



Закалка крупногабаритных деталей с использованием сканирующего излучения оптоволоконного лазера с программным изменением мощности

О. Г. Девойно¹, В. В. Жарский², А. П. Пилипчук³, В. В. Рудый⁴

¹ Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

² ООО «Рухсервомотор», Минск, Республика Беларусь

³ Военная академия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь

⁴ ОАО «БЕЛАЗ»-управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ», Республика Беларусь

Выполнен анализ процесса сканирующей лазерной обработки. Представлены результаты расчета температурного поля, возникающего при лазерной закалке с постоянной мощностью и с изменением мощности лазерного излучения в зависимости от положения лазерного луча при его относительном перемещении. Показана возможность использования программно-изменяемой мощности лазерного излучения в процессе сканирования. Полученные результаты использованы при разработке лазерного технологического комплекса для упрочнения функционально нагруженных поверхностей крупногабаритных деталей MLS-20-3DF-A. Применение лазерной закалки крупногабаритных деталей позволило улучшить качество выпускаемой продукции, обеспечить увеличение срока ходимости карьерных самосвалов, снизить себестоимость выпускаемой продукции, создать дополнительные производственные мощности.

Ключевые слова: лазер, мощность лазерного излучения, лазерная закалка, сканирующая система, математическая модель, температурное поле.

Статья получена: 14.08.2019. Принята к публикации: 16.09.2019.

Hardening of Large-Size Details Using Scanning Radiation of Optical Fiber Laser with Programming Power Change

O. G. Devoyno¹, V. V. Zharsky², A. P. Pilipchuk³, V. V. Rudyy⁴

¹ Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

² LLC «Ruhservomotor», Minsk, Republic of Belarus

³ Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

⁴ OJSC BELAZ Management Company Holding «BELAZ-HOLDING», Republic of Belarus

The analysis of the scanning laser processing process. The results of the calculation of the temperature field arising during laser quenching with constant power and with a change in the laser radiation power depending on the position of the laser beam during its relative displacement are presented. The possibility of using software-variable laser power in the scanning process is shown. The results obtained were used in the development of a laser technological complex for the hardening of functionally loaded surfaces of large-sized MLS-20-3DF-A large parts. The use of laser hardening of large-sized parts made it possible to

improve the quality of products, to ensure an increase in the lifetime of mine dump trucks, to reduce the cost of products, to create additional production capacity.

Keywords: laser, laser power, laser hardening, scanning system, mathematical model, temperature

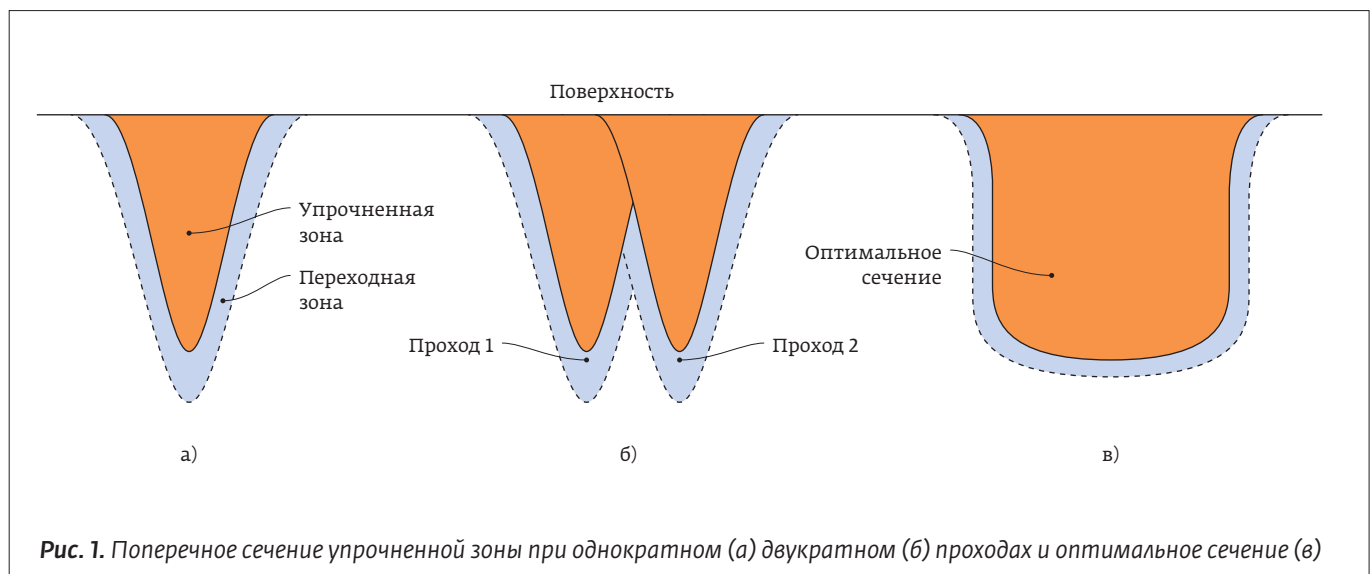
Received: 14.08.2019. Accepted: 16.09.2019.

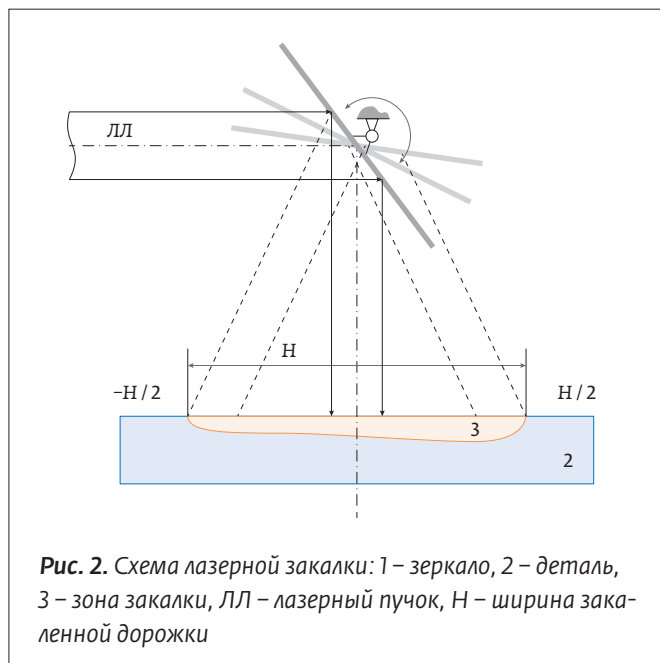
Технология поверхностной лазерной закалки основана на перемещении с определенной скоростью по заданной траектории сфокусированного лазерного луча, что обеспечивает термообработку поверхности без объемного разогрева деталей. Лазерная закалка используется для упрочнения деталей сложной формы, крупноразмерных и ряда других, упрочнение которых невозможно традиционными методами. В большинстве лазерных установок на выходе из резонатора формируется пятно круглого сечения [1] с неоднородным распределением интенсивности. Задачей технолога является определение режимов лазерной обработки, при которой формируется упрочненный слой равномерной глубины (рис. 1), что обеспечивает высокие эксплуатационные свойства детали [2].

Решить поставленную задачу можно путем преобразования исходной формы профиля в эффективный цилиндр с равномерной интенсивностью. Для этого применяются специальные оптические системы – шейперы (от английского beam shaper) [3]. Также можно достичь требуемого уровня качества поверхности созданием за время термического цикла закалки так называемого «псевдопятна» – теплового источника

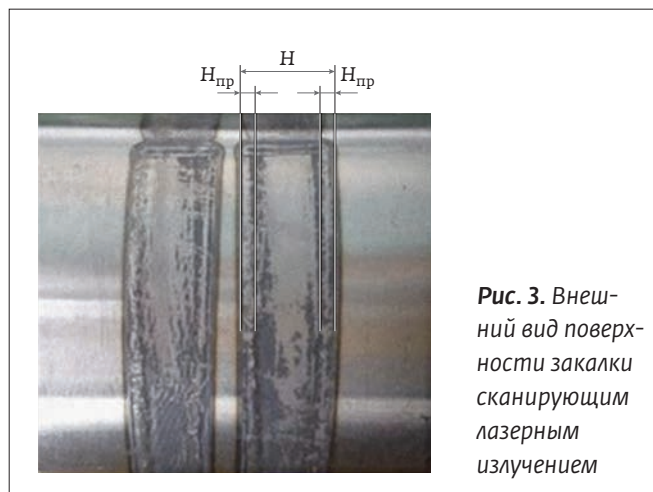
на поверхности образца с равномерным в среднем распределением теплового потока. Условия создания данного «псевдопятна» обеспечивает сканирующая система, включенная в конструкцию, которая заставляет лазерный луч многократно перемещаться с высокой частотой по зоне нагрева. Уже получены результаты [5–7], подтверждающие перспективность применения сканирующей лазерной обработки для повышения качества поверхности.

На рис. 2 представлена схема лазерной закалки с использованием зеркала, при этом деталь перемещается в направлении, перпендикулярном плоскости изображения. Характерной функциональной особенностью схемы является остановка лазерного луча в крайних точках $H/2$ и $H/2$. Анализ представленной схемы сканирования показал, что основной зоной неустойчивости тепловых полей являются периферийные участки зоны, где имеют место два энергетических процесса: увеличение теплоотвода за счет краевого эффекта и увеличение количества подводимой энергии за счет уменьшения скоростей перемещения лазерного луча при изменении направления. На рис. 3 представлен внешний вид упрочненной дорожки первичного вала, полученной





при проведении лазерной закали с использованием сканирующей обработки. Границы участка с проплавлением поверхности соответствуют области максимальной плотности энергии, т.е. геометрическому месту точек, где скорость луча минимальна. В граничных зонах $H_{пр}$ наблюдается проплавление металла, что подтверждает определяющее влияние эффекта увеличения количества подводимой энергии за счет снижения скорости перемещения лазерного луча про-

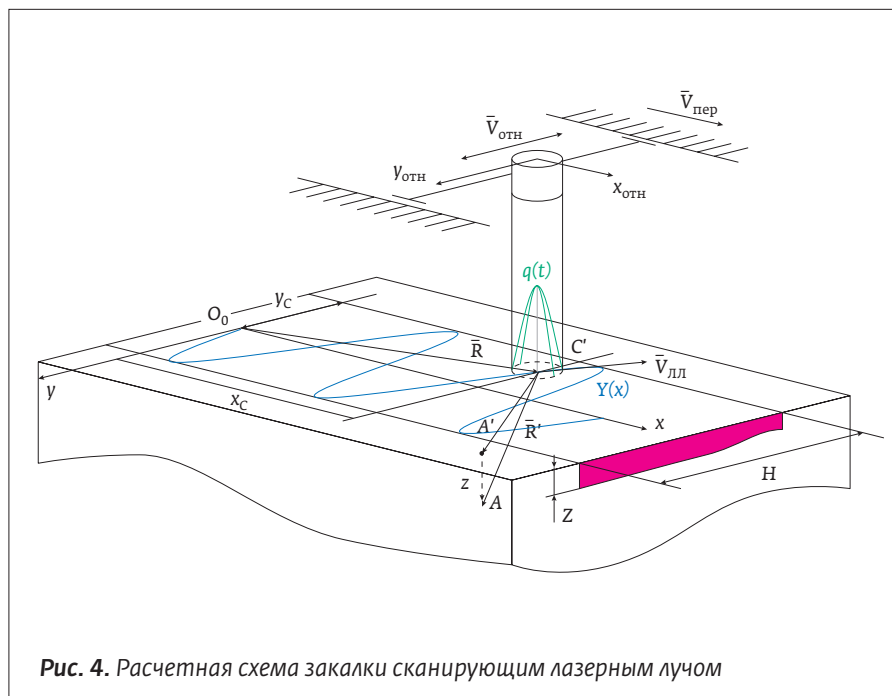


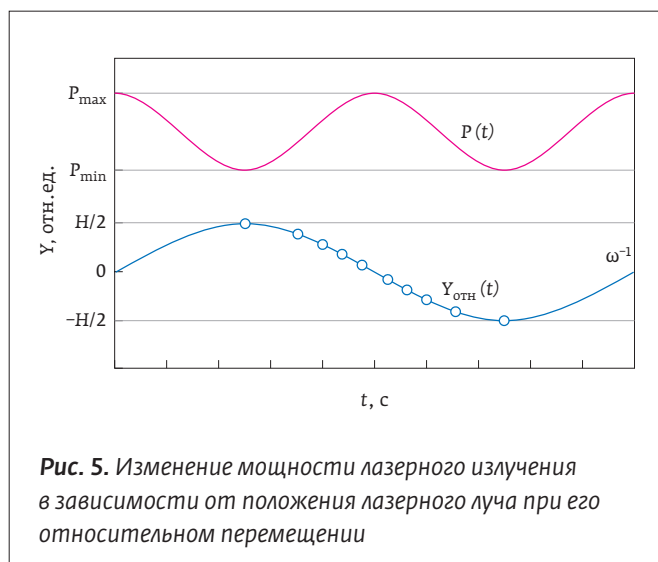
цесса. Уменьшение размеров зон проплавления на периферии поверхности возможно в результате увеличения частоты сканирования.

Отмеченные особенности определили необходимость определения параметров лазерной закали, обеспечивающей отсутствие подплавления в периферийных участках в ходе сканирующей обработки. Для решения поставленной задачи выполнено математическое моделирование процесса лазерной обработки с использованием аналитического решения Н.Н. Рыкалина [8] для случая нагрева полубесконечного тела нормально-круговым источником, движущимся прямолинейно.

При разработке модели процесса закали сканирующим лазерным излучением приняты следующие допущения: лазерный луч совершает возвратно-поступательное движение перпендикулярно оси дорожки со скоростью $V_{отн}$, деталь перемещается поступательно с постоянной скоростью $V_{пер}$, для решения задачи используются неподвижная и подвижная системы отсчета. С учетом принятых допущений расчетная схема закали сканирующим лазерным излучением представлена на рис. 4.

Разработана математическая модель процесса закали сканирующим лазерным излучением [9], учитывающая параметры возвратно-поступательного движения лазерного луча и поступатель-





ного движения детали. Разработанная модель была использована для расчета температурного поля, возникающего при лазерной закалке с изменением мощности лазерного излучения в зависимости от положения лазерного луча при его относительном перемещении. В данной постановке минимальное значение выходной мощности P_{\min} обеспечивается в периферийной зоне (рис. 5). На траектории луча маркерами отмечены точки, в которых определялась глубина проникновения изотермы, соответствующей температуре закалки.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

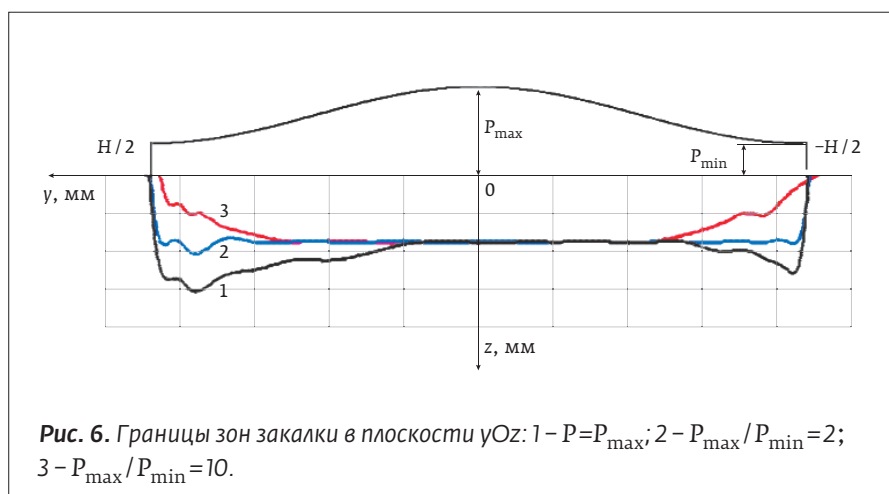
С использованием разработанной модели проанализировано влияние параметров лазерного излучения на температурное поле при поверхностной лазерной закалке на установке ВЛ-1.0 со сканированием луча по ширине H упрочняемой зоны. Параметры обработки: диаметр лазерного пучка (ЛЛ) $d=1$ мм, амплитуда колебаний $H=10$ мм. Определено температурное поле для трех случаев: источник постоянной мощности $P(t)=P_{\max}=1$ кВт, два источника переменной мощности (рис. 5), для которых $P_{\max}/P_{\min}=2$ и $P_{\max}/P_{\min}=10$.

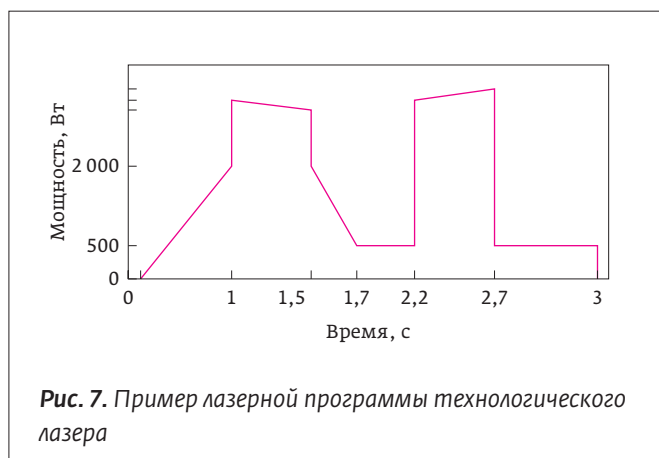
В результате расчета определено температурное поле $T(x, y, z, t)$ в детали, изготовленной из стали 45, возникающее при движении лазерного луча, имеющего гауссово рас-

пределение интенсивности. На рис. 6 представлены результаты расчета границы зоны закалки, за которую было принято положение изотермы, соответствующее температуре закалки для данного материала при лазерной сканирующей обработке для источника постоянной мощности $P(t)=P_{\max}$ (кривая 1), источников переменной мощности для которых $P_{\max}/P_{\min}=2$ (кривая 2) и P_{\max}/P_{\min} (кривая 3).

Представленные результаты показывают, что изменение мощности лазерного луча в процессе сканирования позволяет эффективно влиять на температурные поля. Сравнение форм представленных изотерм показывает, что при сканирующей лазерной закалке излучением постоянной мощности (кривая 1) в периферийных зонах возможно подплавление поверхности, что подтверждают результаты рис. 3. Реализация лазерной закалки оптоволоконным лазером с программно-изменяемой мощностью излучения позволяет обеспечить более равномерную глубину упрочненного слоя (кривая 2). Для оценки эффективности реализации лазерной закалки оптоволоконным лазером с программно-изменяемой мощностью излучения выполнена сравнительная оценка энергетических затрат при сканирующей лазерной закалке излучением постоянной и переменной мощности с соотношением $P_{\max}/P_{\min}=2$. При оценке поглощенной энергии W за время T действия источника использовалось определение мощности излучения как потока энергии или скорости изменения энергии во времени [9]:

$$W = \int_0^T P(t) dt.$$

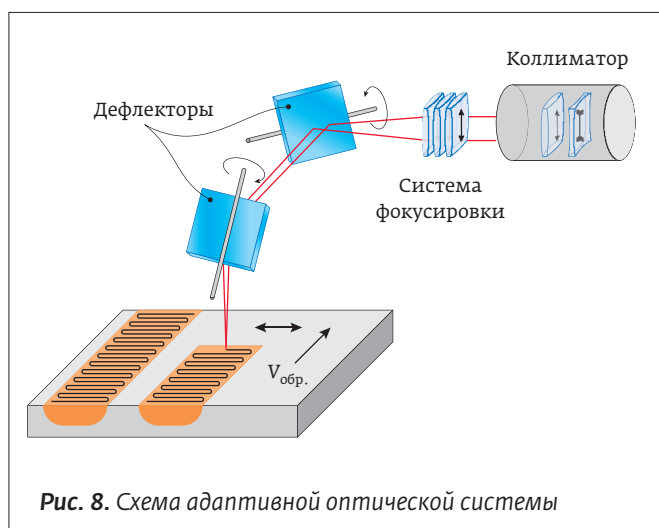




В качестве показателя эффективности выбрано отношение поглощённой энергии при сканирующей лазерной закалке излучением постоянной мощности $W_{\text{пост}}$ к поглощённой энергии при сканирующей лазерной закалке излучением переменной мощности $W_{\text{пер}}$:

$$\eta = \frac{|W_{\text{пост}} - W_{\text{пер}}|}{W_{\text{пер}}} \cdot 100\%.$$

Для анализируемого случая сканирующей лазерной закалки излучением постоянной мощности $P=1$ кВт и переменной мощности с соотношением $P_{\text{max}}/P_{\text{min}}=2$ при условии, что начальная и конечная точки находятся в одной фазе, получено значение $\eta=25\%$. Таким образом, применение сканирующей системы с программно-изменяемой мощностью излучения позволяет снизить энергетические затраты с сохранением заданной геометрии зоны упрочнения.



Таким образом, обеспечение стабильного качества упрочненного слоя при лазерной обработке со сканированием возможно в результате изменения мощности излучения по определенной программе в процессе сканирования. Практическая реализация сформулированного подхода возможна на основе использования технологических оптоволоконных лазерных систем. Современные оптоволоконные лазеры с более высоким суммарным уровнем технико-экономических показателей, по сравнению с CO_2 -лазерами, позволяют изменять мощность излучения с очень высокой скоростью по заданной программе. На рис. 6 представлен пример программы [10], обеспечивающий появление последовательности импульсов, технологического лазерного комплекса производства ООО «Рухсервомотор». Это подтверждает возможность практической реализации лазерной закалки оптоволоконным лазером с программно-изменяемой мощностью излучения.

Возможным положительным эффектом использования данного подхода может быть снижение общих энергетических затрат за счет уменьшения мощности излучения, попадающего в периферийные зоны. Также важной особенностью твердотельных лазеров является то, что излучение с длиной волны порядка 1 мкм лучше взаимодействует с поверхностью металлов по сравнению с излучением CO_2 -лазеров, что повышает эффективность закалки.

Для реализации лазерной закалки с программно-изменяемой мощностью излучения разработана специальная адаптивная оптическая система. Перемещение луча по произвольному контуру обеспечивается применением системы двух зеркал, согласовано совершающих колебания во взаимно перпендикулярных направлениях в соответствии с представленной схемой (рис. 8). Рис. 9 иллюстрирует реализованную схему управления распределением энергии по сечению области лазерного воздействия (псевдопятно), формируемого при сканирующей обработке с использованием двух дефлекторов. Программно заложена возможность симметричного изменения мощности в боковых зонах области лазерного воздействия, а также произвольного изменения в передней и задней его частях. Применение данной адаптивной оптической системы позволяет поддерживать стабильно высокое качество поверхностной термообработки, что позволяет использовать операцию закалки в качестве чистовой.



Полученные результаты были использованы при разработке лазерного технологического комплекса закалки крупногабаритных деталей автомобилей «Белаз». За последние семь лет на ОАО «БЕЛАЗ» проделана значительная работа по обновлению и усовершенствованию технологического оборудования. Значительное место занял комплекс конструкторско-технологических работ по внедрению технологических процессов лазерного раскроя материалов, лазерной маркировки, лазерной термообработки рабочих поверхностей деталей. Ключевую роль сыграла деятельность по разработке, изготовлению и внедрению в серийное производство технологических лазерных установок на базе оптоволоконных лазеров для термоупрочнения рабочих поверхностей деталей большегрузных автомобилей. Основные преимущества технологических комплексов на основе иттербиевых волоконных лазеров: высокая надежность, низкие эксплуатационные расходы, низкое энергопотребление по сравнению с CO₂-системами, высокое качество и стабильность излучения. Примером данной работы является внедрение в производство лазерного технологического комплекса для упрочнения функционально нагруженных поверхно-

стей крупногабаритных деталей MLS-20-3DF-A. Указанное оборудование спроектировано и изготовлено совместно БелАЗом совместно с ОАО «Рухсервомотор».

Оборудование оснащено не имеющей аналогов в мире специальной адаптивной оптической системой, позволяющей поддерживать стабильно высокое качество поверхностной термообработки, что позволяет использовать указанную операцию в качестве чистовой. По своим техническим характеристикам указанное оборудование не уступает мировым аналогам. Это позволило улучшить качество выпускаемой продукции, обеспечить увеличение срока ходимости карьерных самосвалов, снизить себестоимость выпускаемой продукции, создать дополнительные производственные мощности.

Кинематическая схема установки включает в себя следующие узлы: базовое сварное основание, изготовленное из стального проката, координатную систему на базе четырех линейных модулей и оптическую головку со сменными поворотными тубусами для вращения луча.

Подача обрабатываемых деталей в рабочую зону установки реализовано с помощью платформы, которая по рельсам с помощью электрического

ЭССЕНТОПТИКС ||| ESSENTOPTICS

PHOTON RT

Спектрофотометр для Оптиков | Spectrophotometer for Coaters



185 – 5200 nm

**УНИКАЛЬНО ШИРОКИЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ
ДИАПАЗОН В ОДНОМ ПРИБОРЕ**

**—
WORLD-RECORD WAVELENGTH RANGE
IN ONE INSTRUMENT**

ООО «ЭссентОптикс»

23а-81, ул. 40 лет Победы, Боровляны, Минская обл., Минский р-н, 223053 Беларусь
Тел.: +375-17-5112025 | Факс: +375-17-5112026 | www.essentoptics.com



Рис. 9. Схема (а) и внешний вид (б) технологического комплекса MLS-20-3DF-A с установленным для обработки корпусом редуктора мотор-колеса

привода закатывается внутрь установки. В установке использован иттербиевый волоконный лазер производства НТО «ИРЭ-Полюс» ЛС-2 мощностью 2 кВт. Зона обработки детали закрыта защитной кабиной, боковые стороны которой оборудованы защитными экранами. Окна для наблюдения за процессом обработки выполнены из стекла с интерферометрическим покрытием, что обеспечивает необходимую защиту от воздействия лазерного излучения. Оборудование укомплектовано полуавтоматической системой технического зрения для точного определения положения конструктивных элементов заготовок после их подачи в зону обработки. Лазерные комплексы используются в качестве основной технологии для упрочнения ряда деталей большегрузных автомобилей:

- корпус мотор редуктора;
- водило;
- ступица;
- диски фрикциона, втулки фрикциона.

Технология лазерной закалки эффективно использована для упрочнения деталей широкой гаммы большегрузных автомобилей.

ВЫВОДЫ

Выполнен анализ процесса лазерной закалки сканирующим лазерным пучком. В результате математического моделирования процесса лазерной закалки при изменении мощности лазерного излучения в зависимости от положения лазерного луча установлено, что применение сканирующей системы с программно-изменяемой мощностью излучения позволяет снизить на 25% энергетические затраты с сохранением заданной геометрии зоны упрочнения.

Разработан и внедрен в производство лазерный технологический комплекс для упрочнения функционально нагруженных поверхностей крупногабаритных деталей MLS-20-3DF-A. Использование лазерной закалки крупногабаритных деталей позволило улучшить качество выпускаемой продукции, обеспечить увеличение срока ходимости карьерных самосвалов, снизить себестоимость выпускаемой продукции, создать дополнительные производственные мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Югов В. И. Высокоэффективная технология ресурсосбережения: лазерная поверхностная обработка. Фотоника. 2012; № 4: 13–20.
2. Лазерні технології та комп'ютерне моделювання / Під. Ред. Л. Ф. Головка, С. О. Лук'яненко. К.: Вистка. 2009.
3. Бирюков В. П., Фишков А. А., Татаркин Д. Ю., Хриптович Е. В. Влияние лазерного упрочнения круглым, профилированным и колеблющимся лучом на повышение ресурса работы металлических деталей машин Фотоника. 2017; 11(3):28–34. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2017.63.3.28.34>.
4. Бирюков В. П. Модификация поверхности с помощью лазерного излучения. Фотоника. 2010; 3: 18–21.
5. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / Под ред. В. Я. Панченко. – М.: Физматлит. 2009.
6. Бирюков В. П. Изменение структуры и свойств сталей при лазерном упрочнении. Фотоника. 2012; 3: 22–26.
7. Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справочник / Н. Н. Рыкалин. – М.: Машиностроение. 1985.
8. Девойно О. Г., Жарский В. В., Пилипчук А. П. Моделирование поверхностной закалки с использованием сканирующего оптоволоконного лазера. Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2018; 63(4): 435–443. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-435-443>
9. Хирд Г. Измерение лазерных параметров. – М.: Мир. 1970.
10. Иттербиевый волоконный лазер (серия ЛС). Руководство пользователя НТО ИРЭ-Полюс. 2014. URL: <https://www.ipgphotonics.com/ru>.

REFERENCE

1. YUgov V. I. Vysokoeffektivnaya tekhnologiya resursosberezheniya: lazernaya poverhnostnaya obrabotka. Fotonika. 2012; № 4: 13–20.
2. Lazerni tekhnologii ta komp'yuterne modelyuvannya / Pid. Red. L. F. Golovka, S. O. Luk'yanenka. K.: Vystka. 2009.
3. Biryukov V. P., Fishkov A. A., Tatarkin D. YU., Hriptovich E. V. Vliyanie lazernogo uprochneniya kruglym, profilirovannym i koleblyushchimsya luchom na povyshenie resursa raboty metallicheskih detalej mashin. Fotonika. 2017; 11(3):28–34. <https://doi.org/10.22184/1993-7296.2017.63.3.28.34>.
4. Biryukov V. P. Modifikaciya poverhnosti s pomoshch'yu lazernogo izlucheniya. Fotonika. 2010; 3: 18–21.
5. Lazernye tekhnologii obrabotki materialov: sovremennye problemy fundamental'nyh issledovanij i prikladnyh razrabotok/Pod red. V. YA. Panchenko. – M.: Fizmatlit. 2009.
6. Biryukov V. P. Izmenenie struktury i svojstv stalej pri lazernom uprochnenii. Fotonika. 2012; 3: 22–26.
7. Lazernaya i elektronno-luchevaya obrabotka materialov: cpravochnik/N. N. Rykalin. – M.: Mashinostroenie. 1985.
8. Devojno O. G., ZHarskij V. V., Pilipchuk A. P. Modelirovanie poverhnostnoj zakalki s ispol'zovaniem skaniruyushchego optovolokonного лазера. Ves. Nac. akad. navuk Belarusi. Ser. fiz.-tekhn. navuk. 2018; 63(4): 435–443. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-435-443>
9. Hird G. Izmerenie lazernyh parametrov. – M.: Mir. 1970.
10. Itterbievyy volokonnyy lazer (seriya LS). Rukovodstvo pol'zovatelya NTO IRE-Polyus. 2014. URL: <https://www.ipgphotonics.com/ru>.



ПРАВИТЕЛЬСТВО
РЕСПУБЛИКИ
БАШКОРТОСТАН



МИНИСТЕРСТВО
ПРОМЫШЛЕННОСТИ
И ИННОВАЦИОННОЙ
ПОЛИТИКИ РБ



РОССИЙСКАЯ
АССОЦИАЦИЯ
«СТАНКОИНСТРУМЕНТ»



БVK БАШКИРСКАЯ
ВЫСТАВОЧНАЯ
КОМПАНИЯ



РОССИЙСКИЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ ФОРУМ

Специализированные выставки

- **Машиностроение. Металлообработка**
- **Инновационный потенциал Уфы**
- **Сварка**
- **Средства защиты**

26-28 февраля
ВДНХЭКСПО УФА 2020

www.prombvk.ru

+7(347) 246-41-80, 246-41-77

promexpo@bvkexpo.ru



[prombvk](#)



[promexpoufa](#)

[#рпфуфа](#)

[#промфорумуфа](#)

[#бvk](#)