

УДК 621.78

DOI:10.30987/2223-4608-2020-5-42-48

**С.А. Королев** к.т.н., **А.В. Богданов**, к.т.н., **С.А. Шмелев**, аспирант  
(ФГАОУ ВО «МГТУ имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»,  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1),

**В.П. Бирюков**, к.т.н.  
(ФГБУН «ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН», 101990, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4)  
E-mail: mtbmstu@mail.ru

## **Получение композитных структур при упрочнении колесной стали линейным профилем излучения иттербиевого волоконного лазера**

*Представлены теоретические и экспериментальные исследования процесса лазерной термообработки колесной стали с использованием иттербиевого волоконного лазера. Режимы термообработки получены на основе предварительно проведенного математического моделирования процессов распространения тепла методом конечных элементов.*

**Ключевые слова:** волоконный лазер; лазерное упрочнение; износостойкость; линейный профиль излучения; термическая обработка; композитная структура; математическое моделирование; метод конечных элементов; тепловые процессы.

**S.A. Korolyov**, Can. Sc. Tech., **A.V. Bogdanov**, Can. Sc. Tech., **S.A. Shmelyov**, Post graduate student  
(FGAOU HE "Bauman MSTU (National Research University)",  
Building1, 5, 2-d Baumanskaya Str., Moscow, 105005)

**V.P. Biryukov**, Can. Sc. Tech.  
(FGBUN "Blagonravov IMASH of RAS", 4, Maly Kharitonievsky Lane, Moscow, 101990)

## **Composite structure manufacturing at wheel steel strengthening with linear radiation profile of ytterbium fiber laser**

*There are presented theoretical and experimental investigations of wheel steel laser thermal treatment with the use of ytterbium fiber laser. Thermal treatment modes are obtained on the basis of the mathematical modeling preliminarily carried out of the heat propagation processes by a finite element method.*

**Keywords:** fiber laser; laser strengthening; wear-resistance; linear radiation profile; thermal treatment; composite structure; mathematical modeling; finite element method; thermal processes.

### **Введение**

Проблема бокового износа колес и рельсов является одной из первостепенных и самых значимых для железнодорожной отрасли. Более 30 лет данная проблема активно решается и не решена до сих пор [1]. Внедрение новых, казавшихся перспективными, технических решений, таких как смазка, замена подшипников качения на подшипники скольжения в буксовых узлах, уменьшение ширины железнодорожной колеи и других оказалось

малоэффективным.

Стоит отметить, что износ и дефекты контактно-усталостного происхождения являются поверхностными дефектами. Однако между данными видами дефектов существует антагонистическая взаимосвязь [2]. При добавлении смазки в зону контакта колеса и рельса износ сильно замедляется, однако, контактно-усталостные дефекты возникают только при условии присутствия смазки. Оба вида дефектов связаны между собой изменением коэффициента трения, с увеличением которого

возрастает коэффициент тяги, что приводит к увеличению износа в рассматриваемой паре трения.

Для дополнительного увеличения коэффициента тяги в зону контакта колеса и рельса подается песок, а для уменьшения износа одновременно с песком подается смазка. Стоит отметить, что песок, являясь абразивным материалом, существенно ускоряет износ колес и рельсов. Вследствие контактного взаимодействия колес и рельсов песок размалывается и превращается в адсорбционно-активную среду, интенсивно поглощающую смазку и, как следствие, эффективность смазки резко снижается [3].

Боковой износ приводит и продолжает приводить к колоссальным потерям в железнодорожной сфере, а материальные потери от износа гребней в разы выше, по сравнению с износом поверхностей катания по причине необходимости большего съема металла при обточке.

### Используемое оборудование

Эксперименты по лазерной термообработке образцов из колесной стали выполнялись на экспериментальной технологической установке на базе непрерывного иттербиевого волоконного лазера со средней выходной мощностью 10 кВт и диаметром жилы волокна 200 мкм, оптического линейного формирователя, позволяющего получать в фокальной плоскости стабильный линейный профиль излучения 11×1 мм [4]. Оптическая головка позиционировалась с помощью роботизированного манипулятора KUKA KR-60 HA. Образцы фиксировались на монтажном столе. Лазерный генератор и внешняя оптика охлаждались при помощи чиллера типа вода-воздух марки IPG LC-170.

### Расчетная оценка температурных полей в зоне лазерной закалки

Разработка технологии лазерного упрочнения, соответствующей требованиям [5], представляет задачу, включающую в себя множество факторов и большой объем экспериментальных исследований. Для оптимизации проведения экспериментов процесса термоупрочнения колесной стали была выполнена расчетная оценка температурных полей в изделии, возникающих в зонах лазерного воздействия.

Такая расчетная оценка выполнялась посредством математического моделирования

процессов распространения тепла в объемном теле методом конечных элементов. Так, рассматривался источник нагрева с уникальной геометрической конфигурацией (прямоугольной формы), моделирование выполнялось в программном комплексе ANSYS, который при соответствующей подготовке исходных данных и граничных условий позволяет решать подобные задачи универсального характера [6].

Математическое моделирование проводилось применительно к телу размерами 100×100×30 мм. Такие размеры, как будет показано далее, позволили получить температурные поля аналогичные тем, которые возникают при воздействии исследуемого источника нагрева на реальный объект последующего внедрения технологии. Размеры источника нагрева в плоскости составляли 19,0×0,7 мм. Направление движения источника нагрева совпадало с размером 0,7 мм.

На первом этапе строилась геометрическая модель тела и проводилось разбиение тела на элементы конечного размера. Для экономии вычислительных ресурсов задача решалась в симметричной постановке, т.е. для тела размерами 100×50×30 мм. Источник нагрева перемещался вдоль стороны с размером 100 мм.

Разбиение на элементы конечного размера приведено на рис. 1.

Область геометрической модели в зоне действия источника нагрева, в которой предполагались большие градиенты температуры, разбивалась на элементы размером 0,7 (вдоль оси  $X$  – направление движения источника) × 0,5 (вдоль оси  $Y$  – направление перпендикулярное движению источника) × 0,2 (вдоль оси  $Z$  – по глубине) мм. Размер элементов вдоль оси  $X$  равный 0,7 мм был выбран исходя из геометрии источника нагрева. Таким образом, на каждом шаге решения источник перемещался вдоль оси  $X$  на величину равную 0,7 мм. Области, удаленные от источника нагрева с предполагаемо малыми градиентами температур, разделялись на элементы большего размера – примерно 10×5×5 мм, соответственно. Такой подход значительно экономит время расчета без заметного снижения точности решения.

В процессе исследования были выбраны два режима нагрева. Мощность источника нагрева для обоих режимов составляла 8,6 кВт. Скорости перемещения источника нагрева составляли 20 мм/с для первого режима и 30 мм/с – для второго режима, соответственно. Степень черноты тела, соответствующая

данному материалу и волне лазерного излучения, задавалась равной 0,5. Теплофизические свойства материала соответствовали свойствам колесной стали марки 2 ГОСТ 10791-2011.

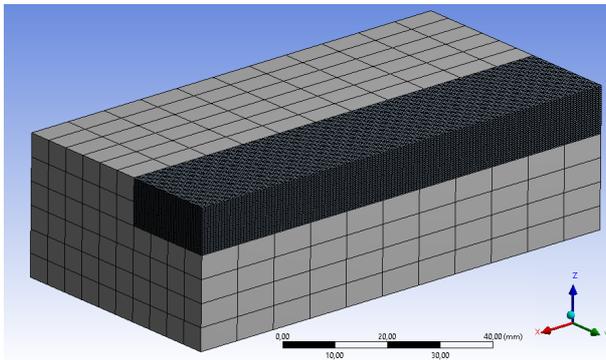


Рис. 1. Разбиение тела на конечные элементы

Температурные поля для первого и второго режимов приведены на рис. 2 и рис. 3, соответственно, где *l* – области, нагретые до температур выше температуры  $A_{c3}$ , равной 769 °С. Таким образом, эти зоны соответствуют областям, в которых при нагреве происходит полное или частичное структурное превращение.

Для уточнения размеров указанных зон были определены максимальные температуры нагрева (рис. 4, б) в точках на разном расстоянии от оси источника нагрева (с шагом 2,0 мм) и на разной глубине (с шагом 0,2 мм).

Установлено, что для скорости перемещения источника нагрева равной 20 мм/с, глубина слоя, нагреваемого до температур выше  $A_{c3}$ , составляет 1,6 мм на всем протяжении от оси до 8,0 мм. Для скорости перемещения источника нагрева равной 30 мм/с глубина такого слоя меньше и составляет 1,4 мм на всем протяжении от оси также до 8,0 мм.

Температура на поверхности тела для двух режимов нагрева не превышает температуры плавления, что удовлетворяет поставленным условиям. Для режима со скоростью 20 мм/с она составляет 1420 °С, а для режима со скоростью 30 мм/с она значительно меньше и равна примерно 1060 °С. Минимальные температуры в моделируемом теле не превышают начальной температуры равной 22 °С. Отсутствие перегрева, который мог бы наблюдаться из-за малых размеров моделируемого образца, по сравнению с реальным объектом, подтверждает правильность выбора его геометрических размеров.

На рис. 5 и 6 представлены расчетные скорости охлаждения для указанных технологических режимов.

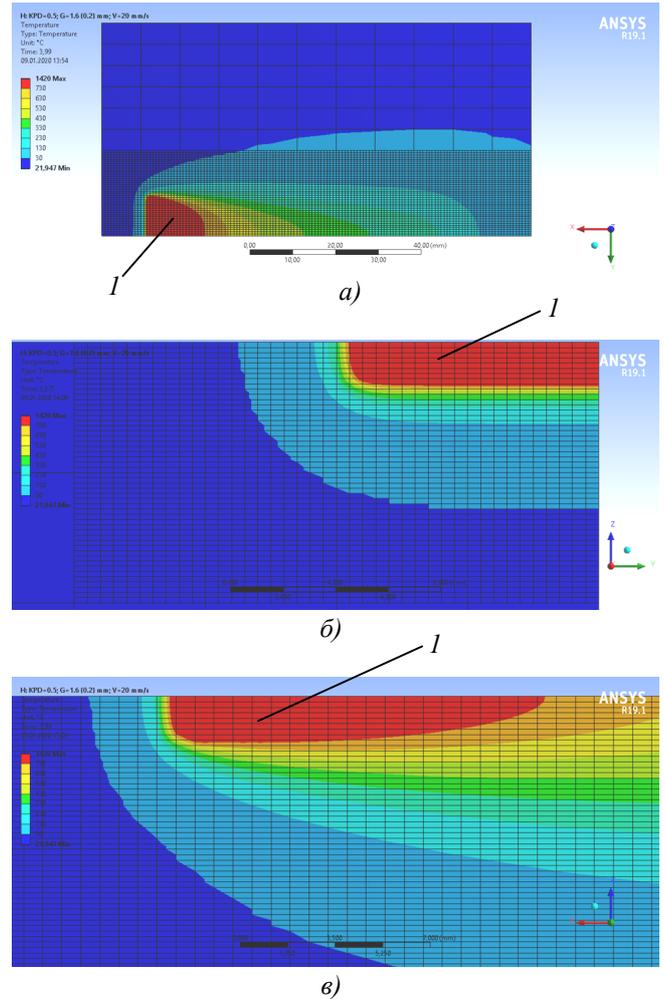


Рис. 2. Температурное поле, соответствующее режиму нагрева (мощность 8,6 кВт; скорость перемещения источника нагрева 20 мм/с):

*a* – в плоскости *XY* (вид сверху); *б* – в плоскости *YZ* (поперечное сечение); *в* – в плоскости *XZ* (продольное сечение)

Отмечено, что для двух режимов указанные скорости охлаждения на оси источника меньше, чем на его периферии. Также установлено, что скорости охлаждения на поверхности выше, чем в глубине металла.

Скорости охлаждения для режима со скоростью перемещения источника 20 мм/с в зоне, нагреваемой выше  $A_{c3}$ , лежат в интервале от 250 до 758 °С/с. Величина интервала составляет 508 °С. Скорость охлаждения равная 250 °С/с соответствует точке, лежащей на глубине 1,6 мм на оси источника нагрева. Скорость охлаждения равная 758 °С/с соответствует точке, лежащей на поверхности на расстоянии 8,0 мм от оси источника нагрева.

Скорости охлаждения для режима со скоростью перемещения источника 30 мм/с в зоне, нагреваемой выше  $A_{c3}$ , лежат в интервале от 426 до 1331 °С/с. Величина интервала

составляет 905 °С. Скорость охлаждения равная 426 °С/с соответствует точке, лежащей на глубине 1,4 мм на оси источника нагрева. Скорость охлаждения равная 1331 °С/с соответствует точке, лежащей на поверхности на расстоянии 8,0 мм от оси источника нагрева.

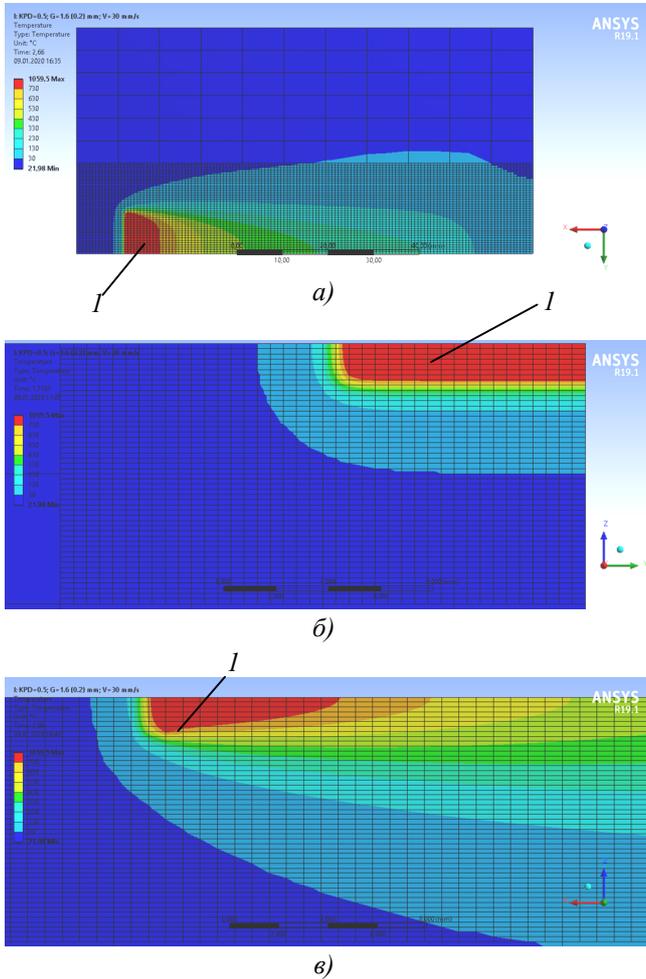


Рис. 3. Температурное поле, соответствующее режиму нагрева (мощность 8,6 кВт; скорость перемещения источника нагрева 30 мм/с):

- а – в плоскости XY (вид сверху);
- б – в плоскости YZ (поперечное сечение);
- в – в плоскости XZ (продольное сечение)

Таким образом, скорости охлаждения при обработке материала со скоростью 30 мм/с значительно выше, чем на со скоростью 20 мм/с. Интервал изменения скоростей охлаждения для режима со скоростью 30 мм/с шире, чем на режиме со скоростью 20 мм/с.

В соответствии с термокинетической диаграммой превращения аустенита для колесной стали известно что он превращается в мартенсит при больших скоростях охлаждения 800...200 °С. Таким образом, полученные в

результате моделирования скорости охлаждения для обоих режимов обработки и для всех точек, нагреваемых свыше Ас3, превышают критические скорости и должны приводить к образованию мелкодисперсных закалочных структур мартенситного типа.

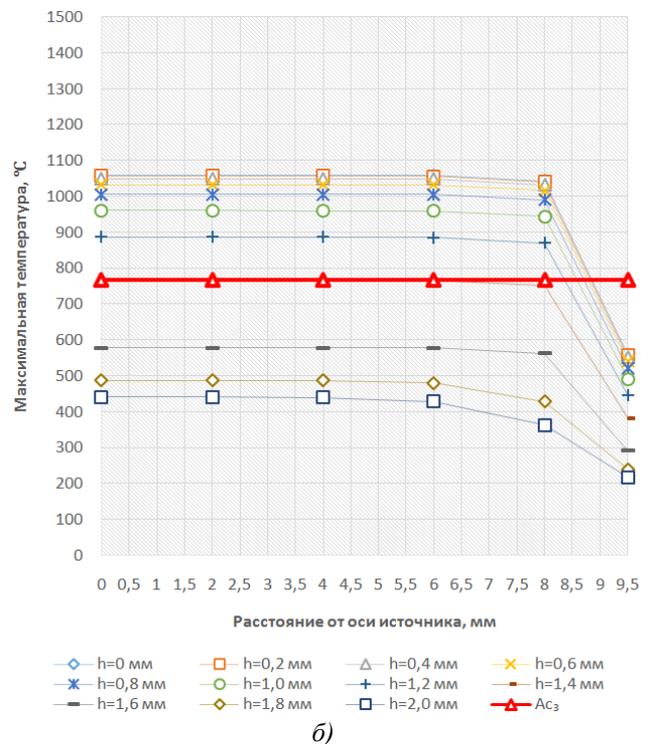
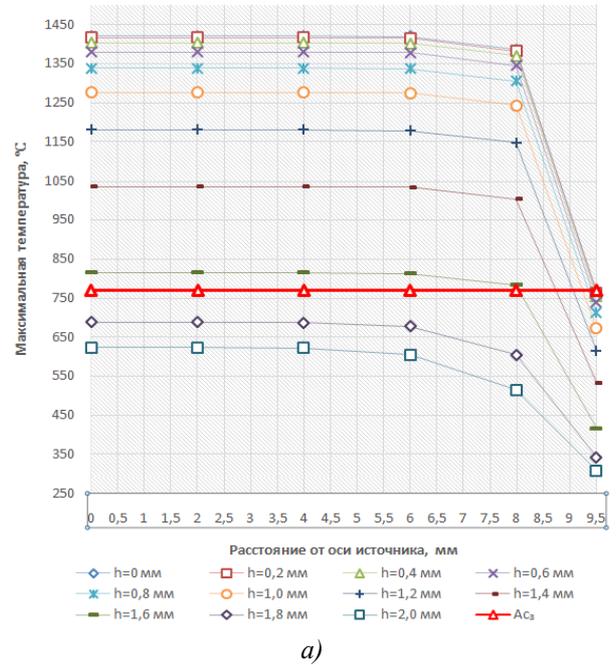


Рис. 5. Максимальная температура в зоне лазерного воздействия для различной глубины в зависимости от расстояния от оси источника нагрева при скорости обработки до 20 мм/с (а) и 30 мм/с (б)

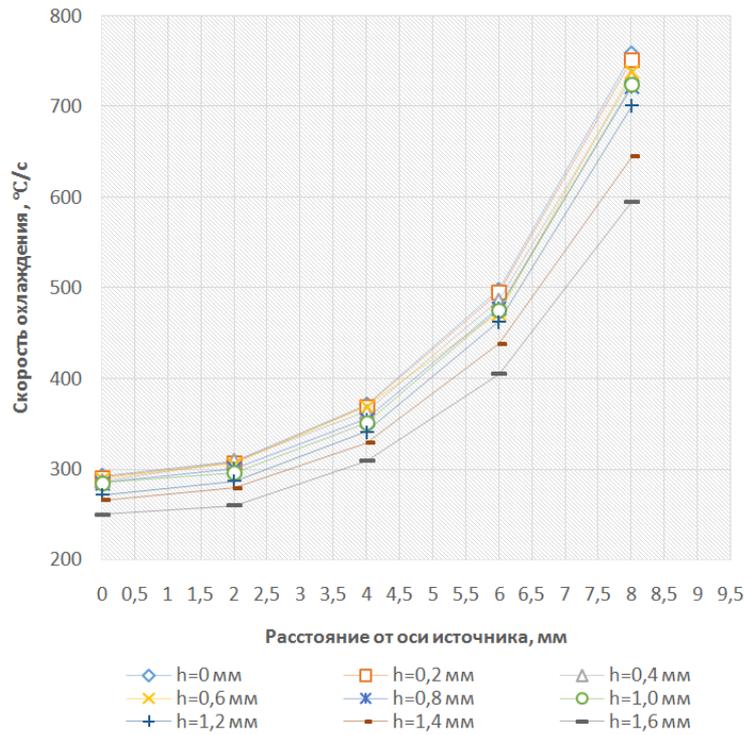


Рис. 5. Скорость охлаждения в зоне лазерного воздействия для различной глубины в зависимости от расстояния от оси источника нагрева при скорости обработки 20 мм/с

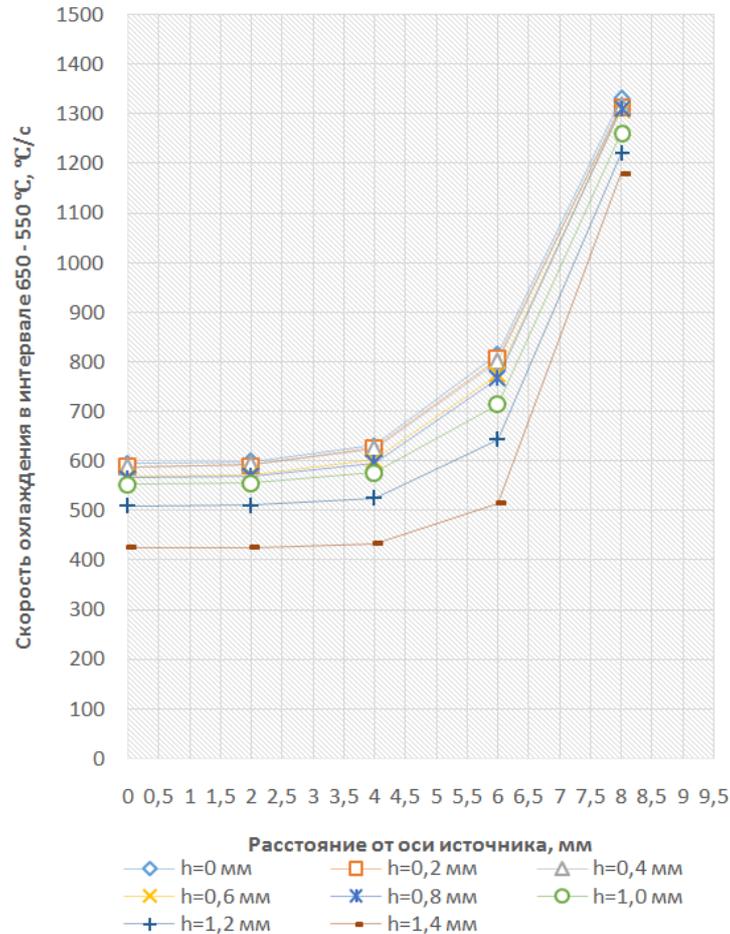


Рис. 6. Скорость охлаждения в зоне лазерного воздействия для различной глубины в зависимости от расстояния от оси источника нагрева при скорости обработки 30 мм/с

### Методика проведения экспериментальных исследований

Лазерное упрочнение образцов колесной стали выполняли на фрагментах колеса толщиной 30 мм, на мощности лазерного излучения 8600 Вт, скорости перемещения луча 20 и 30 мм/с. Металлографические исследования

проводили с использованием микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке 0,98 Н; цифрового микроскопа АМ413МL; металлографического микроскопа «Альтами МЕТ 1С».

На рис. 7 представлены микрошлифы зон упрочнения колесной стали, полученные при режимах А ( $P = 8,6$  кВт;  $v = 20$  мм/с), Б ( $P = 8,6$  кВт,  $v = 30$  мм/с).

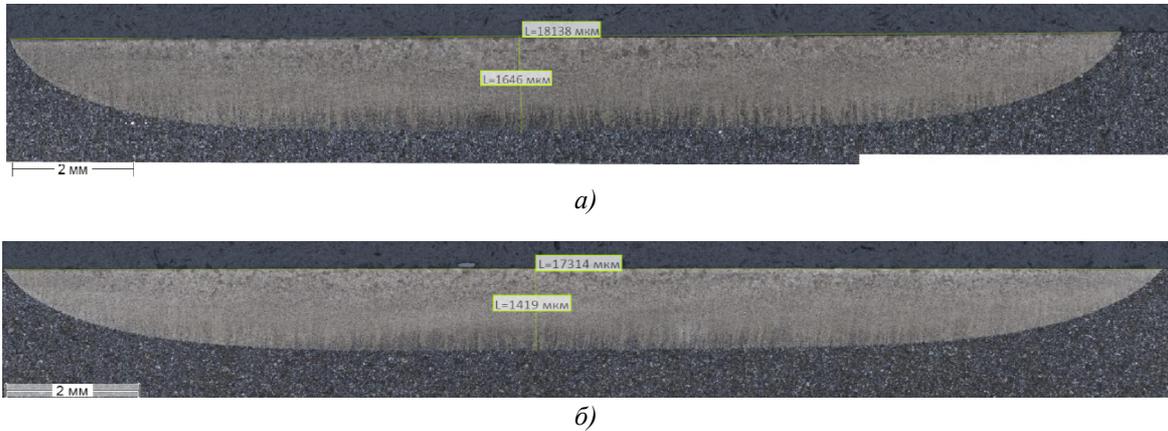


Рис. 7. Фотографии микрошлифов различных технологических режимов: а – А; б – Б

На рис. 8 представлены графические зависимости поверхностной микротвердости от глубины упрочненного слоя для технологических режимов А и Б.

Как видно из рис. 8, глубина упрочненного слоя без оплавления поверхности составила от 1,42 до 1,65 мм при поверхностной микротвердости от 780 до 860 НV.

На рис. 9 представлены зависимости изменения микротвердости по 20-ти точкам с шагом 50 мкм в горизонтали на глубине от 0,5 до 1,5 мм.

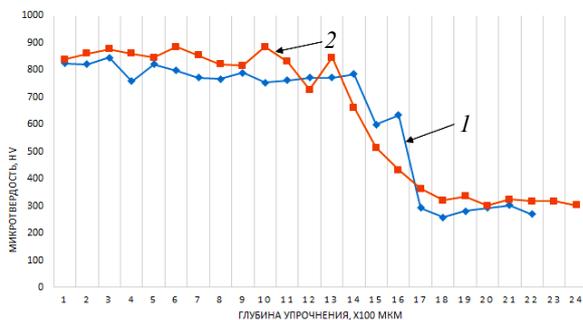


Рис. 8. Зависимость микротвердости от глубины упрочненного слоя для технологических режимов А (1) и Б (2)

Показано, что процесс термообработки с применением иттербиевого волоконного лазера и оптического линейного формирователя на

режимах А и Б характеризуется наличием comb-эффекта (от англ. comb – гребень) – композитной структуры с твердыми и пластичными слоями толщиной от 30 до 50 мкм в зоне неполной закалки. Данный эффект приводит к увеличению сцепления упрочненного слоя и основного металла, уменьшает вероятность отслоения закаленного слоя, ведет к снижению и устранению холодных трещин, придает закаленному слою дополнительную вязкость при обеспечении необходимой твердости, компенсируя деформации и не приводя к хрупкому разрушению структуры.

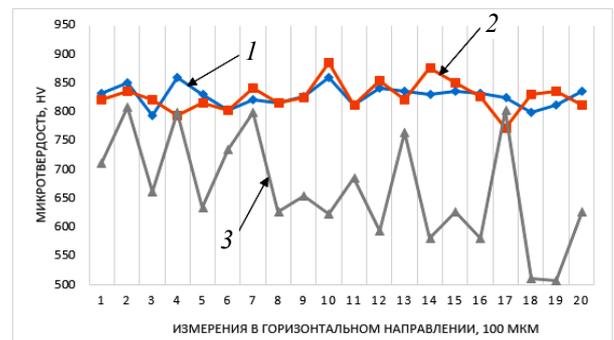


Рис. 9. Изменение микротвердости по 20 точкам с шагом 50 мкм в горизонтали на глубине от 0,5 до 1,5 мм для режима А: 1 – на расстоянии 0,5 мм от поверхности; 2 – на расстоянии 1,0 мм от поверхности; 3 – на расстоянии 1,5 мм от поверхности обрабатываемого изделия

## Выводы

1. Расчетным путем установлено, что требуемые [5] показатели качества процесса термообработки колесной стали могут быть достигнуты при использовании волоконного лазера со средней выходной мощностью от 8,0 кВт, при скорости обработки близкой к 20 мм/с и необходимом размере профиля излучения равном 15...20 мм.

2. Построены поверхности, показывающие закономерность изменения параметров закаленных зон от режимов обработки.

3. Отмечено, что процесс термообработки с применением иттербиевого волоконного лазера и оптического линейного формирователя на режимах А, Б и В (в тексте нет описания режима В) характеризуется наличием комб-эффекта – композитной структуры с твердыми и пластичными слоями толщиной от 30 до 50 мкм в зоне неполной закалки.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Балановский, А.Е., Глазков, В.С. Мороз, Б.А.** Плазменное упрочнение гребней колесных пар подвижного состава / Сб. тр. СГУПС «Новые технологии на ВСЖД». – Новосибирск: СГУПС. 1999. – С. 57-65.
2. **Балановский, А.Е.** Особенности структурообразования в среднеуглеродистых сталях при плазменном поверхностном упрочнении и их влияние на сопротивляемость контактно-усталостным нагрузкам // Дисс. докт. техн. наук. – Иркутск, 2012. – 227 с.
3. **Балановский, А.Е., Хаяси, С.М.** Проблема износа пары трения колесо-рельс (краткий анализ и предложения). – Иркутск: Плазмопротек, 1997. – 56 с.
4. **Богданов, А.В., Соколов, В.И., Шмелев, С.А.** Выбор оптимальных конфигураций оптических схем для задачи лазерной термообработки стальных изделий // Научно-

технические технологии в машиностроении. – 2017. № 10(76). – С.32-37.

5. **ТУ РЖД 0943-218-01124323-2006** «Бандажные колеса с термическим упрочнением гребня».

6. **Engineering Simulation & 3D Design Software | ANSYS:** [сайт]. – URL: <http://www.ansys.com> (дата обращения: 31.01.2020).

7. **Евдокимов, Ю.А., Колесников, В.И., Тетерин, А.И.** Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа. – М: Наука. 1980. – 226 с.

## REFERENCES

1. Balanovsky A.E., Glazkov V.S., Moroz B.A. Plasma strengthening of wheel pair flanges for rolling-stock / *Proceedings of SGUPS "New Technologies on ESR"*. Novosibirsk: SGUPS, 1999, pp. 57-65.

2. Balanovsky A.E. *Structure Formation Peculiarities in Medium Carbon Steels at Plasma Surface Strengthening and Their Impact upon Resistance to Contact-Fatigue Loadings* // Thesis for Dr. Sc. Tech. Degree. Irkutsk, 2012. pp. 227.

3. Balanovsky A.E., Hayasy S.M. *Problem of Wheel-Rail Friction Pair of Wear (short analysis and offers)*. Irkutsk: Plasmoprotek, 1997, pp. 56.

4. Bogdanov A.V., Sokolov V.I., Shmelyov S.A. Choice of optic circuit optimum structures for problem in laser thermal treatment of steel products // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2017. No.10(76). pp. 32-37.

5. TR RR 0943-218-01124323-2006 *"Band Wheels with Flange Thermo-strengthened"*.

6. **Engineering Simulation & 3D Design Software | ANSYS:** [site]. - URL: <http://www.ansys.com> (address data: 31.01.2020).

7. Yevdokimov Yu.A., Kolesnikov V.I., Teterin A.I. *Planning and Analysis of Experiments During Solution of Friction and Wear Problems*. – М.: Science. 1980. – pp. 226.

Рецензент д.т.н. В.В. Васильцов

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7  
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала (4832) 51-51-38, 8-903-592-87-39. E-mail: [naukatm@yandex.ru](mailto:naukatm@yandex.ru)

Вёрстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов.

Сдано в набор 18.05.2020. Выход в свет 30.05.2020.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,58.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
"Брянский государственный технический университет"

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

12+