марки ВЖМ4 //Труды ВИАМ. 2014. №1. Ст. 01 (viam-works.ru).
17. Смирнов А.А., Будиновский С.А. Анализ эволюции нормальных напряжений в системе «сплав–покрытие» в области температур до 1200°C //Авиационные материалы и технологии. 2014. №2. С. 8–14.
18. Горелик С.С., Скаков Ю.А., Расторгуев Л.Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. 3-е изд. доп. и перераб. М.: МИСиС. 1994. 328 с.
19. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В. Компьютерный метод конструирования литейных жаропрочных никелевых сплавов /В сб. Авиационные материалы и технологии. Вып. «Высокорениевые жаропрочные сплавы, технология и оборудование для производства сплавов и литья монокристаллических турбинных лопаток ГТД». М.: ВИАМ. 2004. С. 3–21.
20. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В. Компьютерный метод конструирования литейных жаропрочных никелевых сплавов /В кн. Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина. М.: Наука. 2006. С. 56–79.
21. Тренинков И.А., Алексеев А.А., Зайцев Д.В. Строение узлов обратной решетки монокристаллического жаропрочного никелевого сплава //Физика металлов и металловедение. 2012. Т. 113. №10. С. 988–997.

REFERENCES LIST

1. Shalin R.E., Svetlov I.L., Kachanov E.B. i dr. Monokristally nikelovykh zharoprochnykh spлавov [Single crystals of nickel superalloys]. М.: Mashinostroenie. 1997. 336 s.
2. Gorjunov A.V., Rigin V.E. Sovremennaja tehnologija poluchenija litejnykh zharoprochnykh nikelovykh spлавov [Modern technology for producing heat-resistant nickel alloys casting] //Авиационные материалы и технологии. 2014. №2. С. 3–7.

3. Bondarenko Ju.A., Kablov E.N. Napravlennaja kristallizacija zharoprochnyh splavov s povyshennym temperaturnym gradientom [Directional solidification of superalloys with a high temperature gradient] //MiTOM. 2002. №7. S. 20–23.
4. Gorjunov A.V., Sidorov V.V., Rigin V.E., Zajcev D.V. Formirovanie nanostrukturirovannogo sostojanija v litejnom zharoprochnom splave VZhM4-VI pri mikrolegirovanii ego lantanom [Formation of nanostructured state in casting superalloy VZHM4-VI with microalloying its lanthanum] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №3. S. 39–43.
5. Connor L.D., Stone H.J., Collins D.M., Preuss M., Hardy M.C., Rae C.M.F. The Effect of Cooling Rate from Solution on the Lattice Misfit during Isothermal Aging of a Ni-Base Superalloy //Metallurgical and Materials Transactions. A. 2014. V. 45. P. 2436–2444.
6. Jing-Yang Chen, La-Mei Cao, Ming Xue, Li-Jun Liu. Microstructure and stress-rupture property of an experimental single crystal Ni-base superalloy with different heat treatments //Rare Metals. 2014. V. 33(2). P. 144–148.
7. Samojlov A.I., Nazarkin R.M., Moiseeva N.S. Opredelenie misfita vo fragmentirovannyh monokristallah nikelovyh zharoprochnyh splavov [Definition misfit in fragmented single crystals of nickel superalloys] //Trudy VIAM. 2013. №5. St. 02 (viam-works.ru).
8. Samojlov A.I., Bronfin M.B., Timofeeva O.B. i dr. Difraktometricheskij i jelektronnomikroskopicheskij analizy substrukturny nikelovyh i intermetallidnyh zharoprochnyh splavov [Diffraction and electron microscopy analysis of the substructure and intermetallic nickel superalloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2008. №2. S. 20–23.
9. Samojlov A.I., Ignatova I.A., Kozlova V.S., Krivko A.I. Opredelenie mezhfaznyh naprjazhenij v psevdomonokristallicheskih strukturah s vzaimnoj kristallograficheskoj orientirovkoj faz [Determination of interfacial stresses in pseudomonocrystallic structures with mutual crystallographic orientation phase] //Zavodskaja laboratorija. 1980. T. 46. №5. S. 414–417.
10. Samojlov A.I., Kablov E.N., Petrushin N.V., Roshhina I.N. Razmernoe nesootvetstvie kristallicheskih reshetok γ - i γ' -faz v nikelovyh renijsoderzhashhijh zharoprochnyh splavah [Dimensional crystal lattices mismatch γ - and γ' -phases in the heat-resistant nickel-rhenium alloys] //V sb. Aviacionnye materialy i tehnologii. Vyp. «Vysokorenievye zharo-prochnye splavy, tehnologija i oborudovanie dlja proizvodstva splavov i lit'ja mono-kristallicheskih turbinnyh lopatok GTD». M.: VIAM. 2004. S. 48–57.
11. Hachaturjan A.G. Teorija fazovyh prevrashhenij i struktura tverdyh rastvorov [Theory of phase transitions and structure of the solid solutions]. M.: Nauka. 1974. 384 s.
12. Samojlov A.I., Nazarkin R.M., Petrushin N.V., Moiseeva N.S. Misfit kak harakteristika urovnja mezhfaznyh naprjazhenij v monokristallicheskih zharoprochnyh nikelovyh splavah [Misfit as a characteristic level of interfacial stress in single-crystal nickel superalloys] //Metally. 2011. №3. S. 71–77.

13. Samojlov A.I., Kablov E.N., Petrushin N.V. i dr. O prirode rasshheplenija satellitov rentgenovskih difrakcionnyh refleksov zharoprochnykh monokristal'nykh nikelovykh splavov [On the nature of splitting the satellite X-ray diffraction reflections of high-temperature single-crystal nickel-based alloys] //Zavodskaja laboratorija. Diagnostika materia-lov. 2010. T. 76. №12. S. 26–29.
14. Protasova N.A., Svetlov I.L., Bronfin M.B., Petrushin N.V. Razmernoe nesootvetstvie periodov kristallicheskih reshetok γ - i γ' -faz v monokristallah zharoprochnykh nikelovykh splavov [Dimensional crystal lattice mismatch periods γ - and γ' -phases in single crystals of high-temperature nickel alloys] //Fizika metallov i metallovedenie. 2008. T. 106. №5. S. 512–519.
15. Kos'min A.A., Budinovskij S.A., Gajamov A.M., Smirnov A.A. Zharostojkoe pokrytie dlja novogo perspektivnogo intermetallidnogo splava VIN3 [Reflective coating for a promising new intermetallic alloy VIN3] //Trudy VIAM. 2014. №4. St. 01 (viam-works.ru).
16. Gajamov A.M., Budinovskij S.A., Mubojadzhan S.A., Kos'min A.A. Vybor zharostojkogo pokrytija dlja zharoprochnogo nikelovogo renij-rutenijsoderzhashhego splava marki VZhM4 [The choice of a heat-resistant coatings for heat-resistant nickel-rhenium alloy grade ruthenium VZHM4] //Trudy VIAM. 2014. №1. St. 01 (viam-works.ru).
17. Smirnov A.A., Budinovskij S.A. Analiz jevoljucii normal'nyh naprjazhenij v sisteme «splav–pokrytie» v oblasti temperatur do 1200°C [Analysis of the evolution of the normal stresses in the «alloy-coating» at temperatures up to 1200°C.] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2014. №2. S. 8–14.
18. Gorelik S.S., Skakov Ju.A., Rastorguev L.N. Rentgenograficheskij i jelektronno-opticheskij analiz [X-ray and electron-optical analysis]. 3-e izd. dop. i pererab. M.: MISiS. 1994. 328 s.
19. Kablov E.N., Petrushin N.V. Komp'juternyj metod konstruirovaniya litejnykh zharoprochnykh nikelovykh splavov [Computer method for the construction of cast heat-resistant nickel alloys] //V sb. Aviacionnye materialy i tehnologii. Vyp. «Vysokorenievye zharoprochnye splavy, tehnologija i oborudovanie dlja proizvodstva splavov i lit'ja monokristallicheskih turbinnnykh lopatok GTD». M.: VIAM. 2004. S. 3–21.
20. Kablov E.N., Petrushin N.V. Komp'juternyj metod konstruirovaniya litejnykh zharoprochnykh nikelovykh splavov [Computer method for the construction of cast heat-resistant nickel alloys] //V kn. Litejnye zharoprochnye splavy. Jeffekt S.T. Kishkina. M.: Nauka. 2006. S. 56–79.
21. Treninkov I.A., Alekseev A.A., Zajcev D.V. Stroenie uzlov obratnoj reshetki monokristallicheskogo zharoprochnogo nikelovogo splava [The structure of the reciprocal lattice of the single crystal nickel superalloys] //Fizika metallov i metallovedenie. 2012. T. 113. №10. S. 988–997.