

ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА ТОНКОЛИСТОВОЙ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

В. Д. ШЕЛЯГИН, А. Г. ЛУКАШЕНКО, кандидаты техн. наук,
Д. А. ЛУКАШЕНКО, А. В. БЕРНАЦКИЙ, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),
В. П. ГАРАЩУК, канд. техн. наук (НТУУ «Киевский политехнический институт»),
В. И. ЛУЦЕНКО, инж. (ООО НИИЦ «АРМАТОМ», г. Киев)

Исследованы особенности лазерной сварки листов аустенитной нержавеющей стали толщиной 0,15 и 0,20 мм. Показано, что при определенном диапазоне мощности лазерного излучения экспериментально измеренная ширина шва удовлетворительно описывается моделью линейного движущегося источника в однородном приближении. При повышении мощности излучения на свариваемой поверхности образуется отверстие, через которое уходит часть мощности пучка, что приводит к нарушению зависимостей, описываемых этой моделью. С учетом выявленных особенностей предложена методика определения оптимальных параметров режима сварки, обеспечивающих максимальный эффективный КПД процесса.

Ключевые слова: лазерная сварка, нержавеющая сталь, тонкий лист, эффективный КПД, критерии качества, ширина и форма шва, структура металла шва, прочность

Лазерную сварку тонкого (толщиной $\delta = 0,1 \dots 0,2$ мм) металлического листа из нержавеющей стали встык применяют при изготовлении трубных заготовок для производства сильфонов. Большое количество типов заготовок в условиях мелкосерийного производства требует оперативного выбора оптимальных режимов сварки.

В отечественных и зарубежных изданиях количество публикаций, посвященных оценке и влиянию параметров режима лазерной сварки на свойства стыковых соединений нержавеющей сталей малой толщины, а также раскрывающих методы выбора оптимальных технологических режимов, незначительно [1–6].

Целью настоящей работы являются определение взаимосвязи между параметрами режима лазерной сварки тонколистовой нержавеющей стали и критериями качества сварного соединения, а также разработка методики выбора параметров режима сварки в условиях производства.

Материалы и аппаратура для экспериментов. Выполняли сварку ленты $\delta = 0,15$ и $0,20$ мм из сталей 12X18H10T и 1.4541 (в соответствии с DIN EN 10028-7:2000 последняя является близким аналогом стали 08X18H10T).

Образцы сваривали на трехкоординатном лазерном комплексе «АРМА-100М» (изготовитель — ИЭС им. Е. О. Патона), оснащенном иттербиевым волоконным одномодовым лазером типа ЛС-01-Б с мощностью излучения 100 Вт

(изготовитель — НТО «ИРЭ-Полус», г. Фрязино, РФ), генерирующая сердцевина которого имеет диаметр 10 мкм. Характеристики лазерного пучка представлены на рис. 1 [7]. Лазерное излучение фокусировалось на металл в пучок диаметром 40 мкм.

В качестве защитных газов использовали гелий (сверху сварного соединения) и аргон (снизу). Экспериментальным путем получены данные о расходе некоторых защитных газов и их смесей: гелия $(50 \dots 60) \cdot 10^{-5}$ м³/с; 50 % He + 50 % Ar $(45 \dots 55) \cdot 10^{-5}$ м³/с; Ar $(15 \dots 20) \cdot 10^{-5}$ м³/с.

Исследовали как сварные стыки, так и проплавления на целом листе металла. При сварке по стыку листы вырезали листовыми ножницами с электроприводом MHSU 1000x2.0 (фирмы «Schroeder Maschinenbau», Германия). Приспособление, в котором стыковались свариваемые листы, обеспечивало минимальную депланацию кромок.

Прочность сварных соединений испытывали на разрывной машине FP10/1. Ширину шва измеряли на участке, выполненном при установившемся тепловом режиме сварки, с помощью малого инструментального микроскопа ММИ-2. В качестве основных критериев качества сварного

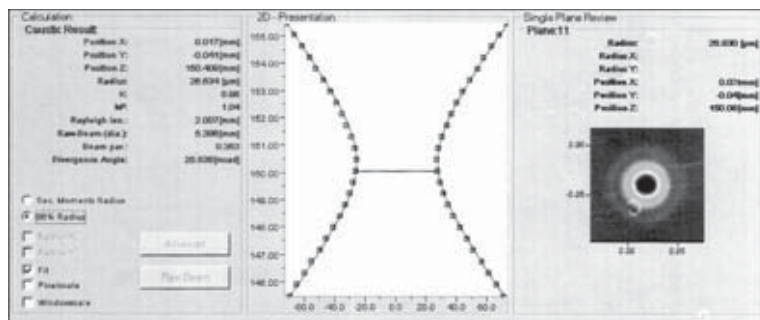


Рис.1. Характеристики лазерного пучка лазера ЛС-01-Б, полученные с помощью компьютерной программы «Primes Laser Quality Monitor»



соединения выбраны геометрия сварного шва и прочность соединения.

Основными требованиями, предъявляемыми к геометрии шва на трубных заготовках сильфонов, являются вертикальность линии сплавления, отсутствие наплывов и провисаний. При таких требованиях допустимо исследовать только взаимосвязь между параметрами режима сварки и шириной шва.

Влияние скорости сварки на ширину шва (проплавление). Образцы из стали 12X18H10T толщиной 0,15 мм сваривали и проплавливали при постоянной мощности лазера $P = 65$ Вт, а из стали 1.4541 толщиной 0,15 и 0,20 мм соответственно при $P = 55$ и 60 Вт. Скорость сварки $v_{св}$ изменяли в диапазоне от 0,8 до 2,5 см/с. Зависимости ширины шва и эффективного КПД от скорости сварки в образцах из названных выше сортов стали показаны на рис. 2.

Кривая 1 на рис. 2, а (экспериментальные данные) показывает изменения ширины швов, выполненных на стали 12X18H10T толщиной $\delta = 0,15$ мм, в зависимости от скорости сварки, а кривая 1' рассчитана по методу наименьших квадратов $b = f(v_{св})$. Как видно из рисунка, все экспериментальные точки хорошо ложатся на гиперболическую кривую, описываемую выражением

$$b = 2,981 \cdot 10^{-3} + 1,163/v_{св}. \quad (1)$$

Для стали 1.4541 гиперболическая зависимость имеет место лишь при большой скорости сварки (ср. кривые 2, 2' и 3, 3' на рис. 2, а). Причем для стальной ленты $\delta = 0,20$ мм эта зависимость имеет место при несколько меньшей скорости, чем при $\delta = 0,15$ мм. При обоих значениях толщины ленты и малой скорости сварки ширина шва меньше, чем следует из гиперболической зависимости, определенной по экспериментальным данным при большой скорости сварки.

Зависимость ширины шва от мощности лазерного излучения. Опыты проводили при постоянной скорости сварки $v_{св} = 0,8, 1,5$ и 2,0 см/с, мощность изменяли в диапазоне от 30 до 100 Вт. Полученные результаты представлены на рис. 3, а.

У образцов из стали 12X18H10T $\delta = 0,15$ мм при скорости сварки 1,5 и 2,0 см/с ширина шва возрастает с увеличением мощности до 60 Вт (кривые 1 и 2 на рис. 3, а), а при больших значениях P практически от нее не зависит.

Образцы из стали 1.4541 $\delta = 0,15$ и 0,20 мм сваривали при скорости сварки $v_{св} = 0,8$ см/с. При мощности 30 и 40 Вт ширина шва была практи-

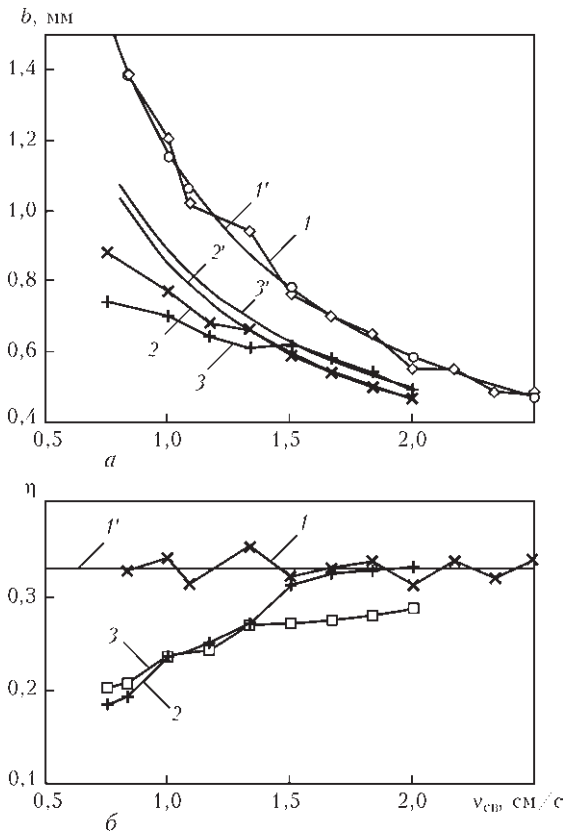


Рис. 2. Зависимость ширины шва b (а) и эффективного КПД η (б) от скорости сварки $v_{св}$ в образцах из стали 12X18H10T $\delta = 0,15$ мм (1, 1'), стали 1.4541 $\delta = 0,15$ мм (2, 2') и $\delta = 0,20$ мм (3, 3')

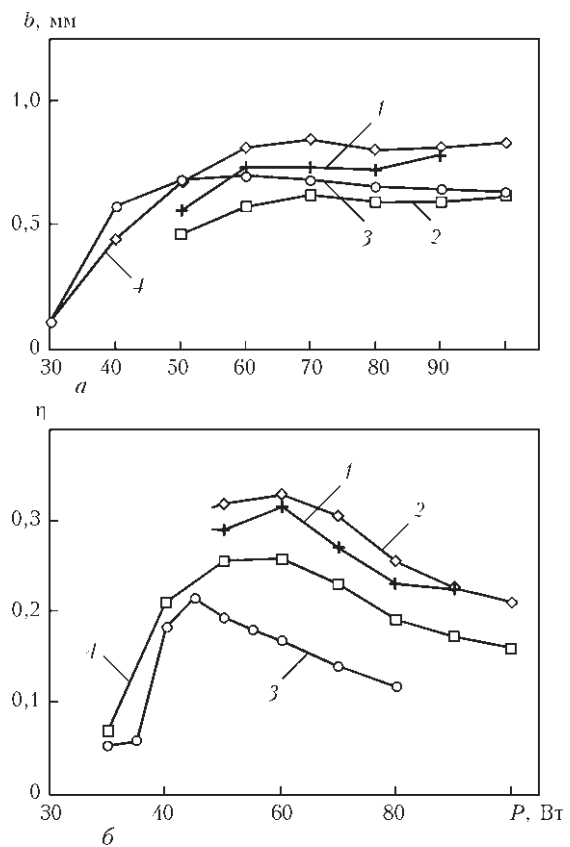


Рис. 3. Зависимость ширины шва b (а) и эффективного КПД η (б) от мощности лазерного пучка у образцов из стали 12X18H10T $\delta = 0,15$ мм при $v_{св} = 1,5$ (1) и 2,0 (2) см/с и из стали 1.4541 $\delta = 0,15$ (3) и 0,20 мм (4) при $v_{св} = 0,8$ см/с

чески такой же, как и у образцов из стали 12X18H10T толщиной $\delta = 0,15$ мм, с увеличением значений P рост ширины шва замедлялся, а при $P \geq 60$ Вт значение b оставалось практически постоянным (см. кривые 3 и 4 на рис. 3).

Прочностные характеристики сварных соединений. Соединения выполняли при использовании в качестве защитного газа аргона (снизу сварного соединения) и гелия (сверху). В таблице показаны результаты испытаний сварных соединений на разрыв. Сравнение этих результатов показало, что наиболее прочные и соответствующие техническим требованиям соединения получены при мощности лазерного пучка 50...65 Вт и скорости сварки от 1,0 до 1,8 см/с.

Прочностные характеристики сварных соединений при различных режимах сварки и защитных газак

№ образца	P , Вт	$v_{св}$, см/с	Усилие разрыва F , МН	Относительное удлинение δ , %	Защитный газ
1	65	1,82	65,8	25,0	Гелий
2	50	1,00	81,6	25,0	»
3	60	1,25	86,7	28,0	»
4	65	1,67	45,0	12,5	Аргон
5	50	1,00	57,3	16,3	»
6	60	1,25	60,0	22,0	»
Основной металл	—	—	63,6	32,4	—
Техническое требование	—	—	≥ 54	≥ 20	—

Металлографические исследования металла швов. Исследовали образцы ленты из стали 1.4541 (структура основного металла аустенитная с выделениями карбонитридов). Образцы сваривали при мощности лазерного пучка $P = 40, 50, 60$ и 70 Вт и $v_{св} = 1$ см/с. Образцы травили электролитическим способом в 20%-м растворе хромовой кислоты. Твердость измеряли на микротвердометре М-400 фирмы «LECO» при нагрузке 0,98 Н. Содержание феррита определяли с помощью ферритометра «Ferritgehaltmesser 1,053» (Германия).

На основании металлографических исследований указанных образцов можно сделать следующие выводы:

при мощности лазерного пучка 40...70 Вт и скорости сварки 1 см/с линии сплавления расположены практически вертикально, наплывы и провисания отсутствуют (рис. 4);

на краю литой зоны расположены столбчатые кристаллиты, а в центре — равноосные кристаллы;

твердость металла шва повышается незначительно (на 13...17 %) по сравнению основным

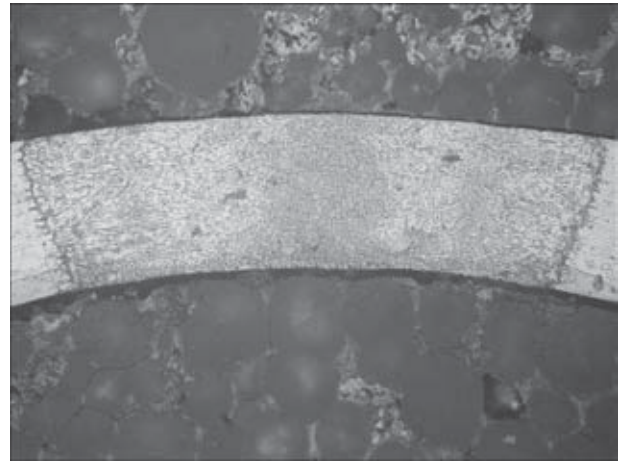


Рис. 4. Макрошлиф ($\times 200$) соединения листа стали 1.4541 $\delta = 0,20$ мм при $v_{св} = 0,8$ см/с и $P = 60$ Вт

металлом (твердость основного металла $HV 01 156...165$; в центральной части шва $HV 01 176...193$, в зоне термического влияния $HV 01 165...181$); с увеличением мощности лазерного пучка содержание ферритной фазы повышается от 0 (в основном металле) до 0,15 об. % (в металле шва).

Обсуждение результатов. В качестве расчетной схемы нагрева металла принята модель движущегося линейного сосредоточенного источника в однородном приближении с гауссовым распределением интенсивности излучения, при котором температура в любой точке пластины одинакова или осредненная по толщине [9].

Сравнение практических результатов (см. рис. 2) с расчетными показало, что в определенном диапазоне значения скорости совпадают. При этом максимальная температура T_{max} , которая достигается на расстоянии y_0 от оси шва, определяется выражением [9]

$$T_{max} = \frac{0,484q}{v_{св} c\gamma 2y_0} \left(1 - \frac{\beta y_0^2}{2a} \right), \quad (2)$$

где q — тепловая мощность лазерного пучка; $c\gamma$ — объемная теплоемкость; β — коэффициент теплоотдачи; a — коэффициент теплопроводности. При T_{max} , равной температуре плавления исследуемой стали, $2y_0 \equiv b$. Поскольку сварка происходит на большой скорости, то можно принять, что поверхностная теплоотдача пренебрежимо мала ($\beta = 0$). Тогда зависимость ширины шва от скорости сварки описывается гиперболической зависимостью.

Аппроксимирующая функция (1) отличается от зависимости (2) свободным членом, однако его значение так мало, что им можно пренебречь. Хорошая согласованность зависимостей (1) и (2) на отдельных их участках шва свидетельствует о малых и стабильных потерях тепла за время пребывания этого участка при температуре плавления.



Эффективность процесса сварки принято характеризовать значением эффективного КПД η , которое обычно определяют способом калориметрирования, однако при сварке тонких пластин лазерным источником малой мощности такой способ измерения достоверных результатов не дает. Для качественной оценки эффективности процесса сварки можно взять расчетное значение η . Используем формулу (2) для расчета тепловой мощности, необходимой для проплавления листа на ширину, значения которой получены экспериментально. Отношение вычисленного значения тепловой мощности к мощности лазерного пучка дает нам значение коэффициента использования мощности лазерного пучка или эффективного КПД η .

При вычислении η пользовались следующими теплофизическими характеристиками нержавеющей стали: коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0,25$ Вт/(см·К) (для высоколегированных сталей значение λ возрастает с повышением температуры примерно до 1100 К, выше которой значение коэффициента λ различных марок стали в аустенитном состоянии близки друг к другу и не превышают 0,25...0,33 Вт/(см·К) [8], из-за увеличения λ при низкой температуре взято его наименьшее значение из возможных); удельной теплоемкостью $c = 3,97$ Дж/(м³·К) (0,46 кДж/(кг·К)); коэффициентом температуропроводности $a = 0,063$ см²/с; температурой плавления $T_{\max} = 1673$ К [10]. Зависимость коэффициента эффективного КПД от скорости сварки и мощности лазерного пучка представлена соответственно на рис. 2, б и 3, б.

Согласно выражению (2) ширина шва прямо пропорциональна тепловой мощности линейного источника. Однако, как показывают экспериментальные данные, такая зависимость у сталей 12X18H10T и 1.4541 имеет место лишь на начальном участке кривой (при малом значении мощности); с увеличением мощности ширина шва зависит от P незначительно. Для стали 1.4541 ширина шва при малой скорости сварки меньше той, которая следует из гиперболической зависимости (см. рис. 2, б). На этом рисунке показано, что на участках гиперболической зависимости ширины шва от скорости сварки значение расчетного эффективного КПД постоянно и равно $\eta = 0,33$ или близко к нему. Там же, где экспериментальные значения η отклоняются от гиперболической зависимости, $\eta < 0,33$, причем это значение тем меньше, чем больше отклонение.

Как видно из рис. 3, б, при наименьших значениях мощности ($P < 40$ Вт) $\eta < 0,07$, а с повышением давления эффективный КПД растет до значений близких к 0,33, а затем понижается. Наименьшие значения η соответствуют неполному проплавлению листа. Полученную зависимость

$\eta = f(P)$ можно объяснить следующим. С увеличением мощности пучка поверхность металла расплавляется, при этом увеличивается коэффициент поглощения лазерного излучения, далее образуется кратер и парогазовый канал, вследствие чего увеличиваются поглощение излучения и эффективный КПД. Этот механизм действует до тех значений мощности пучка, при которых глубина парогазового канала сравняется с толщиной листа, а η не достигнет максимального значения. С дальнейшим увеличением мощности пучка в дне кратера образуется отверстие, через которое часть лазерного излучения проходит сквозь лист без передачи энергии кромкам металла. При этом эффективный КПД резко снижается. Поскольку диаметр горловины сфокусированного пучка в нашем случае составляет примерно 0,04 мм, то расчетный диаметр линейного источника и температура его боковой поверхности должны зависеть от мощности незначительно [11]. Возрастание мощности лазерного излучения приводит к увеличению диаметра образовавшегося внутри линейного источника отверстия, а соответственно и энергетических потерь. При этом ширина шва во много раз превосходит диаметр линейного источника и практически не изменяется.

Согласно полученным оценкам эффективности процесса сварки можно сделать вывод, что выбор технологических параметров сварки можно осуществить по максимальному значению эффективного КПД.

Исходя из рассмотренного выше сформулируем методику определения оптимальных технологических параметров лазерной сварки тонколистовых нержавеющей заготовок: следует задать необходимую с технологической точки зрения ширину шва; определить экспериментальным путем зависимость ширины сварного шва от скорости сварки $b(v_{\text{св}})$ при $P = \text{const}$; вычислить максимальное значение скорости сварки $v_{\text{св max}}$, при котором обеспечивается прямоугольная геометрия шва; определить экспериментально зависимость $b(P)$ при $v_{\text{св}} = v_{\text{св max}}$; найти точку перегиба, в которой значение ширины шва b остается неизменным при дальнейшем увеличении мощности лазерного излучения P . Полученные значения скорости сварки являются оптимальными с точки зрения максимальной эффективности процесса сварки.

Данная методика была применена при разработке технологии лазерной сварки мелких серий прямошовных тонкостенных сварных труб различного диаметра из нержавеющей сталей, предназначенных для изготовления сильфонов. Спроектированные трехкоординатные комплексы лазерной сварки типа «АРМА-100М» (рис. 5) внедрены на ЗАО «КЦКБА» (г. Киев) и ООО НИИЦ «АРМАТОМ» (г. Киев). Применение разработанной методики совместно с оригинальной техно-



Рис. 5. Внешний вид трехкоординатного комплекса типа «АРМА-100М» для лазерной сварки



Рис. 6. Образцы многослойных сильфонов, изготовленных с применением лазерной сварки трубных заготовок из стали 1.4541 $\delta = 0,15$ мм

логической оснасткой позволило достичь производительности одного такого комплекса до 5000 шт. в месяц трубных заготовок для изготовления сильфонов. Сильфоны (рис. 6) сертифицированы в системе сертификации ОИТ на соответствие требованиям российских норм и правил, а также других нормативных документов, устанавливающих требования по обеспечению безопасности в области использования атомной энергии РФ.

Изготовленная продукция используется в различной запорной арматуре, работающей в трубопроводах повышенного давления, при постоянной высоко- и низкочастотной вибрации и

в запорных узлах, требующих точной установки положения запорного органа.

Выводы

1. Экспериментально установлено, что качественные сварные соединения, удовлетворяющие соответствующим техническим требованиям, достигаются при мощности лазерного пучка 50...65 Вт, скорости сварки около 1 см/с и использовании в качестве защитного газа гелия (сверху) и аргона (снизу).

3. Разработана методика определения оптимальных технологических параметров для достижения максимальной эффективности сварочного процесса в условиях производства.

1. *Технология* электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. акад. Б. Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1974. — 768 с.
2. <http://www.thefabricator.com/article/tubepipeproduction/laser-welding-of-stainless-pressure-tubes>.
3. <http://www.medicaldevice-network.com/features/feature81029/>.
4. *On the welding of austenitic/ferritic stainless steels by an high power diode laser* / G. Daurelio, F. Memola Capece Minutolo, F. Curcio, F. Caiazza // Proc. 12th Intern. sci. conf. «Achievements in Mechanical&materials engineering», 7–10 Dec., 2003, Clivice. — Clivice, 2003. — P. 187–190.
5. *Nobuyuki A. Micro welding of thin stainless steel foil with a direct diode laser* / A. Nobuyuki, F. Yoshinori, I. Takashi, T. Masahiro // Transactions of JWRI. — 2005. — 34, № 1. — P. 19–23.
6. *Стасовский Ю. Н.* Научные основы ресурсосберегающих технологий производства прецизионных труб малых размеров применительно к условиям мини-производства с использованием тонкостенной сварной заготовки // Сучасні пробл. металургії. — 2008. — 11. — С. 377–384.
7. *YLR-100-AC. Ytterbium fiber laser* // IPG Laser GmbH. — 2009.
8. *Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюрлов А. И.* Технологические процессы лазерной обработки: Учеб. пособие для вузов / Под ред. А. Г. Григорьянца. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. — 664 с.
9. *Рыкалин Н. Н.* Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 296 с.
10. *Таблицы физических величин: Справ.* / В. Г. Аверин, Б. А. Аронзон, Н. С. Бабаев, Н. А. Бабушкина / Под ред. акад. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976. — 1008 с.
11. *Веденов А. А., Гладуш Г. Г.* Физические процессы при лазерной обработке материалов. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 208 с.

Peculiarities of laser welding of the 0.15 and 0.20 mm thick austenitic stainless steel sheets were studied. It is shown that at a certain power of the laser beam the experimentally measured width of the weld can be satisfactorily described by the model of a linearly moving source in a homogeneous approximation. Increase in power of the laser beam results in formation of a hole on the surface being welded, through which part of the beam power goes away, thus leading to violation of correlations with this model. Based on the peculiarities revealed, a procedure is proposed for determination of optimal welding parameters to provide the maximal efficiency of the process.

Поступила в редакцию 14.05.2010,
в окончательном варианте 24.01.2011