Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,
НАНОСТРУКТУР
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS
OF THE STUDY OF CLUSTERS,
NANOSTRUCTURES AND
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY
IZUČENIÂ KLASTEROV,
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

выпуск 13

ТВЕРЬ 2021

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в журнале «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

Официальный сайт издания в сети Интернет:

<https://www.physchemaspects.ru>

Ф50 Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Издательство Тверского государственного университета, 2021. – Вып. 13. – 956 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Журнал предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials

Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2021

© Тверской государственный университет, 2021

УДК 548.73

Оригинальная статья

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ, СУБСТРУКТУРА И ОСТАТОЧНЫЕ МАКРОНАПРЯЖЕНИЯ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ ПРИВАРКИ ЛЕНТЫ

А.И. Фомин, Н.А. Панькин

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный
университет имени Н.П. Огарева»

430005, Россия, Саранск, ул. Большевикская, 68

fominsurgod@yandex.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.802

Аннотация: Методами рентгенографии и электронной микроскопии исследован поверхностный слой чугуна ВЧ50–2 после его обработки электроконтактной приваркой. В качестве присадочного материала использовалась лента из стали 50ХФА. Применялись технологии обработки с созданием промежуточного слоя из никелевого порошка ПГН-12Н-01 и без него. Получены результаты о фазовом составе, субструктуре и остаточных напряжениях. Исследуемая система состоит из фаз α –Fe и γ –Fe. Параметры субструктуры (микродеформации и измельчение блоков) имеют одинаковые значения для различных режимов электроконтактной приварки. Остаточные напряжения носят растягивающий характер и уменьшаются при создании промежуточного слоя из никелевого порошкового материала. Основным механизмом их образования – термические воздействия на материал, обрабатываемый электроконтактной приваркой. Установлено, что после электроконтактной приварки ленты могут образовываться трещины, их ориентация преимущественно параллельно обрабатываемой поверхности обусловлена наличием большого градиента температур.
Ключевые слова: электроконтактная приварка, фазовый состав, микродеформации, размер субблоков, макронапряжения.

1. Введение

При восстановлении изношенных поверхностей деталей сельскохозяйственной техники и их упрочнения, в настоящее время, широко применяются лазерная наплавка, электродуговая металлизация, газопламенное, газодинамическое, плазменное напыление [1]. К перспективным способам получения функциональных покрытий относится также электроконтактная приварка (ЭКП).

Сущность процесса электроконтактной сварки заключается в приварке мощными импульсами тока к поверхностям деталей различных присадочных материалов [2]. В качестве последних можно использовать стальные ленты, проволоки, порошки и их смеси [3, 4]. Несмотря на широкую распространенность и давность применения метода ЭКП, его возможности далеко не в полной мере использованы. Особенно это касается случаев применения в качестве присадочных материалов различных порошков (в том числе и нанометрового размера) [4]. В частности, частицы различного размера имеют отличающиеся физические,

химические и механические свойства. Например, уменьшение размера частиц понижает температуру их плавления/кристаллизации [5]. В работе [6] для наночастиц железа (менее 100 нм) отмечается варьирование магнитных свойств от суперпарамагнитных до высококоэрцитивных в зависимости от их размера.

Таким образом, использование порошков и нанопорошков является перспективным для их применения в качестве присадочного материала при электроконтактной приварки.

Целью настоящей работы является исследование фазового состава, субструктуры и остаточных напряжений поверхностного слоя после электроконтактной приварки ленты с использованием промежуточного слоя из никелевого порошка и без него. Актуальность обусловлена тем, что в работах посвященных ЭКП, в основном исследуются эксплуатационные свойства, твердость и микроструктура [7-9] без анализа возможных механизмов их образования.

2. Методика эксперимента

Исходные образцы для ЭКП имели форму цилиндра диаметром 58 мм и высотой 35 мм и изготовлены из чугуна *ВЧ50-2* [10]. На них приваривалась лента из стали *50ХФА* [11] толщиной 0,35 мм. При этом использовались две технологии: с применением промежуточного слоя из никелевого порошка *ПГН-12Н-01* [12] и без него.

Электроконтактную приварку ленты осуществляли на установке 011-01-02Н «Ремдеталь» при следующих режимах обработки: сила тока – 4 кА, длительность импульса – 0,06 с, длительность паузы – 0,08 с, усилие сжатия сварочных роликов – 1500 Н. В ходе ЭКП свариваемые поверхности охлаждались проточной водой.

Рентгенографические исследования фазового состава, параметров субструктуры и величины остаточных напряжений в поверхностном слое проводили с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-6 в медном фильтрованном излучении. Величину размеров субблоков и микродеформаций (параметров субструктуры) определяли методом аппроксимации профиля рентгеновских дифракционных линий, которые отличаются порядком отражений [13]. В нашем случае для анализа взяты рефлексы $\alpha-Fe$ от кристаллографических плоскостей (110) и (220). Макронапряжения определяли методом наклонных съемок – $\sin^2\psi$ [13]. Особенности обработки и получения рентгенографических данных от образцов цилиндрической формы можно найти в работе [14].

Электронная микроскопия поверхностного слоя проводилась с использованием растрового электронного микроскопа «Quanta 200 i 3D» со встроенной системой энергодисперсионного микроанализа.

3. Результаты и их обсуждение

Рентгенографический фазовый анализ исходного чугуна ВЧ50-2 указывает на наличие от него лишь дифракционных линий от фазы $\alpha-Fe$. В исходном присадочном материале (сталь 50ХФА) отмечаются (помимо $\alpha-Fe$) рефлексы соответствующие аустенитной фазе железа $\gamma-Fe$. Сопоставление экспериментальных соотношений интенсивностей дифракционных рефлексов с соответствующими данными базы рентгенографических данных порошковых материалов PDF-2 [15] косвенно свидетельствуют о наличии смешанной текстуры (200)+(211) в исходной ленте из стали 50ХФА. Её присутствие, прежде всего, обусловлено процессом прокатки при её производстве.

Основным источником последующих рентгенографических данных от модифицированного слоя после ЭКП является приваренная лента. Её толщина (порядка 350 мкм) значительно превосходит эффективную глубину слоя анализируемого рентгеновским излучением (до 20 мкм).

Из анализа рентгенограмм от модифицированного электроконтактной приваркой слоя можно отметить, что его фазовый состав представляет собой двухфазную систему, состоящую из $\alpha-Fe$ и $\gamma-Fe$. Он характерен, как указано выше, и для исходного присадочного материала. Аналогичный результат был получен нами ранее [16]. При этом, создание промежуточного слоя из никелевого порошка не меняет фазового состава. Кроме того наблюдается существенное уменьшение текстурированности поверхностного слоя. На это указывает то, что соотношение интенсивностей рефлексов от фазы $\alpha-Fe$ близко к соответствующим значениям для порошкового материала. Данный факт обусловлен термическим воздействием электрического тока протекающего через зону контакта «привариваемая лента – чугун» или «привариваемая лента – никелевый порошок - чугун». Это приводит к сильному разогреву контактирующих материалов (температурный диапазон 1000–1200 °С) [1] и протеканию рекристаллизационных процессов в обрабатываемых изделиях. При этом формируется структура с хаотической ориентацией зерен – отсутствие текстуры.

Обработка профилей рентгеновских дифракционных линий от фазы $\alpha-Fe$ указывает на то, что в их уширение вносят два фактора: микродеформации ε и измельчение блоков (размер субзерен D). Их значения представлены в Таблице. Эффективный размер субблоков находится в нанометровой области. Для всех режимов ЭКП характерно примерно одинаковые значения величины микродеформаций и размера субзерен (различия около 3%). Таким образом, введение промежуточного слоя из порошкового материала не изменяет величины параметров субструктуры.

Таблица. Экспериментальные данные для исследуемых образцов.

Образец	$D, \text{\AA}$	$\varepsilon, 10^{-3}$	$\sigma, \text{МПа}$
<i>ВЧ50-2</i>	1306	0,93	21
<i>ВЧ50-2 + ПГН-12Н-01 + 50ХФА</i>	408	1,18	10
<i>ВЧ50-2 + 50ХФА</i>	395	1,12	17

Результаты рентгенографического определения величины остаточных напряжений σ в поверхностном слое (см. данные Таблицы) свидетельствуют о наличии в нем растягивающих макронапряжений. При этом, создание промежуточного слоя из порошкового материала *ПГН-12Н-01* приводит к уменьшению их значений. Возникновение макронапряжений при электроконтактной приварке связаны, прежде всего, с термическими эффектами. Они обусловлены сочетанием высоких локальных температур при ЭКП и быстрым охлаждением за счет отвода тепла через проточную воду. Данный факт приводит к возникновению большого градиента температуры по толщине образца и закалке поверхностного слоя. Вследствие этого происходит формирование областей (преимущественно в направлении перпендикулярном поверхности) с различными коэффициентами теплового расширения (КТР), т.к. КТР зависит от температуры, то на границе областей с различными температурами возникают остаточные напряжения.

Рис. 1. Микроструктура шлифа поверхностного слоя после его электроконтактной приварки ленты без (а) и с применением (б) промежуточного слоя из никелевого порошка (на вкладках увеличенное изображение с указанием областей образования трещин).

В процессе электроконтактной приварки, локально могут образовываться объемы материала с температурами достаточно близкими к температуре плавления основного элемента сталей. В результате этого возможно существование областей металла в жидком состоянии. В этом

случае возможно возникновение растягивающих напряжений связанных с усадкой металлического материала. Вследствие наличия градиента температур по толщине образца, расплавленный материал кристаллизуется слоями параллельными поверхности образца. Этим фактом обусловлен характер трещин присутствующих в образце – они ориентированы преимущественно параллельно обрабатываемой поверхности. На их наличие указывают данные растровой электронной микроскопий (см. рис. 1). Несколько меньшие значения макронапряжений растяжения при применении промежуточного слоя из никелевого порошка связаны с их релаксацией в данном слое. Никель по своим механическим свойствам несколько пластичнее стали и чугуна.

4. Заключение

По результатам проведенного исследования было установлено:

1. Фазовый состав модифицированного поверхностного слоя представляет собой двухфазную систему, состоящую из фаз $\alpha - Fe$ и $\gamma - Fe$ характерных для исходного присадочного материала;

2. Уширение рентгеновских дифракционных линий обусловлено микродеформациями и измельчение блоков. Они имеют одинаковые значения для различных режимов электроконтактной приварки;

3. Остаточные напряжения в поверхностном слое носят растягивающий характер. Промежуточный слой из никелевого порошкового материала приводит к уменьшению макронапряжений. Возникновение остаточных напряжений связано с термическими воздействиями на материал, при его обработке электроконтактной приваркой.

4. После электроконтактной приварки ленты могут образовываться трещины. Они ориентированы преимущественно параллельно обрабатываемой поверхности и обусловлены наличием большого градиента температур.

Библиографический список:

1. **Черноиванов, В.И.** Восстановление деталей машин (Состояние и перспективы) / В.И. Черноиванов, И.Г. Голубев. – ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 376 с.
2. **Латыпов, Р.А.** Электроконтактная приварка. Теория и практика / Р.А. Латыпов, В.В. Булычев, П.И. Бурак, Е.В. Агеев. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2016. – 392 с.
3. **Бурак, П.И.** Материалы, рекомендуемые для электроконтактной приварки / П.И. Бурак, А.В. Серов // Труды ГОСНИТИ. – 2010. – Т. 105. – С. 176-179.
4. **Бурак, П.И.** Использование металлических порошков в качестве промежуточного слоя при электроконтактной приварке стальной ленты / П.И. Бурак // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2006. – № 7. – С. 34-39.
5. **Гафнер, Ю.Я.** Формирование структуры нанокластеров золота при процессах кристаллизации / Ю.Я. Гафнер, Ж.В. Головенько, С.Л. Гафнер // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2013. – Т. 143. – Вып. 2. – С. 288-305. DOI: 10.7868/S0044451013020089.

6. **Горохова, М.Н.** Применение ферромагнитных порошков при электроконтактной приварке / М.Н. Горохова, Г.И. Бударина, С.Д. Полишук, И.В. Бакунин // Труды ГОСНИТИ. – 2011. – Т. 107. – № 2. – С. 17-21.
7. **Фархшатов, М.Н.** Расчетное определение распределения температуры по глубине восстанавливаемой детали при электроконтактной приварке / М.Н. Фархшатов, Р.Н. Сайфуллин, Л.Ф. Исламов, Р.Ш. Набиуллин // Инновации в сельском хозяйстве. – 2018. – № 1(26). – С. 269-279.
8. **Тескер, Е.И.** Исследование свойств поверхностных слоев с покрытием, полученным электроконтактной приваркой износостойкой лентой / Е.И. Тескер, В.Ю. Тараненко, М.А. Субботин // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2016. – № 9 (188). – С. 128-130.
9. **Нафиков, М.З.** Остаточные напряжения в металле покрытия, нанесенного электроконтактной приваркой двух растянутых проволок / М. З. Нафиков, И. Р. Шакиров, И. И. Загиров, Н. М. Юнусбаев // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2018. – Т. 14. – № 1(157). – С. 19-22.
10. Чугун с шаровидным графитом для отливом: ГОСТ 7293-85. – Взамен ГОСТ 7293-79; введ. 01.01.1987. М.: Госстандарт СССР, 1985. – 3 с.
11. Лента холоднокатаная из инструментальной и пружинной стали. Технические условия: ГОСТ 2283-79. – Взамен ГОСТ 2283-69; введ. 01.01.1980. М.: Издательство стандартов, 1979. – 20 с.
12. Смеси, сплавы и материалы наплавочные и минералокерамические. Технические условия: 1970007-002-76942199-2006; введ. 24.04.2006.
13. **Горелик, С.С.** Рентгенография и электроннооптический анализ / С.С. Горелик, В.Н. Расторгуев, Ю.А. Скаков. – М.: Металлургия, 1970. – 366 с.
14. **Сенин, П.В.** Оценка напряженно-деформированного состояния чугуна коленчатого вала восстановленного электроконтактной приваркой стальной ленты 50ХФА через промежуточный слой ПГ-СР2 / П.В. Сенин, А.И. Фомин, В.А. Денисов // Труды ГОСНИТИ. – 2012. – Т. 109. – № 2. – С. 83-86.
15. Powder Diffraction File JCPDS-ICDD PDF-2 (Set 1-47). (Release, 2016). – Режим доступа: [www.url: https://www.icdd.com/pdf-2](http://www.icdd.com/pdf-2). – 15.08.2021.
16. **Фомин, А.И.** Рентгенографическое исследование поверхности после восстановления электроконтактной приваркой ленты / А.И. Фомин, Н.А. Панькин // Прикладная физика. – 2020. – № 3. – С. 57-62.

References:

1. Chernoiivanov V.I., Golubev I.G. *Vosstanovleniye detaley mashin (Sostoyaniye i perspektivy)* [Restoration of machine parts (State and prospects)]. Moscow, FSSI «Rosinformagrotekh» Publ., 2010, 376 p. (In Russian).
2. Latypov R.A., Bulychev V.V., Burak P.I., Agaeiev E.V. *Elektrokontaktnaya privarka. Teoriya i praktika* [Electrical contact welding. Theory and practice]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2016, 392 p. (In Russian).
3. Burak P.I., Serov A.V. *Materialy, rekomenduyemye dlya elektrokontaktnoy privarki* [Recommended materials for electrical contact welding], *Trudy GOSNITI [Proceedings of GOSNITI]*, 2010, vol. 105, pp. 176-179. (In Russian).
4. Burak P.I. Ispol'zovaniye metallicheskih poroshkov v kachestve promezhutochnogo sloya pri elektrokontaktnoy privarke stal'noy lenty [The use of metal powders as an intermediate layer in the electrocontact welding of a steel strip], *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya [Remont. Recovery. Modernization]*, 2006, no. 7, pp. 34-39 (In Russian).
5. Gafner Yu.Ya., Goloven'ko Zh.V., Gafner S.L. Formation of the structure of gold nanoclusters during crystallization, *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2013, vol. 116, issue 2, pp. 252-265. DOI: 10.1134/S106377611302009X.
6. Gorokhova M.N., Budarina G.I., Polishchuk S.D., Bakunin I.V. Primeneniye ferromagnitnykh poroshkov pri elektrokontaktnoy privarke [The use of ferromagnetic powders in electrical contact welding], *Trudy GOSNITI [Proceedings of GOSNITI]*, 2011, vol. 107, no. 2, pp. 17-21. (In Russian).
7. Farkhshatov M.N., Sajfullin R.N., Islamov L.F., Nabiullin R.Sh. Raschetnoe opredeleniye raspredeleniya temperatury po glubine vosstanavlivaemoj detali pri elektrokontaktnoy privarke [Calculated determination of the distribution of temperature on depth of restored details with electrocontact welding], *Innovatsii v sel'skom khozyajstve [Innovations in Agriculture]*, 2018, no. 1 (26), pp. 269-279. (In Russian).
8. Tesker E.I., Taranenko V.Y., Subbotin M.A. Issledovanie svojstv poverkhnostnykh sloev s pokrytiem, poluchennym elektrokontaktnoy privarkoj iznosostojkoj lentoy [Investigation of surface layers with coatings obtained electrocontact welding wear-resistant tape], *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Volgograd State Technical University]*, 2016, no. 9 (188),

pp. 128-130. (In Russian).

9. Nafiov M.Z., Shakirov I.R., Zagirov I.I., Yunusbaev N.M. Ostatochnye napryazheniya v metalle pokrytiya, nanesennogo elektrokontaktnoj privarkoj dvukh rastyanutykh provolok [Residual stresses in the metal coating cladded by resistance welding of two stretched wires], *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya [Strengthening Technologies and Coatings]*, 2018, vol. 14, no. 1 (157), pp. 19-22. (In Russian).

10. *Chugun s sharovidnym grafitom dlya otlivom: GOST 7293-8* [Spheroidal graphite iron for castings. Grades: State Standard 18309-72]. Moscow, Gosstandart SSSR Publ., 1986. 3 p. (In Russian).

11. *Lenta kholodnokatanaya iz instrumental'noj i pruzhinnoj stali. Tekhnicheskie usloviya: GOST 2283-79* [Cold-rolled tool and spring steel strip. Specifications: State Standard 2283-79]. Moscow, Standards Publ., 1979. 20 p. (In Russian).

12. *Smesi, splavy i materialy naplavochnyye i mineralokeramicheskiye. Tekhnicheskiye usloviya* [Mixes, alloys and surfacing and mineral ceramic materials. Specifications] Specifications RF, no 1970007-002-76942199-2006, 2006. (In Russian).

13. Gorelik S.S., Rastorguyev V.N., Skakov Yu.A. *Rentgenografiya i elektronnoopticheskiy analiz* [X-Ray and electron-optical analysis]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970, 366 p. (In Russian).

14. Senin P.V., Fomin A.I., Denisov V.A. Otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya chugunnogo kolenchatogo vala vosstanovlennogo elektrokontaktnoj privarkoj stal'noj lenty 50KhFA cherez promezhutochnyj sloj PG-SR2 [Evaluation of the stress-strain state of the cast-iron crankshaft reduced electro-contact welding of steel strip 50HFA through an intermediate layer of powder PG-CP2], *Trudy GOSNITI [Proceedings of GOSNITI]*, 2012, vol. 109, no. 2, pp. 83-86. (In Russian).

15. Powder Diffraction File JCPDS-ICDD PDF-2 (Set 1-47). (Release, 2016). Available at: [www.url: https://www.icdd.com/pdf-2](http://www.icdd.com/pdf-2) (accessed 15.08.2021).

16. Fomin A.I., Pan'kin N.A. Rentgenograficheskoe issledovanie poverkhnosti posle vosstanovleniya elektrokontaktnoj privarkoj lenty [X-ray investigation of the surface after its restoration by electrical contact welding of the tape], *Prikladnaya fizika [Applied Physics]*, 2020, no. 3, pp. 57-62. (In Russian).

Original paper

PHASE COMPOSITION, SUBSTRUCTURE AND RESIDUAL MACROSTRESSES IN THE SURFACE LAYER OF A TAPE OBTAINED BY ELECTRIC CONTACT WELDING

A.I. Fomin, N.A. Pankin

Ogarev Mordovia State University, Saransk, Russia

DOI: 10.26456 / pcascnn/2021.13.802

Abstract: The surface layer of DI50-2 cast iron after its processing by electric contact welding has been investigated by methods of X-ray diffraction and electron microscopy. A 50HVA steel strip was used as a filler material. Processing technologies were used with the creation of an intermediate layer of nickel powder PC-12N-01 and without it. Results on phase composition, substructure and residual stresses are obtained. The system under study consists of α -Fe and γ -Fe phases. Substructure parameters (microstrain and block refinement) have the same values for different modes of electrical contact welding. Residual stresses are of a tensile nature and decrease when an intermediate layer of nickel powder material is created. The main mechanism of their formation is thermal effects on the material processed by electrocontact welding. Cracks may form after electrical contact welding of the tape. They are oriented mainly parallel to the surface to be treated and are due to the presence of a large temperature gradient.

Keywords: *electrical contact welding, phase composition, microstrains, size of subblocks, macrostresses.*

Фомин Андрей Иванович – к.т.н., доцент, доцент кафедры технического сервиса машин ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева»

Панькин Николай Александрович – к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры физики твердого тела ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева»

Andrey I. Fomin – Ph. D., Docent, Department of Technical Service of Machines, Ogarev Mordovia State University

Nikolay A. Pan'kin – Ph. D., Docent, Department of Solid State Physics, Ogarev Mordovia State University

Поступила в редакцию/received: 25.08.2021; после рецензирования/revised: 20.09.2021; принята/accepted 24.09.2021.