

05;12
©1995

ОБ АНОМАЛЬНОМ ПОВЕДЕНИИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ КАРБИД ТИТАНА

А.В.Колубаев, В.В.Фадин

Исследования структуры и физико-механических свойств композиционных материалов TiC-Cu-Fe, полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) [1], выявили ряд особенностей, которые обусловлены спецификой горения твердых компонентов. Данный процесс характеризуется высокой скоростью протекания реакции и температурой более 2000 К в волне горения, что позволяет синтезировать сложные многофазные системы, отличающиеся от полученных традиционными методами. При такой температуре могут расплавиться любые компоненты, входящие в состав исходной смеси. Кроме того, высокие скорости нагрева и охлаждения в узкой зоне фронта волны горения исключают процессы ликвации и улучшают смачивание на границе раздела фаз. Так, например, абсолютно несмачиваемые карбид титана и медь при спекании в условиях СВС образуют псевдосплав с пористостью менее 2% и достаточно равномерным распределением частиц TiC [2]. Частичная замена меди железом в данной композиции приводит к повышению механических свойств, а также коэффициента теплопроводности (λ) [1]. Если первое можно объяснить более высокой смачиваемостью карбида титана железом по сравнению с медью, то второе кажется удивительным. Коэффициент теплопроводности железа значительно ниже, чем меди, поэтому можно ожидать, что замена в псевдосплаве компонента с высокой теплопроводностью на компонент с низкой должна привести к уменьшению теплопроводности сплава.

Рассмотрим возможную причину подобного поведения коэффициента теплопроводности композитов TiC-50%(Cu,Fe). Резко выраженные неравновесные условия горения смеси титана, углерода и металла наполнителя могут вызвать такое формирование микроструктуры продукта, когда вдоль фронта волны горения образуются микрообласти чистого металла, чередующиеся с областями, обогащенными карбидом титана. Весьма вероятно, что это микрорасслоение будет тем больше, чем больше угол смачивания между металлом и карбидом титана.

В системе TiC–Cu, в которой отсутствует смачивание между карбидом и медью, при изучении тонкой структуры материала действительно наблюдается расслоение. Механизм неравномерного распределения компонентов на микроуровне может реализоваться вследствие всплывания в волне горения отдельных конгломератов TiC. В объемы, освобожденные от карбида титана, затекает расплавленная медь. Таким образом возникают микрообласти расслоения.

Выделим в материале элемент в виде цилиндра с малым диаметром, в котором чередуются области, обогащенные и обедненные частицами карбида титана. Теплопроводность слоистого композита λ_k можно оценить с позиций обобщенной теории переноса [3], согласно которой коэффициент теплопроводности вычисляется из соотношения

$$1/\lambda_k = c_1/\lambda_1 + c_2/\lambda_2, \quad (1)$$

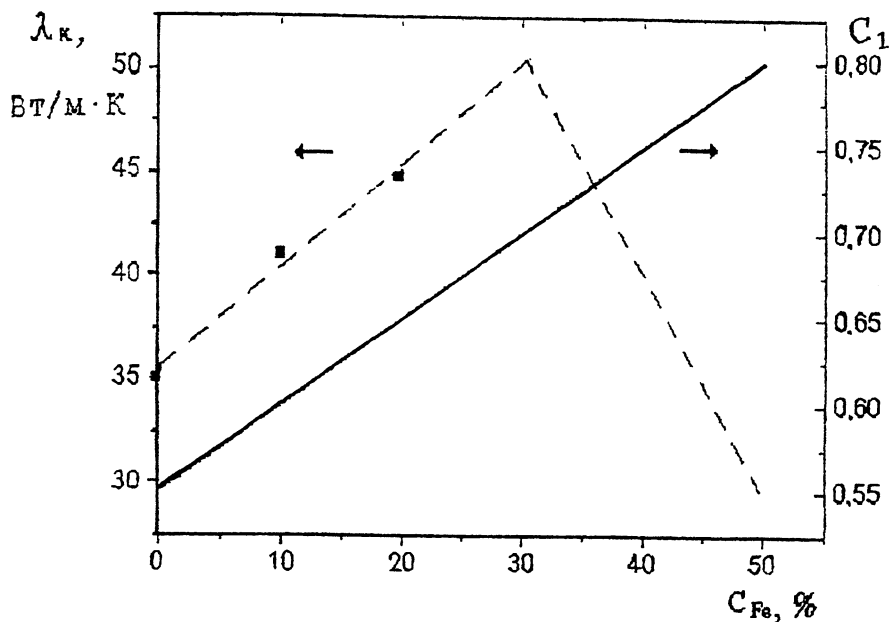
где c_1 и c_2 — объемные доли слоев с коэффициентами теплопроводности λ_1 и λ_2 соответственно.

Предположим, что теплопроводность каждого слоя подчиняется закону смешения. Тогда, согласно той же обобщенной теории переноса, коэффициент теплопроводности однородной смеси ($\lambda_{см}$) твердых частиц и связующего компонента равен:

$$\lambda_{см} = \lambda_{св} \left[\nu - (\nu - 1) \left(1 - m_n^{2/3} \right) m_n^{1/3} \right] \left[\nu - (\nu - 1) m_n^{1/3} \right]^{-1}, \quad (2)$$

где $\nu = \lambda_n/\lambda_{св}$, $\lambda_{св}$ и λ_n — коэффициенты теплопроводности связующего компонента и твердого наполнителя соответственно, m_n — объемная концентрация наполнителя в слое. Сделаем еще одно допущение. Будем считать, что слой 2 представляет собой медь, которая в результате реакции горения легируется примесями, присутствующими в порошках других компонентов. Тогда, учитывая, что $c_2 = (1 - c_1)$, $\lambda_1 = \lambda_{см}$, коэффициент теплопроводности технической меди $\lambda_2 = \lambda_{св} = 300 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ [4], коэффициент теплопроводности карбида титана — $7 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ [5], и решая совместно уравнения (1) и (2), можем оценить объемную долю слоя с равномерным распределением твердых частиц и наполнителя (c_1). Значение λ_k композиционного материала возьмем из эксперимента [1] (см. рисунок).

Рассуждая аналогичным образом, рассчитаем степень расслоения в композициях TiC–(Cu,Fe). При получении данных композиционных материалов методом СВС следует ожидать, что металлическая связка Cu–Fe после затвердевания образует эвтектику [6]. Коэффициент теплопроводности такой смеси может быть вычислен из соотношения (2).



Зависимость объемной доли TiC-Me и рассчитанного коэффициента теплопроводности композиции TiC-50%(Cu,Fe) от концентрации железа.

Далее, решая совместно уравнения (1) и (2) для композиций, содержащих 10 и 20% железа, и учитывая экспериментальные значения λ_k , можем оценить объемную долю c_1 слоя, в котором карбид титана и связка распределены равномерно.

Расчет показал, что при увеличении содержания железа объемная доля (c_1), занимаемая смесью TiC-Me, возрастет и при полной замене меди железом составляет 80% (см. рисунок). Данное расслоение, по-видимому, должно иметь место в силу ограниченной смачиваемости карбида титана железом. Рассчитанный коэффициент теплопроводности композиции TiC-50%(Cu,Fe) (λ_k) в зависимости от концентрации железа показан на рисунке пунктиром. Поскольку коэффициент теплопроводности композиции TiC-Fe ниже, чем у композиций с большим содержанием меди, то зависимость $\lambda(c_{Fe})$ имеет максимум.

Таким образом, возрастание коэффициента теплопроводности композиционных материалов TiC-Cu-Fe при замене металла с высокой теплопроводностью на металл с низкой обусловлен расслоением, зависящим от смачиваемости компонентов.

Список литературы

- [1] Колубаев А.В., Фадин В.В., Панин В.Е. // Изв. вузов. Физика. 1992. № 12. С. 64–68.
- [2] Фадин В.В., Колубаев А.В., Панин В.Е. // Изв. вузов. Физика. 1993. № 2. С. 21–24.
- [3] Дульнев Г.Н., Новиков В.Н. Процессы переноса в неоднородных средах. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 247 с.
- [4] Конструкционные материалы: Справочник / Под ред. Б.Н.Арзамасова. М.: Машиностроение, 1990. 687 с.
- [5] Бондаренко В.П. Триботехнические композиты с высокомолекулярными наполнителями. Киев.: Наук. думка, 1987. 232 с.
- [6] Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов. М.: Металлургия, 1962. 1488 с.

Институт физики прочности
и материаловедения СО РАН
Томск

Поступило в Редакцию
1 июня 1995 г.

