

УДК 669.293:669.018.95

И.Л. Светлов¹, Н.А. Кузьмина¹, А.В. Заводов¹, Д.В. Зайцев¹

ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАЗДЕЛА МЕЖДУ НИОБИЕВОЙ МАТРИЦЕЙ И γ - Nb_5Si_3 СИЛИЦИДОМ В КОМПОЗИТЕ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Nb–Si

DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-28-37

Экспериментально исследована и с кристаллохимических позиций обоснована высокая термостабильность структуры Nb–Si композита. Проведен металлографический анализ микроструктуры композита в исходном состоянии и после высокотемпературной гомогенизации. Изучено явление микроликвации легирующих элементов.

Определены направления преимущественного роста Nb матрицы и силицида γ - Nb_5Si_3 в процессе направленной кристаллизации. Методами просвечивающей электронной микроскопии найдены ориентационные соотношения между ниобиевой матрицей и силицидом γ - Nb_5Si_3 : $\langle 111 \rangle_{Nb_{m.p.}} \parallel \langle 0001 \rangle_{\gamma-Nb_5Si_3}$ и $\{110\}_{Nb_{m.p.}} \parallel \{10\bar{1}0\}_{\gamma-Nb_5Si_3}$. На основании кристаллохимического анализа ориентационного и размерного соответствия кристаллических структур матрицы и силицида на поверхностях раздела обоснована высокая структурная термостабильность Nb–Si композита.

Ключевые слова: Nb–Si естественные композиты, микроструктура, структурное и размерное соотношение Данкова–Конобеевского, кристаллохимический анализ, структура поверхностей раздела.

I.L. Svetlov¹, N.A. Kuzmina¹, A.V. Zavodov¹, D.V. Zaytsev¹

THERMAL STABILITY OF INTERFACES BETWEEN THE NIOBIUM MATRIX AND γ - Nb_5Si_3 SILICIDE IN EUTECTIC Nb–Si COMPOSITES

The high thermal stability of the structure of the Nb–Si composite was substantiated experimentally and from the crystallochemical standpoints. The metallographic analysis of the microstructure of the composite in the initial state and after high-temperature homogenization is carried out. The phenomenon of microliquation of alloying elements has been studied.

The directions of the predominant growth of the Nb matrix and silicide γ - Nb_5Si_3 in the process of directional crystallization are determined. By the methods of transmission electron microscopy, the orientational relationships between the niobium matrix and the silicide γ - Nb_5Si_3 were found: $\langle 111 \rangle_{Nb_{ss}} \parallel \langle 0001 \rangle_{\gamma-Nb_5Si_3}$ and $\{110\}_{Nb_{ss}} \parallel \{10\bar{1}0\}_{\gamma-Nb_5Si_3}$. Based on the crystal-chemical analysis of the orientation and dimensional correspondence of the crystal structures of the matrix and silicide on the interfaces, the high structural thermal stability of the Nb–Si composite is substantiated.

Keywords: Nb–Si in situ composites, microstructure, Dankov–Konobeevsky structural and dimensional relation, crystal-chemical analysis, structure of interfaces.

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

Поверхности раздела между матрицей и армирующими фазами играют важную роль в формировании механических свойств композиционных материалов, особенно

при высоких температурах. Одна из особенностей эвтектических *in situ* композитов состоит в том, что строение межфазных поверхностей раздела формируется в соответствии с диаграммами состояния в процессе кристаллизации. Поэтому свободные энергии фаз равны между собой и, как следствие, отсутствуют градиенты концентраций и взаимные диффузионные потоки.

В бинарной диаграмме состояния Nb–Si (рис. 1) при температуре 1920°C и содержании кремния 18,7% (атомн.) протекает эвтектическая реакция



где $\text{Nb}_{\text{ТВ.Р}}$ и Nb_3Si – твердые растворы ниобия с ОЦК-решеткой и силицида ниобия с тетрагональной решеткой соответственно.

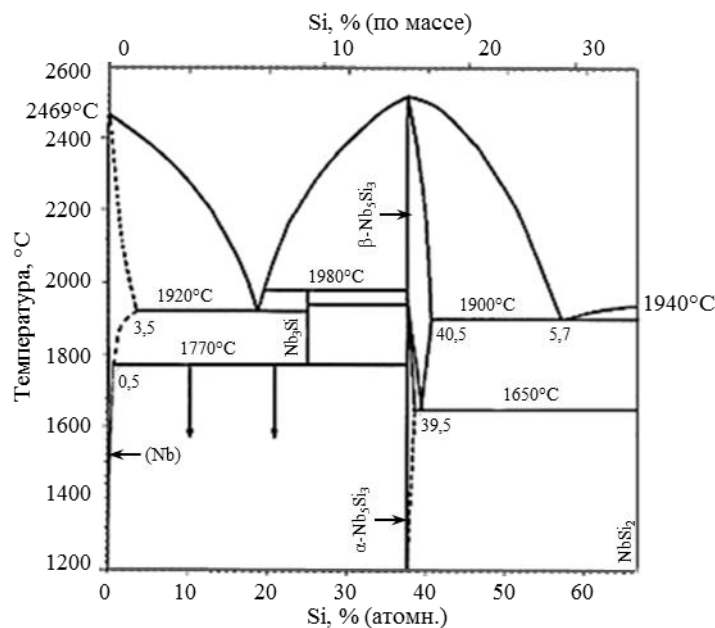


Рис.1. Диаграмма состояния системы Nb–Si

При температуре 1770°C силицид ниобия Nb_3Si распадается по эвтектоидной реакции



где $\beta\text{-Nb}_5\text{Si}_3$ – высокотемпературная модификация силицида.

При дальнейшем охлаждении $\beta\text{-Nb}_5\text{Si}_3$ силицид превращается в низкотемпературную α -модификацию:



Оба силицида α и β имеют тетрагональную сингонию, но различные параметры элементарных ячеек. Таким образом, равновесный фазовый состав композита в бинарной системе Nb–Si состоит из ОЦК твердого раствора $\text{Nb}_{\text{ТВ.Р}}$ и тетрагонального силицида $\alpha\text{-Nb}_5\text{Si}_3$.

Фазовый состав многокомпонентных *in situ* композитов в легированной системе Nb–Si формируется в результате указанных реакций (1)–(3), полнота протекания которых зависит от условий кристаллизации, химического состава композита и режимов термической обработки. С большой долей вероятности можно предположить, что фазовые составы реальных легированных композитов будут определяться в основном кинетикой твердофазной эвтектоидной реакции (2), которая в свою очередь контролируется диффузионными процессами в твердой фазе. Кроме того, некоторые легирующие

элементы стабилизируют ту или иную полиморфную модификацию силицидов. Например, углерод, титан и гафний стабилизируют $\gamma\text{-Nb}_5\text{Si}_3$ силицид с ГПУ-структурой. Следует также иметь в виду, что при реальных скоростях направленной кристаллизации в композитах возникает микроликвация легирующих элементов в масштабах отдельных ячеек, что также влияет на характер связи между фазами.

В соответствии с принципом структурного и размерного соотношения Данкова–Конобеевского в диффузионно-контролируемых твердофазных реакциях кристаллические структуры продуктов реакции ориентируются с таким соотношением, чтобы межфазная энергия была минимальной между продуктами превращения. Существует несколько прогнозных моделей, среди которых стыковая модель совпадения является наиболее простой и эффективной для предсказания ориентационных соотношений и плоскостей габитуса в гетерогенных сплавах, состоящих из фаз с различными кристаллическими структурами [1–3].

В теории и практике физического материаловедения никелевых и кобальтовых жаропрочных сплавов ориентационные соотношения и размерные несоответствия (мисфит) параметров элементарных ячеек фаз определяют стабильность микроструктуры при высоких напряжениях и температурах [4–8].

Аналогичные явления имеют место в естественных эвтектических композитах на основе легированной системы Nb–Si, состоящих из ниобиевой матрицы с ОЦК-решеткой и армирующей фазы в виде силицидов ниобия Nb_5Si_3 различных полиморфных модификаций. Многообразие вариантов сопряжения фаз различных структурных модификаций силицидов в композитах Nb–Si разных составов с равноосной и направленной структурами является причиной неоднозначных экспериментально определенных ориентационных соотношений [9–18].

Цель данной статьи состояла в исследовании поверхностей раздела между ниобиевой матрицей и $\gamma\text{-Nb}_5\text{Si}_3$ силицидами в композитах Nb–Si и обосновании с кристаллохимических позиций высокой структурной стабильности после высокотемпературной гомогенизации.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 9.4. «Композиты на основе Nb–Si с повышенной стойкостью к окислению и коррозии» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [19].

Материалы и методы

Эвтектические композиты получали в два этапа: вначале выплавляли прекурсор эвтектического состава Nb–Ti–Hf–Cr–Al–Si–W–Zr–Mo с равноосной структурой, а затем его переплавляли методом направленной кристаллизации в атмосфере аргона при температуре 1850°C с охлаждением в расплавленном олове. Определение локального элементного состава фазовых составляющих композита проводили с использованием стандартной методики микрорентгеноспектрального анализа (МРСА) на сканирующем электронном микроскопе Hitachi SU8010, оснащенной системой микроанализа Oxford Instruments NanoAnalysis, включающей энерго-дисперсионный рентгеновский детектор XMaxN80.

Фазовый состав определяли порошковым методом на дифрактометре ДРОН-4 с микропроцессорной системой автоматизации в $\text{Cu } K_\alpha$ -излучении. Интервал сканирования по 2θ составлял 23–130 градусов с шагом 0,05 градуса, с экспозицией 2 с. Образец помещали в плоскую, вертикально расположенную, вращающуюся кювету. Рентгенофазовый и рентгеноструктурный анализ проводили методом полнопрофильного анализа по Х.М. Ритвельду [4] с использованием программного обеспечения PDWin. В качестве исходных данных для уточнения использованы модели кристаллических структур, взятые из базы данных ICSD. Распределение атомов по позициям определялось с учетом данных МРСА по химическому составу.

Методом рентгеновской дифракции определено направление преимущественного роста ниобиевой матрицы и силицида ниобия. Для съемки использовали цилиндрический образец с полированной торцевой поверхностью. Для удаления деформированного слоя использовали электролитическое травление. Прямые полюсные фигуры (ППФ) также получали на дифрактометре ДРОН-4 в $\text{Cu } K_{\alpha}$ -излучении. Интервал сканирования по θ составлял 13 градусов с шагом 0,05 градуса. Съемку и построение ППФ проводили с помощью ПО Difwin.

Дифракционный анализ проводили на просвечивающем электронном микроскопе (ПЭМ) марки Jem 200 CX фирмы Jeol при ускоряющем напряжении 160 кВ. Применены методы математического моделирования, позволяющие строить совмещенные электронограммы от нескольких фаз и осуществлять наклон виртуальной модели.

Атомные модели кристаллической структуры силицида γ -модификации Nb_5Si_3 и Nb ОЦК-матрица построены с использованием ПО Crystal Impact Diamond. При построении моделей использованы данные бинарных изоструктурных соединений из базы ICSD PDF-2 и экспериментальные данные рентгеноструктурного анализа.

Результаты и обсуждение

Микроструктура композита в литом состоянии и после гомогенизации

На рис. 2 приведена типичная поперечная и продольная микроструктура исследованного композита Nb–Si в исходном состоянии и после высокотемпературного отжига. Видно, что металлографическими методами не обнаружены какие-либо морфологические или размерные изменения основной упрочняющей фазы $\gamma\text{-Nb}_5\text{Si}_3$ силицида после гомогенизации в течение 10 и 20 ч при температуре 1500°C в вакууме. Этот факт свидетельствует о высокой термической стабильности межфазных поверхностей раздела ниобиевой матрицы и силицида, образовавшимися в результате рассмотренных ранее твердофазных реакций.

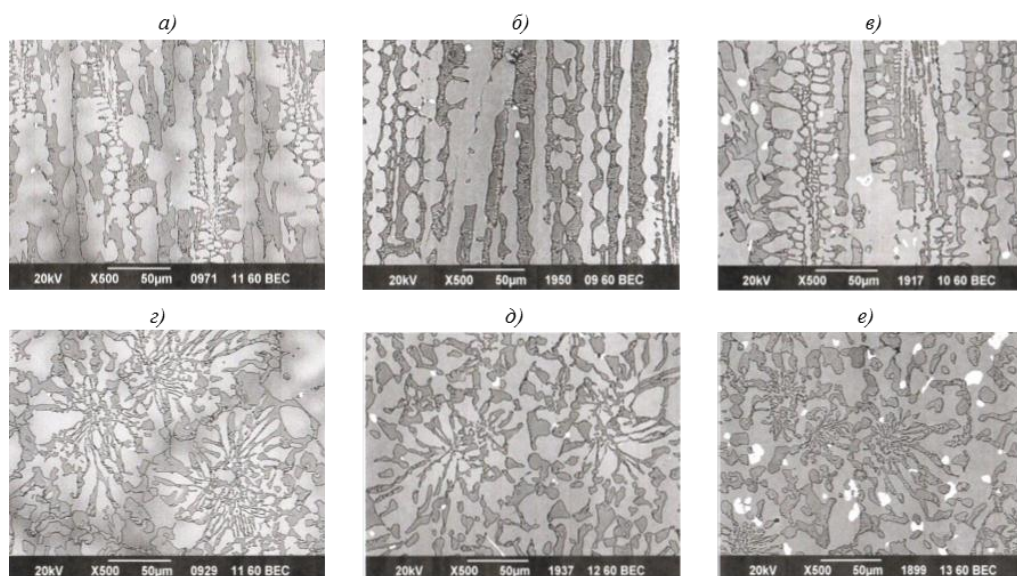


Рис. 2. Микроструктура композита на основе Nb–Si после направленной кристаллизации (а, з) и после гомогенизации при 1500°C в течение 10 (б, д) и 20 ч (в, е); а, б, в – поперечное сечение; з, д, е – продольное сечение

Для выяснения причин высокой термостабильности межфазных поверхностей раздела проведены следующие исследования:

- изучена микроликвация легирующих элементов;
- построены прямые полюсные фигуры фазовых составляющих композита – матрицы и силицида;

- определены ориентационные соотношения ниобиевой матрицы и силицида методом просвечивающей электронной микроскопии;
- проведен кристаллохимический анализ ориентационного и размерного соответствия кристаллических структур матрицы и силицида на поверхностях раздел.

Микроликвация легирующих элементов

Микрорентгеноспектральным анализом обнаружена микроликвация в пределах отдельных ячеек после направленной кристаллизации. Концентрация титана, алюминия и хрома в твердом растворе ниобия увеличивается от центра к периферии ячейки (от 17,2 до 30,0; от 3,7 до 5,5 и от 1,8 до 5,7% (атомн.) соответственно), концентрации молибдена, ниобия и вольфрама, напротив, уменьшаются (от 9,1 до 5,1; от 61,1 до 47,5 и от 3,7 до 1,3% (атомн.) соответственно), а концентрации циркония, гафния и кремния практически не изменяются.

Характер микроликвации «легкоплавких» (титан, алюминий, хром) и «тугоплавких» элементов (молибден, ниобий, вольфрам) подчиняется общей закономерности распределения легирующих элементов при ячеистой кристаллизации: если элемент понижает температуру плавления композита, то его концентрация увеличивается от центра ячейки к периферии, а в случае повышения температуры плавления, как это имеет место при легировании молибденом и вольфрамом, концентрация, напротив, понижается от центра к границам ячеек.

После гомогенизационного отжига при температуре 1500°C в течение 20 ч концентрации легирующих элементов (кроме гафния) практически полностью выровнялись.

Таким образом, гомогенизация композиционного материала при температуре 1500°C в течение 20 ч, не оказывает видимого влияния на изменение морфологии и направленность структуры композита, а лишь приводит к выравниванию концентраций легирующих элементов и выделению дисперсных частиц оксидов гафния.

Прямые полюсные фигуры

фазовых составляющих композита – матрицы и силицидов

Направление преимущественного роста ниобиевой матрицы и силицида ниобия при направленной кристаллизации в композите на основе системы Nb–Si определяли методом рентгеновской дифракции. Получены прямые полюсные фигуры, из которых следует, что аксиальное отклонение ориентации армирующей фазы Nb₅Si₃ от направления <0001> составляет 5–7 градусов, аксиальное отклонение ориентации матрицы Nb_{тв.р} от направления <111> составляет 2 градуса (рис. 3).

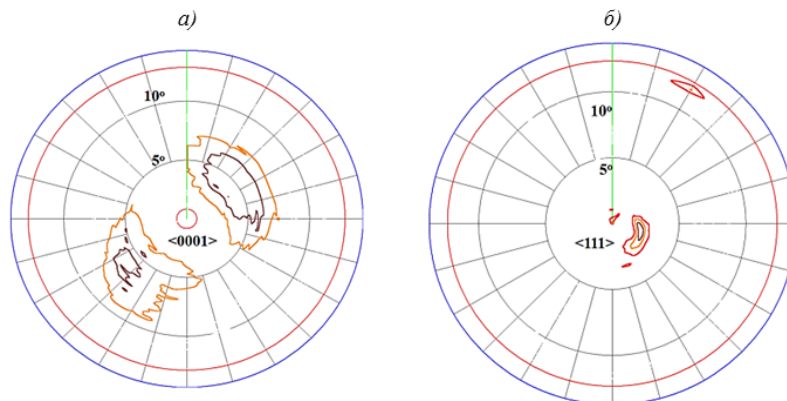


Рис. 3. Прямые полюсные фигуры (ППФ) для основных фаз композита в плоскости, перпендикулярной направлению кристаллизации:

a – ППФ армирующей фазы Nb₅Si₃ от направления <0001>; *б* – ППФ матрицы Nb_{тв.р} от направления <111>

Силицид имеет более высокую температуру кристаллизации и поэтому является ведущей фазой; силицид растет в направлении нормали к базисной плоскости $\langle 0001 \rangle$. Ниобиевая ОЦК-матрица следует нормали к плоскости в соответствии с ориентационным соотношением (ОС) в направлении плотной упаковки $\langle 111 \rangle$. Таким образом, рост композита происходит в направлении типа $\langle 111 \rangle_{\text{Nb}} \parallel \langle 0001 \rangle_{\gamma}$, что совпадает с результатами, приведенными в работе [20].

*Кристаллохимический анализ ориентационного
и размерного соответствия кристаллических структур
матрицы и силицида на поверхностях раздела*

Ранее отмечалось, что в соответствии с принципом структурного и размерного соотношения Данкова–Конобеевского в диффузионно-контролируемых твердофазных реакциях кристаллические структуры продуктов реакции ориентируются относительно друг друга таким образом, чтобы межфазная энергия была минимальной. В свою очередь этот принцип соблюдается при выполнении следующих трех условий.

Во-первых, между матричной фазой и продуктом реакции должна возникнуть когерентная или полукogerентная связь с минимальной поверхностной энергией.

Во-вторых, конфигурация атомов на сопрягаемых плоскостях обеих фаз должна быть подобной для максимального совпадения атомных рядов, что соответствует минимальной упругой энергии деформации.

В третьих, необходима одинаковая или близкая заполненность атомами сопрягаемых плоскостей обеих фаз.

Указанные структурные факторы выполняются только при наличии определенного ориентационного соотношения между продуктами превращения матричной фазы.

Ориентационное соотношение (ОС) определяли дифракционными методами с применением математического моделирования. Использована разработанная авторами данной статьи программа Electronogramm, которая позволяет рассчитывать дифракционные картины от многофазных структур с учетом их ОС, а также работать с моделью в режиме on line, сокращая время обработки экспериментальных данных. Программа автоматически рассчитывает все возможные варианты ОС, а также позволяет определять разориентировку кристаллитов относительно друг друга с точностью до 0,01 градуса. С использованием этой программы найдено ОС между ниобиевой матрицей и силицидом $\gamma\text{-Nb}_5\text{Si}_3$ в исследуемом эвтектическом композите Nb–Si:

$$\begin{aligned} &\langle 111 \rangle_{\text{Nb}_{\text{ТВ.р}}} \parallel \langle 0001 \rangle_{\gamma\text{-Nb}_5\text{Si}_3}, \\ &\{110\}_{\text{Nb}_{\text{ТВ.р}}} \parallel \{10\bar{1}0\}_{\gamma\text{-Nb}_5\text{Si}_3}. \end{aligned}$$

Аналогичное ориентационное соотношение было найдено между $\text{Nb}_{\text{ТВ.р}}$ и $\gamma\text{-Nb}_5\text{Si}_3$ в композите состава Nb–22Ti–16Si–6Cr–4Hf–3Al с направленной структурой [20].

Рассмотрим реализацию принципов структурного и размерного соотношения Данкова–Конобеевского в исследованном композите с учетом найденного ОС. Для этого вначале следует построить атомную модель элементарной ячейки силицида ниобия $\gamma\text{-Nb}_5\text{Si}_3$ гексагональной сингонии. Атомная модель ОЦК-решетки ниобиевой матрицы хорошо известна. Структура гексагонального силицида представляет собой двухслойную упаковку атомных плоскостей, которую можно представить как чередование чисто ниобиевого и смешанного Nb+Si слоев в направлении роста $\langle 0001 \rangle$ (рис. 4).

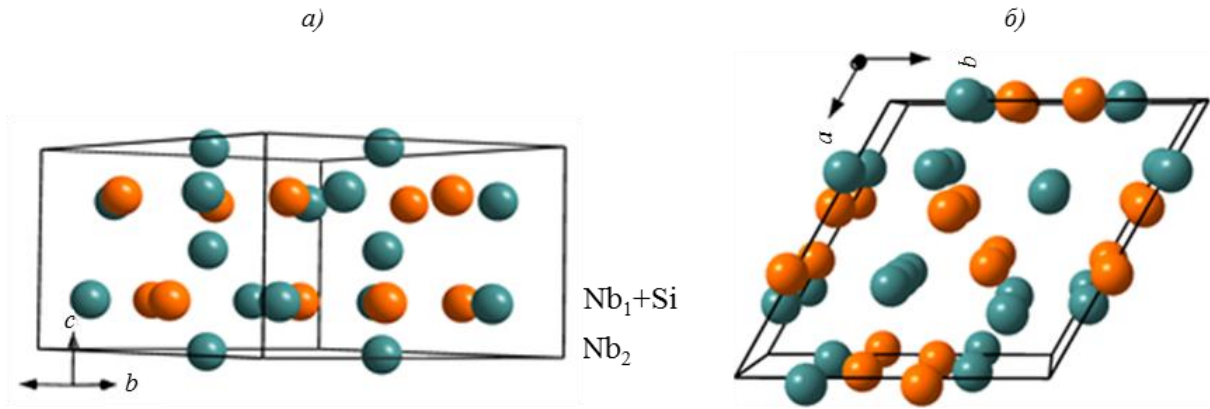


Рис. 4. Атомная структура элементарной ячейки силицида $\gamma\text{-Nb}_5\text{Si}_3$:
 a – плоскость $\{10\bar{2}0\}$; b – плоскость $\{0001\}$

Теперь используем результаты компьютерного моделирования атомной структуры сопрягаемых плоскостей, перпендикулярных направлению роста композита. Для сравнения атомные конфигурации базисной плоскости $\{0001\}$ силицида и октаэдрической плоскости $\{111\}$ ниобиевой матрицы представлены на рис. 5. Конфигурации атомов в рассматриваемых плоскостях подобны, так как имеют ось симметрии третьего – для Nb и шестого – для $\gamma\text{-Nb}_5\text{Si}_3$ порядков, а расстояния между атомами ниобия в этих плоскостях весьма близки: 0,462 нм – для Nb и 0,435 нм – для $\gamma\text{-Nb}_5\text{Si}_3$. Таким образом, на сопрягаемых плоскостях при найденном ориентационном соотношении $\langle 111 \rangle_{\text{Nb}_{\text{ТВ},\text{P}}} \parallel \langle 0001 \rangle_{\gamma\text{-Nb}_5\text{Si}_3}$ имеет место одинаковая конфигурация атомов Nb и довольно близкое расстояние между ними. Поэтому при сопряжении этих плоскостей возникает близкое совпадение атомов ниобия и поверхность раздела имеет низкую межфазную энергию и когерентную или полукogerентную связь.

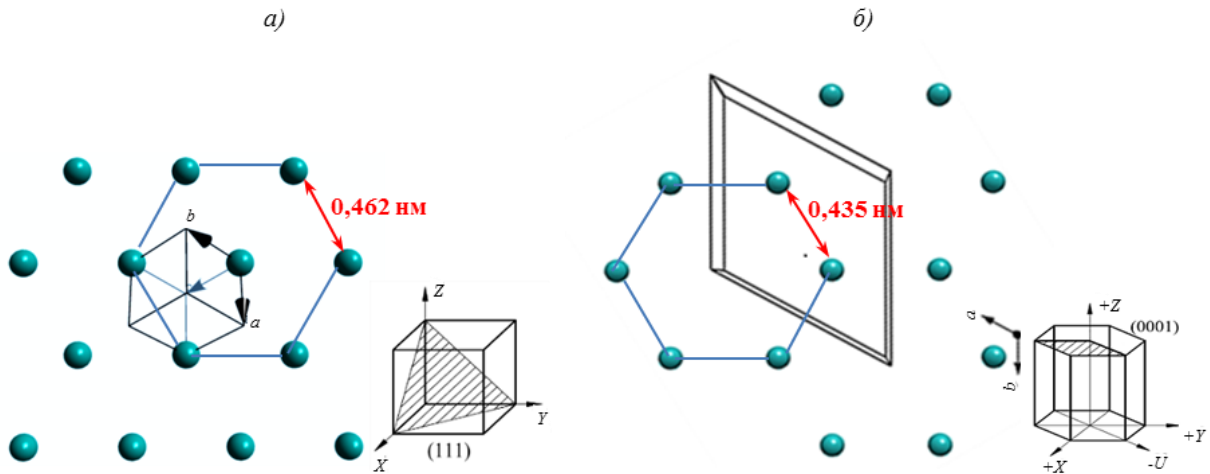


Рис. 5. Атомная структура сопрягаемых плоскостей, перпендикулярных оси роста композита:
 a – ниобиевая матрица (111); b – силицид $\gamma\text{-Nb}_5\text{Si}_3$ (0001)

Результат моделирования атомной структуры сопрягаемых плоскостей, параллельных направлению роста композита, представлен на рис. 6. В соответствии

с найденным ОС плоскостями припасовки являются $\{110\}_{\text{Nb}_{\text{ТВ.р}}}\parallel\{10\bar{1}0\}_{\gamma\text{-Nb}_5\text{Si}_3}$. Рассчитано, что минимальные расстояния между атомами ниобия в плоскости $(110)_{\text{Nb}}$ равны 0,283 нм вдоль оси зоны $\langle 111 \rangle_{\text{Nb}}$, а в плоскости $(10\bar{1}0)_{\gamma\text{-Nb}_5\text{Si}_3}$ расстояние между ними вдоль оси зоны $\langle 0001 \rangle$ равно 0,262 нм. В данном случае, при сопряжении этих двух плоскостей образуется более сложная структура межфазной поверхности: совпадение ниобиевых атомов вдоль направления $[111]$ на плоскости (110) ниобия будет происходить с каждым из трех атомных рядов ниобия на плоскостях $(10\bar{1}0)$ вдоль направления $[0001]$. Между ними расположены два ряда плоскостей, содержащих атомы ниобия и кремния. В этом варианте межфазная энергия, по-видимому, будет больше, чем в рассмотренном ранее случае.

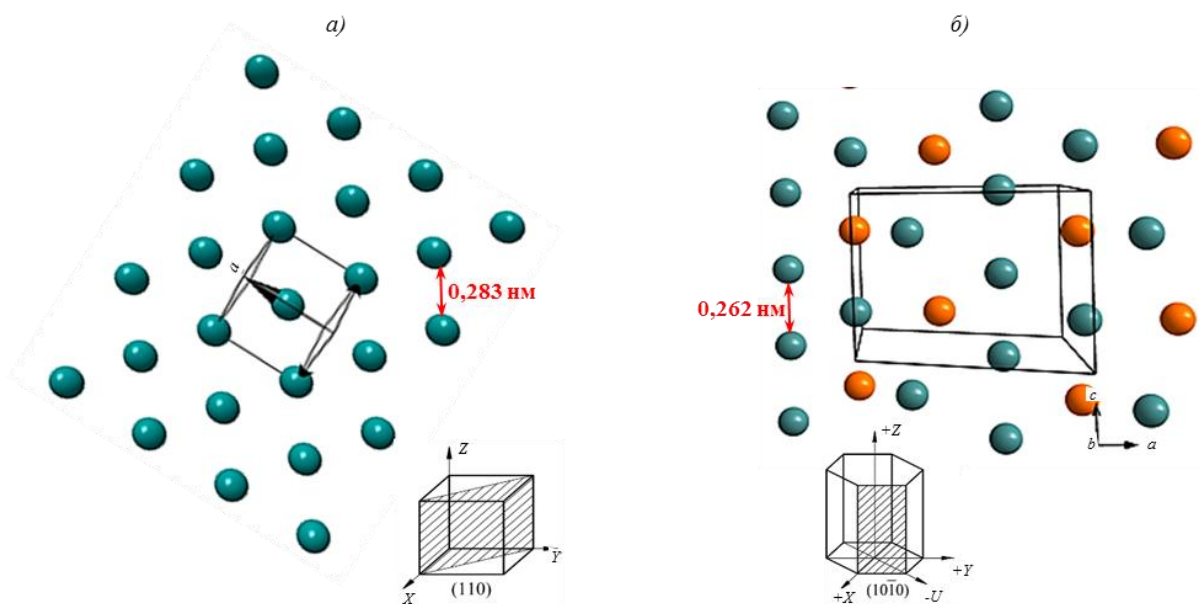


Рис. 6. Атомная структура сопрягаемых плоскостей, параллельных направлению композита:
 a – в плоскости (110) матрицы Nb; b – в плоскости $(10\bar{1}0)$ силицида $\gamma\text{-Nb}_5\text{Si}_3$

Выводы

1. Гомогенизация *in situ* композита Nb–Si при температуре 1500°C продолжительностью 20 ч в вакууме не оказала влияния на изменение морфологии и размеров силицидов $\gamma\text{-Nb}_5\text{Si}_3$, а лишь привела к выравниванию микроликвационной неоднородности легирующих элементов и выделению дисперсных частиц HfO_2 .

2. Методами просвечивающей электронной микроскопии определены ориентационные соотношения между силицидом $\gamma\text{-Nb}_5\text{Si}_3$ и ниобиевой матрицей:

$$\langle 111 \rangle_{\text{Nb}_{\text{ТВ.р}}}\parallel\langle 0001 \rangle_{\gamma\text{-Nb}_5\text{Si}_3} \text{ и } \{110\}_{\text{Nb}_{\text{ТВ.р}}}\parallel\{10\bar{1}0\}_{\gamma\text{-Nb}_5\text{Si}_3}.$$

3. С учетом найденного ориентационного соотношения проведено компьютерное моделирование атомной конфигурации сопрягаемых плоскостей на поверхностях раздела.

4. На основании кристаллохимического анализа ориентационного и размерного соответствия кристаллических структур матрицы и силицида на поверхностях раздела обоснована высокая термическая стабильность Nb–Si композита.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhang M.-X., Kelly P.M. Edge-to-edge matching model for predicting orientation relationship and habit planes – the improvements // *Scripta Materialia*. 2005. Vol. 52. P. 965–968.
2. Zhang M.-X., Kelly P.M. Edge-to-edge matching and its application. Part I. Application to the simple HCP/BCC system // *Acta Materialia*. 2009. Vol. 53. P. 1073–1084.
3. Zhang M.-X., Kelly P.M. Edge-to-edge matching and its application. Part II. Application to Mg–Al, Mg–Y and Mg–Mn alloys // *Acta Materialia*. 2009. Vol. 53. P. 1085–1096.
4. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Ефимочкин И.Ю. Высокотемпературные Nb–Si-композиты // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение*, 2011. №SP2. С. 164–173.
5. Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Карпов М.И., Нейман А.В., Мин П.Г., Карачевцев Ф.Н. Высокотемпературные композиты на основе системы Nb–Si, армированные силицидами ниобия // *Материаловедение*. 2017. №2. С. 24–32.
6. Оспенникова О.Г., Рассохина Л.И., Битюцкая О.Н., Гамазина М.В. Отработка технологии получения отливок лопаток ГТД методом направленной кристаллизации из сплавов на основе Nb–Si композита // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2017. №4. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.03.2018) DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-4-1-1.
7. Лощинин Ю.В., Дмитриева В.В., Пахомкин С.И., Размахов М.Г. Теплофизические свойства компактированных композитов системы Nb–Si в диапазоне температур от 20 до 1400°C // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №2. С. 41–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-41-49.
8. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б. Развитие технологии направленной кристаллизации литейных высокожаропрочных сплавов с переменным управляемым температурным градиентом // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. №S. С. 24–38. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-24-38.
9. Светлов И.Л., Кузьмина Н.Ф., Нейман А.В. Микроструктура никелевых и Ni/Ni₃Al–NbC Nb–Nb₅Si₃ эвтектических композитов // *Материаловедение*. 2015. №3. С. 50–56.
10. Кузьмина Н.А., Еремин Н.Н., Марченко Е.И., Светлов И.Л., Муромцев Н.А., Нейман А.В., Якушев Д.А. Пути диффузии примесей внедрения в силициде ниобия Nb₅Si₃ различных полиморфных модификаций // *Кристаллография*. 2018. №3. С. 358–365.
11. Каблов Е.Н., Кузьмина Н.А., Еремин Н.Н., Светлов И.Л., Нейман А.В. Атомные модели структуры силицидов ниобия в in-situ композитах Nb–Si // *Журнал структурной химии*. 2017. №3. С. 27–37.
12. Марченко Е.И., Кузьмина Н.А., Еремин Н.Н. Локализация позиций примесей углерода в кристаллических структурах полиморфных модификаций Nb₅Si₃ по данным атомистического компьютерного моделирования // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн.* 2017. №3 (51). Ст. 04. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.03.2018) DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-3-4-4.
13. Guo J.T., Tian Y.X., Gheng G.M. et al. Microstructural characteristics in and high temperature compressive properties at 1623 K of a directionally solidified Nb-silicide based in situ composites // *Journal of Alloys and Compound*. 2009. Vol. 470. P. 606–609.
14. Sekido N., Wei F.G., Kimura Y. et al. Orientation relationship between Nb and Nb₅Si₃ (D8₁) phases in the eutectoid lamellar microstructure // *Philosophical Magazine Letters*. 2006. Vol. 86. No. 2. P. 89–98.
15. Cheng G.M., Tian Y.X., He L.L. Orientation relationship and interfacial structure between Nb solid solution precipitates and α-Nb₅Si₃ intermetallics // *Journal of Materials Research*. 2009. Vol. 24. No. 1. P. 192–197.
16. Cheng G., Tian Y., He L., Guo J. Orientation relationship and interfacial structure between α-Nb₅Si₃ and Nb solid solution in eutectic lamellar structure // *Philosophical Magazine*. 2009. Vol. 89. No. 31. P. 2801–2812.

17. Li Y.L., Ma C.L., Zhang H. Crystallographic orientation evolution in Nb_{ss}-Nb₅Si₃ eutectic alloys by EBSD analyses // ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition. 2013. Vol. 5A: Industrial and Cogeneration and Manufacturing Materials and Metallurgy. DOI: 10.1115/GT2013-95309.
18. Tian Y.X., Guo J.T., Gheng G.M. et al. Effect of growth rate on microstructure and mechanical properties in a directionally solidified Nb–Silicide base alloy // Materials and Design. 2009. Vol. 30. P. 2274–2277.
19. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
20. Xiao Ma, Xiping Guo, Maosen Fu, Haisheng Guo. Crystallographic characteristics of an integrally in a directionally solidified Nb–Ti–Si based in-situ composite // Scripta Materialia. 2017. Vol. 139. P. 108–113.