

ляла соответственно 30 и 70 %, что согласуется с экспериментальными данными).

Таким образом, можно сделать вывод о необходимости создания математической модели диффузии в бинарных твердых растворах замещения, учитывающей не только чисто диффузионные эффекты (как, например, в модели Даркера), но и факторы, приводящие к указанному выше эффекту насыщения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Гуров К.П., Карташкин Б.А., Угасте Ю.Э. Взаимная диффузия в многофазных металлических системах. — М.: Наука, 1981, с. 7—104.
2. Смирнов А.А. Молекулярно-кинетическая теория металлов. — М.: Наука, 1966, с. 319—401.
3. Бокштейн Б.С. Диффузия в металлах. — М.: Металлургия, 1978, с. 129—164.
4. Таблицы физических величин/Под ред. И.К.Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976, с. 287—301.

УДК 621.785.5

Л.Г.ВОРОШНИН, д-р техн.наук,  
Б.М.ХУСИД, канд.физ.-мат.наук,  
Ю.Г.БОРИСОВ (БПИ)

#### ДИФфуЗИОННОЕ СИЛИЦИРОВАНИЕ НИОБИЯ

В работе исследовали влияние состава насыщающей смеси, содержащей порошки кремния, оксида алюминия и галоидного активатора, и температурно-временных параметров на процесс диффузионного силицирования и жаростойкость ниобиевого сплава НЦУ.

Активирующее действие галогенидов на процесс силицирования тугоплавких металлов возрастает по мере уменьшения порядкового номера аниона, т. е. от иода к фтору, поэтому в настоящей работе исследовали возможность применения в качестве активаторов фторсодержащих соединений: LiF, NaF, KF, AlF<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>, K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>, Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>, NH<sub>4</sub>F и NH<sub>4</sub>Cl.

При насыщении из порошковых смесей, содержащих кремний и активатор (2,5 % по массе), лучшие результаты дало применение K<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>. В этом случае наряду с сохранением высокой чистоты поверхности образца получили силицидное покрытие достаточной толщины, имеющее минимальное количество дефектов. Возможно применение и других активаторов, например, LiF, NaF, AlF<sub>3</sub>, однако не рекомендуется использование аммонийных соединений, поскольку азот и водород, взаимодействуя с ниобием, вызывают сильное охрупчивание покрытия.

Диффузионный слой на сплаве НЦУ во всех случаях имел практически однофазную структуру NbSi<sub>2</sub>. На поперечных шлифах после химического травления металлографическим анализом выявили наличие тонкой, не более 2 мкм, прослойки низшего силицида Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub>, расположенного между мелкодисперсной столбчатой зоной дисилицида и основным металлом.

Использование в качестве образцов тонкой фольги (50 мкм) позволило детально исследовать кинетику формирования дисилицидного покрытия.

Кинетические кривые роста диффузионного слоя, построенные в логарифмических координатах, указывают на параболический характер зависимости. Однако при насыщении из смесей, содержащих порошок кремния и активатор, имеет место отклонение от квадратичного закона роста слоя, и показатель степени равен 2,2–2,6. Этот факт экспериментально подтверждает то, что при описании процесса роста силицидных фаз и других интерметаллидных соединений наряду с диффузионным массопереносом необходимо учитывать кинетику фазовых превращений.

По истечении некоторого периода времени наблюдали сквозное силицирование фольги, которая имела однофазную структуру  $\text{NbSi}_2$ . Установленное термодинамическое равновесие между образцом и средой зависит от насыщающей способности среды.

После установления равновесия изменения размеров и массы фольги не наблюдали, что свидетельствует об отсутствии процессов осаждения кремния на "дисилицидную пластину".

Образцы, прошедшие диффузионную обработку, подвергали циклическим испытаниям на жаростойкость при 1000 и 1200 °С (1 цикл – выдержка 5 ч при температуре испытания и охлаждения на воздухе).

Установили, что стойкость покрытия зависит от толщины дисилицидного слоя и определяется в основном наличием в нем дефектов и способностью к самозалечиванию в процессе эксплуатации. Так, образцы с толщиной покрытия 20 мкм выдержали 3 цикла испытаний при 1000 °С, удельный прирост массы составил 1,16 мг/см<sup>2</sup>, а покрытие толщиной 90 мкм обеспечило надежную защиту в течение 7 циклов испытаний при 1200 °С, удельный прирост массы – 6,47 мг/см<sup>2</sup>. Однако значительно повысить жаростойкость лишь за счет увеличения толщины силицидного покрытия нельзя. Для эффективной защиты сплавов на основе ниобия необходимо применение модифицированных и комплексных силицидных покрытий.

*УДК 621.74.043*

**Б.М.НЕМЕНЕНОК**, канд.техн.наук,  
**М.И.СТРИЖЕНКОВ**, **А.М.ГАЛУШКО**, канд.техн.наук,  
**Е.Ю.ФЕДОРОВА** (БПИ)

## **ОСОБЕННОСТИ МОДИФИЦИРОВАНИЯ СИЛУМИНОВ СТРОНЦИЕМ**

Для выбора наиболее рационального способа введения стронция в расплав производилась обработка сплава АЛ4 стронцием совместно с универсальным флюсом, серой и гексахлорэтаном. Анализировались механические свойства, жидкотекучесть, объемная усадка, микроструктура и газосодержание. Результаты исследований представлены в табл. 1.

Обработка сплава АЛ4 (9,85 % Si, 0,24 % Mg, 0,43 % Mn, 0,84 % Fe, 0,28 % Cu) стронцием совместно с 0,8 % универсального флюса, состоящего из 35 % NaCl, 40 % KCl, 10 % NaF и 15 %  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ , обеспечивает получение высоких механических и технологических свойств сплава. В данном случае флюс является рафинирующим веществом. Вместе с тем при анализе микроструктуры