

03;05.1

## Эффект Баркгаузена при взаимодействии водорода с аморфным сплавом $Zr_{78}B_{12}Si_9Ni_1$

© Н.Е. Скрябина, Л.В. Спивак, С.А. Кинев, Б.Н. Варской,  
В.П. Вылежнев, Т.Ю. Савельева

Пермский государственный университет

E-mail: spivak@psu.ru

Поступило в Редакцию 10 мая 2000 г.

Сообщается об обнаружении многократного увеличения электродвижущей силы эффекта Баркгаузена при насыщении водородом аморфной ленты сплава  $Fe_{78}B_{12}Si_9Ni_1$ . Показана связь величины эффекта с содержанием водорода в материале.

Несмотря на значительное число публикаций по взаимодействию водорода с аморфными металлическими сплавами (АМС), лишь единичные связаны с изучением их свойств непосредственно в процессе насыщения водородом или сразу же после такого воздействия.

Уже первые работы в этом направлении позволили обнаружить неизвестные ранее в физике взаимодействия водорода с аморфными металлическими сплавами эффекты, например многократное ускорение ползучести при нагрузках, много меньших предела текучести [1], потерю несущей способности пересыщенного водородом АМС, так называемые Реп-Х эффект [2] и др.

Несомненно, что такого рода деформационный отклик должен быть связан с глубокой перестройкой структуры аморфных металлических сплавов. Однако быстрота перехода аморфного металлического сплава от состояния пересыщения водородом к состоянию, практически свободному от его присутствия, затрудняет проведение исследования изменений, происходящих в материале. Это относится как к традиционным структурным методам исследования, так и к определению его физических характеристик, продолжительность измерения которых должна быть настолько мала, чтобы не внести существенных погрешностей, связанных с временной нестабильностью состояния насыщенного водородом аморфного металлического сплава.

Оказалось, что удобной в этом отношении характеристикой является электродвижущая сила эффекта Баркгаузена ( $\varepsilon_B$ ), измерение которой хорошо себя зарекомендовало при изучении различных сплавов, в первую очередь кристаллических [3,4].

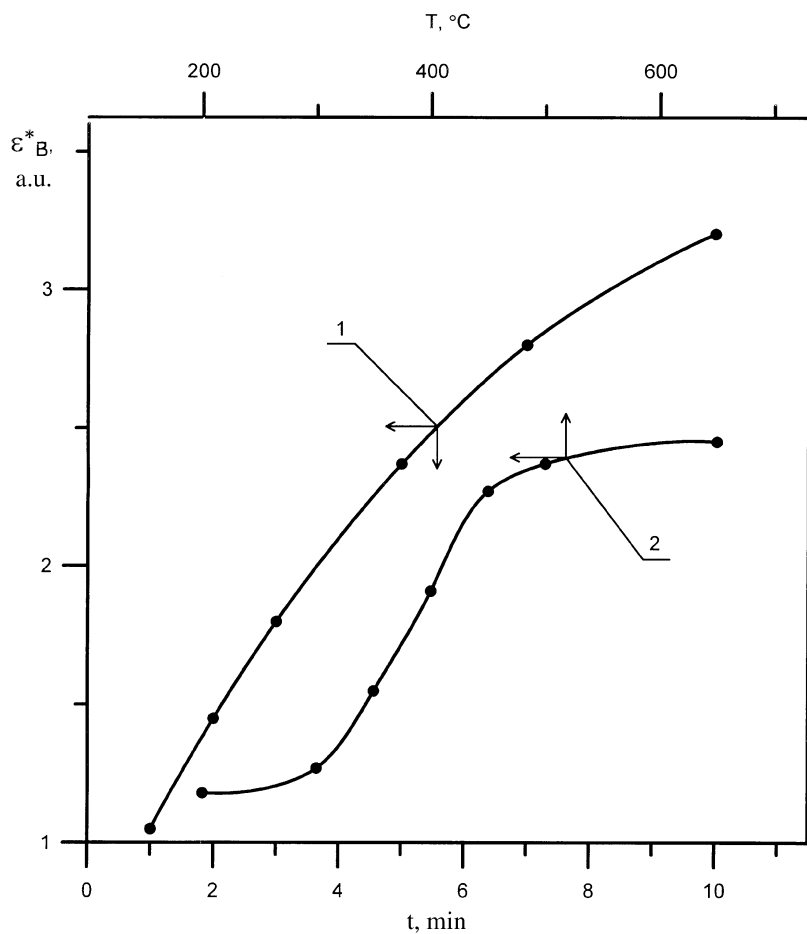
Методика исследования включала в себя двухстороннее насыщение водородом аморфной ленты сплава 2НСР ( $\text{Fe}_{78}\text{B}_{12}\text{Si}_9\text{Ni}_1$ ) толщиной  $30 \mu\text{m}$  из кислого электролита ( $1\text{N H}_2\text{SO}_4 + 100 \text{mg/l As}_2\text{O}_3$ ) при плотности катодного тока  $50 \text{A/m}^2$ . Измерение  $\varepsilon_B$  осуществляли с помощью установки СКИФ-1 [5]. Датчик Баркгаузена представлял собой измерительную катушку, улавливающую магнитный поток от скачков Баркгаузена и преобразующую его в электродвижущую силу эффекта Баркгаузена, и накладной электромагнит, наводящий магнитное поле в объеме образца. Частота переключения магнитного поля составляла  $50 \text{Hz}$ . Перемагничивание в объеме образца было однородным. В качестве эталона использовали ленту сплава 2НСР в состоянии поставки.

Отжиг образцов сплава 2НСР проводили в вакууме или нагревом в жидких нейтральных средах.

Результаты проведенного исследования позволили обнаружить следующие неизвестные ранее эффекты.

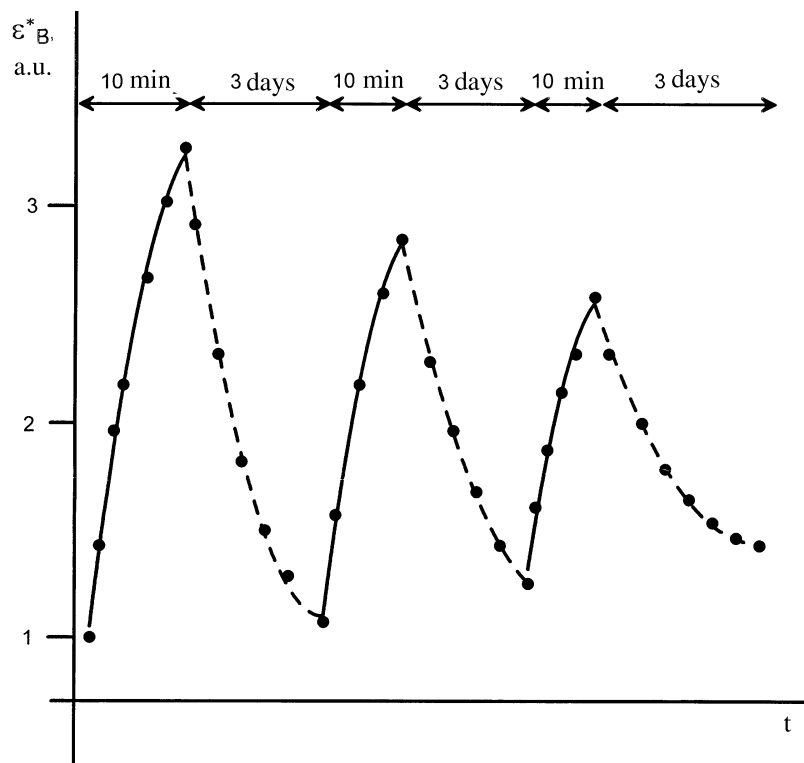
Введение водорода вызывает многократное (рис. 1) увеличение  $\varepsilon_B$ . Причем с ростом продолжительности введения водорода отмечается выход зависимости  $\varepsilon_B(t)$  на насыщение. После прекращения введения водорода  $\varepsilon_B$  постепенно, в течение нескольких суток, возвращается к близкому исходному значению (рис. 2). Повторное насыщение водородом этого же образца (рис. 2) вновь приводит к увеличению  $\varepsilon_B$ . Сплав 2НСР выдерживает несколько таких циклов насыщения водородом — дегазация, пока не наступит его разрушение. С увеличением числа циклов нарастают остаточные изменения и уменьшается амплитуда изменения  $\varepsilon_B$  в каждом цикле. Установлено, что остаточные изменения в значениях  $\varepsilon_B$  устраняются нагревом до  $100^\circ\text{C}$ . После этого сплав имеет значение  $\varepsilon_B$ , характерное для исходного состояния сплава 2НСР.

Исследование влияния температуры нагрева на скорость возврата  $\varepsilon_B$  к исходному, перед насыщением водородом, состоянию, показало, что повышение температуры нагрева выше  $60^\circ\text{C}$  резко ускоряет возврат этой характеристики и при  $120^\circ\text{C}$  время возврата составляет всего несколько минут вместо трех суток при  $20^\circ\text{C}$ . Поскольку в исследованном диапазоне температур нагрева каких-либо структурных изменений в



**Рис. 1.** Влияние продолжительности насыщения водородом (1) и температуры отжига (2) на электродвижущую силу эффекта Баркгаузена сплава 2HCP.  $\varepsilon_B^*$  — отношение измеренной  $\varepsilon_B$  к значению  $\varepsilon_B$  эталона.

сплаве этого типа до сих пор не обнаружено, то единственной причиной возврата  $\varepsilon_B$  следует считать выход водорода из металла. Это подтверждается данными специальных электрохимических исследований.



**Рис. 2.** Динамика изменения электродвижущей силы эффекта Баркгаузена сплава 2НСП. Сплошная кривая — насыщение водородом в течение 10 min, прерывистая кривая — выдержка в течение 3 days.  $\varepsilon_B^*$  — отношение измеренной  $\varepsilon_B$  к значению  $\varepsilon_B$  эталона.

Таким образом, обнаружено влияние водорода на  $\varepsilon_B$  в сплаве 2НСП и показана многократная обратимость этого процесса, обусловленного присутствием водорода в объеме материала.

Изменение  $\varepsilon_B$  в этом сплаве может быть достигнуто его отжигом при  $300 \div 650^\circ\text{C}$  (рис. 1). Однако отжиг сплава, даже при температурах, превышающих температуру его кристаллизации, не позволяет достичь столь больших увеличений  $\varepsilon_B$ , как при насыщении сплава 2НСП водородом. Несомненно, нагрев сплава до таких температур влияет на

его структуру, приводит к необратимым изменениям в сплаве, что и обеспечивает постоянство значения  $\varepsilon_B$  после его термической обработки в течение всего периода наблюдения.

Таким образом, есть все основания считать, что в пересыщенном водородом АМС возникает особое структурное состояние, обеспечивающее снижение потенциального барьера при переходе 180°-ной границы магнитного домена из одного состояния равновесия в другое.

В ферромагнитных аморфных сплавах носителями магнетизма являются атомы переходных металлов (железа, кобальта, никеля), а атомы, стабилизирующие аморфное состояние (металлоиды), считаются немагнитными [6]. Поэтому средний магнитный момент  $\tilde{\mu}$  определяется только величиной магнитного момента атомов металлов  $\tilde{\mu}_f$  и их концентрацией  $c$ :

$$\tilde{\mu} = c\tilde{\mu}_f + (1 - c)\tilde{\mu}_n = c\tilde{\mu}_f,$$

где  $\tilde{\mu}_n$  имеет смысл магнитного момента металлоидного атома и его величина обычно принимается равной нулю. С увеличением содержания водорода в сплаве суммарный вклад магнитных моментов металлических атомов, на первый взгляд, должен уменьшаться. Однако поскольку водород не является типичным металлоидом, то его появление в структуре аморфного сплава, как мы считаем, кардинально меняет ситуацию, что и находит свое отражение в результатах проведенных экспериментов.

Авторы выражают свою признательность Российскому фонду фундаментальных исследований за поддержку исследований.

## Список литературы

- [1] Спивак Л.В., Хоник В.А., Скрябина Н.Е. // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. В. 17. С. 39–43.
- [2] Скрябина Н.Е., Спивак Л.В., Вылежнев В.П., Хоминский В.А. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 23. С. 36–39.
- [3] Skryabina N.Ye., Spivak L.V. // Hydrogen Energy. 1999. V. 24. N 9. P. 795–799.
- [4] Рудяк В.М. // УФН. 1970. Т. 101. В. 3. С. 492–462.
- [5] Ломаев В.Т. Эффект Баркгаузена и его использование в технике контроля и измерения. Ижевск: Изд. ИМИ, 1984. 112 с.
- [6] Судзуки К., Фудзимори Х., Хасимото К. Аморфные металлы. М.: Металлургия, 1987. 328 с.