

ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ КРОМКИ СОЕДИНЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

М. СОКОЛОВ, А. САЛМИНЕН

Технологический университет, г. Лаппеенранта, Финляндия.

E-mail: mikhail.sokolov@lut.fi

Лазерные технологии находят все более широкое применение в промышленности. Многие публикации посвящены повышению эффективности применения лазерной сварки, особенно с глубоким проплавлением, на которую влияют различные параметры процесса. В данной работе изучено влияние шероховатости кромки и наличия зазора при выполнении стыковых соединений пластин из низкоуглеродистой Ст3 толщиной 20 мм. Сварку выполняли волоконным лазером мощностью 14 кВт с длиной волны 1070 нм. Эксперименты проводили в два этапа: на первом выполнили сварку пластин толщиной 16 мм с уровнем шероховатости Ra 2 мкм при скорости сварки 1...2 м/мин, мощности лазера 12...14 кВт и положением фокусной точки — 7,5 мм; на втором изменяли шероховатость кромки и зазор в стыке при скорости сварки 2 м/мин, мощности лазера 14 кВт и том же положении фокусной точки. Отмечено увеличение глубины проплавления до уровня шероховатости Ra 6,3 мкм с дополнительным зазором. Доказано, что роль шероховатости поверхности кромки имеет значительное влияние при возникновении парогазового канала (изменяется модель повторного отражения на кромке стыка). На этапе проектирования изделий, изготавливаемых с использованием стыковой сварки лазерным излучением, необходимо учитывать оба фактора. Библиогр. 26, рис. 4.

Ключевые слова: лазерная сварка, низколегированная сталь, волоконный лазер, высокая мощность, коэффициент поглощения, глубина проплавления, зазор, шероховатость поверхности кромки

Методы повышения коэффициента поглощения, а следовательно, эффективности сварочных процессов являются важной составляющей современного процесса лазерной сварки с глубоким проплавлением, поскольку коэффициент проплавления оказывает влияние на ряд параметров сварки, необходимый уровень поглощенной энергии лазерного излучения, скорость сварки и качество сварного шва. Коэффициент поглощения также определяет возможность образования парогазового канала, которое возможно, если плотность энергии в точке контакта лазер — металл достигает достаточно высокого уровня ($\sim 10^6$ Вт/см²). Металл плавится вдоль передней стенки парогазового канала при движении лазерного луча и затем перемещается через боковую стенку к задней стенке, где затвердевает, образуя узкий шов. Лазерный луч переотражается несколько раз от стенок канала проплавления и расплавленный металл поглощает часть энергии пучка всякий раз, когда луч ударяется о стенку канала (рис. 1).

Коэффициент поглощения зависит от свойств материала, качества и методов обработки поверхности кромки и параметров окружающей среды.

При образовании первоначального парогазового канала роль этих факторов значительна [1–3].

Повысить эффективность процесса лазерной сварки можно с помощью предварительного нагрева. Однако это подразумевает увеличение количества этапов технологического процесса и его применение усложняет процесс сварки. Использование гибридных технологий лазерной сварки, несмотря на значительные преимущества (более высокая стабильность процесса и меньшая вероятность образования сварных дефектов), имеет ощутимые недостатки (высокую сложность на-

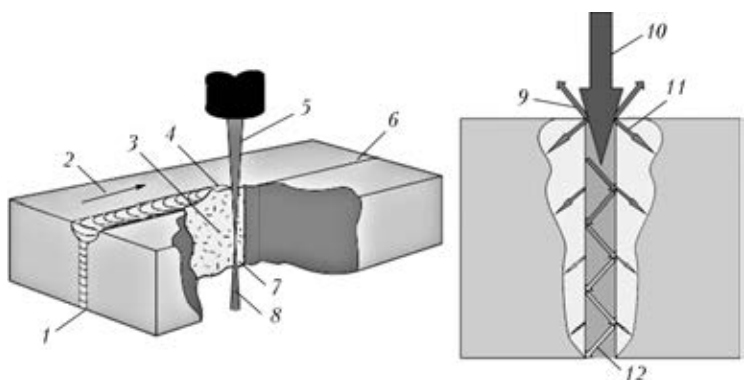


Рис. 1. Схема процесса лазерной сварки с парогазовым каналом [4]: 1 — валик шва; 2 — направление сварки; 3 — ЗТВ; 4 — парогазовый канал; 5 — лазерный пучок; 6 — кромка шва; 7 — жидкий металл; 8 — лазерный пучок, выходящий из обрабатываемого изделия; 9 — отраженное излучение; 10 — лазерный пучок; 11 — поглощенное излучение; 12 — переотражения от стенок парогазового канала



тройки оборудования и увеличение количества параметров контроля и оптимизации по сравнению с лазерной сваркой) [4–7].

Целью настоящей работы является изучение роста эффективности процесса лазерной стыковой сварки при использовании оптимизации уровня шероховатости поверхности кромок и зазора между пластинами.

Соотношение между коэффициентом поглощения и качеством поверхности кромки широко изучено при сварке CO_2 -лазером. В комплексных исследованиях уровня поглощения излучения CO_2 -лазера, проведенных Арата и Миямото в 1972 г., было показано, что уровень поглощения имеет тенденцию к росту с увеличением шероховатости поверхности кромок соединения. Но, когда поверхность расплавлялась, поглощение снижалось до постоянной величины [8]. Другие исследователи посчитали влияние уровня шероховатости поверхности кромок при обработке CO_2 -лазером незначительным [6, 7]. В более поздних исследованиях отмечено заметное увеличение уровня поглощения излучения на более шероховатых поверхностях по сравнению с отполированными [1, 9–12].

Вопрос о влиянии уровня шероховатости поверхности кромок на эффективность процесса лазерной сварки мощными волоконными лазерами практически не изучался. На сегодня исследования подобных процессов сварки направлены на

оптимизацию параметров самого процесса. Подготовка поверхности кромок соединения сводится к выполнению технических требований, основанных на стандартах для электронно-лучевой сварки и лазерной импульсной сварки. Исследование же влияния уровня шероховатости кромок при сварке мощными волоконными лазерами не получило широкого распространения [13–20]. Бергстром и др. с использованием Nd:YAG-лазера установили, что причиной увеличения коэффициента поглощения является угол падения излучения, при варьировании которого изменяется траектория отражения и последующего переотражения падающего луча [21].

В работах [22, 23] сделано предположение, что увеличение коэффициента поглощения при увеличении шероховатости поверхности кромок соединения можно объяснить увеличением размера зазора между пластинами, что ведет к изменению траектории переотражения.

Экспериментальная часть. Эксперименты по лазерной стыковой сварке стали [24] проводили с использованием мощного волоконного лазера IPG YLR 15000 в лаборатории лазерной сварки Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (Россия). Химический состав стали Ст3 (ГОСТ 380–94) следующий, мас. %: 0,16 С; 0,19 Si; 0,44 Mn; 0,01 P; 0,01 S; 0,03 Cr; 0,01 Ni; 0,02 Cu; 0,03 Al; 0,01 N. Пластины

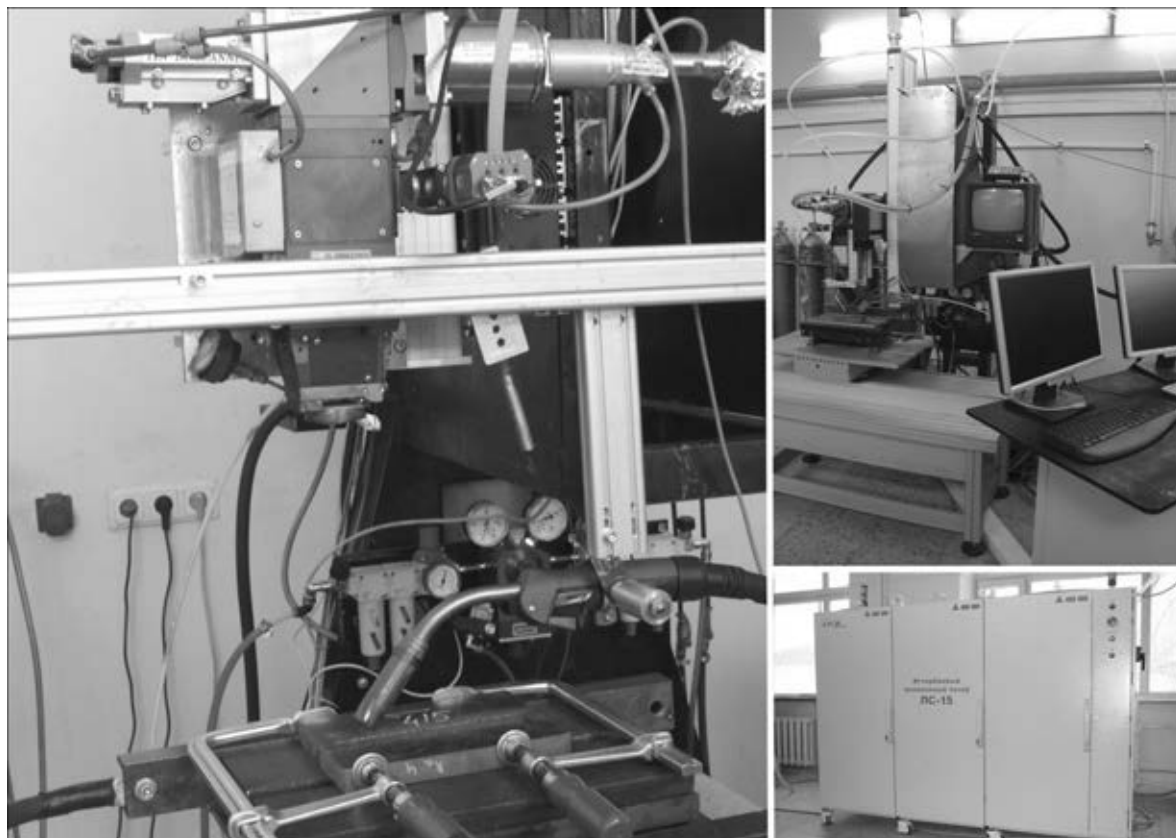


Рис. 2. Фрагменты компоновки оборудования для лазерной сварки образцов стали толщиной 16, 20 мм (фокусное расстояние 400 мм, диаметр фокусного пятна 0,4 мм)

образцов для испытаний (200×75×20 мм) были получены гидроабразивной резкой. Затем поверхности кромок были обработаны фрезерным станком для получения желаемого уровня шероховатости и очищены от слоя оксида низкоскоростной пескоструйной обработкой. Шероховатость поверхности кромок соединения измеряли с помощью контактного устройства для измерения шероховатости Taylor-Hobson Surtronic 10 Ra (диапазон измерения 0,1...40 мкм) с округлением до ближайшего стандартного значения в соответствии с EN 10049 [25].

В экспериментах использовали два варианта компоновки: обычное стыковое соединение и стыковое соединение с увеличенным зазором. Для получения зазора была использована лента из углеродистой стали.

Схема расположения оборудования показана на рис. 2. В процессе эксперимента стальные образцы были плотно зафиксированы зажимом. Аргон (интенсивность подачи 20 л/мин) использовали в качестве защитного газа и направляли в шов с помощью сварочной горелки. Уровни проплавления и качества шва исследовали в соответствии с ISO 13919-1 [26].

Эксперименты провели в два этапа. На первом этапе использовали пластины толщиной $t = 16$ мм с уровнем шероховатости $Ra 2$ мкм, скорость сварки $v_w = 1...2$ м/мин, мощность лазера $P_L = 12...14$ кВт, положение фокусной точки $f_{pp} = 7,5$ мм.

Второй этап запланировали как двухуровневый факторный эксперимент: в качестве совокупности факторов использовали шероховатость поверхности кромок и зазор между пластинами. Выбор параметров сварки пластин ($t = 20$ мм) обоснован результатами первого этапа экспериментов: $v_w = 2$ м/мин, $P_L = 14$ кВт и $f_{pp} = 7,5$ мм.

Результаты и обсуждение. Результаты экспериментов первого этапа представлены на рис. 3. Любопытно, что использование увеличенного зазора привело как к увеличению глубины проплавления, так и к образованию дефекта неполного заполнения кромки.

На рис. 4 представлены результаты экспериментов второго этапа: отмечены незначительные изменения глубины проплавления или геометрии шва при уровнях шероховатости $Ra 3,2...5$ мкм. Добавление стальной ленты толщиной 0,2 мм для увеличения зазора между пластинами не изменяет общей тенденции на указанных уровнях шероховатости. При шероховатости кромок $Ra 5$ мкм зафиксировали образование дефектов при увеличении зазора между пластинами. Максимальный уровень проплавления 15 мм получен при шероховатости $Ra 6,3$ мкм. При добавлении зазора 0,2 мм, глубина проплавления увеличилась до 18,3 мм. В обоих случаях сварные швы характеризовались хорошим качеством.

Таким образом, при стыковой сварке лазерным лучом конструкционной стали Ст3 (уровни шероховатости кромок $Ra 2,0...6,3$ мкм) максимальные глубины проплавления были достигнуты при уровне шероховатости $Ra 6,3$ мкм. Использование ленты из нержавеющей стали толщиной 0,2 мм для увеличения зазора между стальными образцами обеспечило положительный результат при уровне шероховатости поверхности $Ra 6,3$ мкм — глубина проплавления увеличилась до 18,3 мм. При других исследованных уровнях шероховатости использование увеличенного зазора не привело к значительным изменениям геометрии шва.

На этапе проектирования изделия при стыковой сварке лазерным лучом необходимо учитывать как оптимальные уровни шероховатости поверхности кромок, так и дополнительный зазор

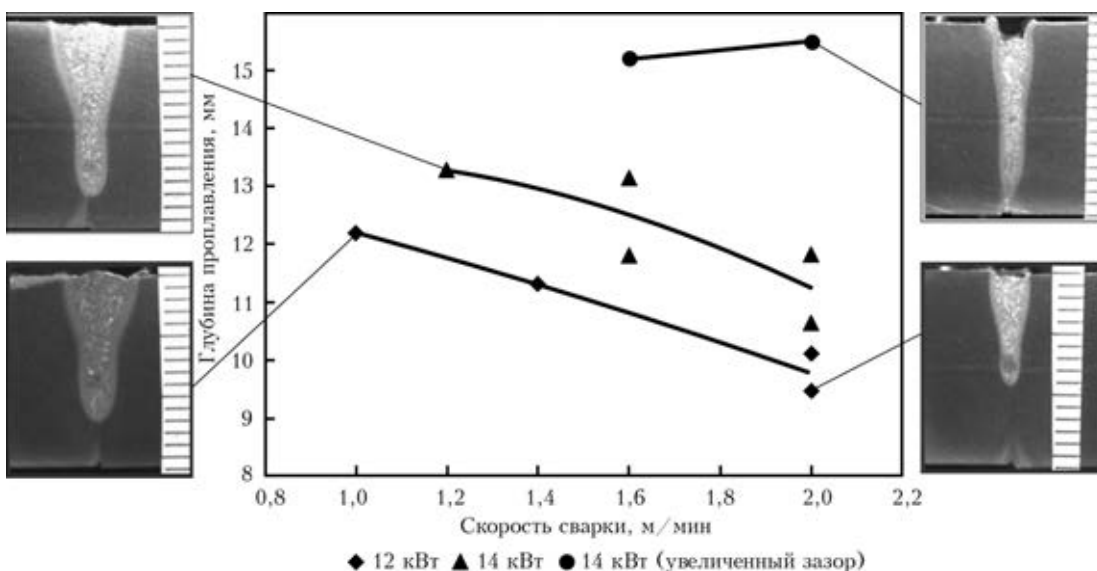


Рис. 3. Влияние различных параметров лазерной сварки на глубину проплавления образцов (Ст3, $t = 16$ мм)

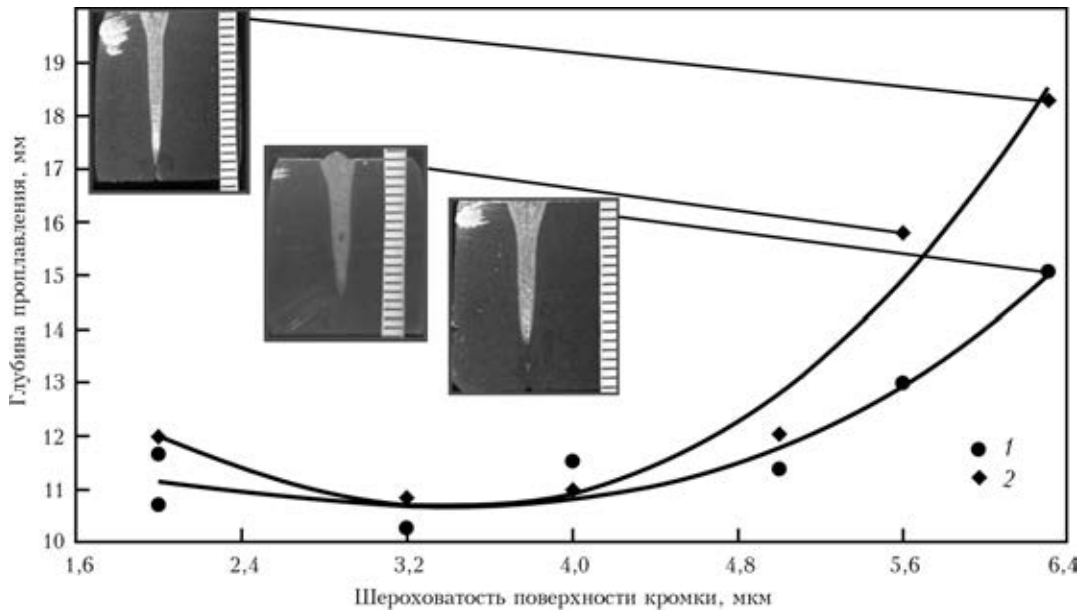


Рис. 4. Влияние уровня шероховатости поверхности кромки при лазерной стыковой сварке образцов без зазора (1) и с увеличенным зазором (2) на глубину проплавления (Ст3, $t = 20$ мм, $P_L = 14$ кВт, $v_W = 2$ м/мин, $f_{pp} = -7,5$ мм)

между пластинами. Кроме того, для данного исследования необходимо учитывать важные ограничения: способ сварки, оборудование и материалы, использованные для экспериментов.

Стоит отметить, что вопрос влияния уровня шероховатости на формирование сварного соединения нуждается в более подробном исследовании, чем просто определение диапазона оптимальных уровней шероховатостей. Предварительно определенные уровни шероховатости кромки можно использовать вместе с методиками предварительного подогрева с целью дополнительного увеличения коэффициента поглощения. Взаимосвязи этих показателей требуют дальнейших исследований на большем количестве разнообразных материалов, используя разные технологические установки на базе мощных волоконных лазеров. Результаты этого исследования будут способствовать разработке четких рекомендаций по определению оптимальных уровней шероховатости поверхности кромки соединения при сварке больших толщин с помощью лазеров высокой мощности.

Выводы

1. Увеличение глубины проплавления для уровня шероховатости Ra 6,3 мкм с дополнительным зазором можно объяснить изменениями в траектории повторного отражения лазерного луча внутри зазора, что приводит к увеличению коэффициента поглощения на поверхностях кромок. При дальнейшем увеличении уровня шероховатости и зазора значительная часть лазерного луча может «провалиться сквозь» зазор и коэффициент поглощения уменьшится.

2. Влияние шероховатости поверхности кромки может меняться в процессе сварки, в частности в момент расплавления металла перед парогазовым каналом. Это означает, что шероховатость поверхности кромки имеет значительное влияние на процесс сварки только во время возникновения парогазового канала, когда влияние шероховатости поверхности кромки с увеличенным зазором изменяет модель повторного отражения. Следовательно, коэффициент поглощения увеличивается, начальный парогазовый канал становится более глубоким и стабильным, тогда как для самого процесса сварки влияние шероховатости больше не является критичным.

1. Duley W. W. Laser welding. — New York: John Wiley & Sons Inc., 1998. — 253 p.
2. Ion J. C. Laser processing of engineering materials. — Oxford: Butterworth-Heinemann, 2005. — 576 p.
3. Xiangzhong J. A three-dimensional model of multiple reflections for high-speed deep penetration laser welding based on an actual keyhole // Optics and Lasers in Eng. — 2008. — 46, № 1. — P. 83–93.
4. Blondeau R. Metallurgy and mechanics of welding processes and industrial applications. — Saint-Etienne: ENSM, 2008. — 512 p.
5. Analysis of hybrid Nd:Yag laser-MAG arc welding processes / L. Guen, R. Fabbro, M. Carin et al. // Optics & Laser Technology. — 2011. — 43, № 7. — P. 1155–1166.
6. Kah P., Salminen A., Martikainen J. Laser-arc hybrid welding processes (review) // The Paton Welding J. — 2010. — № 6. — P. 32–40.
7. Bayraktar E., Moiron J., Kaplan D. Effect of welding conditions on the formability characteristics of thin sheet steels: Mechanical and metallurgical effects // J. Mat. Proc. Technol. — 2006. — 286, № 3. — P. 20–26.
8. Arata Y., Miyamoto I. Some fundamental properties of high power laser beam as a heat source (Report 2) // Transactions of the Japan Welding Society. — 1972. — № 3. — P. 163–180.
9. Laser welding of stainless steel: Influence of the edges morphology / L. Covelli, F. Jovane, L. De Lori V. Tagliaferri // CIRP Annals — Manufacturing Technology. — 1988. — № 37. — P. 545–548.

10. Ricciardi G., Cantello M. Laser material interaction: Absorption coefficient in welding and surface treatment // *Ibid.* — 1994. — 43, № 1. P. 171–175.
11. Grigoryants A. G., Shiganov I. N. Misyurov A. I. Technological processes of laser treatment. — Moscow: Bauman Molcow State Technical University. — 2006. — 663 p. — In Russian.
12. Steen W. M. Laser material processing. — 3 ed. — London: Springer, 2003. — 408 p.
13. Phenomena of welding with high-power fiber laser / K. Kinoshita, M. Mirutani, Y. Kawahito, S. Katayama // *Proc. of 25th Intern. Congress applications of lasers & electro-optics, 2006.* — P. 535–542.
14. Weld penetration and phenomena in 10 kW fiber laser welding / S. Katayama, K. Kinoshita, Y. Kawahito et al. // *Ibid.* — 2007. — P. 360–369.
15. Salminen A., Lehtinen J., Harkko P. The effect of laser and welding parameters on keyhole and melt pool behavior during fiber laser welding // *Ibid.* — 2008. — P. 416–425.
16. Salminen A., Piili H., Purtonen T. The characteristics of high power fibre laser welding // *Proc. of the Institution of Mechanical engineers, Part C // J. Mech. Eng. Sci.* — 2010. — 224, № 5. — P. 1019–1029.
17. Salminen A., Purtonen T. The effect of welding parameters on keyhole and melt pool dimensions and behavior during fiber laser welding // 12th Nordic conf. on laser materials processing. — NOLAMP 12, 2009. — 16 p.
18. Kaplan A., Wiklund G. Advanced welding analysis methods applied to heavy section welding with a 15kW fiber laser // *Intern. conf. on welding of the IIW.* — 2009. — 53. — P. 295–300.
19. Katajama S., Kawahito Y., Mizutani M. Elucidation of laser welding phenomena and factors affecting weld penetration and welding defects // *Phys. Procedia.* — 2010. — № 5. — P. 9–17.
20. Laser welding and weld analysis of thick section S355 structural steel / M. Sokolov, A. Salminen, M. Kuznetsov, I. Tsi-bulskiy // *Materials @ Design.* — 2011. — 32, № 10. — P. 5127–5131.
21. Bergstrom D., Powell J., Kaplan A. The absorption of light by rough metal surfaces. A three-dimensional ray-tracing analysis // *Proc. of 26th Intern. congress on applications of lasers & electro-optics.* — 2007. — P. 704–713.
22. Malashenko A. A., Mezenov A. V. Laser welding of metal. — M.: Mashinostroenie, 1984. — 45 p. — In Russian.
23. Laser welding of structural steels: Influence of the edge roughness level / M. Sokolov, A. Salminen, V. Somonov, A. Kaplan // *Optics & Laser Technology.* — 2012. — 44, № 7. — P. 2064–2071.
24. GOST 380-94. Common quality carbon steel // *Grades.* — 1994. — In Russian.
25. EN 10049:2005. Measurement of roughness average. Ra and peak count R_{pc} on metallic flat products. — 2005.
26. ISO 13919-1:1996. Welding. Electrons and laser beam welded joints // *Guidance on quality levels for imperfections.* — Part 1: Steel. — 1996.

Поступила в редакцию 07.12.2012

РАЗРАБОТАНО В ИЭС

ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ СВАРКА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ТОЛЩИНОЙ ДО 400 мм

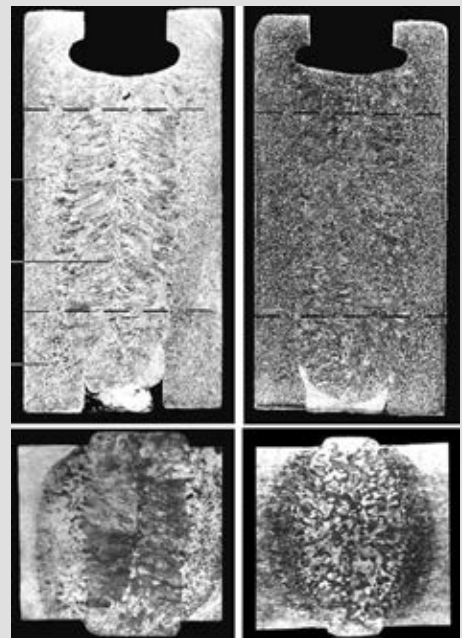
Технология предназначена для сварки деталей и узлов толщиной 40...400 мм из титана и его сплавов при выполнении стыковых, угловых и тавровых соединений.

Сварка осуществляется вертикальными швами за один проход без разделки кромок. Максимальная толщина свариваемого металла в месте стыка 400 мм при максимальной длине шва до 2 м и сварочном зазоре 22...30 мм. В зависимости от конструктивных особенностей изделий сварка может вестись с использованием проволочных электродов, плавящегося мундштука и пластинчатого электрода.

Отличительной особенностью технологии является использование электромагнитного воздействия на сварочную ванну, обеспечивающего высокое качество сварных соединений.

Преимущества:

- возможность сварки изделий толщиной до 400 мм за один проход без разделки кромок;
- высокая производительность процесса сварки;
- мелкозернистая структура металла шва без пор, шлаковых включений, несплавлений и прочих дефектов;
- простота и надежность используемого технологического оборудования.



Макрошлифы сварных соединений, выполненных без электромагнитного воздействия (слева) и с воздействием