

ВЛИЯНИЕ АГРЕССИВНЫХ СРЕД И ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УСТАЛОСТНЫЕ СВОЙСТВА АМОРФНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СПЛАВОВ

Федоров В.А., Федотов Д.Ю., Плужникова Т.Н., Березнер А.Д., Яковлев А.В.
ТГУ им. Г.Р.Державина, г. Тамбов, Россия, E-mail: e-mail: feodorov@tsu.tmb.ru

Материалом для проведения исследования были выбраны ленты аморфных металлических сплавов АМАГ-186 ($\text{Co}_{85,5}\text{Fe}_{2,27}\text{Si}_{5,15}\text{Mn}_{4,07}\text{B}_2\text{Cr}_1$) АМАГ-180 ($\text{Co}_{78,5}\text{Ni}_{4,73}\text{Fe}_4\text{Si}_{7,25}\text{Mn}_{1,88}\text{B}_2\text{Cr}_{1,5}$) и нанокристаллического сплава АМАГ-200 ($\text{Fe}_{80,22}\text{Si}_{8,25}\text{Cu}_{1,44}\text{Nb}_{10,09}$). Размер рабочей области образцов $20 \times 3,5 \times 0,02$ мм. Усталостные испытания образцов проводили методом на растяжение.

Испытания проводили нагрузкой, изменяющейся от некоторого σ_{min} значения до σ_{max} во времени, в знакопостоянном цикле с частотой 2 Гц. В конструкции установки предусмотрено 5 комплектов упругих элементов с различными коэффициентами жесткости. Это обеспечивает создание переменных напряжений в интервалах: 1) (144–284) МПа; 2) (200–428) МПа; 3) (310–570) МПа; 4) (355–660) МПа; 5) (400–750) МПа. Для всех упругих элементов построены тарировочные графики, по которым через величину перемещения определяли напряжение в образце. Зависимость изменения напряжения в образце от времени имеет вид периодической функции.

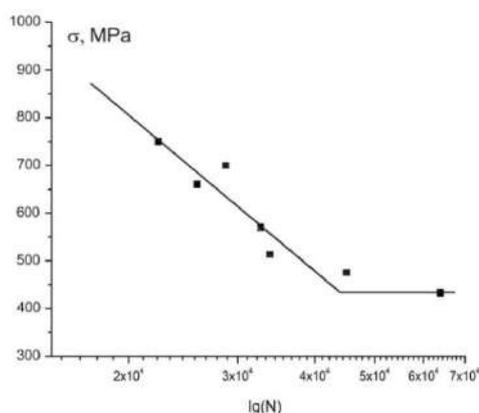


Рисунок 1 – Зависимость величины разрушающих напряжений от логарифма числа циклов при усталостных испытаниях на растяжение образцов сплав АМАГ-186

На рисунке 1 приведена зависимость величины разрушающих напряжений от логарифма числа циклов при усталостных испытаниях на растяжение. Максимальное напряжение при котором образцы не разрушаются при числе циклов $\sim 6 \times 10^5$ составляет 428 МПа.

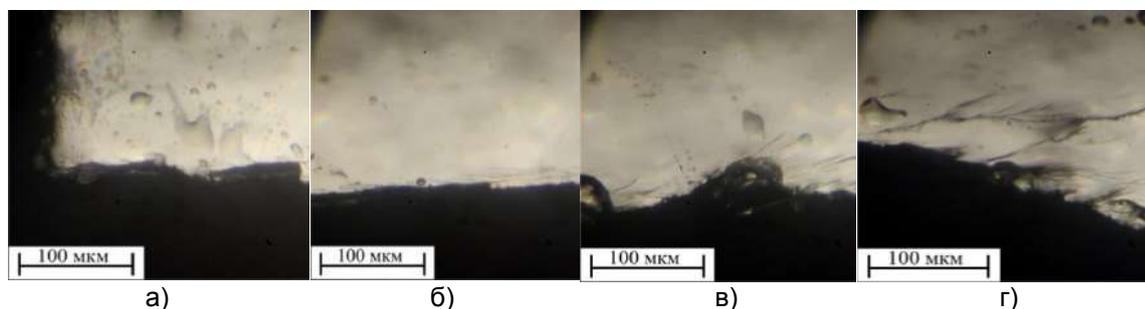


Рисунок 2 – Траектория роста усталостной трещины: а) зарожждение усталостной трещины, б) рост усталостной трещины, в) переход в зону долома, г) зона долома

При росте усталостных трещин выявлены области зарождения трещины (рис. 2а), её роста (рис. 2б), переходная зона (рис. 2в) и зона долома (рис. 2г). Отмечено, в зоне долома рост трещина может развиваться в нескольких плоскостях (рис 2г), количество ветвей возрастает по мере распространения трещины. В области роста усталостной трещины, по её берегам наблюдали ветвистые полосы сдвига. Отмечено, что при снижении величины нагрузки увеличивается зона роста усталостной трещины.

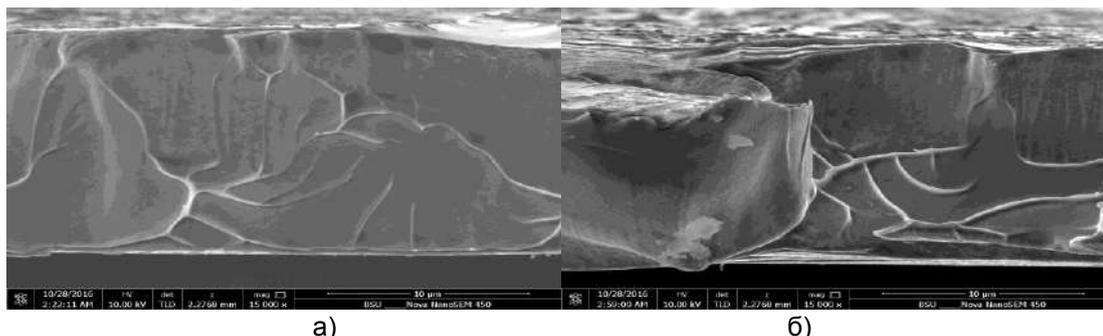


Рисунок 3 – Формирование «венного узора» на поверхности в зоне роста усталостной трещины

Проведены фрактографические исследования поверхности разрушения. В области зарождения трещины имеет место вязкое разрушение с образованием плотнорасположенных микроутяжек. Характерный размер таких утяжек $\sim 0,5-1,5\text{ мкм}$. При переходе к зоне усталостного роста на фоне вязкого разрушения появляются участки роста трещин, похожие на скол. В переходной зоне наблюдаются также участки образования более крупных деформационных структур и ячеек. Основная зона роста усталостной трещины развивается подобно сколу с образованием «венного узора» (рис. 3). Образование «венного узора» наблюдали в работе [1] при разрушении объемного сплава на основе циркония. При этом трещина может переходить из одной плоскости роста в другую – параллельную (рис. 3б). На поверхностях роста усталостной трещины наблюдаются характерные для такого вида разрушения ступени, соответствующие одноразовому скачкообразному подрастанию трещины. Характерная величина такого «скачка» $0,2-0,5\text{ мкм}$. Переход к зоне долома сопровождается переходом к вязкому разрушению с развитием трещин в параллельных плоскостях. В зоне долома трещина продвигается вязко, скачками, с образованием локализованных зон пластичности в местах остановки.

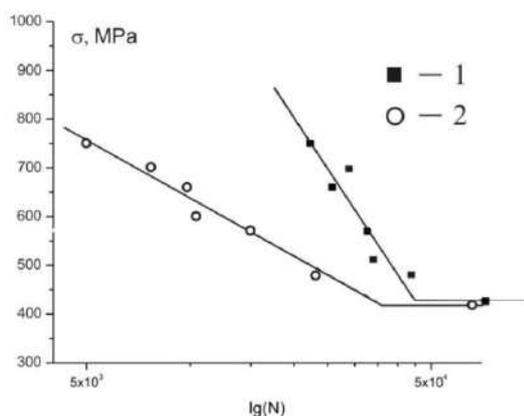


Рисунок 4 – Зависимость величины разрушающих напряжений от логарифма числа циклов при усталостных испытаниях на растяжение: 1) для образцов в исходном состоянии; 2) для образцов подвергнутых электроимпульсному воздействию

Проведены исследования влияния импульсного воздействия электрического тока на усталостные характеристики аморфного металлического сплава. На рисунке 4 приведены зависимости для сплава АМАГ-186. Перед испытаниями образцы нагружали до 200 МПа и подвергали воздействию 10-ти импульсов электрического тока напряжением 100 В. Длительность импульсов $\sim 5\text{ мс}$, плотность тока, протекающего через образцы $1 \cdot 10^8\text{ А/м}^2$. Изменение температуры образцов в момент пропускания импульса не превышала 20 градусов. Время релаксации нагрева составляло 2 с.

Установлено, что образцы разрушаются при меньшем количестве циклов нагружения относительно исходных образцов. Нагружение до 428 МПа, при количестве циклов $\sim 6 \times 10^5$, к разрушению образца не приводит. Исследование структурного состояния образцов после электроимпульсного воздействия показало, что материал остается рентгеноаморфным. Снижение характеристик усталостной прочности можно

объяснить начинающимися процессами структурной релаксации, переводящими аморфные сплавы в более равновесное состояние. Снятие закалочных напряжений повышает значение долговременной прочности.

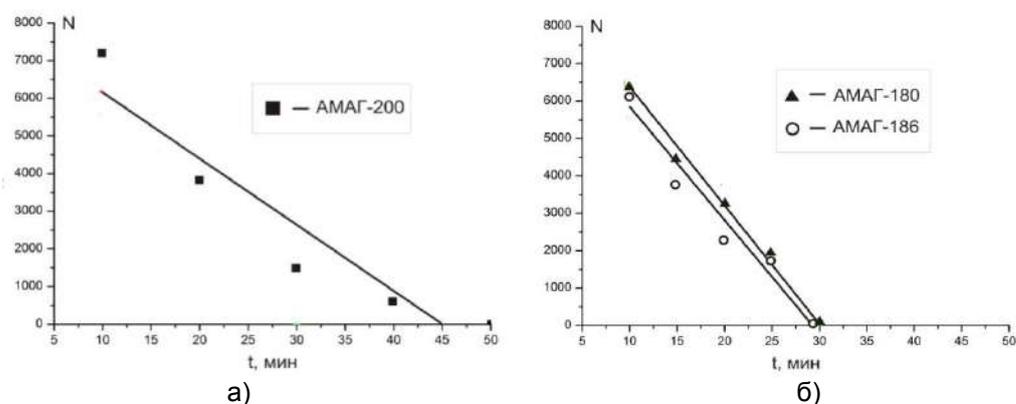


Рисунок 5 – Зависимость числа циклов нагружения, приводящих к разрушению от времени воздействия на образцы 1% раствора HNO₃: а) АМАГ-200; б) АМАГ-180, АМАГ-186

Были проведены исследования влияния воздействия агрессивной среды на усталостные характеристики металлических стекол. Образцы сплавов АМАГ-180, АМАГ-186, АМАГ-200 выдерживались в 1% растворе азотной кислоты, после чего подвергались усталостному растяжению в интервале нагрузок (400–750) МПа. На рис. 5 приведены зависимости числа циклов усталостного нагружения от времени воздействия кислотной среды на образцы, приводящего к их разрушению.

При воздействии кислотной среды происходит образование на поверхности образцов солей Co(NO₃)₂ на АМАГ-180, АМАГ-186 и Fe(NO₃)₃ на АМАГ-200. При этом происходит изменение сечения образцов и действующие напряжение заметно превышает величину нагрузки заданную в испытательной машине. Ее значения превышают усталостный предел прочности, что вызывает ускоренное разрушение образцов. Характерные особенности роста усталостных трещин в этом случае трудно проследить из-за пленки на поверхности образцов. Отмечено, что образцы на основе кобальта, с различным его содержанием, демонстрируют практически одинаковые характеристики усталостной прочности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-01-04553_a)

Список литературы:

1. Yunhu Zhu, Jie Fu, Chao Zheng, Zhong Ji. Effect of laser shock peening without absorbent coating on the mechanical properties of Zr-based bulk metallic glass // Optics & Laser Technology №75 (2015), pp. 157–163.