



## Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Исследование сварных соединений рельсов после механической обработки при различной послесварочной температуре

Андрей Ильиных<sup>1, a</sup>, Марина Галай<sup>1, b, \*</sup>, Эдуард Сидоров<sup>1, c</sup>

<sup>1</sup> Сибирский государственный университет путей сообщения, ул. Д. Ковальчук, 191, г. Новосибирск, 630049, Россия

<sup>a</sup> <http://orcid.org/0000-0002-4234-6216>, [asi@stu.ru](mailto:asi@stu.ru), <sup>b</sup> <http://orcid.org/0000-0002-7897-1750>, [galayms@mail.ru](mailto:galayms@mail.ru),

<sup>c</sup> <http://orcid.org/0000-0001-6237-142X>, [sesnsk@mail.ru](mailto:sesnsk@mail.ru)

#### ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 625.143.482

#### История статьи:

Поступила: 15 мая 2017  
 Рецензирование: 17 июня 2017  
 Принята к печати: 25 июля 2017  
 Доступно онлайн: 15 сентября 2017

#### Ключевые слова:

Рельсы  
 Алюминотермитная сварка  
 Шлифование  
 Твердость  
 Шероховатость

#### АННОТАЦИЯ

Исследовано влияние процесса шлифования алюминотермитных сварных соединений рельсов, выполняемого при разных значениях остаточной послесварочной температуры сварного шва, на физико-механические свойства и шероховатость поверхности катания. Интервал послесварочных температур в зоне шлифования сварных швов составлял 600...850 °С. Установлено, что разные температурные режимы при выполнении технологической операции шлифования алюминотермитных стыков приводят к формированию неидентичных механических свойств металла поверхности головки рельса в зоне сварного шва. Шлифование при остаточной послесварочной температуре поверхности сварного шва 850 или 600 °С позволяет обеспечить наиболее высокие значения твердости металла 33...36 HRC, в то время как проведение операции шлифования при остаточной температуре 800 или 700 °С приводит к снижению твердости металла шва до значений 25...30 HRC. Снижение температуры металла поверхности головки рельса перед выполнением шлифования с 850 до 600 °С позволяет уменьшить значения шероховатости поверхности катания с 2,5 до 0,7 мкм. Наиболее высокие значения твердости и чистоты поверхности могут быть достигнуты, если производить шлифование головки рельса сварного шва после снижения температуры металла обрабатываемой поверхности до 600 °С при проведении процесса сварки.

**Для цитирования:** Ильиных А.С., Галай М.С., Сидоров Э.С. Исследование сварных соединений рельсов после механической обработки при различной послесварочной температуре // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2017. – № 3 (76). – С. 28–34. – doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-28-34.

### Введение

Внедрение инновационных технологий на железнодорожном транспорте рассматривает широкий круг аспектов по разным отраслям и направлениям. Одним из таких направлений является создание бесстыкового пути с помощью алюминотермитной сварки. Применение алюминотермитной сварки на полигоне магистральных путей получило большое распространение

в странах Западной Европы и Азии. Высокими темпами идет внедрение данного способа сварки и в России.

Сварные соединения традиционно являются слабым местом в конструкции бесстыкового пути. Это подтверждается как зарубежными, так и российскими научными исследованиями. В Японии научно-исследовательским институтом железнодорожной техники выявлено, что при нарушении установки оборудования для литья появляются такие дефекты, как непровары и шлаковые включения [1]. В работах [2, 3] рассматриваются вопросы обеспечения механических свойств алюминотермитных сварных швов, схожих со свойствами свариваемых рельсов за

#### \*Адрес для переписки

Галай Марина Сергеевна, к.т.н., доцент  
 Сибирский государственный университет путей сообщения  
 ул. Д. Ковальчук, 191,  
 630049, г. Новосибирск, Россия  
**E-mail:** [galayms@mail.ru](mailto:galayms@mail.ru)

счет легирования термитной смеси. В статьях [4, 5] представлены результаты моделирования дефектов в сварных соединениях и их влияние на напряженно-деформированное состояние сварных швов при нагружении. Кроме того, имеются работы по изучению влияния термической обработки [7] и поверхностной пластической деформации [8–10] на структуру и свойства металла алюминотермитных сварных соединений рельсов.

В настоящее время технологический процесс алюминотермитной сварки регламентируется техническими условиями [11]. Согласно данному нормативному документу весь процесс алюминотермитной сварки можно разделить на три этапа: подготовительный, процесс сварки и послесварочная обработка сварного стыка. В процессе подготовительных работ формируют стыковую зазор между рельсами размером 24...26 мм, затем выравнивают концы рельсов по поверхности катания. После этого на рельсы устанавливают сварочные полуформы и уплотняют их по всему периметру прилегания к рельсу с помощью пасты. Завершающим действием при подготовке к сварке является установка стойки, на которой фиксируют тигель и газовую горелку.

Процесс сварки начинается с предварительного подогрева концов рельсов в стыке до температуры 800...850 °С. После этого в тигель засыпают термитную смесь и поджигают её, при этом выпуск расплавленного металла и заполнение им сварочной формы происходит через 20...28 с при завершении реакции горения термитной смеси.

Послесварочная обработка рельсовых стыков выполняется через 3...5 мин после заливки металла в сварочную форму. Сначала осуществляется демонтаж сварочных полуформ, затем слой лишнего металла (грат), образовавшийся на поверхности катания головки рельса, срезается специальными гидравлическими ножами, а литники, расположенные на подошве рельса, подрубаются в горячем состоянии и отбиваются с помощью кувалды и зубила.

Для обеспечения необходимой геометрии головки рельса в зоне стыка выполняют шлифование по поверхности катания и боковым граням головки рельса шлифовальным гидравлическим станком в два приема: черновое шлифование (проводится сразу после снятия грата) и чисто-

вое шлифование (проводится после остывания сварного стыка до температуры не более 100 °С).

Следует отметить, что шлифование является заключительной операцией в технологическом процессе производства алюминотермитных сварных соединений рельсов, которое не только формирует профиль рельса в зоне сварного соединения, но оказывает воздействие на физико-механические свойства поверхностного слоя. Из инструкции [11] известно, что шлифование осуществляется сразу после снятия грата, при этом сварной шов находится в горячем состоянии и может иметь разную остаточную послесварочную температуру. Отсутствие сведений о шлифовании алюминотермитных сварных соединений рельсов при разной остаточной послесварочной температуре шва и его влиянии на твердость и шероховатость определили цель настоящей работы. Выбор в качестве оцениваемых показателей твердости и шероховатости связан с тем, что данные параметры можно проконтролировать непосредственно при производстве бесстыковой конструкции железнодорожного пути в полевых условиях с применением мобильных измерительных устройств.

### Материал и методы исследования

Для оценки влияния шлифования на твердость и шероховатость сварного соединения рельса были взяты образцы, которые получали путем сваривания рельсов алюминотермитным способом сварки. В качестве исходных материалов для сварки были использованы железнодорожные рельсы из рельсовой стали и сварочный термит, состоящий из порошкообразного металлического алюминия и окиси железа [12].

После окончания процесса сварки у образцов срезали грат при помощи гидравлических ножниц. Далее образцы шлифовали при разной остаточной послесварочной температуре металла сварного шва, которая составляла 850, 800, 700 и 600 °С. Температурный диапазон 850...600 °С выбран экспериментально, поскольку в нормативной документации [11] не установлен температурный интервал, при котором необходимо выполнять операцию шлифования. Поэтому за наибольшее значение послесварочной температуры сварного соединения принято значение 850 °С, которое зафиксировано сразу

после снятия грата. Нижняя граница температурного диапазона выбрана 600 °С из-за того, что при данной температуре полностью произошли фазовые превращения. Температуру металла в зоне сварного шва измеряли бесконтактным способом с помощью цифрового пирометра Mastech MS6550A. Образцы шлифовали шлифовальным гидравлическим станком СШГ-1 фирмы «СНАГА» при частоте вращения 3000 об/мин и глубине резания – 0,2 мм.

Для измерения твердости и шероховатости поверхности катания сварного шва рельса были вырезаны темплеты с помощью горизонтального полуавтоматического ленточного станка UE-350 SA. Твердость измеряли универсальным твердомером HBRV-187.5 по методу Роквелла в соответствии с ГОСТ 9013–59. Схема нанесения отпечатков при измерении твердости показана на рис. 1. Измерение шероховатости поверхности проводили на профилометре MarSurf PS1 в соответствии с методикой, представленной в ГОСТ 2789–73.

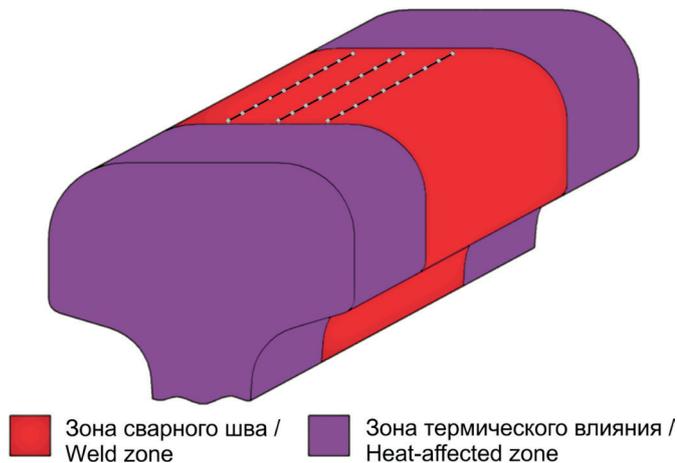


Рис. 1. Схема измерения твердости сварного шва  
Fig. 1. The hardness measurement design of a weld

### Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены результаты измерения твердости образцов, шлифованных при разной остаточной послесварочной температуре рельса. Следует отметить, что значения твердости образцов находятся в широком диапазоне от 24 до 35 HRC.

Наибольшее увеличение твердости до 34...36 HRC наблюдается при шлифовании сварного соединения, когда остаточная послесварочная

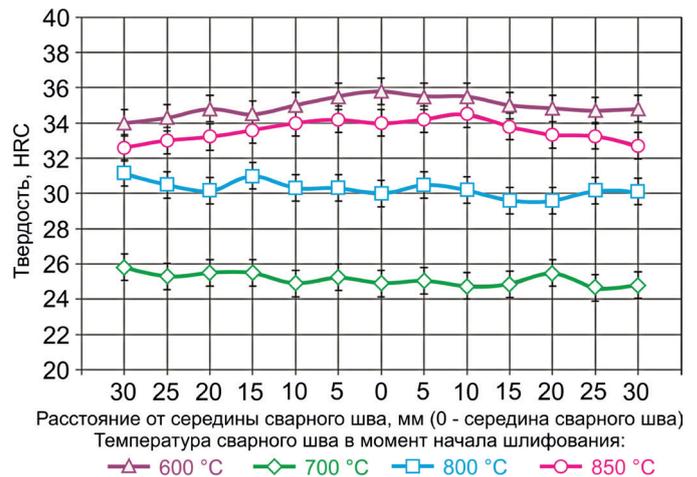


Рис. 2. Распределение твердости сварного шва на поверхности катания головки рельса после шлифования при разной остаточной послесварочной температуре  
Fig. 2. The distribution of hardness of the weld on the rolling surface of the rail head after grinding at different residual post-weld temperature

температура рельса составляет 600 °С. По-видимому, это связано с тем, что при шлифовании под действием сил резания в металле происходит пластическая деформация в области уже перлитной структуры. Однако пластическая деформация при остаточной послесварочной температуре 700 °С происходит в области самого перлитного превращения, при этом наблюдается снижение твердости до 24...25 HRC.

Шлифование сварных соединений рельсов в диапазоне температур 800...850 °С приводит к эффекту высокотемпературной термомеханической обработки. В результате деформации в аустените образуются субструктурные построения, которые наследуются при последующем фазовом превращении перлитом [13, 14]. Твердость сварных швов, шлифованных при температуре 800...850 °С, составляет 30...34 HRC.

Результаты исследования влияния шлифования сварных соединений рельсов, имеющих разную остаточную послесварочную температуру, на величину шероховатости поверхности представлены на рис. 3.

Из графика видно, что значения шероховатости уменьшаются со снижением послесварочной температуры сварного шва. Так, при шлифовании сварного соединения с остаточной послесварочной температурой 850 °С шероховатость варьируется от 2,3 до 2,6 мкм, а при шлифовании с остаточной послесварочной температурой 600 °С шероховатость составляет 0,6...0,8 мкм.

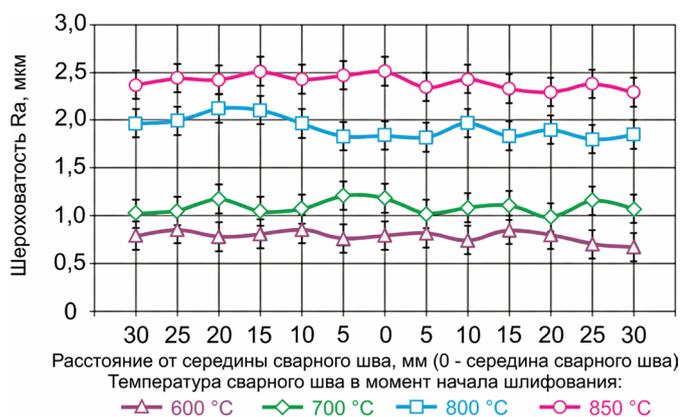


Рис. 3. Распределение шероховатости сварного шва после шлифования при разной остаточной послесварочной температуре

Fig. 3. The distribution of the roughness of the weld after grinding at different residual post-weld temperature

Это объясняется тем, что при температуре 850 °C в зоне резания сконцентрировано много теплоты, в результате чего металл поверхностного слоя значительно размягчается, повышается шероховатость [15]. При температуре шлифования 600 °C тепловое воздействие уменьшается и деформация поверхности происходит в меньшей степени.

При проведении электронно-микроскопических исследований, представленных на рис. 4, на поверхности образцов, шлифованных при остаточной послесварочной температуре 850 °C, зафиксировано наличие грубых бороздок. Известно, что грубые поперечные риски, возникающие при шлифовании, могут приводить к образова-

нию продольных трещин контактной усталости, которые, развиваясь, иногда способны вызывать опасность полного разрушения рельсов [16]. На поверхности образцов, которые шлифовали при остаточной послесварочной температуре 600 °C, бороздки такого рода отсутствуют.

## Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что остаточная послесварочная температура сварного соединения оказывает влияние на твердость и шероховатость в процессе шлифования. Характер распределения твердости образцов, шлифованных при остаточной температуре 850 и 600 °C, одинаков и составляет 34...36 HRC. При шлифовании сварных соединений рельсов с остаточной послесварочной температурой 700 и 800 °C происходит снижение твердости на 6...10 HRC по сравнению с шлифованием швов с остаточной температурой 850 и 600 °C. Экспериментально установлено, что шлифование, осуществляемое при варьировании остаточной послесварочной температуры сварного соединения от 600 до 850 °C, приводит к увеличению шероховатости поверхности от 0,6 до 2,6 мкм.

Полученные при исследовании данные позволяют определить оптимальное значение остаточной послесварочной температуры, при которой необходимо проводить шлифование алюмини-

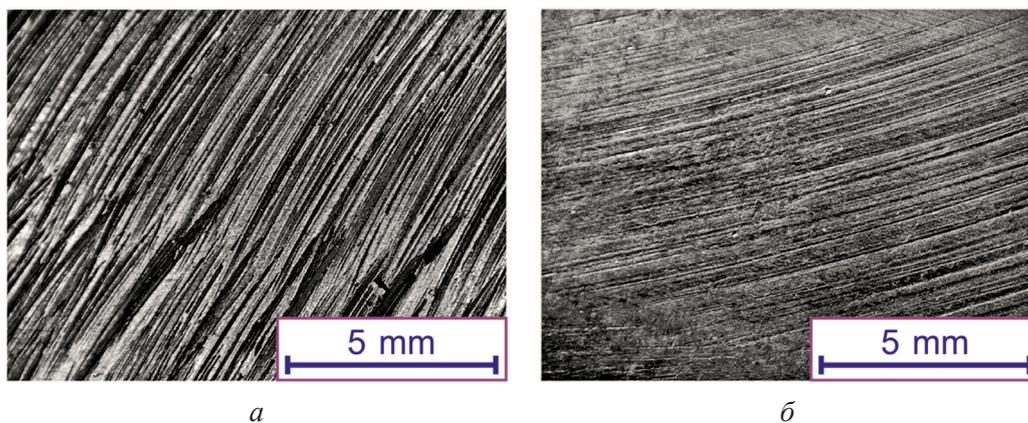


Рис. 4. Вид поверхностей образцов после шлифования:

*a* – при остаточной послесварочной температуре шва 850 °C; *б* – при остаточной послесварочной температуре шва 600 °C

Fig. 4. The surface of the samples after grinding:

*a* – at a residual post-weld temperature of 850 °C; *b* – at a residual post-weld temperature of 600 °C

мальным значением остаточной послесварочной температуры является 600 °С. При шлифовании образцов, имеющих данную остаточную послесварочную температуру, наблюдается повышенное значение твердости и минимальное значение шероховатости. На основании проведенных исследований можно утверждать, что шлифование сварных соединений рельсов в горячем состоянии является перспективным направлением в области совершенствования технологических процессов послесварочной обработки сварных соединений.

### Список литературы

1. Investigation of cause and prevention measures against surface defects on thermit welds / R. Yamamoto, Y. Terashita, M. Tatsumi, H. Itoh, K. Umenai // Quarterly Report of RTRI. – 2016. – Vol. 57, N 2. – P. 112–117.
2. Costea D.M., Gáman M.N., Dumitru G. The weld aluminothermic optimization of rail track by microalloyed // Bulletin of the Transilvania University of Braşov CIBV. – 2014 – Vol. 7 (56), special iss. 1. – P. 285–288.
3. Brânzei M., Coman T. Structure improvement of aluminothermic welding joints by using modifiers // International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering. – 2012 – Vol. 6, N 8. – P. 745–748.
4. Mouallif Z., Radi B., Mouallif I. The thermomechanical modeling of aluminothermic welds affected by different defects // International Journal of Engineering Research and Development. – 2015 – Vol. 11, iss. 10. – P. 44–48.
5. Mohassel A., Kokabi H., Davami P. Mechanical and metallurgical properties of wide-gap aluminothermic rail welds // Iranian Journal of Materials & Engineering. – 2011. – Vol. 8, N 4. – P. 27–33.
6. 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.
7. Влияние нормализации на структуру и механические свойства алюминотермитных сварных соединений рельсов / Л.Б. Тихомирова, А.С. Ильиных, М.С. Галай, Э.С. Сидоров // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2016. – № 1 (70). – С. 60–66. – doi: 10.17212/1994-6309-2016-1-60-66.
8. 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.
9. Влияние виброударной обработки на физико-механические свойства поверхностного слоя сварных соединений рельсов / В.А. Каргин, Л.Б. Тихомирова, А.Д. Абрамов, М.С. Галай // Сварочное производство. – 2013. – № 3. – С. 38–40.
10. Improving service properties of welded joints produced by aluminothermic welding / V.A. Karguin, L.B. Tikhomirova, M.S. Galay, Ye.S. Kuznetsova // Welding International. – 2015. – Vol. 29, iss. 2. – P. 155–157. – doi: 10.1080/09507116.2014.897809.
11. ТУ 0921-127-01124323–2005. Сварка рельсов алюминотермитным методом промежуточного литья. Технические условия. – Введ. 01.04.2005. – М.: ФГУП ВНИИЖТ, 2005. – 27 с.
12. Пасько С.В., Тихомирова Л.Б., Болотова О.В. Алюмотермитная сварка рельсов методом промежуточного литья по технологии фирмы «СНАГА»: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2010. – 99 с. – ISBN 5-93461-418-5.
13. Тушинский Л.И. Теория и технология упрочнения металлических сплавов. – Новосибирск: Наука, 1990. – 306 с.
14. Капуткина Л.М., Берштейн М.Л., Займовский В.А. Термомеханическая обработка стали. – М.: Металлургия, 1983. – 430 с.
15. Зубарев Ю.М. Теория и практика повышения эффективности шлифования материалов: учебное пособие. – М.: Лань, 2010. – 304 с. – ISBN 978-5-8114-0973-0.
16. Шур Е.А. Повреждения рельсов. – М.: Интекст, 2012. – 192 с. – ISBN 978-5-89277-108-5.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



## Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: [http://journals.nstu.ru/obrabotka\\_metallov](http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov)



### Investigation of Welded Rail Joints after Machining at Different Post-Weld Temperature

Andrey Ilinykh<sup>1, a</sup>, Marina Galay<sup>1, b, \*</sup>, Eduard Sidorov<sup>1, c</sup>

<sup>1</sup> Siberian Transport University, 191 Dusi Kovalchuk st., Novosibirsk, 630049, Russian Federation

<sup>a</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-4234-6216>,  [asi@stu.ru](mailto:asi@stu.ru), <sup>b</sup>  <http://orcid.org/0000-0002-7897-1750>,  [galayms@mail.ru](mailto:galayms@mail.ru),

<sup>c</sup>  <http://orcid.org/0000-0001-6237-142X>,  [sesnsk@mail.ru](mailto:sesnsk@mail.ru)

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received: 15 May 2017

Revised: 17 June 2017

Accepted: 25 July 2017

Available online: 15 September 2017

##### Keywords:

Rails

Aluminothermic Welding

Grinding Process

Hardness

Surface Roughness

#### ABSTRACT

Welded rail joints are integral part of continuous welded rail. However, its reliability during the operation is not sufficiently high. The influence of the grinding process of aluminothermite welded rail joints, performed at different values of the residual post-weld temperature of the weld, on the physical and mechanical properties and roughness of the rolling surface is investigated. The process of grinding is carried out at different values of residual post-weld temperature. The interval of post-weld temperatures in the zone of grinding of welded joints was 600...850 °C. It is established that, different temperature regimes, when performing the technological operation of grinding aluminothermite joints, lead to the formation of non-identical mechanical properties of the metal surface of the rail head in the weld zone. Grinding at a residual post-weld temperature of the weld surface of 850 °C or 600 °C allows the highest hardness values of 33 ... 36 HRC to be achieved, while grinding at a residual temperature of 800 °C or 700 °C results in a decrease in the hardness of the weld metal to 25 ... 30 HRC. However, after grinding when the residual post-weld temperature is 800...700 °C hardness of the welded metal decreases from 25 to 30 HRC. Reducing the temperature of the metal surface of the railhead before grinding from 850 °C to 600 °C allows reducing the roughness of the rolling surface from 2.5 microns to 0.7 microns. The received results indicate that the highest values of hardness and surface finish can be reached when temperature of rail welded joint head metal is 600 °C during grinding when carrying out process of welding. It can be claimed that grinding of rails welded joints in a hot state is the perspective direction in the field of improvement of post-weld technological process of welded joints.

**For citation:** Ilinykh A.S., Galay M.S., Sidorov E.S. Investigation of welded rail joints after machining at different post-weld temperature. *Obrabotka metallov (tehnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2017. no. 3 (76), pp. 28–34. doi: 10.17212/1994-6309-2017-3-28-34. (in Russian).

#### References

1. Yamamoto R., Terashita Y., Tatsumi M., Itoh H., Umenai K. Investigation of cause and prevention measures against surface defects on thermit welds. *Quarterly Report of RTRI*, 2016, vol. 57, no. 2, pp. 112–117. doi: 10.2219/rtriqr.57.2\_112.
2. Costea D.M., Găman M.N., Dumitru G. The weld aluminothermic optimization of rail track by microalloyed. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov CIBv*, 2014, vol. 7 (56), special iss. 1, pp. 285–288.
3. Brânzei M, Coman T. Structure improvement of aluminothermic welding joints by using modifiers. *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, 2012, vol. 6, no. 8, pp. 745–748.
4. Mouallif Z., Radi B., Mouallif I. The thermomechanical modeling of aluminothermic welds affected by different defects. *International Journal of Engineering Research and Development*, 2015, vol. 11, iss. 10, pp. 44–48.

##### \* Corresponding author

Galay Marina S., Ph.D. (Engineering)

Siberian Transport University,

191 Dusi Kovalchuk st.,

630049, Novosibirsk, Russian Federation

E-mail: [galayms@mail.ru](mailto:galayms@mail.ru)

5. Mohassel A., Kokabi H., Davami P. Mechanical and metallurgical properties of wide-gap aluminothermic rail welds. *Iranian Journal of Materials & Engineering*, 2011, vol. 8, no. 4, pp. 27–33.
6. Nasonov D.S., Gudkov A.V., Borts A.I., Nikolov A.I. [Ways to improve the quality of aluminothermic welded joints of rails]. *Razvitie zheleznodorozhnogo transporta v usloviyakh reformirovaniya: sbornik statei uchenykh I aspirantov* [The development of railway transport in the conditions of reforming: proceedings of scientists and Ph.D. students “]. Moscow, 2006, pp. 189–194. (In Russian).
7. Ilinykh A.S., Tikhomirova L.B., Galay M.S., Sidorov Je.S. Vliyanie normalizatsii na strukturu i mekhanicheskie svoystva alyuminotermitykh svarnykh soedinenii rel'sov [The effect of normalization on the structure and mechanical properties of rails aluminotermic welded joints]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2016, no. 1 (70), pp. 60–66. doi: 10.17212/1994-6309-2016-1-60-66.
8. Kargin V.A., Tikhomirova L.B., Galay 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.
9. Kargin V.A., Tikhomirova L.B., Abramov A.D., Galay M.S. Vliyanie vibroudarnoi obrabotki na fiziko-mekhanicheskie svoystva poverkhnostnogo sloya svarnykh soedinenii rel'sov [Influence of shock-vibrating machining on physical-mechanical properties of the surface layer of metal welds]. *Svarochnoe proizvodstvo = Welding International*, 2013, no. 3. pp. 38–40. (In Russian).
10. Kargin V.A., Tikhomirova L.B., Galay M.S., Kuznetsova Ye.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.
11. TU 0921-127-01124323–2005. *Svarka rel'sov alyuminotermitym 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.
12. Pas'ko S.V., Tikhomirova L.B., Bolotova O.V. *Alyumotermitynaya 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.
13. Tushinskii L.I. *Teoriya i tekhnologiya uprochneniya metallicheskih splavov* [Theory and technology of hardening metal alloys]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990. 306 p.
14. Kaputkina L.M., Bershtein M.L., Zaimovskii V.A. *Termomekhanicheskaya obrabotka stali* [Thermomechanical treatment of steel]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1983. 480 p.
15. Zubarev Yu.M. *Teoriya i praktika povysheniya effektivnosti shlifovaniya materialov* [Theory and practice of improving the efficiency of grinding materials]. Moscow, Lan' Publ., 2010. 304 p. ISBN 978-5-8114-0973-0.
16. Shur E.A. *Povrezhdeniya rel'sov* [Damages of rails]. Moscow, Intekst Publ., 2012. 192 p. ISBN 978-5-89277-108-5.

### Conflicts of Interest

The author declare no conflict of interest.

© 2017 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).