

УДК 621.791.725

DOI: 10.12737/article\_59d496ec867e42.06170710

**И.Н. Шиганов**<sup>1</sup>, д.т.н.,  
**Е.М. Шамов**<sup>1,2</sup>, инженер,  
**И.А. Бегунов**<sup>2</sup>, инженер,  
**А.К. Шелестова**<sup>2</sup>, инженер

(<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1;

<sup>2</sup>ООО «НТО «ИРЭ-Полус», МО, г. Фрязино,  
пл. им. академика Б.А. Введенского, д. 1, стр. 3)

E-mail: eShamov@ntoire-polus.ru

## Лазерная сварка стали 09Г2С по слою флюса

*Предложен способ лазерной сварки, направленный на устранение дефектов формы шва. Изложены результаты экспериментов, подтверждающие, что ведение процесса лазерной сварки по слою флюса оказывает влияние на формирование структуры и качество сварного шва. Представлены результаты измерений твердости металла сварных соединений, полученных предложенным способом, дуговым и лазерным. Приведены результаты механических испытаний сварных соединений, полученных способом лазерной сварки по слою флюса.*

**Ключевые слова:** лазерная сварка; присадочная проволока; флюс.

**I.N. Shiganov**<sup>1</sup>, D. Eng.,  
**E.M. Shamov**<sup>1, 2</sup>, Engineer,  
**I.A. Begunov**<sup>2</sup>, Engineer,  
**A.K. Shelestova**<sup>2</sup>, Engineer

(<sup>1</sup>Bauman STU, Building 1, 5, Baumanskaya Str., Moscow,

<sup>2</sup>PC "STC "IRE-Pole", Building, 1, Academician Vvedensky Sq., Fryazino, Moscow reg.)

## Steel 09G2S laser bonding on flux layer

*A method of laser bonding aimed for the elimination of welding seam form defects is offered. The results of experiments confirming the impact of laser bonding on a flux layer upon the formation of a structure and quality of a welding seam are stated. The measurement results of metal hardness in welding joints obtained by an offered method and also by arc welding and laser bonding are shown. The results of the mechanical tests of welds obtained by laser bonding on a flux layer are presented.*

**Keywords:** laser bonding; filler wire; flux.

Внешнее формирование сварных соединений, отсутствие дефектов в виде провисаний, подрезов и раковин оказывает существенное влияние на работоспособность сварного соединения в целом [1].

Подобные дефекты часто встречаются в технологии лазерной сварки [2, 3]. Помимо физических особенностей протекания процесса лазерной сварки и дисбаланса сил, определяющих форму расплава, образование дефектов обусловлено заполнением зазоров при не-

качественной сборке и потерей жидкого металла сварочной ванны на разбрызгивание, что отрицательно сказывается на стабильности формирования сварного шва. Брызги, попадая на оптику сварочной головки, искажают пропускную способность луча, что сказывается на качестве шва. Также разбрызгивание приводит к рассеиванию лазерного излучения и расфокусировке луча.

В случае обеспечения прилегания свариваемых кромок с минимальным зазором друг

к другу (менее 0,1 мм), сварка ведется за счет плавления только основного металла. Ведение процесса с глубоким проплавлением позволяет исключить из технологического процесса операцию скоса кромок. В то же время, обеспечение высокой точности при сборке деталей больших толщин (более 4,0...5,0 мм) накладывает дополнительные требования к качеству подготовки кромок.

Формирование шва при однопроводной лазерной сварке с гарантированным проваром на всю глубину стыка сопровождается его занижением с лицевой стороны (рис. 1). Такой дефект недопустим и требует дополнительных операций по его устранению.

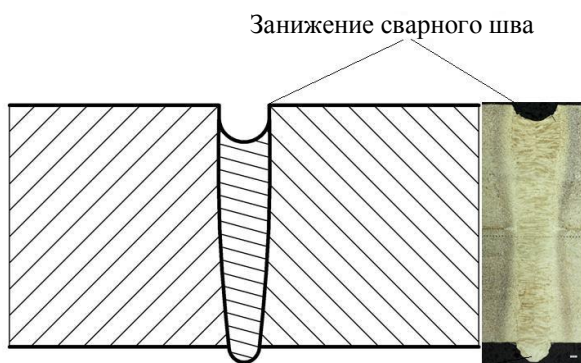


Рис. 1. Дефект лазерной сварки с глубоким проплавлением – занижение сварного шва

Устранение подобного дефекта возможно при использовании гибридного метода лазерно-дуговой сварки (рис.2). Гибридный метод также позволяет увеличивать допуски на зазор при сборке свариваемых кромок. Плавающие сварочные материалы в процессе лазерно-дуговой сварки компенсируют затраты на разбрызгивание основного металла, заполняют сборочные зазоры и устраняют занижение сварного шва [4, 5].

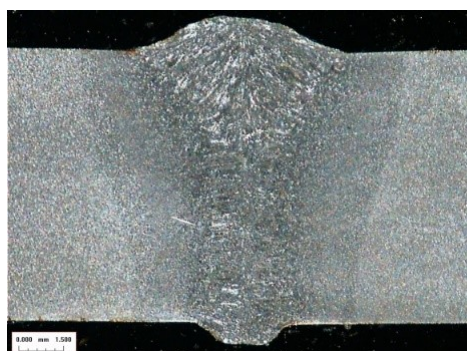


Рис. 2. Макрошлиф сварного шва, полученного гибридным лазерно-дуговым способом сварки, толщина 10 мм

Однако лазерно-дуговые процессы имеют и ряд недостатков, осложняющих производственные и технологические процессы сварки. В первую очередь, комбинация двух источников – лазерного луча и дуги, удваивает затраты на настройку процесса, подбор технологического режима. Оборудование и технологическая оснастка требуют высокого уровня конструкторской проработки. Соблюдение всех правил техники безопасности при наличии двух источников осложняет слежение за процессом непосредственно в момент сварки, а интенсивное разбрызгивание требует принятия дополнительных мер по защите дорогостоящей лазерной оптики от искр, усложняя конструкцию оборудования.

Другим эффективным методом устранения поверхностных дефектов и расширения допусков при сборке стыков под лазерную сварку является способ сварки с применением присадочной проволоки [2, 6]. Подача присадочной проволоки способствует получению завышения сварного шва и придания ему необходимой геометрии.

К недостаткам способа можно отнести необходимость подачи дорогостоящего защитного газа (аргон, гелий, сварочная смесь) в зону расплавленного и остывающего металла. Также следует отметить, что стабильность и повторяемость процесса лазерной сварки зависит от тщательности подготовки облучаемых поверхностей [2] и контролируемой высоты плазменного факела [7]. В противном случае наблюдаются большие потери мощности лазерного излучения на рассеивание и отражение.

Для устранения перечисленных недостатков авторами статьи было предложено проводить лазерную сварку с применением присадочной проволоки, а в качестве защиты от окисления использовать керамические флюсы.

Процесс заключается в подаче присадочной проволоки 1 в сварочную ванну, формируемую лазерным лучом 2 (рис. 3). При сварке присадочный материал 1 направляется в точку пересечения лазерного луча 2 с поверхностью свариваемых деталей 3, 4. Лазерный луч располагается нормально к поверхности свариваемых деталей или под углом 10...25°. Проволока подается под углом 10...80° относительно поверхности. Предварительно на свариваемый стык наносится флюс 5. В процессе сварки лазерное излучение проходит сквозь флюс, попадая на состыкованные кромки и конец присадочной проволоки.

Подача присадочной проволоки в зону из-

лучения позволяет формировать шов *б* с усилением с лицевой стороны. При этом размеры облицовочного и обратного валиков можно регулировать количеством присадочного материала расплавленного в единицу времени. Сварочный флюс выполняет функцию защиты сварного шва от взаимодействия с окружающей атмосферой.

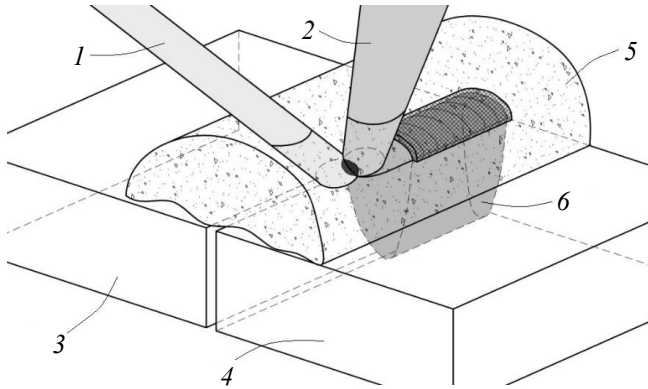


Рис. 3. Условная схема процесса лазерной сварки по слою флюса

Сварку проводили с использованием волоконного лазера модели ЛС-10 на стали 09Г2С и флюса АН-47.

Эксперименты показали, что применение флюса ограничивает рост плазменного факела и исключает разбрызгивание.

Исследовано влияние флюса на проплавляющую способность лазерного излучения. Проплавляли чистые пластины и покрытые флюсом. Установлено, что затраты тепла на расплавление флюса снижают эффективность передачи тепла лазерным излучением к металлу и уменьшают глубину проплавления (рис.4).

Как видно на графиках и макроструктурах рис.4, применение флюса не оказывает существенного влияния на форму проплавления и качество сварного соединения, глубина проплавления снижается при этом на величину около 20 %.

Для оценки эффективности, предлагаемого в данной работе метода, были проведены сравнительные эксперименты по лазерной сварке стали 09Г2С: без применения сварочных материалов, с проволокой, а также с проволокой по слою флюса. Макроструктуры полученных соединений, а также графики измерения микротвердости представлены на рис. 5.

Сваренные лазерным лучом по предложенной технологии с присадочной проволокой по слою флюса образцы стали 09Г2С были испытаны на растяжение. Во всех случаях разрушение образцов проходило по основному ме-

таллу (рис.6). Данный результат свидетельствует о высоком уровне прочностных характеристик сварных соединений, полученных по предлагаемой технологии.

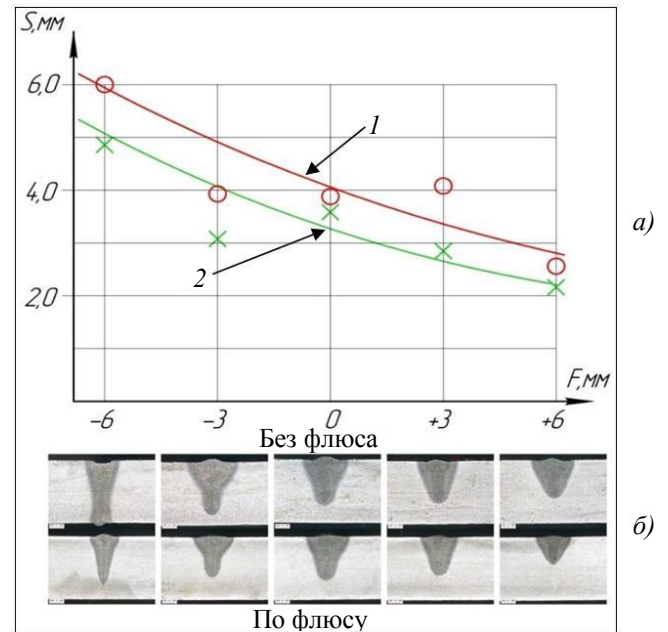


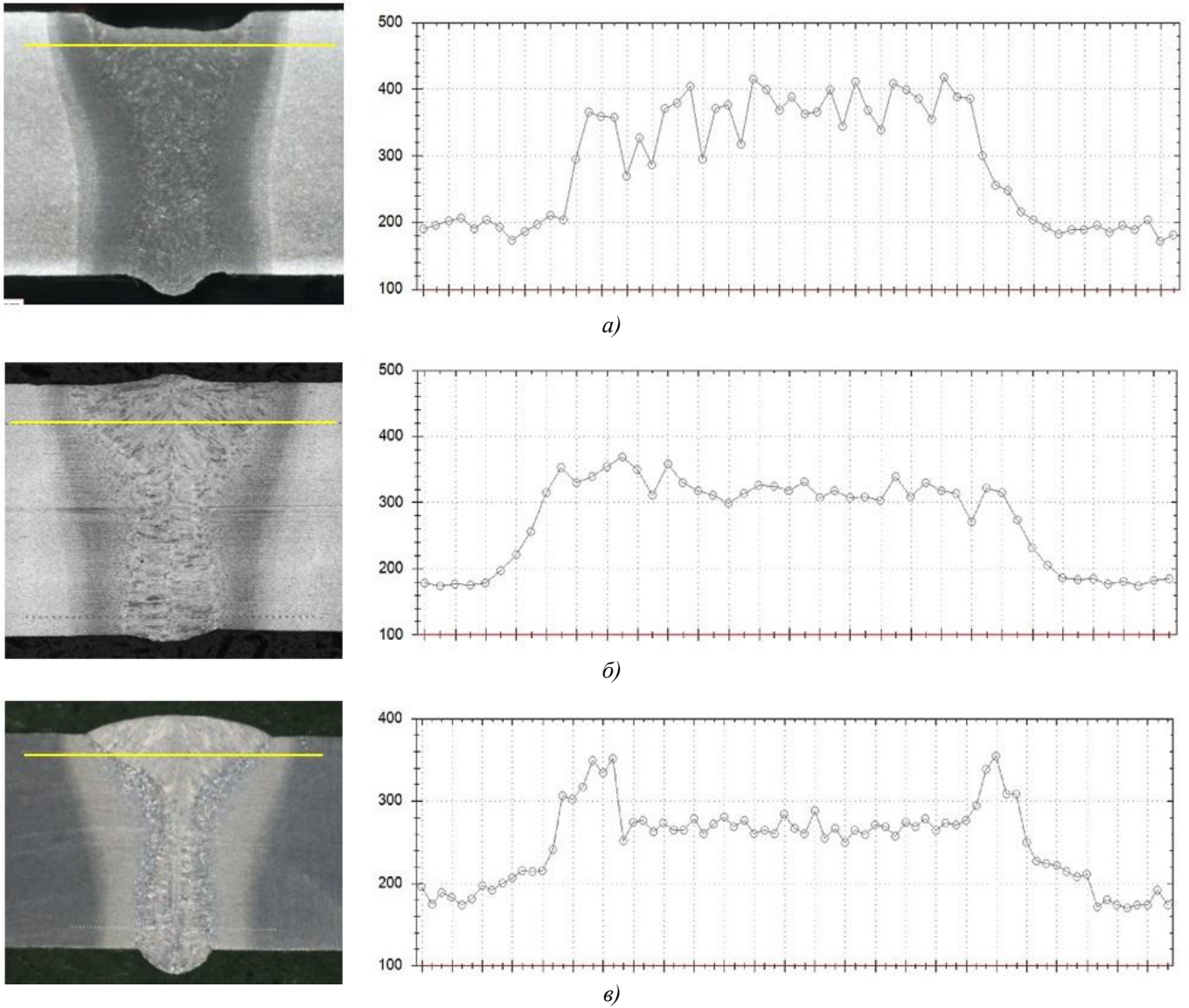
Рис. 4. Зависимости глубины проплавления от положения фокусного пятна при наличии флюса на поверхности пластины и без него:

а – графические зависимости; б – макроструктура проплавлений

Как видно на макроструктурах (см. рис. 5) занижение сварного шва, образуемого в случае отсутствия присадочных материалов, можно устранить подачей присадочной проволоки под лазерный луч. Применение флюса и присадочной проволоки сглаживает поверхностные дефекты, делает плавным переход от усиления к основному металлу и защищает сварной шов от окисления. Меньший уровень микротвердости, зафиксированный для образца, сваренного по слою флюса, свидетельствует о влиянии флюса на скорость охлаждения сварного шва и формирование благоприятных структур, что крайне важно для лазерной сварки закаляющихся сталей типа 09Г2С.

Сварка с присадкой по слою флюса может быть использована как облицовочный шов, который закрывает занижение, возникающее при сварке больших толщин за один проход (см. рис.1). Эта технология была опробована авторами при сварке сталей толщиной 8 и 12 мм за один проход. Макроструктура полученных соединений показана на рис. 7.

Как наглядно видно на макрошлифах, занижение от первого прохода полностью заправляется, образуя требуемое завышение шва с плавным переходом к основному материалу.

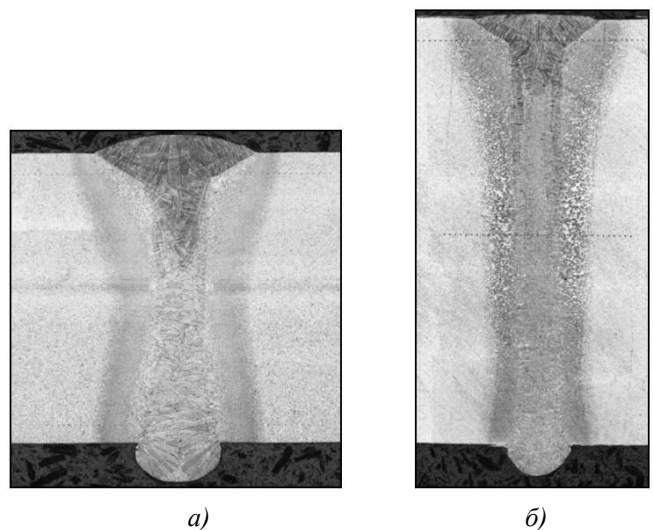


**Рис. 5. Макроструктуры лазерных сварных соединений и графики микротвердости:**

*а* – сварка без сварочных материалов; *б* – сварка с присадочной проволокой в среде защитного газа; *в* – сварка с присадочной проволокой по слою флюса



**Рис. 6. Образцы после механических испытаний на статическое растяжение**



**Рис. 7. Макрошлифы сварных швов, выполненных с подачей присадочной проволоки под слоем флюса:**  
*а* – сталь 40, толщина 8 мм; *б* – сталь Ст3, толщина 12 мм

Опробованный способ лазерной сварки с подачей присадочной проволоки по слою флюса может использоваться как альтернатива гибридной лазерно-дуговой сварке в защитном газе и лазерной сварке с подачей присадочной проволоки в среде защитных газов для устранения занижения сварного шва.

Применение флюса вместо защитного газа устраняет чрезмерное разбрызгивание и рассеивания лазерного излучения при сварке, а твердость металла шва, получаемая при сварке по слою флюса, указывает на более благоприятные структуры, чем при сварке в защитном газе.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Сварка. Резка. Контроль:** справочник. В 2-х томах / Под общ. ред. Н.П. Алешина, Г.Г. Чернышова. – М.: Машиностроение, 2004. Т.1 / Н.П. Алешин, Г.Г. Чернышов, Э.А. Гладков и др. – 624 с.
2. **Григорьянц, А.Г., Шиганов, И.Н., Мисюров, 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.
3. **LIA Handbook of Laser Materials Processing / J.F. Ready (et al.).** – Orlando: Laser Institute of America, 2001. – 704 p.
4. **Григорьянц, А.Г., Шиганов, И.Н., Чирков, А.М.** Гибридные технологии лазерной сварки: учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 52 с.
5. **Пат. РФ № 2010139611/02**, 23.09.2010. Туричин Г.А., Цибульский И.А. Способ лазерно-дуговой сварки плавящимся электродом алюминия и алюминиевых сплавов // Патент России № 2440221. 2012. Бюл. №2.
6. **Patent US № 09/738363**. 14.02.2001. I. Haschke. Process and device for joining of workpiece parts by means of

an energy beam, in particular by means of a laser beam. // United States patent № 6595962. 2001.

7. **Щеглов, П.Ю., Успенский, С.А., Петровский, В.Н. и др.** Исследование паро-плазменного факела при сварке мощным волоконным лазером // Сборник научных трудов конференции "Научная сессия МИФИ-2011". 2011. Т.2, с. 90.

## REFERENCES

1. *Welding. Cutting. Control: Reference Book.* In 2 Volumes / under the general editorship of N.P. Aleshin, G.G. Chernyshov. – M.: Mechanical Engineering, 2004. Vol. 1/ N.P. Alyoshin, G.G. Chernyshov, E. A. Gladkov et al. – pp. 624.
2. Grigoryants, A.G., Shiganov, I.N., Misyurov, A.I. *Technological Processes of Laser Treatment: manual for colleges / under the editorship of A.G. Grigoryants.* – M.: Publishing House of Bauman STU, 2006. – pp. 664.
3. *LIA Handbook of Laser Materials Processing / J.F. Ready (et al.).* – Orlando: Laser Institute of America, 2001. – 704 p.
4. Grigoryants, A.G., Shiganov, I.N., Chirkov, A.M. *Hybrid Technologies of Laser Bonding: manual.* – M.: Publishing House of Bauman STU, 2004. – pp. 52.
5. Pat. RF No. 2010139611/02, 23.09.2010. Turichin G.A., Tsybul'skiy I.A. Method of laser bonding with melting electrode of aluminum and aluminum alloys // *Russia Patent No. 2440221.* 2012. Bull. No.2.
6. Patent US № 09/738363. 14.02.2001. I. Haschke. Process and device for joining of work-piece parts by means of an energy beam, in particular by means of a laser beam. // United States patent № 6595962. 2001.
7. Shcheglov, P.Yu., Uspenskiy, S.A., Petrovskiy, V.N. et al. Plasma torch investigation at bonding with power fiber laser // *Proceedings of the Conf. "Scientific Session of MEPI-2011"*. 2011. Vol. 2, pp. 90.

*Рецензент д.ф.-м.н. Н.Н. Евтихийев*

УДК 621.78

DOI: 10.12737/article\_59d496ecea5154.22425645

**А.В. Богданов**, к.т.н.

(МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1),

**В.И. Соколов**, к.ф.-м.н.,

**С.А. Шмелев**, начальник сектора

(ООО НТО «ИРЭ-Полюс», Московская обл., г. Фрязино),

E-mail: mtbmstu@mail.ru

## Выбор оптимальных конфигураций оптических схем для задачи лазерной термообработки стальных изделий

*В рамках статьи выполнен сравнительный анализ различных конфигураций оптических схем, которые совместно с волоконными лазерами могут использоваться для задачи лазерной термообработки габаритных тел вращения.*

**Ключевые слова:** волоконный лазер; упрочнение; оптическая схема; износостойкость; контактно-усталостная прочность.