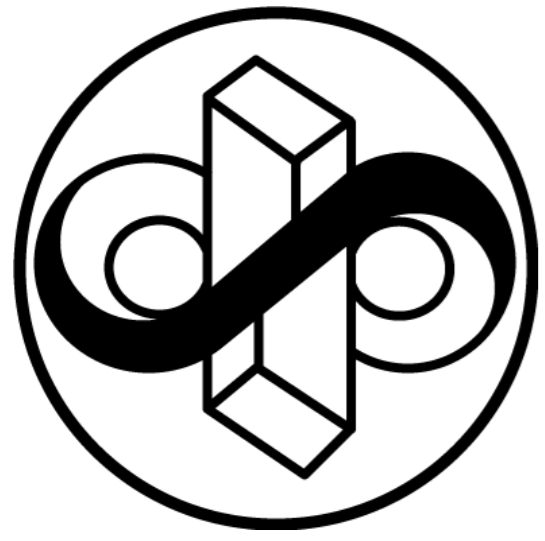


Изменение магнитных свойств аморфных микропроводов состава $Fe_{73.8}Si_{13}B_{9.1}Cu_1Nb_{3.1}$ при нанокристаллизации и воздействии внешних напряжений



Фукс А.А.^{1,2}, Аксенов О.И.¹, Аронин А.С.^{1,2}

1 – Институт физики твердого тела РАН, г. Черноголовка, Россия;

2 – НИУ Высшая школа экономики, г. Москва, Россия

e-mail: artemfux@yandex.ru



Аннотация С использованием методов сканирующей электронной микроскопии, флюксметра и вибрационной магнитометрии было проведено исследование доменной структуры и гистерезисных свойств микропроводов с положительной магнитострикцией (39×10^{-6}) [1]. Сочетание различных условий термообработки, а именно высокотемпературного отжига при температурах больше 400°C и низкотемпературного релаксационного отжига при температуре 330°C , приводит к формированию нанокристаллов твердого раствора кремния в ОЦК-железе с отрицательной магнитострикцией, понижающих до примерно нулевых значений общую магнитострикцию насыщения материала.

Доменная структура аморфных микропроводов с положительной магнитострикцией (рис. 2) представляет собой совокупность центрального доменного слоя с аксиальным направлением намагниченности и поверхностного доменного слоя с радиальным направлением намагниченности [2]. Размеры поверхностных доменов и толщина поверхностного слоя зависят от размеров микропровода, его состава, величины магнитоупругой анизотропии и магнитострикции. Радиус цилиндрического домена сердцевинки, согласно работам [3, 4], определялся по соотношению $R_{\text{core}}/R_{\text{metal}} = (M_r/M_s)^{1/2}$, где M_r – остаточная намагниченность, M_s – намагниченность насыщения.

Внутренние напряжения в микропроводе появляются по двум причинам: во-первых, возникновение закалочных напряжений, обусловленное непосредственно процессом изготовления микропровода и связанное с резким охлаждением расплава, во-вторых, радиальные напряжения, возникающие в результате охлаждения стеклянной оболочки и металлической сердцевинки с разной скоростью из-за разных коэффициентов теплового расширения материалов.

Основные результаты

Рис. 4 Зависимость коэрцитивной силы от приложенного внешнего напряжения при нагрузке (up) и разгрузке (down) микропровода с соотношением $d/D = 0,7$

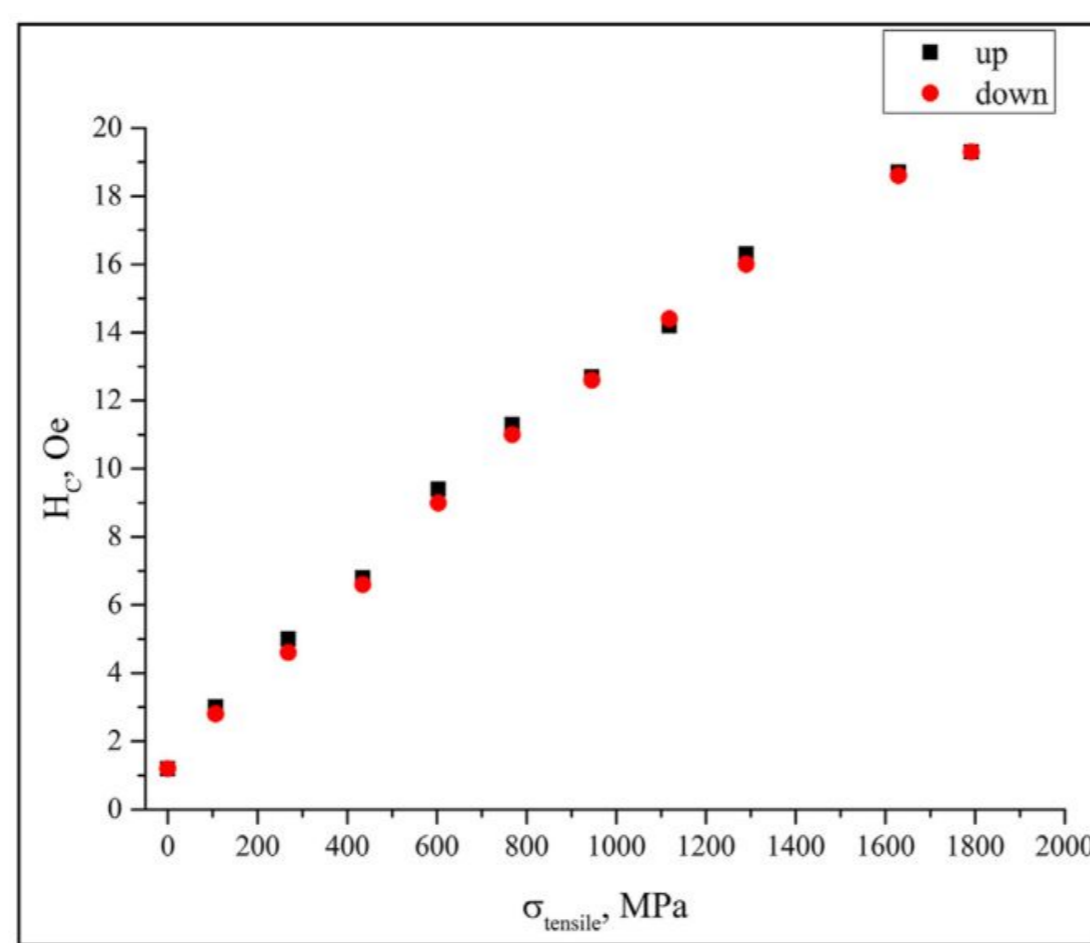
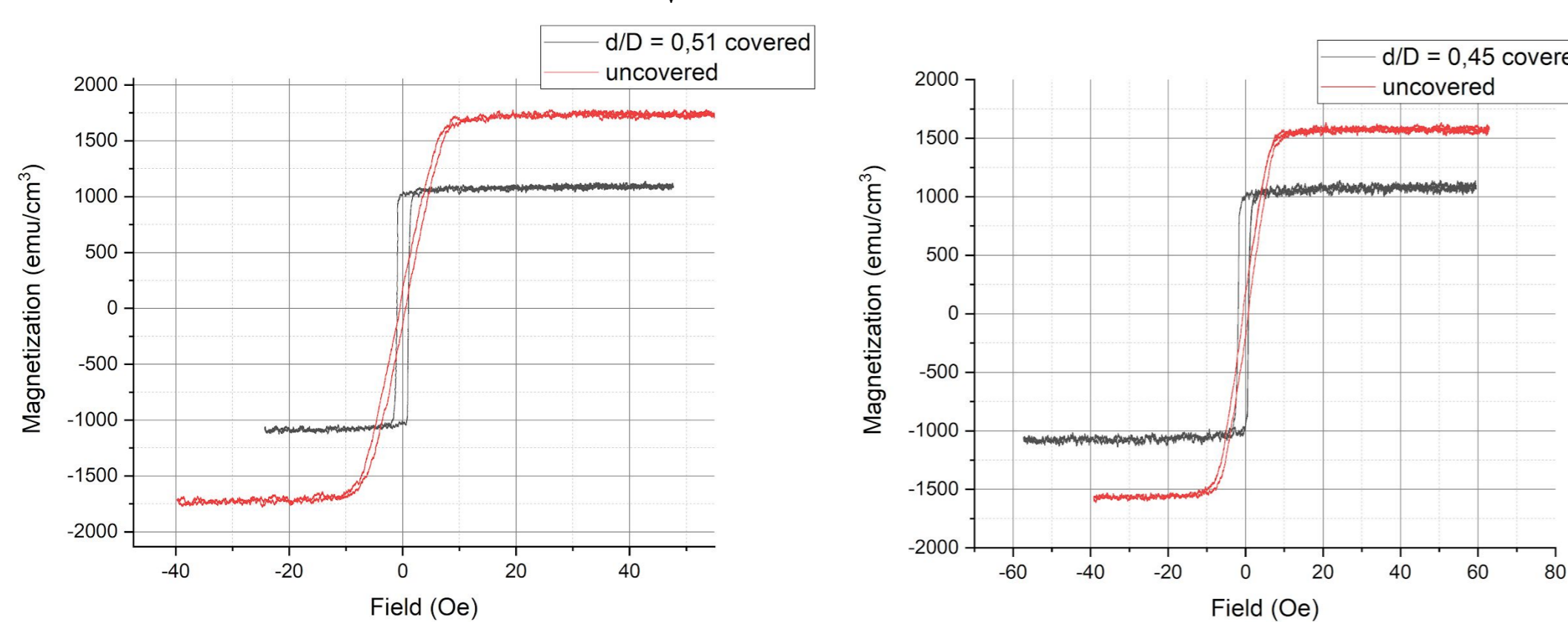


Рис. 5 Петли гистерезиса микропроводов в оболочке и без нее с $d/D=0,51$, отожженных при 550°C 1 час, и с $d/D=0,45$, отожженных при тех же условиях, но с предварительным релаксационным отжигом при 300°C 3 часа



• Коэрцитивная сила у проводов без оболочки больше при том же внешнем напряжении, чем у проводов в стеклянной оболочке из-за отрицательного вклада адгезии в напряжения в поверхностном доменном слое

Образцы Аморфные и нанокристаллизованные микропровода в стеклянной оболочке, изготовленные методом Улитовского-Тейлора (рис. 1) с различными соотношениями d/D диаметра аморфной сердцевинки к общему диаметру микропровода; нанокристаллизация осуществлялась путем отжига. Состав –

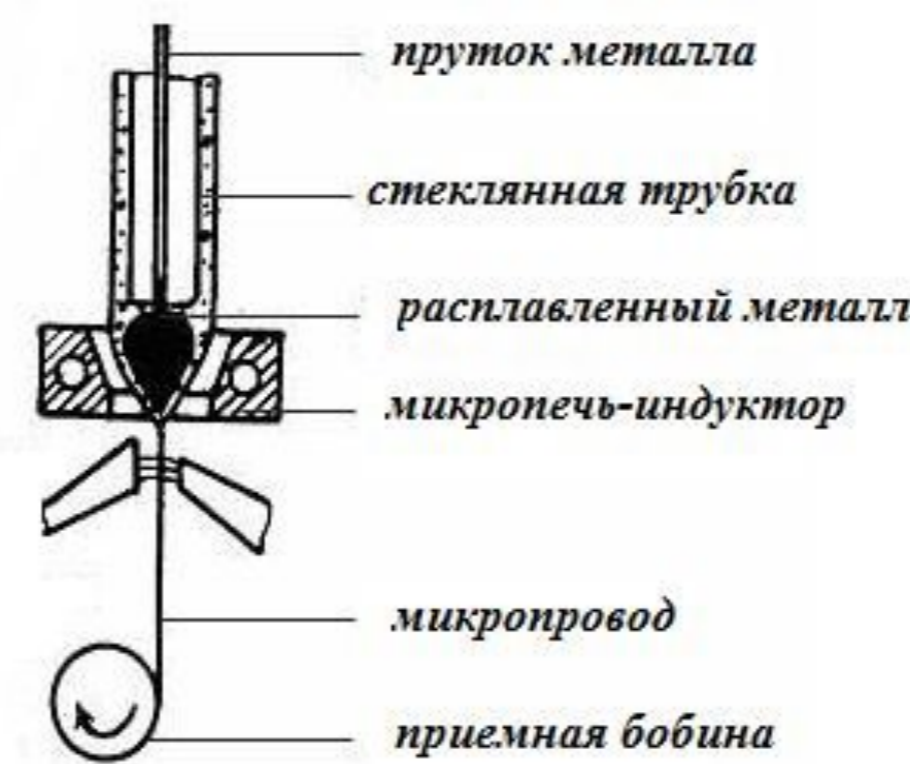


Рис. 1 Схема метода Улитовского-Тейлора

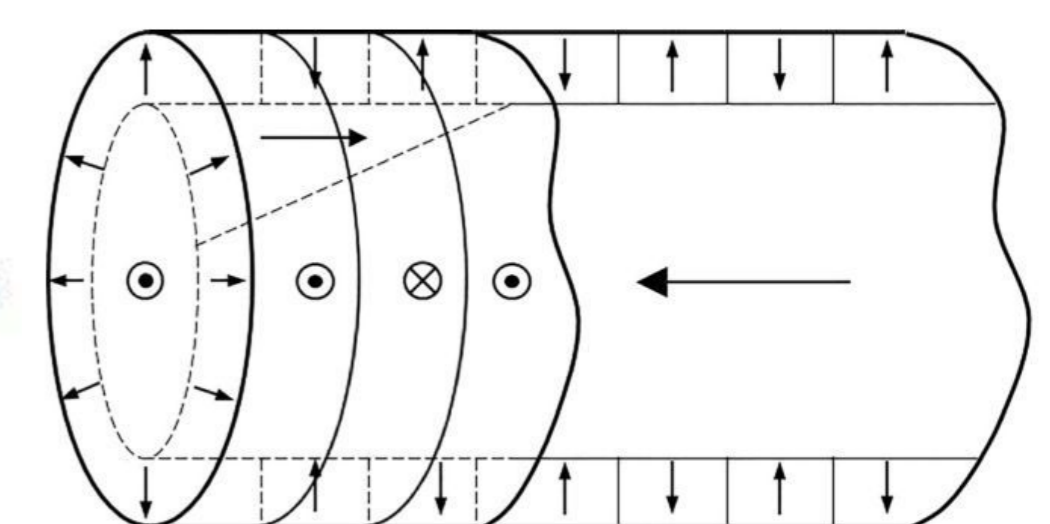


Рис. 2 Магнитная структура аморфных микропроводов с положительной магнитострикцией

Условия отжига	$d/D = 0,51$		Условия отжига	$d/D = 0,45$	
	В оболочке	Без оболочки		В оболочке	Без оболочки
Исходный образец	1,8	–	Исходный образец	1,8	1,1
550C 1 час	1,0	0,48	550C 30 минут	1,4	0,83
Релаксационный отжиг 1 час, остывание на воздухе, 520C 30 минут	1,17	1,1	550C 1 час	1,1	0,56
Релаксационный отжиг 3 часа, остывание в печи, 550C 30 минут	1,22	0,75	Релаксационный отжиг 1 час + остывание на воздухе + 520C 30 минут	1,85	1,3
Релаксационный отжиг 3 часа, остывание в печи, 550C 1 час	0,86	0,6	Релаксационный отжиг 3 часа + остывание в печи + 550C 1 час	1,33	0,7

Табл. 1 Коэрцитивная сила при различных условиях термообработки микропроводов с отношением $d/D = 0,45$ и $d/D = 0,51$

- Нанокристаллизация в подавляющем большинстве случаев уменьшает коэрцитивную силу, этот эффект усиливается удалением стеклянной оболочки и уменьшением из-за этого уровня напряжений в микропроводе
- Для всех типов проводов при высокотемпературном отжиге остаточная намагниченность увеличивается после удаления оболочки
- Размеры цилиндрического домена сердцевинки после нанокристаллизации для микропровода, предварительно подвергнутого релаксационному отжигу, больше, чем в случае, когда он не проводился
- Зависимость коэрцитивности от величины растягивающих напряжений обратима и может состоять из двух частей с линейной и степенной зависимостью, величина которых коррелирует с начальным уровнем и распределением напряжения в материале

1. M. Churyukanova et al. // Journal of alloys and compounds. – 2018. – V. 748 – P. 199

2. J. Yamasaki, F.B. Humphrey, K. Mohry, H. Kawamura, and H. Takamura, R. Malmhäll // Journal of Applied Physics. – 1988. – V. 63 – P. 3949

3. M. Severino, C. Gómez-Polo, P. Marin, and M. Vázquez // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 1992. – V. 103 – P. 117

4. O.I. Aksenov, A.A. Fuks, A.S. Aronin // Journal of Alloys and Compounds. – 2020. – V. 836 – P. 155472

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (проект 19-03-00355)