



УНИКАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ CO₂-РЕЗОНАТОРА ПРОИЗВОДСТВА MITSUBISHI ELECTRIC: ПРЕИМУЩЕСТВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СОВРЕМЕННОЙ ИНДУСТРИИ

И. Шемякин, Mitsubishi Electric Laser,
www.mitsubishi-laser.ru; www.abamet.ru

Идеального источника излучения для лазерной резки не существует – каждый источник предназначен для решения определенных задач. Однако CO₂-резонатор Cross-Flow позволяет оптимально использовать лазерную технологию резки для различных металлов различных толщин. Статья посвящена уникальному резонатору Cross-Flow газового лазера производства компании Mitsubishi Electric. Его конструкционные особенности выдвигают этот газовый лазер в конкурентную борьбу в области лазерной резки с популярной технологией использования твердотельной лазерной активной среды.

Резонатор по праву можно считать сердцем лазерной системы любого производителя. Выбирая лазерную установку, клиент в первую очередь ориентируется на тип источника лазерного излучения и его мощность. Именно они определяют технологические возможности лазерной установки, первоначальные инвестиции, стоимость обслуживания, надежность, безопасность, эффективность и эксплуатационные затраты. В настоящий момент промышленные установки лазерной резки металла базируются на двух основных типах лазеров: газовых, где в качестве активной среды используется смесь газов (CO₂-лазеры), и твердотельных, где активной средой является кристалл или волокно (пример, YAG-, дисковые и волоконные лазеры).

Чтобы вести речь об особенностях и преимуществах различных типов источников и их конструкций, необходимо упомянуть базовые принципы их работы. Начнем с более подробного рассмотрения CO₂-технологии и принципа

THE UNIQUE TECHNOLOGY OF CO₂-CAVITY BY MITSUBISHI ELECTRIC: THE BENEFITS IN MODERN INDUSTRY

I. Shemyakin, Mitsubishi Electric Laser,
www.mitsubishi-laser.ru; www.abamet.ru

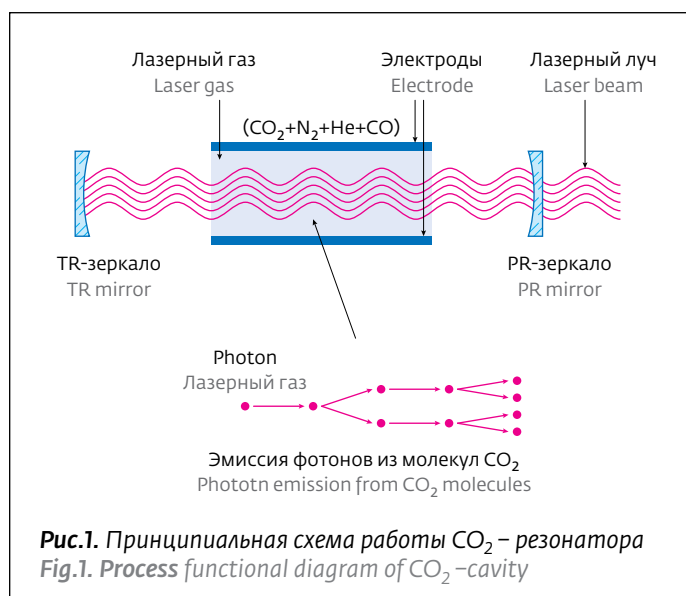
There is no ideal light source for laser cutting; every source fits for solving specific problems. However, Cross-Flow CO₂-cavity gives an opportunity to optimally use the laser cutting technology for a variety of metals and different thicknesses. This article is dedicated to unique Cross-Flow gas laser cavity by Mitsubishi Electric. Its design features bring this gas laser forward to the competition in the field of laser cutting technology with the popular use of solid-state laser active medium.

The cavity can rightly be considered the heart of the laser system of any manufacturer. When choosing the laser system, the client in the first place focuses on the type of laser source and its power. These are the factors that define the technological capabilities of the laser system, the initial investments, maintenance costs, reliability, safety, efficiency and operating costs. Currently, industrial metal laser cutting installations are based on the two main types of lasers: gas lasers, where the active medium is a mixture of gases (CO₂-lasers) and solid-state lasers where the active medium is a crystal or fiber (for example, YAG, disc and fiber lasers).

To talk about the features and benefits of different types of sources and structures, it is necessary to mention the basic principles of their work. Let's start with a more detailed consideration of CO₂-technology and the operating principle of the emission of CO₂-source (Fig.1). Initially, gas, active medium, which is a 3-component mixture of gases in the proportion determined by the manufacturer: CO₂: N₂: He, is pumped in a sealed tube or casing. In the case of installations by Mitsubishi Electric, the gas mixture additionally includes CO. In any arrangement of the cavity, a mixture of gases is between the electrodes. When the laser is activated, influenced by high voltage between the electrodes, the electrons collide with N₂ molecules, thus increasing the amplitude

работы CO_2 -источника излучения (рис.1). Первоначально в герметичную трубку или корпус закачивается газ – активная среда, представляющая собой трехкомпонентную смесь газов в пропорции, установленной производителем: CO_2 : N_2 : He. В случае с установками компании Mitsubishi Electric в смесь дополнительно включается газ CO. При любом конструктивном исполнении резонатора смесь газов находится между электродами. При включении лазера, под действием высокого напряжения, возникающего между электродами, электроны соударяются с молекулами N_2 , увеличивая амплитуду их осцилляций. За счет столкновения молекул N_2 и CO_2 между собой молекулы CO_2 возбуждаются, что в свою очередь приводит к эмиссии фотонов с длиной волны 10,6 мкм. Входящий в газовую смесь газ CO служит для сохранения качества смеси. Далее фотоны, многократно отражаясь между непрозрачным (TR – Total Reflective) и полупрозрачным (PR – Partial Reflective) зеркалом, усиливая процессы испускания фотонов в активной среде, создают генерацию излучения. И как только луч набирает достаточную мощность, он преодолевает полупрозрачное зеркало и, проходя систему зеркал резонатора, по оптическому тракту попадает в режущую головку [1, 2].

По способу и направлению прокачки газа CO_2 -резонаторы разделяют на два подтипа. Первый – это коаксиальный, высокоскоростной резонатор, его широко применяют разные производители в индивидуальных конструкциях. В нем прокачка лазерного газа осуществляется вдоль оптической оси (рис.2).



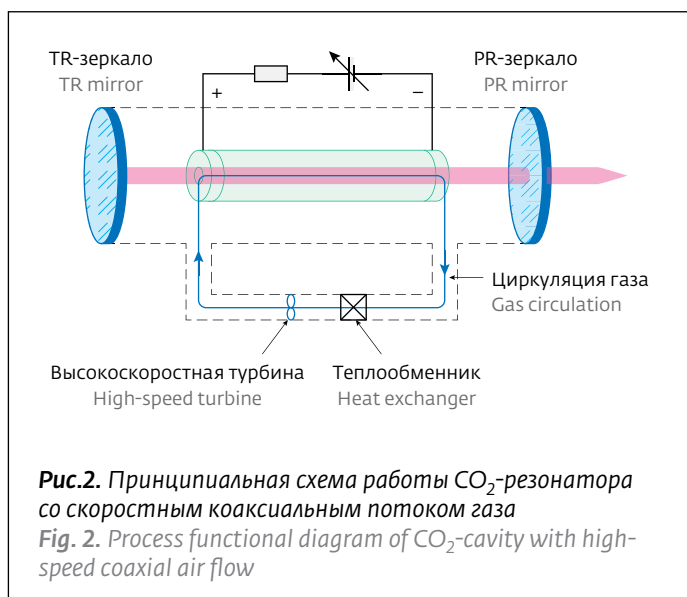
Mitsubishi – это всемирно известная группа компаний, которая является лидером во многих высокотехнологичных областях производства: от приводов и промышленной автоматизации до производства электроэрозионных станков, лазерных комплексов, морских судов, самолетов и аэрокосмических кораблей.

Компания Mitsubishi Electric начала свои изыскания в области лазерных технологий в 1967 году, а в 1979 году был выпущен первый CO_2 -резонатор. На сегодняшний день около 12000 единиц лазерных установок Mitsubishi Electric эксплуатируется по всему миру.

Отдельное внимание уделяется тому, чтобы каждый элемент установки являлся собственным компонентом Mitsubishi. Для обеспечения этой возможности компания располагает большим штатом инженеров, ученых и разработчиков, всего около 3000 человек. Производственный центр располагается в городе Нагойя (Япония).

Выход систем лазерной резки Mitsubishi Electric на рынок Европы и России начался в 2006 году с поставок установки ML3015LVP, которая продавалась под брендом Amada в качестве модели LC-3015 X1. Всего в Европе было продано более 500 данных систем, которые обеспечили хорошую репутацию Mitsubishi Electric. С начала 2010 года системы лазерной резки Mitsubishi Electric вышли на промышленные рынки Европы и России под своим собственным брендом. Эксклюзивным представителем Mitsubishi Electric является компания "Абамет", имеющая десять региональных представительств в Беларуси, России и Казахстане.

of their oscillations. The collisional energy transfer mechanism between N_2 and CO_2 causes the excitation of the CO_2 molecules, which in turn leads to the emission of photons with wavelength of 10.6 microns. The component of CO gas is used to maintain the gas properties. Furthermore, the photons multiply reflected between opaque (TR – Total Reflective) and translucent (PR – Partial Reflective) mirror, amplifying the processes of emission of photons in the active medium, create radiation generation. And as soon as the beam has gained enough power,



Характерный недостаток этой конструкции – сильный нагрев газа в процессе его прохождения вдоль оптической оси, что в свою очередь сказывается на качестве излучения. Решением данной проблемы, помимо использования теплообменника, является применение высокоскоростной турбины, которая значительно увеличивает скорость прокачки газа, не позволяя ему нагреваться. Приблизительная скорость циркуляции газа составляет 200 м/с, что снижает стабильность параметров излучения. При этом возникает вопрос о длительности ресурса этого дорогостоящего турбинного нагнетателя и стоимости его замены. По утверждению производителей, ресурс турбины составляет не более 20 000 часов, что соответствует 5 годам срока эксплуатации оборудования при работе в две смены по 8 часов, а стоимость ее замены составит 25 000–35 000 евро. Стоит отметить, что резонаторы такого типа в своей конструкции содержат стеклянные трубки, внутри которых циркулирует газ. Трубки подвержены постепенному перегреву и потере цилиндрической формы, что приводит к необходимости их замены и простоя оборудования. Следует принять во внимание и количество зеркал, используемых в резонаторе. От данного параметра зависит стоимость и сложность его обслуживания. В зависимости от конкретного производителя и мощности резонатора, в конструкции содержится от 7 до 24 зеркал. Выбирая мощность коаксиального резонатора, необходимо знать, что в некоторых конструкциях ее увеличение обусловлено увеличением количества зеркал. Напряжение в таких резонаторах обычно передается от нескольких

it overpasses the partial reflective mirror, and by passing through the cavity mirror system, it enters the cutting head along the optical path [1, 2].

By the method and direction of gas pumping, CO₂-cavities are divided into two subtypes. First is coaxial, high-speed cavity widely used by various manufacturers in their individual designs. In this design, laser gas pumping is carried along the optical axis (Fig. 2).

A typical disadvantage of this design is strong heating of the gas during its passage along the optical axis, which in turn affects the quality of radiation. The solution to this problem, in addition to using a heat exchanger, is the use of high-speed turbine, which significantly increases the rate of gas flow, not allowing its heating. Approximate gas circulation rate is 200 m/s, which reduces the stability of the radiation parameters. This raises the question of the duration of the life of this expensive turbine supercharger and the cost of its replacement. According to the manufacturers, the turbine life is no more than 20 000 hours, which corresponds to the 5-year lifetime



Mitsubishi Electric began its research in the field of laser technology in 1967, and the first CO₂ cavity was released in 1979. To date, approximately 12,000 units of laser systems by Mitsubishi Electric operate worldwide.

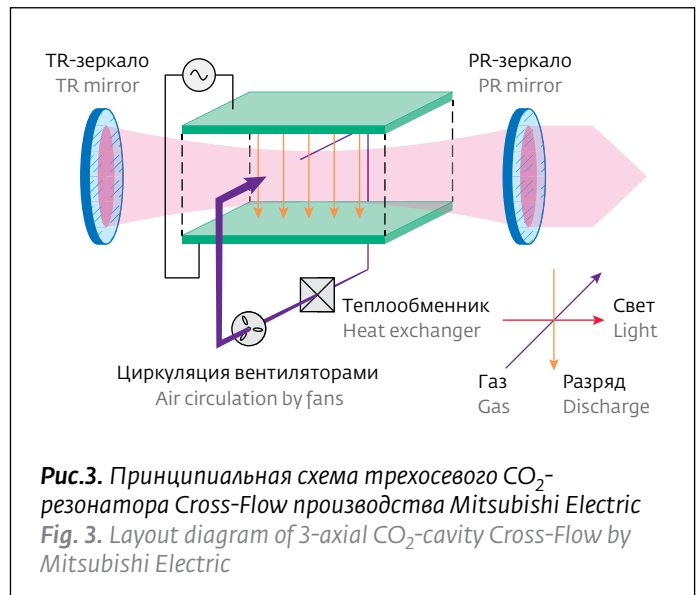
Special attention is paid to the fact that every element of the installation is the component manufactured by Mitsubishi. To provide this opportunity, the company has a large staff of engineers, scientists and developers, totally about 3,000 people. The production center is located in Nagoya (Japan).

The output of laser cutting systems by Mitsubishi Electric to market in Europe and Russia began in 2006 with the supply of ML3015LVP installation, which was marketed under the brand Amada as LC-3015 X1 model. In total, more than 500 of these systems have been sold in Europe, which provided a good reputation to Mitsubishi Electric. Since 2010, the laser cutting systems by Mitsubishi Electric entered the industrial markets of Europe and Russia under its own brand. The exclusive representative of Mitsubishi Electric is "Abamet", having ten regional offices in Russia, Belarus and Kazakhstan.

электродов, которые необходимо менять согласно регламенту обслуживания.

Второй подтип – трехосевой резонатор с поперечной прокачкой лазерного газа – Cross-Flow (рис.3). В данном случае газ прокачивается поперек оптической оси, проходя через теплообменник и четыре вентилятора, которые попарно прокачивают газ в противоположных направлениях, исключая искажение направления оптической оси. Разряд подается перпендикулярно потоку газа и оптической оси, таким образом, конструкция резонатора приобретает трех осевую направленность.

Такая конструкция позволяет работать при скорости циркуляции газа 10 м/с, не требуя высокой скорости его прокачки. Это, в свою очередь, увеличивает стабильность излучения и исключает необходимость применения дорогостоящей турбины и большого количества зеркал – в резонаторе содержится всего пять зеркал. Наличие одного керамического электрода, который, согласно регламенту, не требует замены, а только обслуживания, позволяет говорить о еще большей экономии средств. Также одноэлектродная система возбуждения ведет к сокращению потребления электроэнергии при отключении лазера, за счет подачи разряда только в требуемый момент времени. При таком принципе работы создается импульс излучения прямоугольной формы и пиковая мощность поддерживается продолжительное время. Это позволяет минимизировать температурное влияние на металл. У других производителей форма импульса треугольная



of the equipment when working in 2 shifts of 8 hours, and the cost of its replacement is 25000–35000 Euro. It should be noted that this type of cavity comprises glass tube, inside which the gas circulates. These tubes are exposed to gradual overheating and loss of cylindrical shape, which leads to the necessity of replacement and downtime. It is necessary to take into account the number of mirrors used in the cavity. This parameter influences the cost and complexity of its service. Depending on the manufacturer and the cavity power, the design comprises from 7 to 24 mirrors. Choosing the power of coaxial cavity, it is necessary to know that in some designs its increase is due to an increase in the number of mirrors. Voltage

и характеризуется резкими спадами мощности.

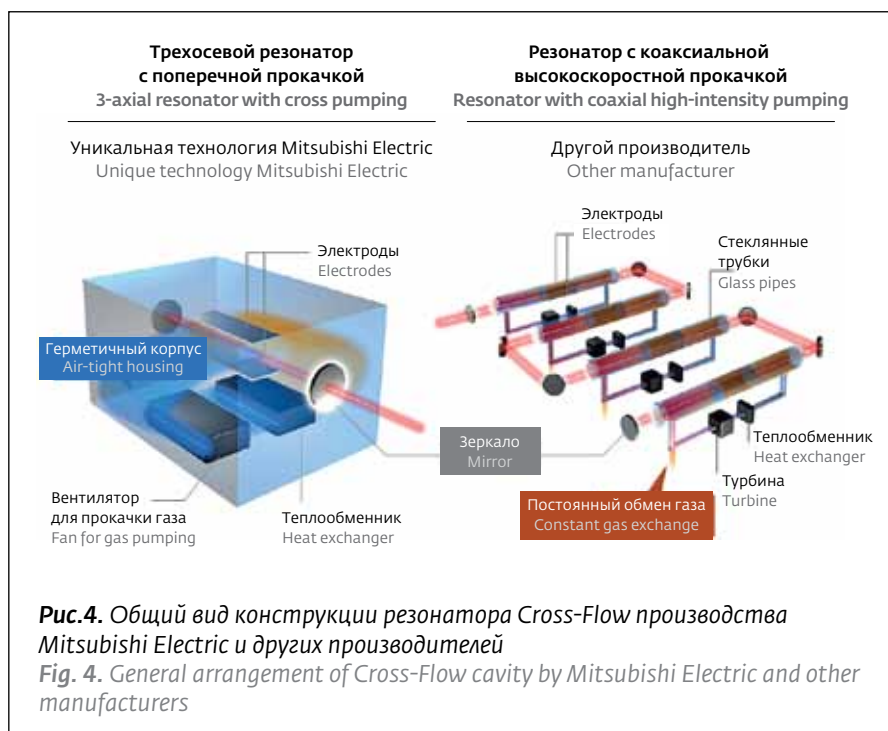
Помимо сказанного, отметим, что данная конструкция подразумевает закачку газа в герметичный корпус. Тогда обеспечивается минимальное потребление лазерного газа – 1-3 л/ч. В этом отличие от коаксиального резонатора, где подкачка газа происходит в течение всего времени работы резонатора, и соответственно потребление газа достигает 10-20 л/ч.

Возвращаясь к вопросу о составе смеси газа для резонатора Cross-Flow, еще отметим, что и здесь для клиента есть возможность экономии средств. Самой дорогой составляющей смеси лазерного газа является гелий (He). Для резонатора Mitsubishi Electric долевое содержание этого элемента составляет 28%, в то время как у других производителей его доля составляет от 60 до 80%, что свидетельствует о меньшей стоимости 1 баллона лазерного газа для резонатора Cross-Flow.

Все перечисленные достоинства позволяют говорить о высокой надежности резонатора Cross-Flow производства Mitsubishi Electric и о низкой стоимости его обслуживания. Известно, что она в 2-3 раза ниже стоимости обслуживания CO₂-лазера аналогичной мощности любого другого производителя (рис.4, 5).

Сегодня многие производители говорят о том, что не существует идеального источника для всех задач лазерной резки. Каждый источник имеет свое применение, и эта точка зрения, безусловно, вызывает солидарность. Однако наличие в промышленной лазерной системе резонатора Cross-Flow позволяет говорить о ее широком применении для резки различных металлов, имеющих разную толщину.

Выбирая твердотельный источник излучения, пользователь часто аргументирует свой выбор задекларированными во всех источниках преимуществами этой технологии: стоимостью обслуживания и его простотой, высокой производительностью, толерантностью к светоотражающим материалам, низкими эксплуатационными затратами.



in these cavities is usually transmitted from multiple electrodes, which should be replaced according to the service rules.

The second subtype is a 3-axis cavity with a transverse-flow gas laser – Cross-Flow (Fig.3). In this case, the gas is pumped across the optical axis passing through the heat exchanger and the four fans, which pump the gas in pairs in opposite directions, eliminating distortion of the optical axis direction. The discharge is fed perpendicularly to gas stream and the optical axis, thus the cavity structure acquires a 3-axis direction.

This construction allows for operation with gas circulating at a speed of 10 m/s without requiring high gas pumping speed. This in turn increases the radiation stability and eliminates the need to costly increase the number of turbines and mirrors; the cavity comprises only 5 mirrors. The presence of one of the ceramic electrode, which, according to the regulations does not require replacement, but only maintenance, suggests an even greater savings. Also single electrode driving system leads to a reduction of power consumption when the laser is turned off, by supplying only the desired discharge time. According to this principle of operation, the rectangular radiation pulse is created and the peak power is maintained for a long time. This minimizes the thermal influence on the metal. Other manufacturers the pulse can have triangular shape and is characterized by sharp decay of power.

Но так ли явно и всегда ли выражаются эти преимущества в сравнении с применением CO₂-технологии и, в частности, Cross-Flow? Для того чтобы действительно разобраться в этом, необходимо ознакомиться с особенностями твердотельных резонаторов. Основными твердотельными источниками, которые получили широкое промышленное применение, являются: стержневой YAG-, дисковый и волоконный лазеры, их основное отличие – активная среда. Постараемся рассмотреть все аспекты, по которым эти конструкции отличаются друг от друга, и сопоставим их с CO₂-лазером с резонатором Cross-Flow.

Первоначально на рынке появился YAG-лазер, где в качестве активной среды использован стержень алюмоиттриевого граната цилиндрической формы, а источником накачки служит высокомогущная лампа, реже – диоды накачки. В конструкции по-прежнему присутствуют зеркала. Но основным недостатком, ограничивающим полноценное промышленное применение этого источника, всегда являлась нестабильность качества излучения и его ограничение по мощности из-за возникновения эффекта тепловой линзы. Дело в том, что стержень в резонаторе этого лазера располагается между лампами накачки вдоль оптической оси и подвержен постоянному внешнему и внутреннему нагреву. Охлаждение стержня производится только через его внешнюю поверхность. Таким образом, он подвержен температурным деформациям и принимает эллиптическую форму, если лампа накачки расположена с одной стороны, или форму двойного эллипса, если энергия накачки действует на стержень с двух сторон. Все это приводит к ухудшению качества лазерного излучения и требует дорогостоящего обслуживания. Проблема охлаждения была решена изменением геометрии активной среды твердотельного YAG-лазера. Таким образом, появились два современных варианта твердотельного источника: дисковый резонатор (увеличен диаметр стержня и уменьшена его длина) и волоконный резонатор (уменьшен диаметр, но увеличена длина активной среды). Эти два варианта стали решением вопроса охлаждения активной среды.

В дисковом резонаторе в качестве активной среды применяется кристалл в форме диска, а в качестве элементов, выделяющих энергию накачки, – диодные линейки. Охлаждается диск через площадь поверхности благодаря покрытию с высокими отражающими свойствами или через теплоотводящий элемент. Длина волны



Рис.5. Резонатор Mitsubishi Electric Cross-Flow (45CF-R)
Fig. 5. Cavity by Mitsubishi Electric, Cross-Flow (45CF-R)

In addition to the above, we should note that this design involves injecting gas into the sealed enclosure. Then, minimal consumption of laser gas is provided – 1-3 l/h. This differs from the coaxial cavity, where the gas pumping occurs at all times during operation of the cavity, and thus the gas consumption is 10-20 l/h.

When again addressing the issue of the composition of the gas mixture for Cross-Flow cavity, we should also note that there is an aspect of cost savings for the customer. The most expensive component of the laser gas mixture is helium (He). For cavities by Mitsubishi Electric, the share content of this element is 28%, whereas the other producers of its share is from 60% to 80%, which means a lower cost of 1 balloon of laser gas for Cross-Flow cavity.

All these advantages make it possible to talk about the reliability of Cross-Flow the cavity by Mitsubishi Electric and its low cost of routine maintenance. We know that it is 2-3 times lower than the cost of servicing for the CO₂-laser of the same power by any other manufacturer (Fig. 4, 5).

Today, many manufacturers say that there is no perfect source for all laser cutting applications. Each source has its uses, and this point of view, of course, is unanimous. However, the presence in the industry if the Cross-Flow laser cavity allows us to speak about its widespread use for cutting of various metals having different thicknesses.

When choosing a solid-state radiation source, the user often justifies his choice by the declared



такого лазера приблизительно 1,064 мкм. Одним из недостатков источника излучения такого типа является наличие зеркал в конструкции резонатора, что ставит под вопрос значительную простоту в обслуживании и его меньшую стоимость в сравнении с резонатором Cross-Flow.

Волоконный лазер представляет собой активную среду в виде оптического волокна, легированного редкоземельными элементами. В качестве элементов накачки используются одиночные лазерные диоды. В такой конструкции резонатора полностью отсутствуют оптические элементы, а функцию отражения поперечного излучения внутри активного волокна выполняют брэгговские решетки. Длина волны волоконного источника приблизительно равна 1,07 мкм.

Не будем останавливаться на сравнении двух последних видов твердотельных источников лазерного излучения между собой, выделении их преимуществ и недостатков по отношению друг к другу. В данном случае мы говорим только об их общем участии в применимости твердотельной технологии в сравнении с CO₂-технологией Mitsubishi Electric, и ее соответствии всем требованиям пользователя. Вернемся к тем аспектам, на которые клиент обращает внимание, выбирая лазерную установку, и подробно проанализируем каждый из них.

Начнем с наименее значимого отличия для нашего рынка – это безопасность эксплуатации. В данном случае основной аспект, влияющий на нее, – это длина волны излучения. При $\lambda \approx 1$ мкм, излучение находится в ближнем ИК-диапазоне спектра. Такое излучение негативно воздействует на зрение человека, поэтому при поставке лазерных установок с твердотельными источниками излучения производители оборудования, зарекомендовавшие себя как обеспечивающие все условия безопасности работы персонала, обязательно устанавливают защитные стекла для визуализации зоны резки. Кабина станка накрывается крышкой, обеспечивая полную защиту оператора во время работы. CO₂-источники более безопасны, так как в данном случае рабочая длина волны в 10,6 мкм находится в дальней ИК-области спектра. Рабочая зона таких установок обычно также защищена со всех сторон кожухами, но уже без крыши и специальных защитных стекол.

Необходимо подчеркнуть действительно неоспоримые достоинства дискового и волоконного лазеров в лазерной резке. Одно из них – низкое

benefits of this technology: cost of the service and its simplicity, high performance, tolerance to reflective materials, low operating costs.

But are the advantages always clearly expressed and compared with the use of CO₂-technology and in particular, Cross-Flow? To really understand this, you need to get acquainted with the peculiarities of solid-state cavities. The main solid-state sources, which received wide industrial applications, are: YAG, disk and fiber lasers, the main difference between them is the active medium. We will try to consider all aspects wherein these structures are different from each other, and compare them with the CO₂ laser cavity, Cross-Flow.

Initially, YAG-laser has appeared in the market, where YAG rod is used as the active medium which is cylindrical in shape and the pumping source is a high-intensity flash lamp, least often – pump diodes. The mirrors are still used in the design. However, the major drawback limiting the use of this full industrial application of this source has always been unstable radiation and its limit power due to the occurrence of the thermal lens effect. The point is that the rod is disposed between the pump flash lamps along the optical axis and is subject to constant internal and external heat. Cooling of the rod is possible only through its outer surface. Thus, it is exposed to thermal deformation and assumes an elliptical shape when the pump flash lamp is located on one side, or the double ellipse shape if the pump energy influences on the rod from both sides. All this leads to deterioration in the quality of the laser radiation and the need for expensive maintenance. The resolution of this cooling issue was changing the geometry of the active medium of solid-state YAG-laser. Thus, two modern versions of a solid-state power have been developed: disk cavity (stem diameter increased and length reduced) and fiber cavity (diameter reduced, but the length of the active medium increased). These two versions have become the solution to the issue of active medium cooling.

The disc cavity in a disk-shaped crystal is used as an active medium, and the diode arrays are used as the elements that emit pumping energy. The disk is cooled through the surface area by coating with high reflective properties or the heat-sinking element. The wavelength of the laser is approximately 1.064 microns. One disadvantage of this type is the source of the presence of the cavity mirrors in the design, which raises the questions of considerable ease of maintenance and lower cost in comparison with the Cross-Flow cavity.



потребление электроэнергии установкой за счет более высокого КПД лазера, что снижает эксплуатационные расходы. Это преимущество неоспоримо. Например, у дискового резонатора КПД достигает 25%, у волоконного – 25–30%, в то время как у CO₂-лазера КПД составляет 10–12%.

Вторым преимуществом является устойчивость дисковых и волоконных резонаторов к обработке материалов с высоким коэффициентом отражения, таких как латунь и медь. Однако полное использование этого преимущества возможно только в ситуациях, когда существует постоянная потребность в обработке именно этих материалов. В противном случае, когда клиентам необходимо обрабатывать эти материалы с толщиной до 3 мм и в небольших объемах. Названные преимущества исчезают, так как в этом диапазоне могут работать и CO₂-лазеры, но с учетом дополнительной подготовки поверхности обрабатываемого металла.

Говоря о простоте и стоимости обслуживания, необходимо аккуратно подходить к сравнению этих двух технологий. Изначально надо принять тот факт, что лазерные установки с CO₂-резонаторами производятся уже более 30 лет. Они эволюционировали в цене и уровне производительности. Уже достоверно известна стоимость их регламентного обслуживания и достаточно точные ресурсы работы основных компонентов. С другой стороны, технологии с их использованием твердотельных источников развиваются лишь последние 5–6 лет, соответственно, лазерные установки с такими резонаторами проработали сравнительно недолгое время. Регламентировать конкретный ресурс компонентов, а соответственно и итоговую стоимость обслуживания таких резонаторов, довольно сложно. Предположительно, стоимость обслуживания коаксиального высокоскоростного резонатора

Fiber laser active medium is in the form of an optical fiber doped with rare earth elements. The single laser diodes are used as the pumping elements. This cavity structure does not have optical elements at all, and the function of reflection of extraneous radiation inside the active fiber is performed by Bragg gratings. The wavelength of the fiber source is approximately equal to 1.07 mm.

We will not focus on the comparison of the two kinds of solid-state laser radiation sources, the allocation of their advantages and disadvantages in relation to each other. In this case, we are talking only about their common participation in the applicability of solid-state technology as compared with CO₂-technology by Mitsubishi Electric, and its compliance with all the requirements of the user. Let us address those aspects which are the most important for the client when choosing a laser installation, and analyze in detail each of them.

Let's start with the least significant difference for our market – the safe operation. In this case, the main influencing aspect is the wavelength. When $\lambda \approx 1 \mu\text{m}$, the radiation is in the near infrared range of the spectrum. Such radiation has a negative impact on a person's vision, so the laser systems with solid-state radiation sources are provided with the safety means for the staff by the equipment manufacturers, protective glasses to visualize the cutting area are equipped by all means. The cab of the machine is covered by a roof, providing full protection for the operator during operation. The CO₂ sources are safer, since in this case the working wavelength is 10.6 micrometers in the IR range. The working area of such installations is usually also protected on all sides by covers, but without a roof and special protective glasses.

The truly undeniable advantages of disk and fiber lasers in laser cutting shall be emphasized. One of them is low power consumption due to a higher



любого производителя аналогичной по мощности установки действительно будет выше стоимости обслуживания рассматриваемых твердотельных источников ввиду необходимости в очистке и замене большого количества зеркал, стеклянных трубок, электродов, а главное – замене турбины по окончании определенного ресурса.

Если смотреть более подробно, то в парном сравнении каждого твердотельного источника с аналогичным по мощности CO₂-источником результат будет разным ввиду характерных особенностей дискового и волоконного резонаторов. Например, в дисковом резонаторе присутствуют зеркала, которые по-прежнему необходимо обслуживать и периодически менять. В волоконном резонаторе их нет. Также заметим, что в волоконном и дисковом лазерах используются разные элементы накачки энергии. У дисковых лазеров элементами накачки являются диодные линейки, у волоконных – одиночные диоды, которые также имеют разный заявленный ресурс работы. Но ключевым плюсом этих технологий по отношению к CO₂-лазерам все же является отсутствие оптической системы передачи луча в режущую головку. Вместо этого используется волоконный кабель. Но если сравнивать эти технологии с CO₂ Cross-Flow, то это сравнение несет противоположный знак, так как эта конструкция резонатора исключает все вышеописанные сложности обслуживания, кроме обслуживания тракта и затраты на замену комплектующих. Этот вывод сделан на основе уже имеющейся первичной практики, полученной компанией Mitsubishi Electric при обслуживании CO₂- и волоконных лазерных установок, сравнимых по мощности. Поэтому резкое суждение о том, что стоимость обслуживания твердотельного источника ниже, чем стоимость обслуживания CO₂-лазера Cross-Flow, спорно.

Возвращаясь к разговору об оптическом тракте, отметим, что в CO₂-лазерах при передаче излучения в режущую головку их необходимо продувать вспомогательным газом. Для установок мощностью до 4 кВт в качестве продувочного газа применяют воздух, в лазерах мощностью выше 4 кВт – азот. Это дополнительные эксплуатационные затраты. В то же время как в твердотельных источниках азот используется в абсолютно небольших количествах только для продувки оптики в режущей головке. Можно принять во внимание и характерное отличие оптики, используемой в этих двух типах источ-

efficiency of the laser, resulting in lower operating costs. This advantage is undeniable. For example, disk cavity efficiency reaches 25%, that of the fiber cavity – 25–30%, whereas the CO₂ laser efficiency is 10–12%.

The second advantage is the stability of the disk and fiber cavities to the processing of materials with high reflectance, such as brass and copper. However, full utilization of this advantage is possible only in the situations where there is a constant need for treatment of these materials. Otherwise, when clients need to process these materials to 3 mm thick, in small volumes, these advantages disappear, since CO₂-lasers can operate in this range, but with the additional training of the treated metal surface.

Speaking of simplicity and cost of service, it is necessary to carefully approach to the comparison of the two technologies. Initially, we must accept the fact that the laser systems with CO₂-cavities are produced for over 30 years. They have evolved in the price and performance level. The cost of their routine maintenance and sufficiently accurate resources for the main components is known for sure. On the other hand, the technology of using solid-state sources have developed for the last 5–6 years, respectively, laser devices with such cavities have been operated for comparatively short time. To regulate particular resource of the components, and thus the total cost of maintenance of such cavities is quite difficult. Presumably, the high cost of maintenance of the coaxial cavity by any manufacturer on a plant with similar power will indeed be higher than the cost of service of the considered solid-state sources because of the need to clean and replace the large number of mirrors, glass tubes, electrodes, and most importantly – the replacement of the turbine at the end of a particular resource.

If observed in more detail, in comparing each solid-state source with the analogue CO₂-source, the result will be different since the characteristics of disk and fiber cavities. For example, a disk cavity contains mirrors, which still need to be serviced and replaced periodically. The fiber cavity does not comprise mirrors. Also, it should be noted that the different elements of power pumping are used in fiber and disk lasers. Disc lasers the pumping elements are the diode arrays, fiber lasers employ single diodes that also have different resource of the claimed work. However, a key advantage of these techniques with respect to CO₂-lasers is still a lack of an optical beam transmission system in the cutting head. Instead a fiber cable is used. But if these technologies are compared with CO₂ Cross-Flow, this comparison carries the opposite sign, since this cavity design



ников. Дело в том, что оптика для твердотельных источников очень восприимчива к загрязнению. Рекомендуется даже не чистить линзу, а сразу заменять ее новой. Для предотвращения попадания частиц расплавленного металла или пыли на линзу, в режущей головке лазерных установок с твердотельным источником устанавливается защитное стекло. Но рассчитать ресурс этого стекла трудно – он зависит и от обрабатываемого металла, и от навыков оператора. Стоимость же оригинального стекла составляет определенную строку затрат при эксплуатации таких установок. В CO₂-установках защитные стекла не используются, и линза более устойчива к загрязнениям, к тому же существует возможность ее периодической очистки. Но тут же нужно отметить, что, несмотря на то, что ресурс линзы для CO₂-установок выше, ее стоимость превышает стоимость линзы для установок с твердотельным резонатором.

Что касается качества получаемой кромки, то при резке на установках с CO₂-резонатором оно выше, особенно это заметно на средних и больших толщинах нержавеющей стали.

И наконец, один из самых важных аспектов сравнения – это производительность. Действительно, характеристики твердотельных источников позволяют быстрее расплавлять металл за счет меньшей длины волны. Это хорошо видно при обработке тонколистовой нержавеющей стали, где скорость резки отличается приблизительно в 3 раза. Часто этот факт принимают за непреложный аргумент при выборе установки лазерной резки для всех материалов, но на самом деле ярко выраженное преимущество достигается только при обработке нержавеющей стали толщиной до 6 мм. Напомним, что скорости обработки конструкционной стали толщиной до 4 мм с помощью разных лазерных источников незна-

eliminates all the above maintenance complexity, except tract maintenance and replacement costs of components. This conclusion is based on the existing primary practice received by Mitsubishi Electric, in serving both CO₂ and fiber laser systems, comparable in power. Therefore, the sharp judgment that the maintenance cost of solid-state source is lower than the maintenance cost of CO₂-laser Cross-Flow is debatable.

Back on topic of the optical path, we should note that the CO₂ lasers when transferring radiation to the cutting head must be purged with auxiliary gas. For installations of up to 4 kW air is used as a purge gas, and nitrogen is used in the lasers with power of above 4 kW. These are additional operating costs. While the solid-state sources uses nitrogen in completely small quantities only to purge optics in the cutting head. Also, it is possible to take into account the characteristic contrast of the optics used in these two types of sources. The point is that the optics for solid-state sources is highly susceptible to contamination. It is recommended not to clean the lens, and immediately replace it with a new one. To prevent molten metal particles or dust on the lens in the cutting head, the solid-state laser source units are equipped with protective glass. But it is difficult to calculate the resource of this glass: it depends on the treated metal, and the operator skills. The cost of the original glass is a certain line costs in the operation of such units. The CO₂-installations do not have protective glass installed and the lens is more resistant to dirt, moreover, there is the possibility of its periodic cleaning. But then it should be noted that despite the fact that the resource of the lens for CO₂-units is higher, its cost is higher than that of the lens for the units with solid-state cavities.

With regard to the quality of the resulting edge, it is higher when cutting on the plants with CO₂-cavities,



чительно различаются между собой. Для резки металлов толщиной выше этой границы наиболее приемлемым оказывается CO₂-лазер. Из практики известно, что в ряде случаев твердотельные источники проигрывают в скорости даже при обработке тонколистовой малоуглеродистой стали. Все связано с тем, что процесс резки здесь протекает с участием процесса горения, при применении в качестве режущего газа кислорода. Помимо этого, разницу в скорости обеспечивает различный уровень комплексной сборки установки, а также заложенные в ее программное обеспечение параметры обработки материалов и толщин. Ведь на производительность влияет не только максимальная скорость подачи, а еще многие другие факторы – скорость обхода углов и раскрытия отверстий, диаметр сопла, давление режущего газа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение можно сделать вывод о сравнительных качествах твердотельной и CO₂-технологии Cross-Flow, говоря только о наиболее важных критериях выбора лазерной установки. Технология твердотельных источников известна весомой экономичностью электроэнергии и оптимально применима для резки тонколистовой нержавеющей стали, но не обладает высокой надежностью. Причина кроется в наличии элементов накачки энергии. Они имеют свой ресурс, по истечении которого их отказ в работе вызывает потерю мощности установки и связан со сложностью ее дальнейшей эксплуатации на максимальных значениях рабочих параметров, до замены дорогостоящего модуля. Отметим, что к настоящему моменту компания Mitsubishi Electric еще ни разу не получила заявку от клиента на замену резонатора ни на одной установке. Этот источник характеризуется минимальными затратами на регламентное обслуживание, отличным качеством получаемой кромки реза и высокой производительностью на широком диапазоне толщин различных материалов. Резонатор Cross-Flow имеет высочайший ресурс работы, поэтому является воплощением понятия "надежность" в области производства и эксплуатации лазерных установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Maintenance Manual CO₂-Laser Processing System Mitsubishi Electric. – Mitsubishi Electric, 2012.
2. Пат. РСТ/JP2004/003317 Япония. 3-axis cross gas flow excitation CO₂-laser processing machine.

which is especially noticeable in the medium and large thick stainless steels.

Finally, one of the most important aspects of the comparison is the performance. Indeed, the characteristics of solid-state sources enable to faster melt the metal due to the lower wavelength. This is clearly seen in the processing of stainless steel sheet, where the speed is different about 3 times. Frequently this fact is taken as an indisputable argument in choosing laser cutting for all materials, but in fact a pronounced advantage is achieved only in the processing of stainless steel up to 6 mm thick. It should be mentioned, that the processing speed of the structural steel to a thickness of 4 mm using different laser sources differs slightly. For cutting the metal with a thickness above this limit, the CO₂-laser is the most acceptable. From practical experience we knew that in some cases, solid-state sources lose speed even when processing low-carbon steel sheet. All this is due to the fact that the cutting process takes place with the combustion process using oxygen as the cutting gas. In addition, the difference is due to the different level of integrated assembly of the installation, as well as its inherent software processing parameters of various materials and thicknesses. After all, the performance is influenced not only the maximum feed rate, but many more other factors, such as bypass speed and cutting hole speed, the diameter of the nozzle, cutting gas pressure.

CONCLUSION

We can draw a conclusion about the relative qualities of solid-state and Cross-Flow CO₂-technology, specifying only the most important criteria for selecting the laser system. Solid-state technology has an important source of electricity and the optimum efficiency for cutting sheet applicability of stainless steel, but it does not have high reliability. The reason is the presence of elements of the energy pumping. They have their own life, after which their failure is reflected in the loss of the power plant and the complexity of its further operation on the maximum values of operating parameters, up to replacement of the expensive module. It should be noted that to date Mitsubishi Electric has never received a claim from a client to replace the cavity on any installation. This source is characterized by minimal expenses for routine maintenance, excellent quality of cutting edge and performance on a wide range of thicknesses of various materials. Cross-Flow cavity has the highest operation resource; therefore it is the embodiment of the concept of "reliability" in the production and operation of laser systems.

