

Л.А.Васильев, канд. техн. наук,  
И.Н.Бурнышев, аспирант (БПИ)

## ЖАРСТОЙКИЕ ДИФфуЗИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ТИТАНОВЫХ СПЛАВАХ

В работе исследован процесс формирования диффузионных алюминидных и силицидных слоев на титановых сплавах и изучены их защитные свойства.

Насыщение образцов из сплавов ВТ1-0, ОТ4 и ВТ14 проводили в порошках алюминия и кремния, в качестве активатора процессов использовались различные галогениды, а в качестве инертного разбавителя окись алюминия.

Исследования показали, что толщина алюминидных покрытий сильно зависит от марки применяемого порошка алюминия и его дисперсности. Тип активатора и его количество тоже изменяют насыщающую способность смеси. Исследованы активаторы  $\text{NaF}$ ,  $\text{AlF}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{NH}_4\text{F}$ ,  $\text{KBF}_4$  и их комбинации. Лучшие результаты получены с комплексным активатором, содержащимся в смеси в количестве (вес. %):  $2\text{KBF}_4 + 1\text{NH}_4\text{Cl}$ . В этом случае формируется беспористый алюминидный слой наибольшей толщины при хорошем качестве поверхности. Добавки в насыщающую смесь активаторов больше 5% приводят к резкому ухудшению качества поверхности.

Кинетика роста диффузионных алюминидных слоев на титановых сплавах подчинена параболической зависимости. Влияние температуры на толщину слоев в интервале  $650-950^\circ\text{C}$  для сплавов ВТ1-0 и ВТ14 незначительно, а для сплава ОТ4 наблюдается ускорение роста алюминидных слоев при температуре  $850-950^\circ\text{C}$ .

При температурах насыщения  $650-850^\circ\text{C}$  формируются однофазные диффузионные слои из высшего алюминид титана  $\text{TiAl}_3$ , под которым расположен твердый раствор алюминия в  $\alpha\text{-Ti}$ .

При температуре насыщения  $950^\circ\text{C}$  наблюдается появление между зоной твердого раствора и зоной алюминид титана  $\text{TiAl}_3$  тонкой прослойки  $\text{TiAl}$ .

При силицировании в качестве диффузанта содержащего вещества исследованы порошки кремния марок Кр0, Кр1, Кр2, Кр3. Существенного влияния марки порошка на толщину слоя не отмечено.

Изучение зависимости толщины силицидного покрытия от содержания порошка кремния в насыщающей смеси показало, что

увеличение содержания его выше 60% (по массе) практически не приводит к увеличению толщины силицидного слоя.

Влияния количества инертной добавки на спекаемость смеси при этом не выявлено. Однако замечено, что при использовании непрокаленной или плохо прокаленной окиси алюминия наблюдается отслоение силицидного слоя от основы.

В качестве активаторов при силицировании были исследованы следующие соединения:  $\text{NaF}$ ,  $\text{AlF}_3$ ,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ ,  $\text{K}_2\text{SiF}_6$ ,  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ ,  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ,  $\text{KBF}_4$ . Наиболее качественные покрытия получаются при использовании в качестве активаторов фторидов натрия, алюминия и кремнефторида натрия (2–3 вес. %). Силицирование с добавками галогенидов аммония дает большую толщину по сравнению с фторидами натрия и алюминия, но ухудшается качество слоя из-за образования в нем пор.

Толщина диффузионных силицидных слоев увеличивается при повышении температуры насыщения по параболическому закону. Зависимость толщины силицидного слоя от времени насыщения экспоненциальная. Скорость роста диффузионных слоев практически не зависит от марки титанового сплава, т. е. легирующие элементы, содержащиеся в сплавах, существенно не влияют на скорость формирования покрытия.

Проведенный рентгеноструктурный анализ силицированных образцов показал, что диффузионный слой состоит из силицидов  $\text{TiSi}_2$  и  $\text{Ti}_5\text{Si}_3$ , под которым находится переходная зона твердого раствора кремния в титане, металлографический анализ подтверждает наличие нескольких фаз в слое.

Результаты испытаний жаростойкости показали, что силицирование и алитирование позволяет повысить жаростойкость титановых сплавов ВТ1-0 (рис. 1, а), ОТ4 и ВТ14 при 700°C соответственно в 25, 18 и 6 раз по сравнению с образцами без покрытий. Меньшая эффективность защитных покрытий на сплаве ВТ14 объясняется меньшей толщиной слоя и более высокой жаростойкостью самого сплава ВТ14 по сравнению с ВТ1-0 и ОТ4. Поверхность испытанных образцов осталась чистой и имела темно-зеленый цвет, признаков разрушения покрытия не обнаружено.

Удельное изменение массы образцов из сплава ВТ1-0, испытанных при температуре 850°C, показано на рис. 1, б. Удельное изменение массы незащищенных образцов из сплавов ВТ1-0, ОТ4 и ВТ14 возросло соответственно в 12, 18 и 27 раз по сравнению с испытаниями при 700°C. Изменение массы после испытаний алитированных сплавов показало повышение жаростойкости для сплава ВТ1-0 в 60 раз, ОТ4 в 100 раз и ВТ14 в 54.

Кинетика окисления образцов с обоими типами покрытий описывается законом, близким к параболе.

Повышение температуры испытаний до 1000°C (рис. 1, в) приводит к изменению характера кинетических кривых окисления силицированных и алитированных сплавов. В этом случае окисление силицированных образцов описывается вогнутой кривой, т. е. процесс происходит с возрастающей скоростью.

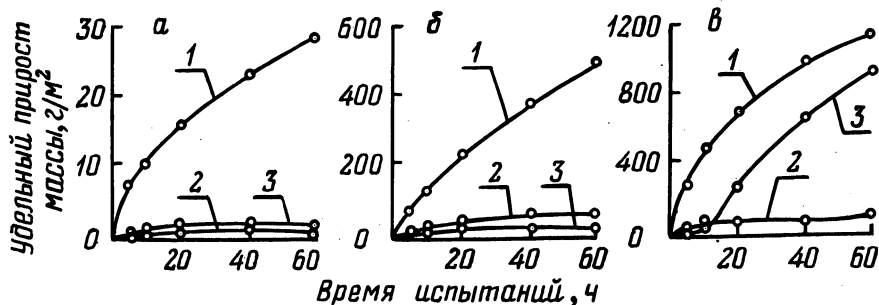


Рис. 1. Кинетика окисления сплава ВТ1-0 при 700°C (а); 850 (б); 1000°C (в) соответственно; 1, 2, 3 – соответственно необработанный сплав, силицированный, алитированный.

Алюминидные покрытия в начальный период окисляются по параболическому закону и имеют более высокую жаростойкость, чем силицидные. Но период параболического окисления мал, составляя для ВТ1-0 10 ч, ОТ4 – 20, ВТ14 – 40. При больших выдержках наблюдается резкое увеличение скорости окисления незащищенных образцов.

Легирующие элементы, содержащиеся в сплаве ВТ14, повышают жаростойкость алюминидных покрытий путем их легирования.

УДК 539.219.3

Л.Г.Ворошнин, докт.техн.наук,  
Е.М.Блох, инженер (БПИ)

### ДИФфуЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ДВУХФАЗНОЙ ОБЛАСТИ ПРИ ЦЕМЕНТАЦИИ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

В работе разработана математическая модель диффузионных процессов в многокомпонентных двухфазных системах. При разработке математической модели процесса диффузионного насыщения используется модель элементарных сферических ячеек [1].