

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ АГРЕССИВНЫХ И НАВОДОРОЖИВАЮЩИХ СРЕД НА ХОД ЗАВИСИМОСТИ $\sigma(\epsilon)$ В КОБАЛЬТОВЫХ АМОРФНЫХ СПЛАВАХ ПРИ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Федоров В.А., Плужникова Т.Н., Березнер А.Д., Яковлев А.В., Васильева С.В.

Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина,  
г. Тамбов, Россия, E-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

В качестве материалов для исследования воздействий импульсов электрического тока были выбраны ленточные аморфные металлические сплавы на основе кобальта с различным его содержанием и нанокристаллический сплав на основе железа. Содержание кобальта в аморфных металлических сплавах (АМАГ) менялось от 70 до 86%. Содержание железа в нанокристаллическом сплаве 83%. Размеры образцов 40x3,5x0,02 мм. Все исследуемые сплавы получены методом спиннингования.

В качестве агрессивных сред использовали растворы NACE + 100 мг/л  $H_2S$  и NACE + 400 мг/л  $H_2S$ , 20 %-ый раствор серной кислоты, 10 %-ый раствор соляной кислоты. Выдержка образцов в среде NACE составляла 24 ч, в растворах серной кислоты – 40 мин, в растворе соляной кислоты 10 минут. Одноосное растяжение образцов производили на электромеханической машине для статических испытаний Instron-5565 при одновременном воздействии импульсного электрического тока длительностью  $\tau = 5$  мс и плотностью тока  $j = 10^8 \div 10^9$  А/м<sup>2</sup>. Элементный состав и морфологию поверхности образцов исследовали на растровом электронном микроскопе Quanta 600 FEG и на атомно-силовом микроскопе Ntegra Aura. Фазовый состав определяли рентгенографическими методами с использованием рентгеновского дифрактометра ARL X'TRA.

Деформация аморфных и нанокристаллических сплавов с одновременным пропусканием импульсного электрического тока на диаграммах нагружения сопровождается явлением, подобным электропластическому эффекту (рис. 1). В момент прохождения импульса тока на диаграммах  $\sigma$ – $\epsilon$  наблюдается кратковременный (примерно 1,1 с) сброс механического напряжения  $\Delta\sigma$  с последующим полным восстановлением хода зависимости напряжение – деформация.

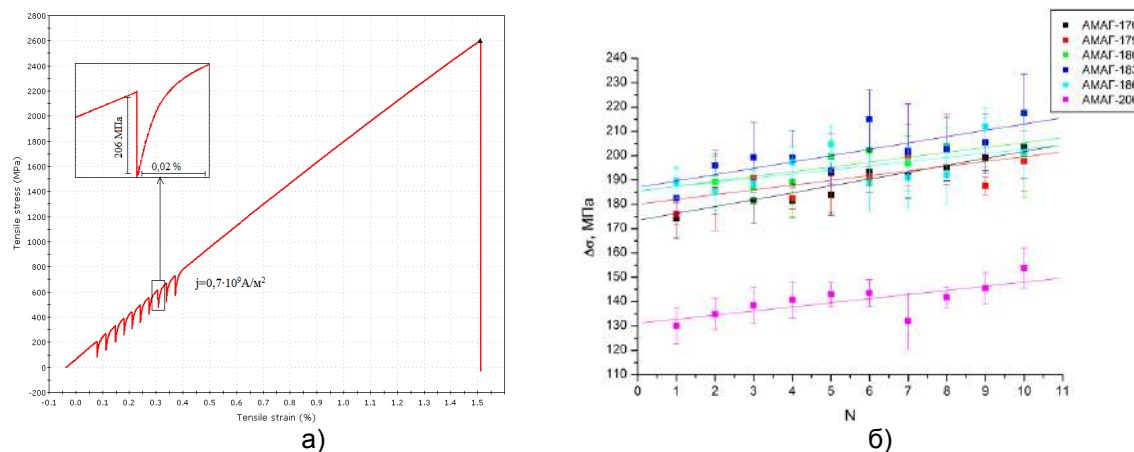


Рисунок 1 – а) Диаграмма нагружения сплава АМАГ – 180 при воздействии импульсным током; б) график зависимости величины сброса механического напряжения  $\Delta\sigma$  от числа импульсов N

В первой части работы исследовано влияние растворов NACE на деформацию аморфных и нанокристаллических сплавов при воздействии импульсного электрического тока. Установлено, что характер деформации образцов аморфных металлических сплавов, 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 железа сброс механического напряжения, вызванный пропусканием импульсного тока плотностью  $j \geq 10^9$  А/м<sup>2</sup> примерно на 10 % больше у образцов этого же сплава, но без выдержки в растворах NACE. Величина сброса механического напряжения в нанокристаллических образцах

не зависит от концентрации растворов NACE, использованных в работе. При этом отмечено, что после комбинированного воздействия растворов NACE и импульсов электрического тока изменяется предел прочности материалов. Так, например, после воздействия растворов NACE и четырех импульсов электрического тока плотностью  $10^9 \text{ A/m}^2$  модуль Юнга всех исследуемых сплавов практически не изменяется, а предел прочности уменьшается примерно на 40 % [1,2].

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 (т.е. не происходит структурных изменений). Электронной микроскопией обнаружено, что на поверхности аморфных и нанокристаллических сплавов наблюдается рост как отдельных микрокристаллов соли NaCl, так и разветвленных дендритных солевых структур. Обнаружено, что среда NACE вызывает на поверхности нанокристаллического сплава окислительные реакции, в результате которых образуются оксиды железа в виде пленки толщиной порядка 1 мкм. Об образовании оксидов также свидетельствуют результаты исследования элементного состава образцов аморфных и нанокристаллических сплавов, которое показало, что выдержка в растворах приводит к появлению в составе атомов кислорода. В аморфных сплавах его концентрация около 1 %, а в нанокристаллическом – более 2,5 % [3].

Во второй части работы исследовано влияние импульсного тока на поведение материалов после выдержки в 20 %-ом растворе серной кислоты. Эксперименты показали, что в аморфных сплавах на основе кобальта значения сбросов механического напряжения, вызванные пропусканием импульсного тока, уменьшаются на  $\Delta\sigma \approx 20 \%$  в сравнении с величиной сбросов в образцах в исходном состоянии. Воздействие кислотной среды на нанокристаллический сплав на основе железа не влияет на величину сбросов механического напряжения.

Уменьшение величины сбросов механического напряжения может быть связано с происходящими поверхностными явлениями. Выявлено, что выдержка в кислотной среде аморфных материалов приводит к появлению на их поверхности сульфатных образований толщиной около 3 мкм, что подтверждается исследованием элементного состава. Образовавшаяся на поверхности сульфатная пленка уменьшает сечение образца, что приводит к росту сопротивления и уменьшению силы тока. Это вызывает меньший нагрев образца, вследствие чего уменьшается величина сброса механического напряжения, вызванного пропусканием импульсного тока. При этом важно отметить, что после выдержки в 20 %-ом растворе серной кислоты аморфные сплавы не теряют своих прочностных свойств.

Выдержка нанокристаллического сплава на основе железа в растворах серной кислоты приводит к образованию питтинговой коррозии. Характерный размер питтинговых ямок составляет 300 – 350 нм глубиной примерно 40 нм. При этом имеет место уменьшение значения предела прочности сплава. Так, например, после воздействия раствора серной кислоты и четырех импульсов тока плотностью  $2 \cdot 10^8 \div 2 \cdot 10^9 \text{ A/m}^2$  предел прочности уменьшается на 20 %.

Сравнение различных видов предварительных воздействий на величину сбросов механического напряжения при электроимпульсном воздействии и влияние количества импульсов показало, что наибольшее влияние оказывает кислотные среды (рис. 2). При воздействии раствора NACE на исследуемые аморфные образцы сброс механического напряжения, вызванный пропусканием импульсного тока, увеличивается на 3% по отношению к образцам, не подвергавшихся воздействию агрессивной среды. В нанокристаллическом сплаве увеличение составляет 4%. Выявлено, что в образцах, выдержанных в 10% растворе соляной кислоты наблюдается уменьшение сброса механического напряжения на 8% у аморфных сплавов и на 7% у нанокристаллического сплава, в сравнении с образцами не подверженными действию коррозионных сред.

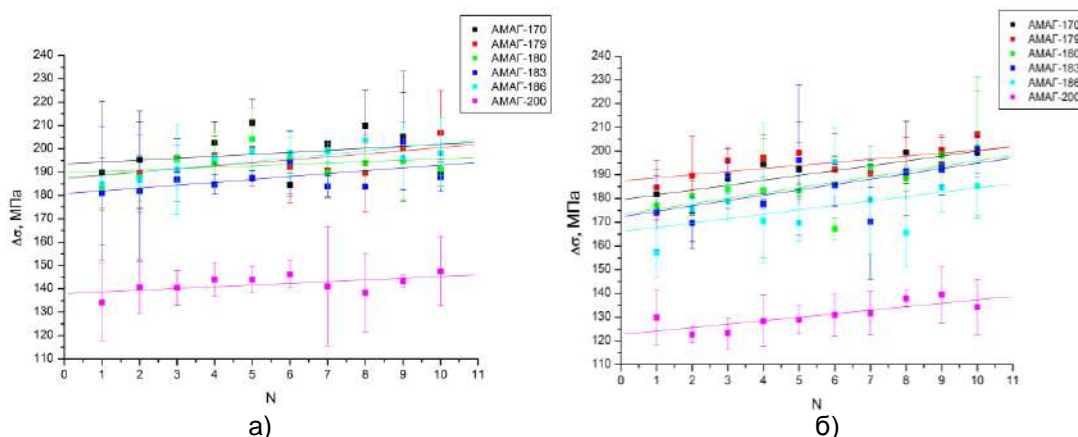


Рисунок 2 – График зависимости величины сброса механического напряжения  $\Delta\sigma$  от числа импульсов  $N$ : а) предварительно выдержанных в NACE; б) предварительно выдержанных в HCl (10% p-p)

Таким образом, коррозионные среды (NACE,  $H_2SO_4$ , HCl) изменяют механические свойства исследуемых образцов при электроимпульсном воздействии. Изменение свойств обусловлено изменением химического состава поверхностных слоев исследуемых сплавов.

#### Список литературы:

1. Федоров В.А., Плужникова Т.Н., Сидоров С.А. Влияние импульсного электрического тока на ход зависимостей механическое напряжение – деформация  $\square$  в аморфных и нанокристаллических металлических сплавах // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2013. №12, С. 60-65.
2. Федоров В.А., Плужникова Т.Н., Сидоров С.А. Влияние агрессивных сред на деформацию аморфных и нанокристаллических сплавов, обусловленную воздействием импульсного электрического тока // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2013 г. №. 4, С. 59 – 62.
3. Pluzhnikova T., Fedorov V., Sidorov S., Gubanova V., Pluzhnikov S. Impact of Corrosive Mediums on Mechanical Properties of Amorphous Alloys under Influence of Impulse Current / American Institute of Physics «Conference Proceedings». AIP Publishing LLC, NY, USA, 2016. Vol. 1698. Pp. 020005-1 – 020005-6.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №15-41-03166).