

**Рентгенографическое исследование поверхности после восстановления электроконтактной приваркой ленты***А. И. Фомин, Н. А. Панькин*

*Представлены результаты рентгенографического исследования стали 20Х после модификации её поверхности электроконтактной приваркой ленты из стали 50ХФА. Приведены данные о фазовом составе и параметрах рентгеновских дифракционных линий (ширине и интегральной интенсивности). Они свидетельствуют о пространственной неравновесности процесса электроконтактной приварки, проявляющейся в изменениях напряженного состояния и параметрах субструктуры. Фазовый состав модифицированной поверхности представлен двумя кристаллографическими фазами:  $\alpha$ -Fe и  $\gamma$ -Fe.*

*Ключевые слова:* электроконтактная приварка, фазовый состав, ширина дифракционной линии, интегральная интенсивность, макронапряжения, субструктура.

*Ссылка:* Фомин А. И., Панькин Н. А. // Прикладная физика. 2020. № 3. С. 57.

*Reference:* A. I. Fomin and N. A. Pan'kin, Applied Physics, No. 3, 57 (2020).

**Введение**

Основное назначение гидравлического распределителя в различных технических системах – управление потоками рабочей жидкости в гидравлических линиях внешним воздействием. Одним из наиболее важных его узлов является прецизионная пара «золотник – корпус». Для её изготовления требуется применения высокосортных конструкционных материалов. Несмотря на это, в процессе эксплуатации происходит неравномерный эрозийный износ сопрягаемых поверхностей вышеуказанной системы. В дальнейшем, это приводит к выходу из рабочего состояния всего гидравлического распределителя [1]. Для восстановления их работоспособности при-

меняются перекомплектовка [2] и нанесение на изношенные поверхности покрытия различными методами: электроконтактной приваркой, электроискровой и порошковой обработкой [3–5]. Среди них, перспективным является приварка под воздействием мощных импульсов тока к поверхности обрабатываемой детали стальной ленты, порошка или проволоки – электроконтактная приварка (ЭКП) [6]. В большинстве случаев, сразу после ЭКП проводится механическая обработка поверхности снятием слоя определенной толщины методом шлифования. В результате чего вносятся существенные изменения в микро- и макроструктуру, а также в напряженное состояние [7]. Они могут в значительной степени сказаться на эксплуатационных характеристиках восстанавливаемой детали. Вышеуказанные факты приводят к искажениям рентгеновской дифракционной картины. В частности могут наблюдаться изменения в интегральной интенсивности, положении и ширины рентгеновской дифракционной линии.

Целью настоящей работы являлось рентгенографическое исследование стали 20Х после модификации её поверхности электрокон-

---

**Фомин Андрей Иванович**, доцент, к.т.н.  
**Панькин Николай Александрович**, доцент, к.ф.-м.н.  
Мордовский государственный университет  
им. Н. П. Огарева.  
Россия, 430005, Республика Мордовия, г. Саранск,  
ул. Большевикская, 68.  
E-mail: fominsurgod@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 06 апреля 2020 г.

© Фомин А. И., Панькин Н. А., 2020

тактной приваркой ленты из стали 50ХФА и последующей механической обработки.

### Методика эксперимента

В качестве исходных материалов взяты цилиндрические образцы диаметром 25,5 мм и высотой 50,0 мм. Они были приготовлены на отрезном станке Discotom-6 из натуральных шеек золотника гидрораспределителя Р-200, который изготовлен из термообработанной стали 20Х с твердостью 56-60HRC. В качестве присадного материала для последующей электроконтактной приварки использовалась лента 50ХФА толщиной 0,35 мм по ГОСТ 2283–79. Выбор данной толщины обусловлен возможностью восстановления изношенной детали до её номинального размера при минимальном припуске на механическую обработку [8].

Электроконтактную приварку ленты проводили на модернизированной установке 011–01–02Н «Ремдеталь» [9] при следующих технологических параметрах: частота вращения детали – 7 об/мин, подача сварочной тележки – 2,5 мм/об, давление в силовых цилиндрах привода сварочных роликов – 1,8 кгс/см<sup>2</sup>, сила сварочного тока – 3,5 кА, длительность импульса – 0,04 с, длительность паузы – 0,08 с,

расход охлаждающей жидкости (воды) – 1,5 л/мин. Режимы приварки выбирались на основании ранее проведенных исследований [10].

Перед нанесением ленты, образцы подвергались механической обработке на бесцентрово-шлифовальном станке Jainnher JHC 18S CNC4 с применением смазочно-охлаждающей жидкости до шероховатости поверхности ~ 0,63 мкм. Данный вид операции осуществлялся в дальнейшем и при послойном снятии материала с исследуемых образцов. Для окончательной механической обработки поверхности применялся шлифовально-полировальный станок TegraPol-21.

Рентгенографические исследования проводили на рентгеновском дифрактометре ДРОН-6 в кобальтовом фильтрованном излучении. Обработка данных осуществлялась с помощью программного комплекса PDWin 4.0 (НПО «Буревестник»).

### Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены участки рентгенограмм после снятия  $N = 1 \div 5$  слоев (толщина каждого слоя порядка 100 мкм).

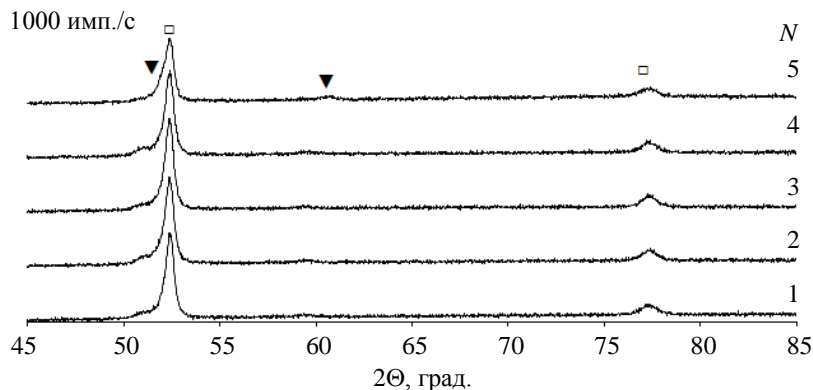


Рис. 1. Участки рентгеновской дифракционной картины от поверхностного слоя после электроконтактной приварки ( $N$  – число снятых слоев; линии фаз:  $\square$  –  $\alpha$ -Fe;  $\blacktriangledown$  –  $\gamma$ -Fe).

Поверхностный слой исследуемых материалов представляет собой двухфазную систему, состоящую из  $\alpha$  – железа (ОЦК кристаллическая решетка, пространственная группа симметрии  $I_{m3m}$ ) и  $\gamma$  – железа (ГЦК кристаллическая решетка, пространственная группа симметрии  $F_{m3m}$ ). Наличие  $\alpha$  – Fe характерно как для материала привариваемой ленты, так и подложки. Вторая фаза исходно присутствует лишь в стали 20Х. Можно заме-

тить, что фазовый состав по мере снятия слоев остается прежним. Отмечаются лишь изменения в параметрах дифракционных линий – их интегральной интенсивности, ширине и угловом положении (брегговский угол).

На рис. 2. представлена зависимость отношения суммарной интенсивности от  $\gamma$  – Fe к интегральной интенсивности всех вышеперечисленных фаз  $I/I_{\Sigma}$  от числа снятых слоев. Таким образом, данные рис. 2 показывают

распределение фаз по глубине образца. Можно отметить уменьшение доли фазы  $\alpha - Fe$  с ростом глубины, и при  $N = 5$  отношение интенсивностей несколько выше соответствующего значения для необработанной стали 20X (~0,23). В интервале  $N$  от 2 до 4, отношение  $I/I_{\Sigma}$  остается практически неизменным. Это обусловлено, прежде всего, тем, что между обрабатываемой деталью и наносимой лентой формируется переходный слой. В нем, при электроконтактной приварке, совершается интенсивный массоперенос между присадочным и обрабатываемым материалами. Вследствие этого происходит выравнивание элементного состава. В нашем случае (рис. 2) толщина данного слоя порядка 0,1–0,2 мм. Данный результат подтверждается исследованиями микроструктуры, проведенными ранее [11].

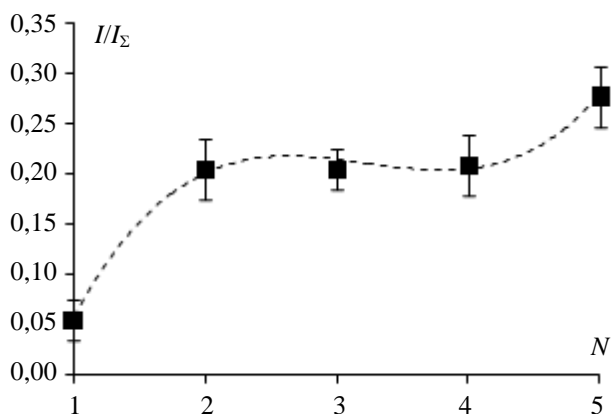


Рис. 2. Зависимость отношения интенсивности  $I$  дифракционных линий от  $\gamma - Fe$  к суммарной интенсивности  $I_{\Sigma}$

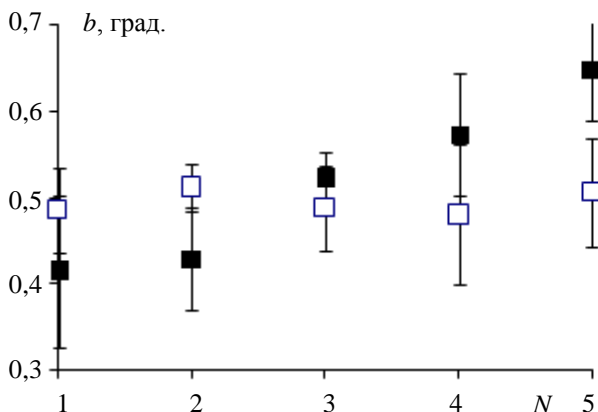


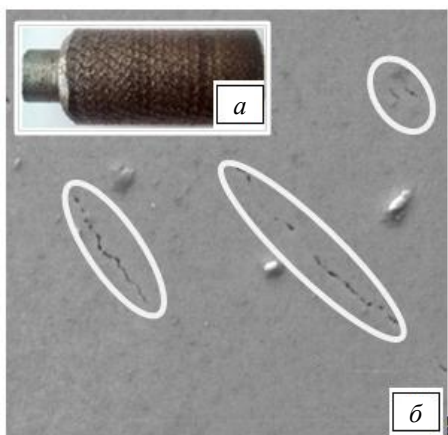
Рис. 3. Зависимость ширины дифракционных линий от фазы  $\alpha - Fe$  (линии: ■ –  $[100]$ ; □ –  $[110]$ ).

Неоднородные термодинамические условия, возникающие в месте электроконтактной приварки, способствуют формированию крайне неоднородной и дефектной структуры. Она приводит к изменениям в параметрах тонкой кристаллической структуры (субструктуры). Об этом свидетельствуют изменения в ширине дифракционных линий. На рис. 3 приведены данные лишь для ширины рефлексов от  $\alpha - Fe$ , т. к. от аустенитной фазы наблюдаются линии малой интенсивности, которые (в некотором диапазоне брегговских углов) сильно перекрываются с рефлексами от  $\alpha - Fe$ . Данное уширение может быть связано с одновременным влиянием двух факторов: измельчением/ростом зерен и возникновением микродеформаций (уравновешены в пределах зерна). Отдельно выделить каждый (используя методы аппроксимаций или гармонического анализа [12]) из них не представляется возможным, вследствие вышеуказанного перекрытия линий. Некоторый рост ширины рефлексов (рис. 3) по мере увеличения  $N$  косвенно свидетельствует об неоднородности структуры в переходном слое между обрабатываемым изделием и присадочным материалом.

В области контакта ленты и обрабатываемого изделия температуры близки к температуре плавления железа. Вследствие этого, возможно образование кристаллитов аустенита ( $\gamma - Fe$  с ГЦК кристаллической решеткой – образуется при температуре выше 900 °C), который является более плотным в сравнении с  $\alpha - Fe$ . В процессе последующего охлаждения, часть из них обратно перестраиваются в  $\alpha - Fe$ . Вследствие сильной неравновесности процесса электроконтактной приварки, часть аустенита может остаться. Об этом свидетельствует несколько большее значение интенсивности от  $\gamma - Fe$  (см. рис. 2). Что, дополнительно, приводит к формированию напряженного и дефектного состояния не только в переходном слое, но и в самих исходных материалах (ленты и восстанавливаемого изделия).

Межплоскостные расстояния для  $\alpha - Fe$  незначительно отличаются ( $\pm 10^{-3} \text{ \AA}$ ) от соответствующих значений порошковых материалов (четкой закономерности от числа снятых слоев не выявлено). Что косвенно сви-

детельствует о наличии в поверхностном слое макронапряжений (уравновешены в объеме материала). Их оценка дает величину порядка 10 МПа, что сравнимо с ошибкой их определения рентгенографическим методом [13]. Они могут быть связаны как с неравновесностью процесса электротермической обработки при электроконтактной приварке, так и искажениями, вносимыми при последующей механической обработке. Отдельно определить (после этапа восстановления поверхности) рентгенографическим методом затруднительно, вследствие довольно большой шероховатости поверхности (рис. 4, а), что приводит к сильным флуктуациям значений межплоскостного расстояния измеренного на различных участках поверхности.



*Рис. 4. Фотография части золотника (а) после приварки к нему ленты и РЭМ-изображение поперечного шлифа модифицированной поверхности (б). Выделены области, где наблюдаются трещины.*

Для сталей 20Х и 50ХФА характерны близкие значения механических (модуль упругости, коэффициент Пуассона и т. д.) и теплофизических (тепловое линейное и объемное расширения, теплопроводность и т. д.) свойств. Вследствие этого, на их границе термические напряжения, связанные с различием коэффициентов теплового линейного расширения (КТР) привариваемого и обрабатываемого материалов практически отсутствуют.

Как было указано выше, при электроконтактной приварке происходит интенсивное перемешивание вследствие значительного термического воздействия в области контакта ленты и восстанавливаемого изделия. Иссле-

дования микроструктуры [11] указывают на следы возможного оплавления в контактной области за счет выделения тепла в переходном сопротивлении. Вследствие этого интенсифицируется процесс пластической деформации переходного слоя. Вышеуказанные факты, а также непрерывное охлаждение зоны приварки охлаждающей жидкостью (водой) способствуют возникновению достаточно большого градиента температур ( $\sim 10^6$  °С/м) по толщине образца и формированию неоднородной структуры. Последующее остывание системы «лента–изделия» до комнатной температуры и достаточно большие значения КТР используемых сталей (более  $11 \times 10^{-6}$  °С<sup>-1</sup>) могут привести к возникновению в объеме образца значительных напряжений, превосходящих соответствующие механические пределы (прочности, пластичности) используемых материалов. В результате этого, в рассматриваемой системе, появляются микро- и макротрещины (рис. 4). Они ориентированы преимущественно параллельно поверхности обрабатываемого изделия. Некоторые из них могут выходить на поверхность, что, сразу же, приводит к отбраковке восстановленной детали. Формированию трещин может способствовать то, что нагрев материала до высоких температур происходит в окислительной воздушной среде. Данный факт приводит к локальному появлению оксидов компонентов сталей. Они, по своим различным физическим и механическим свойствам, могут сильно отличаться от материалов восстанавливаемого изделия и ленты, что препятствует образованию прочных связей между ними.

## Заключение

На основании представленных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Поверхностный слой после электроконтактной приварки состоит из двух кристаллографических фаз: феррита  $\alpha$  – железа (ОЦК кристаллическая решетка, пространственная группа симметрии  $I_{m3m}$ ) и аустенита  $\gamma$  – железа (ГЦК кристаллическая решетка, пространственная группа симметрии  $F_{m3m}$ ).

2. Результаты рентгенографических исследований (изменения в интегральной интенсивности и ширине дифракционных линий)

указывают на то, что между поверхностью стали 20Х и присадочным материалом (сталь 50ХФА) формируется переходный слой толщиной порядка 100–200 мкм. Для него характерны неоднородные (по времени и пространству) термодинамические условия при электроконтактной приварке, способствующие формированию крайне неоднородной и дефектной структуры вследствие интенсивного массопереноса между присадочным и обрабатываемым материалами.

3. Наличие большого градиента температур по толщине образца ( $\sim 10^6$  °С/м) и достаточно большие значения коэффициента теплового линейного расширения используемых сталей ( $\sim 10^{-5}$  °С<sup>-1</sup>) локально приводят к возникновению в объеме образца микро- и макротрещин, преимущественно ориентированных параллельно поверхности обрабатываемого изделия.

Результаты данной статьи могут быть использованы при оптимизации процесса восстановления эрозионноизношенных поверхностей методом электроконтактной приварки ленты.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Величко С. А., Бурумкулов Ф. Х., Мартынов А. В. // Труды ГОСНИТИ. 2011. Т. 108. С. 144.

2. Инатов А. Г., Харанжевский Е. В., Шмыков С. Н. // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. № 2. С. 45.

3. Андронов С. Ф. // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2007. № 8. С. 24.

4. Юдина Е. М. // Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. 2016. № 1. С. 26.

5. Бурумкулов Ф. Х., Величко С. А., Калякин А. Е. // Труды ГОСНИТИ. 2007. Т. 100. С. 149.

6. Серов А. В., Бурак П. И., Латыпов Р. А., Серов Н. В. // Вестник федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В. П. Горячкина». 2018. № 1. С. 52.

7. Загиров И. И., Павлов А. П., Игнатьев А. Г. // Труды ГОСНИТИ. 2018. Т. 132. С. 130.

8. Фомин А. И., Комаров В. А., Нуязин Е. А. // Техника и оборудование для села. 2017. № 5. С. 26.

9. Фомин А. И., Сенин П. В., Кургузкин М. А. // Научное обозрение. Международный научно-практический журнал. 2019. № 1. С. 14.

10. Фомин А. И. // Сельский механизатор. 2018. № 11. С. 46.

11. Фомин А. И., Сенин П. В. // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы. 2013. С. 480.

12. Горелик С. С., Скаков Ю. А., Расторгуев Л. Н. Рентгенографический и электронно-оптический анализ. – М.: Металлургия, 1970.

13. Гладких Л. И., Мальхин С. В., Пугачев А. Т. Дифракционные методы анализа внутренних напряжений. Теория и эксперимент. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2006.

PACS: 52.80.Mg, 61.10.Nz, 65.40.D, 68.47.De.

## X-ray investigation of the surface after its restoration by electrical contact welding of the tape

A.I. Fomin, N.A. Pan'kin

Ogarev Mordovia State University,  
68 Bolshevistskaya st., Republic of Mordovia, Saransk, 430005, Russia  
E-mail: fominsurgod@yandex.ru

Received April 06, 2020

*The results of an X-ray diffraction study of steel 20X after the modification of its surface by electrical contact welding of a tape of steel 50XFA are presented. Data on the phase composition and parameters of x-ray diffraction lines (width and integrated intensity) are presented. They indicate spatial nonequilibrium of the process of electrical contact welding, manifested in changes in the stress state and parameters of the substructure. The phase composition of the modified surface is represented by two crystallographic phases:  $\alpha$  – Fe and  $\gamma$  – Fe.*

**Keywords:** electrical contact welding, phase composition, diffraction line width, integrated intensity, macrostresses, substructure.

## REFERENCES

1. S. A. Velichko, F. Kh. Burumkulov, and A. V. Martynov, Proceedings of GOSNITI **108**, 144 (2011) [in Russian].
2. A. G. Ipatov, E. V. Kharanzhevsky, and S. N. Shmykov, Bulletin of the Izhevsk State Agricultural Academy, № 2, 45 (2019) [in Russian].
3. S. F. Andronov, Repairs. Recovery. Modernization, № 8, 24 (2007) [in Russian].
4. E. M. Yudina. Bulletin of the Velikiye Luki State Agricultural Academy, № 1, 26 (2016) [in Russian].
5. F. Kh. Burumkulov, S. A. Velichko, and A. E. Kalyakin, Proceedings of GOSNITI **100**, 149 (2007) [in Russian].
6. A. V. Serov, P. I. Burak, R. A. Latypov, and N. V. Serov, Bulletin of the federal state educational institution of higher professional education "Moscow State Agroengineering University named after V. P. Goryachkin", № 1, 52 (2018) [in Russian].
7. I. I. Zagirov, A. P. Pavlov, and A. G. Ignatiev, Proceedings of GOSNITI **132**, 130 (2018) [in Russian].
8. A. I. Fomin, V. A. Komarov, and E. A. Nuyanzin, Technique and equipment for the village, № 5, 26 (2017) [in Russian].
9. A. I. Fomin, P. V. Senin, and M. A. Kurguzkin, Scientific review. International scientific and practical journal, № 1, 14 (2019) [in Russian].
10. A. I. Fomin. The rural machine operator, № 11, 46 (2018) [in Russian].
11. A. I. Fomin and P. V. Senin, Energy-efficient and resource-saving technologies and systems, 480 (2013) [in Russian].
12. S. S. Gorelik, Yu. A. Skakov, and L. N. Rastorguev, *X-ray and electron-optical analysis* (Metallurgy, Moscow, 1970) [in Russian].
13. L. I. Gladkikh, S. V. Malykhin, and A. T. Pugachev, *Diffraction methods for analysis of internal stresses. Theory and experiment* (NTU "KhPI", Kharkov, 2006) [in Russian].