

# ВЛИЯНИЕ НОРМАЛИЗАЦИИ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНОТЕРМИТНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РЕЛЬСОВ

*Л.Б. ТИХОМИРОВА, канд. техн. наук, профессор*  
*А.С. ИЛЬИНЫХ, доктор техн. наук, доцент*  
*М.С. ГАЛАЙ, канд. техн. наук*  
*Э.С. СИДОРОВ, аспирант*  
*(СГУПС, Новосибирск)*

Поступила 25 декабря 2015  
Рецензирование 15 января 2016  
Принята к печати 15 февраля 2016

Галай М.С. – 630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191,  
Сибирский государственный университет путей сообщения,  
e-mail: galayms@mail.ru, sesnsk@mail.ru

Рассматриваются вопросы повышения качества сварных соединений рельсов, полученных алюминотермитной сваркой. Приведен анализ причин выхода из строя алюминотермитных сварных соединений рельсов. Изложены результаты экспериментального исследования влияния нормализации на твердость и структуру металла головки сварных соединений рельсов. Установлено, что без термической обработки сварных швов рельсов в зоне сплавления сварного шва и металла рельса наблюдается резкое увеличение твердости с 24 до 38 HRC, что подтверждается микроструктурным анализом разницы в зернистости металла в зонах сварного шва и термического влияния. В зоне сварного шва металл имеет игольчатую дендритную структуру, в зоне термического влияния – крупнозернистую структуру. Вследствие неоднородности структуры сварного соединения вероятность возникновения трещин на границе сплавления сварного шва и металла очень высока.

Установлено, что нормализация алюминотермитных сварных соединений головки рельсов при температурах 850...900 °С обеспечивает формирование ферритно-перлитной структуры в зоне сварного шва. В зоне термического влияния (за границей сплавления) образуется мелкозернистая структура металла с твердостью, близкой к твердости основного рельса, что является следствием устранения вредного влияния перегрева металла при сварке. Отмечено, что термообработка сварных соединений головки рельсов мало изменяет механические свойства, в частности твердость, в зоне сварного шва. Но при этом в зоне термического влияния наблюдается значительное уменьшение твердости на 8...10 HRC после проведения нормализации. Обосновано применение нормализации алюминотермитных сварных соединений рельсов для уменьшения вероятности появления хрупкого разрушения в зоне термического влияния при эксплуатации бесстыкового пути.

**Ключевые слова:** рельсы, алюминотермитная сварка, термическая обработка, микроструктура, твердость, сварной шов.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-60-66

## Введение

Постоянное повышение грузонапряженности железнодорожных линий и скоростей движения поездов приводит к увеличению нагрузок на сварные рельсовые соединения. Поэтому в настоящее время повышение надежности свар-

ных рельсовых соединений является актуальной задачей.

При соединении рельсов применяются разные способы сварки рельсовых стыков, в основном используются контактный и алюминотермитный способы сварки. Одним из достоинств соединения рельсов с помощью сварки является

отсутствие зазора между соединяемыми рельсами. В результате при перекачивании колеса с отдающего конца рельса на принимающий отсутствует удар колеса о край головки принимающего рельса. При этом снижается уровень динамических нагрузок не только на рельсы в местах их соединения, но и на ходовую часть подвижного состава. Отсутствие удара в сварном соединении рельсов существенно снижает вероятность возникновения таких дефектов, как смятие, расслаивание и выкрашивание металла рельса, а также снижается вероятность образования усталостных трещин [1–4]. В отличие от контактного способа сварки алюминотермитная сварка позволяет сваривать рельсы в зоне стрелочных переводов, на мостах, в тоннелях и кривых малого радиуса. Следует отметить, что наряду со сварными соединениями, полученными контактной сваркой, алюминотермитные сварные соединения являются недостаточно изученными.

В процессе эксплуатации рельсов, сваренных алюминотермитной сваркой, было обнаружено, что в зоне сварных швов образуются седловины. В работах [5, 6] было установлено, что причина возникновения данного дефекта в понижении твердости металла сварного шва. Вторым наблюдаемым дефектом выхода из строя алюминотермитных сварных швов является появление трещин на границе сплавления сварного шва и основного металла рельса.

Известно, что сварка создает разнородную структуру в зонах сварного шва и термического влияния. Сварные соединения без термической обработки имеют крупнозернистое строение. В зоне термического влияния присутствует перегрев металла, что значительно понижает пластичность и ударную вязкость, а также может приводить к образованию хрупкого разрушения сварных швов [7]. Измельчение структуры металла сварного соединения может быть достигнуто несколькими способами: за счет модифицирования литейного компонента [8], за счет поверхностного пластического деформирования [9, 10], за счет проведения термической обработки (нормализации) [11, 12]. В настоящее время для улучшения эксплуатационных свойств алюминотермитных сварных соединений рельсов после проведения алюминотермитной сварки допускается проведение нормализации металла

в подошве рельса в зоне стыка, при этом головки и шейки рельса не подвергаются термической обработке [13].

Цель исследований, описываемых в данной статье, – анализ механических свойств и структуры металла сварного шва и зоны термического влияния алюминотермитного сварного соединения головки рельса после проведения нормализации.

### Материал и методы исследований

Материалами исследования служили темплеты, вырезанные из головки алюминотермитного сварного соединения рельса с помощью горизонтального полуавтоматического ленточного станка UE – 350 SA. Поверхность катания головки рельса была сформирована с помощью гратоснимателя после сварки, и последующее шлифование не проводилось. Нормализацию образцов проводили по следующим режимам: 1) выдержка образцов в печи при температуре 850...900 °С, время выдержки – 25...30 мин; 2) охлаждение образцов на воздухе [14]. После удаления обезуглероженного слоя металла и проведения соответствующей подготовки поверхностей была измерена твердость в зоне сварного шва и зоне термического влияния. Измерение твердости металла осуществляли по методу Роквелла с помощью универсального твердомера HBRV-187.5 в соответствии с ГОСТ 9013–59. На рис. 1 показано расположение поверхностей и места нанесения отпечатков при измерении твердости:

- поверхность А, расположенная перпендикулярно оси симметрии профиля рельса на глубине 20 мм от поверхности катания рельса;
- поверхности Б, расположенная в поперечном профиле головки рельса на расстоянии 40 мм от центра сварного шва;
- поверхность В, расположенная в поперечном профиле головки рельса в середине сварного шва.

Расстояния между полученными после измерения твердости отпечатками были определены с помощью цифрового микроскопа Levenhuk DTX 90. Среднее расстояние между отпечатками составило 2 мм, а расстояния между полученными дорожками отпечатков 5 мм. Обработка данных, полученных в результате измерения твердости,

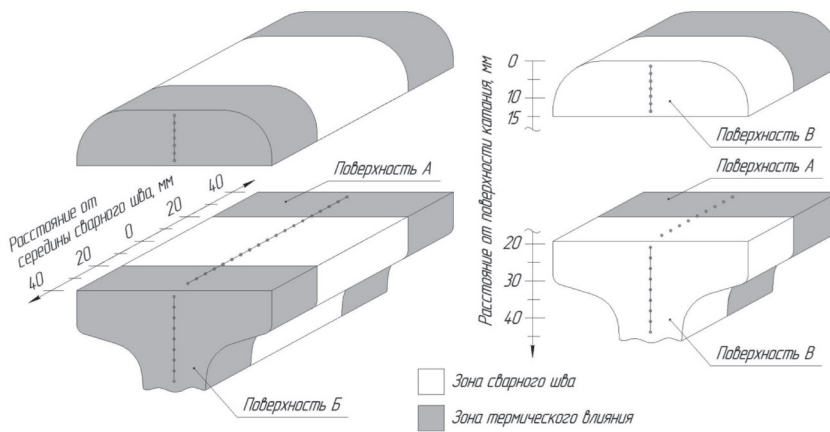


Рис. 1. Схема расположения поверхностей и мест нанесения отпечатков при измерении твердости головки рельса алюминотермитного сварного соединения

осуществлялась с использованием программы STATISTICA [15]. Микроструктурный анализ проводился на шлифах с применением оптического микроскопа МИМ – 8М при увеличениях 100... 400 крат. Для выявления микроструктуры поверхность шлифов подвергали травлению в 5 %-м спиртовом растворе азотной кислоты.

## Результаты и обсуждение

Результаты измерения твердости поверхностей А и В до и после проведения нормализации представлены на рис. 2 и 3. На первом этапе проведена оценка твердости образцов сварных соединений рельсов в исходном состоянии (без

термической обработки). Ширина сварного шва составляет порядка 40 мм. В качестве точки отсчета выбрана середина сварного шва. Твердость металла в зоне сварного шва находится в диапазоне 24...26 HRC. Вблизи границы сплавления металла сварного шва с металлом рельса твердость возрастает до 32 HRC. На расстоянии 26...28 мм от середины сварного шва наблюдается увеличение твердости металла до 37...38 HRC. При дальнейшем удалении от середины сварного шва твердость снижается, и на расстоянии 32...38 мм составляет в среднем 32 HRC. Твердость металла рельса по мере удаления от поверхности катания головки рельса (поверхность В, зона термического влияния) изменяется в небольших пределах и составляет порядка 32...33 HRC.

До проведения нормализации твердость металла сварного шва от поверхности катания до 38 мм по глубине (поверхность В) изменяется незначительно и составляет порядка 25...26 HRC. На глубине 38...44 мм от поверхности катания головки рельса наблюдается постепенное повышение твердости металла сварного шва до 30 HRC, что связано с увеличением скорости охлаждения в области шейки рельса.

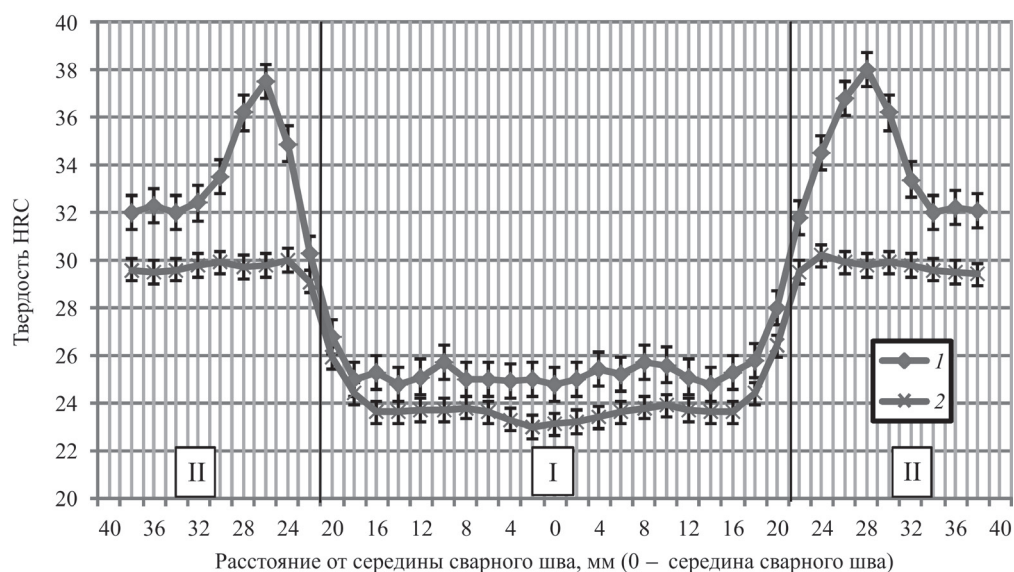


Рис. 2. Твердость металла поверхности А до и после нормализации:

I — зона сварного шва; II — зона термического влияния; 1 — до нормализации; 2 — после нормализации

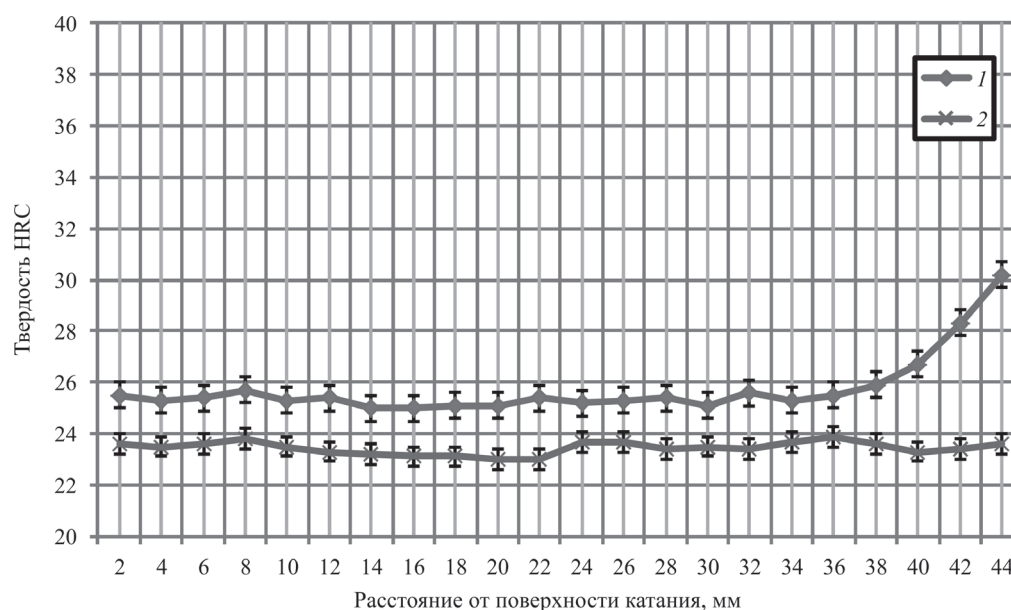


Рис. 3. Твердость металла поверхности В до и после нормализации:

1 – до нормализации; 2 – после нормализации

Анализ результатов измерения твердости сварных соединений после нормализации показал, что твердость металла в зоне сварного шва (поверхность А) составляет 23...24 HRC. Вблизи границы сплавления металла сварного шва с металлом рельса твердость возрастает до 26...30 HRC. На расстоянии 22...38 мм от середины сварного шва твердость металла рельса изменяется незначительно и составляет 29...30 HRC. Твердость металла рельса в зоне термического влияния по глубине изменяется в небольших пределах и составляет порядка 29...30 HRC (поверхность Б). Твердость металла сварного шва по глубине (поверхность В) составляет порядка 23...24 HRC.

Металлографический анализ структуры металла сварного шва и зоны термического влияния до проведения нормализации показал, что металл в зоне сварного шва имеет литую структуру (рис. 4, а), представляющую собой игольчатую  $\alpha$ -фазу с выраженным строением в виде дендритов. В зоне сплавления металла сварного шва и металла рельса (рис. 4, б) видна ярко выраженная неровная граница перехода от литой структуры металла сварного шва к крупнозернистой структуре перлита с ферритными прослойками. На расстоянии 36...38 мм структура металла представляет собой смесь феррита и цемента (рис. 4, в).

Микроструктура зоны сварного шва после проведения нормализации представлена на рис. 4, г. Металл имеет мелкозернистую ферритно-перлитную структуру, размеры дендритов уменьшены. В зоне сплавления металла сварного шва и металла рельса (рис. 4, д) отсутствует четкая граница перехода от одной структуры к другой. Кроме того, отчетливо видно отсутствие крупных зерен со стороны основного металла, что свидетельствует об устранении последствий перегрева. Структура металла рельса в зоне термического влияния (рис. 4, е) представляет собой перлит с небольшими участками феррита.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что металл сварного шва и металл рельса имеют неоднородную структуру и, как следствие, обладают различными механическими свойствами. Повышение твердости металла в зоне термического влияния до 38 HRC связано с перегревом металла этого участка рельса, в результате которого образовалась крупнозернистая структура. Это, в свою очередь, приводит к снижению пластичности и увеличению склонности к хрупким разрушениям.

## Выводы

1. Проведенные исследования показали, что причиной образования седловин в зоне головки



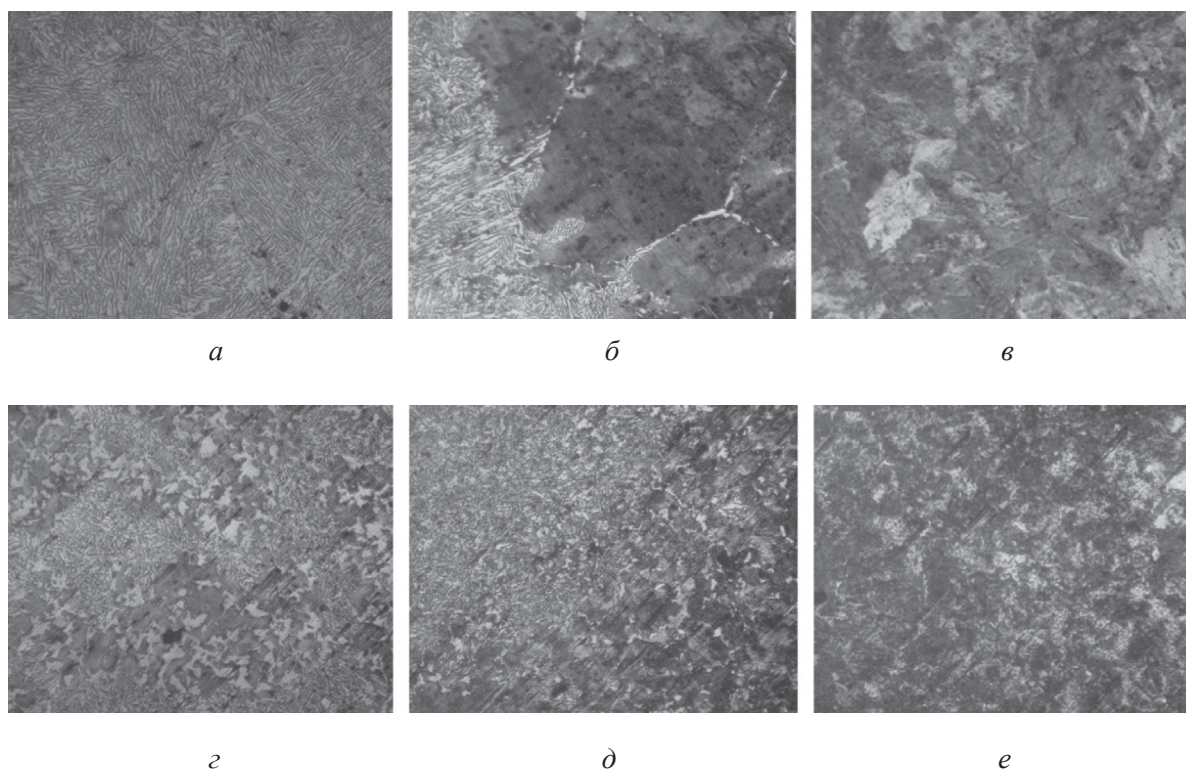


Рис. 4. Микроструктура металла рельса, сваренного алюминотермитным способом сварки до и после проведения нормализации,  $\times 300$ :

*а* – зона сварного шва до нормализации; *б* – зона сплавления до нормализации; *в* – зона термического влияния (за зоной сплавления) до нормализации; *г* – зона сварного шва после нормализации; *д* – зона сплавления после нормализации; *е* – зона термического влияния (за зоной сплавления) после нормализации

алюминотермитных сварных соединений рельсов в процессе эксплуатации является пониженное значение твердости в зоне сварного шва. Причина возникновения данного дефекта не может быть устранена нормализацией, так как после ее проведения твердость сварного шва и рельса снижается на 1...2 HRC.

2. Склонность к хрупкому разрушению в зоне термического влияния сразу за зоной сплавления объясняется наличием крупнозернистости.

За счет проведения нормализации головки алюминотермитных сварных соединений устранено вредное влияние перегрева металла в зоне термического влияния. После нормализации в зоне термического влияния сварных швов наблюдается мелкозернистая структура и снижение твердости с 38 до 30 HRC, в результате чего устраняется опасность хрупкости.

3. Необходимость введения операции нормализации алюминотермитных сварных соединений рельсов в технологический процесс послесварочной обработки подтверждается результатами измерений твердости и металлографическими исследованиями.

## Список литературы

1. Пасько С.В., Тихомирова Л.Б., Болотова О.В. Алюминотермитная сварка рельсов методом промежуточного литья по технологии фирмы «СНАГА»: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2010. – 99 с. – ISBN 5-93461-418-5.
2. Виногоров Н.П. Бесстыковой путь на дорогах Сибири и Дальнего Востока // Путь и путевое хозяйство. – 2004. – № 7. – С. 23–27.
3. Технология алюминотермитной сварки рельсов: учебное пособие / Н.Н. Воронин, В.В. Засыпкин, В.И. Коненков, Э.В. Воробьев, О.Н. Трынкова; под ред. Н.Н. Воронина. – М.: МИИТ, 2008. – 117 с.
4. Гудков А.В., Лыков А.М., Кярамян К.А. Расчет процесса алюминотермитной сварки рельсов // Вестник ВНИИЖТ. – 2013. – № 2. – С. 50–54.
5. Алехин А.Л. Параметры твердости стыков, сваренных алюминотермитной сваркой // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2010. – № 2. – С. 51–56.
6. Каргин В.А., Тихомирова Л.Б., Галай М.С. Упрочнение сварных соединений рельсов методом поверхностного пластического деформирования // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2010. – № 3 (48). – С. 17–18.

7. Берлин В.И., Захаров Б.В., Мельниченко П.А. Транспортное материаловедение: учебник для вузов железнодорожного транспорта. – М.: Транспорт, 1982. – 287 с.

8. Способы повышения качества алюминотермитных сварных соединений рельсов / Д.С. Насонов, А.В. Гудков, А.И. Борц, А.И. Николин // Развитие железнодорожного транспорта в условиях реформирования: сборник статей ученых и аспирантов. – М., 2006. – С. 189–194.

9. Improving service properties of welded joints produced by aluminothermic welding / V.A. Kargin, L.B. Tikhomirova, M.S. Galay, Y.S. Kuznetsova // Welding International. – 2015. – Vol. 29, iss. 2. – P. 155–157. – doi: 10.1080/09507116.2014.897809.

10. Тихомирова Л.Б., Галай М.С. Повышение твердости алюминотермитных сварных соединений рельсов поверхностным пластическим деформированием // Политранспортные системы: материалы VIII международной научно-технической конференции. – Новосибирск, 2015. – С. 564–567.

11. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П. Материаловедение: учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. – М.: Альянс, 2009. – 527 с. – ISBN 978-5-903034-54-3.

12. Технология термической обработки стали / пер. с нем. В.В. Левина; под ред. М.Л. Бернштейна. – М.: Металлургия, 1981. – 608 с.

13. ТУ 0921-127-01124323–2005. Сварка рельсов алюминотермитная методом промежуточного литья. Технические условия. – Введ. 01.04.2005. – М.: ФГУП ВНИИЖТ, 2005. – 27 с.

14. Журавлев В.Н., Николаева О.И. Машиностроительные стали: справочник. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 480 с. – ISBN 5-217-01306-0.

15. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: учебное пособие для металлургических специальностей вузов / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, А.Р. Бондин, В.В. Лобанов; под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2003. – 260 с.

## OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 1 (70), January – March 2016, Pages 60–66

### The effect of normalization on the structure and mechanical properties of rails aluminotermic welded joints

**Tikhomirova L.B.**, Ph.D. (Engineering), Professor, e-mail: ter@stu.ru

**Ilinykh A.S.**, D.Sc. (Engineering), Associate Professor, e-mail: asi@stu.ru

**Galay M.S.**, Ph.D. (Engineering), e-mail: galayms@mail.ru,

**Sidorov Je.S.**, Ph.D. student, e-mail: sesnsk@mail.ru

Siberian Transport University, 191 Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, Russian Federation

#### Abstract

The article is devoted to improving the quality of rail aluminotermic welded joints. The analysis of the causes of rail aluminotermic welded joints failure is given. The results of an experimental research of the effect of normalization on the hardness and structure of metal rail welded joints are studied. It is shown that without heat treatment the hardness of rail welded joints increases from 24 HRC to 38 HRC in the fusion zone of the weld metal and rail metal. The hardness is confirmed by microstructural analysis. Microstructural analysis showed the differences in the grains sizes of metal welded zone and heat affected zone. The structure of welded metal is acicular dendritic. Owing to a difference between structures of the welded joint zones the probability of occurrence of cracks on the boundary of fusion weld and metal is increased.

It is found that the normalization of rail top aluminotermic welded joints at temperature 850...900 °C provides the formation of ferrite-pearlite structure in the welded zone. The normalization formed fine-grained metal structure with a hardness, which approximate to the hardness of rail in the heat affected zone (along the fusion line). The normalization eliminates the harmful effects of overheating of the metal during welding. It is noted that heat treatment of rail aluminotermic welded joints slightly changes mechanical properties, such as hardness, in the welded zone. But, hardness decreased by 8..10 HRC in the heat affected zone.

This investigation has shown that the normalization of rail aluminothermic welded joints reduces the probability of occurrence of brittle destruction in the heat affected zone during the operation of continuous welded rail.

### Keywords:

rails, aluminothermic welding, heat treatment, microstructure, hardness, rails joints.

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-1-60-66

### References

1. Pas'ko S.V., Tikhomirova L.B., Bolotova O.V. *Alyuminotermittnaya svarka rel'sov metodom promezhutochnogo lit'ya po tekhnologii firmy "SNAGA"* [Aluminothermic Rail Welding by Intermediate Casting Method As Developed by the SNAGA Co.]. Novosibirsk, SGUPS Publ., 2010. 99 p. ISBN 5-93461-418-5
2. Vinogorov N.P. Besstykovoi put' na dorogakh Sibiri i Dal'nego Vostoka [Continuous track sections of Siberia and the Far East]. *Put' i putevoe khozyaistvo – Railway Track and Facilities*, 2004, no. 7, pp. 23–27. (In Russian)
3. Voronin N.N., Zasytkin V.V., Konenkov V.I., Vorob'ev E.V., Trynkova O.N. *Tekhnologiya alyuminotermittnoi svarki rel'sov* [The technology of aluminothermic rail welding]. Moscow, MIIT Publ., 2008. 117 p.
4. Gudkov A.V., Lykov A.M., Kyaramyan K.A. Raschet protsessa alyuminotermittnoi svarki rel'sov [Calculation of aluminothermic rail welding process]. *Vestnik nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta – Vestnik of the Railway Research Institute*, 2013, no. 2, pp. 50–54. (In Russian)
5. Alekhin A.L. Parametry tverdosti stykov, svarenykh alyuminotermittnoi svarkoi [Hardness parameters of rail joints welded by alumothermic welding]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putei soobshcheniya – Proceedings of Petersburg Transport University*, 2010, no. 2, pp. 51–56.
6. Kargin V.A., Tikhomirova L.B., Galai M.S. Uprochnenie svarnykh soedinenii rel'sov metodom poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya [Strengthening of butt rail neck by the surface plastic deformation]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2010, no. 3 (48), pp.17–18.
7. Berlin V.I., Zakharov B.V., Mel'nichenko P.A. *Transportnoe materialovedenie* [Transport materials science]. Moscow, Transport Publ., 1982. 287 p.
8. Nasonov D.S., Gudkov A.V., Borts A.I., Nikolin A.I. [Ways to improve the quality of aluminothermic welded joints of rails]. *Razvitie zheleznodorozhnogo transporta v usloviyakh reformirovaniya: sbornik statei uchenykh i aspirantov* [Proceedings of Scientists and Ph.D. students "The development of railway transport in the conditions of reforming"]. Moscow, 2006, pp. 189–194. (In Russian)
9. Kargin V.A., Tikhomirova L.B., Galay M.S., Kuznetsova Y.S. Improving service properties of welded joints produced by aluminothermic welding. *Welding International*, 2015, vol. 29, iss. 2, pp. 155–157. doi: 10.1080/09507116.2014.897809
10. Tikhomirova L.B., Galay M.S. [Increasing the hardness of aluminothermic welded joints of rail surface plastic deformation]. *Materialy VIII mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Politransportnye sistemy"* [Proceedings of the VIII International Scientific Conference "Polytransport systems"]. Novosibirsk, 2015, pp. 564–567.
11. Lakhtin Yu.M., Leont'eva V.P. *Materialovedenie* [Material science]. 4<sup>th</sup> ed. Moscow, Al'yans Publ., 2009. 527 p. ISBN 978-5-903034-54-3
12. Eckstein H.-J., hrsg. *Technologie der wärmebehandlung von stahl* [Heat treatment technology of steel]. Leipzig, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1976. 577 p. (Russ. ed.: *Tekhnologiya termicheskoi obrabotki stali*. Translated from German by V.V. Levin, ed. by M.L. Bernshtein. Moscow, Metallurgiya Publ., 1981. 608 p.).
13. TU 0921-127-01124323–2005. *Svarka rel'sov alyuminotermittnaya metodom promezhutochnogo lit'ya. Tekhnicheskie usloviya* [Specifications 0921-127-01124323–2005. The aluminothermic rail welding methods-house of the intermediate casting]. Moscow, VNIIZhT Publ., 2005. 27 p.
14. Zhuravlev V.N., Nikolaeva O.I. *Mashinostroitel'nye stali: spravochnik* [Constructional steel]. 4<sup>th</sup> ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992. 480 p. ISBN 5-217-01306-0
15. Spirin N.A., Lavrov V.V., Bondin A.R., Lobanov V.V. *Metody planirovaniya i obrabotki rezul'tatov inzhener-nogo eksperimenta* [Planning methods and processing results of the engineering experiment]. Ekaterinburg, UGTU-UI Publ., 2003. 260 p.

### Article history:

Received 25 December 2015

Revised 15 January 2016

Accepted 15 February 2016