

УДК 621.793

ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫЕ МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ МАХ - ФАЗ В СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И ТИТАНА

Е.А. Кнестяпин¹, Е.А. Петрикова², Ю.Ф. Иванов^{2,3}, А.А. Клопотов¹

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет

634003, Томск, пл. Соляная, 2

klopotovaa@tsuab.ru

²Институт сильноточной электроники Сибирского отделения РАН

634055, Томск, пр. Академический, 2/3

³Национальный исследовательский Томский политехнический университет

634050, Томск, пр. Ленина, 30

yufi55@mail.ru

Аннотация: Представлены результаты анализа структуры и свойств титанового сплава ВТ6 и силумина эвтектического состава после электровзрывного легирования и облучения высокоинтенсивным электронным пучком. Выявлено формирование МАХ - фаз состава Ti_3SiC_2 и Ti_3AlC .

Ключевые слова: силумин и титановый сплав ВТ6, электровзрывное легирование, электронно-пучковая обработка, МАХ - фазы.

В последние годы наметилась тенденция при анализе структурно-фазовых состояний металлических и металлокерамических систем использовать подход, основанный на представлении материала как сложной иерархической системы. Данный подход основан на использовании принципов минимума диссипации энергии [1], минимума производства энергии [2] и иерархической термодинамики [3]. В настоящее время активно разрабатываются материалы на основе МАХ - фаз, обладающих специфическими свойствами, сочетающими достоинства металлов и керамики, и занимающих особое место среди большого семейства тройных карбидов [4]. МАХ - фазы можно описывать как моноиерархические (однотипные) объекты, представимые в виде чередующихся определенным образом слоев. В литературе такой подход называют «модулярным принципом материаловедения» [5]. В нашем случае применение такого подхода означает, что структуры образуются последовательно из «блоков» разного уровня. При этом блоки организованы таким образом, что сами состоят из элементов меньшего масштаба и служат «элементами-кирпичиками» для блоков более высокого уровня. При образовании таких структур на каждом из иерархических уровней изменяются силы взаимодействия, которые, в конечном счете, определяют структуру материала. Разнообразное чередование слоев приводит к образованию широкого спектра элементарных ячеек МАХ – фазы с общей формулой $M_{n+1}AX_n$. МАХ – фазы представляют собой слоистую гексагональную структуру с пространственной группой

$D_{6h}^4 - P6_3/mmc$ с двумя формульными единицами в элементарной ячейке (см. рис. 1). MAX - фазы классифицируют в соответствии со значениями числа n : «211» для $M_2AX(n=1)$, «312» для $M_3AX_2(n=2)$, и «413» для $M_4AX_3(n=3)$. В системе $Ti-Si-C$ синтезированы сразу несколько MAX - фаз с составами $M_{n+1}AX_n$ и $M_{n+1}A_nX_n$ [4].

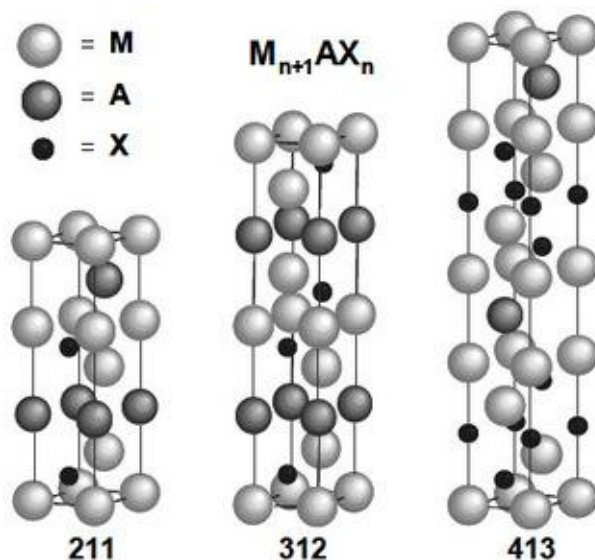


Рис. 1. Кристаллическая структура MAX - фаз карбидов (нитридов) с переходными металлами (M) со слоями из элементов A из групп $III A$ и $IV A$ [4].

Целью настоящей работы является анализ на различных структурно-масштабных уровнях условий и закономерностей образования структурно-фазовых состояний в материалах на основе алюминия и титана, упрочненных MAX - фазами.

В качестве материалов для исследования использовали сплав на основе титана $BT6$ и силумин эвтектического состава ($Al-12\%Si$). Синтез MAX - фаз осуществляли при комбинированной обработке выбранных материалов, сочетающей легирование поверхности плазмой, формирующейся при электрическом взрыве фольги титана и углеграфитового волокна (силумин) или углеграфитового волокна с навеской порошка карбида кремния (сплав $BT6$), и последующее облучение модифицированной поверхности высокоинтенсивным электронным пучком субмиллисекундной длительности. Электровзрывное легирование осуществляли на кафедре физики СибГИУ (Новокузнецк), облучение электронным пучком проводили в ИСЭ СО РАН (Томск) на установке «СОЛО». Фазовый состав и дефектную субструктуру модифицированного слоя изучали методами рентгеноструктурного анализа и дифракционной электронной микроскопии тонких фольг.

В результате исследований образцов силумина, выполненных методами рентгеноструктурного анализа, выявлено присутствие в модифицированном слое наряду с основными фазами (Al и Si), вторых фаз, объемная доля которых составляет $\sim 71\%$. Преобладающей второй фазой является карбид титана TiC . Наряду с карбидом титана выявлено формирование МАХ - фаз состава $Ti_3SiC_2 \sim 5\%$ и $Ti_3AlC \sim 3\%$.

При рентгенофазовом анализе сплава $BT6$ установлено, что основными фазами модифицированного слоя являются $\alpha-Ti$, TiC , SiC , $TiSi_2$ и Ti_3SiC_2 . После электровзрывного легирования суммарная объемная доля вторых фаз $\sim 35\%$, объемная доля $\alpha-Ti \sim 65\%$. Последующая электронно-пучковая обработка приводит к увеличению суммарного содержания вторых фаз до $\sim 73\%$. Одновременно с этим с ростом плотности энергии пучка электронов возрастает объемная доля МАХ - фазы Ti_3SiC_2 , достигая при плотности энергии пучка электронов 60 Дж/см^2 (100 мкс , 10 имп. , $0,3 \text{ с}^{-1}$) $\sim 28\%$ (см. рис. 2). Отметим, что после электровзрывного легирования объемная доля МАХ - фазы составляла $\sim 10\%$.

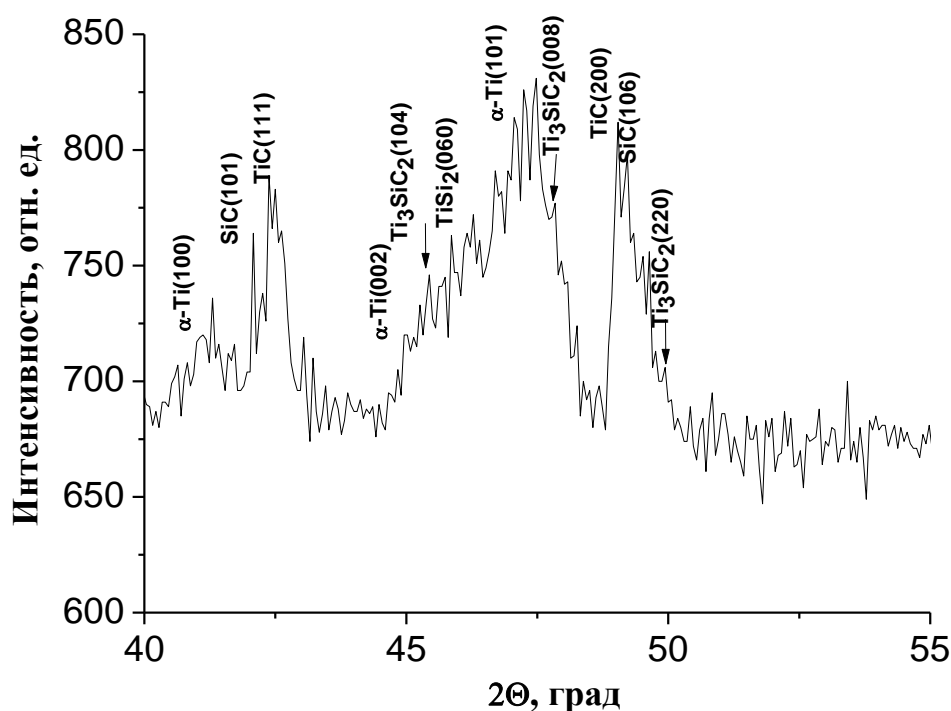


Рис. 2. Участок рентгенограммы модифицированного слоя титанового сплава $BT6$, подвергнутого электровзрывному легированию и последующей электронно-пучковой обработке (60 Дж/см^2 , 100 мкс , 10 имп. , $0,3 \text{ с}^{-1}$).

Электронно-микроскопические исследования поверхностного слоя образца сплава $BT6$, подвергнутого обработке плазмой, формирующейся при электрическом взрыве углеграфитового волокна с навеской порошка

карбида кремния и последующем облучении электронным пучком (60 Дж/см^2 , 100 мкс , 10 имп. , $0,3 \text{ с}^{-1}$), выявили формирование сложного структурно-фазового состояния модифицированного слоя. Характерное электронно-микроскопическое изображение структуры модифицированного слоя сплава *ВТ6* приведено на рис. 3. На светлопольных изображениях структуры (см. рис. 3, а, б) выявляется крапчатый контраст с размером элементов контраста от 5 нм до 8 нм . Характерная микроэлектроннограмма, соответствующая такой структуре, представлена на рис. 3, в. Отчетливо видно, что микроэлектроннограмма имеет сложное квазикольцевое строение с высоким уровнем азимутального и радиального размытия рефлексов. Последнее может свидетельствовать и о нанокристаллическом состоянии анализируемого объема материала, и о высоком уровне упругих искажений кристаллической решетки матрицы, и о присутствии на данном участке фольги некоторого набора фаз, и о вариации параметра кристаллической решетки матрицы.

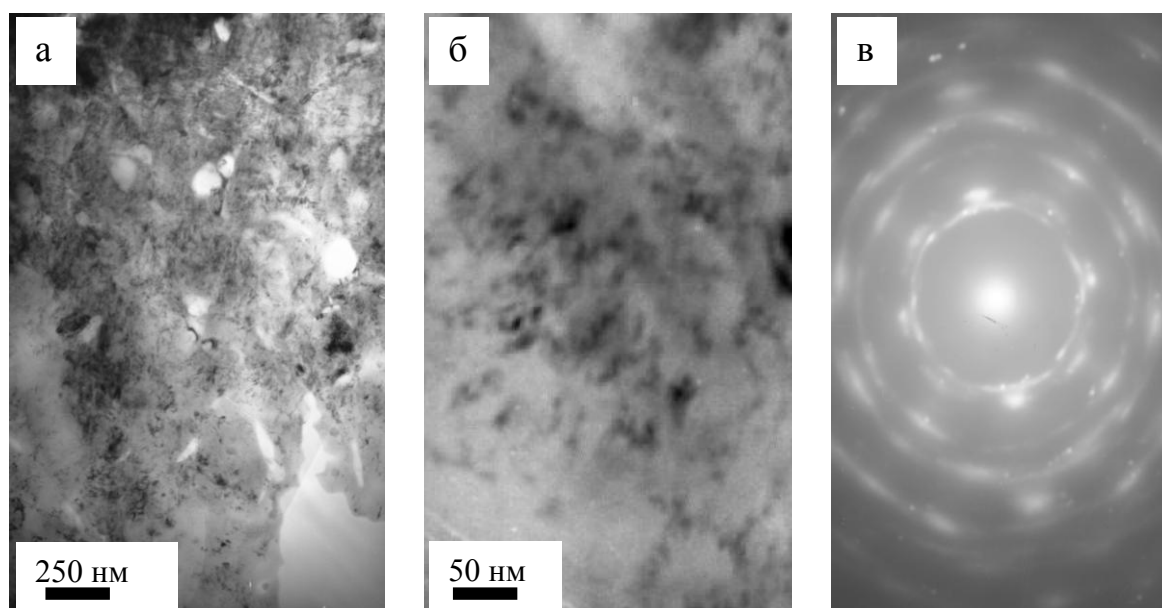


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение структуры, формирующейся в поверхностном слое титанового сплава *ВТ6*, подвергнутого электровзрывному науглероживанию с навеской порошка карбида кремния и последующему облучению электронным пучком: а, б – светлые поля, в – микроэлектроннограмма, соответствующая данному участку фольги.

Таким образом, комплексная обработка сплавов на основе алюминия (силумин) и титана (*ВТ6*), заключающаяся в облучении поверхности образцов плазмой, формирующейся при электрическом взрыве фольги титана и/или углеродистого волокна с навеской порошка карбида кремния и последующем облучении высокоинтенсивным импульсным

электронным пучком, сопровождается формированием многофазной наноразмерной структуры. Наряду с другими, в исследованных материалах выявлено формирование MAX - фаз состава Ti_3SiC_2 и Ti_3AlC . Относительное содержание MAX-фазы состава Ti_3SiC_2 в сплаве ВТ6 достигает ~28 %, в сплаве $Al-12\%Si$ ~5 %. Можно предположить, что одной из причин столь существенного различия в относительном содержании в исследуемых сплавах MAX фазы состава Ti_3SiC_2 обусловлено присутствием в модифицированном слое сплава ВТ6 SiC-кластеров. Последнее означает, что в системе $Ti-Si-C$ возможен синтез карбидокремниевых фаз, аналогов MAX-фаз, в результате создания неравновесных условий при обработке материала концентрированными потоками энергии (потоки плазмы, формирующиеся при электрическом взрыве проводников, высокоинтенсивные электронные пучки, компрессионные потоки плазмы и т.д.).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ (проекты № 13-08-00416 и №13-04-98084), программы Президиума РАН №24 (проект №17), а также государственного задания «Наука» Минобрнауки РФ.

Библиографический список:

1. **Моисеев, Н.Н.** Алгоритмы развития / Н.Н. Моисеев. – М.: Наука. – 1987. – 303 с.
2. **Пригожин, И.** Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой / И. Пригожин, И. Стенгерс. – М.: Прогресс. – 1986. – 432 с.
3. **Гладышев, Г.П.** Термодинамика и макрокинетика природных иерархических процессов / Г.П. Гладышев. – М.: Наука. – 1989. – 290 с.
4. **Palmquist, J-P.** Carbide and MAX-phase engineering by thin film synthesis / J-P. Palmquist // Comprehensive Summaries of Uppsala. Dissertations from the Faculty of Science and Technology. – Uppsala: Acta Universitatis Upsaliensis, 2004. – № 930. – 70 p.
5. **Мошников, В.А.** Исследование свойств наноматериалов с иерархической структурой, полученных золь-гель методом / В.А. Мошников, И.Е. Грачева, М.Г. Анычков // Физика и химия стекла. – 2011. – Т. 37. – № 5. – С. 38-50.