

составом покрытия, можно обеспечить требуемые свойства боридным покрытиями.

Проведенные исследования закономерностей формирования и свойств боридных покрытий, а также опыт их практического использования позволяют технологию процесса борирования подразделить на три вида: высокотемпературное борирование, осуществляемое при температурах 950<sup>o</sup>C и выше; среднетемпературное борирование, осуществляемое в интервале температур 750...900<sup>o</sup>C; низкотемпературное борирование, осуществляемое в интервале температур 550...700<sup>o</sup>C.

Особое внимание следует обратить на то, что необходим дифференцированный подход при выборе режима насыщения, исходя из условий эксплуатации упрочняемого изделия. Выбор режима упрочняющей обработки изделий, способ насыщения и фазовый состав боридных слоев зависят от следующих основных факторов: условий эксплуатации, причин выхода из строя и величины допустимого износа рабочих поверхностей, марки стали изделия, класса точности изготовления, необходимого класса чистоты рабочих поверхностей, размера и серийности.

Использование процесса борирования для упрочнения штампового инструмента обеспечивает повышение эксплуатационной стойкости: тяжело-нагруженного горячештампового инструмента в 1,5–2 раза; выталкивателей горячештампового инструмента в 2–2,5 раза; вставок горячей формовки в 2–4 раза; инструмента для холодной обработки металлов (вытяжные, гибочные, формообразующие штампы) в 4–6 раз; вырубных штампов и пуансонов в 2–3 раза.

Повышение эксплуатационных свойств борированных изделий может быть достигнуто путем снижения традиционной температуры процесса насыщения. Это приводит к повышению текстурованности боридных фаз и покрытий, получению их оптимального соотношения, созданию благоприятной шюры остаточных напряжений в упрочненном изделии, повышению дисперсности структуры, а также к частичному или полному исключению объемного эффекта от фазовых превращений в сердечнике.

*УДК 621. 78:620.22 – 419.8*

**В.И.БЕЛЯЕВ, Д.Г.ДЕВОЙНО**

### **ДИФфуЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В СОЕДИНЕНИИ МЕДЬ–ТИТАН**

Эксплуатация медно-титановых композиций при повышенных температурах может сопровождаться изменением служебных характеристик из-за процесса возникновения и роста на границе раздела металлов диффузионных прослоек, содержащих интерметаллиды.

С целью прогнозирования работоспособности сваренных взрывом при различных начальных температурах медно-титановых соединений исследовалась кинетика роста в них интерметаллидов при нагревах. Для этого использовалась общепринятая методика [1]: сваренные образцы выдерживались в печи при фиксированных температурах в течение различного времени. Интервал исследованных температур составлял 473–1173 К, время выдержек – от 20 мин до 200 ч. Для предотвращения окисления нагрев проводился в соляных ваннах или применялась специальная обмазка, состоящая из смеси жидкого стекла и окиси алюминия. Из подвергнутых отжигу образцов изготавливались микрошлифы, на которых изучались фазовый состав, законы роста интерметаллидного слоя, микротвердость, изменения удельного электросопротивления.

Для экспериментов использовались биметаллы, сваренные взрывом по трем вариантам: начальная температура заготовок была 293 К; начальная температура медной составляющей – 77 К, а титановой – 293 К; начальная температура обеих заготовок – 77 К.

Технологические параметры соударения были подобраны таким образом, что в зоне контакта отсутствовали диффузионные зоны и химические соединения.

После отжига при температурах 473 К и 573 К в течение 200 ч микроструктурным и микрорентгеноспектральным анализами не выявлено протекания диффузионных процессов на границе раздела металлов. Начиная с температуры 673 К в зоне контакта образуется промежуточный слой, который состоит из двух интерметаллидных соединений  $TiCu_3$  и  $TiCu$ . Были проведены исследования изменений толщины этого слоя в зависимости от температуры и времени нагрева.

Анализируя полученные экспериментальные результаты, установили, что кинетика роста интерметаллидной зоны в пределах исследованных температур (673 К – 973 К) подчиняется параболическому закону, т.е.

$$y^2 = K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) (t - t_0), \quad (1)$$

где  $y$  – толщина прослойки;  $K_0$  – коэффициент, не зависящий от температуры;  $E$  – энергия активации диффузии;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура;  $t$  – время выдержки при данной температуре;  $t_0$  – время образования зародышей новой фазы.

В работе [2] показано, что время образования зародышей новой интерметаллидной фазы обычно определяется уравнением

$$t_0 = K_1 \exp \frac{Q}{RT}, \quad (2)$$

где  $K_1$  – коэффициент, не зависящий от температуры;  $Q$  – эффективная энергия активации процесса.

С помощью известной методики [3] определены величины  $K_0$ ,  $K_1$ ,  $E$  и  $Q$ . Подставив значения указанных коэффициентов в уравнение (1), получили законы роста диффузионной интерметаллидной зоны соединения медь-титан в виде следующих выражений:

сварка при начальной температуре заготовок 293 К

$$y^2 = 13,5 \cdot 10^{-2} \exp\left(-\frac{16,6 \cdot 10^3}{RT}\right) (t - t_0), \text{ мкм}^2; \quad (3)$$

сварка с предварительным охлаждением меди до 77 К

$$y^2 = 18,3 \cdot 10^{-2} \exp\left(-\frac{22,9 \cdot 10^3}{RT}\right) (t - t_0), \text{ мкм}^2; \quad (4)$$

сварка с предварительным охлаждением всей композиции до температуры кипения жидкого азота

$$y^2 = 66,9 \cdot 10^{-2} \exp\left(-\frac{33,2 \cdot 10^3}{RT}\right) (t - t_0), \text{ мкм}^2. \quad (5)$$

Время образования зародышей новой фазы  $t_0$  для всех трех вариантов сварки определилось уравнением

$$t_0 = 13 \exp\left(\frac{30,8 \cdot 10^3}{RT}\right), \text{ с}. \quad (6)$$

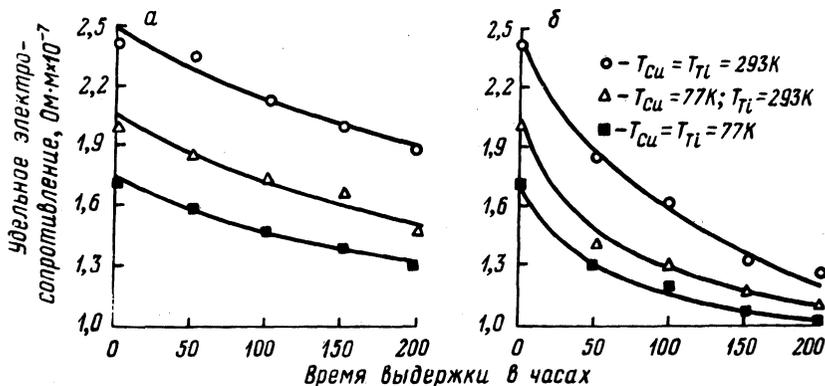


Рис. 1. Зависимость удельного электросопротивления биметалла медь-титан, полученного сваркой взрывом при различных технологических температурах от времени отжига:

а, б — температура отжига 473 и 573 К соответственно.

Анализ полученных зависимостей показывает, что энергия активации диффузии соединения, сваренного взрывом с предварительным охлаждением, значительно больше, чем у биметалла, полученного при нормальной температуре. Это явление объясняется следующим: образованием меньшего числа

микроразродышей интерметаллидов в зоне контакта при сварке с предварительным охлаждением; уменьшением степени пластической деформации охлажденных материалов, снижающих количество активных центров, которые стимулируют образование интерметаллидного слоя.

Второе положение подтвердилось результатами экспериментов по исследованию удельного электросопротивления (рис. 1). У образцов, полученных сваркой с применением предварительного охлаждения, удельное сопротивление значительно меньше, чем у изготовленных при нормальных начальных температурах. Это связано с меньшим уровнем внутренних напряжений и снижением количества образующихся дефектов. Отжиг при температурах 473 К и 573 К, когда еще не образуется интерметаллидный слой, вызывает во всех случаях плавное увеличение электропроводности, причем более интенсивное при температуре 573 К. Данное явление вызвано релаксационными процессами, устраняющими напряженное состояние материала.

**В ы в о д ы.** 1. При температурах нагрева соединения медь-титан, полученного сваркой взрывом, до 573 К на границе раздела металлов не образуются новые промежуточные фазы, а при нагреве до 673 К и выше — появляется диффузионная интерметаллидная прослойка.

2. Получены уравнения, описывающие кинетику роста образующейся интерметаллидной прослойки.

3. Установлено, что при получении биметалла медь-титан, используемого для токопроводящих изделий, целесообразно проводить сварку взрывом с предварительным охлаждением меди до криогенных температур и выполнять последующий отжиг композиционного материала при температуре не выше 573 К. При таком режиме изготовления биметалл будет иметь минимальное электросопротивление.

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. З а й т Б. Диффузия в металлах /Под ред. Б.И.Болтакса. Пер. с нем. — М., 1958.
2. Л а р и к о в Л.Н., Р я б о в В.Р., Ф а л ь ч е н к о В.М. Диффузионные процессы в твердой фазе при сварке. — М., 1975.
3. Р о й т е р В.А. Введение в теорию кинетики и катализа. — Киев, 1962.