

*Гомогенные пленки и пленки композитов Ni-ZrO<sub>2</sub>, Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ni-SiO<sub>2</sub>, содержащие от 0,1 до 2 об.% окисла, полученные вакуумным осаждением, исследовались методами просвечивающей электронной микроскопии, активного растяжения и релаксации напряжений. Структура высокопрочных пленок представляет собой субмикроструктурную матрицу Ni с нанодисперсными частицами окислов. Исследовалось влияние структуры на релаксационную стойкость гомогенных вакуумных пленок и композитов. Наибольшей релаксационной стойкостью обладают высокоотожженные пленки Ni. Была получена немонотонная зависимость относительной глубины релаксации от состава композитов.*

## О ВЛИЯНИИ СОДЕРЖАНИЯ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ФАЗЫ НА РЕЛАКСАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ ВАКУУМНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ NI

*\*А.И. Ильинский, \*\*С.И. Лябук, А.Н. Стеценко*

*\* Доктор физико-математических наук, профессор, зав.кафедры.*

*\*\* Ассистент кафедры*

*Кафедра Прикладного материаловедения Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»*

*Ул. Фрунзе, 21, Харьков, 61002, Украина*

*Конт. тел.: +38(0572)400-435*

### 1. Введение

Метод кристаллизации из паровой фазы в вакууме позволяет получать объекты с заданными структурой и, соответственно, свойствами. Гетерогенные материалы, представляющие собой металлическую матрицу с равномерно распределенными в ней высокодисперсными частицами второй фазы, обладают не только рекордным уровнем прочности, но и достаточно высоким уровнем других физических свойств. Уровень свойств в таких объектах зависит от степени дисперсности как частиц второй фазы, так и других структурных элементов, а также от формы включений и характера их распределения в матрице (рис.1). Как показали первые исследования дисперсноупрочненных композитов, их недостатком является сравнительно низкая релаксационная стойкость, что характерно для объектов с неравновесной структурой [1,2].

### 2. Описание эксперимента

Объекты исследования представляли собой вакуумные конденсаты Ni (температура получения 2800°C), толщиной до 40 мкм, упрочненные окислами Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, содержание которых составляло от 0,1 до 2 об.%.

Состав гомогенных пленок и композитов Ni контролировали рентгеноспектральным анализом и с помощью энерго-масс-анализатора (ЭМАЛ).

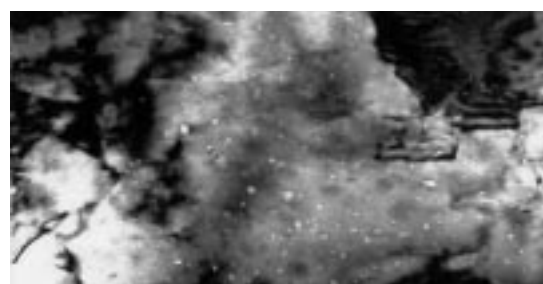
Структура исследовалась электронно-микроскопическим методом на микроскопе ЭМ-200.

Размер зерна гомогенных пленок варьировался отжигами при температуре 400°C, 600°C, 900°C, 1200°C и составлял в исходном состоянии 0,9 мкм и, соответственно после отжигов – 1,5 мкм, 2,5 мкм, 4 мкм, 6 мкм.

Дисперсноупрочненные и гомогенные конденсаты Ni подвергались механическим испытаниям в режиме активного растяжения и релаксации напряжений. Методика



а) x50 тыс.



б) x100 тыс.



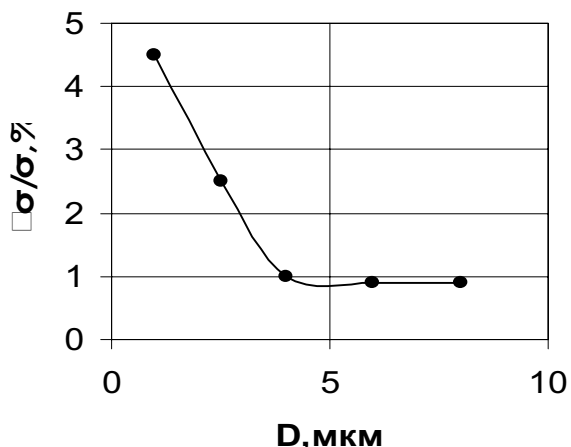
в) x270 тыс.

**Рисунок 1.** Микроструктура гомогенных пленок (а), композитов - Ni-SiO<sub>2</sub> (б), Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (в).

испытаний описана в работе [3]. Релаксационная стойкость (РС) оценивалась по величине, обратной относительной глубине релаксации -  $1/(\Delta\sigma/\sigma_0)$ . Начальное напряжение не превышало предела текучести  $\sigma_{0,1}$ .

### 3. Результаты и их обсуждение

В результате испытаний гомогенных пленок проводилась оценка релаксационной стойкости в зависимости от размера зерна. На рис.2. представлена зависимость относительной глубины релаксации от размера зерна в пленках Ni. Наибольшей релаксационной стойкостью обладают высокоотожженные пленки. С уменьшением размера зерна РС пленок заметно снижается. Объяснением служат структурные особенности вакуумных пленок, имеющих в исходном состоянии большое количество высокоугловых границ, которые в свою очередь характеризуются высокоэнергетическим неравновесным состоянием. Как известно, данные границы являются источниками подвижных дислокаций. С уменьшением размера зерна возрастает плотность зерновых границ и, соответственно подвижных дислокаций. Наличие микропористости в пленках [1] также снижает релаксационную стойкость. Пере-



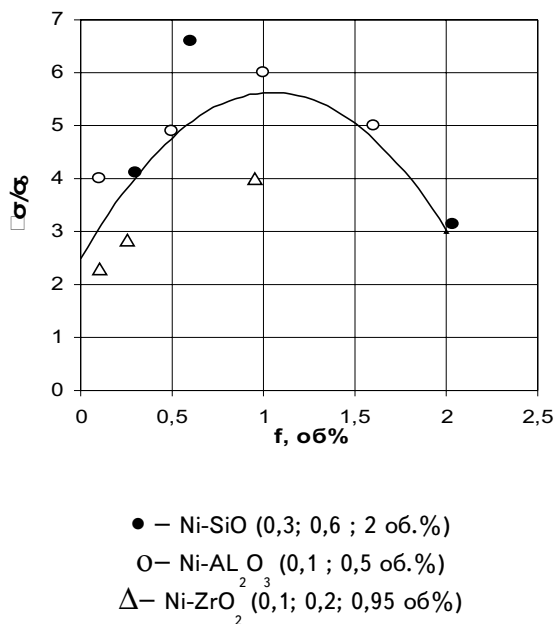
**Рисунок 2.** Зависимость относительной глубины релаксации от размера зерна в пленках Ni

численные выше факторы могут привести к микропроскальзыванию, что также способствует снижению релаксационной стойкости.

При отжиге с целью увеличения размеров зерна в первую очередь исчезают границы с повышенной энергией [1]. Поэтому проведение термообработки для выращивания зерен, меняет не один параметр (размер зерен), а два (размер зерна и состояние границ), не говоря уже об уменьшении плотности дислокаций вследствие рекристаллизационных процессов. Поэтому релаксационная стойкость после отжига повышается.

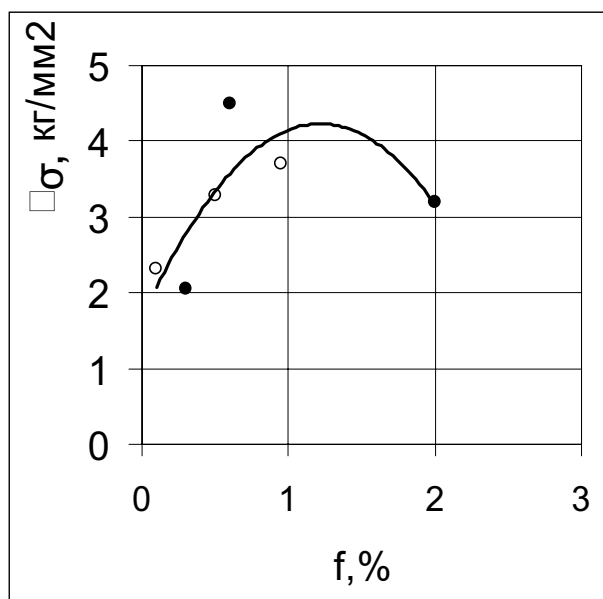
Также производилась оценка релаксационной стойкости дисперсноупрочненных композитов в зависимости от содержания упрочняющей фазы (f). Впервые была обнаружена немонотонная зависимость относительной глубины релаксации от состава композитов (см. рис.3). Данная зависимость имеет максимум, соответствующий 0,5-1 об.% концентрации.

Согласно термоактивационному анализу [1], глубину релаксации  $\Delta\sigma$  можно сопоставить с эффективными на-



**Рисунок 3.** Зависимость относительной глубины релаксации от состава композитов

пряжениями. Обращает на себя внимание тот факт, что зависимость  $\Delta\sigma$  от f также носит немонотонный характер с максимумом, в отличие от начального напряжения (пре-



**Рисунок 4.** Зависимость глубины релаксации от состава композитов

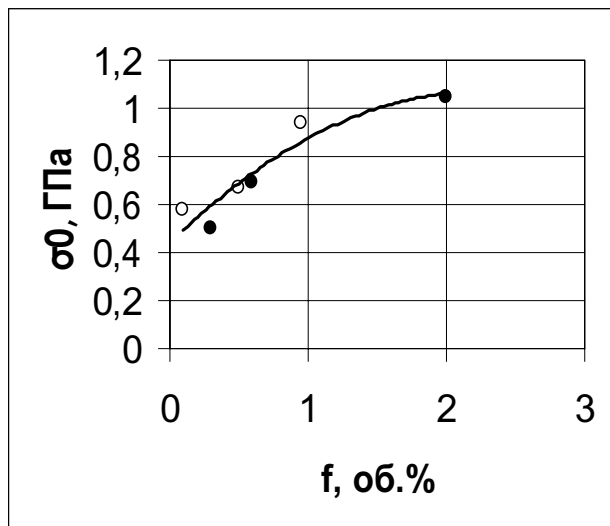
дела текучести) (рис.4,5). Одним из возможных вариантов объяснения является следующий.

Как известно, релаксация напряжений определяется плотностью подвижных дислокаций и зависит от свободного пробега дислокаций (в случае дисперсноупрочненных композитов свободный пробег дислокаций - L может быть равен расстоянию между частицами -  $\lambda$ ).

$$\Delta\sigma = M\Delta\varepsilon \tag{1}$$

$$\Delta\varepsilon = \rho\beta\lambda \tag{2}$$

где  $\rho$  - плотность подвижных дислокаций



**Рисунок 5.** Зависимость начального напряжения от состава композитов

$b$  – вектор Бюргера

$M$  – эффективный модуль образец-машина

При увеличении концентрации ( $f$ ) упрочняющей фазы расстояние между частицами уменьшается ( $\lambda$ ), а соответственно, и свободный пробег дислокаций ( $L$ ), но при этом возрастает плотность подвижных дислокаций ( $\rho$ ).

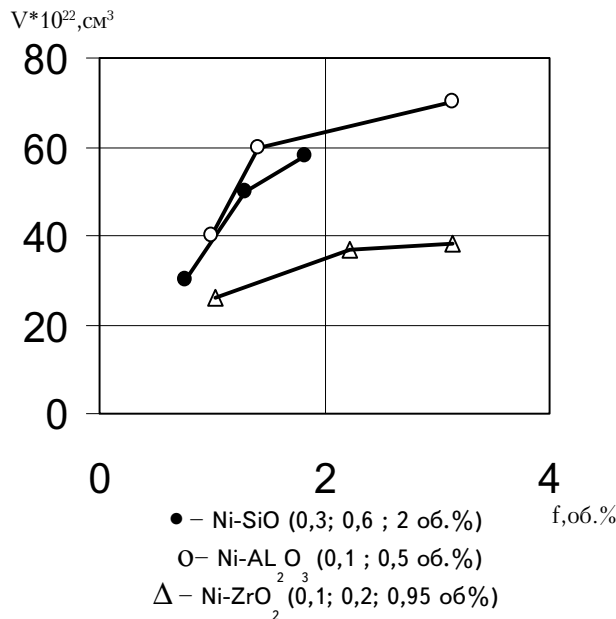
Таким образом, наличие перегиба на графике (рис.3) связано с конкурирующим влиянием частиц как источников подвижных дислокаций, так и барьеров (при концентрации, соответствующей максимуму на графике рис.3). При данной концентрации возможно также множественное скольжение в композитах.

В пользу данного предположения свидетельствует также резкое уменьшение активационного объема –  $V$  (рис.6) при увеличении концентрации окисла.

$$V = \beta d l \quad (3)$$

$l$  – термоактивируемый участок дислокаций, который уменьшается при наличии дополнительных барьеров движению дислокаций,

$d$  – ширина барьера.



**Рисунок 6.** Зависимость активационного объема от состава композитов

#### 4. Выводы

Физические и механические свойства конденсатов определяются структурой изменяющую которую в нужном направлении, можно получить конденсаты с высокой релаксационной стойкостью и прочностью. Экспериментальные исследования методами просвечивающей электронной микроскопии, активного растяжения и релаксации напряжений гомогенных пленок и пленок композитов Ni-ZrO<sub>2</sub>, Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ni-SiO, содержащих от 0,1 до 2 об.% окисла, полученные вакуумным осаждением, позволили установить, что структура высокопрочных пленок представляет собой субмикроструктурную матрицу Ni с нанодисперсными частицами окислов. Наибольшей релаксационной стойкостью обладают высокоотожженные пленки Ni. Получена немонотонная зависимость относительной глубины релаксации от состава композитов.

#### Литература

1. А.И.Ильинский. Структура и прочность слоистых и дисперсноупрочненных пленок, Металлургия, Москва (1986), с.141.
2. М.Л.Хенкин, И.Х.Локшин. Размерная стабильность металлов и сплавов в точном машиностроении и приборостроении, Машиностроение, Москва, (1975), с.255.
3. A.I.Linsky, S.I. Lyabuk, S.K. Kogut. Functional Materials, 8, 535, (2001)