

ВЛИЯНИЕ АГРЕССИВНЫХ СРЕД НА ДЕФОРМАЦИЮ АМОРФНЫХ И НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ, ОБУСЛОВЛЕННУЮ ВОЗДЕЙСТВИЕМ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Федоров В.А., Плужникова Т.Н., Сидоров С.А., Яковлев А.В., Губанова В.О., Плужников С.Н.

Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина, Тамбов, Россия,
feodorov@tsu.tmb.ru

Аморфные металлические сплавы на основе кобальта и нанокристаллические сплавы на основе железа являются перспективными материалами нового поколения.

Эксперименты проводили на ленточных аморфных металлических сплавах (АМС) на основе кобальта (содержание кобальта от 70 до 86%) и на нанокристаллическом сплаве на основе железа (содержание железа 80%). Размеры образцов 40x3,5x0,02 мм. Все сплавы получены методом спиннингования. Одноосное растяжение образцов производилось на электромеханической машине для статических испытаний Instron-5565 при одновременном воздействии импульсного электрического тока длительностью $\tau = 5$ мс и плотностью тока $j = 10^8 - 10^9$ А/м². Пропускание электрического тока сопровождается сбросом механического напряжения, который фиксируется на диаграммах нагружения. Предварительный отжиг образцов осуществляли в печи SNOL – 8.2/1100 при температурах 300°C, 350°C и 400°C в течение 15 минут.

Исследовано влияние агрессивных сред на деформацию аморфных и нанокристаллических сплавов при воздействии импульсного электрического тока. В качестве агрессивных сред использовали растворы NACE + 100 мг/л H₂S и NACE + 400 мг/л H₂S, а также 20% раствор серной кислоты. Выдержка образцов в среде NACE составляла 24 часа, в растворах серной кислоты – 40 минут. Установлено, что характер деформации образцов АМС, выдержанных в растворах NACE не отличается от характера деформации образцов в исходном состоянии. В тоже время воздействие растворов NACE вызывает в нанокристаллическом сплаве на основе Fe возрастание величины сброса механического напряжения, вызванного пропусканием импульсного тока плотностью $j \geq 10^9$ А/м² на $\Delta\sigma \approx 10\%$ по отношению к образцам этого же сплава, но без выдержки в растворах NACE (рис. 1а). Величина сброса механического напряжения в нанокристаллических образцах не зависит от концентрации растворов NACE, использованных в работе. Экспериментально установлено, что после выдержки в 20 % растворе серной кислоты в аморфных сплавах на основе Co, значения сбросов механического напряжения, вызванных пропусканием импульсного тока, уменьшается на ~ 20%, в сравнение с величиной сбросов в образцах в исходном состоянии (рис. 1б,в).

Отмечено, что после комбинированного воздействия растворов NACE и импульсов электрического тока изменяется предел прочности материалов. Так, например, после воздействия растворов NACE и 4 импульсов электрического тока плотностью $\sim 10^9$ А/м² модуль Юнга во всех исследуемых сплавах практически не изменяется, а предел прочности уменьшается на $\approx 40\%$.

Проведены рентгеноструктурные и электронно-микроскопические исследования поверхности образцов и их структурного состояния. На дифрактограммах не отмечено каких-либо изменений. Для аморфных сплавов сохраняется характерное гало, в нанокристаллическом сплаве наблюдается полное совпадение дифракционных максимумов. Обнаружено, что среда NACE вызывает на поверхности нанокристаллического сплава окислительные реакции, в результате которых образуются оксиды железа в виде пленки толщиной ~ 1 мкм (рис. 2а).

Об образовании оксидов, также свидетельствуют результаты исследования элементного состава образцов аморфных и нанокристаллического сплавов, которое показало, что выдержка в растворах приводит к появлению в составе атомов кислорода. В аморфных сплавах его концентрация $\sim 1\%$, а в нанокристаллическом – более $2,5\%$. 20% раствор серной кислоты вызывает образование на поверхности сульфатных образований (рис. 2б).

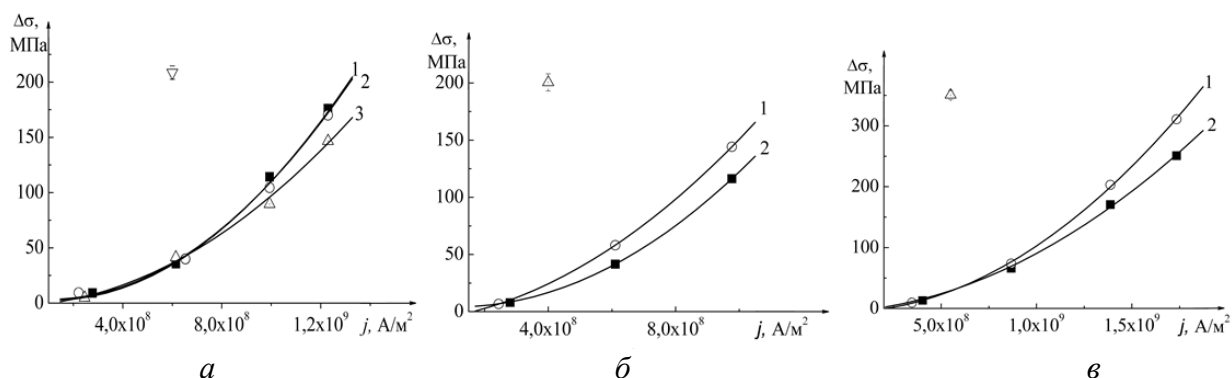


Рис. 1. Зависимость величины сброса механического напряжения от плотности тока в сплаве: а) АМАГ-200 для образцов, выдержанных в растворе NACE + 100 мг/л H₂S -1 и NACE + 100 мг/л H₂S -2; без воздействия среды NACE -3; б) АМАГ-172; в) АМАГ-180; (1 - в исходном состоянии, 2 – после выдержки в 20% растворе серной кислоты).

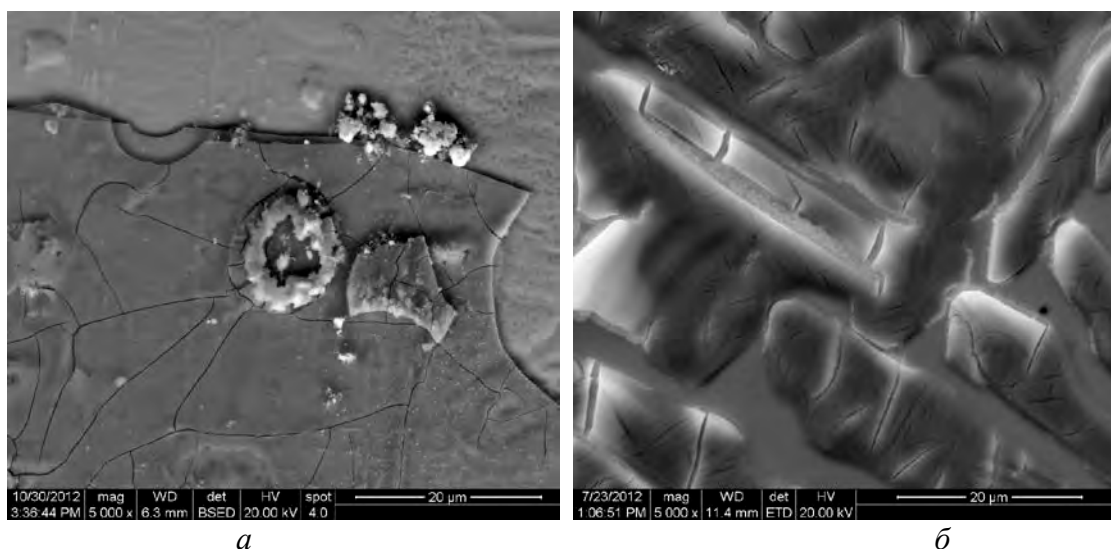


Рис. 2. Оксидная пленка на поверхности нанокристаллического сплава АМАГ-200 после воздействия растворов NACE (а); сульфатные образования на поверхности АМАГ -180 после воздействия 20% раствора серной кислоты (б)

Образовавшаяся в результате выдерживания в растворах NACE оксидная пленка на поверхности нанокристаллического сплава снижает теплоотдачу материала. В результате этого, пропускание импульсного тока вызывает больший нагрев образца, что увеличивает сброс механического напряжения. На поверхности аморфных сплавов после выдерживания в среде NaCE подобной пленки не наблюдается, вследствие этого нагрев образца не изменяется, и значения величины сбросов механического напряжения остаются прежними.

При изучении наводороженных в растворе NaCE образцов было установлено, что на поверхности образуются структуры, состоящие из частиц соли NaCl. На рис. 3 представлены структурные новообразования в виде дендрита (рис. 3а) и кольца (рис. 3б), появляющиеся на поверхности отожженных образцов после наводороживания. Размеры выделившихся частиц лежат в пределах от 10 нм до 700 нм.

В результате отжига в сплавах начинаются процессы кристаллизации, протекающие как на поверхности, так и внутри материала. Упорядоченное расположение кристаллов NaCl, наблюдаемое на поверхности указывает на наличие в объеме материала центров кристаллизации, а также показывает направление её развития. В этих местах растет кристалл в толще материала, и соль осаждается по форме растущих металлических кристаллов.

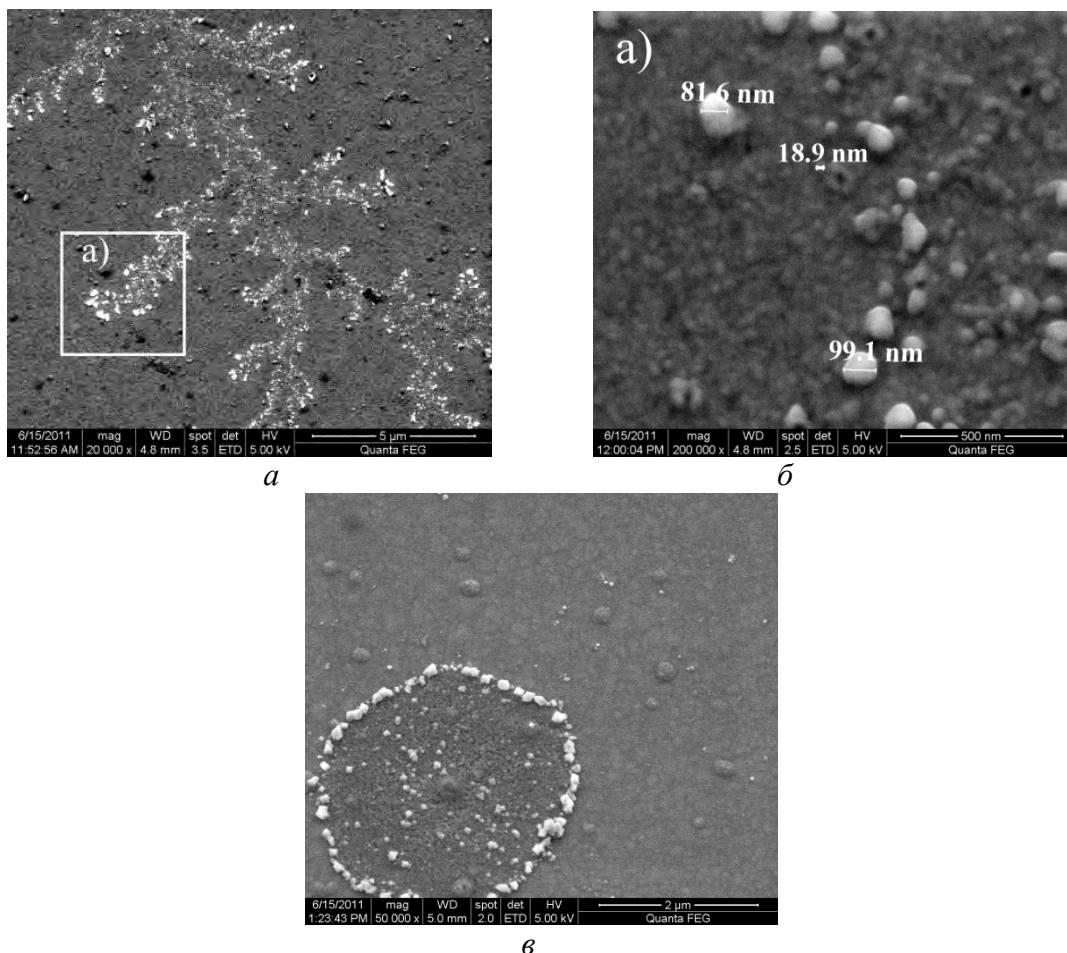


Рис. 3. Морфологические особенности поверхности отожженных образцов подверженных действию водородосодержащей среды: *а* – выделение частиц NaCl, образующее разветвленную дендритообразную ветвь; *б* – фрагмент участка разветвленной дендритообразной ветви; *в* – выделение частиц NaCl, образующее кольцеобразную фигуру.

Различия значений сбросов механического напряжения в наводороженных и ненаводороженных образцах связаны с действием водорода. Водород, имея способность быстро диффундировать в кристаллическую решетку многих материалов, в случае аморфных металлических сплавов заполняет свободный объем. Наводороживание образцов аморфных металлических сплавов приводит к изменению их свойств, что связано с охрупчивающим действием водорода – водородной хрупкостью.

Таким образом, экспериментально установлено, что импульсное токовое воздействие вызывает сброс механического напряжения в образцах металлических стекол. Величина сброса возрастает на ~10% при наводороживании нанокристаллического сплава и уменьшается на ~20% в образцах аморфных сплавов, выдержанных в кислотной среде.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №15-01-04553-а) и гос. задания (проект №2476).