

**Определение когерентности интерфейса
твердорастворной и интерметаллидной фазы
в монокристаллических литейных сплавах
на основе интерметаллида Ni_3Al
рентгенодифрактометрическим методом**

© Р.М. Назаркин^{1,2}, О.М. Жигалина^{1,3}

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

²НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ, Москва, 105005, Россия

³ФНИЦ «Кристаллография и Фотоника» РАН, Москва, 117333, Россия

Исследовано расщепление дифракционных пиков твердорастворной гамма-фазы в никелевых жаропрочных сплавах, в том числе в сплавах на основе интерметаллида Ni_3Al с гетерофазной структурой. Показано, что для сплавов на этой основе эффект расщепления дифракционных пиков твердорастворной гамма-фазы отсутствует, в отличие от никелевых жаропрочных сплавов. Установлено, что расщепление дифракционных пиков твердорастворной гамма-фазы на дифрактограмме вызвано тетрагональным искажением кристаллической решетки гамма-фазы (твердого раствора) под действием межфазных напряжений. Тетрагональное искажение кристаллической решетки гамма-фазы (твердого раствора) возникает только при условии когерентности межфазной границы под действием межфазных напряжений. Поэтому по отсутствию расщепления дифракционных пиков гамма-фазы можно сделать вывод об отсутствии когерентности межфазной границы (интерфейса) в сплавах на основе интерметаллида Ni_3Al с гетерофазной структурой.

Ключевые слова: никелевые жаропрочные сплавы, интерметаллид Ni_3Al , субструктура, кристаллическая решетка, гамма-фаза, тетрагональное искажение, межфазные напряжения, когерентность

Введение. Никелевые литейные жаропрочные сплавы, в том числе сплавы на основе интерметаллида никеля Ni_3Al (γ' -фазы) с гетерофазной ($\gamma'+\gamma$)-структурой, широко используются при изготовлении деталей горячего тракта газотурбинных двигателей (ГТД) и газотурбинных энергетических установок (ГТУ) [1, 2]. Повышение требований к уровню механических свойств и предельным рабочим температурам для деталей горячего тракта двигателей и энергетических установок, особенно лопаток ротора и статора турбины, приводит к необходимости создания новых литейных сплавов на никелевой основе [3, 4]. Литейные сплавы на основе интерметаллида никеля Ni_3Al (γ' -фазы) с гетерофазной ($\gamma'+\gamma$)-структурой относятся к числу наиболее перспективных для изготовления деталей ГТД и ГТУ, работающих в условиях интенсивных тепловых нагрузок, — рабочих и сопловых лопаток, сегментов камеры сгорания, створок и проставок реактивного

сопла [5, 6]. Как известно из [7], механические свойства монокристаллических литейных никелевых жаропрочных сплавов, особенно длительная прочность при повышенной температуре, зависят от уровня межфазных напряжений на γ/γ' -интерфейсе когерентных фаз вида γ -матрица/ γ' -дисперсионная частица, что связано с образованием рафт-структуры в монокристалле под действием приложенных напряжений [8, 9]. В свою очередь, в работе [10] показано, что уровень межфазных напряжений на γ/γ' -интерфейсе в монокристаллических литейных никелевых жаропрочных сплавах определяется мисфитом, т. е. разностью периодов кристаллических решеток двух когерентных фаз сплава: γ -твердого раствора и интерметаллидной γ' -фазы.

Таким образом, экспериментальное исследование γ/γ' -интерфейса на его когерентность в литейных монокристаллических сплавах на основе интерметаллида никеля Ni_3Al (γ' -фазы) с гетерофазной ($\gamma'+\gamma$)-структурой обусловлено задачами по повышению механических свойств данного класса жаропрочных сплавов при температурах эксплуатации.

Цель работы — экспериментальная оценка когерентности/некогерентности γ/γ' -интерфейса в литейных монокристаллических жаропрочных сплавах на основе интерметаллида никеля Ni_3Al (γ' -фазы) с гетерофазной ($\gamma'+\gamma$)-структурой для обоснования возможности или невозможности определения межфазных напряжений в сплавах на основе интерметаллида никеля Ni_3Al (γ' -фазы) с гетерофазной ($\gamma'+\gamma$)-структурой методом рентгеноструктурного анализа.

Материалы и методики исследования. Экспериментальная оценка когерентности либо некогерентности межфазной поверхности раздела может быть проведена при исследовании кристаллической структуры методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) [11]. К преимуществам методов ПЭМ следует отнести их высокое разрешение — возможно прямое наблюдение отдельных атомов, кристаллической решетки фаз, точечных и линейных дефектов кристаллической структуры. Следует также отметить, что ПЭМ позволяет проводить дифракционные исследования фаз материала методом электронной дифракции (микродифракции). Однако методы ПЭМ, помимо преимуществ, имеют и недостатки — так, пробоподготовка образцов для ПЭМ отличается большой трудоемкостью, длительностью и сложностью процесса [12, 13]. Высокая локальность метода при необходимости получения интегральной дифракционной картины от всей поверхности исследуемого образца становится недостатком, так как результаты отдельных локальных измерений не могут свидетельствовать о фазовом составе и кристаллической структуре образца в целом.

Поэтому для определения когерентности γ/γ' -интерфейса в литейных монокристаллических сплавах на основе интерметаллида никеля Ni_3Al (γ' -фазы) с гетерофазной ($\gamma'+\gamma$)-структурой применен метод, основанный на рентгеновской дифрактометрии монокристаллических образцов. Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ и при поддержке кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана: съемка рентгеновских дифрактограмм проведена на рентгеновском дифрактометре ДРОН-4; обработка результатов съемки выполнена с использованием пакетов программ WinScaler и HighScore. К преимуществам выбранного метода относится возможность исследования всей поверхности образца одновременно, что позволит судить о состоянии кристаллической структуры сплава не в отдельных локальных микрообъемах, а в образце в целом. Кроме того, пробоподготовка образцов для проведения рентгеновской дифрактометрии гораздо менее трудоемка и длительна, чем изготовление образцов для ПЭМ.

Сначала рассмотрим эффекты, наблюдаемые при рентгеновской дифрактометрии в монокристаллических никелевых жаропрочных сплавах с когерентным γ/γ' -интерфейсом (это исследование подробно описано в [14, 15]).

Известно, что жаропрочные литейные никелевые сплавы представляют собой многокомпонентные сложнолегированные системы, образующие сплав как изоморфный двухфазный ($\gamma+\gamma'$)-материал, способный к длительному сопротивлению разрушению при высоких рабочих температурах и нагрузках. Изоморфность γ - и γ' -фазы — предпосылка образования частично когерентной межфазной границы (поверхности раздела), укрепленной общими атомными плоскостями, регулярно «прорастающими» через кристаллические решетки обеих фаз, играющими упрочняющую роль наряду со сверхструктурой γ' -фазы. Количество таких общих плоскостей, приходящихся на единицу длины границы раздела фаз, определяется размерным несоответствием периодов их кристаллических решеток или мисфитом D , который рассчитывается по следующему уравнению:

$$D = \frac{(a_\gamma - a_{\gamma'})}{a_\gamma} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где a_γ , $a_{\gamma'}$ — периоды кристаллических решеток твердорастворной (γ) и интерметаллидной (γ') фазы соответственно.

Мисфит является эффективным критерием оптимизации химического состава [8] и структуры жаропрочных сплавов и их механических свойств. Проблема мисфита актуальна не только для жаропрочных никелевых сплавов, но и для сплавов иных систем легирования с интерметаллидным упрочнением их матрицы — твердого раствора,

в частности алюминий-литиевых сплавов, она приобретает особое значение [16].

Определение разности периодов решеток когерентных фаз (мисфита) важно для прогнозирования механических свойств никелевых жаропрочных сплавов, формирующих структуры с двумя фазами сложного химического состава: γ -твердый раствор на основе никеля и γ' -интерметаллидная фаза на основе соединения Ni_3Al (когерентные фазы пристыковываются друг к другу одноименными кристаллографическими плоскостями). Принято считать, что γ - и γ' -фаза являются практически полностью когерентными между собой. Однако понятие когерентности для γ - и γ' -фазы в жаропрочных сплавах до некоторой степени представляется условным и характеризует отсутствие малоугловых границ пристыкованных кристаллитов (зерен) или фрагментов (блоков) отдельного кристалла.

Рассмотрев субструктуру двухфазных агрегатов γ - и γ' -фазы, можно указать на наличие в них «полукогерентной» или частично когерентной связи кристаллических решеток, так как только определенная доля плоскостей одной из фаз — органичное продолжение одноименных плоскостей соседней. Частичная кристаллографическая когерентность фаз вызывается различием периодов их кристаллических решеток и компенсируется за счет межфазных напряжений, точнее — возникающими из-за них упругими деформациями.

Стыкование фаз с различными периодами кристаллических решеток возможно благодаря формированию экстраплоскостей в фазе с меньшим периодом кристаллической решетки. Частично когерентное сопряжение фаз сопровождается возникновением полей межфазных напряжений [17, 18].

Для никелевых жаропрочных сплавов частично когерентная связь между матричной γ - и интерметаллидной γ' -фазой на основе Ni_3Al исследована достаточно подробно. Так, в [17] определен диапазон значений мисфита фаз в жаропрочных никелевых сплавах, обеспечивающий максимальные уровни жаропрочности — от 0,15 % до 0,30 %, и показано, что отклонение этой характеристики от данного диапазона в сторону увеличения или уменьшения значительно снизит жаропрочные свойства сплавов. Схема, показывающая напряженное состояние вокруг частицы γ' -фазы и объясняющая причины тетрагональных искажений кристаллической решетки γ -фазы приведена на рис. 1.

Наличие тетрагональных искажений кристаллической решетки γ -фазы в монокристаллических никелевых жаропрочных сплавах также подтверждено анализом расщепления дифракционных пиков γ -фазы на рентгенограммах: установлено, что дифракционные пики $\{hhh\}$ не дают расщепления рефлекса матричной γ -фазы в отличие от остальных дифракционных пиков γ -фазы. Отсутствие расщепления

пиков $\{hhh\}$ указывает на то, что элементарная ячейка γ -фазы имеет тетрагональные искажения, так как для элементарной ячейки с тетрагональной сингонией только по рефлексам типа $\{hhh\}$ не происходит расщепления единого дифракционного пика на два отдельных.

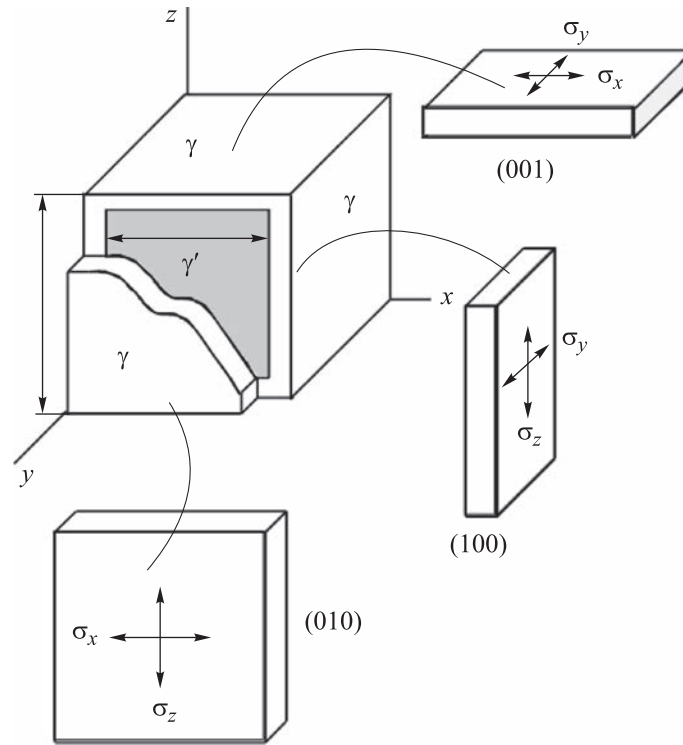


Рис. 1. Схема напряженного состояния в окрестности частицы γ' -фазы

В частности, отсутствие расщепления пиков типа $\{hhh\}$, в отличие от всех остальных, наблюдается у мартенсита в закаленных сталях. Если причиной расщепления дифракционных пиков γ -фазы была бы химическая неоднородность, то расщепление было бы характерно и для рентгеновских рефлексов от плоскостей $\{hhh\}$. На рис. 2 приведены характерные рентгенограммы γ/γ' -рефлекса монокристаллического (с кристаллографической ориентацией $\langle 001 \rangle$) сплава типа ВЖМ4, иллюстрирующие для γ -фазы отсутствие расщепления пика (hhh) и наличие расщепления пика ($00h$) на наблюдаемых γ/γ' -рефлексах.

Методика определения мисфита в высоколегированных жаропрочных сплавах с тетрагональным искажением кристаллической решетки γ -матрицы, которая подробно представлена в публикациях [14, 19], заключается в записи и анализе профиля моноиндексного рефлекса типа $\{hhh\}$. В целях проверки наличия (либо отсутствия) когерентности γ/γ' -интерфейса для монокристаллических сплавов на основе Ni_3Al (γ' -фазы) типа ВКНА1-В, ВКНА25 и ВИН проведена

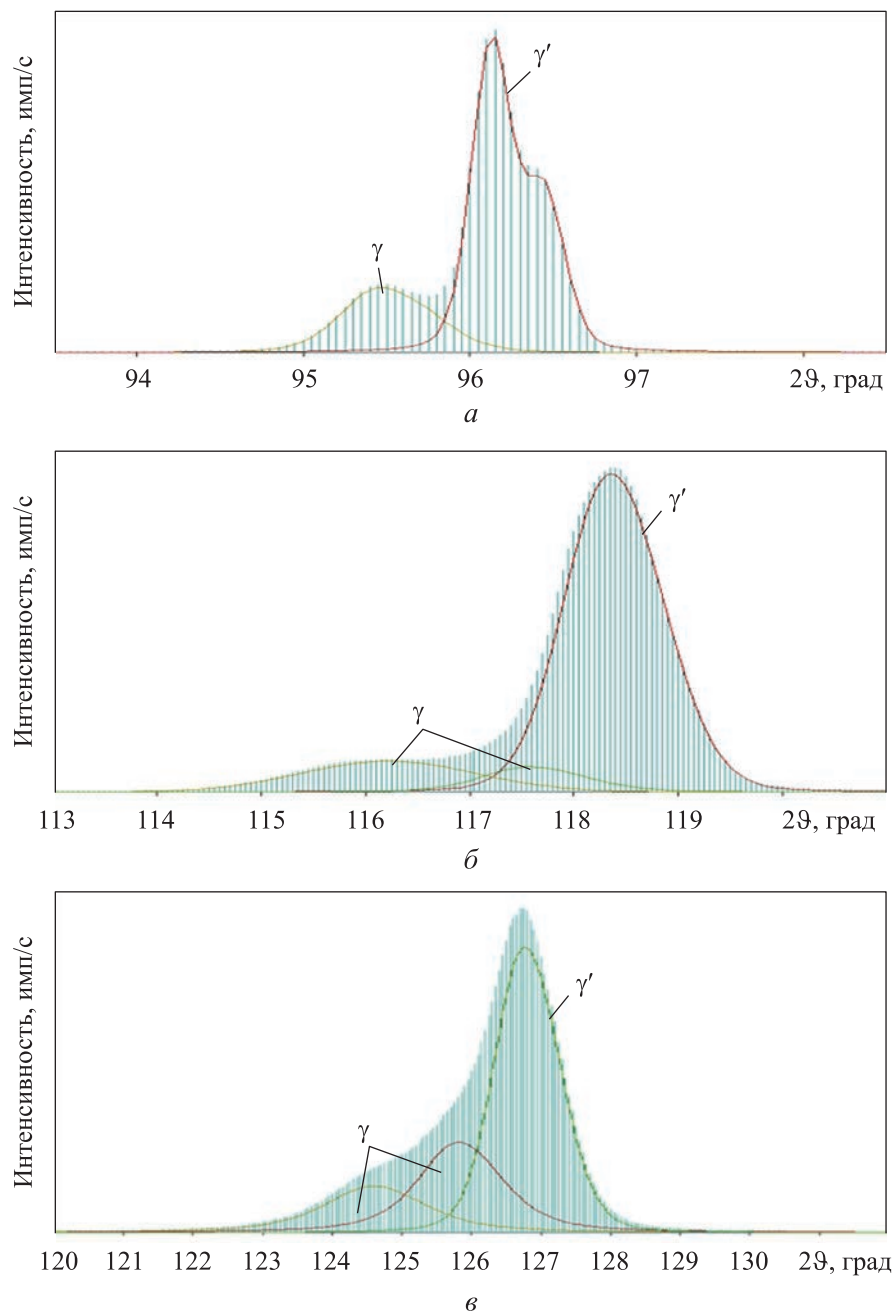


Рис. 2. Рентгенограмма монокристалла $\langle 001 \rangle$ сплава типа ВЖМ4 при изменении угла дифракции 2θ :
 а — γ/γ' -рефлекс (hhh) — (222) $\text{CuK}\alpha$; б — γ/γ' -рефлекс (hhh) — (004) $\text{CuK}\alpha$;
 в — γ/γ' -рефлекс (hhk) — (113) $\text{FeK}\alpha$

серия экспериментов. При этом была поставлена задача подтвердить или опровергнуть эффект расщепления рефлекса γ -фазы под действием межфазных напряжений, обусловленных когерентным сопряже-

нием γ/γ' -интерфейса. Для этого на образцах исследуемых сплавов провели съемку рефлексов сверхструктуры Ni_3Al (γ' -фазы), чтобы исключить ошибки, вызванные несовершенством структуры монокристалла. Рентгенограммы сверхструктурных линий Ni_3Al — (011) и (012) — приведены на рис. 3.

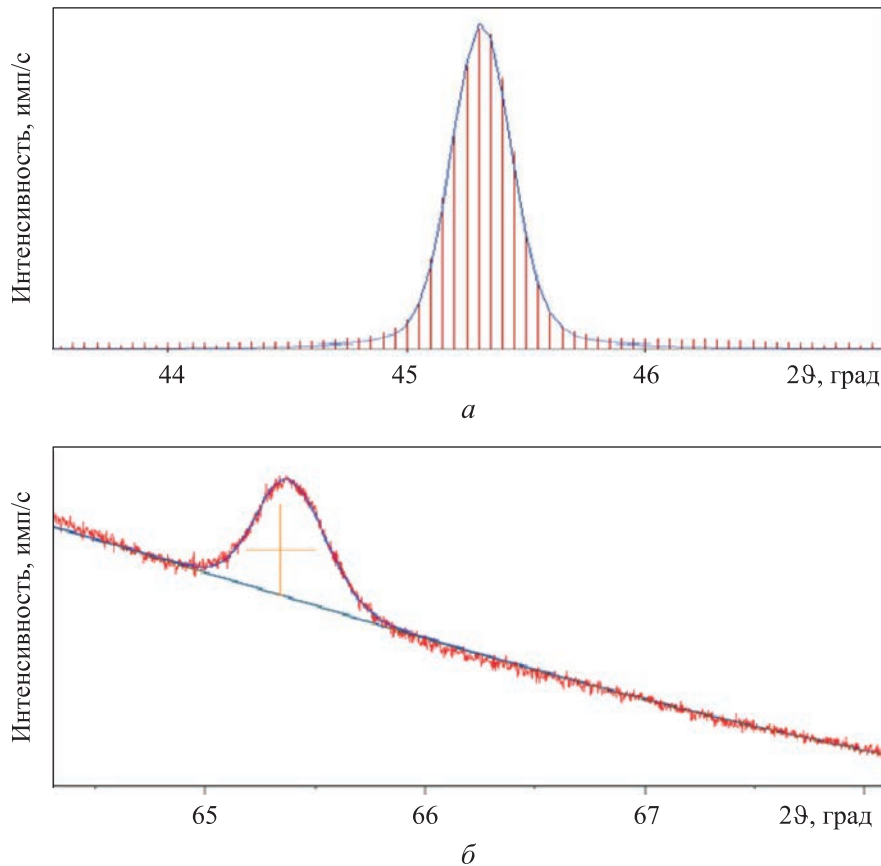


Рис. 3. Рентгенограмма монокристалла $\langle 001 \rangle$ сплава типа ВКНА25:

a — сверхструктурная линия γ' -фазы (011) FeK_α ;
 b — сверхструктурная линия γ' -фазы (012) CoK_α

Как следует из данных рентгеноструктурного анализа (см. рис. 3), сателлиты в исследуемых монокристаллах литейных сплавов на основе Ni_3Al (γ' -фазы) отсутствуют, т. е. монокристалл не имеет блоков, и следовательно, вероятность системной ошибки при обработке дифрактограмм, вызванной несовершенством кристаллической структуры исследуемых монокристаллов, исключена. Затем для поиска дифракционных пиков с признаками явного расщепления рефлекса γ -фазы проводились съемки пиков (00h), (hh0), (hhk) и (hhh) — (002), (022), (113) и (222) соответственно. На рис. 4 приведен внешний вид полученных дифрактограмм.

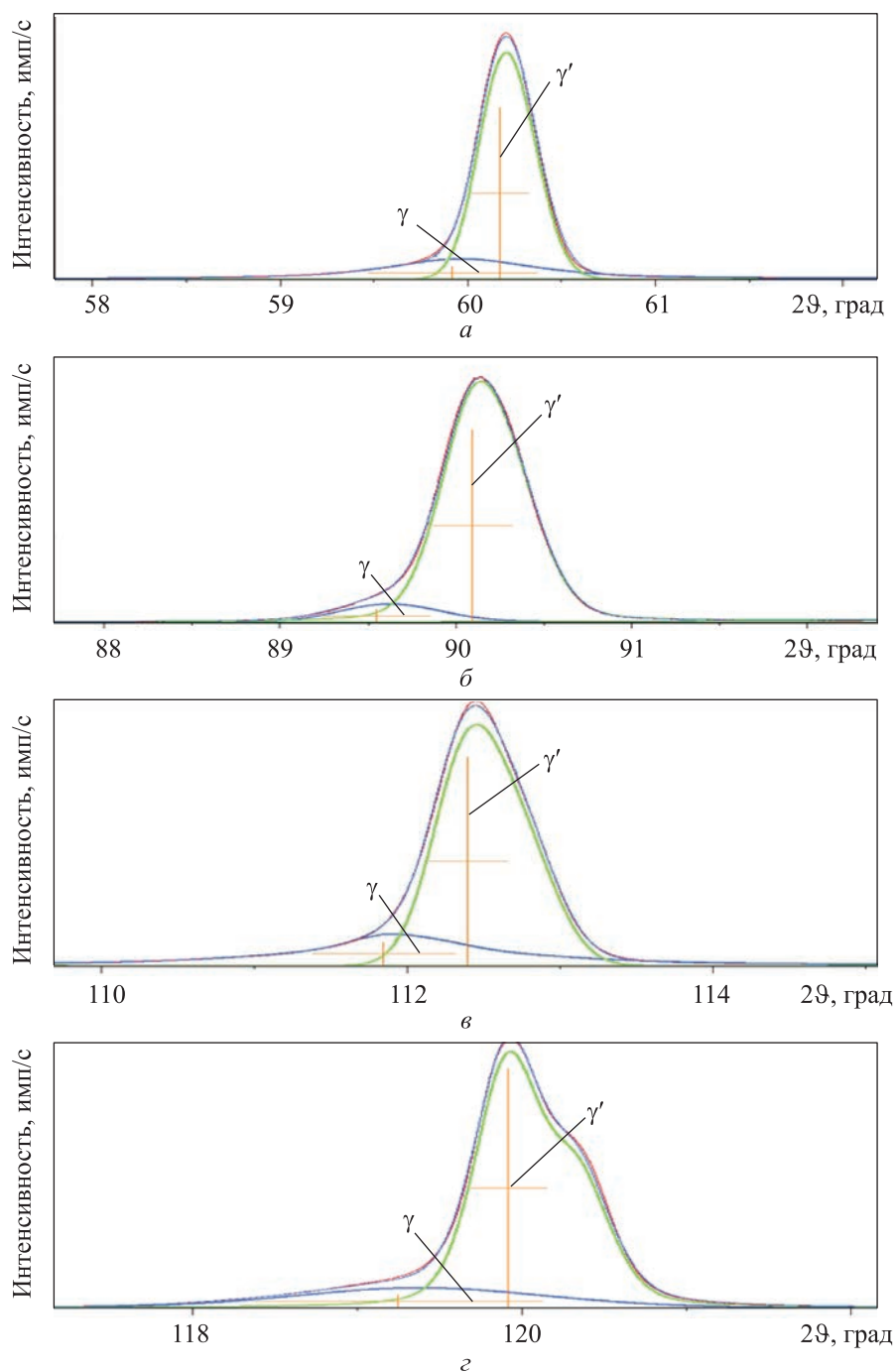


Рис. 4 (начало). Рентгенограммы монокристаллов $\langle 001 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ сплавов типа ВИН и ВКНА1-В:

a — монокристалл $\langle 001 \rangle$ сплава типа ВИН: γ/γ' -рефлекс (002) CoK_α ; *б* — монокристалл $\langle 001 \rangle$ сплава типа ВИН: γ/γ' -рефлекс (022) CoK_α ; *в* — монокристалл $\langle 001 \rangle$ сплава типа ВИН: γ/γ' -рефлекс (113) CoK_α ; *г* — монокристалл $\langle 001 \rangle$ сплава типа ВИН: γ/γ' -рефлекс (222) CoK_α

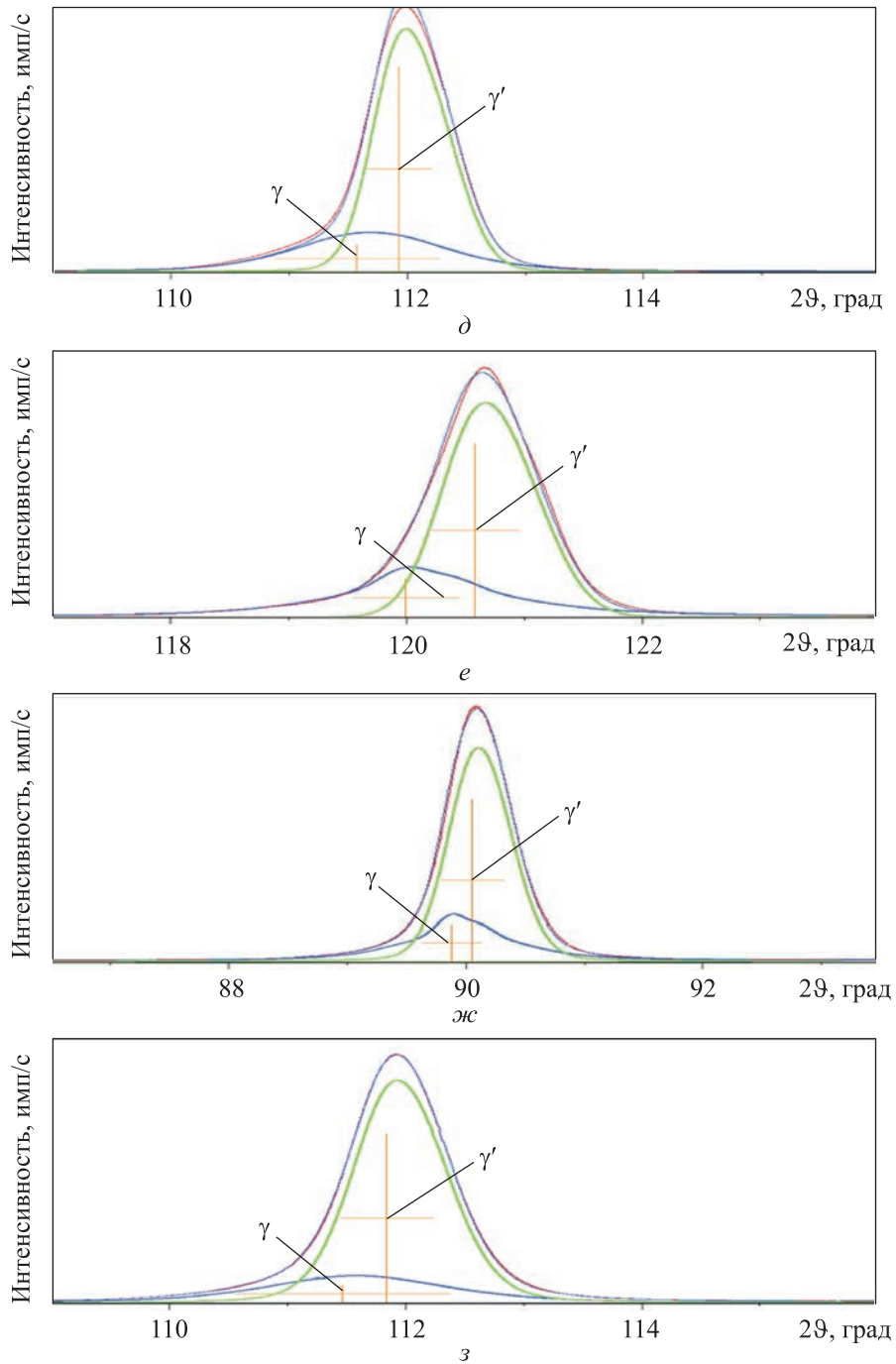


Рис. 4 (окончание). Рентгенограммы монокристаллов $\langle 001 \rangle$ и $\langle 111 \rangle$ сплавов типа ВИН и ВКНА1-В:

δ — монокристалл $\langle 111 \rangle$ сплава типа ВИН: γ/γ' -рефлекс (113) CoK_α ; e — монокристалл $\langle 001 \rangle$ сплава ВКНА1-В: γ/γ' -рефлекс (222) CoK_α ; $жс$ — монокристалл $\langle 001 \rangle$ сплава ВКНА1-В: γ/γ' -рефлекс (022) CoK_α ; $з$ — монокристалл $\langle 001 \rangle$ сплава ВКНА1-В: γ/γ' -рефлекс (113) CoK_α

При анализе рентгенограмм ни на одной из них не было выявлено признаков расщепления дифракционного пика (индивидуального синглета) γ -фазы, что свидетельствует об отсутствии в интерметаллидных сплавах на основе Ni_3Al (с гетерофазной $(\gamma'+\gamma)$ -структурой с высоким содержанием γ' -фазы) межфазных напряжений, вызванных когерентным сопряжением на γ/γ' -интерфейсе, в связи с чем тетрагональность γ -фазы не наблюдается. Поэтому в отличие от никелевых жаропрочных сплавов [14, 15] при определении периодов кристаллических решеток γ - и γ' -фазы задача поиска дифракционных пиков с отсутствием эффекта расщепления рефлекса γ -фазы не возникает. Следовательно, для определения периодов кристаллических решеток γ - и γ' -фазы в сплавах на основе Ni_3Al (с гетерофазной $(\gamma'+\gamma)$ -структурой) разумно использовать дифракционные пики (γ/γ' -рефлексы) с максимально возможным углом дифракции 2θ , например, пик (222) для FeK_α -излучения; что объясняется высокой точностью определения периодов кристаллических решеток γ - и γ' -фазы вследствие снижения величин систематических ошибок измерения, как описано в [18, 20–22].

И в соответствии с уравнением Вульфа — Брэгга

$$2d \sin \theta = n \quad (2)$$

можно полагать, что точность определения периода кристаллической решетки исследуемых фаз ограничена погрешностью измерений угла дифракции 2θ при определении межплоскостного расстояния d . По соотношению

$$|\Delta d/d| = \operatorname{ctg} \theta \Delta \theta \quad (3)$$

понятно, что относительная погрешность $|\Delta d/d|$ прямо пропорциональна абсолютной погрешности при определении угла дифракции 2θ , и при прочих равных условиях она тем меньше, чем больше величина угла рентгеновской дифракции 2θ (фокусировка дифрактометра по Брэггу — Брентано). Наиболее удобен для прецизионного определения периодов кристаллических решеток γ - и γ' -фазы диапазон $120 \dots 168^\circ$ по 2θ .

Отсюда следует вывод, что в интерметаллидных сплавах на основе Ni_3Al (с гетерофазной $(\gamma'+\gamma)$ -структурой) когерентное сопряжение (когерентность) на γ/γ' -интерфейсе практически отсутствует. Самым очевидным объяснением причины его отсутствия в данных сплавах служит то, что преобладающая доля от общего объема γ' -фазы в таких сплавах имеет первичное происхождение, т. е. γ' -фаза выделилась непосредственно из расплава при кристаллизации по перитектической и эвтектическим реакциям, в то время как доля вторичной γ' -фазы с высокой дисперсностью частиц, выделяющихся с распадом γ -фазы при дальнейшем охлаждении интерметаллидного сплава, относитель-

но мала. Вторичная высокодисперсная γ' -фаза может иметь когерентное сопряжение с γ -фазой, что и наблюдается в жаропрочных никелевых сплавах [23–25]. Однако отсутствие когерентных межфазных напряжений не означает полного отсутствия межфазных напряжений в сплаве, так как эти напряжения также могут быть термическими по происхождению, обусловленными разностью коэффициентов термического расширения γ - и γ' -фазы [26–29].

Заключение. Полученные результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что в монокристаллических интерметаллидных сплавах на основе Ni_3Al (с гетерофазной ($\gamma'+\gamma$)-структурой) типа ВКНА и ВИН когерентность на γ/γ' -интерфейсе практически отсутствует. Поэтому применение методик прогнозирования прочностных свойств монокристаллов при рабочей температуре, основанных на определении уровня межфазных напряжений на границе раздела γ - и γ' -фазы, не представляется возможным. Для определения влияния параметров субструктуры исследуемого сплава (периоды кристаллических решеток γ - и γ' -фаз, их мисфит, т. е. размерное несоответствие) на механические свойства следует применять методы прогнозирования, основанные на математическом регрессионном анализе экспериментальных данных.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Тарасенко Л.В., Унчикова М.В., Бондаренко Ю.А. *Жаропрочные сплавы с ориентированной структурой*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 24 с.
- [2] Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Шестаков А.В. Жаропрочные интерметаллидные никелевые сплавы для двигателей летательных аппаратов. *Идеи и новации*, 2020, т. 8, № 3–4, с. 138–146.
- [3] Третьяков А.Ф., Тарасенко Л.В. *Материаловедение и технологии обработки материалов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014, 541 с.
- [4] Логунов А.В. *Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток и дисков газовых турбин*. Рыбинск, ИД «Газотурбинные технологии», 2017, 854 с.
- [5] Jozwik P., Polkowski W., Wojar Z. Applications of Ni_3Al based intermetallic alloys — current stage and potential perspectives. *Materials*, 2015, no. 8 (5), pp. 2537–2568.
- [6] Базылева О.А., Оспенникова О.Г., Аргинбаева Э.Г., Летникова Е.Ю., Шестаков А.В. Тенденции развития интерметаллидных сплавов на основе никеля. *Авиационные материалы и технологии*, 2017, № S, с. 104–115. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-104-115
- [7] Глотка А.А., Гайдук С.В. Прогнозирование свойств монокристаллических жаропрочных никелевых сплавов. *Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*, 2019, № 2 (80), с. 91–100.
- [8] Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Светлов И.Л. Монокристаллические жаропрочные никелевые сплавы для турбинных лопаток перспективных ГТД. *Авиационные материалы и технологии*, 2017, № S, с. 72–103. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-72-103

- [9] Шалин Р.Е., Светлов И.Л., Качанов Е.Б. *Монокристаллы никелевых жаропрочных сплавов*. Москва, Машиностроение, 1997, 336 с.
- [10] 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.
- [11] 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: науч.-техн. журн.*, 2013, № 5, ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru/> (дата обращения: 23.08.2022).
- [12] Жигалина О.М., Базалева К.О. *Анализ структуры материала методами просвечивающей электронной микроскопии*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017, 36 с.
- [13] Жигалина О.М. *Анализ дефектов кристаллического строения материалов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017, 40 с.
- [14] 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, № 12, с. 26–29.
- [15] 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.
- [16] Сетюков О.А. Рентгеноструктурное определение структурных параметров кристаллических решеток матрицы и δ' -фазы (Al_3Li) в сплавах Al–Li. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, 2009, т. 75, № 9, с. 41–45.
- [17] 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.: *Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина*. Каблов Е.Н., ред. Москва, Наука, 2006, с. 131–141.
- [18] Игнатова И.А., Кривко А.И., Самойлов А.И. Развитие рентгеновских методов анализа структуры и напряженного состояния жаропрочных сплавов. В сб.: *Авиационные материалы на рубеже XX–XXI веков*. Шалин Р.Е., ред. Москва, ВИАМ, 1994, с. 465–483.
- [19] 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.
- [20] Туренко Е.Ю., Базылева О.А., Шестаков А.В. Современные перспективные высокотемпературные интерметаллидные сплавы серии ВИН. *Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-техн. журн.*, 2014, № 3, ст. 10. URL: <http://materialsnews.ru> (дата обращения: 23.08.2022).
- [21] Поварова К.Б., Бондаренко Ю.А., Дроздов А.А., Базылева О.А., Антонова А.В., Морозов А.Е., Аргинбаева Э.Г. Влияние направленной кристаллизации на структуру и свойства монокристаллов сплава на основе Ni_3Al , легированного Cr, Mo, W, Ti, Co, Re и PЗМ. *Металлы*, 2015, № 1, с. 50–58.
- [22] Поварова К.Б., Базылева О.А., Дроздов А.А., Казанская Н.К., Морозов А.Е., Самсонова М.А. Конструкционные жаропрочные сплавы на основе Ni_3Al : получение, структура и свойства. *Материаловедение*, 2011, № 4, с. 39–48.

- [23] Бунтушкин В.П., Каблов Е.Н., Базылева О.А. Механические и эксплуатационные свойства литейного жаропрочного сплава на основе интерметаллида Ni_3Al . *Металлы*, 1995, № 3, с. 70–73.
- [24] Каблов Е.Н. Роль фундаментальных исследований при создании материалов нового поколения. *Тез. докл. XXI Менделеевского съезда по общей и прикладной химии*. В 6 т. Санкт-Петербург, 2019, т. 4, с. 24.
- [25] Каблов Е.Н., Евгенов А.Г., Петрушин Н.В., Базылева О.А., Мазалов И.С. Материалы нового поколения и цифровые аддитивные технологии производства ресурсных деталей ФГУП «ВИАМ». Часть 4. Разработка жаропрочных материалов. *Электрометаллургия*, 2022, № 5, с. 8–19. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-5-8-19
- [26] Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Луцкая С.А., Дмитриев Н.С. Литейный интерметаллидный сплав на основе соединения Ni_3Al для турбинных лопаток газотурбинных двигателей. *Авиационные материалы и технологии: электрон. науч.-техн. журн.*, 2022, № 2, с. 5–17. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-5-17
- [27] Кузьмина Н.А., Остроухова Г.А. Блочность и субструктура в монокристаллических отливках никелевых жаропрочных сплавов. *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.*, 2022, № 7, с. 13–26. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-13-26
- [28] Базылева О.А., Карашаев М.М., Шестаков А.В., Аргинбаева Э.Г. Влияние температуры отжига на гомогенность интерметаллидного сплава на основе соединения Ni_3Al . *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.*, 2020, № 8, с. 3–10. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-3-10
- [29] Кузьмина Н.А. Ростовые структурные дефекты в монокристаллах никелевых жаропрочных сплавов. *Авиационные материалы и технологии: электрон. науч.-техн. журн.*, 2022, № 3, с. 15–26. DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-15-26

Статья поступила в редакцию 12.09.2022

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Назаркин Р.М., Жигалина О.М. Определение когерентности интерфейса твердорастворной и интерметаллидной фазы в монокристаллических литейных сплавах на основе интерметаллида Ni_3Al рентгенодифрактометрическим методом. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 10.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-10-2221>

Назаркин Роман Михайлович — старший преподаватель кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана; ведущий инженер НИЦ «Курчатовский институт» — ВИАМ. Область деятельности и научные интересы: рентгеноструктурный анализ, рентгеновский фазовый анализ, никелевые жаропрочные сплавы, никелевые интерметаллидные сплавы, интерметаллид Ni_3Al . e-mail: nazarkin@bmstu.ru

Жигалина Ольга Михайловна — д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры «Материаловедение» МГТУ им. Н.Э. Баумана; ведущий научный сотрудник ФГУ «ФНИЦ «Кристаллография и Фотоника» РАН». Область деятельности и научные интересы: просвечивающая электронная микроскопия, электронная дифракция, никелевые сплавы, наночастицы. e-mail: olga.zhigalina@bmstu.ru

Determination of the coherence of the interface between the solid solution and intermetallic phases in monocrystal cast alloys based on the Ni₃Al intermetallic compound by the X-ray diffraction method

© R.M. Nazarkin^{1,2}, O.M. Zhigalina^{1,3}

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

²The National Research Center “Kurchatov Institute”— All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials (VIAM), Moscow, 105005, Russia

³FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Moscow, 117333, Russia

The paper considers splitting of the solid solution gamma phase diffraction peaks in the nickel heat-resistant alloys, including alloys based on the Ni₃Al intermetallic compound with the heterophase structure. It is shown that the effect of splitting the solid solution gamma phase diffraction peaks is missing in the alloys based on the Ni₃Al intermetallic compound with heterophase structure, in contrast to the nickel heat-resistant alloys. It was established that splitting of the solid solution gamma phase diffraction peaks in the diffraction pattern was caused by tetragonal distortion of the gamma phase crystal lattice (solid solution) exposed to the interphase stresses. Only under condition of the interphase boundary coherence exposed to the interfacial stresses the tetragonal distortion of the gamma phase crystal lattice (solid solution) appeared. Therefore, a conclusion could be made based on the absence of splitting the gamma phase diffraction peaks that the interphase boundary (interface) coherence was missing in alloys based on the Ni₃Al intermetallic compound with the heterophase structure.

Keywords: nickel heat-resistant alloys, Ni₃Al intermetallic compound, substructure, crystal lattice, gamma phase, tetragonal distortion, interphase stresses, coherence

REFERENCES

- [1] Tarasenko L.V., Unchikova M.V., Bondarenko Yu.A. *Zharoprochnye splavy s orientirovannoy strukturoy* [Heat-resistant alloys with oriented structure]. Moscow, BMSTU Publ., 2006, 24 p.
- [2] Bazyleva O.A., Arginbaeva E.G., Shestakov A.V. *Zharoprochnye intermetallidnye nikelovye splavy dlya dvigateley letatelnykh apparatov* [Heat-resistant intermetallic compound nickel alloys for the aircraft engines]. *Idey i innovatsii — Ideas and innovations*, 2020, vol. 8, no. 3–4, pp. 138–146.
- [3] Tretyakov A.F., Tarasenko L.V. *Materialovedenie i tekhnologii obrabotki materialov* [Materials science and materials processing technologies]. Moscow, BMSTU Publ., 2014, 541 p.
- [4] Logunov A.V. *Zharoprochnye nikelovye splavy dlya lopatok i diskov gazovykh turbin* [Heat-resistant nickel alloys for blades and disks of the gas turbines]. Rybinsk, ID “Gasoturbinnye tekhnologii” Publ., 2017, 854 p.
- [5] Jozwik P., Polkowski W., Bojar Z. Applications of Ni₃Al based intermetallic alloys — current stage and potential perspectives. *Materials*, 2015, no. 8 (5), pp. 2537–2568.
- [6] Bazyleva O.A., Ospennikova O.G., Arginbaeva E.G., Letnikova E.Yu., Shestakov A.V. *Tendentsii razvitiya intermetallidnykh splavov na osnove nikelya* [Development trends of nickel-based intermetallic alloys]. *Aviatsionnye materialy tekhnologii — Aviation Materials and Technologies*, 2017, no. S, pp. 104–115. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-104-115

- [7] Glotka A.A., Gaiduk S.V. Prognozirovaniye svoystv monokristallicheskikh zharoprochnykh splavov [Prediction of the monocrystal heat-resistant nickel alloys properties]. *Nauka i progress transporta. Vestnik Dnepropetrovskogo natsionalnogo universiteta zheleznodorozhnogo transporta — Science and progress of transport. Herald of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport*, 2019, no. 2 (80), pp. 91–100.
- [8] Petrushin N.V., Ospennikova O.G., Svetlov I.L. Monokristallicheskie zharoprochnye nikelovyye splavy dlya turbinnykh lopatok perspektivnykh GTD [Single-crystal Ni-based superalloys for turbine blades of advanced gas turbine engines]. *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technologies*, 2017, no. S, pp. 72–103. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-72-103
- [9] Shalin R.E., Svetlov I.L., Kachanov E.B. *Monokristally nikelovykh zharoprochnykh splavov* [Monocrystals of the nickel heat-resistant alloys]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1997, 336 p.
- [10] Samoylov A.I., Nazarkin R.M., Petrushin N.V., Moiseeva N.S. Misfit kak kharakteristika urovnya mezhfaznykh napryazheniy v monokristallicheskikh zharoprochnykh strukturakh nikelovykh splavov [Misfit as a characteristic of the interphase stresses level in the monocrystal heat-resistant nickel alloys]. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2011, no. 3, pp. 71–77.
- [11] Chabina E.B., Alekseev A.A., Filonova E.V., Lukina E.A. Primeneniye metodov analiticheskoy mikroskopii rentgenostrukturnogo analiza dlya issledovaniya strukturno-fazovogo sostoyaniya materialov [The use of methods of analytical microscopy and X-ray diffraction analysis for the study of the structural phase state materials]. *Trudy VIAM: nauch.-tekhn. zhurnal — Scientific and Technical Journal “Proceedings of VIAM”*, 2013, no. 5, art. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru/> (accessed August 23, 2022).
- [12] Zhigalina O.M., Bazaleeva K.O. *Analiz struktury materialov metodami prosvetchivayushey elektronnoy mikroskopii* [Analysis of the structure of materials by means of transmission electron microscopy]. Moscow, BMSTU Publ., 2017, 36 p.
- [13] Zhigalina O.M. *Analiz defektov kristallicheskogo stroyeniya materialov* [Analysis of defects in the crystal structure of materials]. Moscow, BMSTU Publ., 2017, 40 p.
- [14] Samoylov A.I., Kablov E.N., Petrushin N.V., Nazarkin R.M., Moiseeva N.S. O prirode rasschepleniya γ -satellitov rentgenovskikh refleksov zharoprochnykh monokristalnykh nikelovykh splavov [On the nature of splitting of the γ -satellites of the X-ray diffraction reflections of the heat-resistant monocrystal nickel alloys]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov — Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2010, vol. 76, no. 12, pp. 26–29.
- [15] Samoylov A.I., Nazarkin R.M., Moiseeva N.S. Nestesnenny misfit v zharoprochnykh monokristallicheskikh nikelovykh splavakh [Unconstrained misfit in heat-resistant monocrystal nickel alloys]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov — Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2011, vol. 77, no. 11, pp. 36–38.
- [16] Setyukov O.A. Rentgenostrukturnoe opredeleniye strukturnykh parametrov kristallicheskikh reshetok matritsy i δ' -fazy (Al_3Li) v splavakh Al–Li [X-ray diffraction determination of the structural parameters of the crystal lattices of the matrix and δ' -phase (Al_3Li) in the Al–Li alloys]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov — Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2009, vol. 75, no. 9, pp. 41–45.

- [17] Samoylov A.I., Kablov E.N., Petrushin N.V., Roschina I.N. Razmernoe nesootvetstvie kristallicheskih reshetok γ - i γ' -faz v nikelovykh reniysoderzhaschikh zharoprochnykh splavakh [Dimensional mismatch of crystal lattices of the γ - and γ' -phases in the nickel rhenium-containing heat-resistant alloys]. In: *Liteynye zharoprochnye splavy. Effekt S.T. Kishkina* [Casting heat-resistant alloys. S.T. Kishkin effect], Kablov E.N., red. Moscow, Nauka Publ, 2006, pp. 131–141.
- [18] Ignatova I.A., Krivko A.I., Samoylov A.I. Razvitie rentgenovskikh metodov analiza struktury i napryazhennogo sostoyaniya zharoprochnykh splavov [Development of X-ray methods in analyzing the structure and stress state of the heat-resistant alloys]. In: *Aviatsionnye materialy na rubezhe XX–XXI vekov* [Aviation materials at the turn of the XX–XXI centuries]. Shalin R.E., ed. Moscow, VIAM, 1994, pp. 465–483.
- [19] Samoylov A.I., Ignatova I.A., Kozlova V.S., Krivko A.I. Opredelenie mezhfaznykh napryazheniy v psevdomonokristallicheskih strukturakh s vzaimnoy kristallograficheskoy orientirovkoj faz [Determination of interphase stresses in pseudo-monocrystal structures with mutual crystallographic phase orientation]. *Zavodskaya laboratoriya — Industrial Laboratory*, 1980, vol. 46, no. 5, pp. 414–417.
- [20] Turenko E.Yu., Bazyleva O.A., Shestakov A.V. Sovremennye perspektivnye vysokotemperaturnye splavy serii VIN [Modern advanced high-temperature intermetallic component alloys of the VIN series]. *Novosti materialovedeniya. Nauka i tekhnika: electron. nauch.-tekhn. zhurnal — News of materials science. Science and technology: electronic scientific and technical journal*, 2014, no. 3, art. 10. Available at: <http://materialsnews.ru> (accessed August 23, 2022).
- [21] Povarova K.B., Bondarenko Yu.A., Drozdov A.A., Bazyleva O.A., Antonova A.V., Morozov A.E., Arginbaeva E.G. Vliyanie napravlennoy kristalizatsii na strukturu i svoystva monokristallov splava na osnove Ni_3Al , legirovannogo Cr, Mo, W, Ti, Co, Re i P3M [Influence of directed crystallization on structure and properties of the alloy monocrystals based on the Ni_3Al doped with Cr, Mo, W, Ti, Co, Re and REM]. *Metally — Metals*, 2015, no. 1, pp. 50–58.
- [22] Povarova K.B., Bazyleva O.A., Drozdov A.A., Kazanskaya N.K., Morozov A.E., Samsonova M.A. Konstruktsionnye zharoprochnye splavy na osnove Ni_3Al : poluchenie, struktura i svoystva [Structural heat-resistant alloys based on the Ni_3Al : preparation, structure and properties]. *Materialovedenie — Materials Science*, 2011, no. 4, pp. 39–48.
- [23] Buntushkin V.P., Kablov E.N., Bazyleva O.A. Mekhanicheskiye i ekspluatatsionnye svoystva liteynogo zharoprochnogo splava na osnove intermetallida Ni_3Al [Mechanical and operational properties of cast heat-resistant alloy based on the Ni_3Al intermetallide]. *Russian Metallurgy (Metally)*, 1995, no. 3, pp. 70–73.
- [24] Kablov E.N. Rol' fundamental'nykh issledovaniy pri sozdanii materialov novogo pokoleniya [The fundamental research role in creating materials of new generation]. In: *Tez. dokl. XXI Mendeleyevskogo s'yezda po obshchey i prikladnoy khimii* [XXI Mendeleevsky Congress for General and Applied Chemistry: Abstracts]. In six vols. Saint Petersburg, 2019, vol. 4, p. 24.
- [25] Kablov E.N., Evgenov A.G., Petrushin N.V., Bazyleva O.A., Mazalov I.S. Materialy novogo pokoleniya i tsifrovyye additivnyye tekhnologii proizvodstva resursnykh detaley FGUP «VIAM». Chast' 4. Razrabotka zharoprochnykh materialov [Materials of new generation and digital additive production technologies of life-time parts of FGUP «VIAM». Part 4. Development of heat-resistant materials]. *Elektrometallurgiya — Electrometallurgy*, 2022, no. 5, pp. 8–19. DOI: 10.31044/1684-5781-2022-0-5-8-19

- [26] Bazyleva O.A., Arginbayeva E.G., Lutsкая S.A., Dmitriev N.S. Liteynyy intermetallidnyy splav na osnove soyedineniya Ni_3Al dlya turbinnnykh lopatok gazoturbinnnykh dvigateley [Foundry intermetallic alloy based on Ni_3Al compound for turbine blades gas turbine engines]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technologies*, 2022, no. 2, pp. 5–17.
DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-5-17
- [27] Kuzmina N.A., Ostroukhova G.A. Blochnost' i substruktura v monokristallicheskiykh otlivkakh nikelovykh zharoprochnykh splavov [Blockiness and substructure in single-crystal castings of nickel heat-resistant alloys]. *Trudy VIAM: nauch.-tekhn. zhurnal — Scientific and Technical Journal “Proceedings of VIAM”*, 2022, no. 7, pp. 13–26.
DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-7-13-26
- [28] Bazyleva O.A., Karashaev M.M., Shestakov A.V., Arginbaeva E.G. Vliyaniye temperatury otzhiga na gomogennost' intermetallidnogo splava na osnove soyedineniya Ni_3Al [Effect of annealing temperature on the homogeneity of intermetallic alloy based on Ni_3Al compound]. *Trudy VIAM: nauch.-tekhn. zhurnal — Scientific and Technical Journal “Proceedings of VIAM”*, 2020, no. 8, pp. 3–10. DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-8-3-10
- [29] Kuzmina N.A. Rostovyye strukturnyye defekty v monokristallakh nikelovykh zharoprochnykh splavov [Growth structural defects in single-crystals of nickel heat-resistant alloys]. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii — Aviation Materials and Technologies*, 2022, no. 3, pp. 15–26.
DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-3-15-26

Nazarkin R.M., Senior Lecturer, Department of Materials Science, Bauman Moscow State Technical University; Leading Engineer, The National Research Center “Kurchatov Institute”— All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials (VIAM). Field of activity and scientific interests: X-ray diffraction analysis, X-ray phase analysis, nickel heat-resistant alloys, nickel intermetallic content alloys, Ni_3Al intermetallic compound. e-mail: nazarkin@bmstu.ru

Zhigalina O.M., Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Department of Materials Science, Bauman Moscow State Technical University; Leading Researcher, FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Field of activity and scientific interests: transmission electron microscopy, electron diffraction, nickel alloys, nanoparticles.
e-mail: olga.zhigalina@bmstu.ru