В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, А. Г. Серов, В. П. Кулевич

ОЦЕНКА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ БИНАРНЫХ И ЛЕГИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ Ti-Cu*

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: mv@vstu.ru

В диапазоне 25–425 °С получена температурная зависимость коэффициента теплопроводности бинарных и легированных покрытий системы Cu-Ti, сформированных на поверхности титана при термообработке по режиму контактного плавления. Показано, что коэффициент теплопроводности покрытий на основе легированных купридов титана выше, чем у покрытий на основе бинарных купридов титана.

Ключевые слова: покрытие, теплопроводность, куприд титана, сварка взрывом, контактное плавление.

V. G. Shmorgun, O. V. Slautin, A. G. Serov, V. P. Kulevich

EVALUATION OF THE THERMAL CONDUCTIVITY OF THE Ti-Cu SYSTEM BINARY AND DOPED COATINGS

Volgograd State Technical University

The temperature dependence of the thermal conductivity in the range of 25–425 °C was obtained for the Cu-Ti system binary and doped coatings formed on the titanium surface during heat treatment by contact melting. It is shown that the thermal conductivity of coatings based on alloyed titanium cuprides is higher than that on coatings based on binary titanium cuprides.

Keywords: coating, thermal conductivity, titanium cupride, explosion welding, contact melting.

Введение

Известно [1], что интерметаллиды на основе купридов титана обладают значительно меньшей теплопроводностью, чем металлы их образующие. Значительная разница в теплофизических свойствах металлических и интерметаллидных слоев, приводящая к анизотропии теплопроводности, позволяет повысить равномерность распределения температурного поля в композиционных конструкциях, имеющих в своем со-

ставе слои титана, интерметаллида и меди.

Основным недостатком бинарных купридов титана является их хрупкость при пониженных и комнатных температурах [2, 3]. В работе [3] показано, что легирование купридов титана никелем (15–20 %) приводит к увеличению их пластичности. Поэтому для повышения надежности металлоинтерметаллидных композитов замена бинарных купридов титана легированными никелем представляется целесообразной.

Для задания граничных температурных условий при решении задач по оценке рабочей температуры конструкций, имеющих в своем составе легированные никелем куприды титана, необходимы данные по коэффициентам их теплопроводности.

Поскольку наиболее важным практическим применением купридов титана является их использование в качестве износостойких покрытий на поверхности медных и титановых деталей в условиях высоких температур [4, 5], то целью настоящей работы явилось определение теплопроводности бинарных и легированных покрытий системы Ti-Cu, сформированных на поверхности титана при термообработке (ТО) биметаллов титан BT1-0 + медь (медноникелевый сплав) по режиму контактного плавления (КП).

Материалы и методы исследования

Биметаллы были получены сваркой взрывом (СВ) титана BT1-0 (толщиной 2 мм) с медью М1 (5 мм) и медно-никелевыми сплавами МН19 (2 мм) и МН45 (2 мм). СВ всех композиций проводилась по плоскопараллельной схеме на режимах, обеспечивающих минимальный уровень структурной и химической микронеоднородности на межслойной границе. Биметаллические композиты прокатывали на стане «ДУО» при 600 °С для утонения меди или медно-никелевого сплава до 0,3 мм. Для получения интерметаллидных покрытий проводили ТО по режиму КП: 900 °С, 15 мин (BT1-0+М1), 950 °С, 15 мин (BT1-0+МН19 и BT1-0+М45) в воздушной атмосфере печи SNOL 8,2/1100.

Металлографические исследования осуществляли с применением оптической (модульный моторизованный микроскоп Olympus BX61 с фиксацией изображения цифровой камерой DP-12) и электронной (растровый электронный микроскоп Versa 3D) микроскопии. Для обработки цифровых изображений применяли пакет программ «AnalySIS». Микрорентгеноспектральный анализ проводили на электронном микроскопе Versa 3D с использованием энергодисперсионного спектрометра EDAX Trident XM 4. Фазовый состав оценивали с помощью рентгенофазового анализа на дифрактометре Bruker D8 Advance. Микротвердость структурных составляющих определяли на приборе PMT-3М по методу восстановленного отпечатка вдавливанием алмазной четырехгранной пирамиды с квадратным основанием и углом при

вершине 136° (ГОСТ 9450–76) под нагрузкой 0,2–1 Н.

Поскольку эквивалентный коэффициент теплопроводности слоистого композита $\lambda_{СКМ}$ зависит только от термического сопротивления составляющих его слоев и равен [6, 7]:

$$\lambda_{СКМ} = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \dots + \delta_n}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}}, \quad (1)$$

коэффициент теплопроводности покрытия можно оценить по формуле:

$$\lambda_{покр} = \frac{\delta_{покр}}{\frac{\delta_{СКМ}}{\lambda_{СКМ}} - \frac{\delta_{Ti}}{\lambda_{Ti}}}, \quad (2)$$

где $\delta_{покр}$ – толщина покрытия; $\delta_{СКМ}$ – толщина всего композита; δ_{Ti} – толщина титана BT1-0; $\lambda_{СКМ}$, λ_{Ti} – экспериментальные значения коэффициентов теплопроводности композита и титана BT1-0, соответственно.

Исследование теплофизических свойств образцов из меди М1, медно-никелевых сплавов МН19 и МН45, титана BT1-0 и композиций на их основе проводили на анализаторе температуропроводности и теплопроводности LFA 427 фирмы Netzsch (Германия) в диапазоне температур 25–425 °С, используя образцы квадратного сечения 10×10 мм. Нагрев проводился в защитной атмосфере аргона. Теплопроводность образцов рассчитывали, используя полученные экспериментальные данные по их удельной теплоемкости и температуропроводности по формуле:

$$\lambda = a \cdot C_p \cdot \rho, \quad (3)$$

где a – коэффициент температуропроводности, м²/с; ρ – плотность, кг/м³; C_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг · К).

Результаты и их обсуждение

Металлографический анализ экспериментальных образцов после СВ, обработки давлением и ТО показал, что сформировавшееся на поверхности титана в биметалле BT1-0+М1 покрытие (рис. 1, а) состоит из смеси твердого раствора титана в меди с включениями TiCu₂, β TiCu₄ и Ti₃Cu₄. В композициях BT1-0+МН19 и BT1-0+М45 (рис. 1, б, в), помимо указанных выше фаз, присутствуют интерметаллиды Ti₂Cu, Ti₂Ni, TiCu, TiNi и TiCuNi. Изменения в фазовом составе при легировании никелем приводят к увеличению средних значений твердости покрытия (рис. 1).

Рис. 1. Микроструктуры и кривые распределения химических элементов и микротвердости по толщине покрытия, сформированного на титановой подложке:
 а – BT1-0+M1; б – BT1-0+MН19; в – BT1-0+MН45

Экспериментальные данные по удельной теплоемкости и температуропроводности исследованных образцов представлены на рис. 2, а результаты расчетов коэффициента теплопроводности – на рис. 3. Анализ полученных экспериментальных результатов указывает на значительное различие коэффициентов теплопроводности композиций в зависимости от их со-

става и состояния (после СВ или после ТО).

ТО композиций приводит к снижению значений теплопроводности относительно значений после СВ. Причем, после ТО образцы M1+BT1-0 показали более низкие значения коэффициента теплопроводности, чем образцы с медно-никелевыми сплавами MН19+BT1-0 и MН45+BT1-0.

Рис. 2. Результаты измерений температуропроводности (а, в) и удельной теплоемкости (б, з) исходных материалов (а, б) и композиций на их основе после СВ и ТО (в, з)

Рис. 3. Зависимость коэффициента теплопроводности исходных материалов (а) и композиций на их основе после СВ и ТО (б) от температуры

Рассчитанный по правилу смеси коэффициент теплопроводности покрытий, сформированных на поверхности титана после ТО композитов М1+ВТ1-0, МН19+ВТ1-0 и МН45+ВТ1-0 увеличивается с ростом температуры (рис. 4) от 5,2 до 9,0 Вт/(м · К) (М1+ВТ1-0), от 11,7 до 17,9 Вт/(м · К) (МН19+ВТ1-0) и от 11,7 до 15,5 Вт/(м · К) (МН45+ВТ1-0).

Рис. 4. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности покрытий, сформированных на поверхности титана после ТО композитов:

1 – М1+ВТ1-0; 2 – МН19+ВТ1-0; 3 – МН45+ВТ1-0

Вывод

При термообработке по режиму контактного плавления титана, плакированного медью и медноникелевыми сплавами, на его поверхности формируются покрытия на основе купридов титана. При этом теплопроводность покрытий на основе легированных купридов титана выше, чем покрытий на основе бинарных купридов титана.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исследование теплофизических свойств интерметаллидного композита титан-медь / В. Г. Шморгун, Д. В. Проничев, О. В. Слаутин, Д. А. Евстропов, В. П. Кулевич // Известия ВолГГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 23 (150) / ВолГГТУ. – Волгоград, 2014. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении» ; вып. 10). – С. 12–14.
2. Формирование покрытия на поверхности медных деталей при жидкофазном взаимодействии в слоистой системе Al-Ti-Cu / В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, В. Н. Арисова, Д. А. Евстропов, Р. Е. Новиков // Известия ВолГГТУ : научный журнал № 8 (168) / ВолГГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 13–19.
3. Формирование диффузионной зоны при контактно-м плавлении на межслойной границе сваренного взрывом композита ВТ1-0 + МН19 / В. Г. Шморгун, А. Г. Серов, В. П. Кулевич, О. В. Слаутин, Р. Е. Новиков // Известия ВолГГТУ : научный журнал № 4 (227) / ВолГГТУ. – Волгоград, 2019. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 7–14.
4. Формирование покрытий на основе купридов титана на поверхности меди при контактно-м плавлении / В. Г. Шморгун, Л. М. Гуревич, О. В. Слаутин, В. Н. Арисова, Д. А. Евстропов // Металлург. – 2015. – № 10. – С. 88–92.
5. Влияние режимов контактного плавления на структуру и свойства покрытий системы медь–титан / В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, Д. А. Евстропов // Металлург. – 2016. – № 6. – С. 83–86.
6. Трыков, Ю. П. Теплопроводность медно-алюминиевого композита / Ю. П. Трыков, Д. В. Проничев, Л. М. Гуревич, О. В. Слаутин, А. В. Волчков // Технология металлов. – 2007. – № 7. – С. 31–35.
7. Слоистые интерметаллидные композиты и покрытия : монография / Л. М. Гуревич, В. Г. Шморгун, О. В. Слаутин, А. И. Богданов. – Москва: Металлургиздат, 2016. – 346 с.