

ИЗМЕНЕНИЕ ЛОКАЛЬНОЙ АТОМНОЙ СТРУКТУРЫ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗА ПРИ БОЛЬШИХ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЯХ В КАМЕРЕ БРИДЖМЕНА

Сундеев Р.В.¹, Шалимова А.В.², Велигжанин А.А.³, Глезер А.М.², Чернышева О.В.⁴, Перов Н.С.⁵, Алехина Ю.А.⁵, Умнова Н.В.⁶

¹ РТУ МИРЭА, Москва, Россия

² ФГУП «ЦНИИчермет им. И.П.Бардина», Москва, Россия

³ НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

⁴ НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

⁵ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁶ ИМЕТ РАН им. А.А. Байкова, Москва, Россия

sundeev55@yandex.ru

Изучение магнитно-мягких аморфных сплавов на основе железа является одним из важных направлений в физике конденсированного состояния. Интерес к данным материалам вызван уникальным сочетанием их свойств, таких как: малые потери на перемагничивание, малая коэрцитивная сила, высокие значения намагниченности насыщения и магнитной проницаемости. Как правило, аморфные магнитно-мягкие сплавы (АММС) (на основе ферромагнитных компонентов) имеют лучшие магнитные характеристики, чем пермаллои и являются механически более прочными и стабильными при комнатных температурах. Ряд свойств АММС, например, малая магнитная анизотропия (на два порядка ниже таковой для кристаллических сплавов), высокое удельное электросопротивление, вследствие которого значительно снижаются потери на токи Фуко, высокая коррозионная стойкость напрямую связана с их неупорядоченным строением и не может быть достигнута в кристаллических сплавах. Однако, как и все аморфные сплавы, полученные закалкой из расплава (ЗР), АММС метастабильны, поэтому уникальные свойства этих материалов заметно изменяются при внешних воздействиях особенно резко в случае осуществлении структурно-фазовых превращения с переходом исходного материала в аморфно-кристаллическое состояние. С недавних пор внимание исследователей привлекает факт изменения магнитных свойств аморфных сплавов при внешних воздействиях, в результате, который структура сплавов, в основном, остается аморфной. Отмечается изменение магнитных параметров при нагреве, в области температур ниже температуры кристаллизации [1], при приложении давления [2] и в условиях термоциклирования 293-77К [3], хотя структура, зафиксированная с помощью рентгеновской дифракции и просвечивающей электронной микроскопии, остается аморфной во все перечисленных случаях.

Для проверки имеющегося в литературе предположения о том, что причиной деформационной кристаллизации аморфных сплавов является локальный адиабатический разогрев в полосах сдвига был поставлен специальный эксперимент. Аморфные сплавы $Fe_{50}Ni_{33}B_{17}$, $Fe_{54}Ni_{29}B_{17}$, $Fe_{58}Ni_{25}B_{17}$, $Fe_{72}Cr_{10}B_{18}$, $Fe_{48}Co_{19}Cr_{15}B_{18}$, $Co_{68}Fe_5Cr_4Si_{11}B_{12}$, $Fe_{75}Si_8B_{17}$ и $Fe_{65}Cr_{15}Zr_{2}B_{16}C_2$ близкие по химической природе, но имеющие различные значения температуры кристаллизации ($T_{кр}$), деформировали методом кручения под высоким давлением (КВД) в одинаковых условиях ($n = 1$, $P = 6$ ГПа, комнатная температура). Известно, что температура кристаллизации при нагреве аморфного состояния $T_{кр}$ является постоянной величиной, зависящей только от химического состава аморфного сплава и от скорости непрерывного нагрева. Предположим, что в процессе КВД при комнатной температуре, кристаллическая фаза в аморфной матрице возникает вследствие локального повышения температуры в полосе сдвига. Тогда чем выше значение $T_{кр}$ в конкретном аморфном сплаве, тем ниже

должно быть в нем значение объемной доли нанокристаллической фазы $V_{кр}$. Следовательно, если проанализировать аморфные сплавы, близкие по химической природе, но имеющие различные значения $T_{кр}$, после деформации в одинаковых условиях, то наличие или отсутствие четкой обратной корреляции между значениями $T_{кр}$ и $V_{кр}$ должно подтвердить или опровергнуть первую гипотезу, связанную с адиабатическим нагревом.

С помощью просвечивающей электронной микроскопии проводили сравнение структур на ранних стадиях кристаллизации аморфного сплава $Fe_{50}Ni_{33}B_{17}$ после отжига $400\text{ }^{\circ}\text{C} - 30\text{ мин.}$ и после КВД при комнатной температуре. В первом случае наблюдается гомогенный характер выделения равноосных наночастиц $\gamma\text{-Fe}$ (ГЦК) со средним размером 20 нм (рис. 1а). Во втором случае форма выделений существенно иная. Наблюдаются сильно вытянутые наночастицы в виде «строчек» длиной до $300\text{-}400\text{ нм}$ и толщиной около 20 нм (рис. 1б).

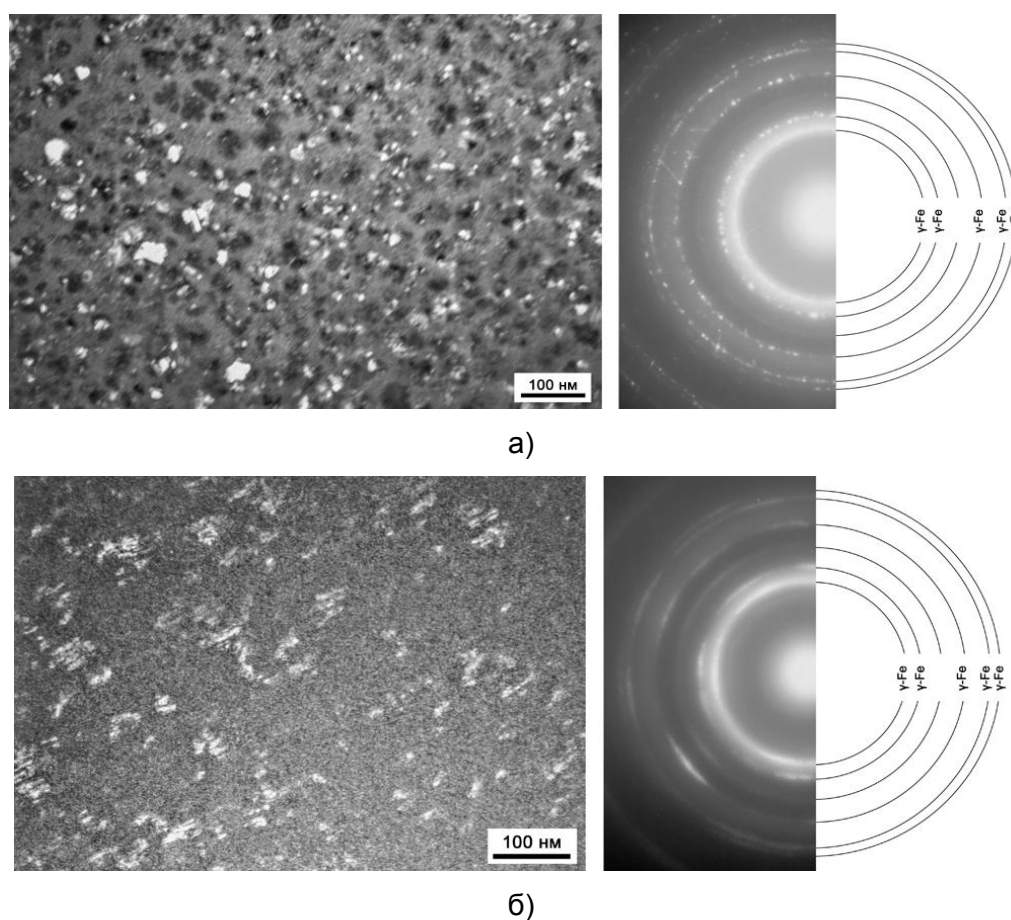


Рисунок 1 – Электронно-микроскопические изображения и соответствующие микроэлектроннограммы структуры на ранних стадиях кристаллизации аморфного сплава $Fe_{50}Ni_{33}B_{17}$ после отжига $400\text{ }^{\circ}\text{C} - 30\text{ мин.}$ (а) и после КВД ($n = 1$) при комнатной температуре (б)

Экспериментально обнаружено, что, чем ниже значение температуры кристаллизации аморфного сплава, тем больше значение объемной доли ($V_{кр}$) кристаллической фазы наблюдается после КВД при одинаковых условиях деформации (рис. 2).

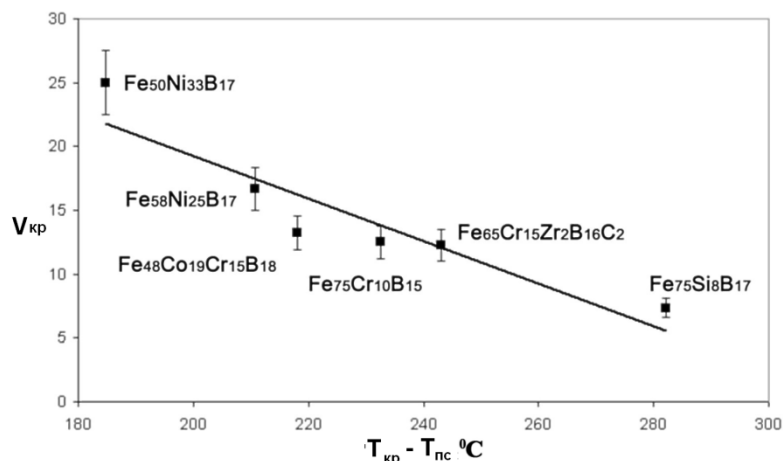


Рисунок 2 – Корреляция между значениями $V_{кр}$ и $T_{кр}$ для аморфных сплавов на основе железа с учетом различной диссипативной способности полос сдвига

В условиях КВД при криогенных температурах (77К) аморфных сплавов системы Fe-Ni-B и $Fe_{75}Si_8B_{17}$ при тех же самых величинах деформации заметного изменения структуры не выявлено ни рентгеновскими, ни электронно-микроскопическими методами исследования. Тем не менее, фиксируется изменение величины теплового эффекта, возможно связанного с более тонкими структурными изменениями в сплавах, чем ранее наблюдаемые. В связи с этим проведено изучение атомной структуры сплавов методом EXAFS в синхротронном излучении. Анализ EXAFS-спектров показал, что в ходе КВД изменяется как химическое окружение выбранного атома Fe, так и среднее межатомное расстояние пар Fe-Fe, Fe-Si и Fe-Ni. В сплавах $Fe_{58}Ni_{25}B_{17}$ и $Fe_{75}Si_8B_{17}$ обнаружено изменение характера композиционного ближнего порядка для атомов Fe с одновременным уменьшением среднего межатомного расстояния для пар атомов Fe-Fe. В сплавах $Fe_{50}Ni_{33}B_{17}$ и $Fe_{54}Ni_{29}B_{17}$ изменения межатомных расстояний между различными парами атомов не зафиксировано. В этих сплавах обнаружено только изменение химического состава окружения атома Fe: часть атомов Fe замещается атомами Ni. Подобное изменение локальной атомной структуры и в том, и в другом случае приводит к уменьшению намагнитченности насыщения в исследуемых аморфных сплавах на основе Fe после КВД при 77К. Резкое увеличение коэрцитивной силы после КВД при 77К объясняется отсутствием каналов релаксации упругих напряжений вследствие подавления термоактивационных процессов. Показано, что КВД при 77К, приводит к образованию более устойчивого к кристаллизации аморфного состояния, чем после ЗР.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-72-00026).

Список литературы

1. C.C. Cao, Y.G. Wang, L. Zhu, Y. Meng, Y.D. Dai, J.K. Chen Evolution of structural and magnetic properties of the FeCuBP amorphous alloy during annealing // Journal of Alloys and Compounds. 2017. V. 722. P. 394-399.
2. X.X. Li, J. Wang, J.Y. Qin, B.S. Dong The relationship between atomic structure and magnetic property of amorphous $Fe_{78}Si_9B_{13}$ alloy at different pressures // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2017. V. 443. P. 216-221.
3. Y. Meng, Y.G. Wang, L. Zhu, C.C. Cao, Y.D. Dai Effect of thermal cycling treatment on local structure, thermal stability and magnetic properties of $Fe_{80}Si_{8.75}B_{10}Cu_{1.25}$ metallic glass // Journal of Non-Crystalline Solids. 2017. V. 471. P. 406-409.