

## ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЛОИСТЫХ СТРУКТУР

В.С.Леонтьев, М.И.Бичурин, А.Х.Гильмутдинов\*, С.В.Курынцев\*, Г.Г.Галеев\*

### LASER WELDING IN PRODUCTION OF MAGNETOELECTRIC LAYERED STRUCTURES

V.S.Leont'ev, M.I.Bichurin, A.Kh.Gil'mutdinov\*, S.V.Kuryntsev\*, G.G.Galeev\*

*Институт электронных и информационных систем НовГУ, viktorsergeevich.novsu@gmail.com*

*\*Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н.Туполева*

Магнитоэлектрические (МЭ) композиты, характеризуются наличием гигантского МЭ эффекта, в отличие от известных однофазных структур. Исследования МЭ композитов открыли широкие возможности для создания различных датчиков, трансформаторов и СВЧ устройств. Практически используются магнитострикционные структуры из пластин метгласа с толщиной, превышающей один слой. В данной статье предлагается новый метод соединения слоев метгласа на основе лазерной сварки. Были получены экспериментальные образцы двухслойных пластин метгласа и проведено сравнение с клеевым соединением.

**Ключевые слова:** магнитоэлектрический эффект, магнитоэлектрическая структура, лазерная сварка

Magnetoelectric (ME) composites are known to enable the achievement of ME voltage coefficients which are many orders of magnitude larger than previously reported values for single phase materials. The advancements have opened up many possibilities in applications of sensors, transformers, and microwave devices. Mainly, magnetostrictive structures of Metglas plates more than one layer thick have practical application. This paper presents a new method of connecting Metglas layers by laser welding. We obtained some experimental samples of Metglas bilayer plates and compared them with the ones got by adhesive connection.

**Keywords:** magnetoelectric effect, magnetoelectric structure, laser welding

#### Введение

В настоящее время, как за рубежом, так и в России большое внимание уделяется исследованию физических свойств материалов, характеризующихся несколькими типами упорядочения (сегнетоэлектрическим, ферромагнитным, упругим и т.п.), т.е. мультиферроиков [1-3]. Это обусловлено возможностью использования мультиферроиков для создания многофункциональных электронных устройств. Взаимодействие между различными параметрами упорядочений в мультиферроиках может приводить к новым эффектам, например, к магнитоэлектрическому (МЭ) эффекту.

Как показывает эксперимент, для практических использований необходимы магнитострикционные структуры из пластин метгласа с толщиной, превышающей один слой. При этом клеевая прослойка вносит потери и отрицательно влияет на величину МЭ коэффициента по напряжению с увеличением толщины клея.

Данная работа посвящена исследованию применения технологии лазерной сварки для создания магнитострикционной структуры из двух пластин метгласа и сравнению ее со структурой, соединенной клеевым способом.

#### Описание эксперимента

Как правило, для соединения пластин толщиной около 100 мкм применяется термокомпрессионная, ультразвуковая, микролазерная сварка, пайка [4,5] или клеевые соединения. Толщина слоя клея соизмерима с толщиной соединяемых пластин метгласа, что может привести к наличию упругой деформации при воздействии внешнего магнитного поля.

Основным требованием к сварному соединению является отсутствие упругой деформации, т. е. максимальная передача сжимающего усилия при воздействии внешнего магнитного поля.

Экспериментальные работы проводились на базе регионального инжинирингового центра «КАИ-Лазер» на установке для маркировки производства НТО «ИРЭ-Полус». Установка оснащена волоконным лазером с максимальной мощностью 20 Вт, фокусное расстояние системы 325 мм, применялся импульсный режим работы, мощность варьировалась в пределах 10-12 Вт, скорость сканирования 4-5 мм/сек. Также применялись различные стратегии наложения шва: один сплошной, один прерывистый, два сплошных, два прерывистых (рис.1).

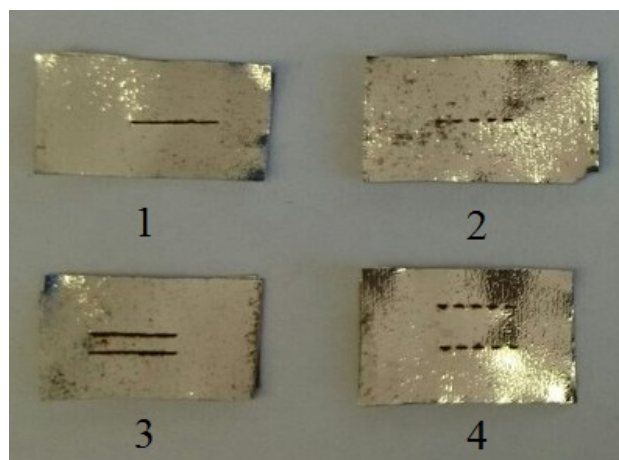


Рис.1. Внешний вид экспериментальных образцов с различными сварными швами: 1 — один сплошной, 2 — один прерывистый, 3 — два сплошных, 4 — два прерывистых

### Описание подготовки образцов и микроанализ сварного шва

Ввиду того, что толщина сваренных образцов 40 мкм, для вертикальной фиксации при заливке образцов необходимо было их обжать другим металлическим материалом (алюминий толщиной 1 мм), на рис.2а сверху и снизу белого цвета. Для выявления микроструктуры применялись разные травители: реактив 1 — 5% раствор азотной кислоты в спирте, реактив 2 — «электросталь» ( $\text{CuSO}_4$  4 гр,  $\text{HCl}$  20  $\text{см}^3$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  20  $\text{см}^3$ ). При травлении реактивом 1 были получены контрастные изображения шва, зоны термического влияния (ЗТВ), основной металл не протравился, при травлении реактивом 2 все участки сварного шва были перетравлены, хорошего изображения не наблюдалось. Для мик-

роструктурного анализа полученных образцов применялся оптический микроскоп Axiovert Observer.D1m фирмы «Carl Zeiss», метрические измерения проводились с помощью программного обеспечения Thixomet, измерения микротвердости проводились на установке Remet HX 1000, используемая нагрузка — 25 грамм.

Сварное соединение лазером пластин метгласа толщиной около 20 мкм внахлест представляет собой сквозной (рис.2а) или несквозной (рис.2б) прожог.

При сквозном прожоге по краям кратера диаметром 80-100 мкм металл оплавляється, что и приводит к образованию сварного соединения. На рис.2а вправо и влево от оплавленной части видна ЗТВ, в которой, скорее всего, произошла деаморфитизация Метгласа, что может повлиять на магнитные свойства

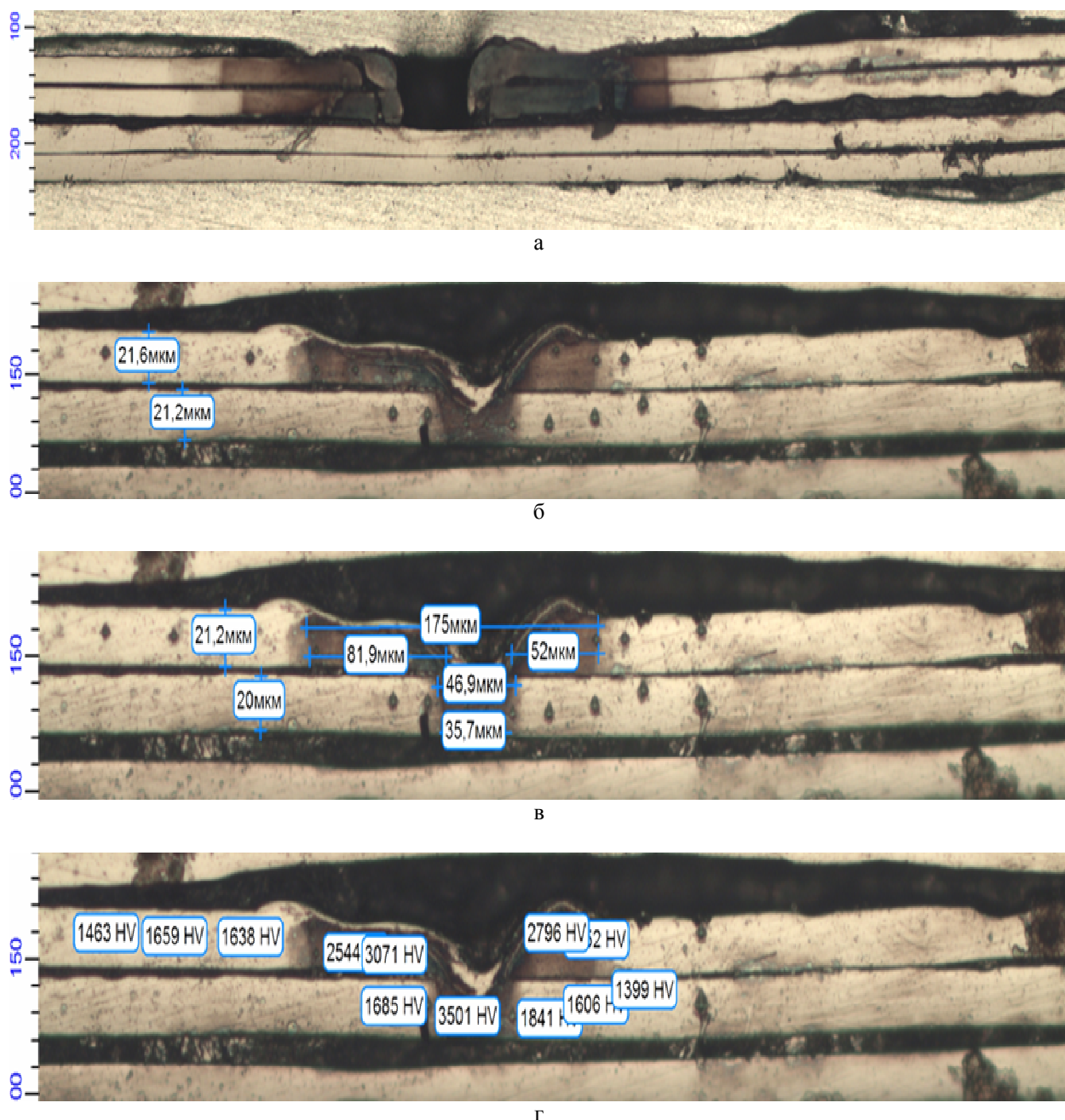


Рис.2. Микроструктура сварного соединения: а — со сквозным прожогом; б — с несквозным прожогом; в — с размерами сварочной ванны и зоны термического влияния; г — со значениями микротвердости различных участков сварного соединения. Увеличение  $\times 200$

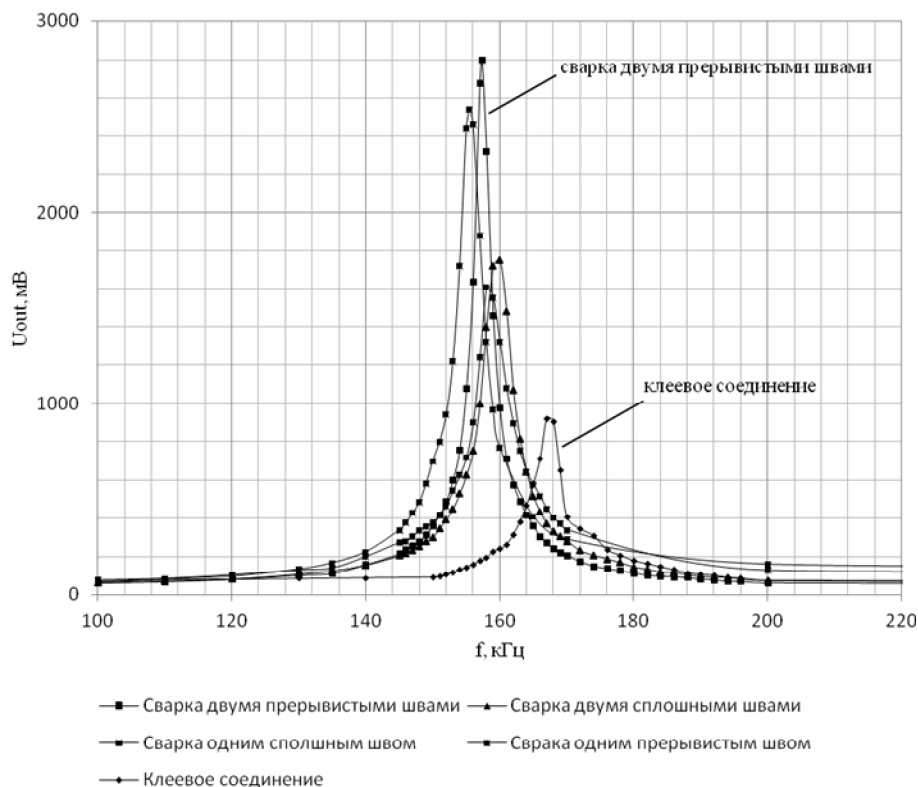


Рис.3. График сравнения МЭ эффекта в двухслойных структурах на основе различных сварочных и клеевого соединений

материала. Ширина ЗТВ составляет около 220 мкм. При несквозном прожоге ширина кратера — 40-50 мкм, ЗТВ верхней фольги — 50-80 мкм, нижней фольги — менее 10 мкм (рис.2б, в).

На рис.2г представлено изображение сварного соединения со значениями микротвердости, видно, что значение основного металла и шва существенно отличаются, примерно в 2 раза. Это свидетельствует об изменении структурного состояния пластин метгласа после лазерного термического влияния, что, вероятно, должно привести к локальному изменению магнитных свойств материала. Этот вопрос требует дополнительных исследований.

### Результаты эксперимента

Результатами эксперимента являются исследования магнитоэлектрических структур с применением лазерной технологии, представленные на рис.3. Из рисунка видно, что величина выходного напряжения в исследуемом образце с клеевым соединением пластин метгласа значительно ниже, чем в образцах со сварным соединением.

Среди экспериментальных образцов самое низкое выходное напряжение наблюдается в образце со сваркой одним прерывистым швом, что можно объяснить недостаточно жесткой связью между слоями метгласа. Полученные сравнимо низкие значения выходного напряжения в образце со сваркой двумя сплошными швами объясняются тем, что, скорее всего, деформировались слои метгласа. Образцы со сваркой одним сплошным и двумя прерывистыми швами характеризуются максимальным выходным напряжением,

которое составляет  $U_{\text{вых}} = 2,54$  В и  $U_{\text{вых}} = 2,8$  В соответственно.

### Заключение

В данной статье представлены результаты исследований магнитоэлектрических структур. Исследованы пластины метгласа, соединяющиеся при помощи метода лазерной сварки. Исследовались магнитоэлектрические элементы, состоящие из пьезоэлектрика ЦТС-19 с размерами  $10 \times 5 \times 1$  мм и обкладок метгласа соответствующего размера. Проведено сравнение выходных характеристик магнитоэлектрических структур. Выявлено, что магнитоэлектрические структуры с метгласом, соединенным методом лазерной сварки, обладают более высокой выходной характеристикой. В результате проведенных экспериментов и исследований было определено, что оптимальной является сварка двумя прерывистыми швами.

1. Bichurin M.I., Petrov V.M. and Srinivasan G. Modeling of magnetoelectric effect in ferromagnetic/piezoelectric multi-layer composites // *Ferroelectrics*. 2002. Vol.280. P.165-175.
2. Bichurin M.I., Petrov V.M. and Srinivasan G. Theory of low-frequency magnetoelectric effects in ferromagnetic-ferroelectric layered composites // *Journal of Applied Physics*. 2002. Vol.92. №12. P.7681-7683.
3. *Magnetoelectricity in Composites* / Eds. M.I.Bichurin and D.Viehland. Singapore: Pan Stanford Publ., 2011. 286 p.
4. Hongjun Ji & Long Li & Lijie Wang & Mingyu Li. Microstructures and properties of the Fe-based amorphous foil/aluminum dissimilar joint by ultrasonic-assisted soldering // *Welding in the World* September. 2015. V.59. Issue 5. P.623-628.

5. Григорянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки: Учебн. пособие для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006. 664 с.

#### References

1. Bichurin M.I., Petrov V.M., Srinivasan G. Modeling of magnetoelectric effect in ferromagnetic/piezoelectric multilayer composites. *Ferroelectrics*, 2002, vol. 280, pp. 165-175.
2. Bichurin M.I., Petrov V.M., Srinivasan G. Theory of low-frequency magnetoelectric effects in ferromagnetic-

ferroelectric layered composites. *Journal of Applied Physics*, 2002, vol. 92, no. 12, pp. 7681-7683.

3. Bichurin M., Viehland D., eds. *Magnetoelectricity in Composites*. Singapore, Pan Stanford Publishing, 2011. 286 p.
4. Ji H., Li L., Wang L., Li M. Microstructures and properties of the Fe-based amorphous foil/aluminum dissimilar joint by ultrasonic-assisted soldering. *Welding in the World*, 2015, vol. 59, no. 5, pp. 623-628.
5. Grigoriants A.G., Shiganov I.N., Misiurov A.I. *Tekhnologicheskie protsessy lazernoi obrabotki* [Laser processing technology]. Moscow, BMSTU Publ., 2006. 664 p.