

## Микроструктура и механические свойства сварного соединения магнитотвердого сплава 25X15K со сталью 10880 полученного линейной сваркой трением

Е. А. Абрамова<sup>1,2†</sup>, Г. Ф. Корзникова<sup>1</sup>, А. В. Корзников<sup>1</sup>, А. М. Хуснуллин<sup>1</sup>,  
В. В. Николаев<sup>1</sup>, Р. М. Кашаев<sup>1</sup>

†fiztec\_la@mail.ru

<sup>1</sup>Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Степана Халтурина 39, 450001, Уфа, Россия

<sup>2</sup>Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина НАНУ, ул. Р. Люксембург 72, 83114, Донецк, Украина

В работе опробован перспективный способ соединения магнитотвердого сплава и электротехнической стали методом линейной сварки трением. Представлены результаты испытаний сварного соединения на трехточечный изгиб. Получено прецизионное соединение заготовок из магнитотвердого сплава 25X15K и стали 10880, обеспечивающее прочность  $\sigma_{0.2} = 880$  МПа и пластичность  $\delta = 3 \pm 1$  % в зоне сварного соединения. Обнаружено, что при сварке трением происходит формирование сплошного соединения без диффузионной зоны. Обсуждается механизм формирования соединения, обеспечивающий прочность и пластичность при испытаниях на изгиб.

**Ключевые слова:** линейная сварка трением, магнитотвердый сплав, градиентная структура

## The microstructure and mechanical properties of the welded joint of 25X15K magnetic alloy and 10880 steel obtained by means of linear friction welding

O. A. Abramova<sup>1,2</sup>, G. F. Korznikova<sup>1</sup>, A. V. Korznikov<sup>1</sup>, A. M. Husnyllin<sup>1</sup>,  
V. V. Nikolaev<sup>1</sup>, R. M. Kashaev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, 39 Khalturin St., 450001, Ufa, Russia

<sup>2</sup>Donetsk Institute for Physics and Engineering named after O.O. Galkin NASU, 72 R. Luxembourg St., 83114, Donetsk, Ukraine

The paper reports a promising process of jointing magnetic alloy and electrical steel by means of linear friction welding. Linear friction welding method allows to create a precise connection of magnetic 25X15K alloy and 10880 steel specimens providing values of strength  $\sigma_{0.2} = 880$  MPa and plasticity  $\delta = 3 \pm 1$  % in the joint zone. Friction welding treatment results in formation of a solid connection without the diffusion zone due to short time of welding process. Mechanical testing at room temperature have shown that the compound demonstrates the values of strength and ductility comparable to ones of bulk 25X15K alloy.

**Keywords:** linear friction welding, magnetic alloys, gradient structure

### Введение

Одним из перспективных направлений совершенствования конструкций ответственных крупногабаритных роторов электродвигателей является создание сварного соединения магнита со стальным магнитопроводом.

В роторах электродвигателей используют перспективные сплавы системы Fe-Cr-Co в виду их оптимального соотношения стоимости (по сравнению с викаллоем содержат в 3—5 раз меньше кобальта и примерно в 2,5—3 раза дешевле), хороших магнитных свойств, высокой коррозионной стойкости [1—8]. При конструирова-

нии электродвигателей большой мощности возникает проблема соединения сердечников магнита с магнитопроводом, изготовленных из сплавов, несвариваемых обычными методами. Использование конструктивных элементов соединения нетехнологично в виду хрупкости магнита, а традиционные методы сварки неприменимы в силу значительного различия температуры электродуговой сварки малоуглеродистой и сильнолегированных сталей и, как следствие, охрупчивания шва. Перспективным подходом к решению проблем соединения несвариваемых обычными (традиционными) методами материалов является линейная сварка трением (ЛСТ) [9,10].

Основной принцип линейной сварки трением [11,12] заключается в соединении неподвижной детали с другой, совершающей линейные колебания под давлением. В настоящее время имеется достаточное количество исследований по сварке разных типов сталей между собой, например, [13], но особенности ЛСТ электротехнической стали и сплава системы Fe-Cr-Co на сегодняшний день исследовали не достаточно для создания детальной технологии.

Целью настоящей работы являлось получение сварного соединения заготовок из магнитотвердого сплава 25X15K со сталью 10880 методом линейной сварки трением, а также анализ структуры и микротвердости сварных соединений без стандартной термообработки на высококоэрцитивное состояние.

## Материалы и методы исследования

В качестве магнитотвердого материала был выбран сплав 25X15K (химический состав приведен в табл.1), а в качестве материала сердечника — электротехническая сталь 10880 (химический состав приведен в табл.2). Образцы из магнитотвердого сплава подвергли закалке от 1200 °С с охлаждением в воду на однофазный  $\alpha$  — твердый раствор. Сталь 10880 использовали в состоянии поставки. Средний размер зерен в сплаве 25X15K и в стали составлял не менее 100 мкм.

Соединение сплава 25X15K и стали 10880 осуществлялось на лабораторной установке линейной сварки трением [14]. Свариваемость образцов оценивали с помощью проведения химического анализа поперечного среза сваренных образцов, а также испытаний на трех-

**Таблица 1.** Химический состав сплава 25X15K (вес %)

**Table 1.** Chemical composition of the alloy 25X15K (wt%)

Fe	Cr	Co	V
Основа	23,5-26,5	14,0-16,0	0,8-1,2

**Таблица 2.** Химический состав электротехнической стали 10880 (вес %)

**Table 2.** Chemical composition of the electrical steel 10880 (wt%)

Fe	C	Si	Mn	Cu
Основа	> 0,035	> 0,3	> 0,3	> 0,3

точечный изгиб полученного соединения.

Образцы для исследования были подготовлены с помощью механической шлифовки и полировки, а также электрополировки для исследования методом EBSD. Анализ распределения химических элементов в области соединения был проведен с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan 3LMH и автоматического анализатора CHANNEL-5. Границы менее 2° не учитывались из-за недостаточной точности их определения, к большеугловым относили границы с разориентировкой более 15°.

Шаг сканирования составил 0,2 мкм. Микроструктурный анализ поперечного среза сварного соединения проводили с использованием оптического микроскопа LEICA VMHT AUTO.

Механические испытания на трёхточечный изгиб проводили на динамометре Instron, оснащенный тензометрическим датчиком с максимальной нагрузкой 50 Н. Образцы для испытаний на изгиб вырезали на электроискровом станке и доводили до конечных размеров 1,5×3,0×14,0 мм путем шлифования и полировки. Для каждой точки использовали по 3 образца. Изгибные напряжения  $\sigma$  рассчитывали по формуле (1) на наружных поверхностях образца (балок):

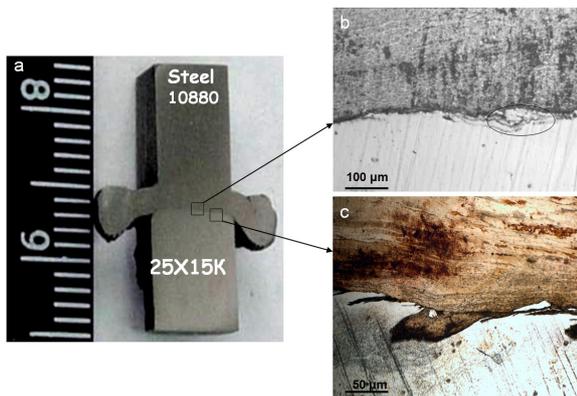
$$\sigma = 1,5 PL / (bh^2) \quad (1)$$

где P — нагрузка [МН], L — расстояние между опорами [мм], b — ширина образца [мм], h толщина образца [мм]. По результатам измерений, оценивали степень деформационного упрочнения. По величине прогиба до появления первой трещины, судили о пластичности образцов. В первом приближении эта величина тесно коррелирует с предельной деформацией [15]. Для каждого состояния было испытано не менее трех образцов.

## Экспериментальные результаты и их обсуждение

В результате ЛСТ с выбранными параметрами сварки стали 10880 и сплава 25X15K было получено сплошное неразъемное соединение. На рис.1 представлены фотографии поперечного сечения сварного соединения (рис.1a) и оптические снимки из центральной области сечения (рис.1b) и периферийной области (рис.1c). По рис.1a видно, что в процессе ЛСТ сформировался грат из более мягкого материала стали 10880. Исследование поперечного сечения сварного шва методом оптической микроскопии показало, что в результате ЛСТ произошло формирование зоны сплошного прилегания материала без несплошностей и трещин как в центральной (рис.1b), так и в периферийной области (рис.1c). Развитая волнообразная контактная поверхность является критерием качественной сварки поверхности [16]. На рис.1b овалом показан участок пластического деформирования магнита.

На рис.2а показано РЭМ-изображение ЛСТ соединения заготовок 25X15K и стали 10880. РЭМ исследования также показали сплошной характер соединения (рис.2а).



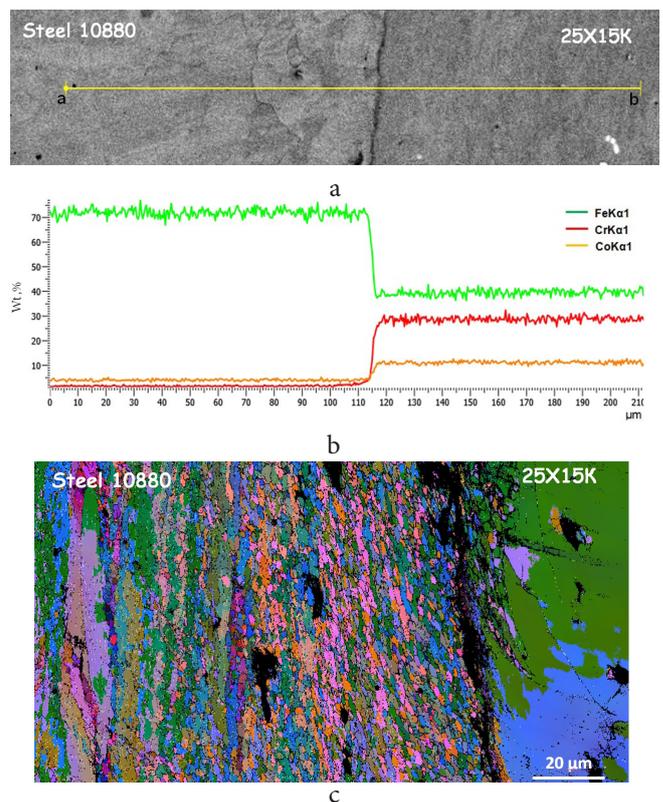
**Рис. 1.** Соединение стали 10880 и сплава 25X15K, полученное ЛСТ. (a) поперечный срез сварного соединения; (b) центральная область сварного соединения; (c) периферийная область сварного соединения.

**Fig. 1.** Welded joint steel 10880 and 25X15K alloy obtained by linear friction welding. (a) a cross section of a welded joint; (b) the central region of the welded joint; (c) the peripheral region of the welded joint.

С помощью автоматического анализатора исследовали химический состав сваренных материалов вдоль линии ab (рис.2a). Диаграмма распределения весовых долей Fe, Cr, Co вдоль линии ab, полученных по Kα1 пикам представлена на рис.2b. Как видно из рисунка содержание Fe, Cr и Co в месте соединения изменяется скачкообразно. Полученный химический состав свариваемых материалов соответствует стандартным составам стали 10880 и 25X15K (табл.1,2). Таким образом, химический анализ ЛСТ соединения показал, что перераспределения химических элементов при сварке не происходит из-за малого времени контакта.

EBSD анализ ЛСТ соединения показал, что в области сварного шва шириной 20 мкм формируется сильнодеформированная зона (рис.2c) на границе контакта стали 10880 и 25X15K. Доля проиндцированных линий в целом составляла не менее 85%, однако в сильнодеформированной зоне непроиндцированных зерен оказалось значительно больше, поскольку шаг сканирования сопоставим с размером зерен в контактной зоне, большая часть зерен в зоне шва не была выявлена (рис.2c). В приконтактной области сплава 25X15K формируются деформационные полосы, образуя волокнистую структуру. Волокна располагаются параллельно плоскости соединения (рис.2c). В стали 10880 вблизи сварного шва наблюдается мелкозернистая структура с размером зерна менее 10 мкм.

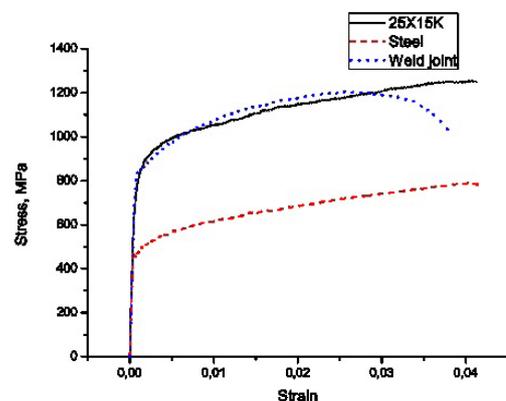
Для оценки механических свойств полученного ЛСТ соединения проводили испытания на трехточечный изгиб как отдельно свариваемых материалов, так и места их соединения. При этом сварной шов устанавливался точно в зоне изгиба. На рис.3 показаны диаграммы изменения напряжения от деформации. Результаты испытаний при комнатной температуре приведены в табл.3. Микроструктурные исследования показали, что при отсутствии диффузной зоны наблюдается сплошное прилегание свариваемых материалов (рис.2). При этом сварное соединение обеспечивает прочность на уровне



**Рис. 2.** (a) РЭМ-изображение ЛСТ соединения заготовок 25X15K и стали 10880; (b) диаграмма распределения элементов (вес%) в зоне соединения сталь 10880 - 25X15K измеренное вдоль линии «ab», полученных по Kα1 пикам; (c) EBSD анализ ЛСТ соединения.

**Fig. 2.** (a) SEM image of a linear friction welding (LWF) connection pieces 25X15K and steel 10880; (b) diagram of distribution of elements (wt%) at the junction between steel 10880 - 25X15K measured along a line «ab», obtained by Kα1 peaks; (c) EBSD analysis LWF connection.

прочности 25X15K, что значительно выше прочности стали 10880 и пластичность на уровне пластичности свариваемых материалов (табл.3). При этом кривая деформации сварного соединения имеет вид кривой с падением прочности перед разрушением, как правило, свидетельствующее о разрушении с локализацией де-



**Рис. 3.** Кривые нагружения образцов из стали 10880 (steel), сплава 25X15K и сварного соединения (weld joint) на трёхточечный изгиб.

**Fig. 3.** Stress - Strain curves. 10880 steel, 25X15K alloy and weld joint on the three-point bending strength.

**Таблица 3.** Механические свойства исследуемых материалов при комнатной температуре

**Table 3.** Mechanical properties of the test materials at room temperature

Material	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %
Steel 10880	510±15	790±25	4±1
25X15K	900±30	1250±40	4±1
Weld joint	880±30	1200±40	3±1

формации [15]. Отсутствие переходной зоны в полученном соединении свидетельствует о том, что прочность  $\sigma_{0.2}=880$  МПа обеспечивается только лишь за счет механического зацепления (рис.1b,c). Предел прочности соединения превышает предел прочности стали 10880 более, чем на 50%, что может свидетельствовать о значительном упрочнении стали 10880 в области сварного шва и, предположительно, градиентной структуры. Исследование особенностей структуры вблизи сварного соединения является предметом дальнейших исследований.

### Заключение

Метод линейной сварки трением позволяет получить прецизионное соединение заготовок из магнитотвердого сплава 25X15K и стали 10880, обеспечивающее прочность  $\sigma_{0.2}=880$  МПа и пластичность  $\delta = 3\pm 1$  % . При сварке трением происходит формирование сплошного соединения без диффузионной зоны. Механические испытания при комнатной температуре показали, что соединение демонстрирует прочность и пластичность, сравнимую с прочностью и пластичностью сплава 25X15K.

### Литература/References

1. G. F. Korznikova, A. V. Korznikov. *Materials Science and Engineering*. **A 503**, 99—102 (2009).
2. O. A. Ushakova, E. H. Dinislamova, M. V. Gorshenkov, D. G. Zhukov. *Journal of Alloys and Compounds*. **586**, S291 — S293 (2014).
3. G. Korznikova, A. Korznikov, Z. Pakiel, K. J. Kurzydowski. *Materials Chemistry and Physics*. **81** (2—3) 401—403 (2003).

4. A. G. Garganeev, D. A. Padalco, A. V. Chervatyuk. *Docladu Tomskogo gosudarstvennogo universiteta system upravleniya i radioelektroniki*. **32** (2), 308 (2014). (in Russian) [А.Г. Гарганеев, Д.А. Падалко, А.В. Черватюк. Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. **32** (2), 308 (2014).]
5. R. M. Kashaev, G. F. Korznikova, A. V. Korznikov. *Perspectivnue materialu*. **12**, 213—217 (2011). (in Russian) [Р.М. Кашаев, Г.Ф. Корзникова, А.В. Корзников. Перспективные материалы. **12**, 213—217 (2011).]
6. Zubair Ahmad, A. ul Haq, Mi Yan, Zafar Iqbal. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. **324**, 2355—2359 (2012).
7. G. F. Korznikova, S. Yu. Mironov, E. A. Korznikova. *Physical mesomechanics*. **17** (3), 216—222 (2014).
8. A. Korneva, G. Korznikova, K. Berent, A. Korznikov, R. Kashaev, J. Bogucka, K. Sztwiertnia. *Journal of Alloys and Compounds*. **615**, 1 (5), S300-S303 (2014).
9. I. Bhamji, A. C. Addison, P. L. Threadgill. *Welding and Joining of Aerospace Materials. Appendix: Linear friction welding in aerospace engineering*. 384—415 (2012).
10. Imran Bhamji, Michael Preuss, Philip L. Threadgill, Adrian C. *Materials Science & Technology*. **27** (1), 2—12 (2011).
11. A. A. Zakirova, M. I. Nagimov, A. M. Husnyllin, R. M. Kashaev. *Perspectivnue materialu*. **12**, 213—217 (2011). (in Russian) [А.А. Закирова, М.И. Нагимов, А.М. Хуснуллин, Р.М. Кашаев. Перспективные материалы. **12**, 155—160 (2011).]
12. I. Bhamji, M. Preuss, P. L. Threadgill, R. J. Moat, A. C. Addison, M. J. Peel. *Materials Science and Engineering*. **A 528**, 680—690 (2010).
13. G. Madhusudan Reddy, K. Srinivasa Rao. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **45**, 875—888 (2009). DOI 10.1007/s/00170-009-2019-6
14. R. M. Kashaev, A. M. Husnyllin, V. V. Nikolaev. *Gazoturbinnue tehnologii*. **2**, 24—29 (2009). (in Russian) [Р.М. Кашаев, А.М. Хуснуллин, В.В. Николаев. Газотурбинные технологии. **2**, 24—29 (2009).]
15. V. S. Zolotarevskii. *M. MISIS (1998) 399 p.* (in Russian) [И. С. Золотаревский. М. МИСИС (1998) 399 с.]
16. V. V. Rybin, I. I. Sidorov, B. A. Greenberg, O. V. Antonova, O. A. Elkina, A. V. Inozemtsev, A. M. Patselov, M. A. Ivanov. *The Physics of Metals and Metallography*. **108** (4), 353—364 (2009).