

---

**РЕАЛЬНАЯ СТРУКТУРА  
КРИСТАЛЛОВ**


---

УДК 548.74

**ОРИЕНТАЦИОННОЕ СООТНОШЕНИЕ И РАЗМЕРНОЕ  
НЕСООТВЕТСТВИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ РЕШЕТОК Nb-МАТРИЦЫ  
И  $\gamma$ -СИЛИЦИДА В КОМПОЗИТЕ СИСТЕМЫ Nb–Si**
© 2019 г. А. В. Заводов<sup>1,\*</sup>, Д. В. Зайцев<sup>1</sup>, Н. А. Кузьмина<sup>1</sup>, И. Л. Светлов<sup>1</sup><sup>1</sup> *Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов ГИЦ РФ, Москва, Россия*\* *E-mail: zavodovad@gmail.com*

Поступила в редакцию 02.04.2018 г.

После доработки 26.12.2018 г.

Принята к публикации 10.01.2019 г.

Методами просвечивающей электронной микроскопии установлены ориентационные соотношения между кристаллическими решетками твердого раствора Nb и частиц  $\gamma$ -силицидов Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>:  $\{110\}_{\text{Nb}}\parallel\{100\}\gamma$ ;  $\langle 111\rangle_{\text{Nb}}\parallel\langle 001\rangle\gamma$ . Плоскостями сопряжения являются плоскости двух типов:  $\{110\}_{\text{Nb}}\parallel\{100\}\gamma$  и  $\{111\}_{\text{Nb}}\parallel\{001\}\gamma$ . Плоскости первого типа образуют между собой ступеньки под углом 120°. Для подтверждения правильности вычисленных ориентационных соотношений и сравнения с экспериментальными картинками электронной дифракции использованы методы математического моделирования, позволяющие строить совмещенные электронограммы нескольких фаз и осуществлять наклон модельного кристалла. Построена модель межфазной границы в двух сечениях и предложено структурное обоснование морфологии поверхности раздела частицы и матрицы. Вычислено размерное несоответствие между кристаллическими решетками матрицы и  $\gamma$ -силицида.

DOI: 10.1134/S002347611905028X

**ВВЕДЕНИЕ**

Кристаллография и морфология диффузионно-контролируемых твердотельных реакций во многом определяются ориентационными и размерными соотношениями между кристаллическими решетками матричной фазы и продуктов превращений. Этот принцип справедлив для всех без исключения твердофазных реакций в процессе термической обработки или эксплуатационной деградации структуры и свойств различных сплавов – магниевых, титановых, циркониевых, железных, никелевых, кобальтовых и других с различными кристаллическими решетками.

Существует несколько прогнозных моделей, среди которых стыковая модель совпадения наиболее проста и эффективна для предсказания ориентационных соотношений и габитусных плоскостей в гетерогенных сплавах, состоящих из фаз с различными кристаллическими решетками [1]. Например, согласно этой модели, индексы параллельных плоскостей и направлений, а также габитусных плоскостей в системах ГПУ–ОЦК существенно зависят от отношений периодов кристаллических решеток сопрягаемых фаз [2]. Модель предсказывает возможную зигзагообразную структуру границы раздела между сопрягающимися решетками [2, 3].

В теории и практике физического материаловедения никелевых и кобальтовых жаропрочных сплавов ориентационные соотношения и размерные несоответствия периодов кристаллических решеток фаз являются важными параметрами, определяющими термостабильность и микроструктуру при высоких напряжениях и температурах [4–8].

Аналогичные проблемы возникают в естественных эвтектических композициях на основе легированной системы Nb–Si, состоящих из Nb-матрицы с ОЦК-решеткой и армирующей фазы в виде силицидов ниобия Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> различных полиморфных модификаций  $\alpha$  и  $\gamma$  [9]. Силицид  $\alpha$ -Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> имеет тетрагональную кристаллическую решетку, а силицид  $\gamma$ -Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> – гексагональную [10–13]. Многообразие вариантов сопряжения фаз различных модификаций в композициях Nb–Si разных составов является причиной неоднозначности экспериментально определенных ориентационных соотношений [14–18].

В связи с этим основные задачи настоящей работы состояли в экспериментальном определении аксиальной текстур Nb-матрицы и армирующей фазы  $\gamma$ -силицида, формирующейся в процессе получения композита методом направленной кристаллизации, ориентационного соотношения между силицидами и Nb-матрицей, а также размерно-

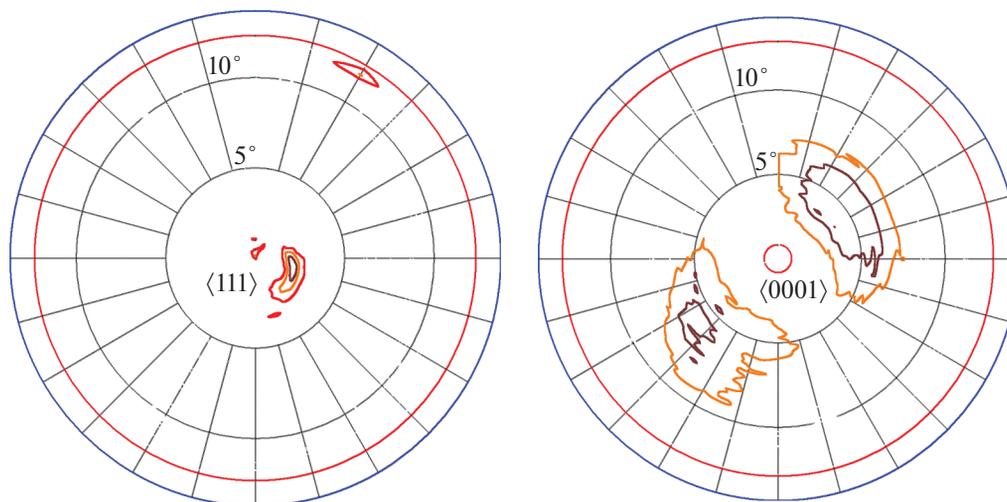


Рис. 1. Прямые полюсные фигуры в поперечном сечении монолитного образца: а – отражение  $222_{\text{Nb}}$ ; б – отражение  $002_{\gamma}$ .

го несоответствия межплоскостных расстояний сопрягаемых плоскостей на границе раздела Nb-матрицы и  $\gamma$ -силицида.

#### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Композиты системы Nb–Si–Ti–Hf–Al–Cr–Mo–W–Zr получали в два этапа: вначале получали сплав, близкий к эвтектическому составу с равноосной структурой (прекурсор), а затем собственно композиты методом направленной кристаллизации прекурсоров. Для выравнивания микроликвационной неоднородности слитки гомогенизировали в вакууме в течение 10 ч.

Методом рентгеновской дифракции определено направление преимущественного роста Nb-матрицы и силицида ниобия. Для съемки использовали цилиндрический образец с полированной торцевой поверхностью. Для удаления деформированного слоя применяли электролитическое травление. Съемку проводили на дифрактометре ДРОН-4 в геометрии Брэгга–Брентано ( $\text{CuK}_{\alpha}$ -излучение), применяли  $\theta$ – $2\theta$ -сканирование в диапазоне углов  $2\theta$   $30^{\circ}$ – $142^{\circ}$ .

Образцы для просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) изготовили в виде дисков таким образом, чтобы их плоскости были перпендикулярны и параллельны оси кристаллизации. Полученные диски утоняли на SiC-бумаге до 50 мкм, а далее в среде аргона на установке ионного травления PIPSII фирмы Gatan.

Дифракционный анализ проводили с помощью микроскопа Jem 200 CX фирмы Jeol при рабочем ускоряющем напряжении 160 кВ и длине камеры 820 мм. Анализ дифракционных картин и вычисление ориентационных соотношений вы-

полняли с применением методов математического моделирования. Прямые ПЭМ-изображения получены в микроскопе Tescan G2 F20 S-TWIN фирмы FEI при рабочем ускоряющем напряжении 200 кВ.

Ориентационные соотношения между кристаллическими решетками твердого раствора Nb (матрица) и силицидами ниобия  $\gamma$ - $\text{Nb}_5\text{Si}_3$  вычисляли в несколько этапов. Сначала определяли тип и параметры кристаллических решеток матрицы и силицидов (периодов и углов), затем получали электронограммы с совмещенными сетками на межфазной границе. После этого задавали ориентационные соотношения и моделировали дифракцию на двух фазах. На последнем этапе проводили проверку совпадения расчетных дифракционных картин с экспериментальными при двух угловых положениях образца.

Все матричные вычисления осуществляли в Mathcad. Результаты расчета визуализировали в программной среде Borland Delphi 7.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

*Определение аксиальной текстуры Nb-матрицы и фазы  $\gamma$ - $\text{Nb}_5\text{Si}_3$ .* На рис. 1 приведены прямые полюсные фигуры для отражений  $222_{\text{Nb}}$  и  $002_{\gamma}$ , полученные в поперечном сечении монолитного образца композита Nb–Si. Для матрицы Nb в поперечном сечении характерно наличие текстуры  $[111]$ . Выделения силицида ниобия  $\gamma$ - $\text{Nb}_5\text{Si}_3$  имеют текстуру  $[001]$ . Таким образом, направлениями роста монолитного образца являются направления типа  $\langle 111 \rangle_{\text{Nb}} \parallel \langle 001 \rangle_{\gamma}$ . Подобное соответствие направлений кристаллизации твердого раствора

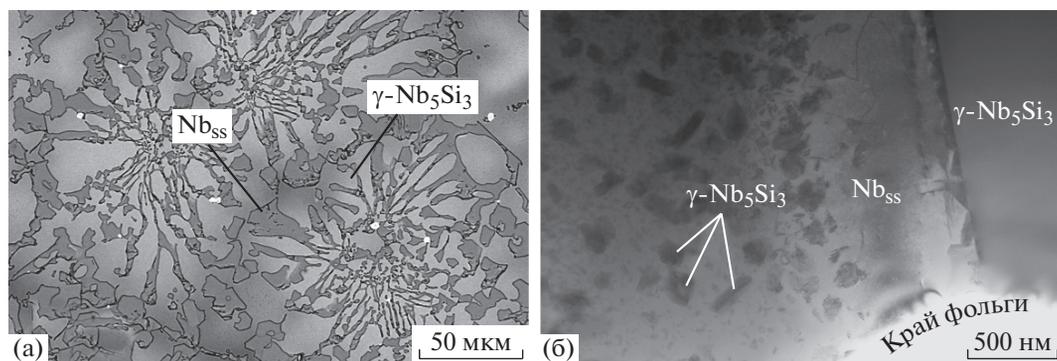


Рис. 2. Микроструктура образца в поперечном сечении: а – первичные  $\gamma$ -силициды (светлые области); б – вторичные силициды, выделяющиеся в твердом растворе  $Nb_{тр}$ .

и силицидов совпадает с результатами, приведенными в [19, 20].

*Определение ориентационных соотношений между силицидами и Nb-матрицей.* Матрица сплава представляет собой твердый раствор Nb с ОЦК-решеткой. В исследуемом сплаве наблюдались силициды двух типов, различающиеся размерами и морфологией (рис. 2). Первые – это крупные силициды, образующиеся по эвтектидной реакции в процессе направленной кристаллизации. На ПЭМ-изображениях (рис. 2а), полученных в режиме детектирования обратно отраженных электронов,  $\gamma$ -силициды соответствуют светлым областям. Вторые – более мелкие силициды, выпадающие при охлаждении из твердого раствора ниобия с уменьшением растворимости легирующих элементов (рис. 2б).

Все изученные силициды, как крупные, так и мелкие, обладают гексагональной решеткой (пр. гр.  $R\bar{6}_3/mcm$ ) с периодами  $a_\gamma \approx 7.57$  и  $c_\gamma \approx 5.21$  Å, соответствующими  $\gamma$ -силицидам ниобия. Период твердого раствора ниобия согласно данным рентгеноструктурного анализа составляет  $a_{Nb} \approx 3.27$  Å.

*Первичный силицид.* На рис. 3 приведена электронограмма граничной области матрицы с крупным силицидом на оси зоны  $[111]_{Nb} \parallel [001]_\gamma$ . Неравномерное распределение интенсивности двух сеток рефлексов связано в первую очередь с тем, что область селекторной диафрагмы наполовину занята матрицей, а наполовину – частицей силицида, что и приводит к такому эффекту.

Для составления ориентационных соотношений необходимо выбрать в двух решетках два совпадающих направления (они уже выбраны – это оси зон  $[111]_{Nb}$  и  $[001]_\gamma$ ) и две параллельные плоскости. Параллельным плоскостям  $(hkl)_{Nb}$  и  $(h'k'l')_\gamma$  соответствуют рефлексы  $hkl_{Nb}$  и  $h'k'l'_\gamma$ , лежащие на одной прямой с нулевым узлом обратной решетки. Таким свойством на рис. 3 облада-

ют, например, почти совпадающие рефлексы  $0\bar{1}1_{Nb}$  и  $0\bar{3}0_\gamma$ .

В общем виде, если в решетку Nb встроен хотя бы один  $\gamma$ -силицид, то одна из его плоскостей семейства  $\{100\}_\gamma$  параллельна одной из плоскостей семейства  $\{110\}_{Nb}$ , а его ось  $[001]_\gamma$  параллельна одной из осей семейства  $\langle 111 \rangle_{Nb}$ , что можно для краткости выразить в условной форме:  $\{110\}_{Nb} \parallel \{100\}_\gamma$ ;  $\langle 111 \rangle_{Nb} \parallel \langle 001 \rangle_\gamma$ .

Ориентационные соотношения между двумя решетками можно определить матрицей перехода. Воспользуемся рис. 3, чтобы выразить каждый базисный вектор обратной решетки  $\gamma$ -силицида линейной комбинацией базисных векторов об-

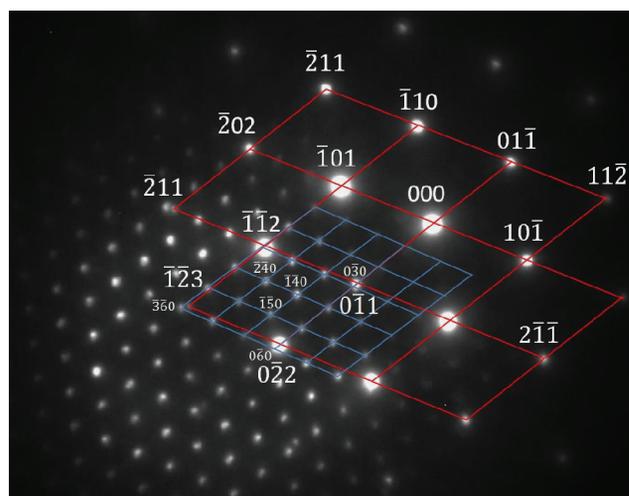


Рис. 3. Электронограмма граничной области (ось зоны  $[111]_{Nb} \parallel [001]_\gamma$ ). Крупные ромбы – решетка Nb, мелкие – решетка  $\gamma$ -силицида. Рефлексы от решеток Nb и  $\gamma$ -силицида обозначены крупными и мелкими символами соответственно.

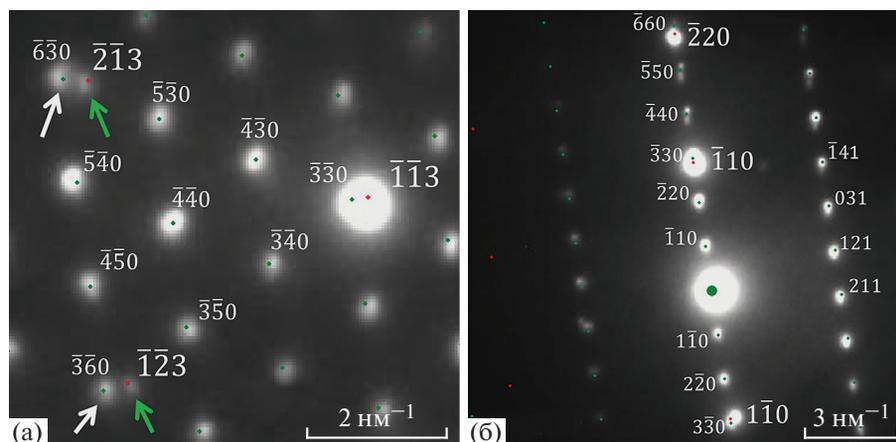


Рис. 4. Наложение расчетных электрограмм на экспериментальные: а – ось зоны  $[111]_{\text{Nb}} \parallel [001]_{\gamma}$ ; б – ось зоны  $[225]_{\text{Nb}} \parallel [113]_{\gamma}$  после наклона на  $26^\circ$  относительно  $[111]_{\text{Nb}}$ .

ратной решетки ниобия. Обозначив символом  $\mathbf{H}(hkl)$  радиус-вектор узла  $hkl$ , запишем:

$$\mathbf{H}(100)_{\gamma} \parallel \mathbf{H}(10\bar{1})_{\text{Nb}}; \mathbf{H}(010)_{\gamma} \parallel \mathbf{H}(01\bar{1})_{\text{Nb}};$$

$$\mathbf{H}(001)_{\gamma} \parallel \mathbf{H}(111)_{\text{Nb}}.$$

Последняя пара векторов направлена по осям двух зон  $[001]_{\gamma} \parallel [111]_{\text{Nb}}$ .

Обозначив базисы обратных решеток силицида и ниобия как  $(\mathbf{a}_1^*, \mathbf{a}_2^*, \mathbf{a}_3^*)$  и  $(\mathbf{A}_1^*, \mathbf{A}_2^*, \mathbf{A}_3^*)$  соответственно, свяжем системы координат двух обратных решеток следующими преобразованиями:

$$\mathbf{a}_1^* = 0.353\mathbf{A}_1^* - 0.353\mathbf{A}_3^*,$$

$$\mathbf{a}_2^* = 0.353\mathbf{A}_2^* - 0.353\mathbf{A}_3^*,$$

$$\mathbf{a}_3^* = 0.362\mathbf{A}_1^* + 0.362\mathbf{A}_2^* + 0.362\mathbf{A}_3^*,$$

т.е.  $\mathbf{a}_i^* = (\alpha_{ik})\mathbf{A}_k^*$ , где

$$(\alpha_{ik}) = \begin{pmatrix} 0.353 & 0 & -0.353 \\ 0 & 0.353 & -0.353 \\ 0.362 & 0.362 & 0.362 \end{pmatrix}$$

– матрица перехода.

Коэффициенты матрицы при векторах  $\mathbf{A}_k^*$  найдены по формуле:

$$\alpha_{ik} = \frac{|\mathbf{H}_i|}{|\mathbf{a}_i^*|} h_{ik} \cdot \mathbf{A}_k^*,$$

где  $\mathbf{H}_i$  – радиус-вектор узла  $hkl$  на электрограмме решетки Nb, направленный вдоль  $i$ -го базисного вектора  $\mathbf{a}_i^*$  обратной решетки  $\gamma$ -силицида;  $h_{ik}$  – соответствующий индекс Миллера, т.е.  $h$ ,  $k$  или  $l$ . Для вычисления брали следующие параметры решеток:  $a_{\gamma} = 7.57$ ,  $c_{\gamma} = 5.21$ ,  $a_{\text{Nb}} = 3.27$  Å.

Известно, что матрица перехода, связывающая базисы двух обратных решеток, преобразует

также координаты узлов прямой решетки к разным базисам. Поэтому при умножении вектора  $[111]_{\text{Nb}}$  на матрицу  $(\alpha_{ik})$  слева получим параллельный ему вектор в решетке  $\gamma$ -силицида:

$$[uvw]_{\gamma} = \begin{pmatrix} 0.353 & 0 & -0.353 \\ 0 & 0.353 & -0.353 \\ 0.362 & 0.362 & 0.362 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}_{\text{Nb}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1.087 \end{pmatrix}_{\gamma}.$$

Для подтверждения правильности результатов покажем на рис. 4а наложение дифракционной картины на оси зоны  $[111]_{\text{Nb}}$ , рассчитанной по программе Electronogramm (свидетельство о гос. регистрации № 2018619581). На удалении от центра картины, где интенсивность матричных отражений низка и не засвечивает отражения силицида, можно наблюдать разделение рефлексов  $\bar{3}\bar{6}0_{\gamma}$  и  $\bar{1}\bar{2}\bar{3}_{\text{Nb}}$ , что очень хорошо воспроизводится в расчетной дифракционной картине. Для проверки ориентационного соотношения наклоним реальный кристалл и модельный на один и тот же угол, например, на  $26^\circ$ . Совмещенная картина дифракции на рис. 4б подтверждает правильность расчетов и заданного ориентационного соотношения.

*Вторичный силицид.* На рис. 5 представлены электрограммы выделенной области с мелким силицидом. Из электрограммы на оси зоны  $[111]_{\text{Nb}}$  видно, что ориентации вторичного и первичного силицидов различаются.

Предположив, что такая ориентация является одним из эквивалентных вариантов указанного выше соотношения, методом перебора всех возможных ориентаций, рассчитанных программой, нашли направление  $[22\bar{1}]_{\gamma}$  удовлетворяющее электрограмме на рис. 5а.

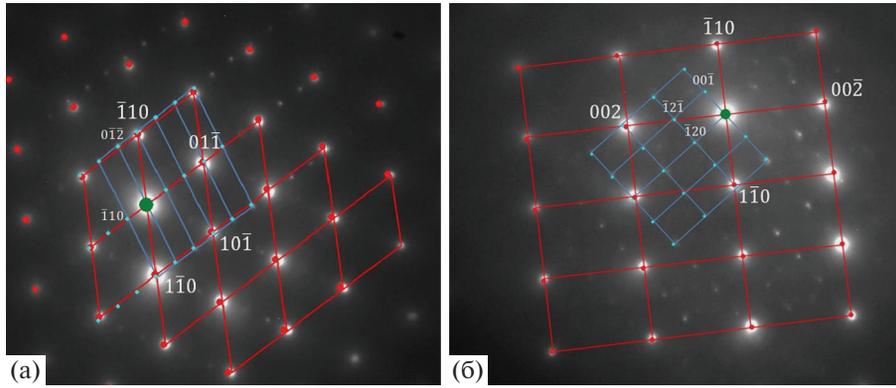


Рис. 5. Электронограммы матрицы и силицида при двух углах наклона относительно плоскости фольги: а –  $0^\circ$ , ось зоны  $[111]_{\text{Nb}} \parallel [221]_{\gamma}$ ; б –  $34^\circ$ , ось зоны  $[110]_{\text{Nb}} \parallel [210]_{\gamma}$ .

Наклонив образец на  $34^\circ$  относительно направления  $[\bar{1}10]$ , получили вторую электронограмму на оси зоны  $[110]_{\text{Nb}}$  (рис. 5б), которая полностью совпадает с расчетной. Ориентационные соотношения в этом случае и матрица перехода представляются как:

$$(110)_{\text{Nb}} \parallel (100)_{\gamma}, [1\bar{1}\bar{1}] \parallel [001]_{\gamma},$$

$$(\alpha_{ik}) = \begin{pmatrix} 0.353 & 0.353 & 0 \\ 0.353 & 0 & 0.353 \\ 0.362 & -0.362 & -0.362 \end{pmatrix}.$$

Для расчета осей зон силицида в направлениях Nb-матрицы  $[111]_{\text{Nb}}$ , (рис. 5) умножим соответствующие векторы на матрицу  $(\alpha_{ik})$  слева:

$$[uvw]_{\gamma} = (\alpha_{ik}) \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}_{\text{Nb}} = \begin{pmatrix} 0.705 \\ 0.705 \\ -0.362 \end{pmatrix}_{\gamma};$$

$$[uvw]_{\gamma} = (\alpha_{ik}) \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}_{\text{Nb}} = \begin{pmatrix} 0.705 \\ 0.353 \\ 0 \end{pmatrix}_{\gamma},$$

где направления векторов гексагональной решетки  $[0.705 \ 0.705 \ 0.\bar{362}]$  и  $[0.705 \ 0.353 \ 0]$  совпадают с направлениями векторов  $[22\bar{1}]_{\gamma}$  и  $[220]_{\gamma}$  соответственно, являющихся осями зон  $\gamma$ -силицида на рис. 5.

**Определение сопрягающихся плоскостей матрицы и  $\gamma$ -силицида.** Определив ориентационные соотношения между кристаллическими решетками матрицы и силицида, нельзя сказать, по каким плоскостям проходит межфазная граница. Ориентационные соотношения задают только расположение двух решеток друг относительно друга, но ничего не говорят о плоскости раздела матрицы и частицы силицида. Кроме того, возникает вопрос о геометрии границы. Какие плоскости

формируют границу раздела фаз и замыкают ее вокруг объемной частицы силицида?

Результаты исследования межфазной границы в режиме детектирования прямого пучка позволили ответить на эти вопросы. На рис. 6 показана межфазная граница между твердым раствором Nb и частицей первичного силицида  $\text{Nb}_5\text{Si}_3$ . На рис. 6а ориентация матрицы и силицида соответственно  $[111]_{\text{Nb}}$  и  $[001]_{\gamma}$ . Граница между матрицей и силицидом параллельна направлению  $[\bar{2}11]_{\text{Nb}}$  матрицы или  $[010]_{\gamma}$  силицида. Однако было бы некорректно утверждать, что граница находится в плоскости типа  $(110)_{\text{Nb}} \parallel (100)_{\gamma}$ , не убедившись, что при данной ориентации образца межфазная граница направлена перпендикулярно изображению.

С этой целью подготовили образец, плоскость которого перпендикулярна плоскости первого образца, а ориентация совпадает с ориентацией матрицы  $[\bar{2}11]_{\text{Nb}}$ , и убедились, что межфазная граница проходит вдоль направления матрицы  $[111]_{\text{Nb}}$  или  $[001]_{\gamma}$  силицида. Это позволяет однозначно утверждать, что граница раздела фаз проходит по плоскостям типа  $(110)_{\text{Nb}} \parallel (100)_{\gamma}$ . Также при этой ориентации наблюдается второй тип границ, образующий с плоскостями типа  $(110)_{\text{Nb}} \parallel (100)_{\gamma}$  угол  $90^\circ$ . Границы второго типа располагаются в плоскостях  $(111)_{\text{Nb}} \parallel (001)_{\gamma}$ .

**Определение размерного несоответствия межплоскостных расстояний сопрягающихся плоскостей матрицы Nb и  $\gamma$ -силицида.** На рис. 7 схематично изображена граница раздела между ОЦК-матрицей и частицей силицида. На данной схеме слева обозначена область матрицы в направлении  $[111]$ , разными оттенками обозначены плоскости A, B и C, располагающиеся на разных уровнях. Справа – область силицида ниобия, где светлыми кругами обозначены узлы элементарной ячейки. Темные круги представляют собой сечение при-

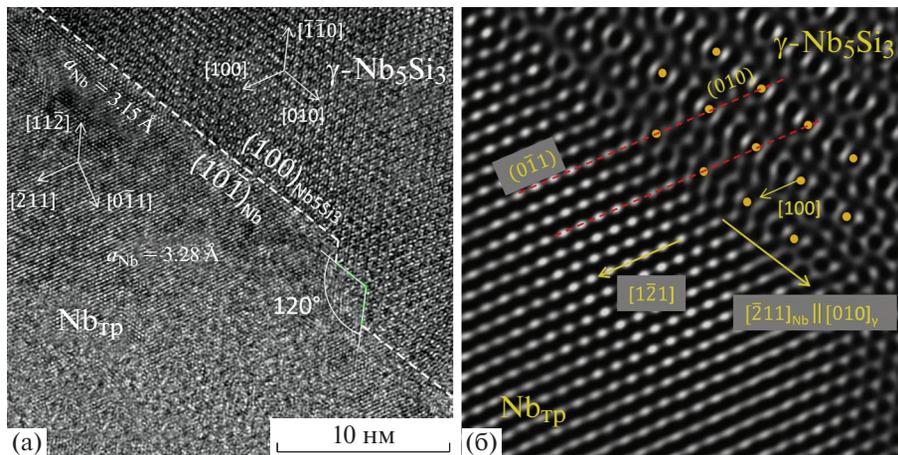


Рис. 6. Межфазная граница между Nb<sub>ТР</sub> и γ-силицидом в направлении [111]<sub>Nb</sub>: а – исходное изображение; б – после фурье-преобразования.

митивной гексагональной решетки в направлении [001], имеющей период приблизительно в 3 раза меньший, чем у силицида. Такое представление позволяет проще изобразить сопряжение двух решеток.

На рис. 6б, полученном после фурье-обработки изображения высокого разрешения, подробно показано сопряжение Nb-матрицы с силицидом. Плоскости (01̄1) твердого раствора переходят в плоскости (010) гексагональной решетки силицида. На одно межплоскостное расстояние (010)<sub>γ</sub> приходится три межплоскостных расстояния (01̄1)<sub>Nb</sub>. Замечено, что период кристаллической решетки твердого раствора Nb меняется от 3.15 Å вблизи границ с силицидами до 3.29 Å вдали от

частиц, что подтверждается прямыми изображениями. Это может быть связано с искажениями кристаллической решетки твердого раствора Nb вблизи частиц силицида.

Используя параметры решетки  $a_{Nb} = 3.15$  и  $a_{\gamma} = 7.59$  Å, по стандартным формулам находим межплоскостные расстояния сопрягающихся плоскостей:

$$3d(0\bar{1}1)_{Nb} = 6.68 \text{ \AA}; \quad d(010)_{\gamma} = 6.57 \text{ \AA}.$$

Различие в межплоскостных расстояниях определяет несовпадение кристаллических решеток при стыковке Nb-матрицы и γ-силицида Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> на межфазной границе и выражается в данном случае как:

$$\Delta_{Nb/\gamma} = 2 \frac{3d(0\bar{1}1)_{Nb} - d(010)_{\gamma}}{3d(0\bar{1}1)_{Nb} + d(010)_{\gamma}} \times 100\% = 1.66\%.$$

Для сравнения следует привести степени несовпадения решеток в монокристаллах жаропрочных никелевых и кобальтовых сплавов: 0.2–0.5% [18] и 0.5–0.9% [19] соответственно. В случае монокристаллов жаропрочных никелевых и кобальтовых сплавов матрицей является твердый раствор с ГЦК-решеткой, а упрочняющей фазой – частицы интерметаллидной γ'-фазы также с ГЦК-решеткой. Таким образом, в данном случае сопрягаются фазы ГЦК–ГЦК. В исследованном композите на основе легированной системы Nb–Si матрицей является твердый раствор ниобия с ОЦК-решеткой, а армирующей фазой γ-Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> – силицид ниобия с гексагональной решеткой. Здесь происходит сопряжение фаз ОЦК–ГПУ и, как следствие, несовпадение решеток в ниобиевом композите больше – 1.66%.

**Формирование границы замкнутого тела.** Межфазная граница является трехмерным объектом и должна замыкаться, образуя ограниченную об-

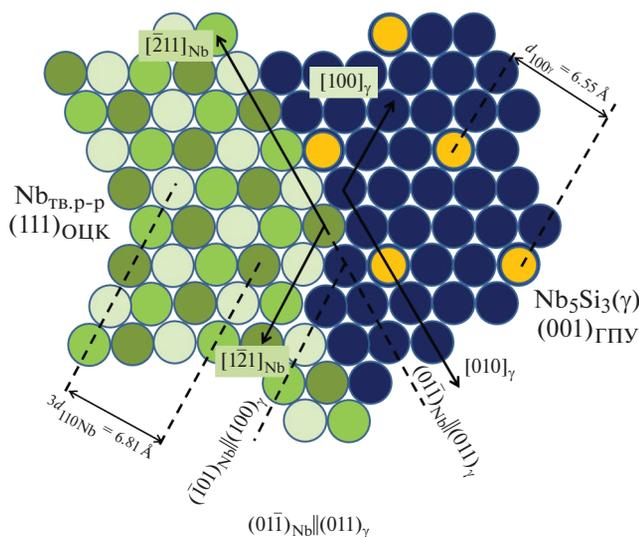


Рис. 7. Схема межфазной границы между Nb-матрицей и γ-силицидом.

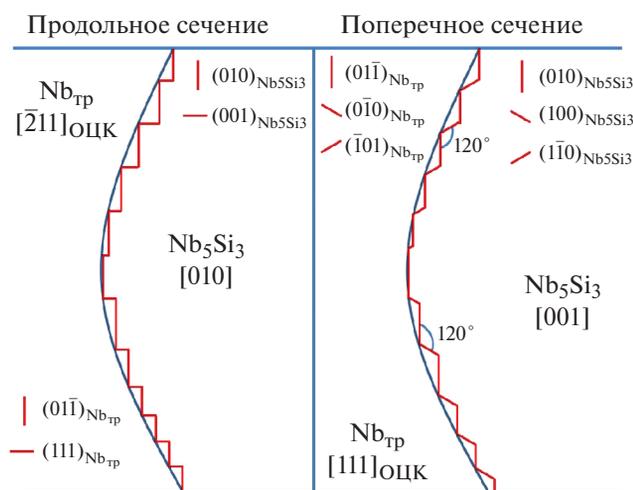


Рис. 8. Схематичное разбиение криволинейной границы эквивалентными плоскостями.

ласть. Морфология границы раздела зависит, в частности, от типа сопрягаемых кристаллических решеток. Для образования замкнутого контура линия границы должна постоянно изменять направление. Вероятно, изменяя направление, граница образует ступеньку, оставаясь в эквивалентных плоскостях типа  $\{110\}_{\text{Nb}}\|\{100\}_{\gamma}$ . Угол между двумя эквивалентными плоскостями таких типов составляет  $120^\circ$ . Продолжая таким образом отклоняться, граница образует замкнутый контур. На рис. 8 справа схематично изображено разбиение криволинейной межфазной границы на прямолинейные отрезки в одних и тех же эквивалентных плоскостях. Подтверждение такого поведения границы можно увидеть на рис. 6а, где она образовала две ступеньки в направлении  $[\bar{1}\bar{1}0]_{\gamma}$ .

В другом сечении при ориентации матрицы  $[\bar{2}11]_{\text{Nb}}$  плоскостью сопряжения является плоскость  $(001)_{\gamma}\|(111)_{\text{Nb}}$ , располагающаяся под углом  $90^\circ$  к плоскостям типа  $\{110\}_{\text{Nb}}$ . На рис. 8 слева представлено разбиение криволинейной границы в продольном сечении. Таким образом, весь объем частицы  $\text{Nb}_5\text{Si}_3$  можно сложить из правильных шестигранных призм. На поверхность тела будут выходить плоскости двух типов:  $\{100\}_{\gamma}$  и  $\{001\}_{\gamma}$ .

Отметим, что при образовании ступеньки под углом  $90^\circ$  межфазная граница каждый раз переходит в эквивалентную плоскость другого типа, в то время как разворот границы на  $120^\circ$  оставляет ее в тех же эквивалентных плоскостях  $\{110\}_{\text{Nb}}\|\{100\}_{\gamma}$ .

## ВЫВОДЫ

В сплаве системы Nb–Si после направленной кристаллизации вдоль ориентационной оси  $[111]$  матрицы ниобия обнаружены  $\gamma$ -силициды двух типов: первичные, ориентированные вдоль направления  $[001]_{\gamma}$ , и вторичные, имеющие различные ориентации, удовлетворяющие ориентационному соотношению в общем виде.

С применением математического моделирования и наложения расчетных электронограмм на экспериментальные картины дифракции определены ориентационные соотношения между  $\gamma$ -силицидами и Nb-матрицей. Кристаллические решетки всех силицидов характеризуются общими соотношениями с матрицей:  $\{110\}_{\text{Nb}}\|\{100\}_{\gamma}$ ;  $\langle 111 \rangle_{\text{Nb}}\|\langle 001 \rangle_{\gamma}$ .

Методом высокоразрешающей микроскопии определены плоскости сопряжения силицида с матрицей Nb:  $\{110\}_{\text{Nb}}\|\{100\}_{\gamma}$  и  $\{111\}_{\text{Nb}}\|\{001\}_{\gamma}$ . Предложена модель сопрягающихся плоскостей и вычислено их размерное несоответствие на границе раздела фаз, составляющее 1.66%.

Обоснована зигзагообразная морфология границы раздела фаз, при которой образуются ступеньки двух типов – под углами  $120^\circ$  и  $90^\circ$ . Межфазная граница всегда остается в эквивалентных плоскостях двух типов:  $\{100\}_{\gamma}$  и  $\{001\}_{\gamma}$ .

Работа выполнена в рамках развития комплексного научного направления 2.1. “Фундаментально-ориентированные исследования” (“Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года”) [21].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang M.-X., Kelly P.M. // Scripta. Mater. 2005. V. 52. P. 965.
2. Zhang M.-X., Kelly P.M. // Acta Mater. 2009. V. 53. P. 1073.
3. Zhang M.-X., Kelly P.M. // Acta Mater. 2009. V. 53. P. 1085.
4. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Ефимочкин И.Ю. // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. 2011. № SP2. С. 164.
5. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Карнов М.И. и др. // Материаловедение. 2017. № 2. С. 24.
6. Оспенникова О.Г., Рассохина Л.И., Битюцкая О.Н., Гамазина М.В. // Тр. ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2017. № 4. С. 3.
7. Лощинин Ю.В., Дмитриева В.В., Пахомкин С.И., Размахов М.Г. // Авиационные материалы и технологии. 2017. № 2 С. 41.
8. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б. // Авиационные материалы и технологии. 2017. № S. С. 24
9. Светлов И.Л., Кузьмина Н.Ф., Нейман А.В. // Материаловедение. 2015. № 3. С. 50.

10. Кузьмина Н.А., Еремин Н.Н., Марченко Е.И. и др. // Кристаллография. 2018. Т. 63. № 3. С. 358.
11. Каблов Е.Н., Кузьмина Н.А., Еремин Н.Н. и др. // Журн. структур. химии. 2017. Т. 58. № 3. С. 547.
12. Марченко Е.И., Кузьмина Н.А., Еремин Н.Н. // Тр. ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2017. Т. 51. № 3. С. 35.
13. Guo J.T., Tian Y.X., Gheng G.M. et al. // J. Alloys Compd. 2009. V. 470. P. 606.
14. Sekido N., Wei F.G., Kimura Y. et al. // Philos. Mag. Lett. 2006. V. 86. P. 89.
15. Cheng G.M., Tian Y.X., He L.L. // J. Mater. Res. 2009. V. 24. P. 192.
16. Cheng G., Tian Y., He L. et al. // Philos. Mag. 2009. V. 89. P. 2801.
17. Li Y.L., Ma C.L., Zhang H. Proc. ASME Turbo Expo 2013. Texas, June 3–7, 2013. P. V05AT21A006 .
18. Tian Y.X., Guo J.T., Gheng G.M. et al. // Mater. Des. 2009. V. 30. P. 2274.
19. Ma X., Guo X., Fu M., Guo H. // Scripta. Mater. 2017. V. 139. P. 108.
20. Li Y., Miura S., Ohsasa K. et al. // Intermetallics. 2011. V. 19. P. 460.
21. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Пискорский В.П. и др. // Авиационные материалы и технологии. 2015. № S2. С. 5.