

ОБЗОР ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГОЛОВОК ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

М.В.Кузнецов, kuznetsov_mich@lrc.ru;
Е.В.Земляков, к.т.н.,
К.Д.Бабкин,
Институт лазерных и сварочных технологий СПбПУ

Среди рабочих инструментов, которыми оснащены лазерные технологические комплексы, важная роль отведена лазерным технологическим головкам – они обеспечивают требуемые пространственные характеристики лазерного излучения в рабочей зоне. В обзорной статье рассмотрены технологические головки ведущих мировых производителей, предназначенные для реализации технологий лазерной и лазерно-дуговой сварки, лазерной резки, термообработки и наплавки.

ВВЕДЕНИЕ

С момента изобретения первого лазера прошло более 55 лет [1]. За это время были созданы лазерные источники различных типов: газовые, твердотельные, полупроводниковые, диодные, волоконные, химические и т.д. На сегодняшний день лазерная индустрия является одной из быстро растущих отраслей мировой экономики. Ее прирост с 1970 по 2015 год составил около 12,5% [2]. Объем мирового рынка лазерных источников в 2015 году исчислялся примерно 10 млрд. долл. США при доле рынка промышленных лазеров около 4 млрд. долл. [3] (рис.1).

Наиболее крупный сегмент рынка лазерной индустрии включает лазерные источники, применяемые для лазерного раскроя металла, лазерной (лазерно-дуговой) сварки, лазерного термоупрочнения, лазерной наплавки, маркировки и гравировки. Анализ рынка лазерных источников показал, что на 2015 год CO₂-лазеры и волоконные лазеры занимали примерно 40 и 39% рынка соответственно. По сравнению с 2014 годом при снижении доли рынка CO₂-лазеров отмечен рост продаж волоконных лазеров по всем видам тех-

REVIEW OF LASER TECHNOLOGICAL HEADS FOR IMPLEMENTATION OF INDUSTRIAL LASER TECHNOLOGIES OF METAL MATERIAL WORKING

M.V.Kuznetsov, kuznetsov_mich@lrc.ru;
E.V.Zemlyakov, Candidate of Engineering,
K.D.Babkin, Institute of Laser and Welding
Technologies (SPbPU)

Depending on the tasks, which must be solved, the laser technological complexes are equipped with different operating tools. One of them includes the laser technological heads, which provide required spatial characteristics of laser radiation in working area. Technological heads of leading world manufacturers, which are intended for the implementation of technologies of laser and arc augmented laser welding, laser cutting, thermal treatment and cladding, are considered in the review article.

INTRODUCTION

More than 55 years have passed since the moment of first laser invention [1]. During this period of time the laser sources of different types have been created: gas, solid-state, semiconductor, diode, fiber, chemical lasers etc. As of today, the laser industry is one of fast growing sectors of world economy, with the average increase of about 12.5% from 1970 to 2015 [2]. The volume of world market of laser sources was about 10 billion US dollars in 2015 with the market share of industrial lasers of about 4 billion US dollars [3] (Fig. 1).

The largest market segment includes the laser sources, which are applied for laser cutting of metal, laser (arc augmented laser) welding, laser thermal hardening, laser cladding, labeling and engraving. Analysis of laser source market showed that in 2015 CO₂-lasers and fiber lasers approximately had 40% and 39% market share, respectively. In comparison with 2014 with the decrease of market share of CO₂-lasers, the growth of sales of fiber lasers used in all types of technologies (labeling – by 6%, moderate power lasers

нологических применений: маркировка на 6%, лазеры средней мощности, используемые в микрообработке на 10%, лазеры высокой мощности на 22%. Доля твердотельных лазеров по сравнению с 2014 годом не изменилась, но внутри сегмента отмечен рост продаж дисковых лазеров. Также отмечено повышение спроса на диодные лазеры, применяемые сегодня не только для поверхностного термоупрочнения, наплавки и сварки, но и для резки металлов. Расширение технологических возможностей диодных лазеров, ведущим производителем которых является компания LaserLine, стало возможным благодаря увеличению максимальной выходной мощности и качества лазерного излучения с 20 кВт при диаметре пятна в фокальной плоскости 3 мм (2013 год) до 25–40–100 кВт при диаметре пятна 0,6–2 мм (2015 год) [2, 3].

Показателен также темп роста рынка технологических лазерных систем, который за период с 1993 по 2013 годы в среднем был равен 10%. Для сравнения следует указать, что средний темп роста рынка металлообрабатывающих станков за тот же период составил около 1,3% (рис.2).

В зависимости от решаемых задач лазерные технологические комплексы оснащаются тем или иным рабочим инструментом – лазерной технологической головкой, оптическая система которой обеспечивает требуемые пространственные характеристики лазерного излучения в рабочей зоне (рис.3).

Кроме фокусировки лазерного излучения технологические головки обеспечивают подачу сопутствующих газов и материалов в зону обработки: защитных газов при сварке, рабочих газов при резке, порошков при наплавке, электродной проволоки при лазерно-дуговой сварке или лазерной сварке с присадкой. Также технологические головки могут быть оснащены системами видеонаблюдения и мониторинга технологического процесса, в том числе системами контроля положения технологической головки относительно обрабатываемого изделия.

Рассмотрим технологические головки ведущих мировых производителей, предназначенные для реализации технологий лазерной и лазерно-



Рис.1. Объемы продаж лазерных источников по сегментам рынка за 2015 год
Fig. 1. Volumes of sales of laser sources by market segments in 2015

used in microworking – by 10%, high power lasers – by 22%) is observed. In comparison with 2014, the share of solid-state lasers has not changed but inside the segment the growth of sales of disk lasers is noticed. Also, the increase of demand with regard to the diode lasers, which are now used not only for surface thermal hardening, cladding and welding but also for metal cutting, is observed. The expansion of technological capabilities of diode lasers, which are produced by the leading company LaserLine, became possible due to the increase of maximum output power and

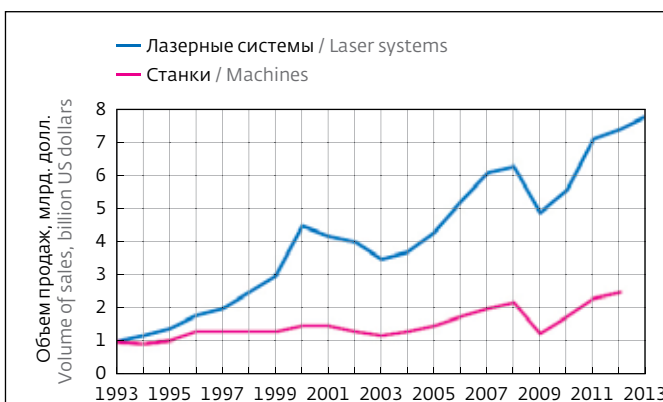


Рис.2. Объем рынка лазерных технологических систем и металлообрабатывающих станков за период с 1993 по 2013 годы

Fig. 2. Volume of the market of laser technological systems and metal-working machines for the period from 1993 to 2013

дуговой сварки, лазерной резки, термообработки и наплавки.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРНЫЕ ГОЛОВКИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ (ЛАЗЕРНО-ДУГОВОЙ) СВАРКИ

Узкий и глубокий сварной шов, характерный для лазерной сварки, получаемый за счет высокой плотности мощности лазерного излучения (10^6 – 10^7 Вт/см²) на поверхности свариваемых изделий, наряду с высокой скоростью сварки (до 20 м/мин), обеспечивают значительное снижение сварочных деформаций, повышение технологической прочности сварных соединений и производительности сварочного процесса. Преимущества лазерной сварки делают данную технологию практически незаменимой при серийном выпуске ответственных сварных конструкций. Дальнейшее развитие технологий лазерной сварки связано с увеличением максимальной мощности излучения (рис.4) используемых лазеров. Появление мощных волоконных и диодных лазеров сделало возможным реализацию целого ряда новых технологий лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварки. Наиболее интересной из них является сварка металлов больших толщин, в частности современных сложнелегированных двух- и трехфазных сталей, применяемых для строительства трубопроводов, корпусов судов, сосудов высокого давления и других ответственных конструкций [4, 5].

Использование мощных лазерных источников в составе сварочных технологических комплексов накладывает ряд требований к оптической системе лазерных головок. В первую очередь – это обеспечение термической стойкости зеркал и фокусирующих линз. Во-вторых, обеспечение надежной защиты оптической системы от конденсированных частиц и паров, вылетающих из парогазового канала с околосвуковыми скоростями. Также малый диаметр пятна нагрева (≤ 600 мкм) определяет требования к точности наведения лазерного луча на стык и ограничивает допустимый зазор между изделиями.

На рынке лазерной техники компаниями IPG [6], HighYAG [7], ScanSonic [8] и Precitec [9] представлены головки, предназначенные для сварки с мощностью излучения от 0,25 кВт (головка μ (HighYAG)) до 50 кВт (FLW-D50HP (IPG)) с длиной волны 900–1080 нм. Лазерные сварочные головки, состоящие из коллиматора, фокусирующей линзы, защитного стекла и системы подачи сжатого воздуха, опционально могут быть оснащены CCD-камерой, для точного наведения

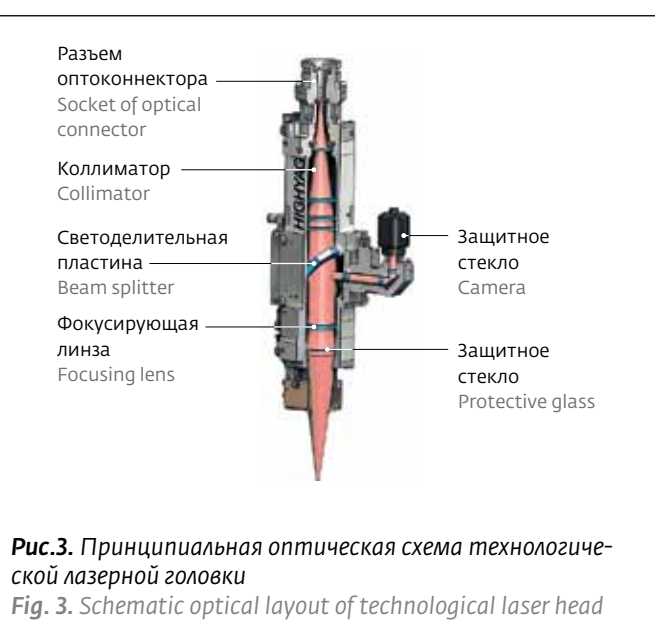


Рис.3. Принципиальная оптическая схема технологической лазерной головки
Fig. 3. Schematic optical layout of technological laser head

enhancement of laser radiation quality from 20 kW with the spot diameter in focal plane of 3 mm (2013) to 25–40–100 kW with the spot diameter of 0.6–2 mm (2015) [2, 3].

The increase rate of the market of technological laser systems is also significant; it is equal to 10% at average for the period from 1993 to 2013. For comparison it should be noted that the average increase rate of the market of metalworking machines is about 1.3% for the same period (Fig. 2).

Depending on the tasks, which must be solved, the laser technological complexes are equipped with different operating tools – laser technological head, optical system of which provides required spatial characteristics of laser radiation in working area (Fig. 3).

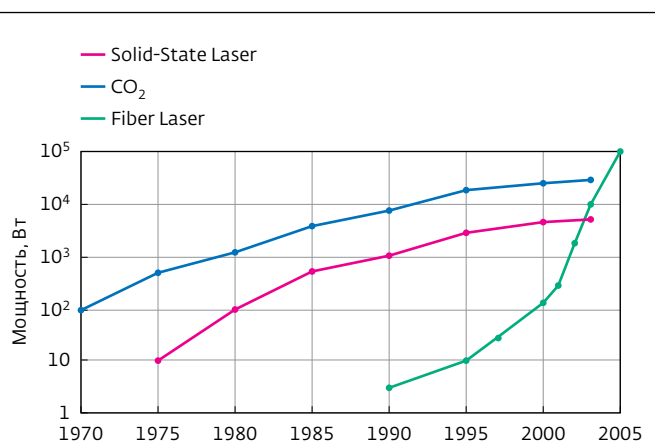


Рис.4. Рост мощности лазерных источников
Fig. 4 Growth of power of laser sources

на стык и слежения за процессом сварки в режиме реального времени, системой подачи сварочной проволоки (головки PDT и PDT-B (HighYAG); ALO1 и ALO3 (ScanSonic)), контактным (ALO1 и ALO3) или оптическим (FSO (ScanSonic)) датчиком, прижимным устройством в виде "пальцев" или дисков (FSO и RSK (HighYAG)), обеспечивающим не только плотное прилегание свариваемых образцов, но и контроль расстояния от лазерной головки до поверхности изделий. Интересен вариант исполнения сварочной системы FormWelder Plus (Precitec) [10], изготовленной на базе лазерной головки YW30 или YW52, предназначенной для сварки излучением микронной длины волны с мощностью до 6 кВт и до 20 кВт соответственно и перемещаемых вдоль осей X и Y на 50 мм (рис.5).

В линейке продукции ScanSonic также представлен наиболее простой вариант исполнения лазерной головки (BO), состоящей из коллиматора и фокусирующей линзы, рассчитанных на мощность излучения до 6 кВт. Головка опционально может быть укомплектована CCD-камерой, картриджем с защитным стеклом, модулем шторной газодинамической защиты, системой автоматического изменения фокусного расстояния, а также противоударным датчиком и иметь как прямое, так и Г-образное исполнение. Интересен вариант исполнения лазерной головки BO-SF, предназначенной для сварки с мощностью лазерного излучения до 30 кВт и изготовленной на базе головки BO. Лазерное излучение микронной длины волны формируется практически с равномерным распределением в поперечном сечении при КПД более 98%. Головка, опционально оснащенная фокусирующим зеркалом и коллиматором с различными фокусными расстояниями, предназначена для лазерной сварки металлоконструкций больших толщин в трубостроении, судостроении и других отраслях промышленности (рис.6) [11].

Компания IPG выпускает лазерные головки FLW-D30 (до 6 кВт) и FLW-D50 в модификациях L (до 10 кВт), S (до 30 кВт) и HP (до 50кВт) в Г-образном, прямом и стандартном (без CCD-камеры) исполнении. Кроме защитного сопла, модуля cross-jet, датчика температуры и загрязнения фокусирующей линзы, оптического датчика слежения за стыком и устройства для подачи проволоки, головки опционально могут быть оснащены модулями сканирования лазерного излучения по траекториям в виде линии, круга и "восьмерки" (Wobble), делителем излучения на два луча с одинаковой мощностью (Dual Spot Module) и модулем, обеспечивающим равномерное распределение лазерного излучения (Beam Shaper



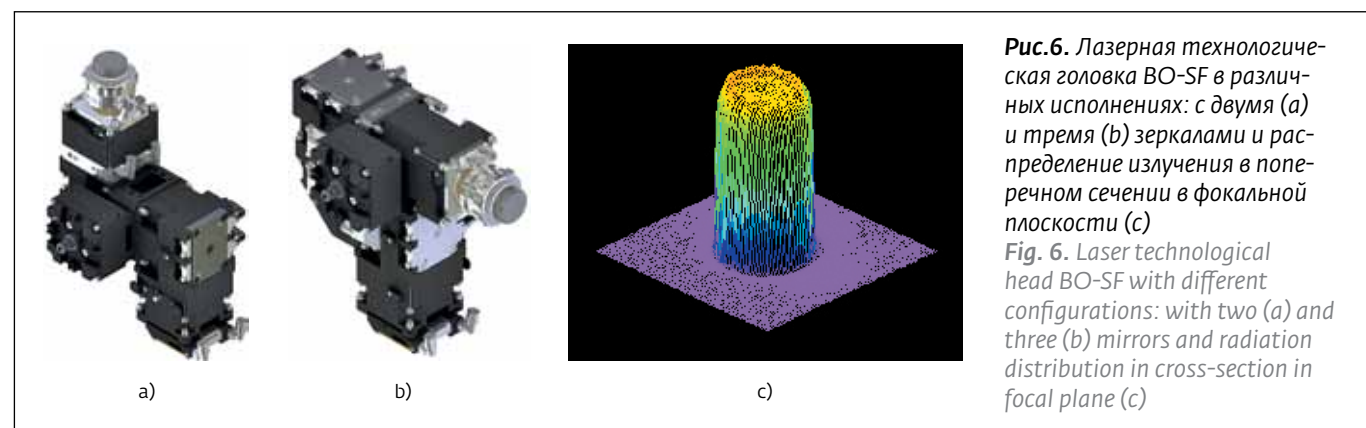
Рис.5. Сварочная система FormWelder Plus на базе лазерной головки YW52
Fig. 5. Welding system FormWelder Plus based on laser head YW52

In addition to focusing of laser radiation, the technological heads supply associated gases and materials to the treatment area: shielding gases – in case of welding, operating gases – in case of cutting, powders – in case of cladding, electrode wire – in case of arc augmented laser welding or laser welding with additive. Also, the technological heads can be equipped with the systems of video surveillance and monitoring of technological process, including the systems of control of technological head position in relation to workpiece.

Let us consider the technological heads of leading world manufacturers, which are intended for the implementation of technologies of laser and arc augmented laser welding, laser cutting, thermal treatment and cladding.

TECHNOLOGICAL LASER HEADS FOR LASER (ARC AUGMENTED LASER) WELDING

Narrow and deep welding joint, which is typical for laser welding and can be obtained at the expense of high density of laser radiation power (10^6 – 10^7 W/cm²) on the surface of welded workpieces, together with high welding speed (up to 20 m/min) provide the significant reduction of welding deformations, increase of technological efficiency of welded joints and productivity of welding process. Advantages of laser welding make this technology practically irreplaceable in case of mass production of critical welded structures. The further development of laser welding technologies is associated with the increase of maximum radiation power (Fig. 4) of used lasers. The occurrence of high-power fiber and diode lasers made



Module), предназначенными для передачи излучения мощностью до 10 кВт [6].

Лазерные сварочные головки, выпускаемые компанией LaserLine для использования с диодным лазером, отличаются равномерным распределением мощности лазерного излучения в поперечном сечении в форме круга или прямоугольника [12]. Дополнительно головки компании LaserLine оснащаются схожими с головками ScanSonic и HighYAG компонентами.

Компания Kugler изготавливает сварочные головки LK190W, LK390F и LK390W, последняя из которых предназначена для работы с излучением мощностью более 40 кВт. Головки могут быть укомплектованы фокусирующими зеркалами с фокусным расстоянием от 150 мм до 600 мм, системой изменения фокусного расстояния в автоматизированном режиме, а также зеркалом-делителем излучения на два луча. На базе лазерной головки LK390W изготовлена головка для лазерно-дуговой сварки LK390H. Также компания изготавливает лазерные головки для микросварки с диаметром пятна лазерного излучения в фокальной плоскости менее 10 мкм [13].

Лазерные сварочные головки AP44 и AP54 (рис.7), изготавливаемые компанией Reis и обладающие быстросъемным креплением для фиксации к роботу-манипулятору, предназначены для работы с мощностью лазерного излучения до 6 кВт и до 12 кВт соответственно.

Основные отличия данных головок от представленных выше – наличие диодной подсветки и быстросъемных магнитных креплений некоторых из модулей: контактно-измери-

it possible to implement a number of new technologies of laser and hybrid arc augmented laser welding. The most interesting of them is the welding of metals with large thickness, in particular modern complex alloyed dual – and three-phase steel used for the construction of pipelines, ship hulls, high-pressure vessels and other critical structures [4].

Use of such high-power laser sources in the structure of welding technological complexes poses a number of requirements to the optical system of laser heads. First of all, these requirements include the provision of thermal resistance of mirrors and lenses. Secondly, they include provision of reliable protection of the optical system against condensed particles and vapors emerging from steam-gas channel with near-sonic speed. Also, small diameter of heating spot ($\leq 600 \mu\text{m}$) determines the requirements to accuracy of laser beam pointing on joint and limits the allowable gap between workpieces.

The companies IPG [6], HighYAG [7], ScanSonic [8] and Precitec [9] offer the heads, which are intended for welding with the radiation power from 0.25 kW (head μ (HighYAG)) up to 50 kW (FLW-D50HP (IPG)) with the



тельного модуля, оптического датчика слежения за стыком и модуля диодного освещения. Дополнительно головки также могут быть оснащены системой подачи проволоки, соплами для некоаксиальной и коаксиальной защиты шва. Компанией Reis представлена головка для лазерно-дуговой сварки [14], выполненная на базе лазерной головки AP54.

При изготовлении изделий машиностроения (теплообменных аппаратов, герметичных узлов насосов и пр.) возникают задачи по проведению обработки в труднодоступных местах. Для этого рядом компаний (Nutech, GTV, IWS, RPM и др.) разрабатывается специальный технологический инструмент [15].

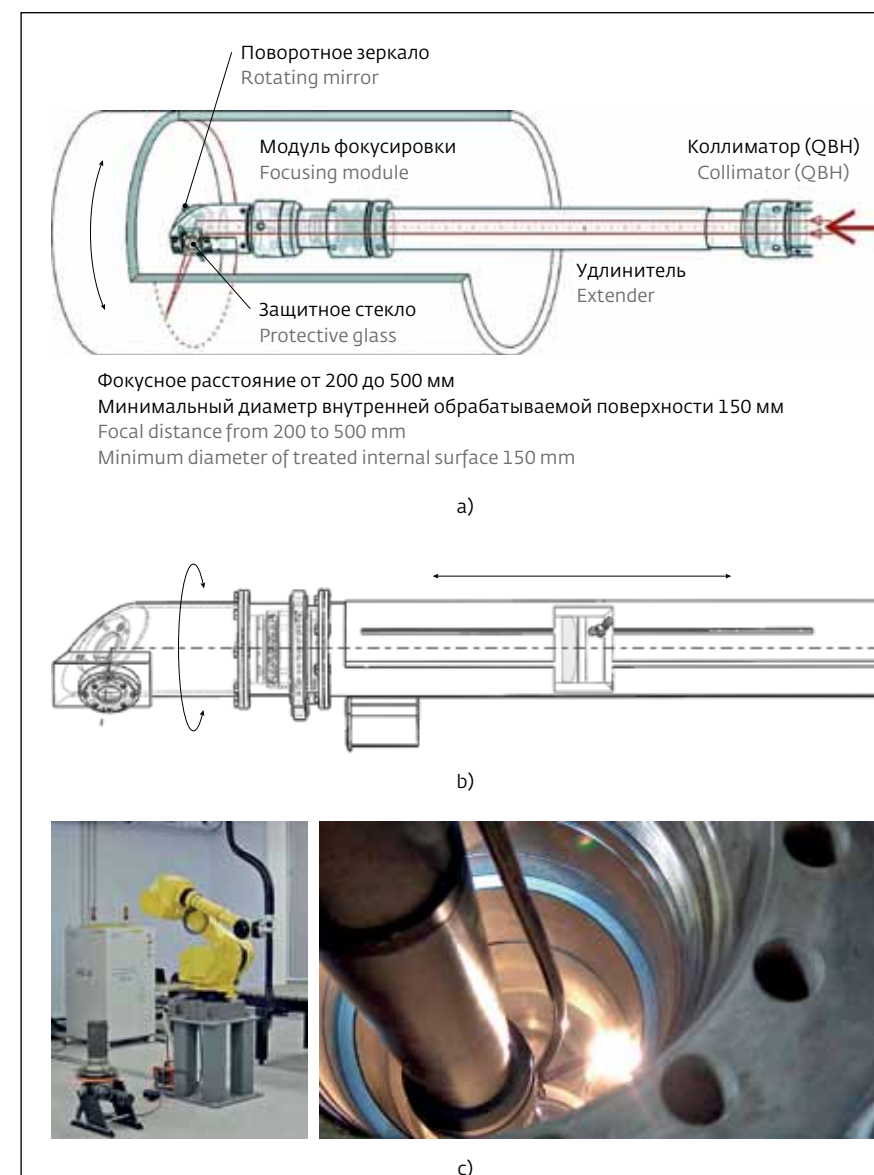
Примером такого технологического инструмента может служить лазерная головка с допустимой лучевой нагрузкой до 3 кВт с глубиной досягаемости в базовой комплектации до 1000 мм, разработанная в Институте лазерных и сварочных технологий [16]. Головка имеет крепления для установки на линейные манипуляторы, промышленные роботы и другие средства доставки.

На рис.8 представлены схемы головок для сварки поворотных и неповоротных стыков (и поверхностной термообработки) и примеры ее использования при приварке тонкостенной обечайки к корпусу насоса.

На рис.9 приведен общий вид головки с вращающимся поворотным зеркалом для сварки внутренних неповоротных стыков, установленной на роботизированном модуле доставки. Такая концепция практически не имеет ограничений по глубине досягаемости.

Одним из малочисленных отечественных производителей лазерных головок является НТЦ "Электроресурс", сотрудники которого изготавливают лазерную головку VF001MA для работы с волоконными лазерами мощностью до 3 кВт. Головка обладает возможностью изменения фокус-

wavelength of 900-1080 nm at the market of laser equipment. Laser welding heads consisting of collimator, focusing lens, protective glass and system of feed of compressed air can be optionally equipped with CCD camera for the accurate pointing on joint and tracking the welding process on a real-time basis, system of supply of welding wire (heads PDT and PDT-B (HighYAG); ALO1 and ALO3 (ScanSonic)), contact (ALO1 and ALO3) or optical (FSO (ScanSonic)) sensor, holding down device in the form of "fingers" or disks (FSO and RSK (HighYAG)) providing not only tight adjoining



ного расстояния в автоматизированном режиме и может быть оснащена модулями на магнитном креплении с датчиком контроля расстояния до обрабатываемого изделия [17].

Также необходимо отметить сканирующие системы, использование которых позволяет повысить производительность сварки примерно на 25%. Из представленных на рынке сканирующих систем можно выделить IntelliWeld PR и IntelliWeld II FT (с F-theta линзой) (ScanLab), предназначенные для работы с лазерным излучением мощностью до 8 кВт. Компания ScanLab также производит сканирующие системы IntelliScan III 10 и IntelliScan III 20, предназначенные для работы с различными типами лазеров (диодный, волоконный, твердотельный и CO₂) с мощностью 150 Вт и 1000 Вт и рабочими зонами 120×120 мм² (f=163 мм, d=32 мкм) и 60×60 мм² (f=160 мм и d=16 мкм) соответственно. Компания Trumpf изготавливает сканирующие системы PFO, предназначенные для лазерной сварки, резки и микрообработки. Системы PFO модификации 14, 20 и 33 используют для 2D обработки изделий лазерным излучением мощностью от 2 до 8 кВт (диодный, волоконный, твердотельный лазеры) со скоростью от 22 до 78 м/с при рабочей зоне 286×230 мм (f=420 мм; PFO 14, PFO 20) и 320×190 мм (f=450 мм, PFO 33). В линейке PFO также представлена сканирующая система для 3D обработки (PFO 3D), которую можно использовать в составе комплекса на базе диодного лазера с максимальной выходной мощностью 8 кВт. В процессе обработки PFO 3D перемещает лазерный луч в фокальной плоскости (f=1200 мм) со скоростью до 22 м/с с размерами рабочей зоны 780×530 мм при возможности изменения положения фокальной плоскости по вертикальной оси на расстояние ±475 мм [18].

Сканирующая система, изготавливаемая компанией Reis, предназначена для сварки с максимальной мощностью лазерного излучения до 15 кВт и выпускается с фокусным расстоянием от 300 мм до 1000 мм в зависимости от комплектации.

Для лазерного излучения с мощностью 8 кВт и длиной волны 1020-1080 нм предназначена сканирующая система RLSK (HighYAG), оснащенная быстросменными стеклами для защиты зеркал и коллиматора, системой cross-jet, системой контроля целостности стекла и сканирующей системой головки RLSK, CCD-камерой и системой отверстий для фиксации. Сканирующая система используется для 3D сварки с рабочей зоной 200×300×200 мм (Ш×Д×В). Перемещение лазерного излучения в рабочей зоне реализуется при скорости и точности позиционирования: до 5 м/с (1 м/с в процессе обработки)

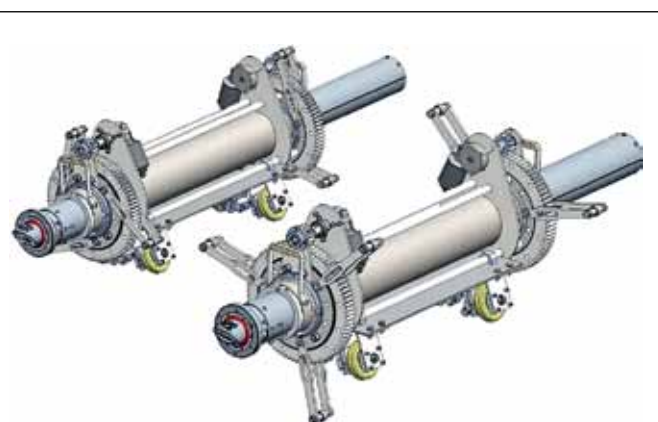


Рис.9. Поворотная технологическая головка на роботизированном модуле доставки

Fig. 9. Rotating technological head on robotized delivery module

of welded samples but also control of the distance of laser head to workpiece surface. The variant of welding system FormWelder Plus (Precitec) [10] made on the basis of laser head YW30 or YW52, which are intended for the welding by radiation with micron wavelength and power up to 6 kW and 20 kW, respectively, and moved along the axes X and Y by 50 mm, is of interest (Fig. 5).

ScanSonic product range also contains the simplest variant of laser head (VO) consisting of collimator and focusing lens, which are rated at the radiation power up to 6 kW. The head can be optionally completed with CCD camera, cartridge with protective glass, module of curtain gas-dynamic protection, system of automatic variation of focal distance and shock-proof sensor; it has straight and L-shaped execution. The variant of laser head BO-SF, which is intended for the welding with laser radiation power up to 30 kW and made on the basis of VO head, is of interest. Laser radiation with micron wavelength is formed practically with homogeneous distribution in cross-section with the efficiency factor of more than 98%. The head, which is optionally equipped with focusing mirror and collimator with different focal distances, is intended for laser welding of metal structures with large thickness in pipe building, ship building and other branches of industry (Fig. 6) [11].

IPC company produces the laser heads FLW-D30 (up to 6 kW) and FLW-D50 with the modifications L (up to 10 kW), S (up to 30 kW) and HP (up to 50 kW) in L-shaped, straight and standard (without CCD camera) configuration. In addition to protective shield cup, cross-jet module, temperature sensor and focusing lens contamination sensor, optical sensor of joint

и ±0,2 мм (вдоль осей X и Y) и ±0,5 мм (вдоль оси Z) соответственно.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРНЫЕ ГОЛОВКИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ

Технология лазерного раскроя благодаря высокой плотности мощности лазерного излучения, превышающей 10⁷ Вт/см², имеет ряд преимуществ перед другими термическими способами резки. Это высокая производительность, низкая погонная энергия, узкая ширина реза и узкая зона термического влияния, высокое качество обработанной поверхности и наряду с этим возможность автоматизации процесса. Технология используется в заготовительном производстве при изготовлении элементов из металлического листового и профильного сортамента (CO₂-, волоконные, твердотельные лазеры), а также из пластиков (CO₂-лазеры) в различных отраслях промышленности.

Использование в составе технологических комплексов современных лазерных источников накладывает определенные требования к лазерным головкам: обеспечение высокой термической стойкости компонентов оптической системы, возможность фокусировки лазерного излучения с минимальным диаметром пятна, контроль давления рабочих газов, целостности элементов оптической системы и расстояния до обрабатываемой поверхности.

Для реализации лазерной резки компания Precitec изготавливает головки, предназначенные для работы в составе комплексов на базе CO₂-, диодных, твердотельных и волоконных лазеров [19].

Лазерные головки, работающие в составе комплексов на базе CO₂-лазеров с максимальной мощностью от 3 до 8 кВт в зависимости от комплектации могут быть оснащены датчиками контроля давления рабочих газов, температуры, загрязнения или повреждения фокусирующей линзы (модели HP1,5" и HP2"), а также поставляются в стандартном исполнении без датчиков (CM2" и M1,5"). Все головки обладают возможностью регулировки фокусного расстояния. Головки, предназначенные для лазерной резки диодными, твердотельными и волоконными лазерами с максимальной мощностью от 500 Вт до 8 кВт, оснащены картриджем с быстросменным защитным стеклом и возможностью регулировки фокусного расстояния. В зависимости от комплектации головки могут иметь датчик контроля температуры фокусирующей линзы (MiniCutter, SpeedCutter и LightCutter) и CCD-камеру для слежения за процессом резки (FineCutter). Отдельно стоит отметить универсальную лазерную головку FineCutter, предназначенную для передачи лазерного излу-

tracking and device for wire supply, the heads can be optionally equipped with the modules of laser radiation scanning by trajectories in the form of line, circle and figure-eight (Wobble), radiation splitter into two beams with the same power (Dual Spot Module) and module providing the homogeneous distribution of laser radiation (Beam Shaper Module), which are intended for the transmission of radiation with the power up to 10 kW [6].

Laser welding heads produced by LaserLine company for the use with diode laser differ in homogeneous distribution of laser radiation power in cross-section in the form of circle or rectangle [12]. The heads are additionally equipped with the components, which are similar to ScanSonic and HighYAG.

Kugler company makes the welding heads (LK190W, LK390F and LK390W), last-mentioned head is intended for the work with radiation with the power of more than 40 kW. The heads can be completed with focusing mirrors with the focal distance of 150 mm to 600 mm, system of variation of focal distance in automated mode and mirror-radiation splitter into two beams. The head for arc augmented laser welding LK390H is made on the basis of the head LK390W. Also, the company produces laser heads for microwelding with the diameter of laser radiation spot in focal plane less than 10 μm [13].

Laser welding heads AP44 and AP54 (Fig. 7) produced by Reis company, which have quick-detachable fastener for the fixation to manipulating robot, are intended for the operation with laser radiation power up to 6 kW and up to 12 kW, respectively.

The main differences of these heads from above-mentioned heads consist in the presence of diode illumination and quick-detachable magnetic fasteners of some modules: contact-measuring module, optical sensor of joint tracking and module of diode illumination. Also, the heads can be optionally equipped with the system of wire feed, nozzles for non-coaxial and coaxial joint protection. The head for arc augmented laser welding based on the laser head AP54 is offered by Reis company [14].

When making the products for mechanical engineering (heat exchangers, air-tight units of pumps etc.), the tasks associated with the treatment in hard-to-reach places occur. For this reason, several companies (Nutech, GTV, IWS, RPM etc.) develop the special technological tool [15].

The laser head with allowable radiation dose up to 3 kW and accessibility depth in basic configuration up to 1000 mm developed at the Institute of Laser and Welding Technologies serves as the instance of such technological tool [16]. The head has fasteners for the

чения с длиной волны 255, 355, 515 нм; 1,064, 1,552 и 10,6 мкм.

Интересен вариант системы лазерной резки FormCutter Plus, оснащенной направляющими с рабочим полем вдоль осей X и Y 50×50 мм² и обеспечивающей высокую точность резки даже при использовании в составе роботизированного комплекса. Система лазерной резки выполнена на базе головки SolidCutter, используемой при максимальной мощности излучения с длиной волны 900–1080 нм до 4 кВт, и может быть изготовлена с фокусным расстоянием коллиматора 75 мм и 100 мм и фокусирующей линзы 75 мм, 100 мм и 125 мм (рис.10).

Наибольшего внимания достойна головка ProCutter, предназначенная для лазерной резки металлов и сплавов при мощности лазерного излучения до 8 кВт и длиной волны 1030–1090 нм. Головка обладает функцией автоматической или ручной (в зависимости от исполнения, рис.11) регулировки фокусного расстояния, LED-дисплеем для визуального контроля давления, температуры, загрязнения оптической системы и движения в процессе работы, а также возможностью передачи данных с датчиков контроля на сотовый телефон или планшет через Bluetooth [20].

Интересна лазерная головка Vimo FSC (HighYAG), предназначенная для резки с мощностью лазерного излучения до 8 кВт (волоконный, твердотельный лазер) при КПД передачи излучения более 97% (1064 нм). Головка обладает возможностью изменения фокусного расстояния и диаметра лазерного излучения (рис.12).

Также компанией HighYAG изготовлена головка для лазерной резки при максимальной мощности до 0,25 кВт с длиной волны 900–1080 нм. Головка

installation on linear manipulators, industrial robots and other delivery systems.

Layouts of the heads for welding of roll and non-roll joints (and surface thermal treatment) and examples of their use during welding of thin-wall shell ring to pump casing are given in Fig. 8.

The general view of the head with rotating deflecting mirror for welding of internal non-roll joints installed on robotized delivery module is given in Fig. 9. Such concept practically does not have restrictions by accessibility depth.

Scientific and Technical Center "Electroresurs" is one of few domestic manufacturers of laser heads; its workers produce the laser head VF001MA for the operation with fiber lasers with the power up to 3 kW. The head has capability of variation of focal distance in automatic mode and it can be equipped with the modules based on magnetic fastening with the sensor of control of distance to treated workpiece [17].

Also, we should mention the scanning systems, use of which allows enhancing the productivity of welding approximately by 25%. The following scanning systems which are offered at the market can be marked out: IntelliWeld PR and IntelliWeld II FT (with F-theta lens) (ScanLab) intended for the operation with laser radiation with the power up to 8 kW. The company ScanLab also produces scanning systems IntelliScan III 10 and IntelliScan III 20, which are intended for the operation with different types of lasers (diode, fiber, solid-state and CO₂-lasers) with the power of 150 W and 1000 W and working areas 120×120 mm² (f=163 mm, d=32 μm) and 60×60 mm² (f=160 mm and d=16 μm), respectively. The company Trumpf produces the scanning systems PFO, which are intended for laser welding, cutting and micro-working. The systems PFO of modifications 14, 20 and 33 are used for 2D treatment of workpieces by laser radiation with the power of 2 to 8 kW (diode, fiber, solid-state laser) with the speed of 22 to 78 m/s in working area 286×230 mm² (f=420 mm; PFO 14, PFO 20) and 320×190 mm² (f=450 mm, PFO 33). The scanning system for 3D treatment (PFO 3D) is also offered in PFO product range; it can be used in the structure of the complex based on diode laser with maximum output power of 8 kW. In the process of treatment, PFO 3D moves the laser beam in focal plane (f=1200 mm) with the speed up to 22 m/sec and dimensions of working area 780×530 mm², with the capability of variation of focal plane position along vertical axis at the distance ±475 mm [18].

The scanning system made by Reis company is intended for welding with maximum power of laser radiation up to 15 kW and produced with focal distance of 300 mm to 1000 mm depending on configuration.



Рис.11. Технологическая лазерная головка ProCutter (Precitec) с функцией автоматизированного (а) и ручного (б) изменения фокусного расстояния
Fig. 11. Technological laser head ProCutter (Precitec) with function of automatic (a) and manual (b) variation of focal distance

оснащена CCD-камерой и возможностью изменения положения фокальной плоскости относительно сопла по оси Z на величину ±5 мм. Головки для лазерного раскроя при мощности излучения до 1 кВт (D30 Compact) и до 12 кВт (FLC-D30) выпускает компания IPG. Лазерная головка FLC-D30 оснащена защитным стеклом с системой контроля, соплом с датчиком контроля высоты, возможностью ручного и автоматизированного перемещения фокусной линзы вдоль вертикальной оси, Ethernet соединением и коллиматором с диафрагмой и системой охлаждения и предназначена для лазерного раскроя стали, алюминиевых, медных сплавов и латуни. Опционально лазерная головка может быть оснащена коаксиальной камерой.

Компанией LaserLine на рынке представлена лазерная головка для раскроя нержавеющей стали и гальванически обработанных листов толщиной до 3 мм с диаметром пятна излучения, генерируемого диодным лазером, равным 150 мкм. Головка оснащена защитным стеклом, емкостным или контактным датчиком и датчиком контроля разрушения фокусирующей линзы.

The scanning system RLSK (HighYAG) equipped with quick-change glasses for the protection of mirrors and collimator, cross-jet system, system of integrity control of glass and RLSK head scanning system, CCD camera and system of apertures for fixation is intended for laser radiation with the power of 8 kW and wavelength of 1020–1080 nm. The scanning system is used for 3D welding with the working area 200×300×200 mm (W×L×H). The movement of laser radiation in working area is implemented at the speed and positioning accuracy: up to 5 m/sec (1 m/sec in the process of treatment) and ±0.2 mm (along the axes X and Y) and ±0.5 mm (along the axis Z), respectively.

TECHNOLOGICAL LASER HEADS FOR LASER CUTTING

Due to high density of laser radiation power, which exceeds 10⁷ W/cm², the technology of laser cutting has following advantages in comparison with other thermal methods of cutting: high efficiency, low rate of energy input, narrow cutting width and heat-affected area, high quality of treated surface and capability of process automation; it is used in blank production when making the elements of metal sheets and sections (CO₂, fiber, solid-state lasers) and plastics (CO₂-lasers) in various sectors of industry.

The use of modern laser sources in the structure of technological complexes poses certain requirements to laser heads: provision of high thermal resistance of optical system components, capability of focusing of laser radiation with minimum spot diameter, control of working gas pressure, integrity of optical system elements and distance to treated surface.

For the purpose of implementation of laser cutting, the company Precitec makes the heads, which are intended for the operation in the structure of complexes based on CO₂, diode, solid-state and fiber lasers [19].

The laser heads operating in the structure of complexes based on CO₂-lasers with the maximum power of 3 to 8 kW depending on configuration can be equipped with the sensors of control of working gas pressure, temperature, contamination or damage of focusing lens (models HP1,5" and HP2"); they are supplied in standard configuration without sensors (CM2" and M1,5"). All heads have the capability of adjustment of focal distance. The heads intended for laser cutting by diode, solid-state and fiber lasers with the maximum power of 500 W to 8 kW are equipped with the cartridge with quick-change protective glass and they have the capability of adjustment of focal distance. Depending on arrangement, the heads can be equipped with the sensor of control of focusing lens



Рис.10. Система лазерной резки FormCutter Plus
Fig. 10. System of laser cutting FormCutter Plus



a)

b)

Рис.12. Лазерная технологическая головка Bimo FSC с функциями изменения фокусного расстояния (a) и диаметра луча (b)
Fig. 12. Laser technological head Bimo FSC with functions of variation of focal distance (a) and beam diameter (b)

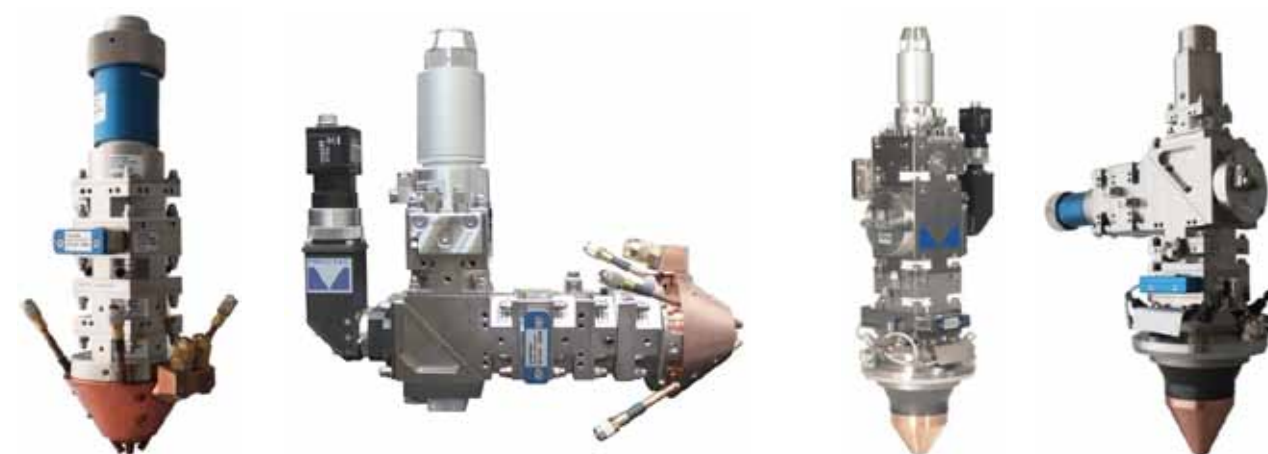
Также интересны технологические лазерные головки LK190C и LK390C, представленные компанией Kugler, работающие с мощностью излучения до 8 кВт. Головки оснащены емкостным датчиком контроля расстояния до обрабатываемого изделия и имеют возможность юстировки сопла вдоль осей X, Y и Z в ручном или автоматизированном режиме.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРНЫЕ ГОЛОВКИ ДЛЯ НАПЛАВКИ

Высококонцентрированное лазерное излучение, генерируемое современными лазерными источниками, при лазерной наплавке обладает следующими преимуществами перед иными источниками нагрева: высокой производительностью, низким коэффициентом перемешивания основного металла с наплавляемым, минимальной

temperature (MiniCutter, SpeedCutter and LightCutter) and CCD camera for the monitoring of cutting process (FineCutter). The universal laser head FineCutter intended for the transmission of laser radiation with the wavelength of 255, 355, 515 nm; 1.064, 1.552 and 10.6 μm should be mentioned separately.

The variant of laser cutting system FormCutter Plus is of interest; it is equipped with the guide ways with working field along the axes X and Y 50x50 mm² and it provides high accuracy of cutting even in case of use in the structure of robotized complex. The system of laser cutting is based on the head SolidCutter used at the maximum radiation power with the wavelength 900-1080 nm up to 4 kW; it can be made with the focal distance of collimator of 75 mm and 100 mm and focusing lens of 75 mm, 100 mm and 125 mm (Fig. 10).



a)

b)

Рис.13. Технологические лазерные наплавочные головки YC30 (a) и YC52 (b) с различным исполнением подачи порошка
Fig. 13 Technological laser cladding heads YC30 (a) and YC52 (b) with different configuration of powder feed

зоной термического влияния, низкой погонной энергией, низким уровнем остаточных деформаций и локальностью обработки изделия.

Лазерные головки, изготавливаемые для реализации технологии лазерной наплавки должны обладать оптической системой с высокой термической стойкостью, системой точной подачи наплавляемого материала в зону воздействия лазерного излучения, обеспечивающей высокий коэффициент использования материала, а также возможностью варьирования диаметров пятна нагрева и струи порошка в фокальной плоскости в широком диапазоне для обеспечения как прецизионной, так и производительной наплавки.

Компанией Precitec представлены варианты исполнения головок для лазерной наплавки с коаксиальной подачей порошка через четыре сопла



a)

b)

Рис.14. Лазерные головки с коаксиальной кольцевой (a) и некоаксиальной (b) подачей порошка
Fig. 14 Laser heads with coaxial ring (a) and non-coaxial (b) powder feed

The head ProCutter deserves the special attention; it is intended for laser cutting of metals and alloys at the power of laser radiation up to 8 kW and wavelength 1030-1090 nm. The head has the function of automatic or manual (depending on configuration,



Рис.15. Головки для интеграции в лазерные комплексы: лазерная наплавочная головка (а), наплавочное сопло с коаксиальной кольцевой подачей порошка (b) и сопло с коаксиальной подачей порошка через сопла (с)
Fig. 15 Heads for integration into laser complexes: laser cladding head (a), cladding nozzle with coaxial ring powder supply (b) and nozzle with coaxial powder feed through nozzles (c)

и кольцевое сопло (YC30 и YC52) (рис.13) и некоаксиальной (рис.14) подачей порошка. Головки отличаются максимальной мощностью транспортируемого лазерного излучения: 2 кВт и 6 кВт соответственно длине волны.

Минимальный диаметр струи порошка в области перетяжки в случае его подачи через четыре сопла и при некоаксиальной подаче (головки YC30 и YC52) равен 2 мм, при струйной кольцевой подаче порошка – 0,7 мм.

Лазерные головки с коаксиальной подачей порошка, представленные компанией LaserLine,



Рис.16. Лазерная головка CoaxII для наплавки с щелевой подачей порошка
Fig. 16. Laser heads CoaxII for cladding with slot powder supply

Fig. 11) adjustment of focal distance, LED display for visual control of pressure, temperature, contamination of optical system and movement in the working process, and it has capability of data transmission from control sensors to cell phone or tablet through Bluetooth [20].

The laser head Bimo FSC (HighYAG) intended for cutting with the power of laser radiation up to 8 kW (fiber, solid-state laser) with the efficiency factor of radiation transmission of more than 97% (1064 nm) is of interest. The head has the capability of variation of focal distance and diameter of laser radiation (Fig. 12).

Also, HighYAG company produces the head for laser cutting at maximum power up to 0.25 kW and wavelength 900–1080 nm. The head is equipped with CCD camera and it has capability of variation of focal plane position relative to nozzle along the axis Z at ± 5 mm. The heads for laser cutting with the radiation power up to 1 kW (D30 Compact) and up to 12 kW (FLC-D30) are produced by the company IPG. The laser head FLC-D30 is equipped with protective glass with control system, nozzle with the sensor of height control, it has capability of manual and automatic movement of focusing lens along the vertical axis, Ethernet connection and collimator with diaphragm and cooling system; this head is intended for laser cutting of steel, aluminum, copper alloys and brass. The laser head can be optionally equipped with coaxial camera.

LaserLine company offers the laser head for cutting of stainless steel and galvanically treated sheets with the thickness up to 3 mm with the diameter of radiation spot generated by diode laser, which is equal to 150 μ m at the market. The head is equipped with pro-

предназначены для работы с диодными лазерами и имеют равномерное распределение лазерного излучения в поперечном сечении в форме круга или прямоугольника.

Лазерные наплавочные головки, производимые компанией Reis, в зависимости от комплектации могут быть оснащены соплами с коаксиальной кольцевой или струйной (через три сопла) подачей, изготавливаемыми компанией ILT (Fraunhofer). Головки предназначены для интеграции в лазерные комплексы на базе диодных, волоконных и твердотельных лазеров с максимальной выходной мощностью 5 кВт, обеспечивая ширину наплавленного слоя от 0,2 мм до 4 мм в зависимости от схемы подачи и используемого лазерного источника (рис.15).

Сотрудниками IWS (Fraunhofer) изготовлены сопла серии Coax для коаксиальной кольцевой подачи порошка при наплавке с мощностью лазерного излучения 3–8 кВт и производительностью 10–150 г/мин в зависимости от исполнения. Также IWS производит сопла для некоаксиальной подачи и для щелевой симметричной подачи порошка Coax II с возможностью изменения ширины щели (рис.16). Сопло обеспечивает наплавку валика с шириной 8–22 мм. Головки предназначены для использования в составе технологических комплексов, изготовленных на базе CO₂, диодного, волоконного, твердотельного лазеров мощностью до 10 кВт.

Также интересен вариант исполнения лазерной головки для лазерной наплавки с коаксиальной подачей проволоки CoaxBrazer (Precitec) [21] и CoaxWire (IWS, Fraunhofer). В случае использования головки CoaxBrazer наплавка осуществляется при кольцевом распределении мощности лазерного излучения, обеспечивающем предварительный подогрев подложки с целью улучшения ее сцепления с наплавляемым материалом. Головка CoaxWire оснащена делителем лазерного луча на три сходящихся в зоне обработки пучка и при использовании проволоки диаметром 0,4–1,6 мм и максимальной мощности излучения 4 кВт обладает производительностью 3 кг/ч. Опционально головка может быть оснащена CCD-камерой и пиро-

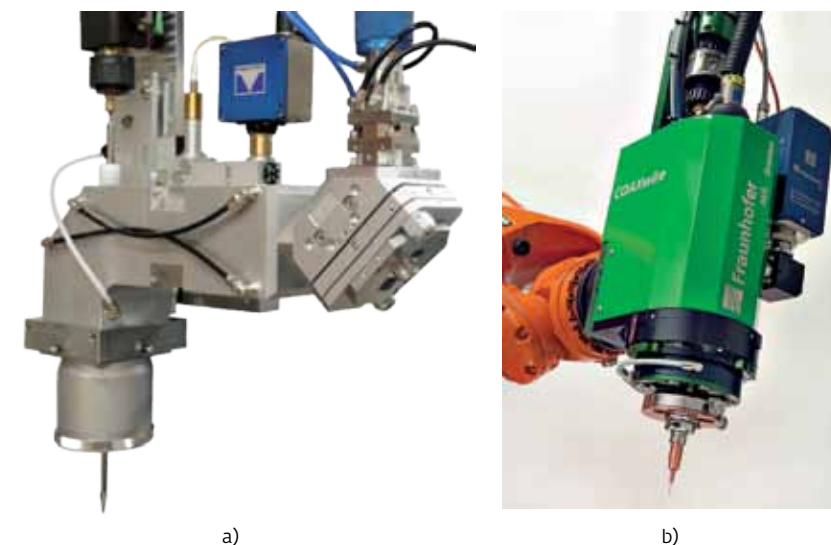


Рис.17. Лазерные головки с коаксиальной подачей проволоки: а) – CoaxBrazer; б) – CoaxWire
Fig. 17 Laser heads with coaxial wire supply: a) – CoaxBrazer; b) – CoaxWire

protective glass, capacitance or contact sensor and sensor of control of focusing lens damage.

Also, the technological laser heads LK190C and LK390C presented by Kugler, which operate with the radiation power up to 8 kW, are of interest. The heads are equipped with capacitance sensor of control of the

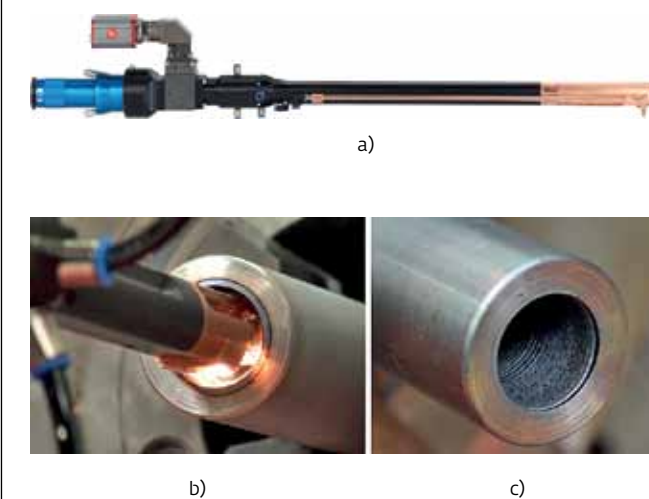


Рис.18. Головка для наплавки в труднодоступных местах: а) – общий вид; б) – процесс восстановления внутренней цилиндрической поверхности; в) – поверхность после обработки
Fig. 18. Head for cladding in hard-to-reach places: a) – general view; b) – process of restoration of internal cylindrical surface; c) – surface after treatment

метром. Технология лазерной наплавки с использованием проволоки обладает рядом преимуществ перед технологией лазерной наплавки металлическим порошком из-за доступности сварочной проволоки на отечественном рынке и приближающегося к 100% коэффициента использования проволоки. Головка предназначена для использования с волоконными, твердотельными и диодными лазерными источниками (рис.17). На рис.18. представлена лазерная головка для восстановления внутренних, труднодоступных поверхностей от компании Nutech.

Сотрудниками CLA и IWS (Fraunhofer) изготовлены головки ID, ID-2 и Coaxid для наплавки внутренних цилиндрических поверхностей с минимальным диаметром 127 мм, 88,9 мм и 100 мм соответственно и рабочим ходом в стандартном исполнении 1 м при использовании мощности лазерного излучения до 6 кВт (диодный лазер; головка ID) и до 3 кВт (дисковый, волоконный, твердотельный лазер; головки ID-2 и Coaxid). Головки обеспечивают наплавку с производительностью 75 г/мин, 60 г/мин и 50 г/мин при ширине наплавленного слоя до 8 мм, 6 мм и 4 мм соответственно.

Отдельно хотелось бы отметить головку CoaxPowerLine, предназначенную для лазерной наплавки диодным лазером с мощностью излучения до 15 кВт с сопутствующим индукционным подогревом мощностью индуктора от 20 до 50 кВт. Использование индукционного подогрева повышает производительность наплавки до 18 кг/ч. По оценкам производителей, применение индукционного нагрева обрабатываемого изделия позволяет при мощности лазерного излучения 4 кВт получать производительность, сравнимую с производительностью наплавки при мощности лазерного излучения 8-10 кВт (рис.19).

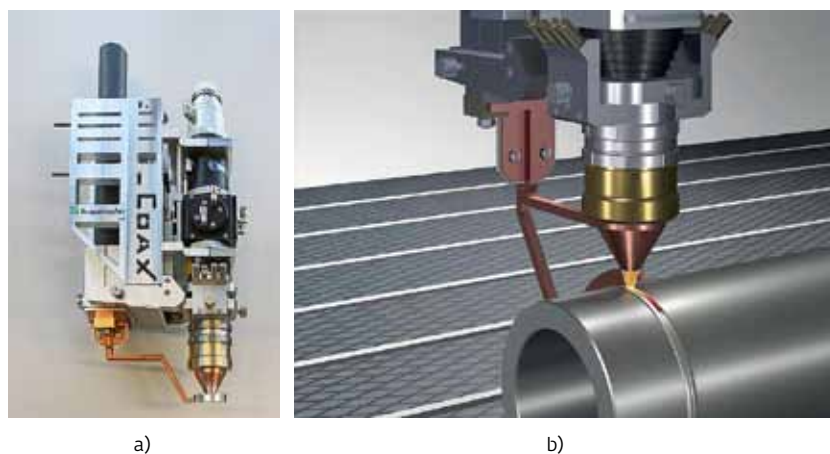


Рис.19. Лазерная головка для наплавки CoaxPowerLine: а) – общий вид; б) – процесс наплавки
Fig. 19. Laser head for cladding CoaxPowerLine

distance to treated workpiece and they have capability of nozzle alignment along the axes X, Y and Z in manual or automatic mode.

TECHNOLOGICAL LASER HEADS FOR O CLADDING

In case of laser cladding, high-concentration laser radiation generated by modern laser sources has the following advantages in comparison with other

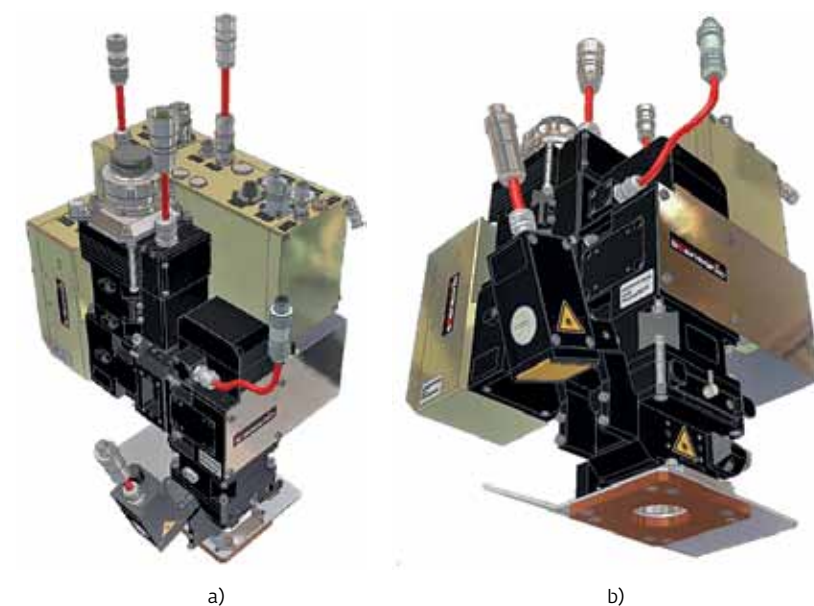


Рис.20. Лазерная головка RLH-A: а) – вид сверху; б) – вид снизу
Fig. 20. Laser head RLH-A

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЛАЗЕРНЫЕ ГОЛОВКИ ДЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ТЕРМОУПРОЧНЕНИЯ

Технология лазерного термоупрочнения реализуется за счет нагревания поверхностного слоя изделия при его кратковременном взаимодействии с высококонцентрированным лазерным излучением до температур, незначительно превышающих температуры полиморфного превращения, и последующего охлаждения с высокой скоростью, благодаря отводу тепла внутрь изделия. Высокие скорости охлаждения подавляют диффузию углерода при полиморфном превращении, образуя в поверхностном слое изделия мартенситную фазовую составляющую, обладающую высокими трибологическими характеристиками.

Для реализации технологии лазерного термоупрочнения в большей степени подходят волоконные, твердотельные и диодные лазерные источники, генерирующие лазерное излучение, поглощаемое материалом изделия с повышенным коэффициентом поглощения по сравнению с излучением, генерируемым CO₂-лазером [22]. С целью обеспечения высокой производительности процесса, а также создания равномерно закаленного по глубине слоя

heating sources: high efficiency, low coefficient of diffusion of the basic metal with clad metal, minimum heat-affected area, low rate of energy input, residual deformations and locality of workpiece treatment.

The laser heads produced for the implementation of technology of laser cladding must have the optical system with high thermal resistance, system of precise supply of clad material into the zone of laser radiation impact, which provides high material utilization rate, and capability of variation of heating spot diameters and powder jet in focal plane within wide range in order to ensure high-precision and effective cladding.

Precitec company presents the variants of heads for laser cladding with coaxial powder feed through four nozzles and ring nozzle (YC30 and YC52) (Fig. 13) and non-coaxial (Fig. 14) powder feed. The heads differ in maximum power of transmitted laser radiation: 2 kW and 6 kW, respectively, with micron wavelength.

Minimum diameter of powder jet in the area of constriction in case of powder supply through four nozzles and in case of non-coaxial supply (heads YC30 and YC52) is equal to 2 mm, in case of jet ring feed of powder – 0.7 mm.

предпочтительнее использовать лазерные головки с равномерным распределением излучения в поперечном сечении. К таким головкам в первую очередь необходимо отнести лазерные сварочные головки IPG мощностью до 10 кВт FLW-D50L с дополнительно встроенным модулем Beam Shape Module, головки Kugler с зеркалами, обеспечивающими равномерное распределение лазерного излучения, а также лазерные сварочные головки компании LaserLine.

Равномерный нагрев поверхности можно реализовать также при осцилляции лазерным пучком поперечно относительно направлению обработки. Для реализации данной технологии успешно применяются лазерные головки компании IPG FLW-D30 Wobble и FLW-D50 Wobble с максимальной мощностью излучения 6 кВт и 10 кВт. Головка RLH-A (ScanSonic) кроме гальванометрического сканатора, обеспечивающего перемещение лазерного излучения в поперечном направлении, образуя закаленный слой шириной до 30 мм, также оснащена пирометром, расположенным коаксиально лазерному излучению и измеряемым температурой обрабатываемой зоны в диапазоне от 800 до 1600 °C. Оптическая система лазерной головки способна передавать лазерное излучение, генерируемое волоконным или твердотельным, или диодным лазерами с максимальной мощностью до 6 кВт (рис.20).

Компанией Precitec для реализации, в том числе технологии лазерного термоупрочнения, изготовлена система ScanTracker, способная сканировать излучение с частотой 1 kHz.

Сотрудниками компании CLA изготовлена лазерная головка ID-H для термоупрочнения внутренних цилиндрических поверхностей диаметром не менее 76 мм и рабочим ходом 1 м при мощности лазерного излучения до 3 кВт.

ВЫВОДЫ

Результаты проведенного анализа показали, что подавляющее большинство лазерных головок предназначено для работы в составе технологических комплексов на базе диодных, волоконных и твердотельных лазеров. Головки изготавливают по модульному принципу, обеспечивающему возможность подбора требуемой комплектации в зависимости от поставленных перед ними задач. Основные усилия компаний-производителей лазерных головок направлены на изготовление компонентов оптических систем, обладающих высокой термической стойкостью, и дополнительных систем, поставляемых в составе лазерных головок и обеспечивающих полную автоматизацию технологического процесса.

Laser heads with coaxial powder feed presented by the company LaserLine are intended for the operation with diode lasers; they have homogeneous distribution of laser radiation in cross-section in the form of circle or rectangle.

Depending on arrangement, the laser cladding heads produced by Reis can be equipped with the nozzles with coaxial ring or jet (through three nozzles) feed made by the company ILT (Fraunhofer). The heads are intended for the integration into laser complexes based on diode, fiber and solid-state lasers with maximum output power of 5 kW providing the width of clad layer of 0.2 mm to 4 mm depending on the feed scheme and used laser source (Fig. 15).

The workers of IWS (Fraunhofer) produce the nozzles of Coax series for coaxial ring powder feed in case of cladding with the power of laser radiation of 3-8 kW and efficiency of 10-150 g/min depending on configuration. Also, IWS produces the nozzles for non-coaxial feed and slot symmetric powder feed Coax 11, with the capability of variation of slot width (Fig. 16). The nozzle provides cladding of the bead with the width of 8-22 mm. The heads are intended for use in the structure of technological complexes made on the basis of CO₂, diode, fiber, solid-state lasers with the power up to 10 kW.

Also, the variant of the laser head for laser cladding with coaxial wire feed CoaxBrazor (Precitec) [21] and CoaxWire (IWS, Fraunhofer) is of interest. In case of use of CoaxBrazor head cladding is performed with ring-type distribution of laser radiation power providing the prior heating of substrate for the purpose of enhancement of its cohesion with clad material. CoaxWire head is equipped with the splitter of laser beam into three beams, which converge in the area of beam treatment, and in case of use of wire with the diameter of 0.4-1.6 mm and maximum radiation power of 4 kW it has the efficiency of 3 kg/h. The head can be optionally equipped with CCD camera and pyrometer. The technology of laser cladding with the use of wire has a number of advantages in comparison with the technology of laser cladding by metal powder due to the availability of welding wire at domestic market and wire utilization rate, which approximates to 100%. The head is intended for the use with fiber, solid-state and diode laser sources (Fig. 17). The laser head for recovery of internal, hard-to-reach surfaces produced by Nutech is shown in Fig. 18.

The workers of CLA and IWS (Fraunhofer) produce the heads ID, ID-2 and Coaxid for cladding of internal cylindrical surfaces with the minimum diameter of 127 mm, 88.9 mm and 100 mm, respectively, and operating stroke in standard configuration of 1 m using

Авторы выражают благодарность С.В.Смирнову (ООО "ЦК СПА") и С.Шмелеву (НТО "ИРЭ-Полюс") за предоставленную информацию о технических характеристиках лазерных головок, изготавливаемых компаниями Precitec, ScanSonic, Nutech и IPG Photonics.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бертологги М. История лазеров. – Долгопрудный: Издательский Дом "Интеллект", 2011.
2. Игнатов А.Г. Десять лет успеха: рынок фотоники и лазерных технологий (2004–2015 годы). – Фотоника, 2015, № 3, с.10–27.
3. Овертон Г., Белфорте Д.А., Ноге А., Холтон К. Годовой обзор и прогноз мирового рынка лазеров. – Лазер-информ, 2016, № 3–4, с.2–8.
4. Цибульский И.А., Туричин Г.А., Земляков Е.В., Валдайцева Е.А., Кузнецов М.В., Сомонов В.В. Разработка технологии гибридной лазерно-дуговой сварки сталей для судостроения и строительства трубопроводов. – 7-я Международная конференция "Лучевые технологии и применение лазеров", Россия, Санкт-Петербург, 18–21 сентября, 2012, с.156–171.
5. Казакевич В.С., Яреско С.И. Тенденции развития рынка лазерных технологий для решения задач лазерной обработки материалов. Часть 1. Мировой лазерный рынок. – Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2014, т. 16, № 4, с. 266–275.
6. IPG Photonics' Welding Heads. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.ipgphotonics.com/527/Widget/Welding+Head+Brochure.pdf>.
7. Laser Processing Heads. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.highyag.com/Laser-Processing-Heads/laser-processing-heads.html>.
8. Optics with Seam Tracking. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.scansonic.de/en/produkte-menu/optics-with-seam-tracking>.
9. Laser welding – a reliable connection. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.precitec.de/en/products/joining-technology/a-reliable-connection/>.
10. Welding System FormWelder Plus. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.precitec.de/en/products/joining-technology/processing-heads/formwelder-plus/>.
11. Processing optics with stable focal position up to 30 kW. Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.scansonic.de/files/downloads/scansonic_bosf_datasheet_v2.0_en.pdf.
12. Welding Optics. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.laserline.de/welding-optics.html>.

the power of laser radiation up to 6 kW (diode laser; head ID) and up to 3 kW (disk, fiber, solid-state laser; heads ID-2 and Coaxid). The heads provide cladding with the productivity of 75 g/min, 60 g/min and 50 g/min at the width of clad layer up to 8 mm, 6 mm and 4 mm, respectively.

The head CoaxPowerLine should be specifically mentioned; it is intended for laser cladding by diode laser with the radiation power up to 15 kW and concurrent induction heating with inductor power from 20 to 50 kW. Use of induction heating increases the productivity of cladding up to 18 kg/hour. On the basis of estimations of manufacturers the use of induction heating of treated workpiece allows obtaining the productivity, which is comparable with cladding efficiency at the power of laser radiation of 8–10 kW, at the power of laser radiation of 4 kW (Fig. 19).

TECHNOLOGICAL LASER HEADS FOR SURFACE THERMAL HARDENING

Technology of laser thermal hardening is implemented at the expense of heating of workpiece surface layer upon its short-term interaction with high-concentration laser radiation up to the temperatures, which insignificantly exceed the temperatures of polymorphous transformation, and further cooling with high speed due to the heat transfer inside the workpiece. Cooling with high speed suppresses carbon diffusion upon polymorphous transformation forming the martensitic phase component in surface layer, which has high tribological characteristics.

Fiber, solid-state and diode laser sources, which generate the laser radiation absorbed by workpiece material with higher absorption coefficient, are more suitable for the implementation of technology of laser thermal hardening in comparison with the radiation generated by CO₂-laser [22]. For the purpose of provision of high process efficiency and layer, which is homogeneously hardened by depth, it is more preferable to use the laser heads with homogeneous distribution of radiation in cross-section. Such type of heads primarily includes the laser welding heads IPG with the power up to 10 kW FLW-D50L with additionally built-in Beam Shape Module, heads Kugler with mirrors providing the homogeneous distribution of laser radiation and laser welding heads produced by LaserLine.

Also, the homogeneous heating of surface can be implemented by oscillation of laser radiation in cross-section relative to the treatment direction. The laser heads of the company IPG FLW-D30 Wobble and FLW-D50 Wobble with maximum radiation power of 6 kW and 10 kW are successfully used for the implementation of such technology. In addition to galvanometric

13. Fiber Laser Heads for Welding and Cutting. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.kugler-precision.com/index.php?Fiber-laser-heads-for-welding-and-cutting#>.
14. Modular welding optics. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.reislaser.de/en/produkte/laser-processing-optics/welding-optics>.
15. Welding optics. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.nutech.de/en/services/laser-system-technology/special-optics>.
16. Разработка оборудования. Электронный ресурс. Режим доступа: http://www.ilwt-stu.ru/research/dev_equipment/#lasercomplex.
17. Богданов А.В., Голубенко Ю.В. Волоконные технологические лазеры и их применение: Учебное пособие. – С-Пб.: Лань, 2016.
18. Programmable Focusing Optics in the PFO Series. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.trumpf-laser.com/en/products/solid-state-lasers/beam-guidance/focusing-optics/pfo.html>.
19. Products. Laser cutting. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.precitec.us/products/laser-cutting/solid-state-laser/finecutter/>.
20. ProCutter – the cutting head for every task. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.precitec.us/products/laser-cutting/solid-state-laser/procutter/>.
21. Pajukoski H., Nakki J., Thieme S., Tuominen J., Nowotny S., Vuoristo P. Laser cladding with coaxial wire feeding. – Conference: 31st International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2012), At Anaheim, CA, USA.
22. Лопота В.А., Туричин Г.А., Цибульский И.А., Сомонов В.В., Кузнецов М.В. Перспективы внедрения волоконных лазеров для лазерной термообработки черных металлов. – Заготовительные производства в машиностроении, 2013, № 3, с.15–17.

scanator providing the movement of laser radiation in transverse direction and forming hardened layer with the width up to 30 mm, the head RLH-A (ScanSonic) is also equipped with pyrometer, which is located coaxially in relation to laser radiation and which measures the temperature of treated area within the range from 800 to 1600 °C. The optical system of laser head is capable to transmit the laser radiation generated by fiber, solid-state and diode laser with maximum power up to 6 kW (Fig. 20).

In order to implement the technology of laser thermal hardening, the company Precitec additionally produces ScanTracker system, which is capable to scan the radiation with frequency of 1 kHz.

Workers of CLA company produce the laser head ID-H for thermal hardening of internal cylindrical surfaces with the diameter of not less than 76 mm and operating stroke of 1 m at the power of laser radiation up to 3 kW.

CONCLUSION

The results of performed analysis showed that the vast majority of laser heads is intended for the operation in the structure of technological complexes based on diode, fiber and solid-state lasers. The heads are made on the basis of module principle, which provides the capability of selection of required configuration depending on set tasks. The main efforts of the companies producing laser heads are aimed at the fabrication of components of optical systems with high thermal resistance and additional systems, which are supplied in the structure of laser heads and which provide the full automation of technological process.

Authors express their gratitude to S.V. Smirnov (LLC "TsK SPA") and S. Shmelev (NTO "IRE-Polyus") for provided information on the technical characteristics of laser heads produced by Precitec, ScanSonic, Nutech and IPG Photonics.