## СТРУКТУРА, ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И ДИФФУЗИЯ

УДК 669.293'782:539.25

# СТРУКТУРА МЕЖФАЗНЫХ ГРАНИЦ Nb- $\gamma$ -Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> В ЭВТЕКТИЧЕСКИХ *in-situ* КОМПОЗИТАХ Nb-Si

© 2020 г. И. Л. Светлов<sup>а</sup>, Д. В. Зайцев<sup>а</sup>, Н. А. Кузьмина<sup>а, \*</sup>, А. В. Заводов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> ФГУП "Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов" ГНЦ РФ, ул. Радио, 17, Москва, 105005 Россия

> \*e-mail: holinataly@yandex.ru Поступила в редакцию 06.03.2019 г. После доработки 27.08.2019 г. Принята к публикации 17.09.2019 г.

В эвтектическом композите Nb–Si определено ориентационное соотношение между ниобиевой матрицей и силицидами  $\gamma$ Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> – [111]<sub>Nb</sub>//[0001]<sub> $\gamma$ </sub> и (110)<sub>Nb</sub>//(1010)<sub> $\gamma$ </sub>. В рамках стыковой модели совпадения проведена оценка размерного несоответствия межатомных и межплоскостных расстояний сопрягаемых фаз. Методом просвечивающей электронной микроскопии прямого разрешения изучено строение границ раздела между ОЦК-решеткой ниобиевой матрицы и ГПУ-решеткой силицида  $\gamma$ Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>. На сопрягаемых границах раздела обнаружены краевые дислокации несоответствия, свидетельствующие о полукогерентном характере связи между фазами. Анализируется ступенчатое строение межфазной поверхности раздела.

*Ключевые слова:* эвтектические композиты Nb–Si, межфазные границы раздела, дислокации несоответствия, ориентационные соотношения

DOI: 10.31857/S0015323020020175

#### введение

Подавляющее большинство современных конструкционных материалов является гетерогенными системами с разветвленной сетью межфазных границ. Длительные механические свойства таких материалов во многом зависят от строения и удельной энергии границ раздела фаз. В жаропрочных сплавах особенно важным фактором является термостабильность межфазных поверхностей. Эвтектические композиты Nb-Si рассматривают в качестве альтернативы никелевым жаропрочным сплавам при производстве монокристаллических лопаток газотурбинных двигателей. Дефекты на границах раздела фаз в таких композитах вызывают повышенную диффузионную проницаемость и, как следствие, преждевременную деградацию жаропрочных свойств.

При изучении атомной структуры межфазных поверхностей раздела используются различные методы моделирования. В настоящее время известно несколько моделей строения границ при сопряжении фаз с различными типами кристаллических решеток ГЦК–ГПУ, ОЦК–ГПУ, ГЦК– ГЦК [1–4]. Среди прогнозных моделей стыковая модель совпадения (Edge-to edge matching model) является наиболее простой и эффективной для предсказания ориентационных соотношений в гетерогенных сплавах с различными кристаллическими структурами фаз. Модель предсказывает возможную зигзагообразную структуру границы раздела между сопрягающимися фазами.

Методом молекулярной динамики с использованием потенциала Морзе исследована атомная структура межфазных границ в сплаве Ni–Al с ориентацией [100] и механизм диффузии вдоль границы в условиях твердофазного контакта. Показано, что на границах раздела формируется квадратная сетка краевых дислокаций несоответствия, вдоль которых преимущественно происходит миграция атомов [5, 6].

Экспериментальная проверка предложенных моделей осуществляется главным образом исследованиями структуры с помощью просвечивающих электронных микроскопов. В работе [7] изучена структура поверхностей раздела в эвтектических микрокомпозитах системы Me–X, где Me – тугоплавкие металлы Mo, Nb, Ta, Zr, a X – нитевидные кристаллы карбидов соответствующих металлов. Показано, что между матрицей с ОЦКрешеткой и нитевидными кристаллами карбидов со структурой ГПУ образуются полукогерентные поверхности раздела, содержащие сетки дислокаций несоответствия.

Аналогичные результаты были получены авторами [8] на жаропрочном эвтектическом сплаве со структурой ү/ү'-NbC, где ү/ү' ГЦК-никелевый твердый раствор, упрочненный интерметаллидными частицами γ'-фазы Ni<sub>3</sub>Al, а NbC – нитевидные кристаллы монокарбила ниобия с ГШК-решеткой. Установлено ориентационное соотношение (ОС) нитевидных кристаллов с матрицей (001)NbC || (001)ү/ү и [100] NbC || [100]ү/ү. На поверхностях раздела матрица-нитевидные кристаллы обнаружены межфазные краевые дислокации с вектором Бюргерса  $\mathbf{b} = a/2[110]$  на расстоянии друг от друга 20-30 нм. Межфазные границы с подобными дислокациями структурно близки к специальным границам, для которых характерно пониженное значение энергии по сравнению с энергией произвольной границы [9].

В последнее время плодотворными являются исследования высокоразрешающими методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). R статье [10] определено **OC** (002)α || (002)Nb [310]α || [110]Nb и структура интерфейса между тетрагональной модификацией силицида ниобия α-Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> и ОЦК-Nb-матрицей в эвтектическом композите Nb-22Ti-3Ta-2Hf-7Cr-3Al-16Si ат. % с равноосной структурой. Установлено, что межфазная поверхность является полукогерентной с хорошим совпадением атомов и наличием периодического ряда дислокаций несоответствия в направлении [110]<sub>Nb</sub> с вектором Бюргерса  $\mathbf{b} = 1/2[110]$ . На интерфейсе атомы ниобиевой матрицы связаны с ниобиевым слоем элементарной ячейкой α-Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> силицида с тетрагональной структурой.

В статье [11] методом ПЭМ высокого разрешения исследована поверхность раздела между частицами ниобиевого твердого раствора, которые при охлаждении выделились в объеме интерметаллидных пластин тетрагональной модификации силицида –  $\alpha$ -Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>. Показано, что поверхность раздела имеет структурные ступеньки, которые также компенсируют несоответствие периодов кристаллических решеток, как и дислокации несоответствия. Таким образом, граница раздела не является гладкой, а имеет зигзагообразную форму.

Задача настоящей статьи заключалась в исследовании дислокационной структуры поверхностей раздела между ниобиевой матрицей с ОЦКструктурой и гексагональной модификацией силицида ниобия —  $\gamma$ -Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> в эвтектическом композите с направленной структурой системы Nb–Si.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Композиты системы Nb-Si-Ti-Hf-Al-Cr-Мо-W-Zr получали в два этапа: вначале выплавляли сплав, близкий к эвтектическому составу с равноосной структурой (прекурсор), а затем получали собственно композиты методом направленной кристаллизации прекурсоров. Для выравнивания микроликвационной неоднородности слитки гомогенизировали в вакууме при температуре 1500°С в течение 20 ч [12].

Вырезку образцов для растровой (РЭМ) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) проводили в плоскостях, перпендикулярных и параллельных оси кристаллизации. Пробоподготовку для РЭМ осуществляли шлифованием и химическим травлением в реактиве состава: 100 мл H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + 200 мл HNO<sub>3</sub> + 100 мл HF + 100 мл + + Н<sub>2</sub>О. Нарезанные диски для ПЭМ сначала утоняли на наждачной бумаге SiC до 50 мкм, а далее на установке для шлифования полусферических лунок до 10 мкм, и завершали обработку в среде аргона на установке ионного травления PIPS II фирмы Gatan. Анализ электронограмм проводили на микроскопе JEM 200 CX фирмы Jeol с диапазоном углов наклона гониометра от  $60^{\circ}$  до  $-60^{\circ}$ . Анализ дифракционных картин и вычисление ОС выполняли с применением методов математического моделирования [12]. Снимки прямого разрешения были получены на микроскопе Tecnai G2 F20 S-TWIN фирмы FEI при рабочем ускоряющем напряжении 200 кВ.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Определение ОС между фазовыми составляющими. Рентгенодифракционными методами установлено, что исследуемый композит после гомогенизации состоит из ОЦК-ниобиевой матрицы и силицидов  $\gamma$ -Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> с ГПУ-решеткой [13]. Методами РЭМ и ПЭМ обнаружено два типа  $\gamma$ -Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> силицидов различной морфологии и размеров. Первые — крупные силициды, образовавшиеся в процессе направленной кристаллизации по эвтектоидной реакции. На рис. 1а приведена ячеистая микроструктура в поперечном сечении образца. Между матрицей и первичными  $\gamma$ -Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> силицидами имеется следующее ОС:

$$[111]_{\rm Nb} //[0001]_{\gamma}$$
 и  $(110)_{\rm Nb} //(10\overline{1}0)_{\gamma}$ . (1)

Вторичные силициды – дисперсные частицы размером 10-100 нм, которые выделились из твердого раствора при охлаждении ниже температуры гомогенизации  $1500^{\circ}$ С (рис. 16). Следует обратить внимание на дислокационные петли вблизи дисперсных частиц. Причиной образования дислокационных петель является разница объемов элементарных ячеек матрицы и силицидов. Поскольку объем элементарной ячейки твердого раствора ниобия равен 0.0347 нм<sup>3</sup>, а объем элементарной ячейки  $\gamma$ -Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> силицида равен 0.262 нм<sup>3</sup>, то при выделении последних возникает



**Рис. 1.** (а) Ячеистая микроструктура эвтектического композита; ячейки состоят из ОЦК ниобиевой матрицы и первичных силицидов γ-Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>. (б) Морфология и размер частиц вторичных γ-Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> силицидов. Дислокационные петли вокруг частиц вторичных силицидов.

напряженное состояние: область твердого раствора вблизи частиц всесторонне растянута, а частицы силицида находятся в состоянии трехосного сжатия. При температуре гомогенизации и последующем охлаждения происходит релаксация внутренних напряжений путем образования и движения дислокационных петель.

Расшифровка электронограмм показала, что кристаллическая структура дисперсных частиц силицидов ориентирована относительно структуры матрицы двояким образом. В первом случае ОС было таким как (1), а во втором отличалось от (1) индексами плоскостей:

$$[111]_{\rm Nb} //[0001]_{\gamma} \,\mu \,\,(111)_{\rm Nb} //(0001)_{\gamma}.$$
(2)

Оба типа силицидов образовались в результате диффузионно-контролируемых твердофазных реакций. Хорошо известно, что кристаллические структуры продуктов твердофазных реакций ориентируются относительно друг друга таким образом, чтобы энергия межфазных границ была минимальной. В свою очередь, энергия межфазных границ определяется атомной структурой сопрягаемых поверхностей и зависит в первую очередь от OC.

Поскольку в статье исследуется дислокационная структура межфазных поверхностей между ниобиевой матрицей и вторичными  $\gamma$ -Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> силицидами, то в дальнейшем будем пользоваться OC (1).

Оценка размерного несоответствия межатомных и межплоскостных расстояний сопрягаемых фазовых составляющих. В используемой стыковой модели сопряжения направления совпадения атомов и плоскостей сопряжения двух фаз определяются ОС. Важным условием сопряжения кристаллов с образованием когерентной или полукогерентной границы раздела является параллельность плотноупакованных плоскостей и направлений на межфазных поверхностях, а также выполнение условий для двух предельных параметров. Возможность образования того или иного типа межфазных границ зависит от численных значений этих параметров.

Для максимально возможного совпадения атомов в рядах необходимо, чтобы размерное несоответствие (мисфит)  $\delta_i$  межатомных расстояний в направлении совпадений не превышало предельного значения ~10%:

$$\delta_i = \frac{2(a_i - b_i)}{a_i + b_i} < 10\%, \tag{3}$$

где  $a_i$  и  $b_i$  — межатомные расстояния в направлениях *i* в структурах обеих фаз.

Второй параметр — несоответствие расстояний между плотноупакованными плоскостями  $\Delta$  должен удовлетворять неравенству

$$\Delta = \frac{2(d_1 - d_2)}{d_1 + d_2} < 6\%, \tag{4}$$

где  $d_1$  и  $d_2$  – расстояния между плотноупакованными сопрягаемыми плоскостями в структурах обеих фаз.

Дополнительное условие состоит в том, чтобы сопрягаемые плоскости содержали направления совпадения в обеих фазах.

Оценим эти параметры для исследуемого композита с OC  $[111]_{Nb}/[0001]_{\gamma}$  и  $(110)_{Nb}//(10\overline{1}0)_{\gamma}$ между ниобиевой матрицей и вторичными силицидами  $\gamma$ -Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>.

На рис. 2 приведено изображение межфазной границы, полученное методом ПЭМ высокого разрешения. Из рисунка следует, что плоскости (011) твердого раствора переходят в плоскости  $\gamma(0110)$  силицида, при этом на одно межплоскостное расстояние (0110) приходится 3 межплоскостных расстояния (011).



**Рис. 2.** Межфазная граница между ниобиевой матрицей и вторичным γ-Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> силицидом.

Используя параметры элементарных ячеек  $a_{\rm Nb} = 0.315$  нм и  $a_{\gamma} = 0.759$  нм, по стандартным формулам кристаллографии находим межплос-костные расстояния сопрягающихся плоскостей:

$$3d(011)_{\rm Nb} = 0.668$$
 нм и  $d(0110)_{\rm V} = 0.657$  нм.

Тогда несовпадение межплоскостных расстояний (мисфит) при стыковке ниобиевой матрицы и γ Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> на межфазной границе равно

$$\Delta = 2 \frac{3d(0\,\overline{1}\,1)_{\rm Nb} - d(01\,\overline{1}\,0)_{\gamma}}{3d(0\,\overline{1}\,1)_{\rm Nb} + d(01\,\overline{1}\,0)_{\gamma}} \times 100\% = 1.6\%.$$
(5)

Для расчета размерного несоответствия межатомных расстояний  $\delta_i$  необходимо знать атомную структуру плоскостей сопряжения. На рис. 3 приведены рассчитанные модели атомной структуры плоскостей сопряжения (110)<sub>Nb</sub> и (1010)<sub>γ</sub> силицида.

Из сравнения сопрягающихся сеток видно, что атомы ниобия в обеих фазах располагаются рядами вдоль направлений  $[111]_{Nb}//[0001]_{\gamma}$  и  $[100]_{Nb}//[1120]_{\gamma}$ . Вторые направления пересекаются с первыми под углами 54.7° в ниобиевой фазе и 55.2° в силициде. Используя данные табл. 1, рассчитаем по формуле (3) несоответствия  $\delta$  меж-



**Рис. 3.** Рассчитанные модели атомной структуры плоскостей сопряжения (110) ниобиевой матрицы и  $(10\overline{1}0)$  силицида  $\gamma$ -Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>.

атомных расстояний Nb–Nb в направлениях совпадения:

$$\delta_{1} = 2 \frac{2a[111]_{\text{Nb}} - b[0001]_{\gamma}}{2a[111]_{\text{Nb}} + b[0001]_{\gamma}}$$
(6)

И

$$\delta_2 = 2 \frac{a[100]_{\rm Nb} - b[1120]_{\gamma}}{a[100]_{\rm Nb} + b[1120]_{\gamma}}.$$
(7)

Поскольку во втором случае  $\delta > 10\%$ , то этот вариант в дальнейшем не рассматривается.

Таблица 1. Несоответствие б межатомных расстояний Nb-Nb в направлениях совпадения

Направления совпадения	Межатомное расстояние Nb–Nb в матрице, нм	Межатомное расстояние Nb–Nb в силициде, нм	Мисфит δ, %
[111] <sub>Nb</sub> //[0001] <sub>γ</sub>	0.2826	0.5228	3.91
$[001]_{\rm Nb}//[1120]_{\gamma}$	0.3263	0.4680	17.2



**Рис. 4.** Дислокации несоответствия на поверхности раздела между ниобиевой матрицей и  $\gamma$ -Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> силицидом: а) прямое разрешение (в правом верхнем углу отмечены области Фурье фильтрации); б) после прямого и обратного Фурье преобразования с фильтрацией по плоскостям (01)<sub>Nb</sub>.

Таким образом, несовпадение расстояний между плотноупакованными плоскостями сопряжения (110)Nb и (1010) равно  $\Delta = 1.6\%$ , а несоответствие межатомных расстояний в направлениях совпадения [111]<sub>Nb</sub> и [0001]<sub>γ</sub> равно  $\delta_1 = 3.91\%$ . Оба параметра меньше предельных значений (3)–(4) и поэтому удовлетворяют условию образования полукогерентной межфазной границы Nb–γ-Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> силицид в рамках стыковой модели совпадения.

Экспериментальные исследования структуры межфазных границ. Методы высокоразрешающей электронной микроскопии позволили исследовать атомную структуру межфазных границ. На рис. 4а приведено изображение межфазной границы ниобиевая матрица-частица силицида  $\gamma$ -Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>, а на рис. 46 приведен тот же участок после Фурье-фильтрации. На рис. 4б наибольшая интенсивность (светлые полосы) соответствует элементам исходного изображения, удовлетворяющим частотному фильтру в заданном направлении, т.е. плоскостям  $(0\overline{1}1)_{Nb}$  и близким к ним по ориентировке и периоду плоскостям  $1/3(01\overline{1}0)_{\nu}$ . Фильтр имеет незначительный диапазон по частоте и направлениям. Картина Фурье с отмеченными областями фильтрации представлена на рис. 4а. Благодаря такой фильтрации, на межфазной границе хорошо виден ряд краевых дислокаций несоответствия, компенсирующих мисфит межплоскостных расстояний. При этом лишняя муаровая полоса, отражающая реальную полуплоскость в кристаллической решетке, направлена в сторону силицида γ-Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>. Расстояние между дислокациями несоответствия колеблется в пределах 3-5 нм.

На рис. 5 приведен снимок ступенчатой межфазной границы, содержащей периодический ряд межфазных дислокаций несоответствия на плоских участках. Структура такой границы напоминает террасу, состоящую из плоских участков и ступенек.

Таким образом, экспериментально наблюдаемые дислокации несоответствия и структурные ступеньки позволяют сделать вывод о полукогерентном характере связи на межфазной границе между ниобиевой матрицей и  $\gamma Nb_5 Si_3$  силицидами: на небольших участках границ сопряжения  $\Delta$  мисфит компенсируется дислокациями несоответствия и структурными ступеньками, а на остальных участках межфазных границ обеспечивается когерентная связь.

Следует обратить внимание на решеточные дислокации другого знака, расположенные вблизи межфазной границы (рис. 46). Для этих дислокаций лишняя муаровая полоса расположена в решетке ниобия, т.е. ориентирована противоположно направлению рассмотренному выше. Расстояние между решеточными дислокациями примерно в 3–2.5 раза больше расстояния между дислокациями несоответствия в межфазной границе. Механизм образования решеточных дислокаций обсуждался при рассмотрении рис. 16.

На рис. 6 показана схема образования дислокации несоответствия на межфазной поверхности Nb матрица/γ-Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> силицид.



Рис. 5. Ступенчатая структура межфазной поверхности раздела с дислокациями несоответствия.

Структура поверхностей раздела, определенная в настоящей работе, аналогична строению полукогерентных межфазных границ в композите Nb–22Ti–16Si–3Cr–3Al–3Hf (в ат. %) [14, 15]. В этом композите межфазные границы Nb матрица– $\gamma$ -Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> силицид также содержали дислокации несоответствия, и лишние полуплоскости находились в решетке силицида. В отличие от настоящей работы, анализ строения межфазных границ авторы осуществляли в рамках модели "решетка совпадающих узлов/полная решетка наложения" (CSL/DSC) [16]. Однако, наряду с одинаковым дислокационным строением меж-



Рис. 6. Схема образования дислокации несоответствия на межфазной поверхности Nb матрица/ γ-Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> силицид.

фазных границ, полученных на основе различных моделей, имеется некоторое различие. Обнаруженные в работе [15] решеточные дислокации вблизи межфазной границы располагались в кристаллической решетке силицида, а не в ниобиевой решетке, как это имеет место в настоящей статье. Вероятно, это связано с различной природой образования решеточных дислокаций: в ниобиевой матрице дислокации образовались в результате пластической деформации, а в решетке силицида возникли в процессе роста.

#### выводы

1. На основе ориентационного соотношения [111]Nb//[0001]γ и (110) Nb//(1010)γ проведена количественная оценка размерных несоответствий межатомных и межплоскостных расстояний на поверхностях раздела Nb матрица–γ-Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> силицид в эвтектическом композите Nb–Si с направленной структурой.

2. Показано, что несовпадение расстояний между плотноупакованными плоскостями сопряжения (110)Nb и (1010) равно  $\Delta = 1.6\%$ , а несоответствие межатомных расстояний в направлениях совпадения [111]Nb и [0001] равно  $\delta = 3.91\%$ . Численные значения  $\Delta$  и  $\delta$  меньше предельных значений 6 и 10% соответственно, и поэтому удовлетворяют условию полукогерентного строения межфазных границ в рамках стыковой модели сопряжения.

3. Методом ПЭМ высокого разрешения обнаружены краевые дислокации несоответствия на межфазных поверхностях раздела Nb-матрица—  $\gamma$ -Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> силицид, свидетельствующие о полукогерентном характере связи между фазами. Показано ступенчатое строение межфазной поверхности раздела, содержащей дислокации-несоответствия.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Косевич В.М., Иевлев В.М., Палатник А.С., Федоренко А.И. Структура межкристаллитных, и межфазных границ. М.: Металлургиздат, 1980. 256 с.
- 2. *Zhang M.-X., Kelly P.M.* Edge-to-edge matching model for predicting orientation relationship and habit planes the improvements// Scripta Mater. 2005. V. 52. № 10. P. 965–968.
- 3. *Zhang M.-X., Kelly P.M.* Edge-to-Edge matching and its application. Part I. Application to the simple HCP/BCC system // Acta Mater. 2009. V. 53. № 4. P. 1073–1084.
- 4. *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 Mater. 2009. V. 53. № 4. P. 1085–1096.
- 5. Санников А.В., Полетаев Г.М., Микрюков В.Р., Старостенков М.Д., Сосков А.А. Атомная структура и диффузионная проницаемость межфазных границ Ni–Al, Cu–Au, Ni–γFe // Изв. вузов. Черная металлургия. 2014. Т. 57. № 8. С. 56–62.
- 6. Полетаев Г.М., Санников А.В. Исследование атомной структуры и диффузионной проницаемости межфазной границы в Ni–Al [100] // Письма о материалах. 2012. Т. 2. № 2. С. 63–66.
- Семененко В.Е., Пилипенко Н.Н., Поздняков В.А. Дислокационная структура естественных микрокомпозиционных материалов // Вопр. атомной

науки и техники Серия: вакуум, чистые материалы, сверхпроводники (18). 2009. № 6. С. 227–231.

- Кишкин С.Т., Светлов И.Л., Сорокина Л.П., Усиков М.П. Электронно-микроскопические исследования жаропрочного сплава эвтектического типа // ФММ. 1982. Т. 53. № 6. С. 1180–1188.
- Бокштейн С.З., Болберова Е.Б., Игнатова И.А., Кишкин С.Т., Разумовский И.М. Влияние величины несоответствия параметров решеток фаз на диффузионную проницаемость межфазных границ // ФММ. 1985. Т. 59. № 5. С. 936–942.
- Cheng G., Tian Y., He. L., Guo J. Orientation relationship and interfacial structure between α-Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> and Nb solid solution in eutectic lamellar structure // Phil. Mag. 2009. V. 89. № 31. P. 2801–2812.
- Cheng G., Tian Y., He L. Orientation relationship and interfacial structure between Nb solid solution precipitates α-Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> intermetallics // J. Mater. Res. 2009. V. 24. № 1. P. 192–197.
- Светлов И.Л., Кузьмина Н.А., Заводов А.В., Зайцев Д.В. Термическая стабильность поверхностей раздела между ниобиевой матрицы и γ-Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> силицидом в композите на основе системы Nb–Si // Труды ВИАМ. 2018. № 6(68). С. 28–37.
- Кузьмина Н.А., Светлов И.Л., Зайцев Д.В., Заводов А.В. Кристаллохимический анализ поверхностей раздела ниобиевая матрица–силициды Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> в естественных композитах Nb–Si // Труды ВИАМ. 2018. № 12(72). С. 14–24.
- Ma X., Guo X., Fu M., Guo H. Crystallographic characteristics of an integrally directionally solidified Nb–Ti–Si based in-situ composite // Scr. Mater. 2017. V. 139. P. 108–113.
- Ma X., Guo X., Fu M. Precipitation of γNb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> in Nb–Si based ultrahigh temperature alloys // Intermetallics. 2018. V. 98. P. 11–17.
- 16. *Орлов А.Н., Переверзев В.Н., Рыбин В.В.* Границы зерен в металлах. М.: Металлургия, 1980. 159 с.