

Опробованный способ лазерной сварки с подачей присадочной проволоки по слою флюса может использоваться как альтернатива гибридной лазерно-дуговой сварке в защитном газе и лазерной сварке с подачей присадочной проволоки в среде защитных газов для устранения занижения сварного шва.

Применение флюса вместо защитного газа устраняет чрезмерное разбрызгивание и рассеивания лазерного излучения при сварке, а твердость металла шва, получаемая при сварке по слою флюса, указывает на более благоприятные структуры, чем при сварке в защитном газе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Сварка. Резка. Контроль:** справочник. В 2-х томах / Под общ. ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышова. – М.: Машиностроение, 2004. Т.1 / Н.П. Алешин, Г.Г. Чернышов, Э.А. Гладков и др. – 624 с.
2. **Григорьянц, А.Г., Шиганов, И.Н., Мисюров, А.И.** Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.
3. **LIA Handbook of Laser Materials Processing / J.F. Ready (et al.).** – Orlando: Laser Institute of America, 2001. – 704 p.
4. **Григорьянц, А.Г., Шиганов, И.Н., Чирков, А.М.** Гибридные технологии лазерной сварки: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 52 с.
5. **Пат. РФ № 2010139611/02,** 23.09.2010. Туричин Г.А., Цибульский И.А. Способ лазерно-дуговой сварки плавящимся электродом алюминия и алюминиевых сплавов // Патент России № 2440221. 2012. Бюл. №2.
6. **Patent US № 09/738363.** 14.02.2001. I. Haschke. Process and device for joining of workpiece parts by means of

an energy beam, in particular by means of a laser beam. // United States patent № 6595962. 2001.

7. **Щеглов, П.Ю., Успенский, С.А., Петровский, В.Н. и др.** Исследование паро-плазменного факела при сварке мощным волоконным лазером // Сборник научных трудов конференции "Научная сессия МИФИ-2011". 2011. Т.2, с. 90.

REFERENCES

1. *Welding. Cutting. Control: Reference Book.* In 2 Volumes / under the general editorship of N.P. Aleshin, G.G. Chernyshov. – M.: Mechanical Engineering, 2004. Vol. 1/ N.P. Alyoshin, G.G. Chernyshov, E. A. Gladkov et al. – pp. 624.
2. Grigoryants, A.G., Shiganov, I.N., Misyurov, A.I. *Technological Processes of Laser Treatment: manual for colleges / under the editorship of A.G. Grigoryants.* – M.: Publishing House of Bauman STU, 2006. – pp. 664.
3. *LIA Handbook of Laser Materials Processing / J.F. Ready (et al.).* – Orlando: Laser Institute of America, 2001. – 704 p.
4. Grigoryants, A.G., Shiganov, I.N., Chirkov, A.M. *Hybrid Technologies of Laser Bonding: manual.* – M.: Publishing House of Bauman STU, 2004. – pp. 52.
5. Pat. RF No. 2010139611/02, 23.09.2010. Turichin G.A., Tsybul'skiy I.A. Method of laser bonding with melting electrode of aluminum and aluminum alloys // *Russia Patent No. 2440221.* 2012. Bull. No.2.
6. Patent US № 09/738363. 14.02.2001. I. Haschke. Process and device for joining of work-piece parts by means of an energy beam, in particular by means of a laser beam. // United States patent № 6595962. 2001.
7. Shcheglov, P.Yu., Uspenskiy, S.A., Petrovskiy, V.N. et al. Plasma torch investigation at bonding with power fiber laser // *Proceedings of the Conf. "Scientific Session of MEPI-2011"*. 2011. Vol. 2, pp. 90.

Рецензент д.ф.-м.н. Н.Н. Евтихийев

УДК 621.78

DOI: 10.12737/article_59d496ecea5154.22425645

А.В. Богданов, к.т.н.
(МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1),
В.И. Соколов, к.ф.-м.н.,
С.А. Шмелев, начальник сектора
(ООО НТО «ИРЭ-Полюс», Московская обл., г. Фрязино),
E-mail: mtbmstu@mail.ru

Выбор оптимальных конфигураций оптических схем для задачи лазерной термообработки стальных изделий

В рамках статьи выполнен сравнительный анализ различных конфигураций оптических схем, которые совместно с волоконными лазерами могут использоваться для задачи лазерной термообработки габаритных тел вращения.

Ключевые слова: волоконный лазер; упрочнение; оптическая схема; износостойкость; контактно-усталостная прочность.

A.V. Bogdanov, Can. Eng.,
(Bauman STU, Building 1, 5, Baumanskaya Str., Moscow)
V.I. Sokolov, Can. Ph-Math.,
S.A. Shmelyov, Sector Head
(PC STC "IRE-Pole", Fryazino, Moscow reg.)

Optimum pattern choice of optical circuits for problems of steel products laser thermal processing by example of railway wheels

Within the limits of the paper a comparative analysis of optical circuit different patterns which can be used jointly with fiber lasers for the problem of laser thermal treatment of dimension solids of rotation.

Keywords: fiber laser; hardening; optical circuit; wear-resistance; contact-fatigue strength.

Проблема бокового износа колес и рельсов является одной из первостепенных и самых значимых для железнодорожной отрасли [1]. Более 20 лет данная проблема активно решается и не решена до сих пор [2]. Множество факторов в той или иной степени влияют на боковой износ железнодорожных колес. Называется до 50 различных причин, суммарно приведших к повышению бокового износа гребней железнодорожных колес [3]. Особую остроту данная проблема приобрела во второй половине XX в. в период уменьшения ширины колеи, замены подшипников качения на подшипники скольжения в буксовых узлах, применения гребнесмазывания, повышения нагрузки на ось, увеличения объемов перевозок и т.д. [4–7].

В последние 10 лет на рынке появились мощные волоконные лазеры мульткиловаттного диапазона, которые произвели настоящую революцию в области обработки материалов. Уже сегодня многие промышленные лидеры производственного сектора сделали выбор в пользу волоконных лазеров [7, 13].

Лазерная поверхностная обработка имеет следующие преимущества по сравнению с традиционными способами упрочнения материалов: низкий уровень напряжений и деформаций, вносимых в изделие, высокая скорость обработки, возможность обработки на большую глубину, низкие затраты на обслуживание оборудования, возможность локальной обработки поверхности, возможность осуществлять термообработку без нанесения поглощающих покрытий, компактные размеры лазерного оборудования, отсутствие необходимости в применении газовых смесей, передача излучения по транспортному волокну без юстировки.

В большинстве технологических задач лазерный генератор не является конечным инст-

рументом. Лазерные технологические головки предназначены для преобразования расходящегося пучка лазера в коллимированный и последующей фокусировки в пятно с необходимой плотностью мощности и геометрией. Также оптические головки ведущих мировых производителей лазерного оборудования (IPG, Precitec, ScanSonic, Kugler) обеспечивают функции адаптивности процесса, имеют обратную связь, камеры видеонаблюдения для отслеживания стыка, датчики контроля температуры корпуса и оптических элементов головки и давления технологических газов, системы сканирования заготовки [8]. Основой любой технологической головки является оптическая схема. Рассмотрим более подробно некоторые оптические схемы, предназначенные для технологической задачи лазерного термоупрочнения.

Примером классической оптической схемы, применяемой в лазерной термообработке, может служить 2-х линзовый коллиматор и фокусирующая линза (рис. 1).



Рис. 1. Моделирование оптической схемы с 2-х линзовым коллиматором

Преимущества данной системы заключаются в простоте и надежности оптической схемы, а также низкой стоимости оптических элементов. Суммарный коэффициент отражения при использовании данной оптической схемы ниже более сложных схем, поскольку

меньше количество поверхностей, пропускающих лазерное излучение.

В случае использования 2-х линзового коллиматора плотность мощности на одной линзе коллиматора существенно ниже, чем при использовании 3-х линзовой системы. Это положительно влияет на периодичность замены оптических элементов. В качестве недостатков указанной оптической системы можно отметить необходимость проведения термообработки с перекрытием пятен, образование зон отпуска из-за сниженной плотности мощности на краях пятна и работа с расфокусиро-

ванным лазерным пятном для увеличения производительности, что влечет за собой повышение мощности лазера.

Для задачи лазерной термообработки возможно применение микролинзовых растров, состоящих из цилиндрических линз. Возможно ортогональное расположение на противоположных плоскостях заготовки. Сформированные микрооптические элементы в сочетании с собирающей плоско-выпуклой линзой могут быть использованы в целях гомогенизации лазерного излучения [9] (Рис. 2).

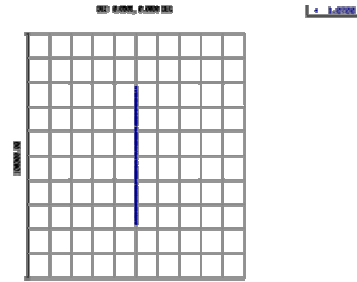
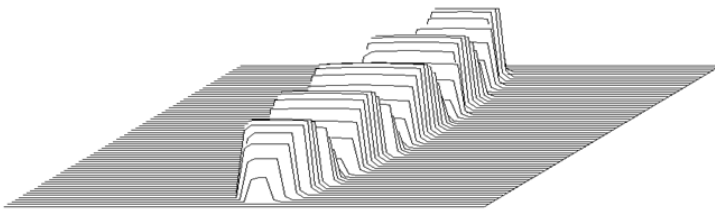


Рис. 2. Моделирование оптической схемы на базе раstra цилиндрической линзы и пятно, получаемое в фокальной плоскости

К недостаткам данной оптической системы стоит отнести высокую стоимость изготовления классическими методами. В настоящее время растры цилиндрических линз можно изготовить способом лазерной абляции с использованием CO₂ лазера. Данный способ является производительным и приводит к удешевлению конечного изделия. Однако основные технологические параметры оптических элементов, такие как стрелки прогиба и радиусы микролинз, имеют размеры от 1 до 10 мкм. При длине волны CO₂ лазера 10,6 мкм точное изготовление данных изделий затруднено, что приводит к неточностям геометрии,

влекущим за собой дифракционное рассеивание и перегрев стенок корпуса оптической головки.

Растр цилиндрических линз можно изготовить классическими методами и с высокой точностью на базе медных зеркал с отражающим золотым покрытием. Главным недостатком такой системы является высокая стоимость и трудоемкость производства.

Получение стабильного линейного профиля возможно при использовании формирователя на базе классической оптической схемы для гауссовых пучков: цилиндрическая линза и ортогонально расположенная ей призма Френеля [10, 11] (Рис. 3).

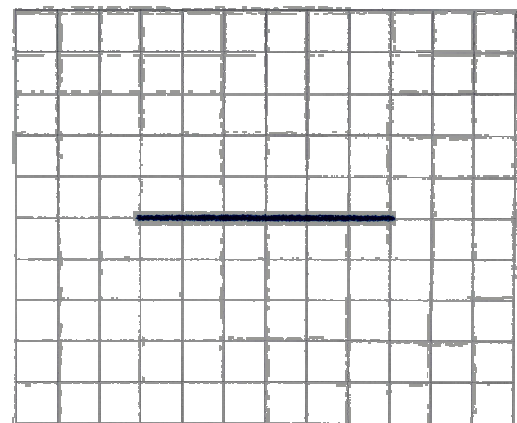
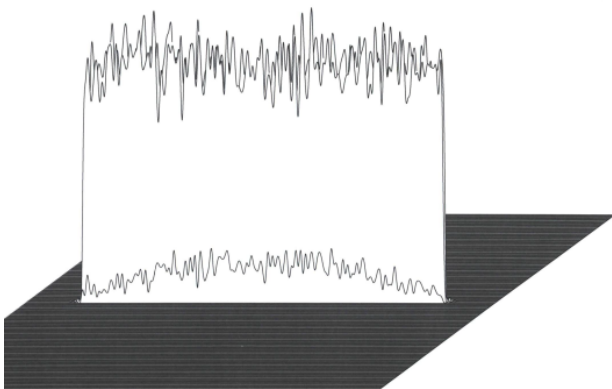
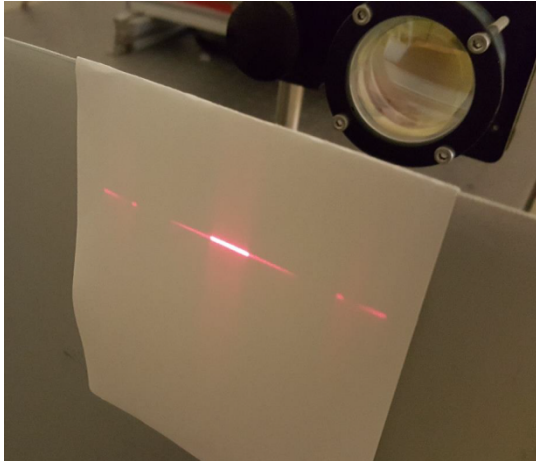


Рис. 3. Моделирование оптической схемы на базе цилиндрической линзы и ортогонально расположенной ей призмы Френеля и пятно, получаемое в фокальной плоскости

В результате тестирования данной схемы в ООО НТО «ИРЭ-Полус» получен стабильный линейный профиль излучения пилотного лазера на выходе формирователя. Размер плоской вершины профиля составляет 11 мм. Паразитные блики (рис. 4) возникают вследствие использования пилотного излучения с длиной волны 658 нм с оптическими элементами,



просветленными под рабочую длину волны волоконного лазера, составляющую 1070 нм. Увеличенный до 55 мм профиль излучения формирователя удалось получить, используя стандартный картридж коллиматора IPGP D50 F120, производимого ООО НТО «ИРЭ-Полус». Расстояние от картриджа до увеличенного профиля составляет 700 мм.

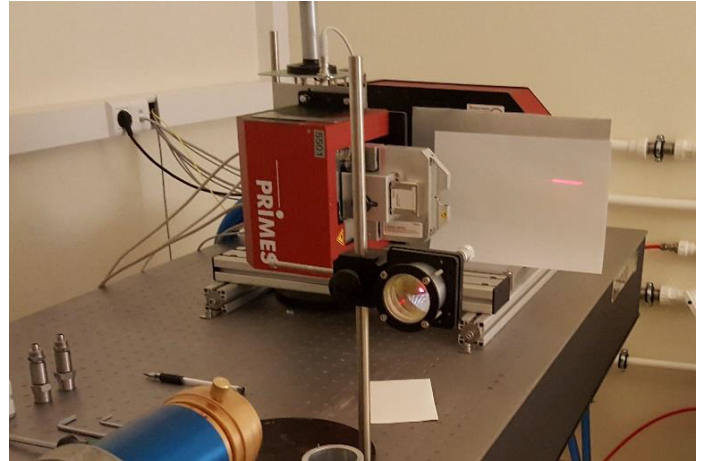


Рис. 4. Результаты тестирования формирователя на базе цилиндрической линзы и ортогонально расположенной ей призмы Френеля

При проведении измерений в ООО НТО «ИРЭ-Полус» параметров излучения непосредственно после линейного формирователя использовался волоконный лазер ЛС-5 с диаметром жилы волокна 200 мкм и ВРР = 8 мм·град. Результаты измерений показывают равномерность профиля вдоль длинной стороны (неравномерность плоской части профиля менее $\pm 5\%$). Радиус поперечного сечения профиля вдоль оси X равен 174 мкм. Расчетный радиус, равный коэффициенту увеличения (отношение фокусов цилиндрической линзы формирователя и коллиматора – 200/120), умноженному на радиус волокна равен 167 мкм.

Параметры линейного профиля соответствуют расчетным, что свидетельствует о возможности хорошей аппроксимации коллимированного излучения волоконного лазера гауссовским пучком. В результате измерения крутизны боковых фронтов линейного профиля излучения непосредственно после линейного формирователя обнаружен пик излучения на краю профиля, возникающий вследствие дифракции излучения на ребре призмы Френеля.

Величина выброса составляет около 15 %. Боковой фронт от 10 до 100 % уровня плоской части профиля не более 250 мкм вследствие специфической формы и размеров пучка на его входе. Максимальная мощность лазера,

направленная на линейный формирователь, составляла 2500 Вт. Более высокую мощность нельзя было использовать из-за невозможности поглотить всю мощность прибора Primes PM48 без его деградации. При данной мощности излучения температура, зафиксированная тепловизором на призме Френеля, не превышала 29 °С, что вполне соответствует рабочим режимам (рис. 5).

Для оценок возможностей использования линейных профилей излучения волоконных лазеров в технологических целях на рис. 6 представлена зависимость пиковых плотностей мощности от размеров сформированного профиля при различных диаметрах жилы волокна лазера при мощности излучения 5000 Вт. Пиковые интенсивности излучения описанных выше линейных профилей, при использовании волоконного лазера 5 кВт, находятся в диапазоне $2 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^6$ Вт/см², что позволяет успешно использовать данную оптическую схему в термообработке.

По мнению авторов благодаря получению стабильного линейного профиля, возможности использования проходной оптики и пропорциональному увеличению размеров пятна, а также низкой стоимости изготовления формирователя данная оптическая схема является одним из оптимальных решений для задачи лазерной термообработки.

Для поверхностной термообработки также возможно использование сканирующей оптической головки IPG 2D High Power Scanner или аналога. Данная оптическая головка рас-

считана на работу с волоконными лазерами, имеющими выходную мощность до 12 кВт (рис. 7).

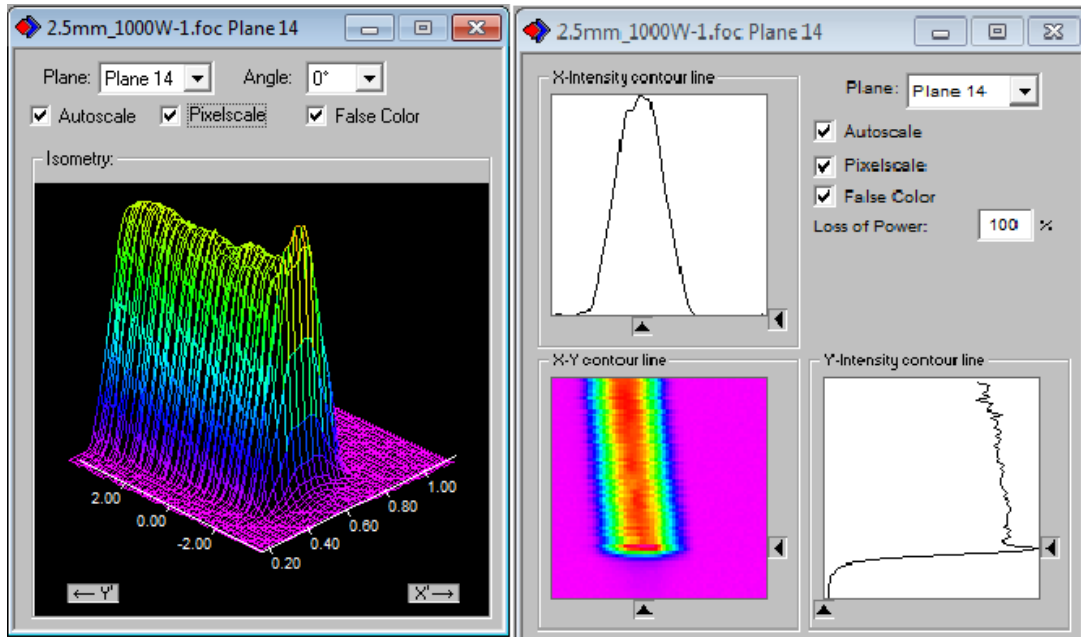


Рис. 5. Измерение параметров излучения после линейного формователя с помощью прибора Primes PM48

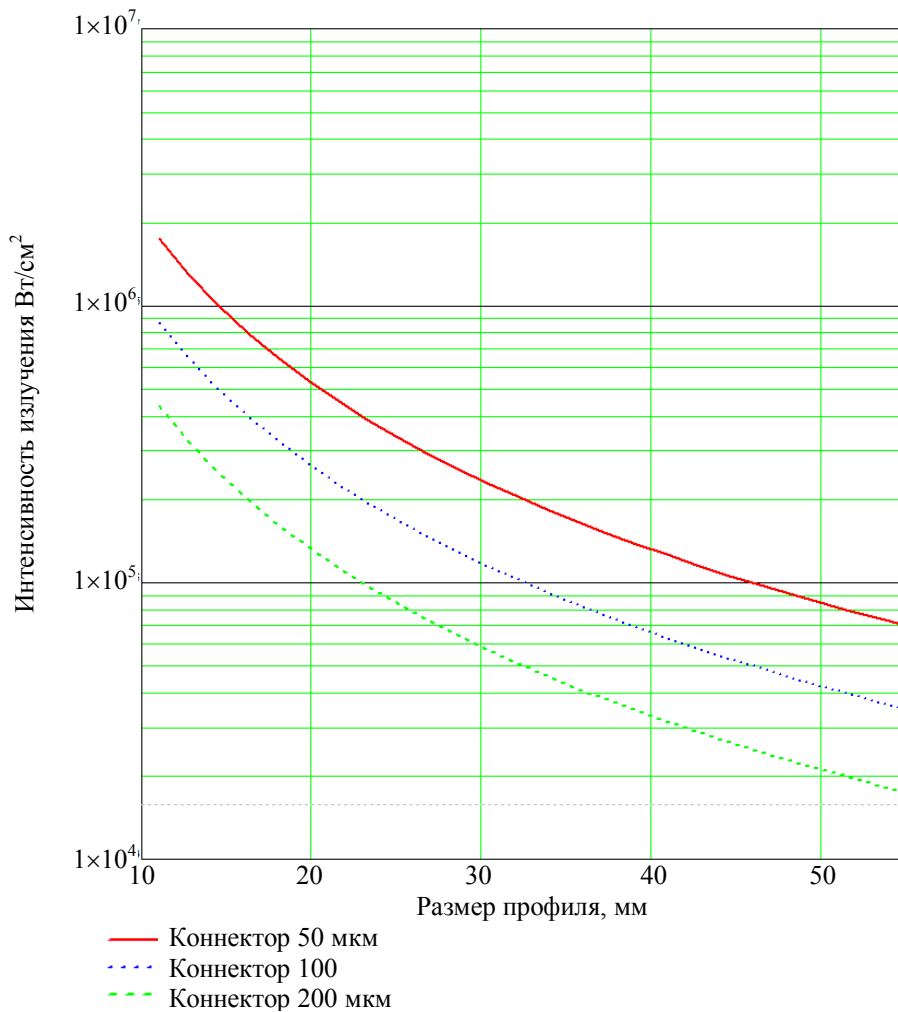


Рис. 6. Зависимость интенсивности излучения от размеров профиля при различных диаметрах жилы волокна лазера



Рис. 7. Сканирующая оптическая головка IPG 2D High Power Scanner

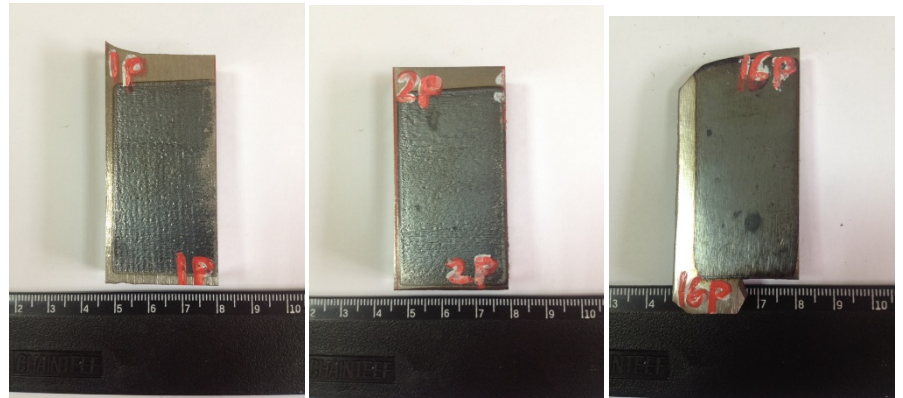


Рис. 8. Внешний вид дорожек после упрочнения волоконным лазером с использованием оптической головки 2D High Power Scanner IPG. Материал – колесная сталь 2

Преимущества данной оптической системы в быстрой корректировке параметров, важных для технологического процесса термообработки. Максимальная частота сканирования IPG 2D High Power Scanner составляет 300 Гц, ширина дорожки сканирования может составлять до 200 мм за один проход при размере рабочего поля системы 200×200 мм.

Скорости термообработки различных материалов могут варьироваться в широких диапазонах и составлять в среднем 30...70 мм/с. Глубина упрочненного слоя при использовании IPG 2D High Power Scanner может составлять более 1 мм без оплавления поверхности. На рис. 8 представлены образцы колесной стали марки 2, упрочненной с использованием волоконного лазера ЛС-6 и сканирующей оптической головки IPG 2D High Power Scanner. Поверхностная микротвердость лежит в диапазоне от 750 до 850 НВ, что выше твердости основного металла в 2,9–3,3 раза. Глубина упрочненного слоя на оптимальном режиме без оплавления поверхности составила от 0,9 до 1,2 мм.

Заключение

Проведен сравнительный анализ различных оптических схем, которые, в сочетании с волоконными лазерами IPG, могут использоваться для поверхностной термообработки металлических изделий. Отмечено, что классическая оптическая схема в виде 2-х линзового коллиматора и фокусирующей линзы, дающей в фокальной плоскости круглое пятно, а также применение микролинзовых растров имеет ряд недостатков, препятствующих широкому распространению данных схем для решения задач, связанных с поверхностной термообработкой в промышленности.

Однако при использовании сканирующей оптической головки IPG 2D High Power Scanner или формирователя на базе цилиндрической линзы и ортогонально расположенной ей призмы Френеля достигаются технологические режимы, близкие к оптимальным, что позволяет рекомендовать данные системы для успешного решения задачи лазерной термообработки различных деталей и узлов техники, в том числе железнодорожных колесных пар.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Марков, Д. П. Механика и трибология бокового износа колес и рельсов. // Вестник РГУПС. – 2003.-№3. – С. 16-23.
2. 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.
3. Марков, Д. П. Закалка гребней колес подвижного состава на высокую твердость для снижения бокового износа // Вестник ВНИИЖТ. – 1997. – №. 1. – С. 36-42.
4. Петров, С.Ю., Костюкевич, А.И., Рябов, А.А. Упрочнение гребней и снижение износа колесных пар // Мир транспорта. 2013. № 2.
5. Киселев, С.Н., Саврухин, А.В., Кузьмина, Г.Д. Влияние плазменной обработки на напряженно-деформированное и структурное состояние гребней бандажей колес локомотивов // Сварочное производство. – 2001. - №6. – С.9-17.
6. Буйнов, А. П. Основные причины интенсивного износа бандажей колесных пар подвижного состава и методы их устранения // Екатеринбург: Изд-во УрГУПС. – 2009.
7. 100 kW CW fiber laser for industrial applications // Gaponov, V.; Shcherbakov, E.; Abramov, A. Laser Optics, 2014 International Conference Saint Petersburg, Russia.
8. Скрипченко, А.И. Технологические головки для волоконных лазеров. // Ритм. – 2010. - №2. – С. 22-27.
9. Вейко, В.П. Опорный конспект лекций по курсу «Физико-технические основы лазерных технологий». Тема: Лазерное формирование микрооптических элементов. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 133 с.

10. **Основы** оптики. Борн М., Вольф Э. Перевод с английского. Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1970.-855 с.

11. **Введение** в Фурье-оптику. Дж. Гудмен. Издательство «Мир», 1970.- 364 с.

12. **Богданов, А.В., Грезев, Н.В., Шмелев, С.А.** Применение волоконных лазеров для повышения износостойкости и контактно-усталостной прочности железнодорожных колес. // Научноёмкие технологии в машиностроении – 2015. - №6. – С. 30-34.

13. **Богданов, А.В., Голубенко, Ю.В.** Волоконные технологические лазеры и их применение. — СПб. : Лань, 2016. — 208 с.

REFERENCES

1. Markov D.P. Mechanics and tribology of wheels and rails side wear. // *Bulletin of RSUC*. – 2003. – No. 3. – pp. 16-23.

2. Balanovsky A.E. Glazkov V.S. Moroz B.A. Wheel pair plasma strengthening of rolling stock / *Proceedings of SSUC “New Techniques on E-SR”*. Novosibirsk: SSUC, 1999, pp 57-65.

3. Markov D.P. Wheel flange hardening for rolling stock for high hardness to reduce side wear // *Bulletin of RRIC*. – 1997. – No. – pp. 36-42.

4. Petrov S.Yu., Kostyukevich A.I., Ryabov A.A. Flange hardening and wheel pair wear decrease // *World of Transport*. 2013. No. 2.

5. Kiselyov S.N., Savrukhin A.V., Kuzmina G.D. Plasma treatment impact upon stress-strain and structural state of wheel tread flanges of locomotives // *Welding Engineering*. – 2001. – No.6. – pp. 9-17.

6. Buinosov A.P. *Basic Reasons of Flange Intensive Wear in Wheel Pairs of Rolling Stock and Methods for Their Elimination* // Ekaterinburg: Publishing House of UralsSUC. – 2009.

7. 100 kW CW fiber laser for industrial applications // Gaptontsev, V.; Shcherbakov, E.; Abramov, A. *Laser Optics, 2014 International Conference Saint Petersburg, Russia*.

8. Skripchenko A.I. *Technological Heads for Fiber Lasers* // Rhythm. – 2010. – No.2. – pp. 22-27.

9. Veiko V.P. *Basic lecture notes for course “Physical-Technical Fundamentals of Laser technologies”*. Theme: *Laser Formation of Micro-optic Elements*. – S-Pb: S-PbSU ITMO, 2008. – pp. 133.

10. *Optics Fundamentals*. Born M., Wolf E. Transl. from Engl. Main Redaction of Physic-Mathematical Literature of “Science” Publishing House, 1970.- pp. 855.

11. *Introduction in Fourier Optics*. J. Goodman. “Mir” Publishing House, 1970. – pp. 364.

12. A.V. Bogdanov, N.V. Grezev, S.A. Shmelyov. Fiber laser application for increase of wear-resistance and contact-fatigue strength of railway wheels. // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering* – 2015. – No.6. – pp. 30-34.

13. A.V. Bogdanov, Yu.V. Golubenko. *Fiber Technological Lasers and Their Use*.-S-Pb.: Lan, 2016. – pp. 208.

Рецензент д.т.н. В.В. Васильцов

Реклама Вашей продукции в нашем журнале – один из способов достижения Вашего успеха!

Журнал «Научноёмкие технологии в машиностроении» читают руководители и специалисты предприятий машиностроительного комплекса.

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:

- найти партнеров, заинтересованных в современных исследованиях, а также внедрении Ваших идей и разработок в области машиностроения;
- установить контакты с организациями и фирмами России и стран ближнего и дальнего зарубежья;
- наладить обмен информацией.

Обращайтесь в редакцию! E-mail: naukatm@yandex.ru