



УДК 621.791.72

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТОЙ ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

**В. М. КУЛИК, В. Д. ШЕЛЯГИН**, кандидаты техн. наук, **М. М. САВИЦКИЙ**, д-р техн. наук, **В. П. ЕЛАГИН, А. В. СИОРА, И. В. ШУБА**, инженеры (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Изучены технологические особенности лазерной сварки Nd:YAG-лазера мощностью 4,4 кВт среднеуглеродистой стали системы легирования Fe–Cr–Mn–Si толщиной от 3 до 10,4 мм за один проход со сквозным проплавлением. По сравнению с аргонодуговой сваркой достигнуто сокращение машинного времени сварки в 6...12 раз, снижение расхода электроэнергии в 2,5...4,5 раза и присадочного металла в 12 раз.

*Ключевые слова:* лазерная сварка, среднеуглеродистая легированная сталь, проплавление, сварное соединение, твердость, производительность

Дуговую сварку А-ТИГ со сквозным проплавлением на весу успешно применяют для соединения стали толщиной до 6 мм, при большей толщине стали выполняют многопроходную сварку А-ТИГ + ТИГ со скошенными кромками путем заполнения стыка присадочным материалом. Однако аргонодуговая сварка является малопродуктивным процессом и характеризуется повышенным тепловложением в металл.

Для расширения номенклатуры свариваемых изделий и повышения качества их соединений рекомендуют применять лазерную сварку с более глубоким проплавлением [1]. По этой причине представляет интерес получение новых экспериментальных данных по оценке технологических особенностей лазерной сварки легированных сталей.

В работе исследованы особенности формирования стыковых соединений среднеуглеродистой стали системы легирования Fe–Cr–Mn–Si (ХГС) толщиной  $S = 3; 6$  и  $10,4$  мм при использовании Nd:YAG-лазера DY 044 («Рофин Синар», Германия) мощностью до 4,4 кВт, в том числе в комбинации со сваркой ТИГ. Излучение фокусировали линзой с фокусным расстоянием  $F = 300$  мм. В качестве защитного газа использовали Ar, He,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Ar} + 17\% \text{CO}_2 + 1\% \text{O}_2$  и  $\text{N}_2$ .

Лазером приведенной мощности выполняют однопроходную сварку легированной стали толщиной 3 мм со скоростью  $v_{\text{св}} \geq 150$  м/ч при погонном расходе электроэнергии  $p/v_{\text{св}} \leq 29$  Вт·ч/м и погонной энергии сварки  $q/v_{\text{св}} \leq 105$  Дж/мм (табл. 1, рис. 1). Уменьшение мощности лазерного излучения до 3 кВт (в 1,47 раза) вызывает необходимость пятикратного снижения скорости сварки и повышения в 3,4 раза  $p/v_{\text{св}}$  и  $q/v_{\text{св}}$ . Для сквозного проплавления стали толщиной 6 мм

при мощности лазера 4,4 кВт в среде различных защитных газов [ $\text{CO}_2$ , Ar и  $(\text{Ar} + 17\% \text{CO}_2 + 1\% \text{O}_2)$ ]  $v_{\text{св}}$  следует уменьшить до 60 и 48 м/ч и повысить  $p/v_{\text{св}}$  до 73,3 и 91,6 Вт·ч/м, а  $q/v_{\text{св}}$  до 264 и 330 Дж/мм. Сварка в углекислом газе со сквозным проплавлением на весу стали толщиной 10,4 мм выполняется с  $v_{\text{св}} = 10,5...12,5$  м/ч,  $p/v_{\text{св}} = 419...352$  Вт·ч/м и  $q/v_{\text{св}} = 1509...1207$  Дж/мм. Значения последних параметров не характерны для лазерной сварки. Экстраполяция экспериментальных данных свидетельствует о возможности сквозного проплавления легированной стали толщиной 11,0...11,5 мм при снижении скорости сварки до 6...8 м/ч.

Для сварки стали толщиной до 6...7 мм целесообразно применять установку ДУ-044. По сравнению со способом А-ТИГ лазерную сварку легированной стали толщиной 3...6 мм выполняют с повышенной (в 8...12 раз) скоростью, меньшим (в 3,5...4,5 раза) расходом электроэнергии

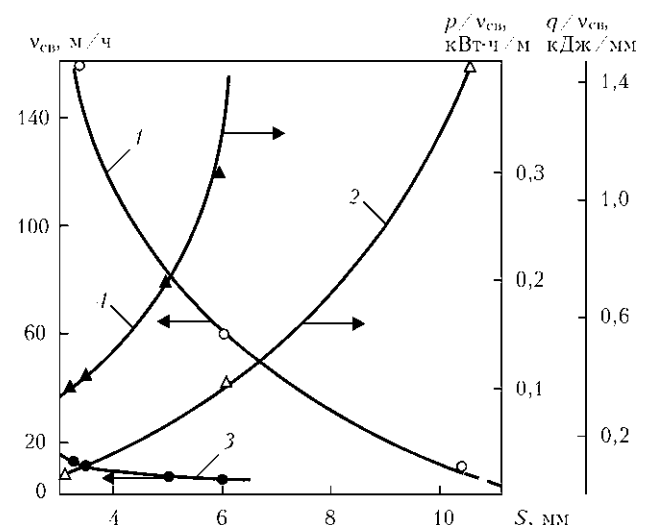


Рис. 1. Сопоставление скорости сварки, удельного расхода электроэнергии  $p/v_{\text{св}}$  и погонной энергии  $q/v_{\text{св}}$  при однопроходной сварке лазером мощностью 4,4 кВт (1, 2) и способе А-ТИГ (3, 4) от толщины свариваемой легированной стали

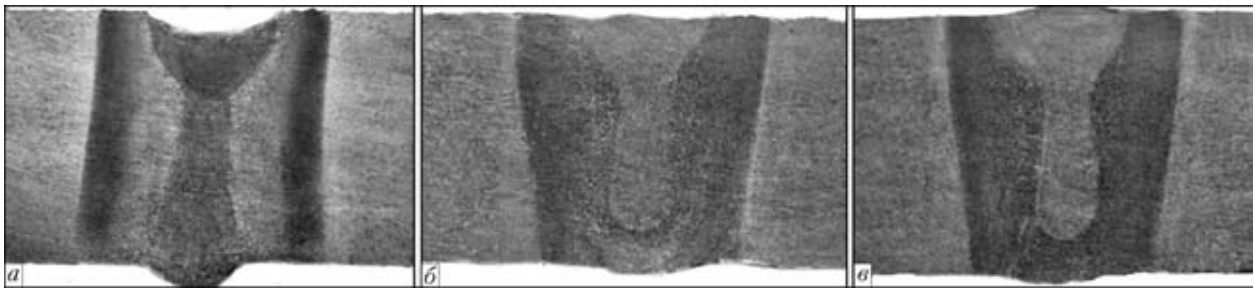


Рис. 2. Поперечные сечения стыковых соединений стали системы ХГС толщиной 10,4 мм с нескошенными кромками, полученных лазером мощностью 4,4 кВт за один (а) и несколько (б, в) проходов без (а, б) и с расплавлением (в) присадочной проволоки

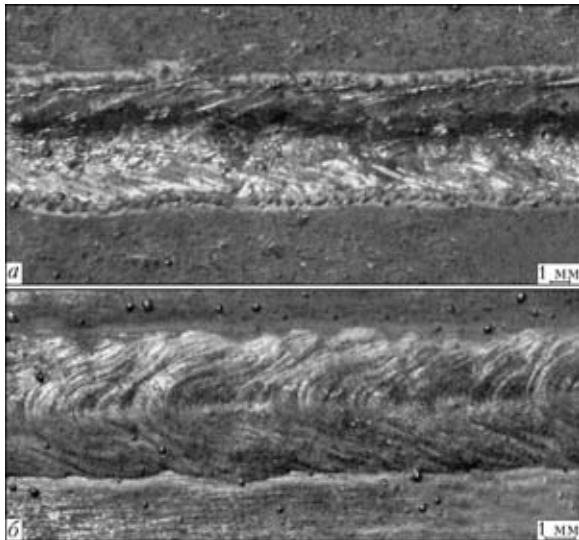


Рис. 3. Вид поверхности стыкового соединения легированной стали после лазерной сварки без (а) и с расплавлением (б) присадочной проволоки

и теплонасыщением металла, сниженным (в 4,5...7,5 раза) расходом защитного газа. Скорость сварки стали толщиной 10,4 мм с нескошенными кромками увеличивается приблизительно в 2 раза, а количество проходов сварки уменьшается в 3 раза по сравнению с аргонодуговой сваркой этой

же стали со скошенными кромками, что приводит к шестикратному сокращению машинного времени сварки. При этом суммарный расход защитного газа уменьшается в 3,0...3,5 раза, а электроэнергии — в 2,5...3,5 раза.

Швы, выполненные на стали толщиной 3, 6 и 10,4 мм лазером за один проход со сквозным проплавлением, имеют ширину соответственно 1,0...3,0; 1,5...3,5 и 3,5...6,0 мм. При этом большие значения относятся к лицевой стороне (рис. 2). В срединной части на глубине 0,3...0,8 толщины стали швы могут быть уже. Шов, выполненный на стали толщиной 10,4 мм, может иметь проседание до 2...3 мм и провисание на 1...2 мм, для уменьшения которых необходимо совместное повышение скорости и мощности лазерного излучения.

Целесообразно выполнение дополнительных проходов сварки с неполным проплавлением и автопрессовкой сварного соединения. Улучшению формирования поверхности проплава способствует также использование защитных газов, в том числе в составе смеси с углекислым газом. Визуально определенная ширина зоны термического влияния (ЗТВ) по обе стороны стыков стали толщиной 3, 6 и 10,4 мм составляет 0,2...0,5 и 1,5...3,0 мм и находится в обратной зависимости от скорости сварки. На поверхности сварных соединений имеют место прилипания капли расплавленного металла (рис. 3), частота размещения которых увеличивается с возрастанием плотности мощности и энергии лазерного пятна.

Несквозные проплавления лазером стали толщиной 10,4 мм имеют грибовидную форму (рис. 4). Под действием реактивного давления, образующегося в лазерном пятне металлургического пара, происходит выдавливание и перемещение расплава из-под лазерного луча в хвостовую и боковые части ванны, выбрасывание жидких и твердых частиц, формирование узкого газометаллического канала глубиной, равной глубине

Таблица 1. Возможности сквозного лазерного проплавления легированной стали

Толщина стали, мм	P, кВт	Защитный газ	v <sub>св</sub> , м/ч	q/v <sub>св</sub> <sup>2</sup> , Дж/мм	Ширина, мм	
					шва	ЗТВ
3	3,0	CO <sub>2</sub>	30	360	3,0/2,5	—
		Ar	30	360	2,6/2,8	—
		Ar + 17% CO <sub>2</sub> + 1% O <sub>2</sub>	30	360	2,5/3,0	—
3	4,4	CO <sub>2</sub>	150	105,6	1,1/1,3	0,4...0,6
		Ar	150	105,6	1,1/1,3	0,4...0,5
		Ar + 17% CO <sub>2</sub> + 1% O <sub>2</sub>	150	105,5	1,4/1,1	0,4...0,6
6	4,4	CO <sub>2</sub>	60	264,0	2,8/1,0	0,3...0,4
		Ar	48	330,0	3,6/3,3	0,4...0,8
		Ar + 17% CO <sub>2</sub> + 1% O <sub>2</sub>	48	330,0	4,1/3,7	0,5...0,7
10,4	4,4	CO <sub>2</sub>	10,5	1267,2...	5,6/4,6	2,0...4,0
			12,5	1508,6		

Примечание. В числителе приведены значения ширины с лицевой стороны, а в знаменателе — с обратной.



**Таблица 2. Химический состав металла после лазерного проплавления легированной стали в различных защитных газах**

Защитный газ (смесь)	C	Si	Mn	Cr
Ar	0,33...0,34/0,33	1,05...1,10/1,07	0,75...0,87/0,82	0,85...0,97/0,91
CO <sub>2</sub>	0,33...0,34/0,33	1,02...1,10/1,05	0,71...0,77/0,74	0,81...0,90/0,87
Ar + 17 % CO <sub>2</sub> + 1 % O <sub>2</sub>	0,27...0,32/0,30	0,97...1,04/1,01	0,70...0,73/0,72	0,80...0,86/0,81
He	0,31...0,33/0,32	0,92...1,05/1,01	0,68...0,77/0,74	0,84...0,93/0,87
N <sub>2</sub>	0,28...0,33/0,30	1,06...1,10/1,03	0,75...0,77/0,76	0,80...0,86/0,82

Примечания. 1. В числителе приведены данные пределов значения массовой доли химических элементов, полученные после четырех анализов по высоте проплавления, а в знаменателе — усредненные значения. 2. Основной металл содержит, мас. %: 0,33 C; 1,10 Si; 1,00 Mn; 0,98 Cr.

проплавления. Проплавление за пределами газометаллического канала происходит путем нагрева и расплавления перегретым расплавом и высокотемпературной парогазовой смесью.

Параметры проплавления зависят от используемых защитных газов (Ar, He, Ar + 17 % CO<sub>2</sub> + 1 % O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub>). Ионизированный газометаллический поток (сварочный факел) является достаточно прозрачным для лазерного излучения с длиной волны 1,06 мкм [2]. В связи с этим при использовании таких инертных газов, как аргон и гелий с потенциалами ионизации  $U_p$ , отличающимися в 1,56 раза, имеет место практически одинаковая глубина проплавления (8,4...8,6 мм), которая увеличивается при использовании углекислого газа в отдельности или в составе смеси Ar + 17 % CO<sub>2</sub> + 1 % O<sub>2</sub>.

Лазерная сварка стали 30ХГСА в защитных газах CO<sub>2</sub>, Ar, He, Ar + 17 % CO<sub>2</sub> + 1 % O<sub>2</sub> и N<sub>2</sub> сопровождается снижением содержания углерода, кремния, хрома, марганца (табл. 2), которое остается (за исключением марганца) в пределах требований ГОСТ 4543–71, мас. %: 0,28...0,35 C; 0,90...1,20 Si; 0,80...1,10 Mn и Cr. При использовании инертных газов в швах могут образовываться поры, отсутствующие после сварки в CO<sub>2</sub> и N<sub>2</sub> (рис. 4). Сварку легированных сталей рекомендуется выполнять в углекислом газе.

Металл соединения легированной стали, сваренной лазером, имеет повышенную твердость по сравнению с основным металлом. У шва, выполненного на стали толщиной 3 мм, она возрастает от HV 0,2 — 375 до HV 0,2 — 450 при повышении

$v_{CB}$  от 30 до 150 м/ч со снижением  $q/v_{CB}$  от 360 до 106 Дж/мм (рис. 5). Уменьшение скорости сварки и увеличение ее погонной энергии при выполнении шва на стали толщиной 10,4 мм обуславливает снижение твердости металла до HV 0,2 — 240...340/305 и HV 0,2 — 230...280/265 после одного и трех проходов. Несмотря на повышенную твердость металла соединения, появление холодных трещин после лазерной сварки среднеуглеродистой легированной стали не происходит.

Получение качественного стыкового соединения легированной стали повышенной толщины с большей скоростью характерно для вертикальной и двусторонней лазерной сварки. При вертикальной сварке легированной стали толщиной 10,4 мм с  $v_{CB} = 15,6$  м/ч ширина шва составляет 5...6 (с лицевой стороны), 2,5...3 мм (с обратной), а на глубине 2,0...2,1 мм — 1,6...1,8 мм (рис. 6, а). Форма и строение соединения после двухпроходной сварки сохраняются в целом такими, как и при односторонней сварке в нижнем положении. Для получения качественного соединения нет необходимости использовать сварочную проволоку и формирующие устройства.

Двустороннее лазерное проплавление стыка глубиной 6 мм с перекрытием слоев осуществимо при  $v_{CB} = 48$  м/ч, когда  $q/v_{CB}$  снижается до 330 Дж/мм. При этом машинное время сварки, суммарный расход электроэнергии и защитного газа сокращаются в 2,0...2,2 раза по сравнению со сваркой в нижнем положении. Полученное со-

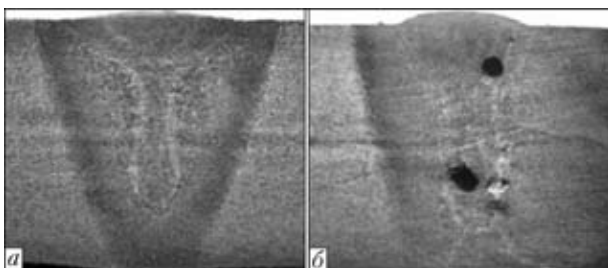


Рис. 4. Несквозные лазерные проплавления в углекислом газе (а) и аргоне (б) стали 30ХГСА толщиной 10,4 мм

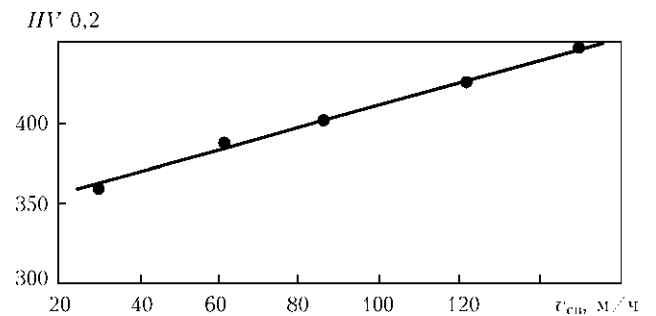


Рис. 5. Зависимость твердости металла шва, выполненного на стали 30ХГСА толщиной 3 мм, от скорости лазерной сварки

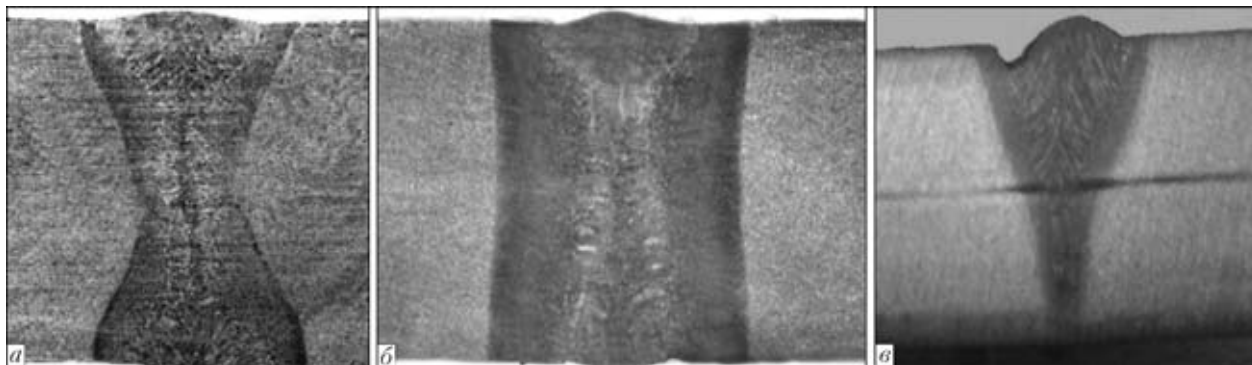


Рис. 6. Макрошлифы соединений термоупрочненной (а, б) и нетермообработанной (в) стали толщиной 10,4 мм, полученные лазерной вертикальной (а), двусторонней (б) и гибридной (в) сваркой

единение характеризуется отсутствием занижений, наличием небольших усилений и незначительной ширины шва (3,5 мм с обеих сторон и 1,2...2,0 мм в срединной части), уменьшенной шириной визуально выявляемой ЗТВ термоупрочненной стали (от 0,5...1,2 мм у поверхности до 1,4...1,6 мм на глубине 2...3 мм) (рис. 6, б).

В состоянии после сварки плоский образец легированной стали с  $\sigma_{0,2} = 830...850$  МПа и  $\sigma_B = 940...970$  МПа выдерживает 34900 циклов нагрузки растяжением до  $\sigma_H = 550$  МПа, разрушаясь за пределами соединения в месте перехода от рабочей части к захватной.

Известно, что глубину проплавления и скорость сварки можно увеличивать, совмещая лазерный луч и дугу неплавящегося электрода [3]. Наибольший эффект достигается при сведении двух источников нагрева в одну сварочную ванну. Скорость гибридной сварки со сквозным проплавлением стали толщиной 10,4 мм может составлять 35...40 м/ч (рис. 6, в). При таких же параметрах режима сварки глубина проплавления этими источниками тепла в отдельности равна 2,5...3,0 и 5,0...5,5 мм, т. е. в сумме меньше 10 мм. Естественно, что при меньшей скорости гибридной сварки возможно сквозное проплавление стали и большей толщины.

## Выводы

1. Установлено, что при мощности лазера 4,4 кВт стыковые соединения легированной стали толщиной до 10,4 мм выполнимы в нижнем положении со сквозным проплавлением нескошенных кромок.

2. Качество формирования соединения улучшают путем регулирования скорости и погонной энергии, выполнения дополнительных проходов и осуществления двусторонней и вертикальной сварки.

3. При использовании лазерного излучения мощностью до 4,4 кВт машинное время сварки сокращается в 6...12 раз, расход электроэнергии снижается в 2,5...4,5 раза, защитного газа в 3...7,5 раза и присадочной проволоки до 12...13 раз по сравнению с аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом. Содержание основных легирующих элементов и углерода остается на приемлемом уровне, а марганца снижается на 18...28 %.

1. Григорянц А. Г., Шиганов И. Н. Лазерная сварка металлов. — М.: Высш. шк., 1988. — 207 с.
2. Исследование сварочного факела при сварке мощными волоконными лазерами / П. Ю. Щеглов, А. В. Гуменюк, М. Ретмайер и др. // V Междунар. конф. «Лазерные технологии в сварке и обработке материалов»: Программа и тез. докл. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 2011. — С. 50–51.
3. Гибридная лазерно-плазменная сварка алюминиевых сплавов / И. В. Кривцун, В. Д. Шелягин, В. Ю. Хаскин и др. // Автомат. сварка. — 2007. — № 5. — С. 49–53.

Technological peculiarities of 4.4 kW Nd: YAG-laser welding of medium-carbon steel of the Fe–Cr–Mn–Si alloying system, 3 to 10.4 mm thick, in one pass with through penetration have been studied. Compared with argon-arc welding, the present welding method provides 6...12 times reduction in machine welding time, 2.5...4.5 times decrease in power consumption, and 12 times decrease in consumption of filler metal.

Поступила в редакцию 16.02.2012