

Особенности сварки металлов излучением импульсно-периодического Nd : YAG-лазера малой мощности

Г.Г.Гладуш, А.Ф.Глова, С.В.Дробязко

Получены зависимости глубины и ширины провара от скорости перемещения образцов из нержавеющей стали и сплава алюминия при воздействии на них излучения импульсно-периодического Nd : YAG-лазера мощностью 5–15 Вт. Показано, что при частотах следования импульсов 25–50 Гц и скважности 150–300 удельные затраты мощности на проплавление на 1–2 порядка меньше, чем при сварке излучением непрерывных и импульсно-периодических CO₂-лазеров.

Ключевые слова: импульсно-периодический лазер, сварка, глубина провара, удельные затраты мощности.

1. Введение

Наряду с качеством сварного соединения важным параметром при лазерной сварке металлов являются удельные затраты мощности (УЗМ) W/h – отношение средней мощности лазера W к глубине провара h . Чем меньше это отношение, тем большую глубину сварного шва обеспечит лазер с заданной мощностью. Другой важной характеристикой служит кинжалность h/b – отношение h к ширине провара b .

Известно, что при сварке непрерывным лазерным излучением отношение $h/b > 1$ достигается при превышении некоторого порогового значения плотности мощности на поверхности металла из-за появления в расплаве парогазового канала (ПГК), по которому излучение проникает в глубь образца [1, 2]. При этом перенос металла с передней стенки ПГК на заднюю имеет циклический характер [2–4], а средняя температура стенок ПГК близка к температуре кипения металла [5]. Типичные значения УЗМ при сварке непрерывным лазерным излучением составляют 300–1000 Вт/мм, а кинжалность изменяется в пределах 3–8 [2].

Использование импульсно-периодических (ИП) CO₂- и Nd : YAG-лазеров с длительностью импульсов ~10 мс и скважностью 2–10 позволило несколько уменьшить УЗМ (до 200 Вт/мм) без ухудшения качества шва и кинжалности [2, 6–8]. При таком режиме облучения, как показала скоростная рентгеновская съемка ванны расплава [8], ПГК формируется примерно за 1 мс после начала лазерного импульса и заполняется расплавом за 1.5 мс после его окончания. При этом средняя температура стенок ПГК оказывается ниже, чем при сварке непрерывным излучением.

При скважности 40–200 расплав образуется на передней стенке ПГК и переносится на его заднюю стенку за

время, много меньшее интервала между импульсами, а после выключения лазерного излучения заполнения ПГК расплавом не происходит [9–12]. Удельные затраты мощности в данном режиме минимальны и составляют 40–160 Вт/мм, кинжалность достигает 20.

Глубина сварки излучением ИП лазера в пределе малых скоростей перемещения мишени описывается приближенным выражением [2]

$$h = \frac{E}{\pi d c \rho T_b (\chi \tau)^{1/2}} + \frac{W}{2\pi k T_b} \ln \left[\frac{h}{d/2 + (4\chi/f)^{1/2}} \right], \quad (1)$$

где E и τ – соответственно энергия и длительность лазерного импульса; f – частота следования импульсов; $W = Ef$; d – диаметр фокального пятна; T_b – температура кипения металла; c , ρ , k и χ – соответственно удельная теплоемкость, плотность, коэффициент теплопроводности и коэффициент температуропроводности материала. Отметим, что описываемая формулой (1) зависимость h от E и f соответствует измерениям [11]; зависимость h от других параметров экспериментально практически не исследована.

Из формулы (1) можно получить следующую оценку УЗМ:

$$\frac{W}{h} = \pi d c \rho T_b f (\chi \tau)^{1/2} \times \left\{ 1 + \frac{df}{2} \left(\frac{\tau}{\chi} \right)^{1/2} \ln \left[\frac{h}{d/2 + (4\chi/f)^{1/2}} \right] \right\}^{-1}. \quad (2)$$

Из выражения (2) видно, что при уменьшении диаметра d области фокусировки УЗМ также уменьшаются, причем при $d < d^*$ это уменьшение описывается линейной зависимостью, где

$$d^* = \left(\frac{\chi}{\tau f^2} \right)^{1/2} \ln^{-1} \left[\frac{h}{d/2 + (4\chi/f)^{1/2}} \right]. \quad (3)$$

Оценки показывают, что для параметров нашей задачи используемые в экспериментах величины d существенно

Г.Г.Гладуш, А.Ф.Глова, С.В.Дробязко. ФГУП «ГНЦ РФ – Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», Россия, Московская обл., 142190 Троицк; e-mail: gladush@triniti.ru

Поступила в редакцию 25 мая 2006 г., после доработки – 13 июля 2006 г.

меньше d^* , что приводит к уменьшению W/h при уменьшении d . Кроме того, увеличение порога приповерхностного оптического пробоя из-за уменьшения длины волны излучения [2] позволяет надеяться на сохранение высокого качества сварного соединения.

Целью настоящей работы является исследование зависимости УЗМ от параметров процесса при лазерной сварке металлов излучением ИП Nd:YAG-лазера с относительно небольшой средней мощностью.

2. Экспериментальная установка

В экспериментах использовался многомодовый ИП Nd:YAG-лазер со следующими параметрами: длительность импульсов излучения $\tau \approx 140$ мкс, частота их следования $f = 25, 33$ и 50 Гц, средняя мощность подводимого к мишени излучения для указанных частот $W = 4.2, 8$ и 13.4 Вт соответственно. Непропорциональное увеличение средней мощности с увеличением частоты происходит из-за увеличения энергии в отдельном импульсе. Применялись мишени из нержавеющей стали толщиной 3.2 мм и из сплава алюминия АД16 толщиной 4.6 мм. Скорость их перемещения (скорость сварки) V изменялась в пределах $0.1 - 1$ мм/с. Фокусировка излучения осуществлялась линзой из кварцевого стекла с фокусным расстоянием 56 мм. Угол фокусировки составляет 0.11 рад, диаметр пятна фокусировки $d = 0.2$ мм при $f = 25$ и 33 Гц и 0.4 мм при $f = 50$ Гц.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис.1 приведены фотографии поперечных шлифов проваров при разных скоростях сварки. Основные результаты измерений параметров проваров, полученные для образцов из нержавеющей стали, представлены на рис.2–5.

На рис.2, 3 для трех режимов работы лазера показаны зависимости h и b от V , измеренные с погрешностью 15% . Из приведенных на этих рисунках зависимостей видно, что глубина провара с ростом скорости сварки V уменьшается, а его ширина для $f = 25$ и 33 Гц от V не зависит и практически одинакова.

Полный КПД сварочного процесса η , определяемый как отношение энергии, необходимой для нагрева и плав-

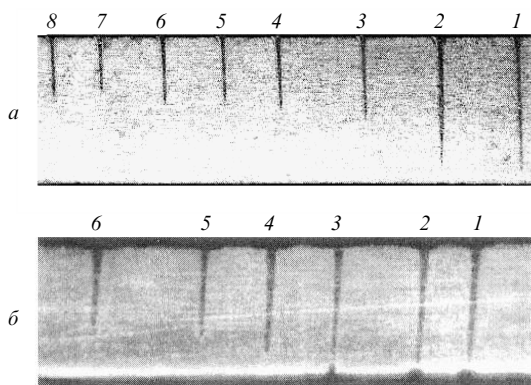


Рис.1. Фотографии поперечных шлифов проваров в образце из сплава алюминия АД16 толщиной 4.6 мм (а) и в образце из нержавеющей стали толщиной 3.2 мм (б) при $W = 8$ Вт, $f = 33$ Гц и $V = 0.1$ (1), 0.2 (2), 0.3 (3), 0.4 (4), 0.5 (5), 0.6 (6), 0.8 (7) и 1 мм/с (8).

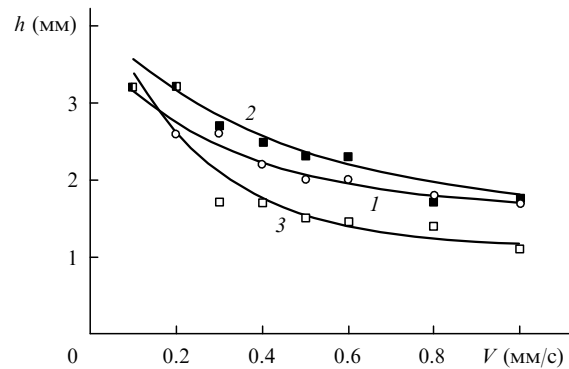


Рис.2. Зависимости глубины провара h стального образца от скорости его перемещения V при $W = 4.2$ Вт и $f = 25$ Гц (1), $W = 8$ Вт и $f = 33$ Гц (2), $W = 13.4$ Вт и $f = 50$ Гц (3).

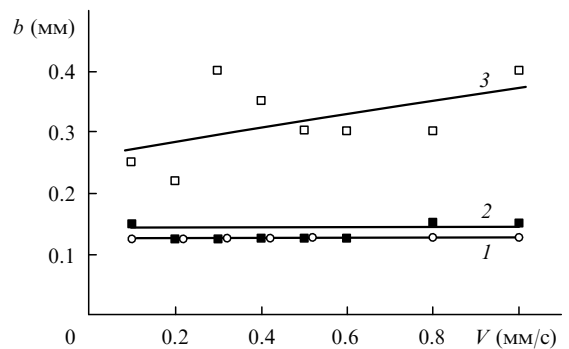


Рис.3. Зависимости ширины провара b стального образца от скорости его перемещения V при $W = 4.2$ Вт и $f = 25$ Гц (1), $W = 8$ Вт и $f = 33$ Гц (2), $W = 13.4$ Вт и $f = 50$ Гц (3).

ления провара, к полной энергии, показан на рис.4. С увеличением скорости КПД увеличивается и при $f = 25$ Гц и $V = 1$ мм/с достигает 45% .

Удельные затраты мощности W/h (рис.5) при увеличении скорости сварки также увеличиваются, но во всех случаях оказываются значительно меньше, чем при сварке излучением ИП СО₂-лазера с высокой скважностью импульсов (кривая 4 на рис.5) [10]. Так, в условиях данных экспериментов при $V = 0.1$ мм/с минимальное значение $W/h = 1.3$ Вт/мм соответствует $f = 25$ Гц, а при $V = 1$ мм/с максимальное значение $W/h = 12$ Вт/мм относится к $f = 50$ Гц. Необходимо отметить, что при сварке излучением непрерывного СО₂-лазера УЗМ также заметно превышают значения, полученные в настоящей работе. Например, для непрерывного СО₂-лазера мощ-

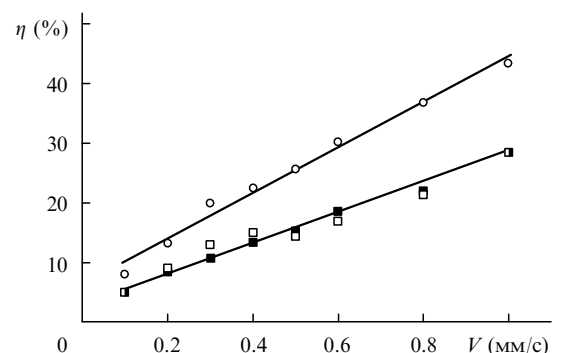


Рис.4. Зависимости КПД сварочного процесса η для стального образца от скорости его перемещения V при $W = 4.2$ Вт и $f = 25$ Гц (○), $W = 8$ Вт и $f = 33$ Гц (■), $W = 13.4$ Вт и $f = 50$ Гц (□).

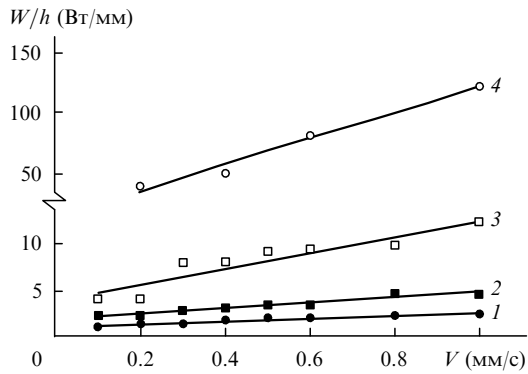


Рис.5. Зависимости удельных затрат мощности W/h для стального образца от скорости его перемещения V при сварке излучением Nd:YAG-лазера при $W = 4.2$ Вт и $f = 25$ Гц (1), $W = 8$ Вт и $f = 33$ Гц (2), $W = 13.4$ Вт и $f = 50$ Гц (3), а также излучением ИП CO₂-лазера [10] (4).

ностью 1.2 кВт при сравнительно небольшой скорости $V = 3.2$ мм/с получено $W/h = 220$ Вт/мм [13]. Отметим также, что при частотах следования импульсов $f = 25$ и 33 Гц расходимость излучения использовавшегося нами лазера меньше, чем при $f = 50$ Гц, о чем свидетельствует уменьшение диаметра пятна фокусировки при уменьшении частоты. В результате УЗМ при уменьшении частоты уменьшаются быстрее, чем по линейному закону (ср. кривые 1 и 3 на рис.5).

Приведенные на рис.5 зависимости УЗМ от V позволяют оценить эффективность сварки hV/W – величину свариваемой площади в расчете на один джоуль. Полученная в данных экспериментах максимальная эффективность составляет 0.4 мм²/Дж, тогда как при сварке излучением непрерывного CO₂-лазера она равна ~ 0.04 мм²/Дж [2], а излучением ИП CO₂-лазера (согласно зависимости 4 на рис.5) – 0.01 мм²/Дж.

Параметры сварки h , b , η и W/h при различных V для образца из сплава алюминия АД16 при фиксированной частоте следования импульсов $f = 33$ Гц и $W = 8$ Вт даны в табл.1. Можно отметить, что приведенные значения параметров, за исключением КПД процесса, близки к соответствующим значениям для образца из нержавеющей стали. Близкими являются и оценки W/h для обоих материалов, полученные по выражению (2). Меньший КПД для АД16 объясняется более высоким коэффициентом теплопроводности алюминиевого сплава и меньшим коэффициентом поглощения излучения.

Табл.1. Параметры сварки h , b , η и W/h при различных V для образца из сплава алюминия АД16 при $f = 33$ Гц, $d = 0.2$ мм и $W = 8$ Вт.

| V (мм/с) | h (мм) | b (мм) | η (%) | W/h (Вт/мм) |
|------------|----------|----------|------------|---------------|
| 0.1 | 4.1 | 0.15 | 2.05 | 1.95 |
| 0.2 | 4.0 | 0.15 | 4.0 | 2.0 |
| 0.3 | 2.7 | 0.15 | 4.2 | 3.0 |
| 0.4 | 2.3 | 0.15 | 4.7 | 3.5 |
| 0.5 | 2.1 | 0.15 | 5.3 | 3.8 |
| 0.6 | 2.1 | 0.15 | 6.3 | 3.8 |
| 0.8 | 1.7 | 0.15 | 6.8 | 5.7 |
| 1.0 | 1.9 | 0.15 | 8.7 | 4.2 |

4. Выводы

Основные результаты работы можно сформулировать следующим образом:

1. Показана возможность эффективного использования излучения относительно маломощного ($\sim 5 - 10$ Вт) ИП Nd:YAG-лазера для сварки образцов из нержавеющей стали и сплава алюминия АД16 толщиной 3–4 мм.

2. УЗМ при сварке остросфокусированным излучением маломощного Nd:YAG-лазера на один-два порядка меньше, чем при сварке излучением ИП или непрерывного CO₂-лазера.

3. Применение ИП Nd:YAG-лазеров с повышенной мощностью излучения может увеличить производительность процесса, и на основе этих лазеров возможно создание компактных и эффективных лазерных комплексов для сварки металлов.

1. Бункин Ф.В., Трибельский М.И. *УФН*, **130**, 193 (1980).
2. Веденов А.А., Гладуш Г.Г. *Физические процессы при лазерной обработке материалов* (М.: Энергоатомиздат, 1985).
3. Arata Y., Abe N., Oda T. *Proc. 5th GCL Symp.* (Oxford, 1984, p. 61).
4. Басов Н.Г., Башенков В.В., Гловатов Е.И. и др. *Изв. АН СССР. Сер. физич.*, **48**, 2310 (1984).
5. Голубев В.С. *Препринт ИИЛИТ РАН № 83* (Шатура, 1999).
6. Смирнов В.Н. *Автоматическая сварка*, № 2, 12 (1983).
7. Narikiyo T., Miura H., Fujinaga S., et al. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **31**, 2331 (1998).
8. Fujinaga S., Takenaga H., Narikiyo T., et al. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **33**, 492 (2000).
9. Левин Г.И. *Автоматическая сварка*, № 9, 29 (1980).
10. Веденов А.А., Гладуш Г.Г., Дробязко С.В. и др. *Изв. АН СССР. Сер. физич.*, **47**, 1473 (1983).
11. Веденов А.А., Гладуш Г.Г., Дробязко С.В. и др. *Квантовая электроника*, **12**, 60 (1985).
12. Арутюнян Р.В., Баранов В.Ю., Большов Л.Ф. и др. *Воздействие лазерного излучения на материалы* (М.: Наука, 1989).
13. Arata Y., Mario H., Miyamoto I. *Tool. Eng.*, **25**, 24 (1981).

ПОПРАВКА

Е.В.Завидеев, А.В.Петровская, А.В.Симакин, Г.А.Шафеев. Образование наноструктур при лазерной абляции серебра в жидкостях («Квантовая электроника», 2006, т. 36, № 10, с. 978–980).

В написании фамилии первого автора допущена опечатка. Вместо Е.В.Завидеев следует читать Е.В.Заведеев.