

Использование аморфных ферромагнитных микропроводов в качестве встроенных сенсоров механических напряжений в функциональных материалах

М.М. Салем¹, М.Г. Неъматов¹, А. Уддин¹, Л.В. Панина^{1,2}, А.Т. Морченко¹, В.А. Скиданов²

¹Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

²Институт проблем проектирования в микроэлектронике РАН, Москва, Россия

elshstawy@science.tanta.edu.eg, lpanina@plymouth.ac.uk, mng2409@gmail.com

Аннотация — В последнее время предпринимаются значительные усилия для развития неразрушающих методов контроля механических напряжений в различных композитных материалах. В настоящей работе обсуждается новый способ мониторинга внутренних напряжений, основанный на использовании ферромагнитных микропроводов как стресс-чувствительных встраиваемых сенсоров. Аморфный микропровод в стеклянной оболочке состава $\text{Co}_{71}\text{Fe}_5\text{V}_{11}\text{Si}_{10}\text{Cr}_3$ имеет небольшую положительную магнитострикцию и бистабильные кривые намагничивания. В процессе перемагничивания микропровода возникает резкий скачок напряжения, который характеризуется высокочастотными гармониками в спектре сигнала. Амплитуда этих гармоник значительно изменяется под действием различных напряжений. Этот эффект и предлагается использовать для бесконтактного измерения внутренних напряжений. Микропровод диаметром 10-50 мкм не влияет на структурную целостность композита, поэтому может использоваться как его составная часть. Результаты экспериментов проанализированы в рамках магнитостатической модели намагничивания.

Ключевые слова — ферромагнитный микропровод, магнитострикция, магнитный импеданс, магнитная бистабильность, встроенные сенсоры.

I. ВВЕДЕНИЕ

Ферромагнитный микропровод с аморфной или нанокристаллической структурой имеет ряд специфических магнитных свойств: наличие двух устойчивых состояний, или бистабильность [1-3], очень большой магнитный импеданс (МИ) [4-6] и импеданс, чувствительный к механическим напряжениям [7, 8]. Все указанные свойства могут использоваться для разработки различных сенсоров. С точки зрения практических приложений важно, чтобы магнитные и структурные свойства провода можно было бы регулировать с помощью специальных обработок, в частности, отжига. В случае магнитных проводов со стеклянным покрытием магнитные свойства также зависят от соотношения толщины стекла и диаметра металлического сердечника. Существует два основных типа магнитных

микропроводов. Первый тип, обычно присущий составам, богатым железом, характеризуется практически прямоугольной петлей магнитного гистерезиса, измеренной в магнитном поле вдоль оси микропровода. При перемагничивании генерируется узкий сигнал напряжения, имеющий в спектре гармоники высоких порядков. Выявление высоких гармоник возможно благодаря хорошему отношению сигнал/шум, т.к. обычный шум и $1/f$ шум существенно подавляются на высоких частотах. Амплитуда гармоник зависит от внешних параметров, таких как деформация, механическое напряжение, температура. Следовательно, подобные провода могут использоваться в качестве беспроводных датчиков с дистанционным опросом, будучи установленными на поверхности изделий, либо размещенными внутри материалов. Второй тип микропроводов характеризуется практически линейной наклонной петлей гистерезиса с насыщением. В них проявляется эффект магнитного импеданса – большое изменение высокочастотного импеданса микропровода под влиянием продольного магнитного поля [4-6]. Указанное свойство сходно с явлением гигантского магниторезистивного эффекта и используется при разработке высокочувствительных магнитных датчиков для регистрации магнитных полей чрезвычайно низкой напряженности (см., например, обзор [9]). Такие провода могут также применяться в качестве встроенных сенсоров, которые работают на гигагерцевых частотах. Провод конечной длины ведет себя как симметричная антенна, параметр релаксации которой зависит от внешних факторов из-за модуляции импеданса. В данной работе мы фокусируем внимание на первом типе проводов, часто называемых бистабильными проводами, и на их свойстве генерировать высокие гармоники индуцированного электрического напряжения. Мы демонстрируем, что указанные гармоники могут быть чувствительными к растягивающим и скручивающим напряжениям, и это явление может быть использовано для мониторинга целостности различных конструкций.

В технологиях внедренных сенсоров в качестве чувствительных элементов обычно используются

особые частицы или волокна, которые выступают посредниками между внутренними параметрами среды и считывающим устройством (детектором). В зависимости от физического принципа, используемого для реализации данной передаточной функции, возможен выбор и различных физических величин в качестве измеряемых параметров. Последние включают в себя, например, ток, напряжение, сопротивление или импеданс, электрические или магнитные поля, магнитную или электрическую проницаемость, амплитуду и фазу отраженных или проходящих электромагнитных волн и т.д. Метод мониторинга внутренних растягивающих напряжений, разработанный в настоящей работе, заключается во встраивании бистабильного микропровода в полимерную матрицу и регистрации гармонического спектра отклика получившейся системы при ее опросе.

Будет полезно провести сравнительный анализ нескольких методов построения встроенных сенсоров, которые аналогичны нашему методу либо по геометрии включения, либо по некоторым физическим принципам. Бесспорным лидером неразрушающих испытаний композиционных материалов является метод, использующий встроенные оптические волокна [10, 11]. Кремниевые или полимерные оптические волокна могут выступать в качестве сенсоров самостоятельно, либо могут передавать сигналы между тестируемой областью, где свет взаимодействует с веществом, и считывающим устройством. Наряду с чрезвычайной чувствительностью оптическим методом можно также измерять широкий ряд характеристик, таких как напряжение, температура, давление, влажность и вибрация. Кроме того, он не восприимчив к электромагнитным помехам. Недостатком данной технологии является необходимость в защитном покрытии, что увеличивает общий размер сенсорного элемента. В свою очередь магнитные микропровода со стеклянным покрытием могут иметь размеры в единицы микрометров, что сопоставимо с элементами структуры композита – стеклянными или углеродными волокнами.

В импедансной спектроскопии [12-16] эффективный импеданс смеси проводящих (стальных или углеродных) армирующих волокон и слабопроводящей матрицы измеряется в определенном частотном диапазоне (обычно МГц) между парой коммутационных контактов, прикрепленных к поверхности образца. Поскольку объемная доля волокон обычно ниже порога перколяции, наличие слабопроводящей матрицы абсолютно необходимо для обеспечения эффективной проводимости. Внешнее напряжение не изменяет электрических свойств немагнитных проводящих волокон. Пьезоимпедансный эффект вызван интерфейсом между матрицей и волокнами, который имеет емкостную природу из-за наличия оксидного или поляризационного слоев, формирующихся на поверхностях стальных и углеродных волокон, соответственно. Следовательно, данный метод вряд ли пригоден при использовании матриц с очень низкой

проводимостью, например, полимерных. Напротив, чувствительность ферромагнитных микропроводов к механическим напряжениям вызвана только ее внутренними магнитными свойствами и, исходя из этого, такие провода можно использовать в любых диэлектрических матрицах, допускающих их встраивание.

К преимуществам использования магнитных микропроводов в качестве встроенных датчиков относятся также чувствительность отклика, перенастраиваемость характеристик, небольшая стоимость и относительно простая обработка сигнала.

В способе магнитострикционной маркировки магнитные микрочастицы сплава Терфенол-Д (Тб-Fe-Du) определенной формы добавляются в матрицу для обеспечения эффективных магнитных свойств композита [17, 18]. Так как частицы Терфенол-Д почти в девять раз плотнее, чем материал матрицы, они имеют склонность к осаждению в процессе отвердевания смолы. Для предотвращения этого нежелательного явления образец помещается между полюсами постоянного магнита, создающего однородное магнитное поле, перпендикулярное поверхности образца. Образцы, приготовленные таким способом, имеют кластеры, состоящие из встроенных частиц, и демонстрируют при нагрузке повышенный магнитострикционный отклик. Механическое напряжение, передаваемое частицам по матрице, вызывает изменение равновесного направления намагниченности за счет обратного магнитострикционного эффекта. Мониторинг механического напряжения производится с помощью контроля продольной или перпендикулярной компоненты магнитного поля вблизи поверхности образца посредством магнитометра. Магнитострикционный эффект используется и в нашем методе. Однако измеряемой в этом случае величиной является амплитуда высших гармоник отклика. Использование микропроводов освобождает от необходимости обеспечивать формирование нужных магнитных свойств в процессе отвердевания материала, а использование отношения амплитуд высокочастотных гармоник позволяет избавиться от проблем калибровки при измерении.

II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Нами были изучены аморфные провода со стеклянным покрытием состава $Co_{71}Fe_5B_{11}Si_{10}Cr_3$, имеющего низкое положительное значение константы магнитострикции (порядка 10^{-7}). В экспериментах использовались два типа проводов с различной геометрией: общим диаметром 29,5 и 41,5 мкм и диаметром металлического сердечника 23,9 и 36,3 мкм соответственно, обозначаемых в дальнейшем как образец №1 и образец №2.

Структурные параметры проводов исследовались методом дифференциальной сканирующей калориметрии.

Были рассмотрены процессы намагничивания проводов под воздействием растягивающей нагрузки

до 50 г (что соответствует механическому напряжению 693 МПа для диаметра проволоки около 30 мкм) с использованием индукционного метода с двумя дифференциальными катушками, имеющими внутренний диаметр 3 мм. Для питания использовался ток частотой 500 Гц, амплитуда намагничивающего поля составляла 1000 А/м. Нагрузка прикладывалась с одного конца микропровода. Для построения петли гистерезиса индуцированный электрический сигнал оцифровывался и интегрировался как функция магнитного поля.

Мы также изучали зависимость высокочастотного импеданса от магнитного поля в диапазоне частот 1-100 МГц с помощью векторного анализатора цепей Hewlett-Packard 8753E путем измерения параметра S12 (коэффициента передачи) для специально разработанной микроволновой полосковой ячейки, содержащей микропровод.

Высокочастотные гармоники выделяются численным методом с применением Фурье-преобразования измеряемого импульса напряжения при перемагничивании в некотором временном интервале.

III. ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 1 представлены результаты дифференциальной сканирующей калориметрии. Видно, что образец №1 имеет аморфную структуру, процесс кристаллизации начинается при температуре 514°C. Образец №2 с большим диаметром не имеет четкого пика кристаллизации, что свидетельствует о его изначальной частичной кристалличности (около 15%). Это структурное различие обуславливает различное влияние механических напряжений на процессы намагничивания проводов. Температура Кюри обоих проводов совпадает и равна 364°C.

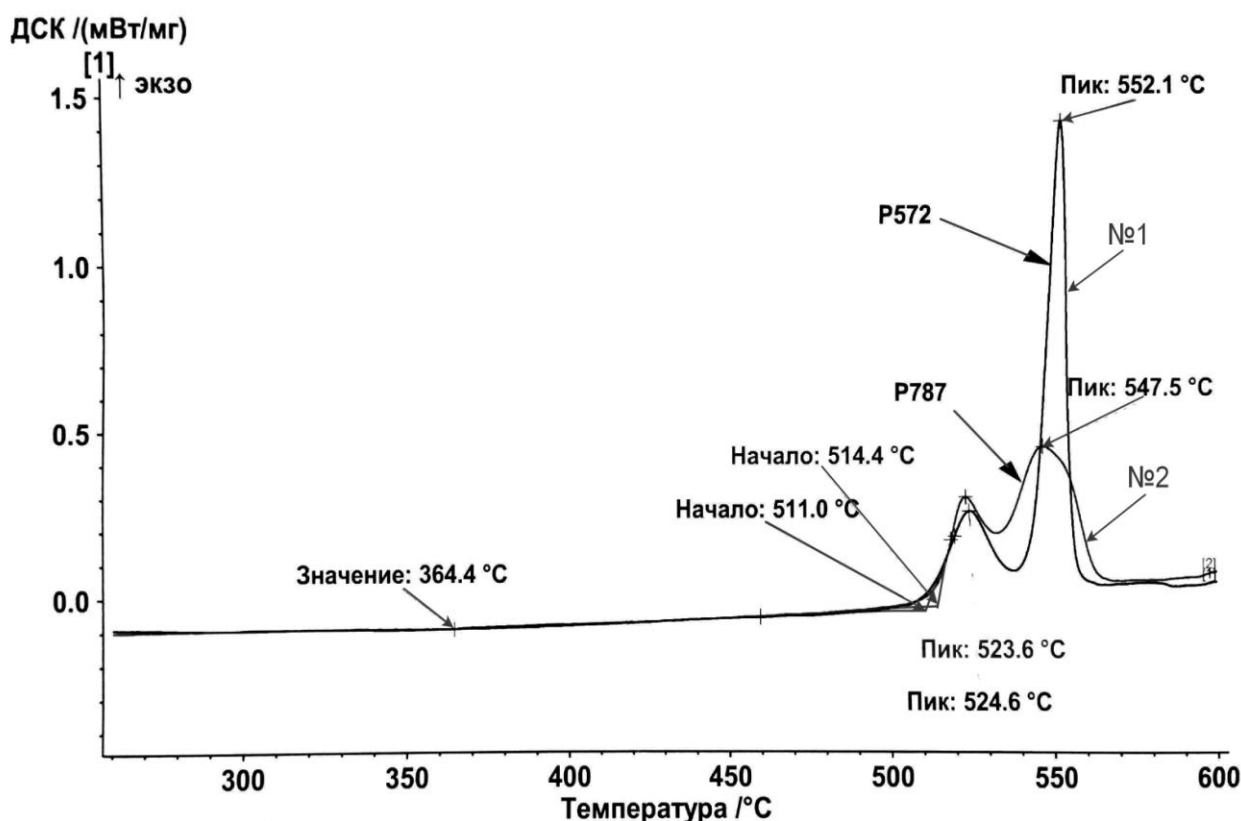


Рис. 1. Дифференциальная сканирующая калориметрия для двух исследуемых образцов

На рис. 2 представлены кривые намагничивания обоих образцов. При отсутствии растягивающего напряжения петли гистерезиса проводов обоих типов практически идентичны, демонстрируя небольшую коэрцитивность около 25 А/м. Петля гистерезиса у

провода меньшего диаметра имеет два более ярко выраженных устойчивых состояния. Значение остаточной намагниченности, близкое к насыщению, также подтверждает существование осевой анизотропии практически во всем объеме проводов.

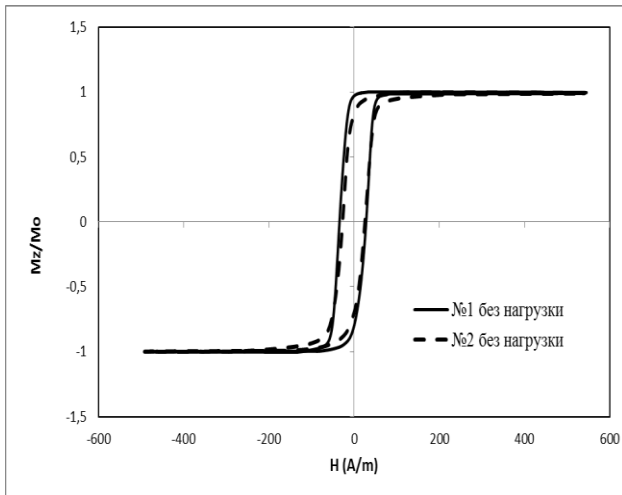


Рис. 2. Петли гистерезиса микропроводов №1 и №2 состава $\text{Co}_{71}\text{Fe}_5\text{V}_{11}\text{Si}_{10}\text{Cr}_3$. Кривая, полученная на проводе меньшего диаметра (№1) демонстрирует более ярко выраженное бистабильное поведение

На рис. 3 (а, б) показана действительная часть импеданса как функция магнитного поля для различных значений растягивающего напряжения на частоте 80 МГц. В отсутствие напряжений оба провода имеют МИ характеристики с одним центральным пиком, что также свидетельствует о наличии осевой магнитной анизотропии [19]. Однако под влиянием напряжений кривые импеданса изменяются различным образом. Провода второго типа сохраняют форму МИ характеристик, но с меньшей чувствительностью. Для проводов первого типа происходит изменение формы кривых МИ: появляются два симметричных пика, что характерно для циркулярной или геликоидальной анизотропии. Таким образом, в проводах первого типа изменяется характер магнитной анизотропии. При этом усиливается чувствительность процессов намагничивания по отношению к механическим воздействиям.

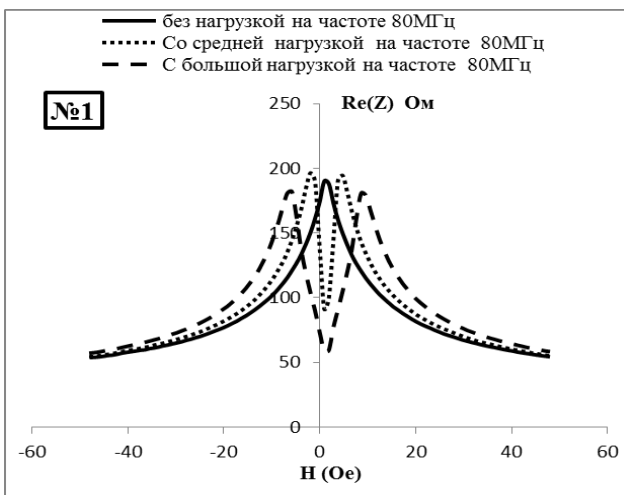


Рис. 3а. Зависимость действительной части импеданса от магнитного поля при различной нагрузке в микропроводе №1

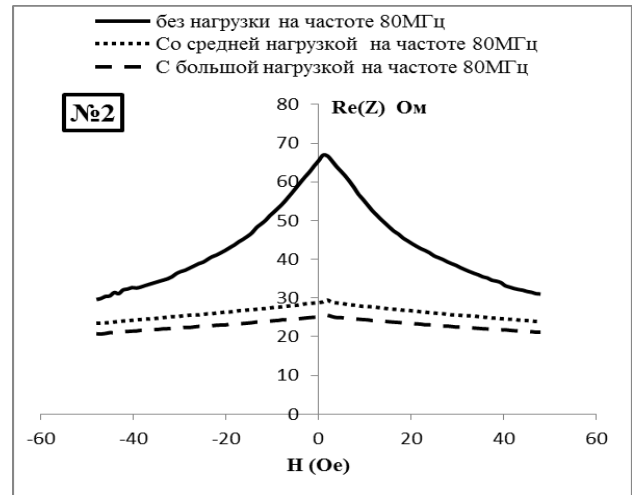


Рис. 3б. Зависимость действительной части импеданса от магнитного поля при различной нагрузке в микропроводе №2

Преобразование петель гистерезиса под действием растягивающего напряжения в изученных типах проводов также разительно отличается. Образец №1 теряет свойство бистабильности, демонстрируя наклонную петлю гистерезиса с резко уменьшенной восприимчивостью, как показано на рис. 4. Такое преобразование происходит по причине индуцирования в проводе под действием нагрузки магнитострикционной анизотропии циркулярного типа. Природа изменения анизотропии может быть связана со сменой знака магнитострикции под действием растяжения [20]. В образце №2 характер воздействия растягивающего напряжения на петлю гистерезиса существенно отличается. Как видно из рис. 5, по мере роста нагрузки коэрцитивность провода увеличивается, а петля приобретает все более и более ярко выраженное свойство бистабильности. Следовательно, в данном случае знак магнитострикции остается положительным.

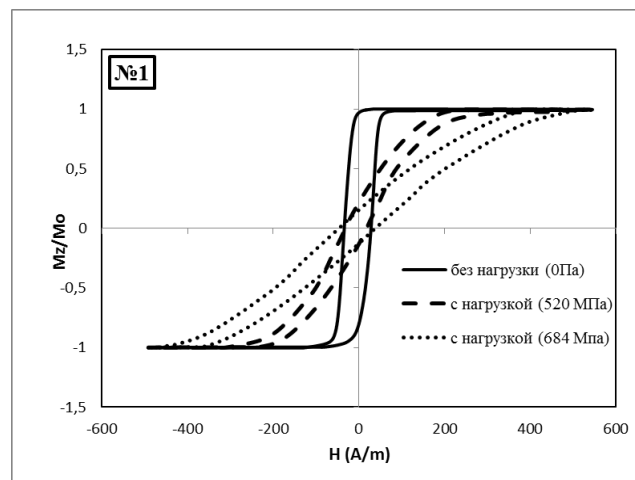


Рис. 4. Влияние растягивающего напряжения на осевую петлю гистерезиса микропровода в стеклянной оболочке (образец №1). Нагрузка прикладывалась к свободному концу провода (оценка напряжения, создаваемого грузом в 1 г, составляет 14 МПа)

Необходимо отметить, что изменение знака магнитострикции также очень важно для понимания большой чувствительности МИ к напряжению в проводах на гигагерцевых частотах. Известно, что при увеличении частоты основное влияние на чувствительность импеданса оказывает зависимость направления статического намагничивания от внешнего фактора [21, 22]. В проводах как с отрицательной магнитострикцией (циркулярная анизотропия), так и с положительной магнитострикцией (осевая анизотропия) приложение растягивающего напряжения не приводит к изменению направления намагничивания. Однако если напряжение также приводит к изменению знака магнитострикции, это вызовет резкое изменение типа анизотропии и направления намагничивания.

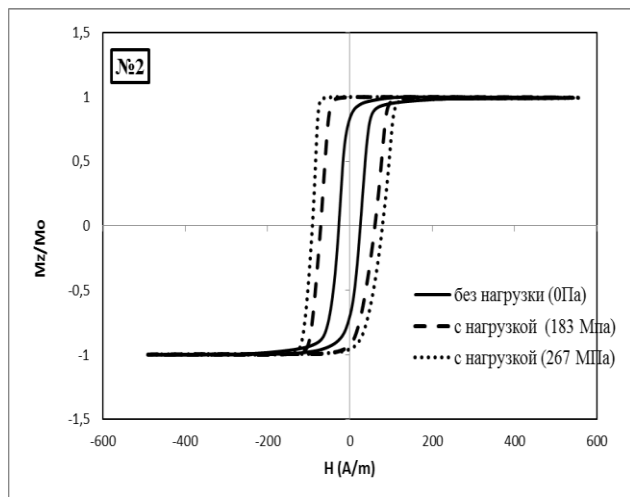


Рис. 5. Влияние растягивающего напряжения на осевую петлю гистерезиса микропровода в стеклянной оболочке (образец № 2). Нагрузка прикладывалась к свободному концу провода (оценка напряжения, создаваемого грузом в 1 г, составляет 7 МПа)

Процесс намагничивания провода также реагирует и на иные типы механического воздействия, в частности, на напряжение кручения. На рис. 6. показано влияние напряжения кручения, выражающееся в повышении коэрцитивности, при этом кривая гистерезиса имеет два четко выраженных участка, относящихся к широким скачкам Баркгаузена в области смещения доменных границ и вращению намагниченности в более высоких полях. Такое поведение согласуется с предположением, что изменение знака магнитострикции происходит под воздействием напряжения. Напряжение кручения, являющееся сочетанием напряжений растяжения и сжатия, велико в поверхностной области микропровода и способствует росту вклада участка вращения намагниченности на кривой намагничивания. Центральная область жилы провода сохраняет аксиальную анизотропию, и механизм ее намагничивания ограничивается процессами смещения доменных стенок.

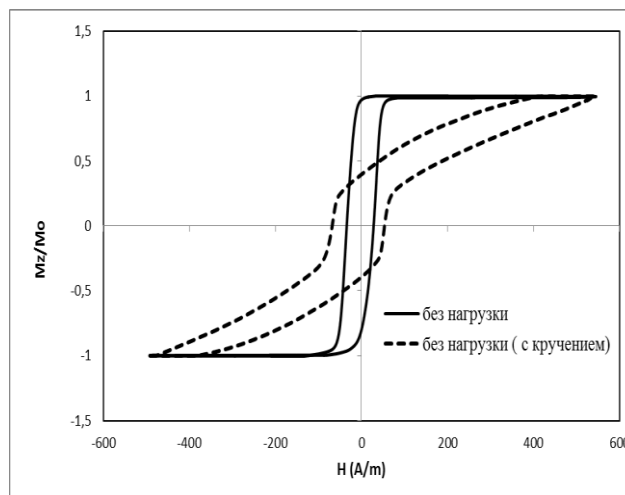


Рис. 6. Влияние напряжения кручения на петли осевого гистерезиса микропровода в стеклянной оболочке (образец № 1)

В обоих типах проводов электрическое напряжение, индуцированное при их перемагничивании, характеризуется генерированием высоких гармоник, амплитуда которых значительно изменяется под воздействием механического напряжения, как это показано на рис. 7 (а, б). Тем не менее, если речь идет о проводах меньшего диаметра (образец №1), амплитуды гармоник монотонно уменьшаются с ростом напряжения вплоть до 500-700 МПа (в зависимости от количества гармоник); при этом для бистабильного провода минимальное значение амплитуды в зависимости от напряжения достигается при 300 МПа, а при малых напряжениях наблюдается область отсутствия чувствительности. Следовательно, для применения в качестве элемента, чувствительного к механическим напряжениям, образец провода №1 является более предпочтительным.

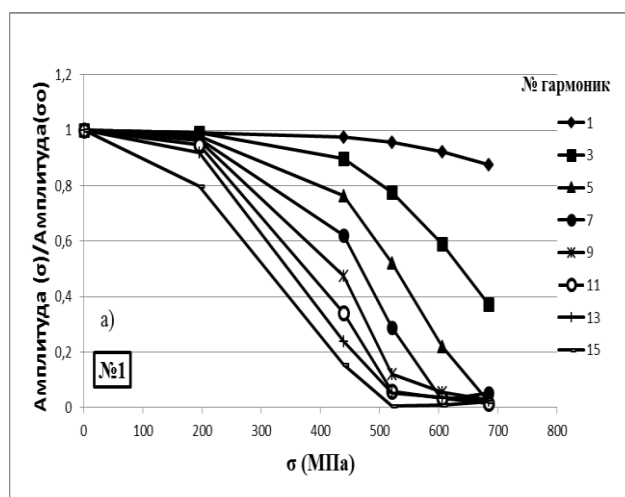


Рис. 7а. Амплитуды высоких гармоник как функции приложенного напряжения для образца провода №1. Амплитуды нормированы к их значениям в отсутствие механического напряжения

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложено использовать аморфные провода в стеклянной оболочке с малой положительной магнитострикцией в качестве встроенных сенсоров механических напряжений, действие которых основано на изменении спектра их сигнала. Были изучены процессы намагничивания под воздействием растягивающих напряжений и генерация высоких гармоник в двух типах проводов состава $\text{Co}_{71}\text{Fe}_5\text{B}_{11}\text{Si}_{10}\text{Cr}_3$ с различной геометрией. Показано, что амплитуды высокочастотных гармоник демонстрируют очень высокую чувствительность к механическим напряжениям, которая наиболее ярко выражена в проводах, где напряжение приводит к изменению преимущественных направлений магнитной анизотропии.

Таким образом, в основу принципа действия встроенных сенсоров можно положить зависимость спектра гармоник сигнала аморфных ферромагнитных микропроводов от механических напряжений. Для практического применения бистабильных проводов в сенсорах важным преимуществом является отсутствие необходимости их калибровки по причине высокой чувствительности отношения амплитуды отдельных гармоник к контролируемым механическим напряжениям.

БЛАГОДАРНОСТИ

Настоящая работа была выполнена при поддержке и в рамках государственного заказа Российской Федерации по организации научной работы Л.В. Паниной. Авторы выражают особую благодарность директору компании MFTI Ltd В. Ларину за безвозмездное предоставление образцов бистабильных микропроводов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Chiriac H. and Ovari T.-A. Amorphous Glass-Covered Magnetic Wires: Preparation, Properties, Applications. // *Progr. Mater. Sci.* 1996. V. 40, P. 333-407.
- [2] A. Zhukov and V. Zhukova. Magnetic properties and applications of ferromagnetic microwires with amorphous and nanocrystalline structure. // *Nova Science Publishers*. 2009. V. 162, P. 11788, ISBN: 978-1- 60741 - 770-5.
- [3] M. Vazquez, H. Chiriac, A. Zhukov, L. Panina, T. Uchiyama. On the state-of-the-art in magnetic microwires and expected trends for scientific and technological studies. // *Phys. Status Solidi*. 2011. V. 208, P. 493-501.
- [4] L. Panina and K. Mohri. Magneto-impedance effect in amorphous wires. // *Appl. Phys. Lett.* 1994. V. 65, P. 1189-1191.
- [5] M. Knobel and K. R. Pirota. Giant magnetoimpedance: concepts and recent progress. // *J. Magn. Magn. Mater.* 2002. V. 242/245, P. 33-40.
- [6] C. Tannous, J. Gieraltowski. Giant magneto-impedance and its applications. // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2004. V.15, P.125-133.
- [7] L. V. Panina, S. I. Sandacci, D. P. Makhnovskiy. Stress effect on magneto-impedance (MI) in amorphous wires at GHz frequencies and application to stress-tunable microwave composite materials. // *J. Appl. Phys.* 2005. V.97 P. 013701-6.

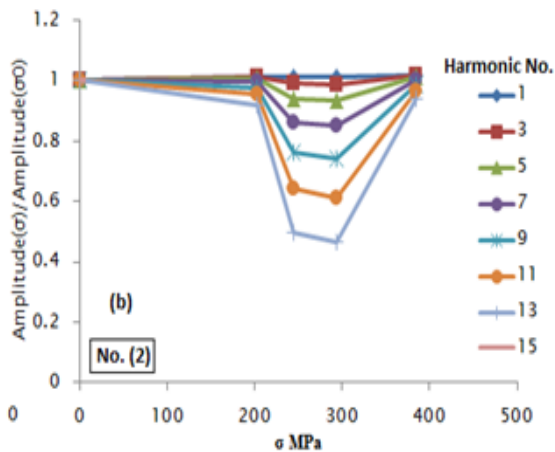


Рис. 76. Амплитуды высших гармоник как функции приложенного напряжения для образца провода №2. Амплитуды нормированы к их значениям в отсутствие механического напряжения

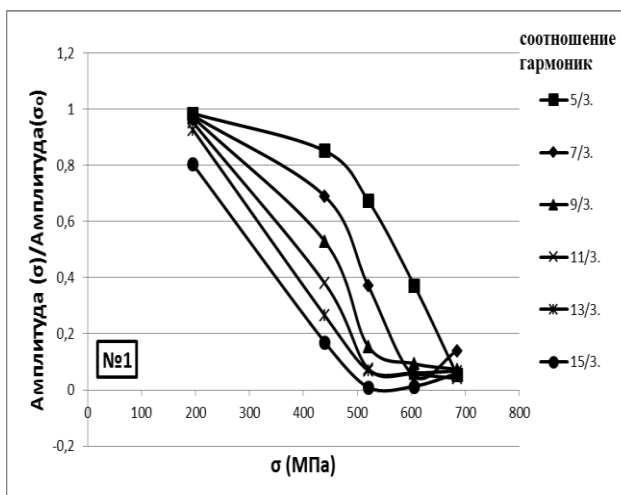


Рис. 8. Отношение амплитуд гармоник как функции приложенного напряжения для образца провода № 1

Для образца №1 также была изучена чувствительность к напряжению с учетом соотношения высоких гармоник, в частности, нормированных к амплитуде третьей гармоники, как показано на рис. 8. Указанное соотношение имеет очень высокую чувствительность к напряжению, что очень важно для практических целей, так как его можно использовать при калибровке, во избежание воздействия измерительного оборудования. Согласно полученным результатам, аморфные микропровода с незначительной положительной магнитострикцией могут использоваться в качестве чувствительных к механическим напряжениям внутри элементов конструкций, изготовленных из различных материалов. Изменения в индуктивном спектре гармоник могут обеспечивать информацией о состоянии деформации или механического напряжения внутри материалов, которое трудно измерить иными способами.

- [8] K. Mohri, T. Uchiyama, L. P. Shen, C. M. Cai, L. V. Panina, Y. Honkura, M. Yamamoto. Amorphous wire and CMOS IC-based sensitive micromagnetic sensors utilizing magnetoimpedance (MI) and stress-impedance (SI) effects. // *IEEE Trans. Magn.* 2002. V. 38, №-5, P. 3063-3068.
- [9] Mohri, K., Honkura, Y., Panina, L.V., Uchiyama T. Super MI Sensor: Recent Advances of Amorphous Wire and CMOS-IC Magneto-Impedance Sensor. // *J. Nanoscience and Nanotechnology.* 2012. V.12. P. 7491-7495.
- [10] G. F. Fernando. Fibre optic sensor systems for monitoring composite structures. // *Reinf. Plast.* 2005. V. 49, P. 41-49.
- [11] K. Peters. Polymer optical fiber sensors - a review. // *Smart Mater. Struct.* 2011. V. 20, P. 013002-18.
- [12] J. M. Torrents, T. O. Mason, E. J. Garboczi. Impedance spectra of fiber-reinforced cement-based composites. A modeling approach. // *Cem. Concr. Research.* 2000. V.30, P. 585-592 26.
- [13] A. D. Hixson, L. Y. Woo, M. A. Campo, T. O. Mason, E. J. Garboczi. Intrinsic conductivity of short conductive fibers in composites by impedance spectroscopy. // *J. Electroceramics.* 2001. V. 7, P. 189-195.
- [14] A. Peled, J. M. Torrents, Th. O. Mason, S. P. Shah, E. J. Garboczi. Electrical impedance spectra to monitor damage during tensile loading of cement composites. // *ACI Mater. Journal.* 2001. V. 98, P. 313-322.
- [15] J. M. Torrents, T. O. Mason, A. Peled, S. P. Shah, E. J. Garboczi. Analysis of the impedance spectra of short conductive fiber reinforced composites. // *J. Mater. Sci.* 2001. V. 36, P. 4003-12.
- [16] T. C. Hou and J. P. Lynch. Electrical impedance tomographic methods for sensing strain fields and crack damage in cementitious structures. // *J. Intel. Mater. Syst. Struct.* 2009. V. 20, P. 1363-1379.
- [17] M. Kubicka, T. Mahrholz, A. Kühn, P. Wierach, M. Sinapius Magnetostrictive properties of epoxy resins modified with Terfenol-D particles for detection of internal stress in CFRP. Part 1: materials and process. // *J. Mater. Sci.* 2012. V. 47, P. 5752-5759.
- [18] M. Kubicka, T. Mahrholz, A. Kühn, P. Wierach, M. Sinapius Magnetostrictive properties of epoxy resins modified with Terfenol-D particles for detection of internal stress in CFRP. Part 2: evaluation of stress detection // *J. Mater. Sci.* 2013. V. 48, P. 6578-6584.
- [19] D.P. Makhnovskiy, L.V. Panina and D.J. Mapps, Field-dependent surface impedance tensor in amorphous wires with two types of magnetic anisotropy: helical and circumferential // *Phys Rev B.* 2001. V. 63, P. 14424-14441.
- [20] A. Zhukov, M. Churyukanova, S. Kaloshkin, V. Sudarchikova, S. Gudoshnikov, M. Ipatov, A. Talaat, J. M. Blanco, V. Zhukova. Magnetostriction of Co-Fe-Based Amorphous Soft Magnetic microwires. // *Journal of Electronic Materials.* 2015. V. 44, P. 1-9.
- [21] S. Sandacci, D.P. Makhnovskiy, L.V. Panina, V. Larin. Valve-like behaviour of the magnetoimpedance in the GHz range // *J. Magn. Magn. Mat.* 2004. V. 272-276, P. 1855-1857.
- [22] L. V. Panina, S. I. Sandacci, D. P. Maknovskiy. Stress effect on magneto-impedance (MI) in amorphous wires at GHz frequencies and application to stress-tuneable microwave composite materials. // *J. Appl. Phys.* 2005. V. 97, P. 013701 -013703.

Amorphous Glass-Coated Microwires for Using as Embedded Stress Sensors in Functional Materials

M.M. Salem¹, M.G. Nematov¹, A. Uddin¹, L.V. Panina^{1,2}, A.T. Morchenko¹, V.A. Skidanov²

¹National University of Science and Technology, MISIS, Moscow 119991, Russia

²Institute for Design Problems in Microelectronics RAS, Moscow 124681, Russia

e-mail: elshshtawy@science.tanta.edu.eg, drlpanina@gmail.com, mng2409@gmail.com

Keywords - ferromagnetic microwires, magnetostriction, magnetoimpedance, magnetic bistability, embedded sensors

ABSTRACT

Contactless measurement of the internal stress distribution in composite materials is of high importance in the structural health monitoring. Considerable efforts are made to develop the embedded stress-sensor approaches. In the present work it is proposed to utilize the soft-magnetic amorphous microwires with a stress-sensitive magnetization process as the sensors embedded into a polymer matrix. The microwire of a diameter of 10-50 microns is covered by glass and is compatible with the structural glass or carbon fibers. Because of an amorphous state, the main source of the anisotropy is the magnetostrictive interaction, so the wire magnetization processes may be highly sensitive to stress. When a bistable microwire is remagnetized a sharp voltage surge is

induced which is characterized by high frequency harmonics. The amplitude of these harmonics sensitively depends on the various stresses. This property can be used for the stress monitoring inside composite materials.

In wires with the axial anisotropy which is induced by the combination of positive magnetostriction and frozen-in internal tensile stress the remagnetization takes place by axial domain propagation, which generates the sharp voltage signal producing higher harmonics. The harmonic amplitude depends on external parameters, such as stress, strain and temperature. Enhanced stress sensitivity is seen in the case when the magnetostriction constant can change a sign under the stress effect as was demonstrated in the present paper. Therefore these wires are perspective as the wireless sensors with remote interrogation and can be placed on the surface or inside materials. We have demonstrated that the ratio of harmonic amplitude may

also sensitively depend on tensile and torsion stress which can be used directly for the structural health monitoring.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Russian Federation State contract for organizing a scientific work. The authors are very thankful to Dr. V. Larin, MFTI Ltd, for donating the wire samples.

REFERENCES

- [1] Chiriac H. and Ovari T.-A. Amorphous Glass-Covered Magnetic Wires: Preparation, Properties, Applications. //Progr. Mater. Sci. 1996. V. 40, P. 333-407
- [2] A. Zhukov and V. Zhukova. Magnetic properties and applications of ferromagnetic microwires with amorphous and nanocrystalline structure. //Nova Science Publishers. 2009. V. 162, P. 11788, ISBN: 978-1- 60741 - 770-5
- [3] M. Vazquez, H. Chiriac, A. Zhukov, L. Panina, T. Uchiyama. On the state-of-the-art in magnetic microwires and expected trends for scientific and technological studies. //Phys. Status Solidi. 2011. V. 208, P. 493-501
- [4] L. Panina and K. Mohri. Magneto-impedance effect in amorphous wires. //Appl. Phys. Lett. 1994. V. 65, P. 1189-1191
- [5] M. Knobel and K. R. Pirota. Giant magnetoimpedance: concepts and recent progress. //J. Magn. Magn. Mater. 2002. V. 242/245, P. 33-40
- [6] C. Tannous, J. Gieraltowski. Giant magneto-impedance and its applications. //Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2004. V.15, P.125-133.
- [7] L. V. Panina, S. I. Sandacci, D. P. Makhnovskiy. Stress effect on magneto-impedance (MI) in amorphous wires at GHz frequencies and application to stress-tuneable microwave composite materials. //J. Appl. Phys. 2005. V.97 P. 013701-6
- [8] K. Mohri, T. Uchiyama, L. P. Shen, C. M. Cai, L. V. Panina, Y. Honkura, M. Yamamoto. Amorphous wire and CMOS IC-based sensitive micromagnetic sensors utilizing magnetoimpedance (MI) and stress-impedance (SI) effects. // IEEE Trans. Magn. 2002. V. 38, №-5, P. 3063-3068
- [9] Mohri, K., Honkura, Y., Panina, L.V., Uchiyama T. Super MI Sensor: Recent Advances of Amorphous Wire and CMOS-IC Magneto-Impedance Sensor. //J. Nanoscience and Nanotechnology. 2012. V.12. P. 7491-7495
- [10] G. F. Fernando. Fibre optic sensor systems for monitoring composite structures. //Reinf. Plast. 2005. V. 49, P. 41-49
- [11] K. Peters. Polymer optical fiber sensors - a review. //Smart Mater. Struct. 2011. V. 20, P. 013002-18
- [12] J. M. Torrents, T. O. Mason, E. J. Garboczi. Impedance spectra of fiber-reinforced cement-based composites. A modeling approach. //Cem. Concr. Research. 2000. V.30, P. 585-592 26
- [13] A. D. Hixson, L. Y. Woo, M. A. Campo, T. O. Mason, E. J. Garboczi. Intrinsic conductivity of short conductive fibers in composites by impedance spectroscopy. //J. Electroceramics. 2001. V. 7, P. 189-195
- [14] A. Peled, J. M. Torrents, Th. O. Mason, S. P. Shah, E. J. Garboczi. Electrical impedance spectra to monitor damage during tensile loading of cement composites. //ACI Mater. Journal. 2001. V. 98, P. 313-322
- [15] J. M. Torrents, T. O. Mason, A. Peled, S. P. Shah, E. J. Garboczi. Analysis of the impedance spectra of short conductive fiber reinforced composites. //J. Mater. Sci. 2001. V. 36, P. 4003-12
- [16] T. C. Hou and J. P. Lynch. Electrical impedance tomographic methods for sensing strain fields and crack damage in cementitious structures. //J. Intel. Mater. Syst. Struct. 2009. V. 20, P. 1363-1379
- [17] M. Kubicka, T. Mahrholz, A. Kühn, P. Wierach, M. Sinapius Magnetostrictive properties of epoxy resins modified with Terfenol-D particles for detection of internal stress in CFRP. Part 1: materials and process. // J. Mater. Sci. 2012. V. 47, P. 5752-5759
- [18] M. Kubicka, T. Mahrholz, A. Kühn, P. Wierach, M. Sinapius Magnetostrictive properties of epoxy resins modified with Terfenol-D particles for detection of internal stress in CFRP. Part 2: evaluation of stress detection // J. Mater. Sci. 2013. V. 48, P. 6578-6584
- [19] D.P. Makhnovskiy, L.V. Panina and D.J. Mapps, Field-dependent surface impedance tensor in amorphous wires with two types of magnetic anisotropy: helical and circumferential // Phys Rev B. 2001. V. 63, P. 14424-14441
- [20] A. Zhukov, M. Churyukanova, S. Kaloshkin, V. Sudarchikova, S. Gudoshnikov, M. Ipatov, A. Talaat, J. M. Blanco, V. Zhukova. Magnetostriction of Co-Fe-Based Amorphous Soft Magnetic microwires. //Journal of Electronic Materials. 2015. V. 44, P. 1-9
- [21] S. Sandacci, D.P. Makhnovskiy, L.V. Panina, V. Larin. Valve-like behaviour of the magnetoimpedance in the GHz range // J. Magn. Magn. Mat. 2004. V. 272-276, P. 1855-1857
- [22] L. V. Panina, S. I. Sandacci, D. P. Maknovskiy. Stress effect on magneto-impedance (MI) in amorphous wires at GHz frequencies and application to stress-tuneable microwave composite materials. //J. Appl. Phys. 2005. V. 97, P. 013701 -013703