

УДК 536.212

К.Б. ИСАЕВ¹, А.А. РОГОЗИНСКАЯ¹, С.В. АХОНИН², В.К. САБОКАРЬ²,
Э.Л. ВРЖИЖЕВСКИЙ²¹Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича НАН Украины, Киев²Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, КиевТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ γ -СПЛАВА
АЛЮМИНИДА ТИТАНА

Определены теплофизические характеристики γ -сплава TiAl (31 % Al + добавки). Удельная теплоемкость алюминидов титана определялась на стандартной установке ИТ-с-400, а коэффициент теплопроводности – решением обратных задач теплопроводности. Для решения последней задачи экспериментально определены одномерные температурные поля в образцах исследованного сплава в условиях одностороннего нагрева. Проведен рентгеноструктурный анализ исследованного сплава, определен его фазовый состав. Получено, что с ростом содержания алюминия в сплавах алюминидов титана его удельная теплоемкость увеличивается, а коэффициент теплопроводности уменьшается.

Ключевые слова: алюминид титана, сплав, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности, температурное поле.

Введение

Алюминиды титана обладают уникальными свойствами, такими как: относительно высокая температура плавления, низкая плотность, высокие упругие модули, стойкость к окислению и возгоранию, высокое отношение прочность/плотность, жаропрочность и др. Область применения этих материалов обширна и включает в себя: компоненты различных двигателей, реактивные сопла, элементы обшивки космических аппаратов, сотовые конструкции сверхзвуковых летательных аппаратов и элементы их теплозащитных систем и т.п. Алюминиды титана отличаются содержанием алюминия и различных добавок. В настоящее время в литературе отсутствует информация о теплофизических характеристиках алюминидов титана с содержанием алюминия большим нескольких процентов. Чтобы восполнить этот пробел в данной работе были определены теплофизические характеристики γ -сплава TiAl – 47ХД [1]. Ориентировочный состав этого материала следующий: Ti – 61%; Al – 31 %; Nb – 2 %; Mn – 2 % плюс другие добавки.

Удельная теплоемкость сплава определялась на стандартной установке ИТ-с-400, в которой реализован метод монотонного нагрева (максимальная погрешность – 10 %). Предельная температура измерений – 400 °С. Плотность исследованного сплава определялась как частное от деления веса образца на его объем, при этом использовались образцы, предназначенные для определения удельной теплоемкости. Средняя величина плотности этого сплава составила

3956 кг/м³. Коэффициент теплопроводности сплава определяли по технологии [2, 3], основанной на экспериментальном определении температурного поля в образцах исследуемого материала и обработке этого поля с помощью методик решения обратных задач теплопроводности (ОЗТ).

1. Удельная теплоемкость

На рис. 1 приведены результаты определения удельной теплоемкости исследованного алюминидов титана для двух образцов.

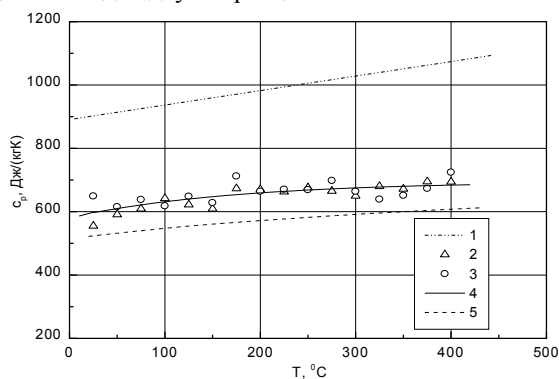


Рис. 1. Температурные зависимости удельной теплоемкости: 1 – Al [4]; 2, 3 – № 1 и № 2 TiAl соответственно; 4 – аппроксимация точек 2 и 3; 5 – Ti [4]

Максимальное отклонение экспериментальных данных от кривой 3 составляет ~ 8 %. Для сравнения на рис. 1 приведены температурные зависимости удельной теплоемкости чистого титана

тана и алюминия [4]. Добавление 31 % алюминия к титану приводит к росту c_p титанового сплава на ~ 15 % по сравнению со значениями этой характеристики чистого титана, что, по-видимому, объясняется более высокой теплоемкостью алюминия [4].

2. Температурные поля в образцах алюминид титана

Экспериментальное определение температурных полей в образцах этого сплава проводилось при одностороннем нагреве. В качестве источника тепла использовался расплав свинца, перегретый до температуры примерно 400 °С. Методика проведения эксперимента подробно описана в [3] и заключается в следующем. Изготавливается теплоприемник из исследуемого материала – цилиндрический образец с термопарами и соответствующей теплоизоляцией боковой поверхности. Термопары заделываются либо в отверстия, просверленные перпендикулярно оси цилиндра на разном расстоянии от нагреваемого торца, либо в прорези, сделанные также перпендикулярно оси и на глубину в половину диаметра цилиндра. После заделки термопар отверстия или прорези заполняются порошком материала с высокой теплопроводностью (например, медь). Далее термопарные провода фиксируются с помощью кварцевой нити вдоль образующей цилиндра, а боковая поверхность цилиндра теплоизолируется с помощью втулки из теплоизоляционного материала или асбестового шнура. В данной работе для измерения температур в образцах сплава использовались термопары ВР 5/20, (диаметр электродов – 0.1 мм). Термопарные провода были покрыты двуокисью иттрия толщиной в несколько мкм. Расстояние первой термопары от поверхности нагрева в испытанных образцах TiAl составляло 2 мм, а расстояния между термопарами – 5 мм. Регистрация показаний термопар осуществлялась с помощью шлейфового осциллографа HO71.3. Результаты регистрации показаний четырех термопар для двух образцов

исследованного алюминид титана приведены на рис. 2, а, б.

Как видно из этих рисунков, температура в образцах исследованного сплава монотонно увеличивается до момента снятия тепловой нагрузки, а затем плавно уменьшается (показания первой термопары). Далее запись показаний термопар при остывании не проводили, т.к. для решения ОЗТ использовался только режим нагрева образцов. Образцы после нагрева остывали при комнатной температуре.

3. Коэффициент теплопроводности алюминид титана

Полученная экспериментальная информация была обработана по технологии [2, 3], с использованием температурной зависимости удельной теплоемкости этого сплава, приведенной на рис. 1. Результаты решения ОЗТ приведены на рис. 3. Данные о коэффициенте теплопроводности двух образцов сплава были аппроксимированы линейной функцией с помощью метода наименьших квадратов. На рис. 3 данные о $\lambda(T)$ алюминия не приведены из-за большой разницы в значениях коэффициентов теплопроводности рассмотренных материалов.

Как отмечалось выше, исследованный в данной работе сплав состоит в основном из Ti и Al. Эти два металла принадлежат IV переходной и III группам периодической системы элементов Менделеева соответственно. Высокая теплопроводность Al обеспечивается его электронной составляющей как в твердом, так и в жидком состояниях. Доля решеточной составляющей теплопроводности алюминия не превышает 2% при 800 К. Для Ti, обладающего относительно низкой теплопроводностью, при 800 К электронная составляющая примерно в 5 раз больше решеточной [7]. В результате соединения этих металлов получается сплав – алюминид титана.

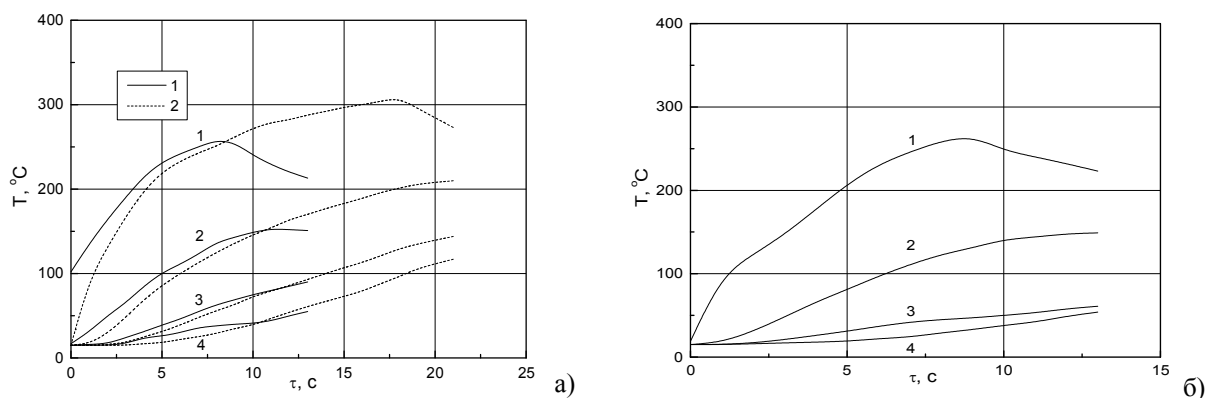


Рис. 2. Температурные поля в образцах № 1 (а) (два нагрева) и № 2 (б) алюминид титана. 1 – первый нагрев; 2 – второй нагрев. 1-4 показания четырех термопар

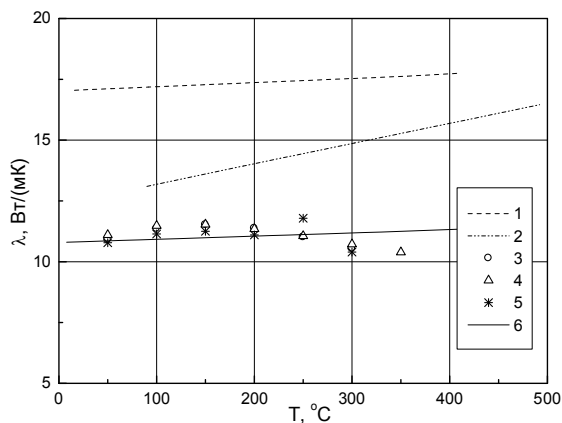


Рис. 3. Температурная зависимость коэффициента теплопроводности титана и титановых сплавов. 1 – титан ВТ1 [5]; 2 – титановый сплав (5 % Al) [6]; 3-5 – образцы № 1 (два нагрева) и № 2 соответственно; 6 – линейная аппроксимация

Для выяснения фазового состава исследованного сплава был проведен рентгеноструктурный анализ его образцов на установке ДРОН-3 в фильтрованном (Ni-фильтр) $\text{CuK}\alpha$ -излучении. Расшифровка экспериментальных данных осуществлялась с помощью широко известной Американской картотеки [8].

На рис. 4 приведен типичный результат рентгеноструктурного анализа образцов TiAl . Этот анализ показал, что основной фазой исследованного сплава является γ -фаза TiAl с тетрагональной решеткой с периодами $a = 4,00 \text{ \AA}$, $c = 4,07 \text{ \AA}$ и $c/a = 1.018$. Структура алюминиды титана упорядоченная – типа CuAu . В этом сплаве присутствует небольшое количество фазы Ti_2Al с гексагональной кристаллической решеткой, периоды которой равны: $a = 5.775 \text{ \AA}$, $c = 4.638 \text{ \AA}$ и $c/a = 0.803$, а также небольшое количество фазы TiAl_3 с тетрагональной решеткой, периоды которой $a = 3,849 \text{ \AA}$, $c = 8,610 \text{ \AA}$ и $c/a = 2.237$. Последняя фаза представлена на дифрактограмме (рис. 4) тремя очень слабыми линиями. Фаза на основе TiAl имеет область гомогенности от стехиометрического состава до 70 ат. % Al. Измерения отношения интенсивности отражений от сетчатых плоскостей $\{220\}$ и $\{110\}$ при исследовании сплавов с различным содержанием алюминия показали, что избыточные атомы алюминия беспорядочно замещают атомы титана при сохранении дальнего порядка [9].

Данные о зависимости коэффициента теплопроводности исследованного алюминиды титана от содержания алюминия при разных температурах представлены на рис. 5, которые были аппроксимированы экспоненциальной функцией.

С увеличением содержания Al в сплавах титана его теплопроводность уменьшается (рис. 5), не смотря на то, что значения коэффициента теплопроводности алюминия больше этой характеристики титана более чем в 10 раз. При 20 °C коэффициент теплопроводности

Al составляет $\sim 240 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, немного увеличивается с ростом температуры до 100 °C, а затем плавно уменьшается [5].

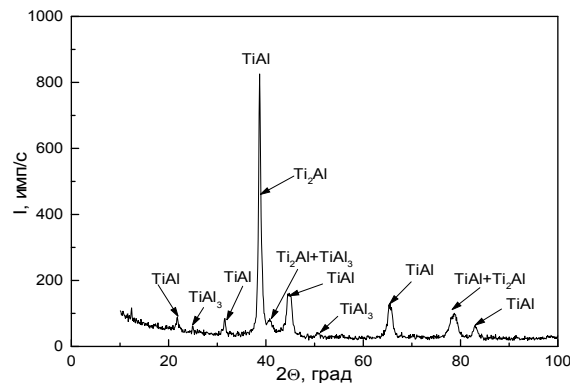


Рис. 4. Типичная дифрактограмма исследованного γ -сплава TiAl

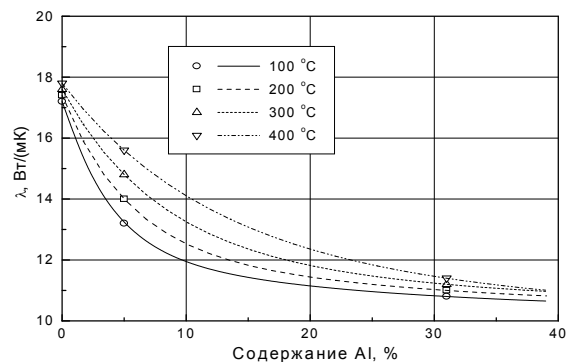


Рис. 5. Влияние содержания Al (вес. %) на коэффициент теплопроводности γ -сплава алюминиды титана при различных температурах

Для бинарных систем такое поведение коэффициента теплопроводности является типичным [10] и, по-видимому, связано с рассеиванием носителей тепла в сплаве (в основном электронов и фононов) на дефектах кристаллической решетки, которые образуются в результате внедрения атомов алюминия и добавок в кристаллическую решетку титана. Как показано в [10], минимум коэффициента теплопроводности бинарной системы достигается при 50 % содержании компонентов.

Заключение

Проведенные исследования теплофизических характеристик алюминиды титана показали, что с ростом содержания алюминия в сплаве значения удельной теплоемкости увеличиваются по сравнению с чистым титаном, а коэффициента теплопроводности уменьшаются.

Полученные данные о теплофизических характеристиках γ -сплава алюминиды титана (31% Al) были успешно использованы при расчете режимов сварки деталей из этого сплава [1].

Литература

1. Замков В.Н. Сварка давлением гамма-алюминиды титана / В.Н. Замков, В.К. Сабокар, П.Н. Четверо, С.В. Ахонин, И.К. Петриченко // Контактная сварка и другие виды сварки давлением. Технологии и оборудование: материалы 4-го Меж. семинара, 23-25 ноября 2007 г. – С-Пб., 2008. – С. 16-24.
2. Исаев К.Б. Определение коэффициента теплопроводности материалов // Промышленная тепло-техника. – 2004. – Т. 26, № 2. – С. 46-55.
3. Исаев К.Б. Теплофизические характеристики материалов в широких диапазонах температур и скоростей нагрева К.Б. Исаев. – К.: Куприянова, 2008. – 240 с.
4. Столович Н.Н. Температурные зависимости теплофизических свойств некоторых металлов / Н.Н. Столович, Н.С. Минуцкая. – Минск: Наука и техника, 1975. – 160 с.
5. Охотин А.С. Теплопроводность твердых тел. Справочник // А.С. Охотин, Р.П. Боровикова, Т.В. Нечаева, А.С. Пушкарский; ред. А.С. Охотин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 320 с.
6. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент. Справочник // Ред. В.А. Григорьев и В.М. Зорин. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.
7. Зиновьев В.Е. Кинетические свойства металлов при высоких температурах / В.Е. Зиновьев. – М.: Металлургия, 1984. – 200 с.
8. 1984. – 320 с. ASTM/ Diffraction Data Card Files JCPDS. Philadelphia, USA. – 1998.
9. Еременко В.Н. Титан и его сплавы / В.Н. Еременко. – К.: АН УССР, 1960. – 200 с.
10. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Справочная книга / Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.

Поступила в редакцию 1.06.2009

Рецензент: д-р техн. наук Г.А. Фролов, Институт проблем материаловедения им. И.Н. Францевича, Киев.

ТЕПЛОФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ γ -СПЛАВА АЛЮМІНІДА ТИТАНА

К.Б. Исаев, А.А. Рогозинська, С.В. Ахонин, В.К. Сабокар, Е.Л. Вржіжєвський

Визначені теплофізичні характеристики γ -сплава TiAl (31 % Al + добавки). Питома теплоємність алюмініда титана була визначена на стандартній установці ИТ-с-400, а коефіцієнт теплопровідності – вирішенням обернених задач теплопровідності. Для вирішення останньої задачі були експериментально визначені одновимірні температурні поля в зразках досліджуваного сплаву в умовах одностороннього нагріву. Було проведено рентгеноструктурний аналіз досліджуваного сплаву, було визначено його фазовий склад. Одержано, що зі зростанням змісту алюмінію в сплавах алюмініда титана його питома теплоємність зростає, а коефіцієнт теплопровідності зменшується.

Ключові слова: алюмінід титану, сплав, питома теплоємність, коефіцієнт теплопровідності, температурне поле.

THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF γ -ALLOY TITANIUM ALUMINIDE

K.B. Isayev, A.A. Rogozinskay, S.V. Akhonin, V.K. Sabokar', E.L. Vrzhezhevskiy

Thermophysical properties of γ -alloy TiAl (31 % Al + additions) are determined. The specific heat of the titanium aluminide was determined on standard installation IT-c-400, and thermal conductivity – by solving of inverse heat conduction problems. For the decision of the last task the one-dimensional temperature fields in samples of investigated alloy were experimentally determined in the conditions of the one-sided heating. The investigated alloy was subjected to the X-ray analysis as a result its phase structure was determined. As a result of the investigation it was received, that with growth of the contents of aluminium in alloys of titanium aluminide its specific heat is increased, and thermal conductivity decreases.

Key words: titanium aluminide, alloy, specific heat, thermal conductivity, temperature field.

Исаев Константин Борисович – д-р техн. наук, ст. научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича, Киев, Украина, isayev_k@gala.net.

Рогозинская Алла Александровна – научный сотрудник Института проблем материаловедения им. И.Н. Францевича, Киев, Украина.

Ахонин Сергей Владимирович – д-р техн. наук, заведующий отделом Института электросварки им. Е.О. Патона, Киев, Украина.

Сабокар Владимир Константинович – к-т техн. наук., ст. научн. сотр. Института электросварки им. Е.О.Патона, Киев, Украина.

Вржіжєвський Едуард Леонович – вед. інженер Інститута електросварки ім. Е.О.Патона, Київ, Україна.