ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

INTERNATIONAL WORKSHOP

**«Multiscale Biomechanics and Tribology
of Inorganic and Organic Systems»**

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**«Перспективные материалы с иерархической структурой
для новых технологий и надежных конструкций»**

**VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ,
ПОСВЯЩЕННАЯ 50-ЛЕТИЮ ОСНОВАНИЯ
ИНСТИТУТА ХИМИИ НЕФТИ**

«Добыча, подготовка, транспорт нефти и газа»

DOI: 10.17223/9785946218412/277

**НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ АМОРФНОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ,
ИНИЦИИРОВАННОЕ МИЛЛИСЕКУНДНЫМ ТЕПЛОВЫМ ИМПУЛЬСОМ**

^{1,2,3}Слядников Е.Е., ¹Хон Ю.А., ^{2,4}Турчановский И.Ю., ¹Каминский П.П.

¹ИФПМ СО РАН, Томск

²ИВТ СО РАН Томск

³ТУСУР, Томск

⁴ТПУ, Томск

Аморфные магнитные материалы нашли широкое применение в электротехнике и радиотехнике в качестве магнитопроводов дросселей, трансформаторов, электродвигателей, экранов для защиты от э/м полей, головок магнитной записи и пр. Уникальными магнитными свойствами обладают аморфные металлические сплавы со структурой, которая имеет вид беспорядочно ориентированных нанокристаллов в магнитной аморфной матрице. Существуют различные способы получения такого структурного состояния. Первый способ состоит в термическом нагреве аморфного материала. Совместные рентгеноструктурные и ЯГР исследования кристаллизации тонкой аморфной пленки сплавов на основе Fe и Co (толщиной 20 – 30 *nm*, шириной 10 *nm*, длиной 30 *nm*) при термическом отжиге в течение 30 – 60 минут показали несколько вариантов изменения структуры. В области температур отжига ниже 500 °C происходит изменение ближнего порядка в аморфном состоянии (структурная релаксация). При температурах отжига от $T_1 \approx 500$ °C до $T_2 \approx 700$ °C образуется нанокристаллическая структура со средним размером зерна около 10 *nm* [1]. Когда температура отжига превышает 700 °C, аморфная структура трансформируется в поликристаллическую структуру со средним размером зерна более микрометра. Для кристаллизации аморфной пленки также используется импульсный отжиг миллисекундной длительности (лазером, электронным пучком, электрической лампой, импульсом тока). При однократном облучении пленки мощным световым импульсом изменение структуры аморфного сплава зависит от его энергии. Если энергии импульса ниже порогового значения ($E \approx 1,1$ *kJ* - пороговая энергия, подводимая к лампе) происходят изменения в его ближнем порядке (структурная релаксация) [2]. Когда энергия импульса превышает пороговое значение ($E \approx 1,3$ *kJ*), формируется поликристаллическая структура со средним размером зерна около микрометра. При облучении аморфной пленки серией из $N = 30$ световых импульсов с энергией меньше пороговой ($E \approx 0,9$ *kJ*) (или условного времени отжига $t = N \cdot t_i$, где $t_i = 0,5$ *ms* - длительность светового импульса) происходит последовательный рост доли нанокристаллической фазы до насыщения [2]. Механизм такого влияния теплового импульса на нанокристаллизацию аморфного материала остается не ясным. По мнению авторов работы [2] механизм кристаллизации при импульсном отжиге миллисекундной длительности такой же, что и при термическом отжиге.

На самом деле, физические условия, в которых протекает кристаллизация термическим отжигом и импульсным отжигом, существенно отличаются. При термическом отжиге тепловой источник имеет объемный характер, процесс кристаллизации протекает медленно и гомогенно, а нанокристаллы возникают по всему объему термофлуктуационным путем. При импульсном отжиге тепловой источник имеет поверхностный характер, глубина проникновения излучения в материал составляет примерно 1 микрометр. Дальнейший прогрев пленки на всю ее толщину осуществляется теплопроводностью, причем время температурной релаксации имеет один порядок с длительностью светового импульса. В условиях поверхностного импульсного нагрева температура поверхности пленки значительно превышает температуру холодной части пленки, поэтому в пленке возникают значительные термонапряжения. Поэтому механизм кристаллизации при импульсном отжиге миллисекундной длительности должен включать помимо термических флуктуаций также атермические флуктуации, инициированные механическими напряжениями.

Секция 4. Научные основы разработки материалов с многоуровневой иерархической структурой, в том числе для экстремальных условий эксплуатации

В [3] предложена кинетическая модель, выявлены физические причины, условия, механизм и закономерности зарождения и распространения температурного фронта при термоактивированном аморфно-поликристаллическом превращении в аморфной пленке $Ti_{50}Cu_{50}$, инициированном объемным тепловым источником. Показано, что существует температура самопроизвольного поликристаллического превращения T_* , выше которой система становится тепло-неустойчивой. Режим возникновения и распространения превращения волновой и связан с атомными процессами теплопроводности, а механизм явления имеет тепловой характер. При тепловом механизме возникновения и распространения фронта превращения тепло, выделившееся при превращении, теплопроводностью передается на соседние участки не превращенного вещества, нагревает их, и инициирует самоускоряющийся переход. При температурах ниже T_* инициация волнового аморфно-поликристаллического превращения возможно только в случае дополнительного локального нагрева пленки со свободной поверхности.

Целью настоящей работы является формулировка модели и механизма наноструктурирования аморфной металлической пленки при нагреве и термоупругих деформациях, инициированных поверхностным миллисекундным тепловым импульсом. Предлагаемый подход учитывает характерные особенности такого теплового источника: поверхностный характер, кратковременность воздействия теплового источника, высокую интенсивность. Учитывается малоразмерность, сильная неравновесность системы, термодинамические флуктуации параметра порядка, термомеханические напряжения.

Показано, что при малой упругой сдвиговой деформации напряжение подчиняется закону Гука, а при дальнейшем повышении упругой сдвиговой деформации в критической точке происходит скачкообразное изменение ближнего порядка аморфной среды, генерация нанокристаллов, уменьшение сдвиговых напряжений и вязкое течение среды. Когда изменяется ближний порядок аморфной среды, возникают нанокристаллы, внутренняя энергия и упругая энергия превращенного слоя системы понижаются, выделяется скрытая теплота превращения, релаксируют напряжения. Эта выделенная теплота превращения, наряду с пришедшим теплом от поверхностного теплового источника, нагревает следующий слой материала, в котором возникают термонапряжения, что вместе вызывает генерацию нанокристаллов уже в этом слое. Слои, в которых нанокристаллизация завершилась, просто являются проводниками тепла от поверхностного теплового источника к слою, в котором протекает превращение. Так эстафетным образом происходит генерация нанокристаллов по всей толщине пленки, то есть от нагреваемой поверхности движется волна превращения.

Таким образом, механизм нанокристаллизации при импульсном отжиге миллисекундной длительности должен включать помимо термических флуктуаций также атермические флуктуации, инициированные механическими напряжениями.

Работа выполнена по проекту Ш.23.2.8. Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы.

1. Yoshizawa Y., Oguma S., Yamauchi K. New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine grain structure // J. Appl. Phys. – 1988. – Vol. 64. – N.10. – P. 6044–6046.
2. Назипов Р.А., Митин А.В., Выжимов Ю.М., Зюзин Н.А., Пятаев А.В. Получение магнитомягкого нанокристаллического состояния в лентах из аморфного сплава FINEMET-типа при облучении лампой-вспышкой // Физика и химия обработки материалов. – 2013. – №6. – С.25-31.
3. Слядников Е.Е., Хон Ю.А., Каминский П.П., Турчановский И.Ю. Зарождение и распространение температурного фронта при кристаллизации аморфного сплава $Ti_{50}Cu_{50}$, инициированной объемным тепловым источником // ЖТФ.–2018.–Т. 88.– В. 3.– С.374–379.