



Оптимизация параметров оптической схемы фокусирования излучения мощного волоконного лазера для сварки сталей больших толщин

Н. В. Грезев¹, И. Н. Шиганов², А. А. Васильев^{1,2}

¹ НТО «ИРЭ-Полюс», г. Фрязино, Моск. обл., Россия

² Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

Представлены результаты расчетов параметров оптической схемы проникновения излучения мощных волоконных лазеров в материалы большой толщины. Показано, что реализация оптической схемы из коллимирующей линзы с фокусным расстоянием 160 мм (С160) и фокусирующей линзы, короткофокусной (F250) или длиннофокусной (F400), дает наилучшие оптические характеристики, необходимые для плавления материалов большой толщины. В системе фокусировки IPG FLW D50 реализованы оптимальные параметры оптической схемы. Экспериментально показано, что выбранные параметры оптической схемы позволяют получить качественный сквозной проплав на сталях толщиной до 12 мм. Предпочтительной оптической схемой для сварки материалов большой толщины следует считать соотношение С 160 / F400.

Ключевые слова: волоконный лазер, стабильность процесса лазерной сварки, расфокусировка лазерного пучка, мощная лазерная сварка с глубоким проникновением

Статья получена: 03.02.2022

Статья принята: 18.04.2022

Parameter Optimization of the Optical Focusing Scheme for a High-Power Optical Fiber Laser Radiation for Heavy Steel Welding

N. V. Grezev¹, I. N. Shiganov², A. A. Vasiliev^{1,2}

¹ NTO "IRE-Polus", Fryazino, Moscow region, Russia

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

The parameters of the optical scheme for the penetration of materials of large thicknesses by the radiation of high-power fiber lasers are calculated. It is shown that the ratio of the collimating lens C160 with the focusing lenses F250 and F400 gives the best optical characteristics necessary for melting materials of large thicknesses. The optimal parameters of the optical circuit are implemented in the focusing system IPG FLW D50. It has been experimentally shown that the selected parameters of the optical scheme make it possible to obtain high-quality through-melting on steels up to 12 mm thick. The preferred optical scheme for welding materials of large thicknesses should be considered the ratio with C160 / F400.

Keywords: Faber Laser, stability of the laser welding process, defocusing of the laser beam, high-power deep-penetration laser welding

Received on: 03.02.2022

Accepted on: 18.04.2022

INTRODUCTION

The interaction of high-power laser radiation of more than 1.0 kW with metals is accompanied by a number of physical phenomena that ensure deep weld penetration and their connection during welding [1, 2]. In this case, a distinctive feature is the formation of a deep keyhole filled with metal vapors [3]. The phenomena

ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие мощного лазерного излучения более 1,0 кВт с металлами сопровождается целым рядом физических явлений, обеспечивающих глубокое проплавление и их соединение в процессе сварки [1, 2]. В этом случае отличительной особенностью является формирование глубокого канала, заполненного парами металла [3]. Явления, происходящие в канале весьма сложны и многообразны, поэтому понимание и их контроль имеют большое теоретическое и практическое значение. Существенное влияние на формирование канала оказывают гидродинамические процессы перемещения жидкости [5], газодинамическое воздействие паров [4], плазменные процессы в канале и над его поверхностью [6, 7] и оптические явления [8]. За счет их взаимодействия и перемещения в процессе сварки металл в канале находится в нестабильном состоянии, связанном в основном с колебательными движениями жидкости на его стенках [9].

Для формирования такого канала требуется вложения концентрированной лазерной энергии не менее $1 \cdot 10^6$ Вт/см². Эта энергия передается вглубь материала за счет многократных отражений от стенок канала [10]. С помощью этого механизма, как правило, металлическая поверхность с очень низкой поглощающей способностью может вести себя почти как абсолютно черное тело, поскольку лазерный луч передает большую часть своей энергии на поверхность канала. Кроме того, явления многократного отражения определяют способ, которым энергия лазерного луча передается металлу, и, что наиболее важно, влияют на все другие физические процессы, происходящие при лазерной обработке материалов, например поток жидкости, теплопередачу и затвердевание. Поэтому оптические явления в канале играют важную роль в получении глубокого проплавления и формировании качественного закристаллизованного металла, например при сварке [11].

Лазерное излучение на выходе из резонатора, как правило, нельзя непосредственно использовать для технологических целей, так как оно не обеспечивает требуемой концентрации энергии, характера распределения плотности мощности в пучке излучения и других требуемых характеристик. Обеспечение плотности мощности, переотражения лучей в канале и влияние их на процесс проплавления создается параметрами оптической системы фокусировки лазерного пучка. В частности, фокусным расстоянием, рэлеевской длиной в фокусе (перетяжке), абберациями, и пр. Кроме

occurring in the keyhole are very complex and diverse, so their understanding and control are of great theoretical and practical importance. A significant influence on the keyhole formation is exerted by the hydrodynamic liquid movement processes [5], gas-dynamic vapor effects [4], plasma processes in the keyhole and above its surface [6, 7], and optical phenomena [8]. Due to their interaction and movement during the welding process, the metal in the keyhole is in an unstable condition, mainly associated with the oscillatory liquid movements on its walls [9].

The formation of such a keyhole requires provision of concentrated laser energy of at least $1 \cdot 10^6$ W/cm². This energy is transferred deep into the material due to multiple reflections from the keyhole walls [10]. With this mechanism, a metal surface with very low absorptive capacity can behave as an absolute black body, since the laser beam transfers most of its energy to the keyhole surface. In addition, multiple reflection phenomena determine the way in which the laser beam energy is transferred to the metal and, most importantly, affect all other physical processes that occur during laser processing of materials, such as fluid flow, heat transfer and solidification. Therefore, optical phenomena in the keyhole play an important role in obtaining deep weld penetration and formation of the high-quality crystallized metal, for example, in the case of welding [11].

As a rule, laser radiation at the resonator output cannot be directly used for technological purposes, since it does not provide the required energy concentration, the nature of the power density distribution in the radiation beam, and other required specifications. Provision of the power density, re-reflection of beams in the keyhole and their influence on the weld penetration process are determined by the parameters of the laser beam focusing optical system, in particular, the focal distance, the Rayleigh length at the focus (waist), aberrations, etc. In addition, the position of the laser beam waist relative to the surface of the metal being processed has a significant effect [12]. When the position of the laser beam waist is changed, various formation defects are developed in the form of splashes, metal leakage, and cavities that lead to the defect formation during welding [13].

To ensure the stable formation of the weld penetration keyhole and crystallized metal during welding by the high-power optical fiber laser radiation, it is first necessary to calculate and design the optimal optical scheme that will provide the required spot diameter in the laser beam waist and focus depth (Rayleigh length). Depending on the selected optical scheme, it will be possible to determine the focus position rela-



того существенное влияние оказывает положение перетяжки лазерного пучка относительно поверхности обрабатываемого металла [12]. При изменении положения перетяжки лазерного пучка возникают различные дефекты формирования в виде брызг, вытекания металла, пор, которые приводят к образованию дефектов при сварке [13].

Для обеспечения стабильного формирования канала проплавления и закристаллизовавшегося металла при сварке излучением волоконного лазера большой мощности необходимо в первую очередь рассчитать и сконструировать оптимальную оптическую схему, которая обеспечит необходимый диаметр пятна в перетяжке лазерного пучка и глубину фокуса (рэлеевскую длину). В зависимости от выбора оптической схемы можно будет определить положение фокуса относительно поверхности обрабатываемого металла и все остальные параметры.

Целью настоящей работы является определение базовых принципов подбора оптических схем фокусирования излучения волоконных лазеров для сварки металлов различных толщин.

ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ

Экспериментальная часть работы проводилась на роботизированном комплексе, в состав которого входит волоконный лазер IPG YLS-10000 с выходной мощностью излучения до 10 кВт и диаметром транспортного волокна 100 мкм, система охлаждения IPG LC 340, промышленный робот KUKA KR 60 HA. На выходе из транспортного волокна лазерное излучение обладает следующими характеристиками: длина волны излучения $\lambda=1,07$ мкм, угол расходимости излучения $\theta=0,16$ рад, параметр $M^2=11,03$ (отношение произведения диаметра перетяжки $2\omega_0$ на угол расходимости пучка θ по отношению к произведению аналогичных параметров идеального пучка с гауссовым распределением), параметр качество пучка $BPP=3,756$ мм·мрад.

Преобразование лазерного излучения осуществляется оптической головкой IPG FLW D50. Эффективность разработанной оптической схемы проверялась в процессе лазерной сварки со сквозным проплавлением пластин из сталей 09Г2С (К52) и 10Г2ФБЮ (К60) толщиной от 8 до 12 мм.

РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ

Результаты, полученные в ходе ряда исследований, показали [11, 12], что при проплавлении металлов большой толщины волоконными лазерами

relative to the surface of the metal being processed and all other parameters.

The purpose of this paper is to determine the basic principles for selecting optical focusing schemes for the optical fiber laser radiation for welding metals with various thicknesses.

EQUIPMENT AND MATERIALS USED

The experimental part of the work was performed using a robotic system that included an IPG YLS-10000 optical fiber laser with a beam output power of up to 10 kW and a transport fiber diameter of 100 μm , an IPG LC 340 cooling system, and an industrial robot KUKA KR 60 HA. At the transport fiber output, laser radiation has the following specifications: radiation wavelength $\lambda=1.07$ μm , beam intensity divergence angle $\theta=0.16$ rad, parameter $M^2=11.03$ (the ratio of the product of the waist diameter $2\omega_0$ to the beam intensity divergence angle θ in relation to the product of similar parameters of an ideal beam with a Gaussian distribution), the beam quality parameter $BPP=3.756$ mm·mrad.

The laser radiation is converted by the optical head IPG FLW D50-W. The developed optical scheme efficiency was tested during the laser welding process with through weld penetration of plates made of low alloy steel X52 and X80 steels with a thickness of 8 to 12 mm.

OPTICAL SCHEME DESIGN

The results obtained in the course of a number of studies have shown [11, 12] that when the optical fiber lasers melt heavy metals, a rather narrow vapor-gas keyhole is formed. The dimensions and shape of the vapor-gas keyhole largely depend on the focusing parameters and the focus location relative to the surface of the workpiece being welded. A graphical analysis of the vapor-gas keyhole shape, obtained from X-ray images, with converging laser beams superimposed on it, is shown in Fig. 1 (source [13]).

Analysis of the obtained schemes has showed that the maximum weld penetration depth occurs at such a focus position (-5 mm), when the front keyhole wall is closest to the vertical. In this case, all radiation penetrates into the keyhole depth. The minimum weld penetration depth of 5.46 mm occurs at the focus position (4 mm), at which a sufficiently large tilt angle is developed on the front keyhole wall that in turn leads to the reflection of a part of the energy into the upper rear part of the keyhole wall. As a result, the splashes and defects are observed in this area that is a consequence of overheating.

возникает парогазовый канал достаточно узкой формы. Размеры и форма парогазового канала в значительной степени зависят от параметров фокусировки и положения фокуса относительно поверхности свариваемой детали. Графический анализ формы парогазового канала, полученного с рентгеновских снимков, с наложением на него сходящихся лазерных лучей, показан на рис. 1 (источник [13]).

Анализ полученных схем показал, что максимальная глубина проплавления возникает при таком положении фокуса (-5 мм), когда передняя стенка канала наиболее приближена к вертикали. В этом случае все излучение проникает в глубину канала. Минимальная глубина проплавления 5,46 мм возникает при том положении фокуса (4 мм), при котором на передней стенке канала возникает достаточно большой угол наклона, который в свою очередь приводит к отражению части энергии в верхнюю заднюю часть стенки канала. В результате наблюдаются выплески и дефекты в этой зоне, что является следствием перегрева.

Такая высокая чувствительность процесса сварки к изменению положения фокуса при использовании волоконного лазера возникает вследствие того, что используемая сталь имеет более высокий коэффициент поглощения лазерного излучения с длиной волны 1,07 мкм, чем, например, лазерного излучения с длиной волны 10,6 мкм. Поэтому эффект многократного переотражения излучения, наблюдаемый при лазерной сварке газовыми лазерами, [14] заметно снижен.

Чтобы сделать процесс сварки волоконными лазерами более стабильным и повторяемым, необходимо ослабить чувствительность сварочного процесса к положению фокуса оптической системы. Для того, чтобы более равномерно распределить энергию по глубине канала предложено использовать две оптические схемы с различными фокусирующими линзами - C160/F250 (короткофокусную) и C160/F400 (длиннофокусную), где C - обозначение фокусного расстояния коллиматора, а F - фокусное расстояние фокусирующей линзы (рис. 2).

Расчет параметров лазерного излучения провели по следующим формулам [15].

$$BPP = \frac{\varnothing_f \theta}{2 \cdot 2} = \frac{M^2 \lambda}{\pi}, \quad (1)$$

где BPP (beam parameter product) - параметр качества пучка, мм·мрад; \varnothing_f - диаметр транспортного волокна, мкм; θ - угол расходимости, рад; λ - длина волны, мкм. Далее находим BPP_0 для

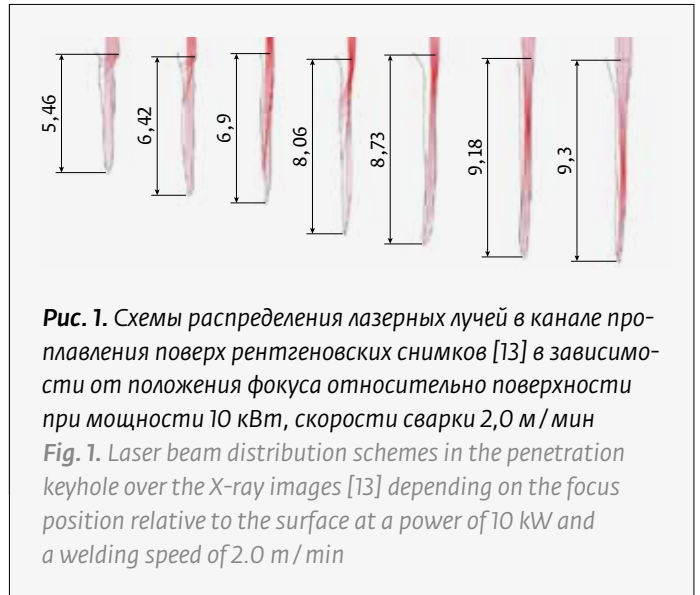


Рис. 1. Схемы распределения лазерных лучей в канале проплавления поверх рентгеновских снимков [13] в зависимости от положения фокуса относительно поверхности при мощности 10 кВт, скорости сварки 2,0 м/мин
Fig. 1. Laser beam distribution schemes in the penetration keyhole over the X-ray images [13] depending on the focus position relative to the surface at a power of 10 kW and a welding speed of 2.0 m/min

Such a high sensitivity of the welding process to changes in the focus position when using an optical fiber laser is based on the fact that the steel used has a higher absorption coefficient of laser radiation with a wavelength of 1.07 μm than, for example, laser radiation with a wavelength of 10.6 μm . Therefore, the effect of multiple radiation re-reflection observed during the laser welding process with gas lasers [14] is noticeably reduced.

In order to make the welding process with the optical fiber lasers more stable and repeatable, it is necessary to reduce the welding process sensitivity to the position of the optical system focus. In order to more evenly distribute the energy over the keyhole depth, it is proposed to use two optical schemes with various focusing lenses, such as C160/F250 (short-focus) and C160/F400 (long-focus), where C=160 mm is the focal distance of the collimator, F=250 mm is the focal distance of the short-focus focusing lens and F=400 mm is the focal distance of the long-focus focusing lens (Fig. 2).

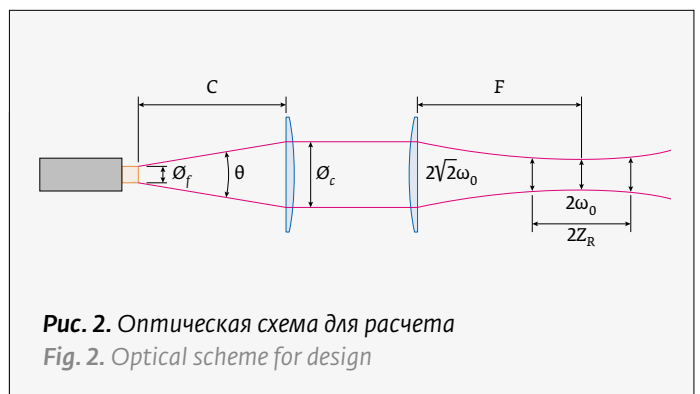


Рис. 2. Оптическая схема для расчета
Fig. 2. Optical scheme for design

идеального лазерного пучка и BPP для пучка, получаемого в действительности:

$$BPP_0 = \frac{\lambda}{\pi}; \quad (2)$$

$$M^2 = \frac{BPP}{BPP_0}. \quad (3)$$

Тогда на коллиматор попадает лазерный пучок диаметром \varnothing_c :

$$\varnothing_c = C \cdot \theta, \quad (4)$$

где C – фокусное расстояние коллиматора, мм. А диаметр перетяжки лазерного пучка в фокусе $2\omega_0$ через фокусное расстояние линзы F определяем по формуле:

$$2\omega_0 = \frac{F}{C} \varnothing_f. \quad (5)$$

Глубину резкости определяется длиной Релея $2Z_R$, поэтому находим Z_R как:

$$Z_R = \frac{\omega_0^2}{BPP}. \quad (6)$$

В соответствии с расчетами оптическая схема C160/F250 формирует в фокусе пучок диаметром 150 мкм, который при мощности падающего излучения 10 кВт обладает достаточно большой плотностью мощности 52,15 МВт/см², при этом

The laser radiation parameters were calculated using the following formulas [15].

$$BPP = \frac{\varnothing_f \theta}{2} = \frac{M^2 \lambda}{\pi}, \quad (1)$$

where BPP (beam parameter product) is a beam quality parameter, mm·mrad; \varnothing_f is the transport fiber diameter, μm ; θ is the divergence angle, rad; λ is the wavelength, μm . Next, we will obtain BPP_0 for an ideal laser beam and BPP for a beam obtained in real conditions:

$$BPP_0 = \frac{\lambda}{\pi}; \quad (2)$$

$$M^2 = \frac{BPP}{BPP_0}. \quad (3)$$

Then a laser beam with a diameter \varnothing_c hits the collimator:

$$\varnothing_c = C \cdot \theta, \quad (4)$$

where C is the focal distance of the collimator, mm. The laser beam waist size at the focus $2\omega_0$ along the focal distance of the lens F is determined by the following formula:

$$2\omega_0 = \frac{F}{C} \varnothing_f. \quad (5)$$

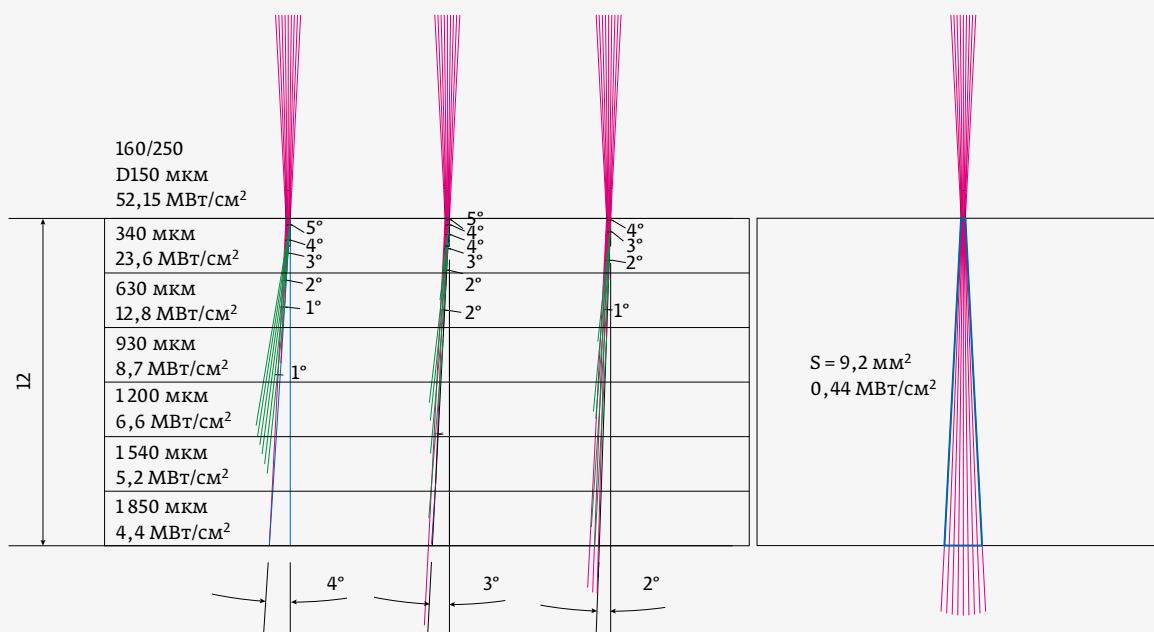


Рис. 3. Распределение плотности мощности по глубине канала для оптической системы C160 / F250

Fig. 3. Power density distribution over the keyhole depth for the C160 / F250 optical system

Таблица. Сравнение параметров лазерного пучка, формируемого оптическими системами

Table. Comparison of the laser beam parameters formed by the optical systems

Параметр Parameter	C160/F250	C160/F400
Диаметр перетяжки лазерного пучка в фокусе $2\omega_0$, мкм Laser beam waist size at the focus $2\omega_0$, μm	156	250
Глубина фокуса $2Z_R$, мм Depth of field $2Z_R$, mm	3,25	8,32
Плотность мощности E_F , МВт/см ² Power density E_F , MW/cm ²	52,15	20,37

глубина фокуса (длина Рэлея) составляет 3,25 мм (см. табл).

Оптическая схема C160/F400 формирует в фокусе пучок с перетяжкой диаметром 250 мм и при мощности лазерного излучения 10 кВт создает меньшую плотность мощности 20,4 МВт/см², при этом глубина фокуса составляет 8,32 мм (см. табл).

Чтобы определить насколько рассчитываемые оптические схемы будут оптимальны для использования в процессах сварки, например стальных пластин толщиной 12 мм, предлагаем рассмотреть еще несколько параметров. Во-первых, изменение распределения плотности мощности по глубине «парогазового» канала. Во-вторых, среднюю плотность мощности в плоскости передней стенки канала и угол падения и отражения лазер-

The depth of field is determined by the Rayleigh length $2Z_R$. The Z_R value is obtained as follows:

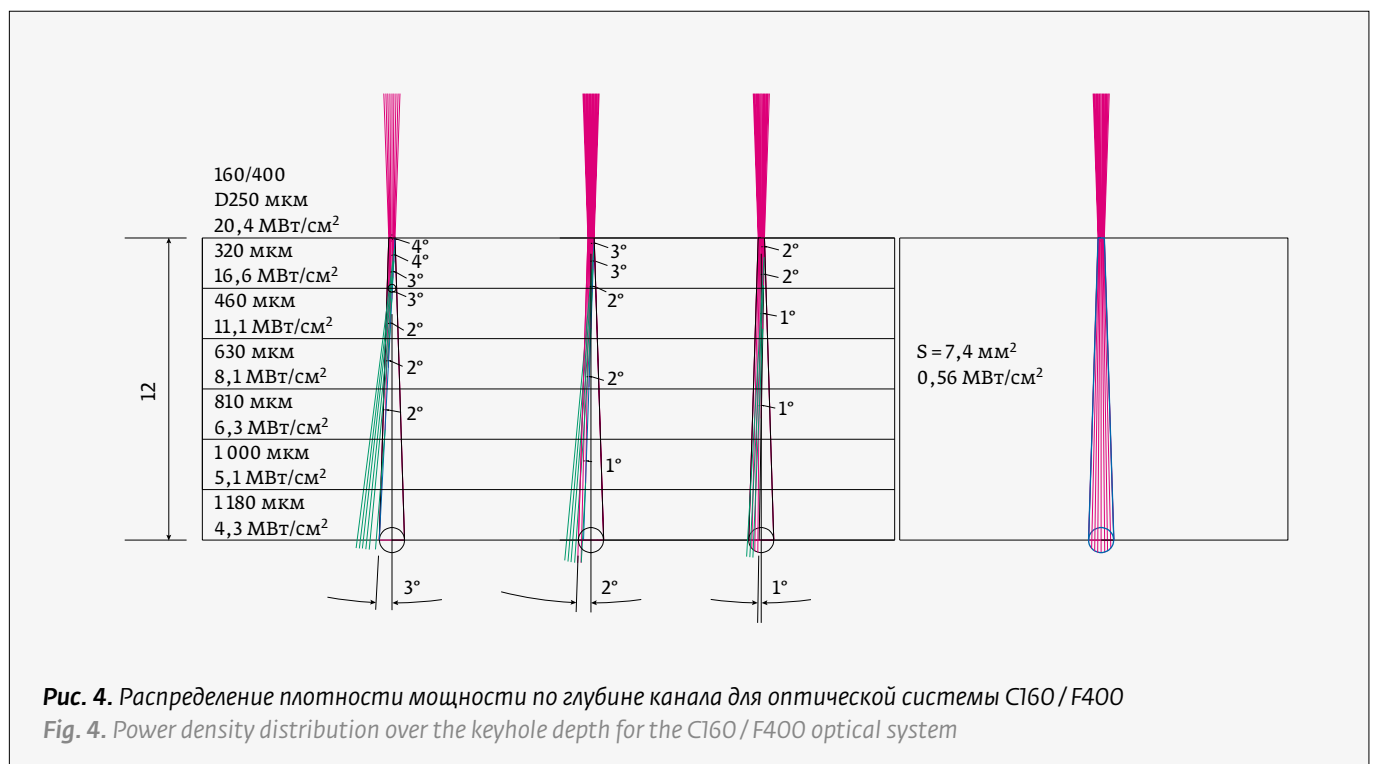
$$Z_R = \frac{\omega_0^2}{BPP}. \quad (6)$$

In accordance with the calculations, the C160/F250 optical scheme forms a beam with a diameter of 150 μm at the focus that, at an incident radiation power of 10 kW, has a sufficiently high power density of 52.15 MW/cm², while

the depth of field (Rayleigh length) is 3.25 mm (see Table).

The C160/F400 optical scheme forms a beam with a waist diameter of 250 mm at the focus, and at a laser power of 10 kW it leads to a lower power density of 20.4 MW/cm², while the depth of field is 8.32 mm (see Table).

To determine optimality of the designed optical schemes for use in the welding processes, for example, steel plates with a thickness of 12 mm, we propose to consider a few more parameters. First, it is a change in the power density distribution over the depth of the vapor-gas keyhole. Secondly, it is the average power density in the plane of the front keyhole wall and the laser beam incidence and reflection angles from the conditional front keyhole wall (see Figs. 3 and 4).





ного луча от условной передней стенки канала (см. рис. 3 и 4).

При использовании короткофокусной оптической схемы C160/F250 при распространении лазерного пучка в направлении от положения фокуса на поверхности металла вглубь канала плотность мощности снижается из-за расходимости пучка и, соответственно, увеличения диаметра лазерного пятна (рис. 3). Снижение происходит в следующей последовательности: на расстоянии -2 мм плотность мощности составляет 23,6 МВт/см², на расстоянии -4 мм плотность составляет 12,8 МВт/см², далее при заглублинии на -6 мм плотность мощности снижается до 8,7 МВт/см², а на расстоянии -8 мм от фокуса величина становится еще меньше и доходит до 6,6 МВт/см², далее на -10 мм соответственно - 5,2 МВт/см² и на -12 мм составляет 4,4 МВт/см².

Применительно для сварки деталей толщиной 12 мм разница в значении плотности мощности в фокусе (52,15 МВт/см² на поверхности в соответствии со схемой) и на выходе (4,4 МВт/см²) велика, значения отличаются в 12 раз. Такая разница будет приводить в области фокуса к брызгообразованию из-за перегрева металла. Конечно, путем варьирования положения фокуса относительно поверхности детали можно будет добиваться стабильного формирования канала, но низкая плотность мощности на выходе из пластины будет увеличивать вероятность появления дефектов в виде пор и полостей вследствие недостаточной плотности мощности и нестабильности канала. Средняя плотность мощности в плоскости передней стенки составляет 0,44 МВт/см², а это явно недостаточно для обеспечения стабильности процесса. Оптическая схема C160/F250, исходя из оценки распределения плотности мощности по глубине, более подходит для использования при сварке металлических пластин толщиной 6-8 мм.

Снижение величины плотности мощности лазерного излучения для длиннофокусной системы C160/F400 менее интенсивно: на расстоянии -2 мм величина плотности мощности 16,6 МВт/см², далее при увеличении глубины с шагом 2 мм: -4 мм, -6 мм, -8 мм, -10 мм, -12 мм получаем распределение плотности мощности: 11,1 МВт/см², 8,1 МВт/см², 6,3 МВт/см², 5,1 МВт/см², 4,3 МВт/см². Применительно для сварки деталей толщиной 12 мм разница плотности на поверхности детали и на выходе отличается в 4,7 раза. Это намного лучше, чем при использовании короткофокусной системы. При этом средняя плотность мощности в плоскости передней стенки, выше

While using the C160/F250 short-focus optical scheme, when the laser beam propagates in the direction from the focus position on the metal surface deep into the keyhole, the power density is decreased due to the beam divergence and, accordingly, an increase in the laser spot diameter (Fig. 3). The decrease occurs in the following sequence: at a distance of -2 mm, the power density is 23.6 MW/cm², at a distance of -4 mm, the density is 12.8 MW/cm², then, at a depth of -6 mm, the power density is decreased to 8.7 MW/cm², and at a distance of -8 mm from the focus, the value becomes even smaller and reaches 6.6 MW/cm², then at -10 mm, respectively, it is 5.2 MW/cm², and at -12 mm it is 4.4 MW/cm².

While welding the parts with a thickness of 12 mm, the difference in the power density value at the focus (52.15 MW/cm² at the surface in accordance with the scheme) and at the output (4.4 MW/cm²) is large, the values differ by 12 times. Such a difference will lead to the splash formation in the focus area due to the metal overheating. Certainly, by varying the focus position relative to the surface of the part, it will be possible to achieve stable keyhole formation. However, the low power density at the plate output will increase the likelihood of defects in the form of pores and cavities due to insufficient power density and keyhole instability. The average power density in the plane of the front wall is 0.44 MW/cm² that is clearly insufficient to obtain process stability. The C160/F250 optical scheme, based on an estimate of the power density distribution through depth, is more suitable for use in welding the metal plates with a thickness of 6-8 mm.

The decrease in the laser radiation power density for the C160/F400 long-focus system is less intense: at a distance of -2 mm, the power density is 16.6 MW/cm², then while increasing the depth at a pitch of 2 mm: -4 mm, -6 mm, -8 mm, -10 mm, -12 mm, we get the power density distribution as follows: 11.1 MW/cm², 8.1 MW/cm², 6.3 MW/cm², 5.1 MW/cm², 4.3 MW/cm². When welding the parts with a thickness of 12 mm, the difference in density on the part surface and at the output differs by 4.7 times. This is much better than with the short-focus system. In this case, the average power density in the plane of the front wall is higher and equal to 0.56 MW/cm². This power density distribution is suitable for welding the heavy thick parts.

Figure 5 shows the power density distribution in the focusing range of the laser beam waist from 0 to -12 mm on the welded sample surface using two selected types of focusing optical systems (the maximum laser power for the selected optical fiber laser is 10 kW).

и составляет $0,56 \text{ МВт/см}^2$. Такое распределение плотности мощности подходит для сварки деталей с большой толщиной.

На рис. 5 показано распределение плотности мощности в интервале фокусирования перетяжки лазерного пучка от 0 до -12 мм на поверхности свариваемого образца при использовании двух выбранных типов фокусирующих оптических систем (максимальная мощность лазерного излучения для выбранного волоконного лазера равна 10 кВт).

Проведена оценка угла падения и отражения лазерного пучка на переднюю стенку канала, которая в свою очередь условно определяется по диагонали получившейся трапеции по всей толщине в области воздействия лазерного луча. Для оптической схемы C160/F250 этот угол равен 4° , для C160/F400 – составляет 3° . Трассировка лазерного луча по такой условной передней стенке для оптической схемы C160/F250 показывает, что в этом случае переотражение от передней стенки идет в центральную область, в случае использования оптической схемы C160/F400 – в нижнюю часть, что должно быть более благоприятно для получения большей глубины проплавления.

В процессе сварки, угол передней стенки в зависимости от скорости сварки, положения фокуса может меняться, поэтому трассировку отражений лазерных лучей целесообразно производить для еще нескольких положений с шагом в 1° . Так для оптической схемы C160/F250 при уменьшении угла наклона до 3 и 2° направление переотражения смещается на глубину 6 и 8 мм . Для оптической схемы C160/F400 при любом положении угла наклона переотражение лучей идет на глубину 10 – 12 мм , что предположительно более благоприятно для сварки толщины до 12 мм .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Оценка применимости рассчитанных параметров оптической схемы проводилась экспериментально путем проплавления стальных пластин толщиной $8, 10$ и 12 мм из низколегированных сталей (09Г2С, К60). Критерием оценки служила стабильность формирования сварного шва со сквозным проплавлением. Смещение положение фокуса при использовании обеих фокусирующих линз производилось в диапазоне от -9 мм до 9 мм . Скорости сварки составляли $0,6$ и $0,9 \text{ м/мин}$. Были исследованы зависимости изменения требуемой мощности и диапазоны возможных отклонений положения фокуса, не влияющих на качество проплавления и результат сварки.

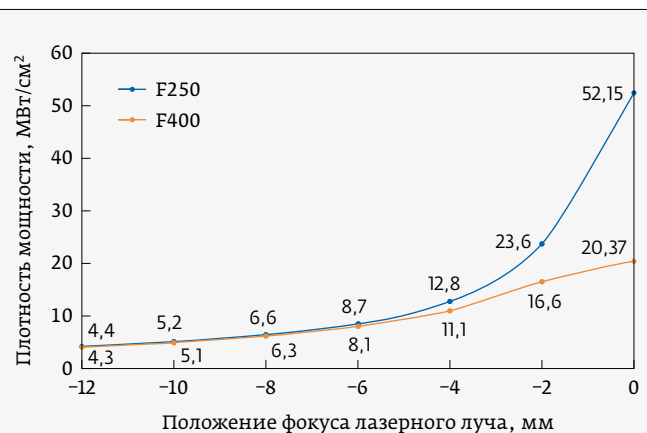


Рис. 5. Распределение плотности мощности в интервале фокусирования лазерного луча от 0 до -12 мм при линзах F250 и F400 на мощности лазерного излучения 10 кВт

Fig. 5. Power density distribution in the laser beam focusing range from 0 to -12 mm with the lenses F250 and F400 at a laser power of 10 kW

An estimate is made in relation to the laser beam incidence and reflection angles on the front key-hole wall that, in turn, is conditionally determined by the diagonal of the resulting trapezoid over the entire thickness in the area of laser beam impact. For the C160/F250 optical scheme this angle is 4° , for C160/F400 it is 3° . The laser beam tracing along such a conditional front wall for the C160/F250 optical scheme shows that in this case the re-reflection from the front wall is directed to the central area, in the case of the C160/F400 optical scheme it is directed to the lower part that should be more favorable for obtaining greater weld penetration depth.

In the welding process, the angle of the front wall depending on the welding speed and focus position can be changed, so it is advisable to trace the laser beam reflections for several more positions in increments of 1° . For example, for the C160/F250 optical scheme, as the inclination angle decreases to 3 and 2° , the re-reflection direction shifts to a depth of 6 and 8 мм . For the C160/F400 optical scheme, at any position of the inclination angle, the beams are re-reflected to a depth of 10 – 12 мм that is presumably more favorable for welding with the thicknesses up to 12 мм .

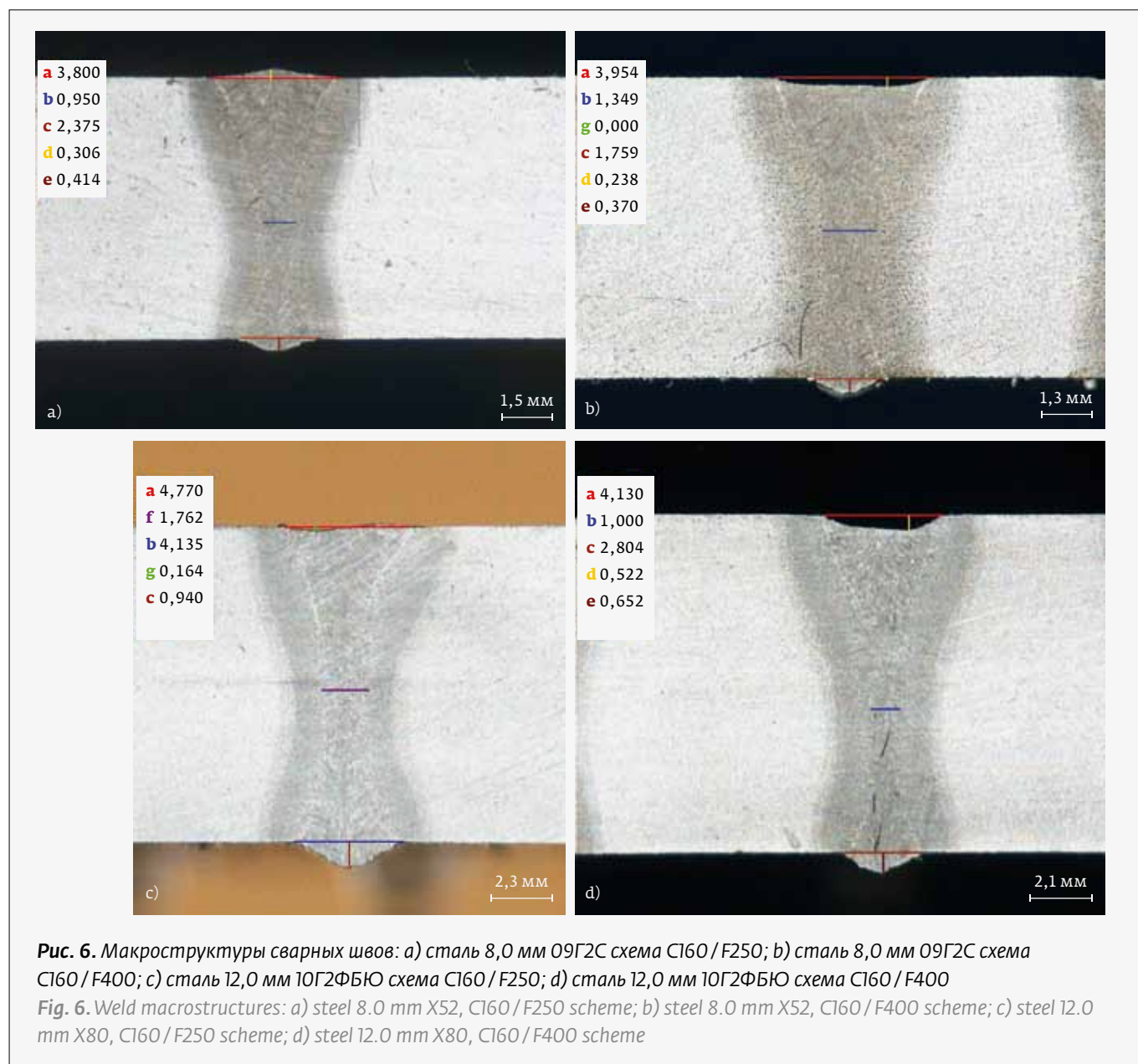
EXPERIMENTAL PROCEDURE

The applicability of the calculated optical scheme parameters was evaluated experimentally by melting steel plates with the thickness of $8, 10$ and 12 мм

Рассматриваемые на каждой фокусирующей линзе диапазоны положений фокуса лазерного луча выбраны с учетом диаметра пятна на поверхности. При положении фокуса лазерного луча на поверхности металла пятно, полученное на фокусирующей линзе F400 больше, чем на линзе F250. При увеличении расфокусирования пучка до 3 мм при использовании обеих фокусирующих линз пятна будут иметь приблизительно одинаковый размер (рис. 5). Далее эффект от расфокусировки будет отличаться: при использовании длиннофокусной линзы для получения пятна того же диаметра, что и при использовании короткофокусной линзы, потребуется большая расфокусировка.

made of low-alloy steels (X52, X80). The evaluation criterion was the weld stability with through penetration. The focus position when using both focusing lenses was shifted in the range from -9 mm to 9 mm. The welding speeds were 0.6 and 0.9 m/min. The dependences of changes in the required power and the ranges of possible focus position deviations that do not affect the penetration quality and the welding result, were studied.

The ranges of the laser beam focus positions considered on each focusing lens are selected with due regard to the spot diameter on the surface. When the laser beam focus is located on the metal surface, the spot obtained on the F400 focusing lens is larger



LDesigner-SLS

СДЕЛАНО В РОССИИ



Мы разработали программно-аппаратный комплекс «LDesigner-SLS» для обеспечения процесса селективного лазерного сплавления порошковых материалов.

Комплекс включает в себя сканирующую систему, состоящую из сканаторной и коллиматорной головок, контроллера и программного продукта. Использование сканаторов собственного производства (Патенты РФ № 2767033 и № 2766317) позволило значительно снизить себестоимость комплекса по сравнению с зарубежными аналогами, а также дало возможность изменять выходные параметры системы в зависимости от требований заказчика.

Программа (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018617750) дает возможность не только осуществлять подготовку и непосредственный процесс лазерного спекания, но и позволяет создавать новые алгоритмы и обрабатывать технологические режимы, оптимальные для использования новых отечественных порошковых материалов.

www.ateko-tm.ru

г. Москва, ул. Бол. Семеновская, д. 42, стр. 7

8 (495) 642-07-63, 8 (499) 369-47-01

ateko-tm@ateko-tm.ru

На рис. 6 показаны фотографии макрошлифов сварных швов со сквозным проявлением, полученных на сталях разной толщины на оптимальных режимах с использованием различных оптических схем. Как видно на макрошлифах, обе оптические схемы C160/F250 и C160/F400 обеспечивают качественное формирование с полным проплавлением пластин толщиной от 8,0 до 12,0 мм при положении фокуса на поверхности.

По результатам эксперимента построены графики, отражающие влияние глубины фокуса фокусирующей линзы на необходимую мощность лазерного излучения для получения сквозного проплавления пластины толщиной 8 мм (рис. 7) и 12 мм (рис. 8).

Увеличение толщины свариваемого металла требует больше мощности лазерного излучения при использовании короткофокусной оптики (F250) в сравнении с длиннофокусной (F400). Классическое распределение плотности мощности в сечении лазерного пучка подчиняется распределению Гаусса. В процессе сварки пучок распространяется в образующемся парогазовом канале под некоторым углом к передней стенке. При расчетах принимаем, что канал имеет форму цилиндра. От сохранения постоянства распределения плотности мощности пучка в канале зависит стабильность процесса.

При использовании фокусирующей линзы F400 с более глубоким фокусом требуется меньше мощности излучения для сквозного проплавления стали К60 толщиной 12 мм требуется меньше мощности лазерного излучения.

Смещение фокуса в глубь металла на 3–6 мм снижает требуемую мощность для сквозного проплавления на 15–17%, а подъем над поверхностью на 3–6 мм повышает мощность для проплавления незначительно на 5–7%. Эти зависимости сохраняются для обеих оптических схем. При увеличении скорости сварки до 0,9 м/мин для полного проплавления требуется увеличение мощности на 15–17% при фокусировке на поверхности, однако зависимости при смещении фокуса остаются в том же диапазоне.

Так же наблюдается изменение внешнего формирования, образования разбрызгивания, провисание проплава в зависимости от положения фокуса. Установлено, что диапазон смещений фокуса при получении сварных швов без указанных дефектов для оптической системы C160/F400 в 3 раза шире, чем для системы C160/F250. Это предоставляет возможность управлять в более

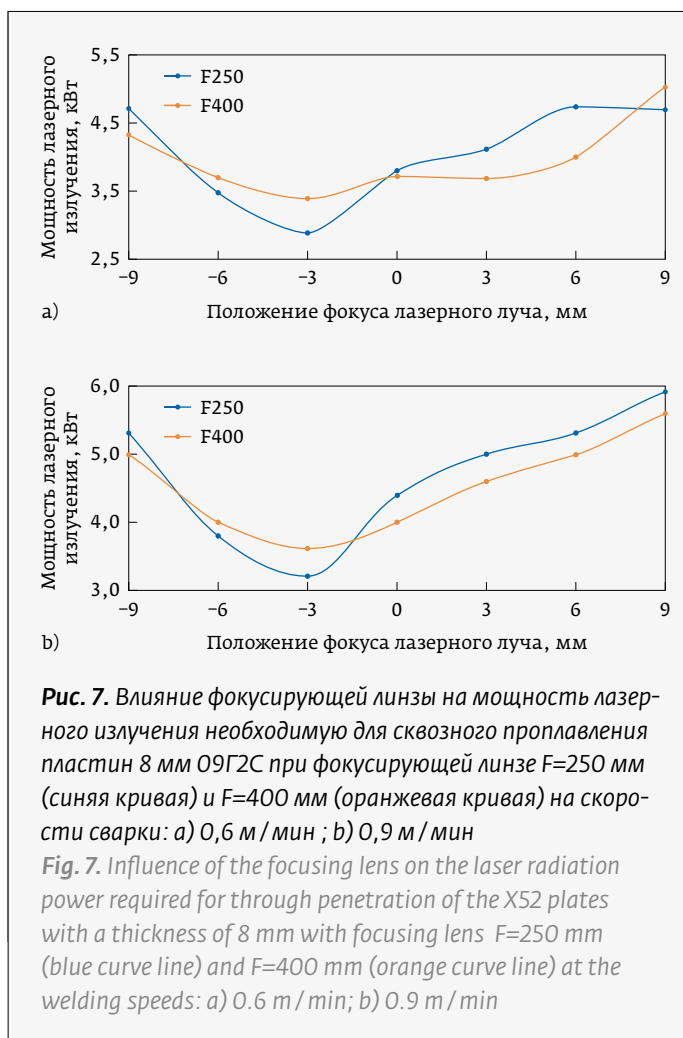


Рис. 7. Влияние фокусирующей линзы на мощность лазерного излучения необходимую для сквозного проплавления пластин 8 мм 09Г2С при фокусирующей линзе F=250 мм (синяя кривая) и F=400 мм (оранжевая кривая) на скорости сварки: а) 0,6 м/мин ; б) 0,9 м/мин

Fig. 7. Influence of the focusing lens on the laser radiation power required for through penetration of the X52 plates with a thickness of 8 mm with focusing lens F=250 mm (blue curve line) and F=400 mm (orange curve line) at the welding speeds: а) 0.6 m/min ; б) 0.9 m/min

than on F250. Further, as the beam defocusing is increased to 3 mm, the spots of both focusing lenses will have approximately the same size (Fig. 5). In the case of further magnification, a greater defocusing is required to obtain the same spot size on a long-focus lens.

Figure 6 shows the images of weld macrosections with a through penetration, obtained on the steels with various thicknesses in optimal modes using various optical schemes. As it can be seen on the macrosections, both C160/F250 and C160/F400 optical schemes provide high-quality formation with full weld penetration of plates with a thickness of 8.0 to 12.0 mm at the focus position on the surface.

Based on the experimental results, the graphs are plotted that reflect the impact of the focus depth of the focusing lens on the required laser radiation power to obtain through penetration of a plate with a thickness of 8 mm (Fig. 7) and 12 mm (Fig. 8).

Increased thickness of the welded metal requires more laser power when using the short-focus optics

широких пределах параметрами сварки с применением оптической системы C160/F400. На основании этого данная оптическая схема более пригодна для сварки более толстых материалов.

Выводы

1. В связи с повышенной поглощательной способностью металлов на длине волны волоконного лазера равной 1,07 мкм, при сварке больших толщин требуется более расширенный анализ оптических параметров фокусирующих систем.
2. Помимо расчета базовых параметров (диаметра фокусного пятна, плотности мощности и глубины фокуса) требуется оценка и дополнительных параметров:
 - распределение плотности мощности по глубине «парогазового» канала;
 - средней плотности мощности на плоскости передней стенки;
 - оценка угла падения и отражения лазерного луча от передней стенки канала.
3. На примере двух оптических систем C160/F250 и C160/F400 экспериментально подтверждена более высокая применимость длиннофокусной системы для сварки толщины 10–12 мм, область

(F250) compared to the long-focus (F400) optics due to a deeper focus.

When using the F400 focusing lens with a deeper focus, less laser power is required for through penetration of K60 steel with a thickness of 12 mm.

The focus transition into the metal depth by 3–6 mm reduces the required power for through penetration by 15–17%, and its rise above the surface by 3–6 mm increases the power for penetration slightly by 5–7%. These dependences are preserved for both optical schemes. In the case of an increase in welding speed up to 0.9 m/min, full penetration requires an increase in power by 15–17% when focusing on the surface. However, the dependences remain in the same range when the focus is shifted.

There are also changes in the external formation, splash formation, sagging of the melt, depending on the focus position. It has been established that the range of focus transitions when obtaining the welds without indicated defects for the C160/F400 optical system is 3 times wider than for the C160/F250 system. This makes it possible to control the welding parameters over a wider range using the C160/F400 optical system. Based on this fact, this optical scheme is more suitable for welding thicker materials.

ЭССЕНТОПТИКС ESSENTOPTICS

PHOTON RT

Спектрофотометр для Оптиков | Spectrophotometer for Coaters



185 – 5200 nm

**УНИКАЛЬНО ШИРОКИЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ
ДИАПАЗОН В ОДНОМ ПРИБОРЕ**

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

ООО «ЭссентОптикс»

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

оптимальных режимов сварки находятся в более широких диапазонах.

REFERENCES

1. Gladush G. G., Smurov I.YU. *Fizicheskie osnovy lazernoj obrabotki materialov*. – М.: FIZMATLIT. 2017. 592 p. ISBN 978-5-9221-1712-8.
Гладуш Г. Г., Смулов И. Ю. *Физические основы лазерной обработки материалов* – М.: ФИЗМАТЛИТ. 2017. 592 с. ISBN 978-5-9221-1712-8.
2. Katayama S. *Spravochnik po lazernoj svarke*. – М.: TEKHNOСFЕРА. 2015. 704 s. ISBN 978-5-94836-420-9.
Катаяма С. *Справочник по лазерной сварке*. – М.: ТЕХНОСФЕРА. 2015. 704 с. ISBN 978-5-94836-420-9.
3. Kawahito Y, Mizutani M, Katayama S. *Investigation of High-Power Fiber Laser Welding Phenomena of Stainless Steel*. Transactions of Joining and Welding Research Institute. 2007;36(2): 11–16.
4. Jae Y., Sung H., Dave F. Mechanism of keyhole formation and stability in stationary laser welding. *Journal of Physics D. Applied Physics*. 2002; 35: 1570–1580.
5. Krivcun I. V., Suhorukov S. B., Sidorec V. N., Koval O. B. Modelirovanie processov isparenija metalla i gazodinamiki metallichesogo para v parogazovom kanale pri lazernoj svarke. *Avtomaticheskaya svarka*. 2008; 10: 19–26.
Кривцун И. В., Сухоруков С. Б., Сидореч В. Н., Ковал О. Б. Моделирование процессов испарения металла и газодинамики металлического пара в парогазовом канале при лазерной сварке. *Автоматическая сварка*. 2008; 10: 19–26.
6. Petrovskij B. H., Uspenskij C. A., SHCHeglov P.YU., Gumenyuk A. V., Retmajer M. Issledovanie paro-plazmennogo svarochного fakela pri svarke moshchnym itterbiovym volokonnym lazerom. *YAdernaya fizika i inzhiniring*. 2011; 2(2): 159–165.
Петровский В. Н., Успенский С. А., Щеглов П. Ю., Гуменюк А. В., Ретмайер М. Исследование паро-плазменного сварочного факела при сварке мощным иттербиевым волоконным лазером. *Ядерная физика и инжиниринг*. 2011; 2(2): 159–165.
7. Dilthey U. Kinetic description of keyhole plasma in laser welding. *Journal of Physics D. Applied Physics*. 2000;33: 2747–2753. DOI: 10.1088/0022-3727/33/21/312.
8. Solana P., Negro G. A study of the effect of multiple reflections on the shape of the keyhole in the laser processing of materials. *Journal of Physics D. Applied Physics*. 1997; 30: 3216–3222. DOI: 10.1088/0022-3727/30/23/006.
9. Jae Y., Sung H., Dave F. Mechanism of keyhole formation and stability in stationary laser welding. *Journal of Physics D. Applied Physics*. 2002; 35: 1570–1580. DOI: 10.1088/0022-3727/35/13/320.
10. Hyungson Ki, Pravansu S. Mohanty, and Jyotirmoy Mazumder Multiple reflection and its influence on keyhole evolution. *Journal of Laser Applications*. 2002;14(1): 39–45. DOI: 10.2351/1.1449885.
11. Zhang M. J., Chen G. Y., Zhou Y., Li S. C., Deng H. Observation of spatter formation mechanisms in high-power fiber laser welding of thick plate. *Applied Surface Science*. 2013;280: 868–875. DOI: 10.1016/j.apsusc.2013.05.081.
12. Grigor'yanс A.G., SHiganov I.N., Misurov A. I. *Tekhnologicheskije processy lazernoj obrabotki / Pod red. A. G. Grigor'yanca*. – М.: Izd-vo MGТУ im. N. E. Baumana. 2008. 664 p.
Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. *Технологические процессы лазерной обработки / Под ред. А. Г. Григорьянца*. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2008. 664 с.
13. Li S., Chen G., Katayama S., Zhang Y. Relationship between spatter formation and dynamic molten pool during high-power deep-penetration laser welding. *Applied Surface Science*. 2014; 303: 481–488.
14. Honda H., Tsukamoto S., Kawaguchi I., and Arakane G. Keyhole behavior in deep penetration CO₂ laser welding. *Journal of Laser Applications*. 2010;22(2): 43–47. DOI: 10.2351/1.3455815.
15. Grigor'yanс A.G., Vasil'cov V. V. Prostranstvennaya struktura izlucheniya moshchnyh volnovodnyh i volokonnyh lazerov dlya tekhnologij. *Vestnik MGТУ im. N. E. Baumana. Ser. «Mashinostroenie»*. 2012; 5–33.
Григорьянц А. Г., Васильцов В. В. Пространственная структура излучения мощных волноводных и волоконных лазеров для технологий. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение»*. 2012; 5–33.

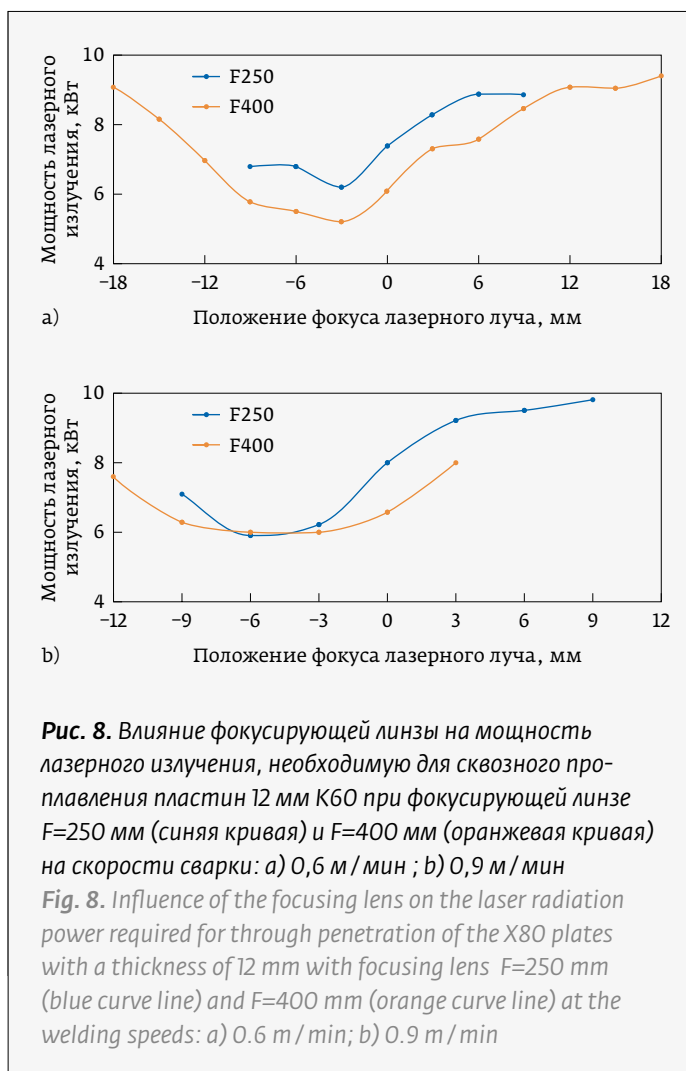


Рис. 8. Влияние фокусирующей линзы на мощность лазерного излучения, необходимую для сквозного проплавления пластин 12 мм К60 при фокусирующей линзе $F=250 \text{ мм}$ (синяя кривая) и $F=400 \text{ мм}$ (оранжевая кривая) на скорости сварки: а) $0,6 \text{ м/мин}$; б) $0,9 \text{ м/мин}$

Fig. 8. Influence of the focusing lens on the laser radiation power required for through penetration of the X80 plates with a thickness of 12 mm with focusing lens $F=250 \text{ mm}$ (blue curve line) and $F=400 \text{ mm}$ (orange curve line) at the welding speeds: a) 0.6 m/min ; b) 0.9 m/min

CONCLUSIONS

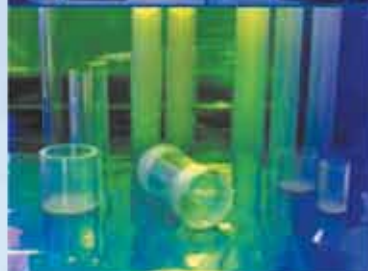
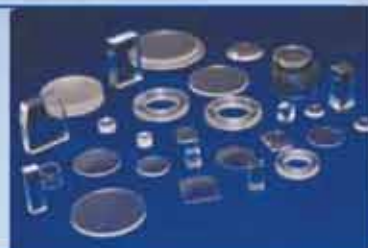
1. Due to the increased absorption capacity of metals at an optical fiber laser wavelength of $1.07 \mu\text{m}$, when welding the materials with great thicknesses, a more extended analysis of the focusing system optical parameters is required.
2. In addition to calculating the basic parameters (focal spot diameter, power density and focus depth), an assessment of additional parameters is also required:
 - distribution of power density over the depth of the vapor-gas keyhole;
 - average power density on the plane of the front wall;
 - estimation of the laser beam incidence and reflection angles from the front keyhole wall.
3. Using the example of two optical systems C160/F250 and C160/F400, the higher applicability of the long-focus system for welding the materials with thicknesses of 10–12 mm has been experimentally confirmed; the optimal welding modes is in wider ranges.

Синтетический САПФИР

Производство кристаллов и оборудования



Пластины, окна, подложки:
смотровые, защитные, сканерные окна, часовые
стекла, экраны для смартфонов и мобильных
телефонов, оптические компоненты



Трубы и тигли
трубки и тигли различной длины и сечения
для ламп высокого давления, термореакторов,
установок плазменного травления



Стержни круглого и
прямоугольного сечения:
световоды для пирометров, плунжера для
хроматографических насосов и сиквенаторов,
изоляторы, износостойкие направляющие



Индивидуальный заказ:
Термореакторы, часовые и приборные камни,
подшипники, компоненты для научной и
медицинской техники, брекеты, сувенирная
продукция



Оборудование для выращивания
кристаллов

Nika-M60, Nika-M30, Nika-3, Nika-PROFILE



ЗАО «РОСТОКС-Н»

Since 1993

142432 Россия, Московская обл., г. Черноголовка, Проспект Академика Семенова, д. 9, ЗАО «Ростокс-Н»
Тел.: +7 496 527 35 91, +7 496 527 35 96, +7 496 527 35 95 • Факс: +7 496 52 7 36 03
E-mail: belov@ezan.ac.ru, info@rostox-n.ru • <http://www.rostox-n.ru>