

А.Г. Григорьянц, А.Н. Грезев, Н.В. Грезев

## ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА СТАЛЕЙ БОЛЬШИХ ТОЛЩИН С ПРИМЕНЕНИЕМ МОЩНЫХ ОПТОВОЛОКОННЫХ И СО<sub>2</sub>-ЛАЗЕРОВ

*Приведены экспериментальные данные по физике взаимодействия лазерного излучения с плазмой, сопровождающей процесс лазерной сварки, для двух типов лазеров: оптоволоконных и СО<sub>2</sub>-лазеров. Описаны условия, при которых процесс сварки протекает наиболее эффективно. Показано влияние интенсивности лазерного излучения, скорости сварки, а также марки металла на эффективность процесса сварки. Рассмотрены конкретные примеры характера проплавления металла и свойства сварных соединений.*

**E-mail:** mt12@bmstu.ru

**Ключевые слова:** лазеры, лазерная сварка, интенсивность излучения, плазма, сварочная ванна, стали, сварной шов, механические свойства.

За последние 30 лет лазерные технологии прошли путь от лабораторных экспериментальных работ до промышленного применения. В настоящее время десятки тысяч единиц лазерного оборудования работают на промышленных предприятиях. В основном используются такие технологические процессы, как лазерная маркировка и лазерная резка. Лазерная сварка металлов также занимает достойное место по применению в различных производственных отраслях, например, отработанные технологические процессы сварки шестерен коробки передач автомобилей ЗИЛ и ВАЗ, изготавливаемых из сталей 12Х2Н4А, 18ХГТ (рис. 1, а). При этом достоинства лазерной сварки как прецизионного процесса были подтверждены экспериментально: получены практически нулевые остаточные послесварочные отклонения размеров от заданных значений, указанных на чертежах шестерни. Показатели механических свойств сварных соединений находились на уровне основного металла. Рассмотренная технология внедрена на ОАО «АВТОВАЗ» в 1992 г.

Еще одно важнейшее направление эффективного применения лазерной технологии — сварка коррозионно-стойких труб (рис. 1, б), которая позволила повысить производительность сварки в 10 раз по сравнению с производительностью аргонодуговой сварки. Результаты испытаний лазерных сварных соединений из сталей 08Х18Н10Т, 08Х18Т1, 08Х18Н10 по механическим показателям и коррозионной стойкости находились на уровне основного металла. Такая технология внедрена на ОАО «Интерпайп. Новомосковский трубный завод» (Украина).

Однако до настоящего времени лазерная сварка металлов толщиной 12...100 мм, выполняемая лазерами мощностью в несколько десятков киловатт, является проблематичной. Это связано с недоста-

*а**б*

**Рис. 1. Шестерни (а) коробки передач автомобиля ЗИЛ, изготавливаемые из стали 12Х2Н4А при мощности излучения 5 кВт,  $v_{св} = 3$  м/мин, и образцы коррозионно-стойких труб (б)**

точной изученностью физических процессов, происходящих при взаимодействии мощного лазерного излучения с газовой средой, образующейся при сварке и с жидким металлом сварочной ванны.

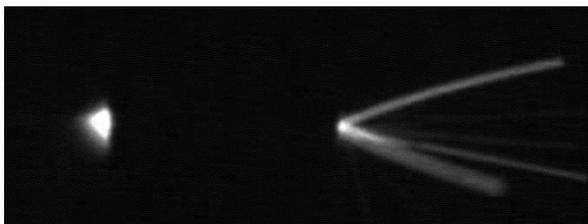
Преимущества лазерной сварки сталей больших толщин: выполнение сварки без разделки кромок, за один проход на всю свариваемую толщину, без применения дорогостоящих флюсов, большого потребления присадочной проволоки. Как показывает практика сварки сталей малых толщин ( $\leq 10$  мм), свойства лазерных сварных соединений, как правило, находятся на уровне свойств основного металла.

В связи с этим изложим результаты исследований лазерной сварки сталей толщиной 12...50 мм. Полученные результаты исследований позволяют оптимизировать плазменные процессы, сопровождающие лазерную сварку, а также металлургическое взаимодействие, происходящее между лучом лазера и расплавом в сварочной каверне, на  $CO_2$ -лазерах и на оптоволоконных лазерах IPG НТО «ИРЕ-Полюс».

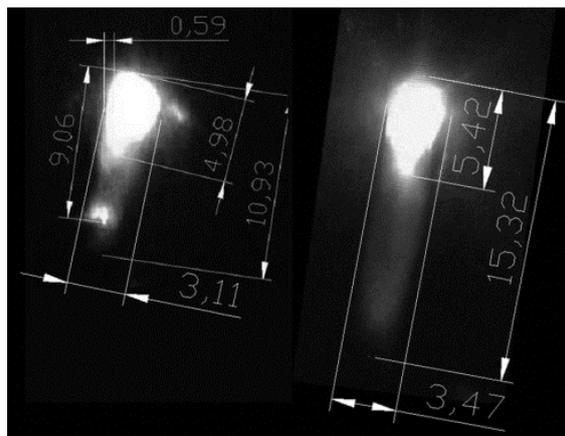
Установлено, при лазерной сварке белой жести с интенсивностью лазерного излучения  $2 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> удалось достичь скорости сварки 20 м/мин. При этом с увеличением скорости сварки с 10 м/мин наблюдалось уменьшение размеров плазмы над сварочной каверной, а при скоростях сварки более 20 м/мин стабильность формирования сварного шва стала неустойчивой. При значениях скорости сварки 25...27 м/мин имеют место периодическое исчезновение свечения плазмы, а также прекращение плавления металла и формирование сварного шва в этих местах. Повышение интенсивности более  $10^7$  Вт/см<sup>2</sup> позволило полу-

чить скорость сварки до 60 м/мин. Приведенные данные свидетельствуют о том, что путем изменения скорости сварки можно воздействовать на температуру плазмы и обеспечивать наиболее эффективное использование энергии лазерного излучения для плавления металла, минуя его поглощение и рассеивание плазмой. В работах [1, 2] достаточно полно описаны условия, при которых лазерная сварка протекает стабильно с качественным формированием сварного соединения и в каких случаях происходит плазменный пробой, приводящий к экранизации лазерного излучения СО<sub>2</sub>-лазеров.

При лазерной сварке сталей больших толщин скорость может варьироваться в диапазоне значений 1...5 м/мин. При этом интенсивность лазерного излучения необходимо обеспечивать в пределах  $(2...5) \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. Установлено, что сварочная каверна при лазерной сварке существует непрерывно в течение всего времени подачи лазерного излучения (рис. 2) и никаких процессов ее схлопывания не происходит. Температура плазмы в сварочной каверне при сварке СО<sub>2</sub>-лазерами, измеренная на расстоянии 1 мм над поверхностью металла, достигает в среде гелия 11 000 К, в среде аргона — 15 000 К. При больших толщинах свариваемых сталей скорость сварки влияет



*a*



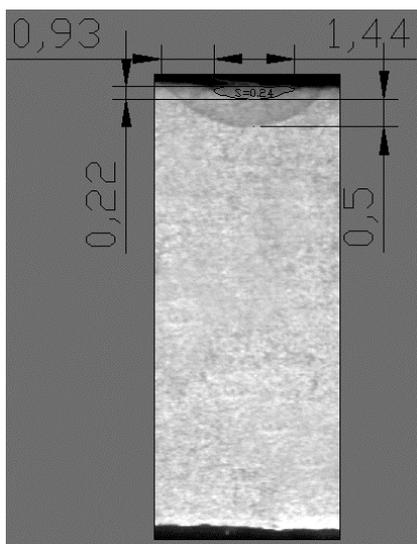
*б*

**Рис. 2. Сварочная каверна (а) и сварочная ванна (б) при лазерной сварке СО<sub>2</sub>-лазером при 10 кВт и 1 м/мин, толщина стали 10 мм**

на температуру плазмы не так сильно, как при сварке малых толщин металла. Попытки увеличить интенсивность лазерного излучения более  $(6 \dots 10) \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2$  приводят к активизации процесса поглощения лазерного излучения плазмой, разбрызгиванию жидкого металла из сварочной каверны, при возрастании температуры плазмы в каверне глубина проплавления металла уменьшается. Диапазон значений пороговой температуры плазмы каверны является примерно  $16\,000 \dots 22\,000 \text{ К}$ . При таких значениях температуры плазмы каверны процесс проплавления углеродистой стали прекращается. Сварочная каверна исчезает, плазма горит над поверхностью металла и большая часть подведенной энергии лазера поглощается плазмой (рис. 3). Следует отметить, что при воздействии на плазму каверны, которая выступает над свариваемой поверхностью металла примерно на  $2 \dots 3 \text{ мм}$ , тонкой струей газа, например гелия, происходит охлаждение плазмы каверны не только в верхней части но и по всему каналу каверны. Это обусловлено тем, что скорость распространения температуры в плазме в режиме светового горения, возникающей при интенсивности  $I = (0,1 \dots 10) \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2$ , составляет  $1 \dots 100 \text{ м/с}$ . Вследствие этого плазма каверны активно охлаждается, становится более прозрачной для луча, и процесс сварки протекает с более глубоким проплавлением. При этом важно не допускать кипение металла в сварочной каверне, которое приводит к его разбрызгиванию и ухудшению формирования сварного шва, появлению пор, подрезов и т. д.



*a*



*б*

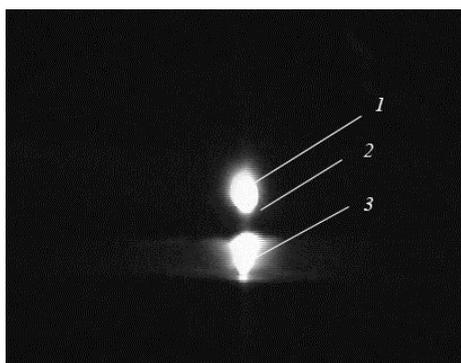
**Рис. 3. Процесс образования плазмы при лазерной сварке в среде аргона (а) при интенсивности лазерного излучения около  $2 \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2$ , и характер формирования сварного шва (б) (5 кВт, 1 м/мин, расход аргона 17 л/мин) при интенсивности лазерного излучения приблизительно  $10^7 \text{ Вт/см}^2$**

На состояние плазмы при лазерной сварке существенно влияет химический состав стали или марка металла. Например, при сварке меди хорошее формирование сварного шва происходит при интенсивности лазерного излучения более  $10^7$  Вт/см<sup>2</sup>. При этом плазма не препятствует проплавлению и имеет ограниченные размеры и яркость. Это связано с тем, что медь активно отводит теплоту, плазма в сварочной каверне быстро охлаждается и ее температура не превышает пороговые значения. При сварке меди образуются очень узкие сварные швы с малой зоной термического влияния.

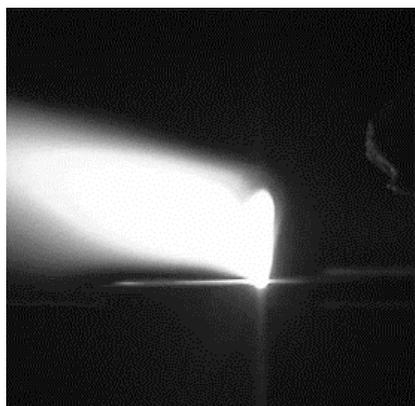
На прозрачность плазмы при сварке оказывает влияние и расход защитного газа (рис. 4). Даже незначительное увеличение расхода защитного газа приводит к охлаждению плазмы не только над поверхностью металла, но и в сварочной каверне вследствие огромных скоростей теплопередачи в плазме. Проплавляющая способность возрастает (рис. 4, б, з).



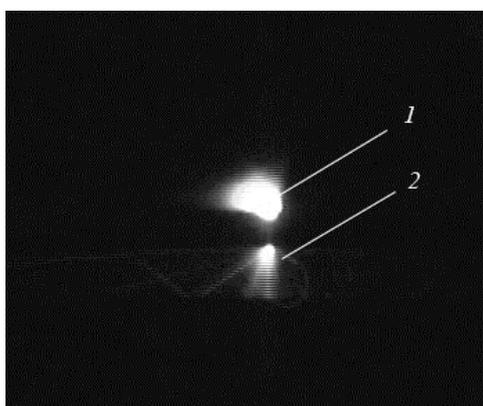
*а*



*б*



*в*



*з*

**Рис. 4. Влияние расхода защитного газа на образование плазмы и характер проплавления стали 08X18H10T толщиной 2 мм, мощность 3 кВт:**

*а* —  $v_{св} = 2$  м/мин, расход аргона 17 л/мин; *б* —  $v_{св} = 2$  м/мин, расход аргона 30 л/мин; *в* —  $v_{св} = 3$  м/мин, расход аргона 17 л/мин; *з* —  $v_{св} = 3$  м/мин, расход аргона 30 л/мин; 1 — плазма каверны со стороны подвода лазерного излучения; 2 — свариваемый образец; 3 — плазма каверны со стороны корня шва

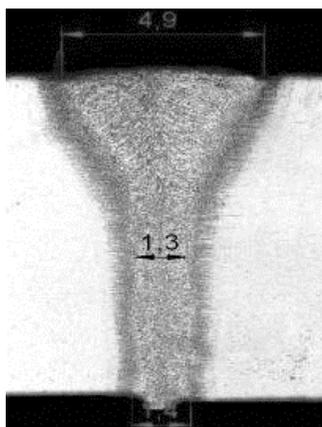
При соблюдении оптимальных параметров лазерной сварки на  $\text{CO}_2$ -лазерах успешно проводится процесс проплавления металла разной толщины с удовлетворительным формированием сварного шва и заданных геометрических параметров (рис. 5). Механические свойства таких сварных соединений приведены ниже (в числителе даны фактические значения, в знаменателе — требуемые):

Основной металл:

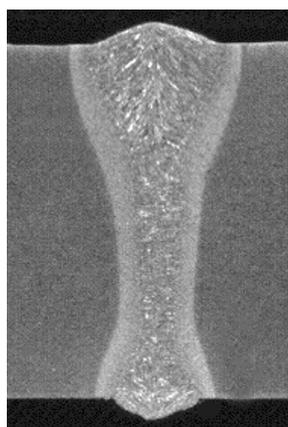
предел прочности $\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup> .....	510...520 (515) / 490...588
ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup> :	
KCU <sup>-60</sup> .....	147...169 (154) / 29,4
KCV <sup>-20</sup> .....	144...151 (147) / 39,2

Сварное соединение:

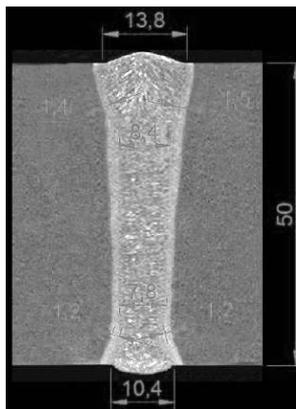
предел прочности $\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup> .....	608...628 (618) / $\geq 588$
ударная вязкость с надрезом по центру шва, Дж/см <sup>2</sup> :	
KCU <sup>-40</sup> .....	147...169 (154) / $\geq 39,2$
KCU <sup>-60</sup> .....	144...151 (147) / —
KCV <sup>-40</sup> .....	144...151 (147) / —
KCV <sup>-30</sup> .....	144...151 (147) / —



*a*



*б*



*в*

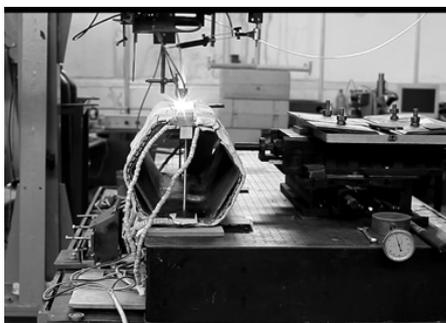
**Рис. 5. Характер проплавления при лазерной сварке сталей  $\text{CO}_2$ -лазерами:**

*a* — сталь толщиной 10 мм,  $P_{\text{изл}} = 10$  кВт,  $v_{\text{св}} = 1$  м/мин; *б* — сталь толщиной 30 мм,  $P_{\text{изл}} \approx 28$  кВт,  $v_{\text{св}} = 1$  м/мин; *в* — сталь толщиной 50 мм,  $P_{\text{изл}} \approx 55$  кВт,  $v_{\text{св}} = 1$  м/мин

Лазерная сварка с применением оптоволоконных лазеров показывает некоторые отличия от лазерной сварки на  $\text{CO}_2$ -лазерах. Это связано с длиной волны оптоволоконных лазеров, которая равна  $1,07 \text{ мкм}$  и, по-видимому, структурой излучения. Проведенные экспериментальные работы на оптоволоконных лазерах показывают, что лазерная сварка ведется с кинжальным проплавлением и с образованием плазмы (см. рис. 5). Однако наблюдается определенное различие как в характере поведения плазмы, так и в формировании сварного шва.

При длине волны лазерного излучения  $1,07 \text{ мкм}$  сопровождающая сварочный процесс плазма имеет температуру в пределах  $4\,000 \dots 7\,000 \text{ К}$  и является более прозрачной для прохождения лазерного луча [3]. Плазменных пробоев пока обнаружено не было и большая часть лазерного излучения идет на плавление металла. По-видимому, внутри сварочной каверны температура плазмы не намного выше по сравнению с температурой плазмы над поверхностью свариваемого металла. Вследствие этого от воздействия плазмы не так активно плавится металл, как при сварке  $\text{CO}_2$ -лазерами. Следует отметить, что при сварке на оптоволоконных лазерах эффективность технологического процесса по глубине проплавления и скорости сварки выше.

Полученные результаты по сварке на мощностях оптоволоконных лазеров до  $5 \text{ кВт}$  позволяют вести технологический процесс успешно длительное время, с получением качественных сварных



*a*



*б*

**Рис. 6. Сопоставление образования плазмы при сварке  $\text{CO}_2$ -лазером и оптоволоконным лазером:**

*a* — лазерная сварка на мощности  $8 \text{ кВт}$  шестигранной трубы из коррозионно-стойкой стали  $\text{CO}_2$ -лазером с оптимальными условиями по образованию плазмы; *б* — лазерная сварка при мощности  $8 \text{ кВт}$  с шестигранной трубы из коррозионно-стойкой стали оптоволоконным лазером; *в* — лазерная сварка при мощности  $15 \text{ кВт}$  углеродистой стали оптоволоконным лазером



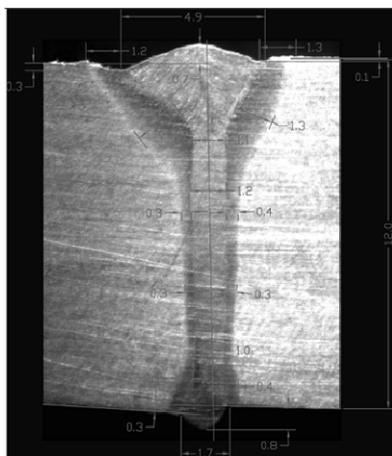
*в*

соединений. Однако на мощностях свыше 10 кВт на данном этапе исследований имеющиеся экспериментальные данные позволили установить ряд иных проблем. В частности, в отличие от сварки  $\text{CO}_2$ -лазерами плазма при сварке оптоволоконными лазерами существенно в больших объемах формируется над свариваемой поверхностью металла, и влияет на обслуживающий персонал и оборудование (рис. 6). В связи с изложенным выше сварочные фокусирующие устройства, успешно применяемые на  $\text{CO}_2$ -лазерах, не выдерживают более нескольких минут работы на оптоволоконных лазерах. Установлено, что охлаждаемое водой устройство, фокусирующее лазерное излучение, и сопло для подачи газа для защиты сварного шва от окисления перегреваются через короткое время и процесс сварки приходится останавливать. Попытки сдува плазмы струей воздуха существенно не улучшают ситуацию.

Сварочная каверна и ванна по всем признакам формируются одинаково, что и при сварке на  $\text{CO}_2$ -лазерах [4, 5]. Экспериментальные данные показывают, что металл в сварочной каверне перегревается до кипения (рис. 7, *а*) и его капли выбрасываются на поверхность свариваемого металла.



*а*



*б*

**Рис. 7.** Сварочная ванна при сварке на оптоволоконной лазерной установке мощностью 10 кВт (*а*) и внешний вид поперечного сечения сварного соединения, полученного при сварке углеродистой стали толщиной 16 мм оптоволоконным лазером при мощности 16 кВт, скорости сварки 1,5 м/мин (*б*)

Сварной шов (рис. 7, б) при сварке на оптоволоконных лазерах формируется очень узким, следовательно, скорость охлаждения металла шва будет очень высокой на различных этапах кристаллизации металла. Это приведет на сталях, склонных к закалке, к ухудшению технологической прочности металла шва и околошовной зоны. Практика показывает следующее: механические свойства также не будут уступать свойствам основного металла (особенно, ударная вязкость и угол загиба).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грезев А.Н. Плазмообразование при лазерной сварке с глубоким проплавлением // Сварочное производство. 2005. № 5. — С. 20—25.
2. Grezev A.N. Plasma Formation in Laser Welding //Welding International. 2005. Vol. 19. No. 10. — P. 808—813.
3. Исследование пароплазменного факела при сварке мощным волоконным лазером / П.Ю. Щеглов, С.А. Успенский, В.Н. Петровский и др. В кн. «Сборник научных трудов» конф. «Научная сессия МИФИ–2011». 2011. Т. 2. — С. 90.
4. Грезев А.Н. Формирование парогазового канала и перенос жидкого металла из каверны в сварочную ванну при лазерной сварке // Сварочное производство. 2005. № 6. — С. 13—17.
5. Grezev A.N. Formation of the Vapor-Gas Channel in the Weld Pool in Laser Welding // Welding International. 2005. Vol. 19. No. 11. — P. 906—910.

Статья поступила в редакцию 11.09.2012