

УДК 669.1.17

## Изучение микроструктуры сварных соединений рельсов

**Е. В. Протопопов, Р. А. Шевченко, Н. А. Козырев,  
Р. Е. Крюков, И. В. Осетковский**

*ФГБОУ ВО “Сибирский государственный индустриальный университет”,  
г. Новокузнецк. E-mail: kozyrev\_na@mtsp.sibsiu.ru.*

В работе проведено исследование структуры сварных соединений рельсовой стали марки Э76ХФ при различных режимах сварки. Установлено, что в зоне сварного шва преобладает структура пластинчатого перлита. После контактной стыковой сварки без использования дополнительной обработки в зоне сварного шва рельса выявлены недопустимые структуры, представляющие собой игольчатый мартенсит. В ходе исследования были определены оптимальные параметры сварки, благодаря которым возможно получение требуемой структуры материала.

Ключевые слова: рельсы, сварное соединение, микроструктура.

The structure of welded joints of rail steel of the E76KhF grade was studied after various welding conditions. It has been established that the structure of lamellar pearlite predominates in the seam welded zone. After pressure contact butt welding without using additional processing, impermissible structures representing acicular martensite have been revealed the seam welded zone of the rail. Optimal welding parameters have been determined in the course of the study due to which it is possible to obtain the required material structure.

Keywords: rails, welded joint, microstructure.

### Введение

Сварное соединение рельсов для обеспечения безопасности дорожного движения должно соответствовать ряду требований, гарантирующих эксплуатационную стойкость. [1]. Одним из основных параметров является микроструктура сварного соединения [2 – 9]. При разработке новой технологии сварки рельсовой стали марки Э76ХФ проведено исследование микроструктуры выполненных в лабораторных условиях сварных соединений. Химический состав исследуемых образцов приведен в табл. 1. Для сварки из головки железнодорожного рельса профиля Р65 марки Э76ХФ вырезались образцы сечением 10 мм × 30 мм и длиной 90 мм.

Контактную стыковую сварку непрерывным оплавлением проводили на машине МС – 20.08.

При сварке образцов из стали 1 – 9 осуществляли подвод дополнительного тепла в момент их охлаждения путем пропускания через сварной стык переменного электрического тока по заданным режимам (табл. 2). Исследуемыми параметрами введения дополнительного тепла являлись:  $X_1$  — время охлаждения после осадки (характеризуется скоростью охлаждения (степень переохлаждения аустенита) и температурой  $T_1$ , до которой происходит охлаждение);  $X_2$  — время подогрева (характеризуется температурой  $T_2$ , до которой происходит нагрев);  $X_3$  — время охлаждения после подогрева (характеризуется температурой  $T_1$ , до которой про-

Таблица 1

Химический состав образцов рельсовой стали.

| Образец № | Массовая доля элементов, % |      |      |      |      |       |       |       |
|-----------|----------------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
|           | C                          | Mn   | Cr   | Si   | V    | Al    | P     | S     |
| 0         | 0,74                       | 0,84 | 0,37 | 0,26 | 0,04 | 0,002 | 0,009 | 0,010 |
| 1         | 0,76                       | 0,77 | 0,37 | 0,53 | 0,04 | 0,003 | 0,010 | 0,009 |
| 2         | 0,76                       | 0,77 | 0,36 | 0,53 | 0,04 | 0,003 | 0,010 | 0,007 |
| 3         | 0,76                       | 0,77 | 0,37 | 0,53 | 0,04 | 0,003 | 0,010 | 0,009 |
| 4         | 0,76                       | 0,77 | 0,37 | 0,53 | 0,04 | 0,003 | 0,010 | 0,009 |
| 5         | 0,76                       | 0,77 | 0,36 | 0,53 | 0,04 | 0,003 | 0,010 | 0,007 |
| 6         | 0,76                       | 0,77 | 0,36 | 0,53 | 0,04 | 0,003 | 0,010 | 0,007 |
| 7         | 0,77                       | 0,80 | 0,38 | 0,56 | 0,04 | 0,002 | 0,008 | 0,006 |
| 8         | 0,74                       | 0,79 | 0,38 | 0,55 | 0,06 | 0,002 | 0,009 | 0,005 |
| 9         | 0,77                       | 0,80 | 0,38 | 0,56 | 0,04 | 0,002 | 0,008 | 0,006 |

исходит охлаждение);  $X_4$  — количество импульсов подогрева (характеризуется инкубационным периодом превращения аустенита в перлит). Для сравнения использовали образец 0, выполненный способом контактной стыковой сварки непрерывным оплавлением без термической обработки.

Металлографический анализ изменений структуры проводился при увеличении  $\times 500$  с помощью оптического микроскопа Olympus GX-51. Для создания оптического контраста образцы химически травились раствором, представляющим собой 4 %-й раствор азотной кислоты в этиловом спирте в течение 6 с. Анализ и оценка микроструктуры образцов выполнены по ГОСТ 8233-56.

Исследование микротвердости было проведено по ГОСТ 9450-76 с помощью микротвердомера HVS-1000. Нагрузка была постоянной для всех

режимов обработки и составляла 1Н. Время приложения и удержания нагрузки составляло 10 с, снятия испытательной нагрузки — 5 с.

**Материалы, методы и результаты исследования**

Анализ микроструктуры проводили в образцах по зонам. Выделены следующие характерные области: шов – обезуглероженный слой, зона крупного зерна, зона мелкого зерна, основной металл. Диаграмма протяженности зоны термического влияния приведена на рис. 1. На рис. 2 приведены изображения структуры, полученные при различных режимах, а результаты оценки микроструктуры на бальность в зоне сварного шва представлены в табл. 3.

Таблица 2

Режимы контактного подогрева образцов стали Э76ХФ

| Номер режима | $X_1$ , с | $X_2$ , с | $X_3$ , с | $X_4$ , с |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1            | 30        | 0,6       | 15        | 4         |
| 2            | 30        | 0,6       | 15        | 2         |
| 3            | 30        | 0,6       | 10        | 4         |
| 4            | 30        | 0,6       | 10        | 2         |
| 5            | 25        | 0,6       | 15        | 4         |
| 6            | 25        | 0,6       | 15        | 2         |
| 7            | 25        | 0,6       | 10        | 4         |
| 8            | 25        | 0,6       | 10        | 2         |
| 9            | 27,5      | 0,6       | 12,5      | 3         |

Здесь  $X_1$  — время охлаждения после осадки;  $X_2$  — время подогрева;  $X_3$  — время охлаждения после подогрева;  $X_4$  — количество импульсов подогрева.

Таблица 3

Оценка микроструктуры в зоне сварного шва

| Номер режима | Объемная доля мартенсита/троостита, % (Балл) | Степень дисперсности пластинчатого перлита, балл |
|--------------|--|--|
| 0            | 95/5 (4)                                     | —  |
| 1            | —  | 2  |
| 2            | >75/<25 (7,5)                                | —  |
| 3            | —  | 1  |
| 4            | —  | 4  |
| 5            | —  | 1  |
| 6            | —  | 1  |
| 7            | —  | 1  |
| 8            | 25/75 (7)                                    | —  |
| 9            | —  | 1  |

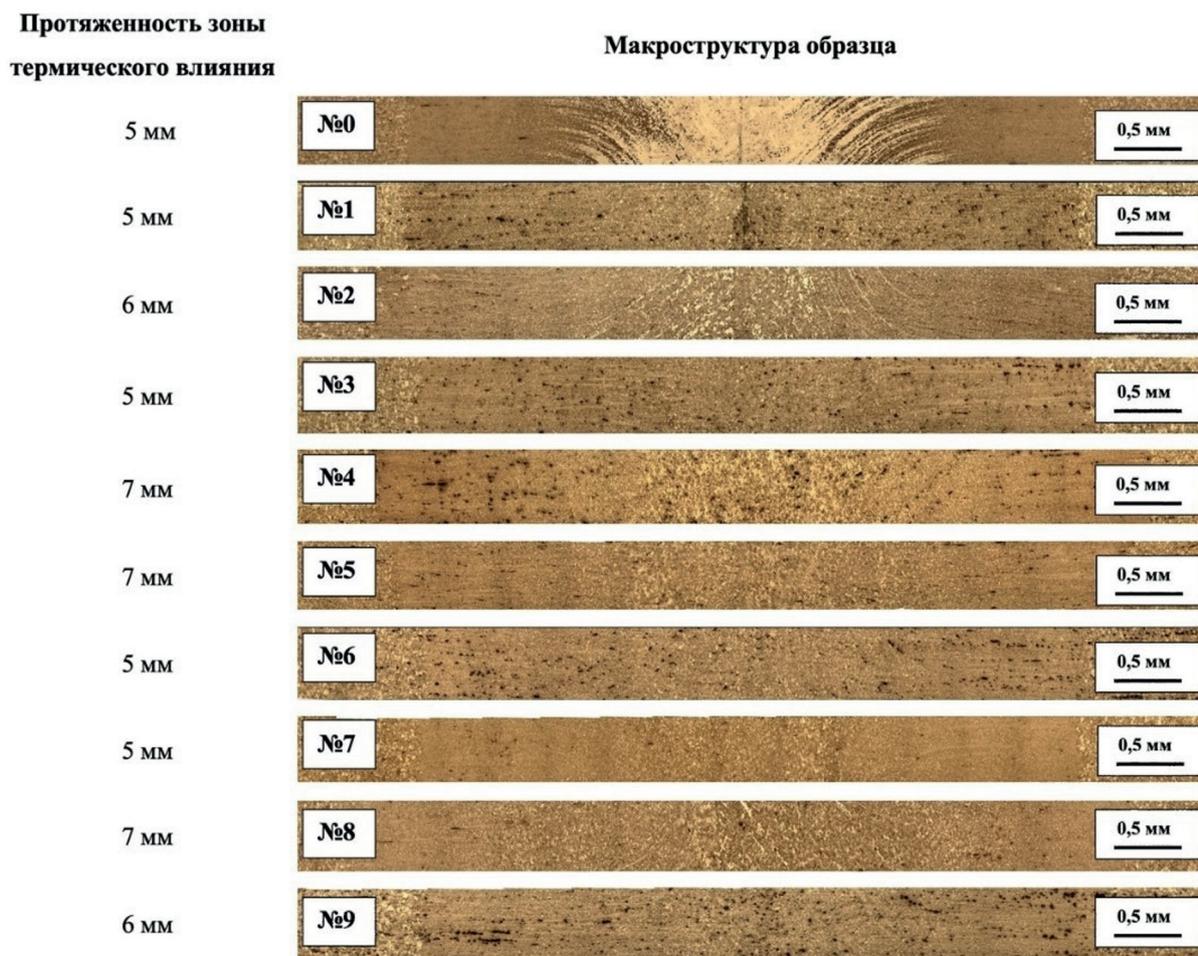


Рис. 1. Протяженность зоны термического влияния.

В зоне сварного шва преобладает структура пластинчатого перлита. Дисперсность этого типа структуры изменяется в пределах 1 – 4 балла по шкале 1 ГОСТ 8233-56. Для образцов 3, 5, 6, 7 и 9 в этой зоне преобладает сорбитообразный перлит с межпластинчатым расстоянием менее 0,2 мкм. Для образца 1 — скрытопластинчатый перлит с межпластинчатым расстоянием 0,3 мкм. Для образца 4 преобладает мелкопластинчатый перлит с межпластинчатым расстоянием 0,4 мкм. Согласно ГОСТ Р 51685-2013, данные типы структур являются допустимыми в рельсовом металле.

В сварном шве образцов 0, 2 и 8 присутствует структура игольчатого мартенсита. Размеры игл для образца 0 оцениваются баллом 7 шкалы 3 ГОСТ 8233-56 и относится к типу крупноигльчатого мартенсита с наибольшей длиной игл 12 мкм. Для образца 2 структура мартенсита соответствует баллу 6 шкалы 3 ГОСТ 8233-56. Такой тип мартен-

сита относится к среднеигльчатому мартенситу, где наибольший размер игл составляет 10 мкм. Для образца 8 в зоне сварного шва наблюдается мартенсит, оценивающийся баллом 4 шкалы 3 ГОСТ 8233-56. Данный тип мартенсита соответствует мелкоигльчатому мартенситу с наибольшей длиной игл 6 мкм. Наличие таких структур недопустимо в рельсовом металле.

Результаты оценки микроструктуры на балльность в зоне крупного зерна представлены в табл. 4. Приведенные данные свидетельствуют о преобладании в зоне крупного зерна структуры пластинчатого сорбитообразного перлита с межпластинчатым расстоянием менее 0,2 мкм. Для режимов 4 и 5 обнаружен тонко- и мелкопластинчатый перлит с межпластинчатым расстоянием до 0,6 мкм. Проведенные исследования микроструктуры образцов 0, 2 и 8 показали, что в зоне крупного зерна, так же, как и в сварном шве присутствует

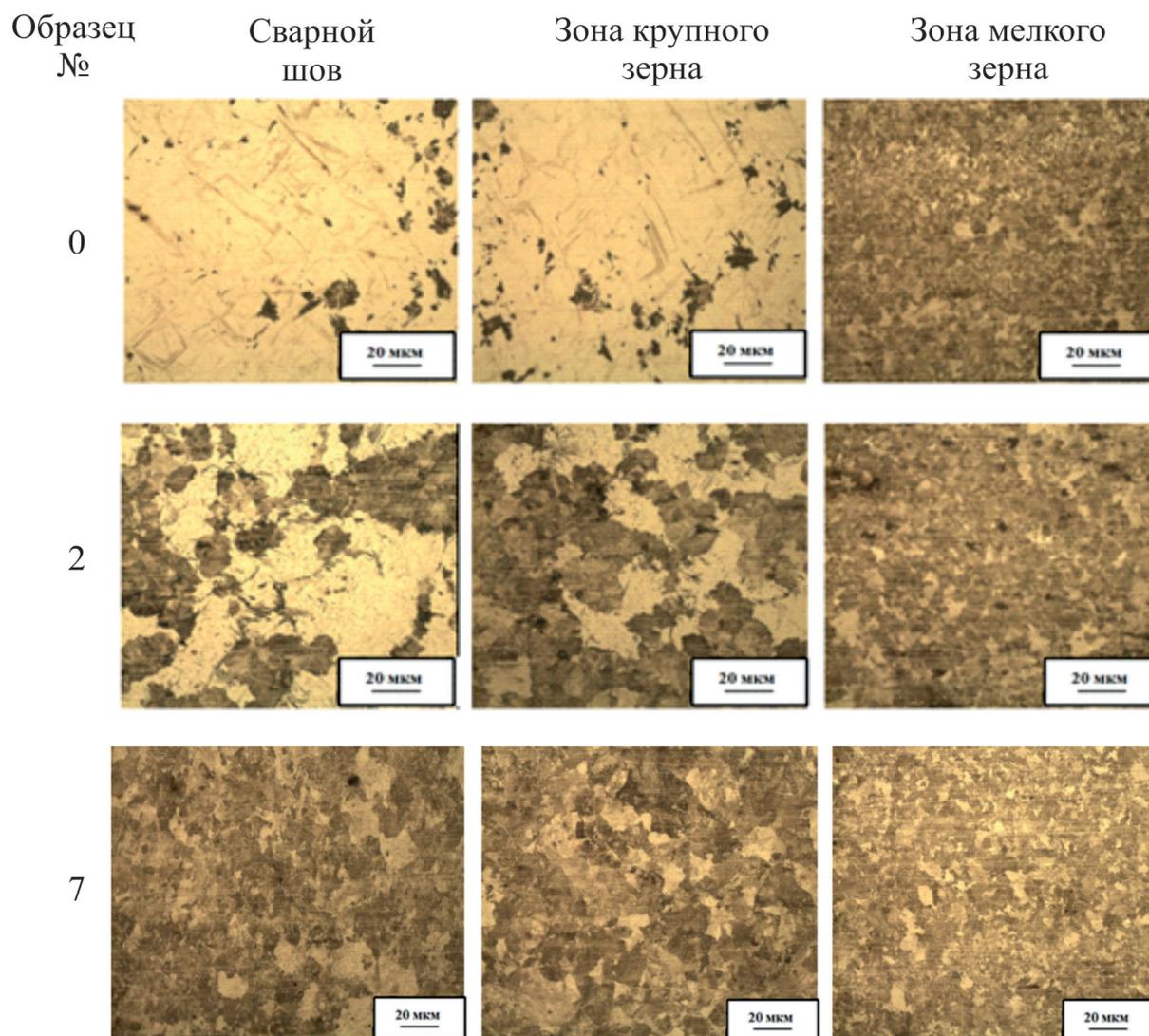


Рис. 2. Микроструктура различных областей, полученная при различных режимах.

Таблица 4

Оценка микроструктуры в зоне крупного зерна

| Номер режима | Протяженность зоны, мм | Объемная доля мартенсита/троостита, % (Балл) | Степень дисперсности пластинчатого перлита, балл |
|--------------|------------------------|--|--|
| 0            | 0,9                    | 95/5 (4)                                     | —  |
| 1            | 0,9                    | —  | 1  |
| 2            | 2,09                   | 25/75 (9)                                    | —  |
| 3            | 0,9                    | —  | 1  |
| 4            | 1,9                    | —  | 3–4  |
| 5            | 3,0                    | —  | 3–4  |
| 6            | 1,9                    | —  | 1  |
| 7            | 0,9                    | —  | 1  |
| 8            | 3,09                   | 25/75 (9)                                    | —  |
| 9            | 0,9                    | —  | 1  |

Таблица 5

Протяженность зон термического влияния и средние значения микротвердости для исследуемых режимов

| Номер образца    | Протяженность зоны термического влияния, мм | Средние значения микротвердости HV1 |                     |                    |                 |
|------------------|---|-------------------------------------|---------------------|--------------------|-----------------|
|                  |   | Зона сварного шва                   | Зона крупного зерна | Зона мелкого зерна | Основной металл |
| 0                | 5   | 519                                 | 525,02              | 418,98             | 369,21          |
| 1                | 5   | 356,44                              | 347,5               | 328,49             | 321,59          |
| 2                | 6   | 413,08                              | 374,13              | 333,72             | 344,27          |
| 3                | 5   | 350,8                               | 336,3               | 311,5              | 324,1           |
| 4                | 7   | 294,5                               | 300,7               | 303,9              | 324,9           |
| 5                | 7   | 336,0                               | 316,8               | 302,6              | 328,6           |
| 6                | 5   | 360,42                              | 349,35              | 316,29             | 323,97          |
| 7                | 5   | 358,9                               | 352,9               | 329,5              | 330,3           |
| 8                | 7   | 365,82                              | 355,4               | 284,12             | 318,42          |
| 9                | 6   | 357,3                               | 358,55              | 319,96             | 334,4           |
| Среднее значение |   | 371,226                             | 361,665             | 324,9              | 331,976         |

мартенситная структура, наличие которой не допускается в рельсовом металле. Для образцов 0 и 2 мартенсит оценивается баллом 8 шкалы 3 ГОСТ 8233. Этот тип мартенсита относится к крупноигльчатому мартенситу с размером игл 16 мкм. Для режима 8 мартенсит оценивается баллом 5 шкалы 3 и относится к типу среднеигльчатого мартенсита с размером игл 8 мкм.

Микроструктура в зоне мелкого зерна представляет собой пластинчатый и зернистый перлит в различной стадии коагуляции. Дисперсность пластинчатого перлита оценивается баллом 1 шкалы 1 ГОСТ 8233-56 и соответствует сорбитообразному перлиту с межпластинчатым расстоянием менее 0,2 мкм. Дисперсность зернистого перлита оценивается баллом 1 шкалы 1 ГОСТ 8233-56. Этот тип зернистого перлита относится к точечному со средним диаметром зерен цементита до 0,25 мкм. Протяженность этой зоны для исследуемых образцов варьируется от 3 до 5 мм. Режимы 1, 5, 6 и 8 имеют наименее протяженную область мелкого зерна, равную 3 мм, режимы 4 и 9 наибольшую, равную 5 мм.

Структура основного металла исследуемых образцов представляет собой пластинчатый перлит 1-2 балла по шкале 1 ГОСТ 8233-56, что характерно для структуры нетермоупрочненных рельсов.

Протяженность зон термического влияния, а также значения микротвердости по зонам, выявленным в зоне термического влияния, представлены в табл. 5. Из таблицы видно, что наименьшая протяженность зоны термического влияния наблюдается у сварных стыков, образцов 0, 1, 3, 6 и 7 (около 5,0 мм), а наибольшая — у сварного стыка

4, 5 и 8 (около 7,0 мм). Исходя из полученных данных по макроструктуре, можно увидеть границу между основным металлом и зоной термического влияния. Этот переход обуславливается резким различием в размере зерна (или перлитной ячейки) между двумя областями.

Максимальные значения микротвердости в зоне сварного шва и крупного зерна наблюдаются в образцах, полученных на образцах 0 и 2, что подтверждает наличие в этих зонах у этих образцов структуры мартенсита. Минимальные значения микротвердости характерны для зоны мелкого зерна. Снижение микротвердости после сварки в зоне мелкого зерна, очевидно, произошло вследствие образования зернистого перлита на этом участке. Область, относящаяся к зоне основного металла, имеет микротвердость 330 HV1. Равномерное распределение микротвердости получено при режимах 4 и 7.

Таким образом, можно делать вывод, что наиболее оптимальным из представленных режимов контактного подогрева для образцов стали Э76ХФ является режим 7. Этот образец сочетает минимальную протяженность зоны термического влияния, отсутствие в сварном соединении закалочных структур, удовлетворительную протяженность зоны мелкого зерна и оптимальные значения микротвердости.

## Выводы

В результате микроструктурного анализа в сварном соединении образцов из рельсовой стали Э76ХФ, полученным электроконтактным спосо-

бом, в зоне термического влияния выделены четыре участка: сварной шов, зона крупного зерна, зона мелкого зерна и основной металл.

Изучена микроструктура в зоне сварного шва рельса после контактной стыковой сварки без использования контактного подогрева в момент охлаждения сварного соединения; выявлены недопустимые структуры, представляющие собой игольчатый мартенсит.

На основании данных полученной микроструктуры, протяженности зоны термического влияния и значений микротвердости выбраны оптимальные параметры контактного подогрева после контактной стыковой сварки.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-48-420003 р\_а “Развитие физико-химических и технологических основ создания принципиально нового способа сварки дифференцированно термоупрочненных железнодорожных рельсов”.*

## Литература

1. Генкин И.З. Сварные рельсы и стрелочные переводы. М.: Интекст, 2003, 93 с.
2. Shevchenko R.A., Kozyrev N.A., Kryukov R.E., Patrushev A.O., Usoltsev A.A. Multi-factor regression analysis of the process of rails contact welding on K1000 machine. / In: Metallurgy 2017. IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 411 (2018) 012088| doi:10.1088/1757-899X/411/1/012088.
3. Кузнецов В.А., Шевченко Р.А., Усольцев А.А., Козырев Н.А., Крюков Р.Е. Методика определения электрического сопротивления рельсовой стали. // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. 2018. Вып. 40. С. 111 – 117.
4. Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Усольцев А.А., Крюков Р.Е. Совершенствование технологии электроконтактной сварки и термообработки железнодорожных рельсов. // Вестник горно-металлургической секции Российской академии естественных наук. Отделение металлургии: Сборник научных трудов. 2018. Вып. 40. С. 63 – 68.
5. Шевченко Р.Е., Козырев Н.А., Куценко А.И., Усольцев А.А., Куценко А.А. Методика исследования влияния режимов изотермического отжига при сварке рельсов откаточных путей горных выработок. // Научно-технические технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журнал Сибир. госуд. индустр. унив. 2018. № 4. С. 269 – 273.
6. Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Усольцев А.А., Крюков Р.Е., Князев С.В. Современные технологии сварки железнодорожных рельсов. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. Вып. 2 (1418). С. 62 – 68.
7. Шевченко Р.А., Козырев Н.А., Патрушев А.О., Кратко С.Н., Шишкин П.Е. Определение оптимальных режимов работы рельсосварочной машины K1000. // Вестник РАЕН (Западно-Сибирское отделение). 2017. Вып. 20. С. 118 – 126.
8. Козырев Н.А., Шевченко Р.А., Крюков Р.Е., Усольцев А.А. Разработка новой технологии сварки рельсов для высокоскоростного движения. // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. Вып. 8 (1424). С. 50 – 57.
9. Протопопов Е.В., Козырев Н.А., Крюков Р.Е., Шевченко Р.А., Усольцев А.А. Новая технология сварки железнодорожных рельсов. / В кн.: Сбор. трудов XV Международного конгресса сталеплавильщиков (г. Москва-Тула, 15-19 октября 2018г). М.: МОО “Ассоциация сталеплавильщиков”. 2018. С. 296 – 300.