

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПОДВОДНОЙ ПЛАЗМЫ И МАГНИТОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ЛЕНТОЧНЫХ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ FeSiB

М.Н. Шипко¹, М.А. Степович^{2,*}, А.В. Хлюстова^{3,**}, Н.А. Сироткин³, Т.П. Каминская⁴, А.В. Стулов⁵, Е.С. Савченко⁶

¹Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, Иваново, Россия

²Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, Калуга, Россия, *m.stepovich@mail.ru

³Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, Иваново, Россия, **avlada5577@gmail.com

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁵ООО «Научно-производственный комплекс «Автоприбор», Владимир, Россия

⁶Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

Растровая электронная, оптическая и атомная силовая микроскопия использованы для изучения морфологии поверхности, состава и свойств аморфных ленточных сплавов Fe-Si-B, полученных методом сверхбыстрого охлаждения при распылении расплава на быстро вращающемся медном барабане и последующей магнитоимпульсной обработки и обработки в импульсной подводной низкотемпературной плазме.

Образцы аморфной электротехнической стали (фольги) представляли собой ленту толщиной около 100 мкм, шириной 45 мм, которые были получены методом сверхбыстрого охлаждения при распылении расплава на вращающемся медном барабане. Последующая обработка проводилась в импульсной подводной низкотемпературной плазме [1], после чего изучалось влияние слабых импульсов магнитного поля на изучаемые материалы [2, 3]. Исследовались неотожжённые аморфные сплавы состава $Fe_{73}Si_9B_{13}$ и с добавкой 1 % Cu, влияющей на процесс кластеризации в процессе последующего термического отжига.

Характер поверхности аморфных сплавов состава $Fe_{73}Si_9B_{13}$ и сплавов с добавкой 1 % Cu имел во многом одинаковую структуру для обеих поверхностей ленты: контактной, прилегающей к медному барабану и другой, свободной, поверхности. Морфология поверхностей соответствовала результатам, полученным в растровом электронном микроскопе (РЭМ) при исследованиях подобных материалов близкого состава, $Fe(Ni, Cu)(SiB)$ – для свободной поверхности см. рис 1. Наиболее интересные результаты для структуры поверхности фольг получены при большем увеличении, в атомном силовом микроскопе (АСМ) – см. рис. 2 и рис. 3.

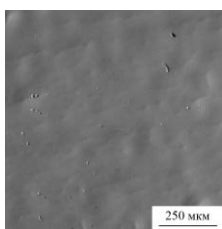


Рис. 1. Поверхность свободной стороны фольги в режиме регистрации вторичной электронной эмиссии РЭМ.

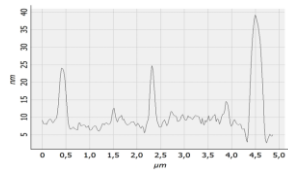
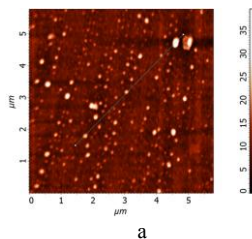


Рис. 2. а – изображение участка свободной поверхности фольги $Fe_{73}Si_9B_{13}$, полученное в АСМ, иллюстрирующее размер и распределение по поверхности неровностей на участке фольги размером 5,5x5,5 мкм; б – профиль сечения фольги вдоль отрезка прямой, показанной на рис. 2а, иллюстрирующий характер неровностей.

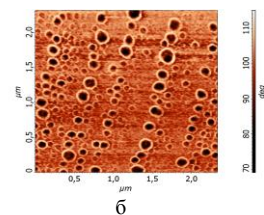
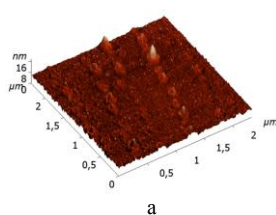


Рис. 3. Изображение одного и того же участка свободной поверхности ленточного аморфного сплава $Fe_{73}Si_9B_{13}$, полученных в АСМ: а – в амплитудном контрасте в 3D, б – в фазовом контрасте в 2D.

На выбранном участке свободной поверхности фольги высота неровностей не превосходит 40 нм – см. рис. 2. Также видна упорядоченная структура в расположении этих неровностей: указанный на рис. 2а отрезок прямой проходит через 3 из них, отлично отображённых на профиле сечения фольги на рис. 2б. Из рис. 2а и рис. 2б легко оценить размеры этих неровностей (ширина у основания профиля от 2 мкм до 5 мкм) и их высоту (для первых двух неровностей около 25 нм, для третьей – немного менее 40 нм). На рис. 2 практически на всей поверхности фольги слабо заметны и более мелкие неровности с размерами около (0,05-0,1) мкм, которые хорошо визуализируются на рис. 3б. Поскольку характерные размеры таких образований существенно меньше 0,5 мкм, провести локальный рентгеноспектральный микроанализ с такой локальностью и определить химический состав отдельно для каждого локального участка поверхности не удалось.

Отметим, что на контактной поверхности фольг практически отсутствовали плоские участки, что не позволило провести их АСМ-исследования. Это было сделано методами оптической микроскопии – см. рис. 4. Изучение контактной стороны фольги показало наличие структурированной поверхности с неровностями, имеющими размеры до нескольких десятков микрометра.

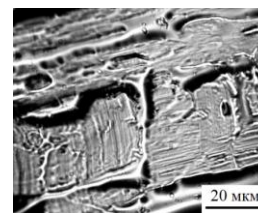
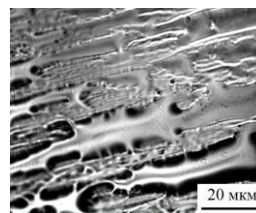


Рис. 4. Структура различных участков контактной поверхности аморфного сплава $Fe_{73}Si_9B_{13}$, полученная в оптическом микроскопе.

Обработка в импульсной подводной низкотемпературной плазме проводилась с использованием различных токов разряда и различных материалов электродов. После обработки поверхности фольг приобретали на вид желтоватый оттенок, характер которого довольно сильно различался в зависимости от режима обработки в плазме. Для большинства материалов наблюдалось неоднородное нанесение материала электродов на поверхность.

Режимы магнитоимпульсной обработки (МИО) описаны в [3]. Характер влияния МИО на исследуемые материалы отвечал описанному в [2].

1. Хлюстова А.В., Сироткин Н.А., Агафонов А.В., Степович М.А., Шипко М.Н. О динамике развития и результатах действия электрического разряда в водной среде // Поверхность. Рентген-, синхротрон. и нейтрон. исслед. 2023. № 2. С. 57-62.

2. Шипко М.Н., Каминская Т.П., Степович М.А., Вирус А.А., Тихонов А.И. О влиянии магнитоимпульсной обработки на структуру поверхности и магнитные свойства ленточных аморфных сплавов $Fe(Ni, Cu)(SiB)$ // Поверхность. Рентген-, синхротрон. и нейтрон. исслед. 2023. № 2. С. 17-22.

3. Шипко М.Н., Степович М.А., Поletaев В.А., Костюк В.Х. О влиянии слабых импульсных магнитных полей на процессы упорядочения в прецизионных сплавах системы Fe-Si-Al // Вестник Ивановского гос. энергетич. ун-та. 2011. № 5. С. 49-51.