

# ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА СТАЛЕЙ БОЛЬШИХ ТОЛЩИН

## С ПРИМЕНЕНИЕМ МОЩНЫХ ОПТОВОЛОКОННЫХ И CO<sub>2</sub>-ЛАЗЕРОВ

А.Григорьянц, д.т.н., А.Грезев, д.т.н., В.Грезев, ЗАО "Лазерные комплексы", Шатура, Московская обл., [www.lasercomp.ru](http://www.lasercomp.ru)

В статье представлены экспериментальные данные по физике взаимодействия лазерного излучения с плазмой, сопровождающей процесс лазерной сварки. Данные приведены для двух типов лазеров – CO<sub>2</sub>- и оптоволоконных. Дано описание условий, при которых процесс сварки протекает наиболее эффективно. Показано влияние интенсивности лазерного излучения, скорости сварки, марки металла на эффективность процесса сварки. Приведены конкретные примеры характера проплавления металла и свойств сварных соединений.

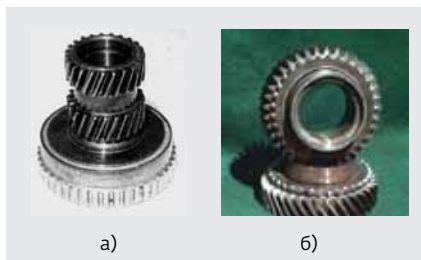
**Л**азерные технологии за последние 30 лет прошли путь от лабораторных экспериментальных работ до промышленного применения. В настоящее время десятки тысяч единиц лазерного оборудования работают на промышленных предприятиях. Особенно широкое применение нашли такие технологические процессы, как лазерная маркировка и лазерная резка.

Лазерная сварка металлов также занимает достойное место в различных производственных отраслях. Отработаны, например, технологические процессы сварки шестерен коробки передач автомобилей ЗИЛ и ВАЗ, изготавливаемых из сталей 12Х2Н4А, 18ХГТ (рис.1). При этом достоинства лазерной сварки как прецизионного процесса были подтверждены замерами, которые показали практически нулевые остаточные послесварочные отклонения размеров от заданных значений в чертежах на шестерни. Показатели механических свойств сварных

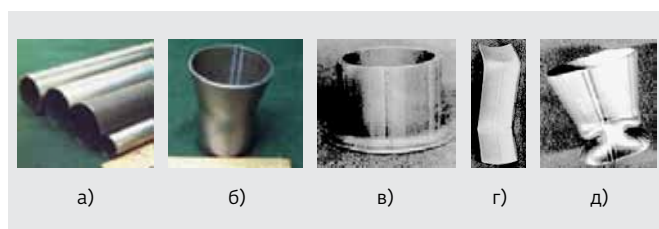
соединений находились на уровне основного металла. Данная технология внедрена на ОАО "АВТОВАЗ" в 1992 году, с момента начала поставки лазерного оборудования.

Другим важнейшим направлением эффективного применения лазерной технологии является сварка нержавеющей труб (рис.2), которая позволила увеличить производительность сварки в 10 раз по сравнению с аргонодуговой сваркой. Результаты испытаний лазерных сварных соединений на сталях 08Х18Н10Т, 08Х18Т1, 08Х18Н10 по механическим показателям и коррозионной стойкости находились на уровне основного металла. Данная технология внедрена на Новомосковском трубном заводе Днепропетровской области.

Однако лазерная сварка металлов толщиной от 12 до 100 мм, выполняемая на лазерах мощностью в несколько десятков киловатт, до настоящего времени сопровождается проблемами в работе. Это связано, прежде



**Рис.1.** Шестерни коробки передач автомобилей, заваренные CO<sub>2</sub>-лазером: а – автомобиля ЗИЛ ( $P_{\text{изл}}=5$  кВт,  $V_{\text{св}}=3$  м/мин); б – автомобиля ВАЗ ( $P_{\text{изл}}=2,5$  кВт,  $V_{\text{св}}=2$  м/мин)

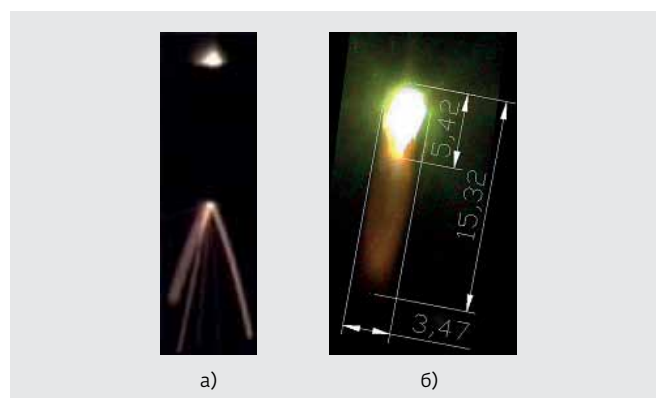


**Рис.2.** Образцы труб: а – заваренные на лазерном трубосварочном стане; трубы, подвергнутые испытаниям: б – раздутием конусом; в – отбартовкой кромки; г – на коррозионную стойкость; д – сплющиванием

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

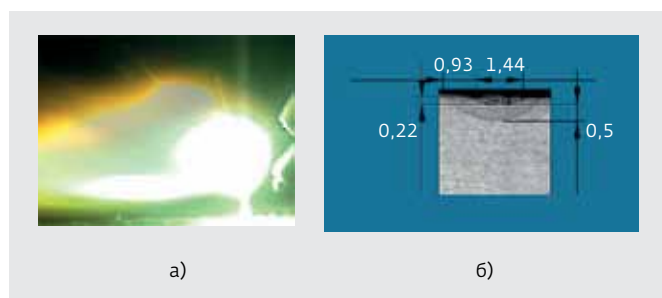
Преимущества лазерной сварки больших толщин в сопоставлении с дуговой сваркой под флюсом и электрошлаковой сваркой очевидны. Лазерная сварка выполняется без разделки кромок, за один проход на всю свариваемую толщину, без применения дорогостоящих флюсов, без большого потребления присадочной проволоки. Свойства лазерных сварных соединений, как показывает практика сварки малых толщин ( $\leq 10$  мм), обычно находятся на уровне основного металла. В связи с этим результаты исследований по лазерной сварке сталей толщиной от 12 до 50 мм интересуют многих специалистов. Полученные результаты исследований позволяют оптимизировать плазменные процессы, сопровождающие лазерную сварку, а также металлургическое взаимодействие, происходящее между лучом лазера и расплавом в сварочной каверне, как на  $\text{CO}_2$ -лазерах, так и на оптоволоконных лазерах производства ИРГ НТО "ИРЕ-Полюс".

Установлено, что при лазерной сварке белой жести при интенсивности лазерного излучения  $2 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> удалось достичь скорости сварки  $V_{\text{св.}} = 20$  м/мин. При этом с увеличением скорости сварки более 10 м/мин наблюдалось уменьшение размеров плазмы над сварочной каверной, а на скорости сварки свыше 20 м/мин стабильность формирования сварного шва стала неустойчивой. При скорости сварки 25–27 м/мин периодически стало наблюдаться исчезновение свечения плазмы. И в местах ее исчезновения прекращались и плавление металла, и формирование сварного шва. Увеличение интенсивности выше  $10^7$  Вт/см<sup>2</sup> позволило довести скорость сварки до 60 м/мин. Эти данные еще раз подчеркивают, что варьированием скорости сварки можно воздействовать



**Рис.3.** Лазерная сварка  $\text{CO}_2$ -лазером: а – сварочная каверна; б – сварочная ванна ( $P=10$  кВт,  $V_{\text{св.}}=1$  м/мин, толщина стали 10 мм)

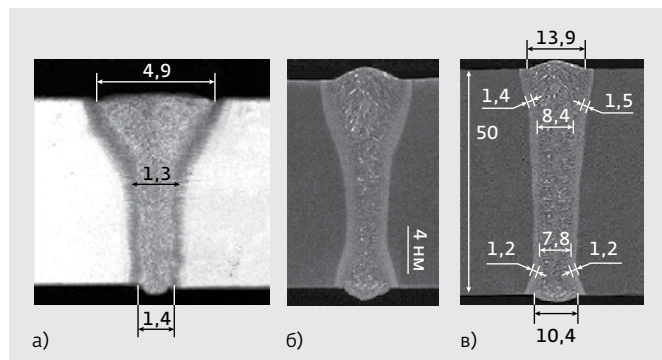
на температуру плазмы и обеспечивать наиболее эффективное использование энергии лазерного излучения на плавление металла, минуя его поглощение и рассеивание плазмой. В работах [1, 2] достаточно полно представлены условия, при которых лазерная сварка протекает стабильно с качественным формированием сварного



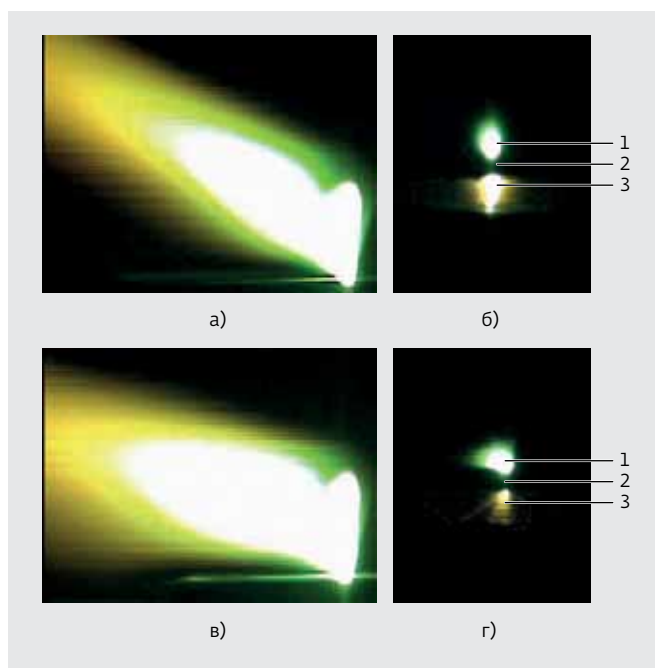
**Рис.4.** Лазерная сварка в среде Ar: а – процесс плазмообразования; б – сформированный сварной шов ( $P=5$  кВт,  $V_{св.}=1$  м/мин, расход Ar – 17 л/мин). Поведение плазмы при различных энергетических состояниях: а – при интенсивности лазерного излучения  $\sim 2 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>; б – при интенсивности лазерного излучения  $\sim 10 \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>

соединения, и в каких случаях происходит плазменный пробой, приводящий к экранизации лазерного излучения CO<sub>2</sub>-лазеров.

При лазерной сварке сталей больших толщин скорость сварки может меняться в более узких пределах – от 1 до 5 м/мин. При этом необходимо интенсивность лазерного излучения 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.3) и никаких процессов ее схлопывания не происходит. Температура плазмы в сварочной каверне при сварке CO<sub>2</sub>-лазерами, замеренная на расстоянии 1 мм над поверхностью металла, достигает в He-среде – 11000К, в Ar-среде – 15000К. На больших толщинах скорость сварки оказывает влияние на температуру плазмы не в такой мере, как при сварке малых толщин металла. Установлено, что попытки

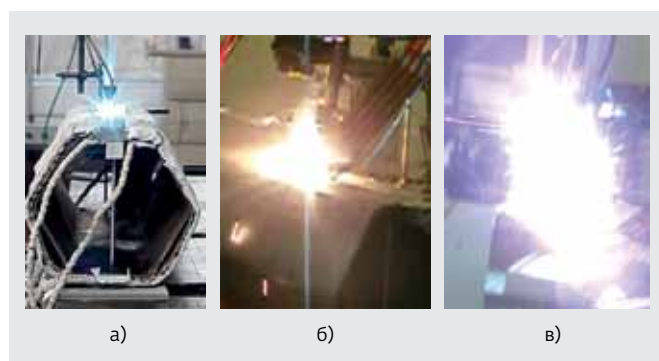


**Рис.6.** Характер проплавления при лазерной сварке сталей CO<sub>2</sub>-лазерами: а – толщина 10 мм,  $P_{изл}=10$  кВт,  $V_{св}=1$  м/мин; б – толщина 30 мм,  $P_{изл} \sim 28$  кВт,  $V_{св}=1$  м/мин; в – толщина 50 мм,  $P_{изл} \sim 55$  кВт,  $V_{св}=1$  м/мин



**Рис.5.** Влияние расхода защитного газа на плазмообразование и характер проплавления стали 08Х18Н10Т толщиной 2 мм,  $P=3$  кВт: а –  $V_{св}=2$  м/мин, расход Ar – 17 л/мин; б –  $V_{св}=3$  м/мин, расход Ar – 17 л/мин; в –  $V_{св}=2$  м/мин, расход Ar 30 л/мин; г –  $V_{св}=3$  м/мин, расход Ar 30 л/мин (1 – плазма каверны со стороны подвода лазерного излучения; 2 – свариваемый образец; 3 – плазма каверны со стороны корня шва)

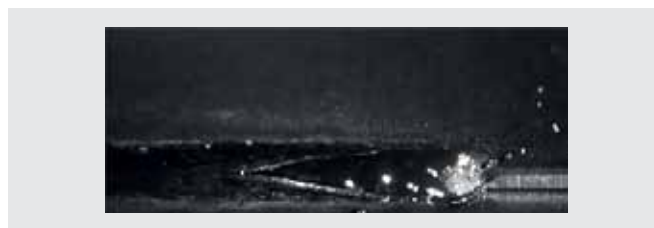
увеличить интенсивность лазерного излучения свыше  $(6-10) \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup> приводят к активизации процесса поглощения лазерного излучения плазмой, разбрызгиванию жидкого металла из сварочной каверны и при росте температуры плазмы в каверне глубина проплавления металла уменьшается. Пороговой температурой плазмы каверны является величина примерно 16 000 – 22 000К. При этих температурах плазмы каверны процесс проплавления углеродистой стали прекращается. Сварочная каверна исчезает, плазма горит над поверхностью металла, и большая часть подведенной энергии лазера поглощается плазмой (рис.4). Следует отметить, что при воздействии на плазму каверны, которая выступает над свариваемой поверхностью металла примерно на 2-3 мм, тонкой струи газа, например He, происходит охлаждение плазмы каверны не только в верхней части, но и по всему каналу каверны, так как скорость распространения температуры в плазме в режиме светового горения, возникающего при  $I=(0,1-10) \cdot 10^6$  Вт/см<sup>2</sup>, составляет 1-100 м/с. Вследствие этого плазма каверны активно охлаждается, она становится более прозрачной для луча, и процесс



**Рис.7.** Сопоставление плазмообразования при лазерной сварке шестигранной трубы из нержавеющей стали – а – сварка  $\text{CO}_2$ -лазером с оптимальными условиями по плазмообразованию ( $P=8$  кВт); б – сварка оптоволоконным лазером ( $P=8$  кВт); в – сварка оптоволоконным лазером ( $P=15$  кВт) углеродистой стали

сварки протекает с более глубоким проплавлением. Но важно при этом не допускать кипения металла в сварочной каверне, которое приводит к его разбрызгиванию и ухудшению формирования сварного шва, появлению пор, подрезов и т.д.

На состояние плазмы при лазерной сварке существенное влияние оказывает химический состав

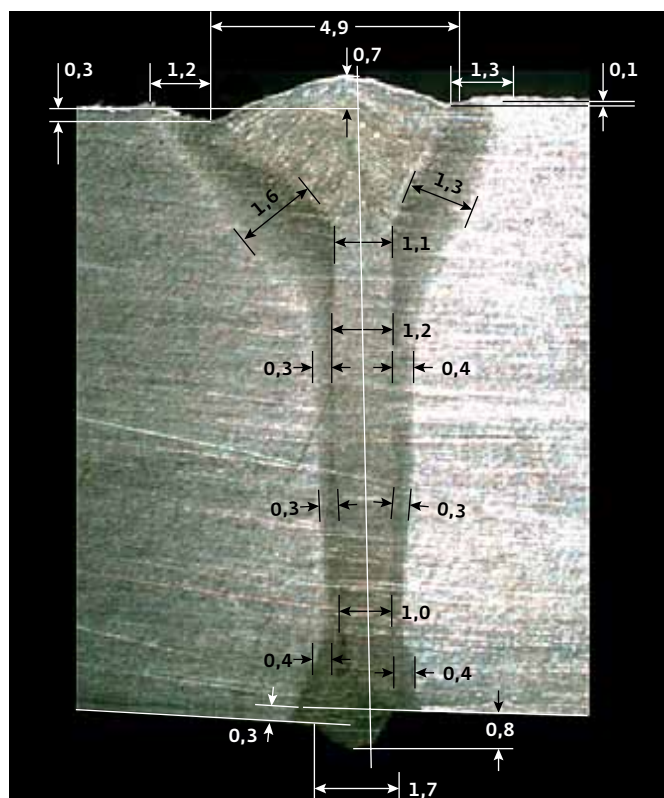


**Рис.8.** Сварочная ванна при сварке на оптоволоконной лазерной установке ( $P=10$  кВт)

стали или же марка металла. Например, при сварке меди хорошее формирование сварного шва происходит при интенсивности лазерного излучения свыше  $10^7$  Вт/см<sup>2</sup>. Плазма при этом не препятствует проплавлению и имеет ограниченные размеры и яркость. Это связано с тем, что медь активно отводит тепло, поэтому плазма в сварочной каверне активно охлаждается, при этом ее температура не превышает порогового значения. Сварные швы при сварке меди формируются очень узкими и с малой зоной термического влияния.

На прозрачность плазмы при сварке оказывает влияние и расход защитного газа (рис.5). Даже незначительное увеличение расхода защитного газа приводит к охлаждению плазмы не только над





**Рис.9.** Поперечное сечение сварного соединения, полученного при сварке углеродистой стали толщиной 16 мм с использованием оптоволоконного лазера ( $P=16$  кВт,  $V_{св}=1,5$  м/мин)

поверхностью металла, но и в сварочной каверне из-за огромных скоростей теплопередачи в плазме. Проплавающая способность возрастает, что видно из рис.5б,г. При соблюдении оптимальных параметров лазерной сварки на  $CO_2$ -лазерах успешно ведется процесс проплавления металла разной толщины с удовлетворительным формированием сварного шва и заданных параметров по геометрии (рис.6). Механические свойства таких сварных соединений представлены в таблице.

Лазерная сварка с применением оптоволоконных лазеров показывает некоторые отличия от лазерной сварки на  $CO_2$ -лазерах. Это связано с длиной волны оптоволоконных лазеров, которая равна 1,07 мкм и, по-видимому, структурой излучения. Проведенные экспериментальные работы на оптоволоконных лазерах показывают, что лазерная сварка ведется с кинжальным проплавлением и также с образованием плазмы (рис.6). Однако наблюдается определенная разница, как в характере поведения плазмы, так и в формировании сварного шва.

Известно [3], что при длине волны лазерного излучения 1,07 мкм плазма, сопровождающая

сварочный процесс, имеет температуру в пределах 4000–7000К, а сама плазма более прозрачна для проходящего лазерного луча. Плазменных пробоев при этом пока обнаружено не было и большая часть лазерного излучения идет на плавление металла. По-видимому, внутри сварочной каверны температура плазмы не намного выше, чем температура плазмы над поверхностью свариваемого металла. Вследствие этого металл от воздействия плазмы не так активно плавится, как при сварке  $CO_2$ -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 кВт позволяют успешно вести технологический процесс в течение длительного времени, с получением качественных сварных соединений. Однако на мощностях свыше 10 кВт на данном этапе исследований полученные экспериментальные данные позволили выявить ряд иных проблем. В частности, в отличие от сварки  $CO_2$ -лазерами плазма при сварке оптоволоконными лазерами существенно в больших объемах формируется над свариваемой поверхностью

Механические свойства лазерных сварных соединений и основного металла

| Параметры   | Основной металл      |                    |
|---|----------------------|--------------------|
|   | Фактические значения | Требуемые значения |
| Предел прочности, $\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup>          | 510–520<br>515       | 490–588            |
| Ударная вязкость, Дж/см <sup>2</sup>                          |                      |                    |
| КСУ <sup>-60</sup>  | 147–169<br>154       | 29,4               |
| КСУ <sup>-20</sup>  | 144–151<br>147       | 39,2               |
| Подавление обратного отражения, дБ                            | >30                  | >30                |
| Параметры   | Сварное соединение   |                    |
|   | Фактические значения | Требуемые значения |
| Предел прочности, $\sigma_{0,2}$ , Н/мм <sup>2</sup>          | 608–628<br>618       | ≥588               |
| Ударная вязкость с надрезом по центру шва, Дж/см <sup>2</sup> |                      |                    |
| КСУ <sup>-40</sup>  | 147–169<br>154       | ≥39,2              |
| КСУ <sup>-60</sup>  | 144–151<br>147       | Нет                |
| КСУ <sup>-40</sup>  | 144–151<br>147       | Нет                |
| КСУ <sup>-30</sup>  | 144–151<br>147       | Нет                |



металла и оказывает влияние на обслуживающий персонал и оборудование (рис.7). В связи с этим сварочные фокусирующие устройства, успешно применяемые на CO<sub>2</sub>-лазерах, не выдерживают работы более нескольких минут на оптоволоконных лазерах. Установлено, что охлаждаемое водой устройство, фокусирующее лазерное излучение, и сопло, подающее газ для защиты сварного шва от окисления, перегреваются через короткое время, и процесс сварки приходится останавливать. Попытки сдува плазмы струей воздуха не приводят к существенному улучшению ситуации.

Сварочная каверна и ванна по всем признакам формируются одинаково, что и при сварке на CO<sub>2</sub>-лазерах [4,5]. Однако экспериментальные данные показывают, что металл в сварочной каверне перегревается до кипения (рис.8), и его капли выбрасываются на поверхность свариваемого металла. Сварной шов (рис.9) при сварке на оптоволоконных лазерах формируется очень узким, а следовательно, скорость охлаждения металла шва будет очень высокой на различных этапах кристаллизации металла, что на сталях, склонных к закалке, приведет к ухудшению технологической прочности металла шва и околошовной зоны. Практика показывает, что механические свойства также не

будут уступать свойствам основного металла, особенно ударная вязкость и угол загиба.

#### ЛИТЕРАТУРА

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, v.19, № 10, p. 808–813.
3. **Щеглов П.Ю., Успенский С.А., Петровский В.Н. и др.** Исследование паро-плазменного факела при сварке мощным волоконным лазером. – В кн.: Сборник научных трудов конференции "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 vapour-gas channel in the weld pool in laser welding. – Welding International, 2005, v.19, № 11, p. 906–910.