

На правах рукописи
УДК 536.46, 620.22

Носырев Антон Николаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСТРУКТУР
И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СИНТЕЗА
ИНТЕРМЕТАЛЛИДОВ НА ИХ ОСНОВЕ

Специальность 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Антон

Москва – 2004

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор ХВЕСЮК В.И.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор КИСЕЛЕВ М.И.
кандидат технических наук,
стар. науч. сотрудник ХОХЛОВ Ю.А.

Ведущая организация: Институт металлургии и материаловедения
им. А.А. Байкова РАН

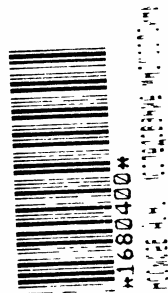
Защита состоится “__” _____ 2004 г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д212.141.08 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Лефортовская наб., д. 1, кор. “Энергомашиностроение”.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д212.141.08. Автореферат разослан “__” _____ 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



КОПОСОВ Е.Б.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В последнее десятилетие появились перспективные направления науки и техники: микромеханика, наноэлектроника и др., для успешного развития которых и перехода на другой качественный уровень необходимо создание материалов принципиально новых типов.

Одним из таких перспективных классов материалов для микро- и нанотехнологий являются многослойные наноструктуры, которые представляют собой пленки (фольги, покрытия), состоящие из чередующихся слоев толщиной (1...100) нм и количеством до нескольких тысяч различных материалов компонентов: металлов, полупроводниковых материалов, диэлектриков и др. В силу сочетания специфических особенностей слоистых систем и неординарных свойств нанообъектов различные типы многослойных наноструктур (многослойные пленки, наноламинаты) проявляют уникальные электрические, магнитные, теплофизические и механические свойства. Благодаря этому наноламинаты находят все более широкое использование в датчиках магнитного поля, устройствах хранения информации, оптических системах, в качестве защитных покрытий и др., обеспечивая значительное уменьшение габаритов и повышение чувствительности измерительных устройств, значительное плотности записи информации и т.д.

Большой интерес для создания малогабаритных, размером менее (3...5) мм, механических устройств: мембранных микродатчиков давления, микроклапанов, микроманипуляторов, и др. представляет использование многослойных металлических наноструктур бинарного состава, обладающих в ряде случаев уникальными теплофизическими свойствами.

При определенных условиях: толщине слоев, стехиометрии, начальной температуре и др. наноламинаты такого типа проявляют специфические теплофизические свойства и представляют собой метастабильную термодинамическую систему. В метастабильных многослойных наноструктурах возможно инициирование самоподдерживающейся реакции взаимодействия компонентов слоев – самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). В результате инициирующего внешнего теплового воздействия по слоистой системе распространяется фронт реакции, компоненты слоев взаимодействуют, образуя интерметаллиды. В итоге, после прохождения фронта реакции слоистая структура исчезает, и многослойная пленка преобразуется в пленку интерметаллида.

ГТУ
№ 3 Баумана
Директор

Использование таких пленок интерметаллидов представляет большую актуальность в качестве элементов конструкции микродатчиков и микромеханизмов, которые должны работать при воздействии высоких температур, в химически активных средах, обладая наряду с этим металлическими свойствами: подвижных пленочных микроконтактов, механических мембран емкостных преобразователей, микрозеркал и др.

В связи с этим, исследование вопросов создания многослойных металлических наноструктур бинарного состава, изучение их свойств и особенностей синтеза на основе наноламинатов пленок интерметаллидов представляют большой практический интерес.

Цель работы

Исследование структуры и свойств металлических многослойных наноструктур бинарного состава и теплофизических процессов синтеза интерметаллидов на их основе.

Научная новизна работы

1. Экспериментально обнаружена зависимость эффекта упорядочивания кристаллической структуры материала многослойных пленок от компонентного состава.

2. Экспериментально исследованы теплофизические процессы образования интерметаллидов из многослойных метастабильных наноструктур Ti/Al и Hf/Al в процессе самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

3. Экспериментально обнаружены зависимости скорости распространения фронта реакции синтеза и степени деформации пленок интерметаллидов от температуры внешнего нагрева и толщины слоев исходной метастабильной системы.

4. Впервые обнаружен эффект наследования кристаллографических особенностей (наследования текстуры) исходных метастабильных многослойных систем, материалом пленок интерметаллидов, синтезированных на их основе.

Практическая ценность работы

1. Показана практическая возможность получения многослойных наноструктур при использовании металлических пар: Ti/Al; Hf/Al; Ta/Al; Nb/Al; Cu/Al; Ni/Al, с толщиной слоев от десятков до единиц нанометров и количеством слоев свыше 2000.

2. Показана практическая возможность получения методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза на основе метастабильных структур бинарного состава тонких пленок интерметаллидов контролируемой стехиометрии.

3. Изучено влияние внешнего нагрева и толщины нанослоев исходного многослойного субстрата на качество синтезируемых интерметаллических пленок.

На защиту выносятся:

1. Результаты комплексного экспериментального исследования многослойных наноструктур состава Ti/Al; Hf/Al; Ta/Al; Nb/Al; Cu/Al; Ni/Al, полученных на экспериментальном оборудовании, включающие в себя: изучение слоистой наноструктуры, изучение химического состава, исследование кристаллографических особенностей, исследование топологии поверхности пленок.

2. Результаты теплофизических исследований различных режимов синтеза интерметаллических пленок Hf/Al Ti/Al из многослойных наноструктур в зависимости от способа инициирования реакции, температуры предварительного прогрева, стехиометрии, параметров структуры.

3. Результаты исследований свойств интерметаллических пленок, синтезированных на основе многослойных наноструктур Hf/Al и Ti/Al, включающих в себя исследование структурных изменений на этапе взаимодействия компонентов слоев исходных многослойных пленок, структуры и химического состава конечных продуктов синтеза.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических семинарах кафедры «Теплофизика» МГТУ им. Н. Э. Баумана, МАИ, Институте Общей Физики РАН, на XXVIII Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (Звенигород 2001), на научно-методических семинарах «Нанотехнологии, наноструктуры и микромеханика» МГТУ им. Н. Э. Баумана, на 1-ом российско-французском семинаре по СВС (Черноголовка, 2003), на Всероссийской школе-семинаре по структурной макрокинетике для молодых ученых (Черноголовка, 2003).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения. Работа содержит 233 страниц машинописного текста, в том числе 65 рисунков, библиографию из 83 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, определена цель и поставлены задачи работы, сформулированы положения, определяющие новизну и практическую ценность полученных результатов, перечислены положения, выносящиеся на защиту.

Анализ литературных источников свидетельствует, что многослойные наноструктуры находят все более широкое применение в различных областях науки и техники. Это обусловлено, прежде всего, выявлением у наноламинатов специфических электрических, магнитных, механических, теплофизических и оптических свойств.

На сегодняшний день следует выделить несколько типов многослойных наноструктур, получивших наиболее широкое распространение:

1. Многослойные пленки, обладающие эффектом гигантского магнитосопротивления, которые находят все более широкое применение в системах хранения информации, датчиках магнитного поля и др.

2. Многослойные нанокompозитные защитные покрытия, обладающие экстремально высокой твердостью, хорошей стойкостью к воздействию высоких температур и химически активных сред.

3. Кроме того, многослойные наноструктуры находят применение в качестве накопителей электрической энергии большой емкости, в коротковолновой оптике, в качестве пленочных подвижных элементов различного рода малогабаритных устройств.

Новое перспективное направление – использование многослойных наноструктур в качестве специализированных химических субстратов для получения (синтеза) на их основе сверхтонких мембран и фольг интерметаллидов методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (рис.1).

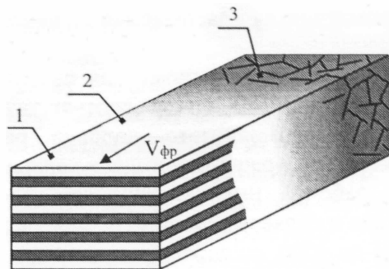


Рис. 1. Распространение фронта экзотермической реакции по многослойной структуре:

1 – исходная многослойная структура, 2 – раскаленная область фронта реакции, 3 – остывающие продукты синтеза, $V_{фр}$ – скорость распространения фронта реакции

Отмечено, что, несмотря на большой интерес к использованию пленок такого типа в конструкции различных малогабаритных механических устройств и появлению ряда интересных работ на эту тему, на настоящий момент направление изучено недостаточно.

В результате проведенного анализа данных литературы в конце главы были сформулированы задачи настоящей работы.

В первой главе приведено описание экспериментального оборудования, которое было создано для проведения исследований по созданию многослойных и сверхмногослойных наноструктур, перечислены и даны характеристики основных и вспомогательных систем. Исследования проводились на двух различных экспериментальных установках:

1. Экспериментальном стенде для создания металлических многослойных и сверхмногослойных наноструктурированных материалов и покрытий бинарного состава методом магнетронного напыления.

2. Экспериментальном стенде для получения многослойных и сверхмногослойных наноструктурированных материалов и покрытий методом ионно-лучевого распыления.

В первом варианте получение многослойных наноструктур осуществлялось путем одновременного осаждения атомов различных материалов на различные подложки, закрепленные на вращающемся водоохлаждаемом подложкодержателе. Потоки атомов формировались с помощью с помощью двух магнетронных распылительных систем постоянного тока (магнетронов). В стандартном оснащении, конструкция

магнетронов предусматривала распыление немагнитных металлов и сплавов.

Толщина слоев и общая стехиометрия создаваемых многослойных пленок (соотношение толщины слоев соответствующих компонентов), регулировались путем независимого подбора разрядных параметров магнетронов и скорости вращения подложкодержателя. Оборудование позволяло за один рабочий цикл формировать слоистые структуры из немагнитных металлов и сплавов с толщиной слоев в диапазоне (6...500) нм и количеством слоев до 4000, со скоростью напыления до 120 нм/мин. Для снижения внутренних механических напряжений в многослойных пленках магнетроны были адаптированы для работы при повышенных давлениях рабочего газа Ar (1...5) Па.

Во втором варианте получение многослойных наноструктур осуществлялось методом попеременного осаждения атомов различных материалов на подложки, закрепленные стационарно. Соответствующие атомные потоки создавались вследствие распыления мишеней из материалов-компонентов с помощью технологического ионного ускорителя.

В качестве технологического ускорителя использовался ускоритель с анодным слоем. Формирование слоистого строения у пленок достигалось вследствие последовательной экспозиции мишеней в ионном пучке. Толщина слоев и общая стехиометрия многослойных пленок определялись временем экспозиции мишеней в ионном пучке. Оборудование позволяло за один рабочий цикл формировать слоистые структуры с толщиной слоев в диапазоне (6...500) нм и количеством слоев до 5000, со скоростью до 50 нм/мин. Использование ионного ускорителя как инструмента для распыления, позволило значительно увеличить круг используемых материалов-компонентов наноструктур: это могут быть различные металлы (в том числе магнитные), диэлектрические материалы, полупроводники; и, таким образом, значительно расширить исследовательские возможности оборудования при снижении производительности системы, по сравнению с магнетронным вариантом.

Во второй главе приведены результаты экспериментальных исследований микро- и наноструктуры многослойных образцов, полученных на экспериментальном оборудовании.

Изучалась слоистая структура многослойных образцов, химический состав, кристаллографическая структура и топология поверхности полученных пленок. Исследование проводилось с привлечением методов и средств растровой и просвечивающей электронной микроскопии, Оже-

спектроскопии, сканирующей туннельной микроскопии и рентгеноструктурного анализа.

В экспериментах использовались образцы многослойных наноструктур, сформированных из пар металлов, способных вступать в экзотермическую реакцию (метастабильных многослойных наноструктур) с образованием интерметаллических соединений Ti/Al; Hf/Al; Ta/Al; Nb/Al; Cu/Al; Ni/Al, с толщиной слоев от десятков до единиц нанометров и количеством слоев до 2500. Для диагностики использовались как многослойные пленки на соответствующих подложках, так и предварительно отделенные от них - в виде фольги.

В результате исследований было выявлено наличие у образцов пленок ярко выраженной слоистой структуры, со слоями, ориентированными параллельно поверхности пленок, которая сохраняется вплоть до сверхмалой толщины слоев в несколько нанометров (рис. 2). Наряду со слоистой структурой была обнаружена поликристаллическая столбчатая структура пленок, с преимущественной ориентацией кристаллитов вдоль направления роста пленки (перпендикулярно поверхности пленки).

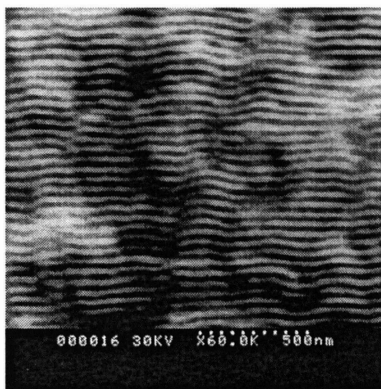


Рис. 2. Вид нанослоев на поперечных сколах многослойных пленок Ta/Al (сканирующий электронный микроскоп). Увеличение $\times 60000$

Исследования химического (элементного) состава, проведенные методами послылойной Оже-спектроскопии, с диагностикой в направлении перпендикулярно к поверхности пленок, подтвердили наличие чередующихся слоев из различных компонентов.

Поверхность многослойных образцов имеет зернистую структуру, отдельные зерна имеют округлую форму и плотно прилегают друг к другу. Рисунок поверхности является следствием поликристаллического строения многослойных пленок и формируется в результате сопряжения столбчатых зерен кристаллитов, формирующих многослойную пленку.

Методами рентгеноструктурного анализа исследовались кристаллографические особенности многослойных пленок. В результате экспериментов было подтверждено наличие у образцов кристаллического строения. В зависимости от кристаллографического соответствия металлов-компонентов сопряженных слоев многослойных пленок обнаруживаются различную степень упорядоченности структуры. У наноламинатов состава Ti-Al проявляется сильная текстура материалов-компонентов слоев, при которой кристаллографические плоскости с плотнейшей упаковкой атомов ориентированы вдоль поверхности многослойных образцов. Многослойные пленки системы Hf/Al имеют аналогичную текстуру, но гораздо менее выраженную, что, очевидно, связано с большим отличием атомных радиусов элементов по сравнению с системой Ti/Al, при сохранении сходного характера размещения атом в плоскостях с наиплотнейшей упаковкой. У многослойных пленок с плохим кристаллографическим соответствием компонентов (Ta/Al, Nb/Al) текстура отсутствует, хотя пленки сохраняют кристаллическое строение.

В третьем главе приведены результаты исследований теплофизических процессов, происходящих с метастабильными многослойными наноструктурами в результате процесса распространения фронта экзотермической реакции взаимодействия компонентов слоистой системы - самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. В процессе экспериментов было изучено влияние внешнего нагрева, способов инициирования реакции, структурных параметров исходных метастабильных многослойных пленок на характер протекания экзотермической реакции и качество синтезируемых пленок интерметаллидов. Были проведены измерения температуры нагрева материала пленок во фронте экзотермической реакции. Иницирование реакции проводилось методом быстрого локального прогрева: от искрового пробоя на пленку через ножевые графитовые контакты и от раскаленной металлической проволоочки; а также методом постепенного общего прогрева всей пленки теплом от источника радиационного нагрева. При исследовании акцент был сделан на исследование экзотермической реакции в многослойных структурах со сходным строением Ti/Al и Hf/Al. Реакция проводилась на образцах пленок, отделенных от соответствующих подложек – фольгах.

При локальном инициировании, в зависимости от величины внешнего нагрева и толщины слоев исходных метастабильных многослойных пленок обнаружено два режима распространения фронта экзотермической реакции: пульсирующий и режим с постоянной скоростью.

В пульсирующем режиме фронт реакции распространяется от места инициирования по образцу рывками (пульсациями). Во фронте поверхность образец подвергается короблению, причем характер неровностей совпадает с местами кратковременных остановок фронта реакции. После остывания неровности остаются на поверхности пленки интерметаллида.

В режиме с постоянной скоростью фронт реакции распространяется по многослойным образцам равномерно. Образцы интерметаллических пленок, синтезированные на основе многослойных наноструктур в таком режиме после остывания сохраняют исходную форму.

Переход из пульсирующего режима в режим с постоянной скоростью наблюдается при увеличении внешнего нагрева и уменьшении толщины слоев исходных многослойных пленок.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что наиболее приемлемыми с точки зрения технологий получения интерметаллических пленок на основе многослойных наноструктур Ti/Al и Hf/Al являются режимы с использованием наноламинатов с толщиной слоев менее 50 нм и температурой начального нагрева образца свыше 200 °C. В этом случае реакция распространяется без пульсаций, что обеспечивает хорошее качество поверхности интерметаллических пленок.

При увеличении температуры внешнего нагрева до (350...400)°C реакция синтеза возникает в многослойных метастабильных пленках спонтанно, без локального инициирующего воздействия. При этом пленки также сохраняют форму исходных многослойных образцов.

Измеренные средние скорости реакции синтеза оказались намного выше, чем в известных порошковых экзотермических смесях аналогичного состава (рис. 3).

В большинстве случаев скорость распространения реакции составила более 10 см/с и при больших температурах внешнего прогрева свыше 200 °C превышала 50 см/с. В порошковых смесях скорость обычно не превышает 1 см/с. Наличие высокой скорости в метастабильных многослойных наноструктурах обусловлено малой толщиной слоев реагентов и хорошим контактом между слоями, вследствие отсутствия примесей по границе раздела слоев, что обеспечивает лучшие условия для протекания реакции.

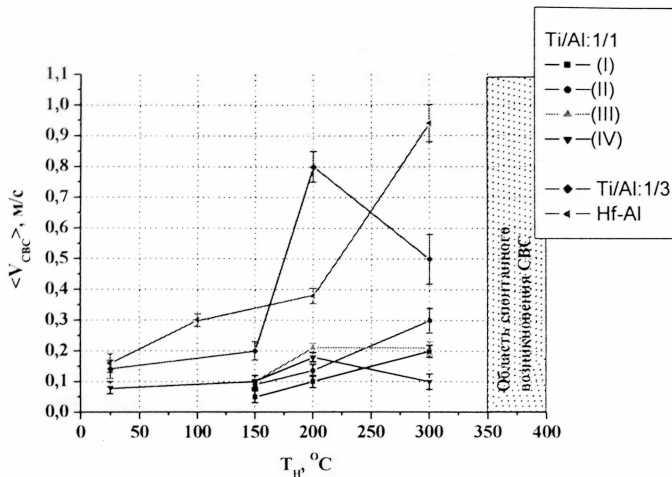


Рис. 3 Зависимость средней скорости высокотемпературного самораспространяющегося синтеза $\langle V_{CBC} \rangle$ в многослойных пленках от температуры начального нагрева T_H

В результате выделения энергии во фронте реакции синтеза интерметаллидов развиваются высокие температуры. Измерения скоростным пирометром для двух композиций Hf/Al, Ti/Al зафиксировали максимальные значения измеренных температур в диапазоне (1300...1400)°C (рис. 4).

Это значительно выше, чем температура плавления ($T_{пл}$) одного из исходных реагентов – Al (660,4°C), но ниже значения другого компонента многослойной системы – Ti (1670°C) и Hf (2231°C). Кроме того, максимальное значение измеренных температур оказалось ниже, чем температура плавления интерметаллических соединений, образовавшихся в результате реакции: $T_{пл}^{TiAl} \sim (1415...1445^\circ\text{C})$; $T_{пл}^{TiAl^{1/3}} \sim 1395^\circ\text{C}$; $T_{пл}^{HfAl} \sim 1550^\circ\text{C}$ и температуры полиморфного превращения титана $\alpha\text{Ti} \rightarrow \beta\text{Ti}$ (882°C).

Зафиксированные особенности указывают на наличие значительных структурных изменений в многослойных пленках, которые происходят непосредственно на стадии их прогрева в области, сопряженной с зоной реакции и позволяют оценить характер процессов, развивающихся на микроскопическом уровне при образовании интерметаллида.

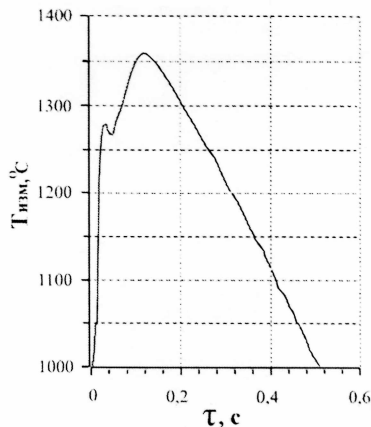


Рис. 4. Изменение температуры образцов пленки состава Ti/Al:1/1 в процессе синтеза интерметаллида TiAl (температура начального нагрева $T_H = 150^\circ\text{C}$)

В четвертой главе представлены результаты исследования структуры интерметаллических пленок, полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза на основе многослойных метастабильных структур. Были зафиксированы изменения, происходящие в многослойных пленках на всех структурных уровнях на стадии синтеза интерметаллических соединений.

В результате прохождения фронта реакции происходит исчезновение слоистой структуры, и пленка гомогенизируется по составу. Процесс исчезновения слоистой структуры зафиксирован на основе исследования сколов на сканирующем электронном микроскопе образцов пленки после завершения реакции синтеза.

Исчезновение слоев и образование интерметаллидов исследовалось при постепенном нагреве ультратонких срезов многослойных образцов на просвечивающем электронном микроскопе. Основными центрами зарождения новых фаз являются границы кристаллических зерен: наиболее энергично компоненты слоев начинают взаимодействовать вблизи границ кристаллических зерен, а затем, по мере увеличения нагрева, область реакции перемещается вглубь кристаллита (рис. 5).

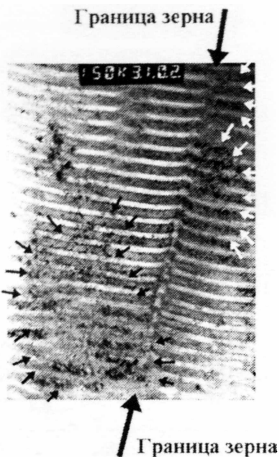


Рис. 5. Исчезновение слоистой структуры в процессе нагрева многослойной пленки. Границы кристаллических зерен и области исчезновения слоев выделены стрелками (просвечивающий электронный микроскоп). Увеличение $\times 150000$

Данные об исчезновении слоистой структуры и выравнивании химического состава в объеме пленок после реакции были получены с помощью Оже-спектроскопии. Исследование продуктов, синтезированных из многослойных наноструктур с различным соотношением компонентов, показало, что выравнивание химического состава происходит с учетом сохранения общей стехиометрии пленок.

Наряду с процессами исчезновения слоев происходит трансформация на уровне поликристаллического строения: столбчатая структура пленок исчезает.

Данные рентгеноструктурного анализа свидетельствуют, что после завершения химической реакции основными фазами являются фазы интерметаллидов. Образование интерметаллических соединений происходит в хорошем соответствии с фазовыми диаграммами пар металлов, что создает возможность управлять конечным составом интерметаллических пленок, подбором оптимальной стехиометрии исходных многослойных наноструктур.

Интересным феноменом, обнаруженным впервые, является своеобразное «наследование» кристаллографической текстуры исходных компонентов в слоях наноламинатов продуктами синтеза, при котором плотноупакованные плоскости кристаллических решеток интерметаллидов, после завершения реакции, выстраиваются вдоль поверхности пленки. Процесс согласованного выстраивания кристаллической структуры в масштабах всей пленки интерметаллида происходит несмотря на существенные структурные изменения, которые сопровождают самоподдерживающуюся экзотермическую реакцию. Наследование текстуры наблюдалось у систем Ti/Al и Hf/Al и очевидно, обусловлено кристаллографическим соответствием плоскостей плотнейшей упаковки у компонентов исходных многослойных пленок и образованных интерметаллидов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В работе исследованы свойства и структура многослойных металлических наноструктур бинарного состава, полученных методами ионно-плазменного осаждения. Исследованы теплофизические процессы формирования из этих структур различных интерметаллидов методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза, а также свойства и структура полученных интерметаллидов.

2. Показана практическая возможность создания металлических многослойных наноструктур бинарного состава с использованием методов ионно-плазменного напыления материалов. Получены многослойные наноструктуры Ti-Al, Hf-Al, Nb-Al, Ta-Al, Cu-Al, Ni-Al, с толщиной слоев от десятков до единиц нанометров и количеством слоев свыше 2000.

3. Исследованы структурные особенности многослойных пленок. Обнаружена зависимость эффекта упорядочивания кристаллической структуры материала многослойных пленок от компонентного состава.

4. Исследованы процессы образования интерметаллических соединений из многослойных метастабильных наноструктур Ti/Al и Hf/Al в результате самораспространяющегося высокотемпературного синтеза.

5. Экспериментально обнаружены зависимости скорости распространения фронта реакции синтеза и степени деформации пленок продукта от температуры внешнего нагрева и толщины слоев исходной метастабильной системы.

6. Впервые обнаружен эффект наследования кристаллографических особенностей (наследования текстуры) исходных метастабильных многослойных систем, материалом пленок интерметаллидов, синтезированных на их основе.

Основные результаты работы отражены в публикациях:

1. Экспериментальная установка для создания сверхмногослойных материалов / А.Н. Носырев, В.И. Хвесюк, П.А. Цыганков и др. // 170 лет МГТУ им. Н.Э. Баумана.: Тез. докл. Российская научно-техническая конференция. - М., 2000. - С.75.

2. Экспериментальное плазменное оборудование для получения сверхмногослойных материалов / А.Н. Носырев, В.И. Хвесюк, П.А. Цыганков и др. // Прикладная физика. - 2001. - № 3. - С. 8-12.

3. Автоволновое распространение экзотермических реакций в тонких многослойных пленках системы Ti-Al / А.Э. Григорян, А.Г. Мержанов, А.Н. Носырев и др. // Доклады АН. - 2001. - Т. 381, №3. - С.368-372.

4. Some features of gasless combustion and product structure formation in the nano-scale multilayered intermetallic films / N.G. Merzhanov, A.N. Nosyrev, P.A. Tsygankov et al // VI International symposium on self-propagating high-temperature synthesis.: Proc. - Haifa, 2001. - P. 49-51.

5. Процессы горения в многослойных пленочных наносистемах / А.С. Рогачев, Д.Ю. Ковалев, А.Г. Мержанов и др. // Процессы горения и взрыва в физикохимии и технологии неорганических материалов.: Тез. докл. Всероссийская конференция. - М., 2002. - С. 38-39.

6. О механизме взаимодействия нанослоев в многослойных интерметаллидных пленках / А.С. Рогачев, А.Н. Носырев, П.А. Цыганков и др. // Пленки и покрытия.: Тез. докл. Международная конференция. - Санкт-Петербург, 2003. - С. 66-71.

7. Канель И.Г., Носырев А.Н., Цыганков П.А. Автоматизированная система экспресс-диагностики параметров ионного пучка // Прикладная физика. - 2003. - № 5. - С. 61-64.

8. Some peculiarities of self-propagating high-temperature synthesis in thin multilayer films / H.E. Grigoryan, A.S. Rogachev, P.A. Tsygankov et al // VII International symposium on self-propagating high-temperature synthesis.: Proc.- Cracow, 2003.- С. 21-23.

9. Feature of SHS-reactions and products structure formation in nano-scale multilayered films / A.S. Rogachev, J.C. Gachon, P.A. Tsygankov et al // VII International symposium on self-propagating high-temperature synthesis.: Proc.- Cracow, 2003.- С.46-48.

10. Obtaining of super multilayer films by methods of ion-plasma deposition / A.N. Nosyrev, I.G. Kanel, P.A. Tsygankov et al // Russian-french workshop on SHS.: Proc.- Chernogolovka, 2003.- С. 27-28.

11. Носырев А.Н. Исследование свойств многослойных CBC-наноструктур // Всероссийская школа-семинар по структурной

15.

C.15-16.

взрыва. - 2004. - № 2.- С. 45-51.

Носырев А.Н.
Исследование многослойных
наноструктур и
теплофизических процессов
синтеза интерметаллидов н...
2004

\$1680400

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

[illegible]