

## Повышение стойкости крановых рельсов при использовании плазменной дискретной поверхностной обработки

Докт. техн. наук, проф. С. С. Самогутин<sup>1)</sup>, инж. В. А. Гагарин<sup>1)</sup>, канд. техн. наук, доц. В. А. Мазур<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Приазовский государственный технический университет (г. Мариуполь, Украина)

© Белорусский национальный технический университет, 2017  
Belarusian National Technical University, 2017

**Реферат.** В ходе эксплуатации кранов происходит интенсивное изнашивание крановых колес и рельсов. Поэтому повышение работоспособности этих деталей актуально. Перспективным направлением является поверхностная обработка высококонцентрированными потоками энергии: лазерным лучом, плазменной струей. Предлагается применять градиентную поверхностную плазменную обработку с целью повышения работоспособности крановых рельсов. Для проведения исследований на крановые рельсы наносили упрочненные зоны при разных режимах обработки. Микротвердость измеряли как на поверхности, так и по глубине на специально изготовленных шлифах. Приведены результаты исследования влияния плазменного поверхностного упрочнения на износостойкость крановых рельсов. Изменение параметров плазменной обработки (ток, скорость перемещения плазмотрона, расход плазмообразующего газа аргона) позволяет получать требуемые твердость и структуру стали, а выбор оптимального расположения упрочненных зон дает возможность существенно повысить износо- и трещиностойкость. Плазменная закалка способствует получению структуры высокодисперсного мартенсита преимущественно пластинчатой морфологии и более высокой твердости по сравнению с закалкой токами высокой частоты или наплавкой. Испытаниями на износостойкость углеродистых сталей установлено, что плазменная поверхностная обработка в 2–3 раза снижает интенсивность абразивного изнашивания по сравнению с исходным состоянием. Достаточно резкая граница между упрочненными и неупрочненными участками благоприятно влияет на работоспособность деталей в условиях действия динамических нагрузок, способствуя торможению трещин при переходе из твердого в мягкий металл. Для углеродистых и низколегированных рельсовых сталей плазменное упрочнение по достигаемым свойствам может эффективно заменить закалку токами высокой частоты или наплавку. Установлен диапазон режимов плазменной обработки, который позволяет получить поверхностный слой с определенным комплексом эксплуатационных свойств.

**Ключевые слова:** кран, рельс, плазменная струя, структура, упрочненный слой, твердость

**Для цитирования:** Самогутин, С. С. Повышение стойкости крановых рельсов при использовании плазменной дискретной поверхностной обработки / С. С. Самогутин, В. А. Гагарин, В. А. Мазур // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 1. С. 68–72. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-68-72

## Improvement of Crane Rail Hardness while Using Plasma Discrete Surface Treatment

S. S. Samotugin<sup>1)</sup>, V. A. Naharin<sup>1)</sup>, V. A. Mazur<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Pryazovskyi State Technical University (Mariupol, Ukraine)

**Abstract.** Crane wheels and rails are subjected to intensive wear in the process of operation. For this reason improvement of operating capability for these components is considered as a problem of great importance. A promising direction in this regard is surface treatment by highly concentrated energy flows such as laser beams or plasma jets. The paper proposes to use gradient plasma surface treatment with the purpose to improve operating capability of crane rails. While carrying out investigations hardened zones have been deposited on crane rails under different treatment modes. Microhardness has been measured both on the surface and in depth while using custom-made microsections. The paper presents results of the investigations for

### Адрес для переписки

Гагарин Владимир Александрович  
Приазовский государственный технический университет  
ул. Университетская, 7,  
87500, г. Мариуполь, Донецкая обл., Украина  
Тел.: +380 985 54-82-13  
Gagarin\_v\_a@ukr.net

### Address for correspondence

Naharin Vladimir A.  
Pryazovskyi State Technical University  
7 Universitetskaya str.,  
87500, Mariupol, Donetsk Province, Ukraine  
Tel.: +380 985 54-82-13  
Gagarin\_v\_a@ukr.net

plasma surface hardening influence on wear resistance of crane rails. Change of plasma surface treatment parameters (current, plasma torch movement speed, argon gas flow rate) allows to obtain the required steel hardness and structure and selection of optimal location for the hardened zones makes it possible significantly to improve wear- and crack resistance. Plasma surface hardening contributes to obtain a fine-grained martensite structure mainly with lamellar morphology and higher hardness rate in comparison with induction hardening or overlaying. Wear tests of carbon steels have revealed that plasma surface treatment reduces abrasive wear rate by 2–3 times in comparison with the initial state. Rather sharp boundary between hardened and non-hardened portions has a positive effect on the performance of parts under dynamic loads, contributing to crack stopping during the transition from solid to soft metal. According to the obtained properties plasma surface hardening can efficiently substitute induction hardening or overlaying for carbon and low alloy rail steels. The mode range for plasma surface treatment that allows to obtain a surface layer with specific complex of operational properties has been determined in the paper.

**Keyword:** crane, rails, plasma jet, structure, hardened layer, hardness

**For citation:** Samotugin S. S., Naharin V. A., Mazur V. A. (2017) Improvement of Crane Rail Hardness while Using Plasma Discrete Surface Treatment. *Science and Technology*, 16 (1), 68–72. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-1-68-72 (in Russian)

## Введение

Одно из наиболее перспективных направлений развития современного производства – нанесение упрочняющих покрытий с использованием интенсивных технологий обработки материалов высококонцентрированными источниками нагрева (ВКИН) – лазерным и электронным лучами, плазменной струей. Высокая плотность мощности и возможность регулирования продолжительности воздействия при использовании данных источников нагрева позволяют получить свойства материала, недоступные для известных способов. К перспективным областям применения поверхностного упрочнения ВКИН относится повышение работоспособности контактных поверхностей пары «рельс – колесо» [1, 2]. Из методов поверхностной обработки ВКИН плазменная модификация является наиболее экономичной, доступной и производительной [3].

Крановые колеса – одни из основных и наиболее нагруженных элементов ходовой части крана, непосредственно взаимодействующих с путем. Колесная пара совершает сложные пространственные перемещения, а колесо проскальзывает по рельсу, и возникают значительные поперечные силы между гребнем колеса и рабочей гранью наружного рельса. Это приводит к повышенному боковому износу рельсов и гребней колес, нарушению геометрии, соответственно к сокращению сроков службы и увеличению расходов на их эксплуатацию.

В основе сопротивления стале-трибологическому нагружению в условиях сухого трения с проскальзыванием лежит прочность поверхностного слоя металла. Определяющим фактором при этом является локальная характеристика прочности – твердость стали. Одно из важных эксплуатационных свойств – соот-

ношение твердости колесной и рельсовой сталей.

Основная проблема при эксплуатации упрочненных покрытий – их разрушение и отслоение (отколы). Как правило, износостойкие покрытия из-за высокой хрупкости не используют ресурс работы полностью. Как отмечено в [4], повышение адгезионной прочности покрытий не обеспечивает решение данной проблемы, так как в сочетании с высокой твердостью и хрупкостью это приводит к дополнительному охрупчиванию и разрушению основного металла задолго до исчерпания его ресурса. В результате возникает острая необходимость формирования нового научного направления в трибологическом ведении, связанного с управлением поведением материалов за счет создания структурно неоднородных (регулярных) покрытий методами термического упрочнения, наплавки, напыления, осаждения [5].

Применительно к развитию методов поверхностного термического упрочнения наиболее перспективным направлением получения покрытий с макрогетерогенной регулярной структурой является нанесение упрочняющих покрытий градиентного строения с чередующимися по определенной закономерности твердыми и пластичными участками. Заменив сплошной слой покрытия на прерывистый с мозаично-дискретной структурой, можно преодолеть хрупкость – основной недостаток сверхтвердых поверхностных структур. Благодаря дискретности структуры ограничиваются рост напряжений и процесс трещинообразования, что многократно повышает прочность и долговечность покрытий, полностью исключая их когезионное растрескивание и адгезионное отслоение. Такой подход позволяет обеспечить необходимые физико-механические свойства рабочего слоя, реализовать нужные условия

трения, а также минимизировать износ упрочненных изделий [6]. С учетом специфики работы контактной поверхности «рельс – колесо» нанесение упрочняющих покрытий градиентного строения можно считать наиболее оптимальным.

Изучение характера разрушения разрывных армированных (дискретноупрочненных) образцов [7] показало, что чередование упрочненных и необработанных участков – это барьер на пути развивающейся трещины. На диаграммах нагружения появляется характерный участок перехода от хрупкого разрушения к пластичному с торможением движения трещины, а в изломе возникают характерные элементы типа «губ среза». Эффект торможения трещины при переходе из упрочненной зоны в исходный металл установлен и при динамическом разрушении широкого круга сталей и сплавов после плазменного поверхностного упрочнения [3, 8].

### Методы исследований

Для определения глубины и твердости закаленного слоя провели плазменное упрочнение головки рельса. Технические требования ограничивают твердость рельса для предупреждения хрупкого разрушения при эксплуатации, поэтому целью исследования являлось получение рекомендуемой твердости (48–54 HRC) [2] при максимальной ширине и глубине упрочненной зоны.

В изучаемых образцах плазменную поверхность закалку производили по ширине головки рельса. Закаленная зона располагалась в центре пробы. Для изучения строения и определения глубины закаленного слоя в поперечном сечении изготавливали микрошлифы. На образцах измеряли микротвердость по глубине закаленного слоя. Также определяли микроструктуру основного металла образцов.

В образце № 1 закаленный слой шириной 29,2 мм выполняли за три прохода, он имел глубину 1,76–1,88 мм. Обработку плазмой в образце № 2 осуществляли за два прохода с расстоянием 1,0 мм между ними. Ширина закаленной зоны 13,0 мм, глубина 0,9 мм. На образце № 3 закалку выполняли за несколько проходов. Закаленный участок имел ширину 22,0 мм, полученную за два прохода, глубину – 2,0–2,3 мм. В местах перекрытия проходов выявлена зона термического влияния.

При измерении микротвердости по толщине закаленного слоя установлено, что в образцах № 1, 2 твердость закаленной зоны составляла 610–800 HV (55–60 HRC). В образце № 3 получены неоднородные значения микротвердости. На поверхности образца в местах наложения упрочненных зон твердость металла была 226–240 HV (22–24 HRC), в зоне термического влияния – 285–320 HV (30–35 HRC), в упрочненной зоне – 502–587 HV (48–52 HRC).

Дискретное строение рабочей поверхности детали при упрочнении может быть получено с нанесением твердых и мягких участков в виде параллельных полос (рис. 1а), перекрестной насечки (рис. 1б), когда локальные мягкие участки имеют ограниченную конфигурацию квадрата (при перпендикулярном перекрестном движении плазматрона) или ромба (при не перпендикулярном перекрестном движении). Возможно получение дискретного строения упрочненного слоя с нанесением упрочненных зон в виде круга (рис. 1в), эллипса, треугольника и т. п. В этом случае между поверхностью детали и плазматроном располагается защитный экран из тугоплавкого материала с отверстиями заданной формы.

При упрочнении железнодорожных рельсов и колес может быть реализован способ упрочнения только скруглений – самых нагруженных участков (рис. 2).

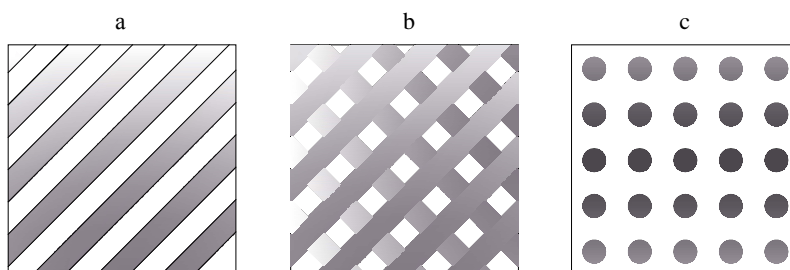


Рис. 1. Дискретное строение рабочей поверхности детали с нанесением упрочненных зон в виде: а – параллельных полос; б – перекрестной насечки; с – круга; темные и светлые участки – соответственно твердые и мягкие участки

Fig. 1. Discrete structure of working area for piece with deposition of hardened zones in the form of: a – parallel strips; b – cross cut; c – circle; dark and highlight sections – correspondingly hard and soft sections

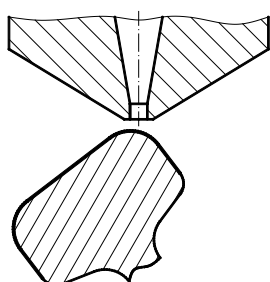


Рис. 2. Пример реализации плазменной градиентной модификации скругления головки рельса

Fig. 2. Example of rail head rounding while realizing plasma gradient modification

Для получения мартенсита в сплавах железа с углеродом в температурном интервале минимальной устойчивости аустенита скорость охлаждения должна превышать критическую, которая для большинства сталей находится в интервале 50–200 °C/с. Основной отличительной особенностью плазменной поверхностной закалки является достижение очень высоких значений скорости нагрева и охлаждения – до 10<sup>6</sup> °C/с [3]. Многократное увеличение скорости охлаждения не приводит к образованию новых фаз и структур; при плазменной закалке в стали имеются те же фазы и структуры, что и при обычной закалке: мартенсит, остаточный аустенит, карбиды. Однако существенно изменяются их параметры: увеличиваются степень дисперсности, плотность дислокаций, степень тетрагональности мартенсита. Это обуславливает получение более высокой степени упрочнения (большей твердости), чем при объемной закалке.

В результате единичного воздействия (прохода) плазменной струи на поверхности стали образуется упрочненная зона (так называемая зона плазменного воздействия – ЗПВ), которая состоит из закаленной и переходной зон. ЗПВ имеет форму сегмента окружности, что вызвано нормальным (гауссовским) распределением

мощности плазменной струи по площади пятна нагрева. Размеры ЗПВ и ее составляющих и характер изменения твердости в ЗПВ зависят, кроме режима обработки, от состава стали и исходного состояния [4]. При обработке без оплавления поверхности глубина ЗПВ составляет 2,5–3,5 мм, ширина – в пределах 10–15 мм.

Между ЗПВ и исходным металлом имеется достаточно резкая граница (рис. 3), что благоприятно влияет на работоспособность упрочненных деталей в условиях действия динамических нагрузок, способствуя торможению трещин при переходе из твердого в мягкий металл [3].

Исследования микроструктуры рельсовой стали в исходном состоянии (поставки) после объемной закалки в печи и плазменной закалки показали (рис. 4), что в исходном состоянии сталь М76 имеет структуру пластинчатого перлита (рис. 4а), а после объемной закалки при стандартных температурах приобретает достаточно высокую твердость и структуру крупноигольчатого мартенсита (рис. 4б). Плазменная закалка приводит к получению структуры высокодисперсного мартенсита преимущественно пластинчатой морфологии (рис. 4с) и более высокой твердости по сравнению с объемной закалкой (табл. 1) [3–10].

Испытаниями на износостойкость углеродистых сталей установлено [3, 9], что плазменная поверхностная модификация способствует снижению интенсивности абразивного изнашивания по сравнению с исходным состоянием в 2–3 раза, а по сравнению с объемной закалкой – на 20–30 %. При этом сохраняется достаточно высокая стойкость к зарождению и развитию трещин при действии динамических нагрузок. Лабораторные испытания были подтверждены в условиях производства при эксплуатации упрочненных по предложенной технологии рельсов.

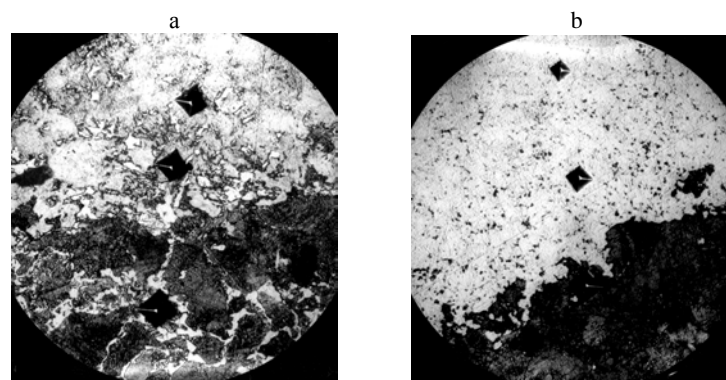


Рис. 3. Микроструктура переходной зоны при плазменной модификации сталей (×400): а – 50XH; б – М76

Fig. 3. Microstructure of transition zone under plasma modification of steel (×400): а – 50XH; б – М76

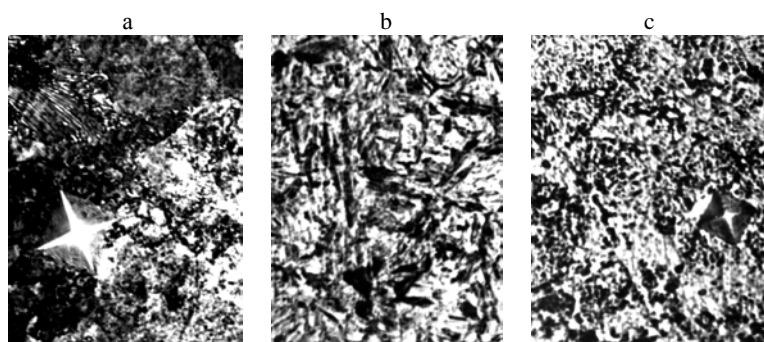


Рис. 4. Микроструктура рельсовой стали М76 (×1000):

- а – в исходном состоянии;
- б – после объемной закалки;
- с – после плазменной закалки

Fig. 4. Microstructure of rail steel M76 (×1000): a – initial state; b – after volumetric quenching; c – after plasma quenching

### ВЫВОДЫ

1. Эффективным методом повышения несущей способности контактных поверхностей рельсов в условиях ударно-абразивного воздействия является плазменная поверхностная модификация с нанесением упрочненного слоя градиентного (дискретного) строения с чередующимися по определенной зависимости твердыми и мягкими участками.

2. Обработка углеродистых сталей высококонцентрированной плазменной струей обеспечивает получение упрочненного слоя с высокодисперсной мартенситной структурой. Твердость упрочненного слоя больше в 2–3 раза по сравнению с исходным состоянием и на 20–30 % – по сравнению с объемной закалкой.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Петров, С. В. «Скорая помощь» для железных дорог / С. В. Петров // Мир техники и технологий. 2005. № 2. С. 40–42.
2. Упрочнение боковых граней головок железнодорожных рельсов электронно-лучевой обработкой в воздушной среде / В. А. Батаев [и др.] // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 12. С. 14–18.
3. Самотугин, С. С. Плазменное упрочнение инструментальных материалов / С. С. Самотугин, Л. К. Лещинский. Донецк: Новый мир, 2002. 383 с.
4. Ляшенко, Б. А. Упрочнение поверхностей металлов покрытиями дискретной структуры с повышенной адгезионной и когезионной стойкостью / Б. А. Ляшенко, Ю. А. Кузема, М. С. Дигам. Киев: Препринт ИПП АН УССР, 1984. 57 с.
5. Технологические основы нанесения упрочняющих покрытий дискретного строения на изделия из чугуна / С. С. Самотугин [и др.] // Научные проблемы современной металлургии: сб. науч. тр. Мариуполь: ПГТУ, 2007. С. 162–172.
6. Ляшенко, Б. А. Упрочняющие покрытия дискретной структуры / Б. А. Ляшенко, А. Я. Мовшович, А. И. Долматов // Технологические системы. 2001. № 4. С. 17–25.
7. Подгайский, М. С. Термическое армирование проката / М. С. Подгайский // Металловедение и термическая обработка металлов. 1992. № 10. С. 20–23.
8. Сафонов, Е. Н. Закалка поверхностного слоя деталей машин плазменной дугой прямого действия / Е. Н. Сафонов, И. С. Дружинин, Н. В. Орлова // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 9. С. 23–29.
9. Ананьев, А. М. Исследование износостойкости материалов крановых рельсов и колес / А. М. Ананьев, В. А. Коротков // Вестник машиностроения. 2011. № 8. С. 35–37.
10. Особенности структуры поверхностных слоев металла бандажей железнодорожных колес после плазменной

обработки / Л. И. Маркашова [и др.] // Автоматическая сварка. 2005. № 1. С. 22–25.

Поступила 03.03.2016

Подписана в печать 05.09.2016

Опубликована онлайн 30.01.2017

### REFERENCES

1. Petrov S. V. (2005) “Emergency Response” for Railways. *Mir Tekhniki i Tekhnologii* [World of Technique and Technology], (2), 40–42 (in Russian).
2. Bataev V. A., Bataev A. A., Golkovskii M. G., Ostromenskii P. I., Korotaev B. V. (2002) Lateral Edge Strengthening of Rail Heads by Electron-Beam Machining in Air. *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals], (12), 14–18 (in Russian).
3. Samotugin S. S., Leshchynski L. K. (2002) *Plasma Hardening of Tool Materials*. Donetsk, Novy Mir Publ. 383 (in Russian).
4. Lyashenko B. A., Kuzema Yu. A., Digam M. S. (1984) *Hardening of Metal Surfaces by Coatings Having Discrete Structure with High Adhesive and Cohesive Resistance*. Kiev, Preprint of Institute for Problems of Strength – Academy of Sciences of the Ukrainian Soviet Socialist Republic. 57 (in Russian).
5. Samotugin S. S., Lyashenko B. A., Samotugina Iu. S., Haharin V. A. (2007) Technological Fundamentals for Deposition of Hardening Coatings Having Discrete Structure on Cast Iron Products. *Nauchnye Problemy Sovremennoi Metallurgii: Sb. Nauch. Tr.* [Scientific Problems of Modern Metallurgy. Collection of Scientific Papers]. Mariupol, Pryazovskiy State Technical University, 162–172 (in Russian).
6. Lyashenko B. A., Movshovich A. Ya., Dolmatov A. I. (2001) Hardening Coatings Having Discrete Structure. *Tekhnologicheskiye Sistemy* [Technological Systems], (4), 17–25 (in Russian).
7. Podgaisky M. S. (1992) Thermal Reinforcement of Rolled Products. *Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov* [Metal Science and Heat Treatment of Metals], (10), 20–23 (in Russian).
8. Safonov E. N., Druzhinin I. S., Orlova N. V. (2010) Hardening of Surface Layer in Machine Parts by Plasma Arc of Direct Action. *Uprochnyayushchie Tekhnologii i Pokrytiya* [Hardening Technologies and Coatings], (9), 23–29 (in Russian).
9. Ananiev A. M., Korotkov V. A. (2011) Investigations on Material Durability of Crane Rails and Wheels. *Vestnik Mashinostroyeniya* [Mechanical Engineering Bulletin], (8), 35–37 (in Russian).
10. Markashova L. I., Grigorenko G. M., Valevich M. L., Petrov S. V. (2005) Specific Features of Metal Surface Layer Structure in Tread Bands of Railway Wheels after Plasma Treatment. *Avtomaticheskaya Svarka* [Automatic Welding], (1), 22–25 (in Russian).

Received: 03.03.2016

Accepted: 05.09.2016

Published online: 30.01.2017