



МИКРОСКОПИЧЕСКИЙ ПРЕДЕЛ УПРУГОСТИ ОСАЖДЕННОГО ИЗ ПАРОВОЙ ФАЗЫ ТРЕХСЛОЙНОГО МАТЕРИАЛА СИСТЕМЫ Fe–Cu

Т. Т. Могильникова, Л. М. Нероденко, Б. А. Мовчан

Методом внутреннего трения определен микроскопический предел упругости трехслойного композиционного материала, полученного электронно-лучевым испарением и последующей конденсацией в вакууме. Исследована зависимость микроскопического предела упругости от чередования слоев. Установлено, что конденсаты Fe/Cu/Fe и Fe/Cu характеризуются наличием двух микроскопических пределов упругости. Высказано предположение о взаимосвязи микроскопических пределов упругости со структурой каждого слоя.

Microscopic limit of elasticity of a three-layer composite material, produced by electron beam evaporation and subsequent condensation in vacuum was determined by a method of internal friction. Dependence of a microscopic limit of elasticity on alternation of layers was studied. It was established that condensates Fe/Cu/Fe and Fe/Cu are characterized by the presence of two microscopic limits of elasticity. Assumption was made about interrelation of microscopic limits of elasticity with a structure of each layer.

Ключевые слова: электронно-лучевое испарение; трехслойные конденсированные материалы; микроскопический предел упругости; логарифмический декремент затухания.

В микрослойных конденсатах протяженность границы раздела между разнородными слоями в значительной мере определяет механические свойства материала. В работе [1] отмечалось, что структура границы раздела между чередующимися слоями (при толщине слоя $h > 10$ мкм) подобна большеугловой границе между зёрнами в поликристаллах. Так как микрослойные конденсаты имеют поликристаллическую структуру, средний размер зёрна в которых пропорционален толщине слоя, возможно путем изменения последней варьировать размер

зёрна и, следовательно, механические свойства материала, чувствительные к структуре. С увеличением толщины чередующихся слоев и, как следствие, уменьшением протяженности границы раздела возрастает роль свободной поверхности в определении механических свойств материала.

Цель настоящей работы — исследовать влияние состава, взаимного расположения слоев на микроскопический предел упругости τ_s трехслойных конденсатов в условиях испытания при комнатной температуре.

Микрослойные конденсаты (МСК) Fe/Cu/Fe и Cu/Fe/Cu в форме листа получали независимым испарением железа и меди в вакууме по методике, описанной в работе [2]. Исходным материалом служили слитки армо-железа двойного электронно-лучевого переплава и меди чистотой 99,99 %. С целью получить равновесную структуру осажденные осуществляли на подложку, нагретую до 600 °С. Объемное содержание железа и меди и толщина чередующихся слоев в микрослойных конденсатах приведены в таблице.

Плоские образцы, изготовленные из полученного материала, длиной 25 мм, шириной 3 мм и толщиной ~ 0,43 мм предварительно подвергали механическому шлифованию с обеих сторон для достижения одинаковой толщины внешних слоев. Для снятия механических напряжений образцы отжигали в вакууме при температуре 600 °С в течение часа. По результатам металлографических исследований [3] установлено, что в слоях железа формируется структура в виде столбчатых кристаллитов толщи-

Микрослойные конденсаты	V_{Fe}/V_{Cu} *	τ_{s1} , МПа	τ_{s2} , МПа	h_{Fe} , мкм	h_{Cu} , мкм
Fe/Cu/Fe	0,59/0,41	14,6	26,6	127	180
	0,58/0,42	14,6	27	125	180
	0,57/0,43	12,5	28	118	180
Cu/Fe/Cu	0,58/0,42	11	–	250	90
	0,59/0,41	11,9	–	250	85
	0,62/0,38	15	–	250	57
Fe/Cu	0,5/0,5	9,79	19,6	225	225
	0,5/0,5	9,2	20,2	220	220
	0,5/0,5	10,3	22,4	250	250
Железо	–	4,9	–	–	–
Медь	–	~ 2,9	–	–	–

* V_{Fe} и V_{Cu} — объемное содержание железа и меди.



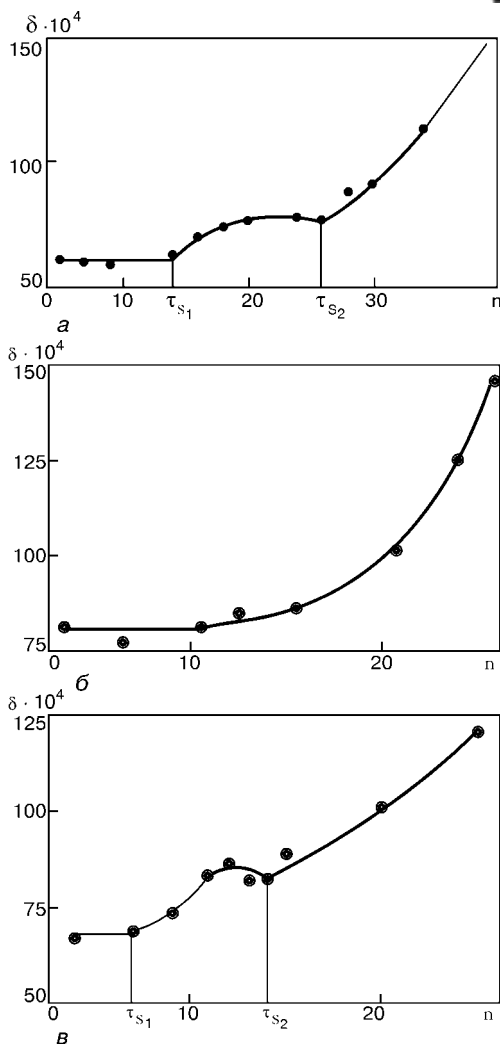
ной 13... 14 мкм, в слоях меди — равноосные зерна размером 22... 27 мкм. Дополнительный отжиг при 600 °С не приводит к изменению размера или формы зерна. Вследствие незначительной взаимной растворимости железа и меди в твердом состоянии между слоями образуется четкая концентрационная граница.

Микроскопический предел упругости определяли методом внутреннего трения. Мерой внутреннего трения служил логарифмический декремент затухания δ , измеряемый при одновременном приложении к образцу периодических свободно затухающих крутильных колебаний и монотонно нарастающего в пределах макроупругости закручивания [4]. Предел упругости соответствует минимальному напряжению сдвига, при достижении которого наблюдается возрастание внутреннего трения, т. е. происходит микропластическая деформация [5]. Частота колебаний 1... 1,25 кол/с. Максимальная относительная деформация, возникающая под воздействием знакопеременного напряжения, составляла $\sim 10^{-5}$. Скорость нарастания дополнительного касательного напряжения не превышала 1,55 МПа/с. Наибольшее касательное напряжение было ниже 1/2 предела упругости при деформации сдвигом. Для каждого варианта объемного соотношения содержащихся компонентов испытывали по три образца. Результаты измерений τ_{s1} и τ_{s2} приведены в таблице.

На рис. а представлена зависимость декремента затухания трехслойного конденсата Fe/Cu/Fe от числа колебаний n (величина дополнительного касательного напряжения пропорциональна числу колебаний). Как видно, δ немонотонно изменяется по мере нарастания касательного напряжения. При достижении напряжения 14,6 МПа декремент затухания резко возрастает, при дальнейшем повышении напряжения до 26,6 МПа происходит второе резкое увеличение δ . Таким образом, в МСК наблюдаются два микроскопических предела упругости τ_{s1} и τ_{s2} . При этом τ_{s2} почти вдвое превосходит τ_{s1} .

Понятно, что на механические свойства конденсата влияет не только количественное соотношение входящих в него компонентов, но и их взаимное расположение. Для сравнения исследования были выполнены на МСК Cu/Fe/Cu с таким же содержанием железа и меди, но с другим чередованием слоев (Fe/Cu/Fe). На рис. б представлены результаты измерения $\delta = f(n)$. Как видно, конденсат Cu/Fe/Cu в отличие от Fe/Cu/Fe имеет только один микроскопический предел упругости, равный 11,9 МПа.

Поверхность раздела является характерным элементом структуры МСК и оказывает влияние на механические свойства материала, поэтому представляло интерес выявить влияние границы на микроскопический предел упругости. С целью уменьшить протяженность межфазной границы из трехслойных конденсатов путем шлифования одного из поверхностных слоев получали двухслойные материалы с одной межфазной границей. В результате



Зависимость декремента затухания трехслойных конденсатов Fe/Cu/Fe (а), Cu/Fe/Cu (б) и двухслойного конденсата Fe/Cu (в) от числа колебаний

исследования установлено, что двухслойный конденсат Fe/Cu характеризуется наличием двух микроскопических пределов упругости, равных соответственно $\tau_{s1} = 9,8$ МПа и $\tau_{s2} = 20,7$ МПа (τ_{s1} и τ_{s2} — усредненные значения по данным измерений на трех образцах), отличающихся по величине в два раза (рис. в). Уменьшение протяженности межфазной границы приводит к снижению микроскопического предела упругости двухслойного конденсата по сравнению с соответствующими значениями как для Fe/Cu/Fe, так и для Cu/Fe/Cu. В то же время τ_{s1} конденсата Fe/Cu в два раза превосходит τ_{s1} конденсата чистого железа и в три раза — конденсата чистой меди. Повторное нагружение во всех случаях приводит к значительному повышению микроскопического предела упругости. Из таблицы видно, что конденсаты Fe/Cu/Fe и Cu/Fe/Cu с одинаковым объемным содержанием компонентов отличаются значением микроскопического предела упругости. Так, τ_{s1} конденсата Fe/Cu/Fe почти на 20 % выше τ_{s1} конденсата Cu/Fe/Cu. Это согласуется с тем, что конденсированный материал



Fe/Cu/Fe имеет более высокие значения предела текучести и предела прочности по сравнению с конденсатом Cu/Fe/Cu, измеренных при растяжении [3].

Выявление механизмов, обуславливающих поведение каждого слоя в зависимости от их взаимного расположения, выходит за рамки настоящей работы. Можно предположить, что на наличие двух микроскопических пределов упругости конденсатов Fe/Cu/Fe и двухслойных Fe/Cu могут влиять несколько факторов. Несомненно, механические свойства конденсатов определяются структурным состоянием каждого слоя, которое обусловлено многими факторами: толщиной слоев, физико-химическим взаимодействием на поверхности раздела, уровнем термических напряжений, возникающих в чередующихся слоях при остывании конденсата от 600 °С (температура подложки) до комнатной температуры вследствие существенного различия термических коэффициентов линейного расширения микрослоев. В отличие от микрослойных равнотолщинных конденсатов в данном случае существенное влияние может оказывать состояние поверхностного слоя, которое зависит также от многих факторов.

Выводы

1. Определено, что значение τ_s трехслойных конденсатов Fe/Cu/Fe и Cu/Fe/Cu, полученных

электронно-лучевым испарением и последующей конденсацией в вакууме, зависит от чередования слоев.

2. Установлено наличие двух микроскопических пределов упругости для трехслойных конденсатов Fe/Cu/Fe и двухслойных Fe/Cu.

1. Мовчан Б. А., Гречанюк Н. И. Структура и некоторые свойства микрослойных конденсированных материалов // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1984. — Вып. 20. — С. 68–73.
2. Мовчан Б. А. Получение новых неорганических материалов путем конденсации паровой фазы в вакууме // Вестник АН СССР. — 1985. — № 7. — С. 21–29.
3. Особенности деформации трехслойных конденсатов системы Fe/Cu / И. В. Бернадская, Л. М. Нероденко, Т. А. Молодкина, Б. А. Мовчан // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1990. — № 4. — С. 55–60.
4. Грабер Р. И., Могильникова Т. Т. К вопросу об определении предела упругости реальных твердых тел // Физика металлов и металловедение. — 1962. — 13, № 2. — С. 314–315.
5. Грабер Р. И., Могильникова Т. Т. Размножение дислокаций при совместном воздействии периодических и нарастающих напряжений // Кристаллография. — 1969. — 14, № 1. — С. 137–139.

Национальный научный центр

«Харьковский физико-технический институт»

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 24.10.2003

НОВАЯ КНИГА

Л. С. Киреев, В. В. Пешков, В. Ф. Селиванов Физико-химия процесса получения пористо-компактных материалов на основе титана.

Под ред. акад. Б. Е. Патона. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, 2003. — 354 с.



В монографии представлены особенности диффузионной сварки титановых пористо-компактных заготовок. Рассмотрено влияние на формирование соединения и уплотнение пористого материала технологических параметров сварки, микроструктуры соединяемых материалов, физико-химического состояния свариваемых поверхностей. Полученные результаты позволили оптимизировать параметры процесса диффузионной сварки пористых и компактных титановых заготовок.

Рассматривая задачу придания пористым заготовкам свойств металлокерамики, авторы провели анализ условий, обеспечивающих насыщение пористого материала по всему объему, выполнили комплекс исследований, дающих информацию о зависимости характеристик как пористого титана, так и сварочного соединения в целом от параметров химико-термической обработки.