



Диодные лазеры и их использование в робототехнических системах

Д. О. Чухланцев, Д. А. Шипихин, Е. С. Шишкин, В. П. Умнов
ООО «ТермоЛазер», г. Владимир, Россия

Диодные лазеры большой мощности, необходимые для многих лазерных производственных процессов, традиционно были громоздкими напольными устройствами. Однако производители лазеров отреагировали на потребность промышленности в компактных системах, которые в полной мере используют миниатюризацию, присущую диодным лазерам. Это позволяет успешно встраивать диодные лазеры в качестве рабочих инструментов в исполнительные системы универсальных промышленных роботов, в том числе мобильных роботов для обработки крупногабаритных объектов. В статье представлен лазер-робот производства компании «ТермоЛазер», разработанный для обработки крупных деталей энергетического и транспортного назначения.

Ключевые слова: диодные лазеры, ультракороткие импульсы, робототехнические системы, качество пучка

Статья получена: 10.04.2023

Статья принята: 04.05.2023

Среди различных источников лазерного излучения, используемых в производстве, первенство постепенно завоевывают диодные лазеры, вытесняя газовые и другие твердотельные лазеры, включая волоконные [1–3]. Это происходит вследствие неоспоримых достоинств диодных лазеров, среди которых:

- узкая линия спектра излучения лазерных диодов;
- возможность обработки не только металлов как при использовании волоконного лазера, но и неметаллов, например дерева, акрила, камня и т. д.;

Diode Lasers and Its Use in the Robotic Systems

D. O. Chukhlantsev, D. A. Shipikhin, E. S. Shishkin, V. P. Umnov
TermoLaser LLC, Vladimir, Russia

The high-power diode lasers required for many laser industrial processes have conventionally been the bulky floor devices. However, the laser manufacturers have responded to the industrial need for compact systems that take full advantage of the miniaturization inherent in the diode lasers. This makes it possible to successfully integrate the diode lasers as the service tools into the actuating systems of multipurpose industrial robots, including the mobile robots for processing the large-dimensioned items. The article presents a laser-robot produced by the ThermoLaser LLC company, designed for processing large parts for energy and transport purposes.

Keywords: diode lasers, ultrashort pulses, robotic systems, beam quality

Article received on: 10.04.2023

Article accepted on: 04.05.2023

Among the various laser radiation sources used in the production process, the diode lasers are gradually winning the first place, displacing the gas and other solid-state lasers, including the optical fiber ones [1–3]. This is due to the following undeniable advantages of diode lasers:

- narrow emission line of the laser diodes;
- possible processing of not only metals, as when using an optical fiber laser, but also non-metals, such as wood, acrylic, stone, etc.;
- lack of fiber optic cable;
- unequalled electrical and optical efficiency (efficiency up to 50% and above);
- higher power-to-size ratio compared to any other industrial laser technology, as well as the solid-state stability and reliability;
- high (over 10 thousand hours in a continuous mode and 10^9 pulses in a quasi-continuous mode) service life of the high-power laser diodes used.



- отсутствие оптоволоконного кабеля;
- непревзойденная электрическая и оптическая эффективность (КПД до 50% и выше);
- более высокое соотношение мощности и размеров по сравнению с любой другой промышленной лазерной технологией, а также твердотельную стабильность и надежность;
- высокий (свыше 10 тыс. часов в непрерывном режиме и 10^9 импульсов в квазинепрерывном режиме) ресурс работы используемых мощных лазерных диодов.

Благодаря отмеченным достоинствам диодные лазеры с высокой эффективностью используются в различных производственных машиностроительных процессах: закалка поверхности металлических изделий, наплавка и легирование, пайка, очистка поверхности.

Ограничением на применение диодных лазеров является относительно большой размер фокусируемого пятна на обрабатываемой поверхности. Мощность на объекте обработки не может быть эффективно сфокусирована в пятно микронного размера, поэтому большинство применений для мощных диодных лазеров включают нагрев определенной области, обычно измеряемой в миллиметрах.

При оценке возможности применения диодного лазера специалисты, как правило, озабочены качеством выходного луча, получаемого поэтапным суммированием мощности диодных линеек и модулей. При этом образуется множество отдельных лучей с асимметричным распределением плотности мощности в сечении лазерного пучка, и их необходимо свести вместе в один пучок с симметричным распределением в сечении. Такая задача соответствует концепции твердотельного кристаллического лазера с диодной накачкой. Однако этот процесс требует дополнительных затрат энергии, а это уже приводит к снижению КПД лазера.

Другое решение заключается в суммировании лазерных лучей от нескольких диодов в оптическом волокне. Но при направлении светового излучения от линейки диодных лазеров или, тем более, от модуля через оптоволоконный кабель приходится сталкиваться с другой проблемой – попыткой направить луч с квадратным распределением плотности мощности по сечению пучка через волновод круглого сечения. При этом обязательно появятся потери части энергии светового пучка, которая проходит снаружи волокна.

Кроме того, на торцевой поверхности оптошины имеется значительная «мертвая» зона. Ее появление вызвано отсутствием излучения из простран-

Due to the advantages noted, the diode lasers with high efficiency are used in various industrial engineering processes, such as surface hardening of metal products, building-up and alloying, soldering, and surface cleaning.

A constraint on an applicability of diode lasers is the relatively large size of the focused spot on the treated surface. The power on the target cannot be efficiently focused into a micron-sized spot, therefore, most applications for the high-power diode lasers involve heating of a specific area, usually measured in millimeters.

When evaluating the possible application of a diode laser, the specialists are usually concerned about the output beam quality obtained by the stepwise summarization of the power of arrays and modules. In this case, many separate beams of asymmetric quality are generated. They must be brought together into one beam with a symmetrical section. Such a problem corresponds to the concept of a diode-pumped solid-state crystal laser. However, this process requires additional energy costs, and this fact leads to a decrease in the laser efficiency. Another solution is to sum the laser beams from several diodes in an optical fiber. However, when directing the light radiation from an array or, moreover, from a module through a fiber optic cable, it is necessary to face another problem, namely an attempt to direct a beam with a square section through a circular waveguide. In this case, part of the light beam energy that passes outside the tube, will be lost. In addition, there is a significant “dead” area on the end surface of the optical bus. Its occurrence is caused by the absence of radiation from the space between the emitters. When these dark spots are projected onto an optical fiber, the power and brightness of the resulting beam is reduced. Another key problem occurs when combining the diode radiation within a fiber optical channel. The higher the output beam quality and the smaller the number of emitters projected onto the optical fiber, the higher the specific absorption of light energy from the fiber surface per unit of channel diameter. Moreover, the current achievements in the construction of high-power diode lasers make it possible to obtain a high quality of the resulting laser beam by using the developed homogenizing modules produced in the form of micro-optical gratings.

One of the key tasks in the development of high-power diode lasers is the issue of an efficient cooling system [4]. As a rule, the microchannel cooling is used, when water flows through the channels with a minimum cross section in a copper radiator soldered to a diode laser rod. To minimize the current leakage and electrochemical corrosion, the deionized water



ства, разделяющего излучатели. При проецировании этих темных пятен на оптическое волокно снижается мощность и яркость результирующего пучка.

Другая ключевая проблема возникает при объединении диодного излучения внутри оптоволоконного канала. Чем выше качество луча на выходе и меньше количество излучателей, проецируемых на оптическое волокно, тем выше удельное поглощение световой энергии с поверхности оптоволоконного канала на единицу диаметра канала. В то же время сегодняшние достижения в построении мощных диодных лазеров позволяют путем использования разработанных гомогенизирующих модулей, производимых в виде микрооптических решеток, добиться высокого качества выходного лазерного пучка.

Одной из ключевых задач при создании мощных диодных лазеров является задача построения эффективной системы охлаждения [4]. Как правило, используется микроканальное охлаждения, когда вода течет по каналам минимального сечения в медном радиаторе, припаянном к диодному лазерному стержню. Чтобы минимизировать утечку тока и электрохимическую коррозию, обычно используется деионизированная вода, которая имеет низкую электропроводность. Потребность в деионизированной воде или водяных картриджах увеличивает эксплуатационные расходы и является существенным недостатком. В последнее время разработаны схемы охлаждения, основанные на использовании контактного кондуктивного охлаждения непосредственно рядом со стержнями и токовыми контактами с использованием проточной отфильтрованной водопроводной воды [5–6].

Компанией ООО «ТермоЛазер» создан и успешно эксплуатируется мобильный лазер – робот МЭЛ-3.0, рабочим инструментом которого является малогабаритный высокоэффективный диодный лазер с номинальной выходной мощностью излучения 3,0 кВт. Мобильный лазер-робот оснащен специальной управляемой тележкой, на которой размещается типовой технологический манипулятор, имеющий 6 степеней подвижности с исполнительной кинематической цепью длиной до 3 метров, предназначенный преимущественно для обработки крупногабаритных длинномерных объектов, последовательного выполнения операций в нескольких производственных ячейках или выполнения операций в различных структурных подразделениях одного предприятия. В качестве дополнительной опции лазер-робот может быть

that has a low electrical conductivity, is commonly used. The need for deionized water or water cartridges leads to increase in the operating costs and is a significant disadvantage. Recently, the cooling circuits have been developed based on the use of contact conductive cooling directly next to the rods and current contacts with the filtered tap water [5, 6].

TermoLaser LLC has developed and successfully operated a MEL-3.0 mobile robotic laser, the operating tool of which is a small-sized, highly efficient diode laser with a nominal output power of 3.0 kW. The mobile robotic laser is equipped with a special controlled trolley with a standard process manipulator, having 6 degrees of freedom with an executive kinematic chain up to 3 meters long, designed mainly for processing the large-dimensioned long items, sequentially performing operations in various work cells or performing operations in various structural subdivisions of the same enterprise. As an additional option, the robotic laser can be equipped with a manipulator base stabilization system in relation to the trolley that ensures stability and rigidity of the stationary trolley position. This feature expands the operational and process capabilities of the mobile robot and provides the required processing accuracy and quality for the large-dimensioned long items on the non-rigid and uneven surfaces, for example, the ground surface in the case of field operations.

Figure 1 demonstrates a view of a mobile robotic laser. Table 1 shows its main technical specifications. Figure 2 provides a view of a diode laser (in Fig. 1 it is covered with a casing).

The emitting system of a diode laser consists of eight separate modules, while each of which generates a homogeneous beam through the special micro-optical elements. To direct all beams from all eight modules to the output beam profiler, four mirrors with an interference coating to combine the beams of two orthogonally located modules and a special lens are used. The generated output beam is directed to a focusing lens protected against external influences by two glasses. The laser provides the possible individual adjustment of the laser spot energy profile in the treatment area by setting the output power of the optical laser radiation of each laser module by a programmable computer control device. Each module consisting of diode arrays contains a copper base. The main parameters of the laser used in the robotic laser and being the final link of the kinematic robot chain are given in Table 2.

The basic component of each laser module is a radiation source, the technical specifications of which are given in Table 3.



Рис. 1. Мобильный лазер – робот МЭЛ-3.0
Fig. 1. Mobile robotic laser MEL-3.0

оснащен системой стабилизации положения основания манипулятора относительно тележки, обеспечивающей устойчивость и жесткость неподвижного положения тележки, что расширяет эксплуатационные и технологические возможности мобильного робота и обеспечивает требуемую точность и качество обработки крупногабаритных длинномерных объектов на нежесткой и неровной, например грунтовой поверхности при работе в полевых условиях.

На рис. 1 представлен вид мобильного лазер-робота, а в табл. 1 приведены его основные технические характеристики. На рис. 2 представлен вид диодного лазера (на рис. 1 закрыт кожухом). Излучающая система диодного лазера состоит из восьми отдельных модулей, при этом каждый из модулей через специальные микрооптические элементы формирует гомогенный пучок. Для направления всех пучков от всех восьми модулей к формирователю профиля выходного пучка используется четыре зеркала с интерференционным покрытием для объединения пучков двух ортогонально расположенных модулей и специальная линза. Сформированный результирующий выходной пучок направляется на фокусирующую линзу, защищенную от внешнего воздействия двумя стеклами. В лазере обеспечивается возможность индивидуальной регулировки энергетического профиля лазерного пятна в зоне обработки путем настройки

Таблица 1. Технические характеристики лазер – робота МЭЛ-3.0

Table 1. Technical specifications of the MEL-3.0 robotic laser

| Параметр Parameter | Величина Value |
|---|--|
| Максимальная досягаемость, мм Maximum reach capability, mm | 2606 |
| Количество осей Number of axes | 6 |
| Повторяемость, мм Repeatability, mm | 0,06 |
| Скорость обработки, мм/с Processing speed, mm/s | 1–30 |
| Максимальная скорость перемещения по осям, град/с Maximum travel speed along the axes, degrees/s | Ось 1 – 180, ось 2 – 180, ось 3 – 180, ось 4 – 250, ось 5 – 250, ось 6 – 360 Axis 1 – 180, axis 2 – 180, axis 3 – 180, axis 4 – 250, axis 5 – 250, axis 6 – 360 |
| Тип источника лазерного излучения Type of laser radiation source | Диодный Diode |
| Номинальная мощность излучения лазера, кВт Rated laser radiation power, kW | 3 |
| Тип транспортной платформы Type of transport platform | Управляемая с двумя мотор-колесами, оснащенными синхронными двигателями Controlled by two power-wheels equipped with the synchronous motors |
| Занимаемая площадь, м ² Required area, m ² | 6,8 |

One usage sample of the MEL-3.0 robotic laser is the laser surface hardening of the car boss spline joint. Moreover, the requirements for hardness and depth of the hardened layer for projections, depressions and side surfaces of the splines are different. The boss material is cast iron VCh 50, GOST 7293-85, initial hardness is 170–207 HB. A view of the spline section hardened by a diode laser is shown in Fig.3. When performing the laser hardening procedure, the speed of the laser beam moving by the robot was changed from 1 mm/s to 5 mm/s, the power in the spot on the hardened surfaces was changed from 1200 to 1600 W by changing the laser power and various spot sizes for various surfaces: 2×16 mm for the side surfaces

Таблица 2. Технические характеристики диодного лазера

Table 2. Technical specifications of a diode laser

| Параметр Parameter | Значение Value |
|---|---|
| Мощность излучения, Вт Radiation power, W | ≥ 3000 |
| Напряжение питания, В Supply voltage, V | ≤ 270 |
| Рабочий ток, А Operating current, A | ≤ 21 |
| Длина волны излучения, нм Radiation wavelength, nm | 976 ± 10 |
| Коэффициент полезного действия, % Efficiency, % | > 50 |
| Размер пятна излучения, мм Laser spot dimensions, mm | 3×6 мм, 2×16 мм, 2×10 мм (возможны вариации) 3×6 mm, 2×16 mm, 2×10 mm (options are possible) |
| Фокусное расстояние, мм Focal length, mm | ~ 245–670 |
| Габариты, мм Overall dimensions, mm | 230×100×167 |
| Охлаждение Cooling | Обычное водное Standard water |

выходной мощности оптического лазерного излучения каждого лазерного модуля устройством программируемого компьютерного управления. Каждый модуль, состоящий из диодных линеек, содержит основание из меди. Основные параметры лазера, используемого в лазер-роботе и являющегося конечным звеном кинематической цепи робота, представлены в табл. 2.

Базовым компонентом каждого модуля в лазере является источник излучения, технические характеристики которого приведены в табл. 3.

Одним из примеров использования лазер-робота МЭЛ-3.0 является выполнение лазерной закалки поверхности шлицевого соединения ступицы автомобиля. При этом требования по твердости и глубине закаленного слоя для выступов, впадин и боковых поверхностей шлицев различаются между собой. Материал ступицы – чугун ВЧ 50, ГОСТ 7293-85, исходная твердость 170–207 НВ. Вид участка шлицев, закаленных диодным лазером, приведен на рис. 3. При выполнении операции лазерной закалки скорость перемещения лазерного луча роботом изменялась от 1 мм/с до 5 мм/с, мощность в пятне на закаливаемых поверхностях

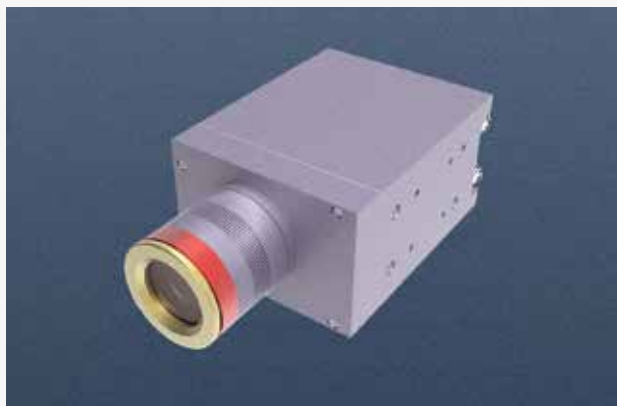

Рис. 2. Диодный лазер в сборе

Fig. 2. Diode laser assembly

of the spline and 3×6 mm for depressions and projections. The hardness of hardened surfaces is 240–304 HB with a depth of more than 0.5 mm. At the same time, the spline profile distortion did not exceed 0.15 μm and the boss body heating temperature did not exceed 20 °C of the ambient temperature.

Fig. 4 shows an implementation scheme of the MEL-3.0 robot for a more comprehensive hardening process of the working edge of a steam turbine blade made of alloy steel with a curvilinear shape of a hardening area along the part length with simultaneous usage of two diode lasers [7].

The laser beams 6 and 9, emitted by the diode radiation sources 4 and 7 through the optical heads 5 and 8, mounted on a bracket and moved by the robot along the working edge, have an impact on the front part 2 and end part 3 of the blade 1 leading edge. In this case, the required radiation power of each laser and the dimensions of the beam spots on the treatment surface are determined, and simultaneous hardening


Рис. 3. Участок шлицев, закаленных диодным лазером

Fig. 3. Section of splines hardened by a diode laser

Таблица 3. Технические характеристики источника излучения

Table 3. Technical specifications of the radiation source

| Параметр Parameter | Значение Value |
|--|--|
| Оптическая выходная мощность в непрерывном режиме не менее, Вт Optical output power in a continuous mode, not less than, W | 95 |
| Длина волны максимума спектра лазерного излучения, нм Wavelength in the maximum laser spectrum, nm | 940±25 |
| Высота излучающей области, мкм Height of the emission region, μm | 2 |
| Ширина излучающей области, мм Width of the emission region, mm | 5 |
| Расходимость пучка (полная ширина на полувысоте), в плоскости параллельной р-п переходу, градус Radiation beamwidth (full width at half height) in a plan parallel to the p-n junction, degrees | ≤11 |
| Расходимость пучка (полная ширина на полувысоте), в плоскости перпендикулярной р-п переходу, градус Radiation beamwidth (full width at half height) in a plane perpendicular to the p-n junction, degrees | ≤45** |
| Режим работы Operating mode | Непрерывный или импульсно-периодический Continuous or repetitively-pulsed |
| Ток накачки, А Pumping current, A | Не более 100 Not more than 100 |
| Напряжение при максимальном токе накачки, не более В Voltage at the maximum pumping current, not more than, V | 2,0 |
| Температура хладоносителя°, °С Coolant temperature°, °C | 20±5 |
| Расход хладоносителя через источник излучения, не менее л/мин Coolant flow rate through the radiation source, not less than, l/min | 1 |

изменением мощности лазера от 1200 до 1600 Вт и различный размер пятен для разных поверхностей: 2×16 мм для боковых поверхностей шлица и 3×6 мм для впадин и выступов. Твердость закаленных поверхностей 240–304 НВ при глубине более 0,5 мм. При этом искажение профиля шлицев не превысило 0,15 мкм и превышение нагрева тела ступицы не более 20 °С температуры окружающей среды.

На рис. 4 представлена схема реализации роботом МЭЛ – 3.0 более сложного процесса закалки рабочей кромки турбинной лопатки паровой турбины из легированной стали с криволинейной по длине детали формой зоны закалки с использованием одновременно двух диодных лазеров [7].

Лазерные лучи 6 и 9, испускаемые диодными источниками излучения 4 и 7 через оптические головки 5 и 8, закрепляемые на кронштейне и пере-

of the front part 2 and the end part 3 of the leading edge of the blade 1 is performed. The angular position of each beam (angles α and β) is selected in such a way that to provide the closest to normal incidence angle of radiation on the hardened surfaces 2 and 3 along the entire profile of the heated area and uniform exposure throughout the entire processing area. The installation angles α and β of the optical heads 5 and 8 are also selected with due regard to the prevention of direct and reflected radiation of the part in the optical head holes. When moving the laser beams 6 and 9 along the treated area, their angular position shall be programmatically changed when the transverse profile of the edge is changed and set as described above. To ensure the material hardening to the required depth, two conditions must be met: the material temperature in the layer to the full depth during the heating process shall reach or exceed the value of Ac3+50 °C, or 1050 °C

мещаемые роботом вдоль рабочей кромки, воздействуют на переднюю часть 2 и торцевую часть 3 входной кромки лопатки 1. При этом назначаются необходимые мощности излучения каждого лазера и размеры пятен лучей на поверхности обработки и происходит одновременная закалка передней части 2 и торцевой части 3 входной кромки лопатки 1. Угловое положение каждого из лучей (углы α и β) выбираются таким образом, чтобы обеспечить наиболее близкий к нормальному угол падения излучения на закаливаемые поверхности 2 и 3 по всему профилю нагреваемого участка и равномерную экспозицию по всей зоне обработки. Углы α и β установки оптических головок 5 и 8 выбираются также с учетом недопущения попадания прямого и отраженного от детали излучения в окна оптических головок. При перемещении лазерных лучей 6 и 9 вдоль обрабатываемого участка их угловое положение должно программно изменяться при изменении поперечного профиля кромки и устанавливаться, как описано выше. Для обеспечения закалки материала на требуемую глубину необходимо обеспечивается выполнение двух условий: температура материала в слое на всю глубину в процессе нагрева должна достичь или превысить значение $A_{c3} + 50$ °C или 1050 °C (для стали), в процессе охлаждения материал на всю глубину и материал должен остывать с максимальной скоростью для предотвращения образования тростита.

Охлаждение осуществляется в основном за счет ухода тепла в ненагретый объем детали, и в существенно меньшей степени – за счет ухода тепла в виде электромагнитного излучения в окружающее пространство и в массы газа, контактирующие с поверхностью. Для обеспечения постоянных значений потоков тепла, уходящего из области материала в процессе закалки, используются два потока охлажденных газов. Первый поток 11 направляют соплом 12 рассредоточенной струей на поверхность детали на некотором небольшом расстоянии от края зоны закалки со стороны зоны воздействия лазера 7. Этот поток должен отводить тепло от детали, компенсируя нагрев ее за счет притока тепла из зоны закалки со стороны противоположной зоны воздействия излучения лазера 4. Второй поток, содержащий инертный газ, направляют соплом 14 рассредоточенной струей 13 на ребро входной кромки таким образом, чтобы поток сформировал зону с атмосферой инертного газа и вытеснял воздух и летучие продукты процесса закалки от обрабатываемой поверхности и одновременно отводил тепло от поверхности закаливаемого слоя. Регулирование мощности лазеров 4 и 7 осуществляется системой

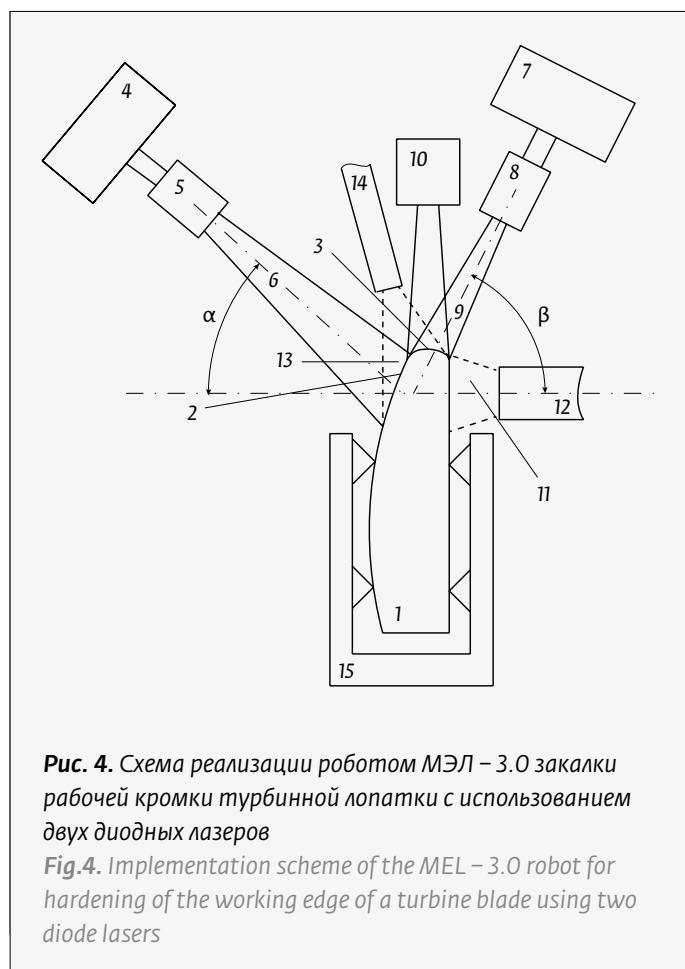


Рис. 4. Схема реализации роботом МЭЛ – 3.0 закалки рабочей кромки турбинной лопатки с использованием двух диодных лазеров

Fig.4. Implementation scheme of the MEL – 3.0 robot for hardening of the working edge of a turbine blade using two diode lasers

(for steel), during the cooling process, the material shall be cooled down at a maximum speed to prevent the troostite development.

Cooling is performed mainly due to the heat transfer to the unheated part area, and to a much lesser extent, due to the heat transfer in the form of electromagnetic radiation into the external environment and into the gas masses being in contact with the surface. To ensure constant values of heat fluxes leaving the material area during the hardening procedure, two flows of cooled gases are used. The first flow 11 is directed by a nozzle 12 with a dispersed jet to the part surface at some small distance from the edge of the hardening area from the side of the laser impact zone 7. This flow shall remove heat from the part, while compensating for its heating due to the heat influx from the hardening area from the side opposite to the laser radiation impact zone 4. The second flow containing an inert gas is directed by a nozzle 14 with a dispersed jet 13 to the rib of the leading edge, so that the flow generates an area with an inert gas atmosphere, displaces air and volatile products of the hardening process from the surface being treated and

управления по информации с датчика температуры 10 нагрева закаливаемой поверхности.

На рис. 5 приведен результат закалки рабочей кромки лопатки в одном из поперечных сечений. Твердость вершины в сечении (зона 1 рис. 5) – 48,15 HRC. Твердость на расстоянии 14 мм от вершины (зона 2 рис. 5) – 49,5 HRC. Глубина упрочненного слоя при вершине – 3,0 мм, на расстоянии 14 мм от вершины – 1,6 мм.

Компанией ООО «ТермоЛазер» разработан технический проект мобильного лазер-робота для обработки крупногабаритных объектов с использованием диодного лазера и оригинального робота с совокупной длиной звеньев до 15 метров. Разработанный лазер-робот может использоваться для монтажа или обработки, например, корпусов судов, крупных наземных и воздушных транспортных средств или крупных резервуаров.

REFERENCES

1. **Bruns P., Kubacki F.** High power diode lasers – new opportunity for applications. *Photonics Russia*. 2008; 5: 6–11. (In Russ.).
Брунс П., Кубаки Ф. Мощные диодные лазеры – новые возможности для применений. *Фотоника*. 2008; 5: 6–11.
2. **Ajhler YU., Ajhler G. I.** *Lazery. Ispolnenie, upravlenie, primenenie.* – M: Technosphaera. 2012. 496 pp. (In Russ.).
Айхлер Ю., Айхлер Г. И. *Лазеры. Исполнение, управление, применение.* – М: Техносфера. 2012. 496 с.
3. **Ullmann C.** High Power Diode Lasers For Industrial Material Processing. *Photonics Russia*. 2016; 3(57):58–62.
Ульман К. Диодные лазеры высокой мощности для промышленной обработки материалов. *Фотоника*. 2016; 3(57): 58–62.
4. **Rasheed Nema Abed.** The Thermal Management System of Laser Diode: a review. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015;10(12):5250–5260.
5. **Riedelsberger H.** High power Diode Lasers: Focus on Improved Utility. *Laser focus world*. 2019;. URL: <https://www.laserfocusworld.com/software-accessories/positioning-support-accessories/article/16556279>.
6. **Di-Hai Wu, Chung-En Zah, Xingsheng Liu.** A method of designing water-cooled horizontal array diode lasers for uniform junction temperature. *Proceedings Semiconductor Lasers and Applications VIII*; 2018; 108120 U. <https://doi.org/10.1117/12.2500701>. Event: SPIE/COS Photonics Asia, 2018, Beijing, China.
7. Patent RU 2751 784 C2. Method of laser treatment of surface of steel blades of turbines of power plants / Kolov P., Umnov V., Chukhlantsev O., Chukhlantsev D.
Патент RU2751 784 C2. Способ лазерной обработки поверхности стальных лопаток турбин энергетических установок / Колов П., Умнов В., Чухланцев О., Чухланцев Д.

АВТОРЫ

Чухланцев Дмитрий Олегович, кандидат экономических наук, Генеральный директор ООО «ТермоЛазер», г. Владимир, Россия.
Шипихин Дмитрий Алексеевич, заместитель генерального директора ООО «ТермоЛазер» по производству, г. Владимир, Россия.
Шишкин Евгений Сергеевич, инженер-технолог ООО «ТермоЛазер», г. Владимир, Россия.
Умнов Владимир Павлович, кандидат технических наук, доцент, заместитель генерального директора ООО «ТермоЛазер» по науке, г. Владимир, Россия.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы подтверждают отсутствие конфликта интересов. Все авторы ознакомлены и согласны с рукописью.

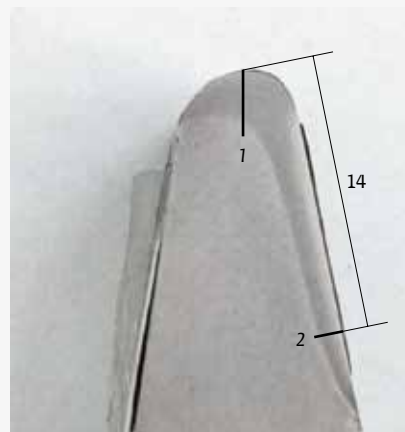


Рис. 5. Результат закалки рабочей кромки лопатки в одном из поперечных сечений

Fig. 5. Hardening results of the working edge of the blade in one of the cross sections

simultaneously removes heat from the hardened layer surface. The power of the lasers 4 and 7 is regulated by the control system according to the information from the temperature sensor 10 of the hardened surface.

Fig. 5 shows the hardening results of the blade working edge in one of the cross sections. The hardness of the top in the section (area 1 on Fig. 5) is 48.15 HRC. The hardness at a distance of 14 mm from the top (area 2 on Fig. 5) is 49.5 HRC. The depth of the hardened layer at the top is 3.0 mm, at a distance of 14 mm from the top – 1.6 mm.

TermoLaser LLC has developed an engineering design of a mobile robotic laser for processing the large-dimensioned items using a diode laser and an original robot with a total link length of up to 15 meters. The developed robotic laser can be used for mounting or processing, for example, for the ship hulls, large land and air transport vehicles or large tanks.

AUTHORS

Chukhlantsev Dmitriy O., Cand. of Sciences (Econom), CEO of TermoLaser LLC, Vladimir, Russia.
Shipikhin Dmitriy A., deputy director general of TermoLaser LLC for manufacturing, Vladimir, Russia.
Shishkin Evgeniy S., process engineer, TermoLaser LLC, Vladimir, Russia.
Umnov Vladimir P., Cand. of Sciences (Eng.), associate professor, deputy director general of TermoLaser LLC for science, Vladimir, Russia.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that they have no conflict of interest and they supplemented the manuscript in part of their work.