

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА СТРУКТУРУ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ШВА ПРИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКЕ ФЕРРИТНЫХ СТАЛЕЙ

В. В. СОМОНОВ

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.
195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, РФ. E-mail: ballak@inbox.ru

Рассмотрены проблемы управления сварочной ванной при сварке ферритных нержавеющей сталей. Проведен сравнительный анализ работ в области влияния ультразвуковых и вибрационных колебаний на сварной шов. Отражены результаты предварительных экспериментальных и металлографических исследований образцов соединений, выполненных лазерной сваркой при дополнительном ультразвуковом воздействии на сварочную ванну. Исследовано влияние позиционирования прижимов и источника ультразвуковых волн относительно границы стыка на характер колебаний, возникающих в нем. Определены наиболее благоприятные частоты и амплитуды колебаний для генерации колебаний в области стыка. Получены результаты влияния толщины материала на возникающие в нем колебания, которые могут оказать воздействие на стабильность и скорость охлаждения сварочной ванны и, как следствие, на микроструктуру металла сварного шва. Библиогр. 11, табл. 1, рис. 5.

Ключевые слова: лазерная сварка, ультразвуковые волны, ферритные нержавеющей стали, сварочная ванна, микроструктура

Все чаще для сварки ферритных нержавеющей сталей используются современные лазеры, например, волоконные или дисковые. Это сводит к минимуму термические деформации конструкции при высоких скоростях сварки и последующую обработку сварных швов, сокращая этапы производства. Однако при сварке этих сталей существуют проблемы повышения склонности сварных швов к межкристаллитной коррозии (МКК) и снижения механических свойств (прочности и твердости) по сравнению с основным металлом. Традиционно с проблемой МКК борются следующими методами: стабилизацией (легирование Ti и Nb), снижением содержания углерода в стали меньше, чем 0,03 % или термической обработкой. Технологии стабилизации и снижения содержания углерода в стали являются материально затратными, а термическая обработка является энергоемким и неэкологичным технологическим процессом, требующим больших производственных площадей. В связи с этим исследователи пытались создать более простые способы решения проблемы. Одним из способов может быть использование вибрационных или ультразвуковых колебаний сварочной ванны в процессе сварки, но до конца не ясно, каковы возможности применения этого дополнительного источника для управления свойствами сварного шва.

Целью настоящих исследований было изучение влияния позиционирования источника ультразвуковых механических колебаний и при-

жимных устройств на образование колебаний в области сварного стыка для управления формированием микроструктуры металла сварного шва при лазерной сварке ферритных нержавеющей сталей, улучшая при этом его механические, металлургические характеристики и снижая склонность к МКК.

Анализ результатов исследований по материалам опубликованных работ. Исследованием влияния механических колебаний в сварочной ванне на снижение склонности к МКК занимались ученые в г. Уфа [1–3]. Они пришли к выводам, что вибрационная и ультразвуковая ударная обработки в процессе сварки позволяет увеличить стойкость металла шва сварного соединения из аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T к МКК. Ультразвуковая ударная обработка при частоте в интервале 25...27 кГц повышает сопротивление усталостному разрушению на 24...26 % больше, чем вибрационная. Последняя позволяет уменьшить величину зерна, что способствует образованию более однородной структуры в металле шва. В работах [4, 5] показано, что ультразвуковые механические колебания при лазерной сварке высокоуглеродистых сталей приводят к перемещению различных слоев металла в сварочной ванне. Расплавленный металл перемещается на край ванны расплава, что свидетельствует об эластичности ванны. Установлено влияние колебаний на форму сварного шва и распределение элементов в нем. Силы, действующие на расплавленный металл во

время ультразвуковых колебаний, улучшают контакт между ванной расплава и твердой подложкой, что зависит от скорости сварки и акустической мощности.

В ходе этого воздействия расплавленный металл располагается симметрично вокруг вертикальной оси симметрии шва. Он из центра сварочной ванны вытесняется на края, приводя к глубокому проплавлению и образу полусферические области с небольшим уклоном в области центральной полусферы в ванне расплава. Применение ультразвука способствует повышению механических свойств металла шва при его кристаллизации благодаря измельчению структуры и лучшему удалению газов.

Обычно используется диапазон частот 18...80 кГц. Такие колебания позволяют сваривать металлы с окисленной поверхностью, покрытые слоем лака и т. п., уменьшая или снимая остаточные напряжения, возникающие при этом. Ультразвуком можно стабилизировать структурные составляющие металла шва, устраняя возможность самопроизвольного деформирования сварных конструкций со временем [6, 7]. В ИТПМ СО РАН были выполнены исследования влияния ультразвука на повышение пластических свойств соединений. В результате экспериментов предел текучести и временное сопротивление разрушению заметно не изменились, но более, чем на 20 % возросла пластичность [8]. Из литературных источников известно, что в зависимости от конструкции волновода и крепления инструмента в зоне сварки можно получить продольные, поперечные и крутильные колебания. Их амплитуда обычно бывает в пределах 10...30 мкм [9, 10]. Из сказанного выше видно, что ультразвуковые механические колебания оказывают сильное влияние на свойства получаемого сварного шва, но, к сожалению, до конца не изучено влияние позиционирования источника и прижимных устройств относительно друг друга и стыка на величину, качество и глубину создаваемого эффекта в сварочной ванне. Из-за этого нет полного понимания происходящих при этом процессов.

Экспериментальные исследования и анализ результатов. В качестве экспериментальных образцов использовались пластины размером 100×100×2 мм из ферритной нержавеющей стали марки 1.4016 (X6Cr17) химического состава (мас. %): 0,08 С; 1,0 Si; 1,0 Mn; 0,04 P; 0,015 S; 16...18 Cr. Согласно BS EN 10088-1:2005 [11] химические характеристики этой марки стали: $\delta = 20\%$; $\sigma_{0,2} = 260$ МПа; $\sigma_b = 400...630$ МПа; $HV 126...197$.

Для проверки эффекта влияния колебаний, вызываемых ультразвуком, на свойства металла полученного шва, были выполнены предвари-

тельные эксперименты по лазерной сварке. Использовался разработанный экспериментальный стенд на базе технологического комплекса для лазерной сварки фирмы Reiss. В качестве источника излучения применялся иттербиевый волоконный лазер модели ЛС-10 производства фирмы IPG Laser GmbH (Германия) с максимальной выходной мощностью излучения 10 кВт, а для доставки его к поверхности свариваемых образцов — лазерная головка модели MWO 54 фирмы Laseroptik REIS Lasertec, снабженная воздушным кроссджем для защиты оптики от паров и брызг металла, с фокусирующей линзой, имеющей фокусное расстояние 300 мм и диаметр луча в фокусе $df 0,4$ мм. Перемещение образцов относительно лазерного луча осуществлялось при помощи четырехосевого манипулятора фирмы Reiss. Для создания колебаний использовались два пьезошейкера модели PS-X03-6/500 фирмы Isi-sys GmbH (Германия) с частотой колебаний F в пределах 0...30 кГц и амплитудой колебаний, регулирующейся в интервале 0...5 В, закрепляемые на поверхности образцов. Сами образцы и два пьезошейкера фиксировались на оси манипулятора при помощи специально изготовленной технологической оснастки. Сварка осуществлялась по прямой с отступом по 15 мм в обе стороны от пьезошейкеров. Сначала были получены швы без колебаний, а затем с добавленными колебаниями. Расположение пьезошейкеров на образцах в ходе экспериментов поясняет рис. 1.

В результате получено несколько сварных стыков соединений без и с воздействием колебаний в области стыка. При этом мощность лазерного излучения P (кВт), скорость сварки v (м/мин), положение фокуса относительно поверхности свариваемых образцов zf (мм) выбирались для обеспечения сквозного провара. Из полученных швов вырезались образцы и изготавливались металлографические шлифы для изучения микроструктуры с помощью микроскопов Leica Z16 APO A и Leitz Ergolux ($\times 1000$). Также проведены механические испытания на растяжение на стенде модели Z100 фирмы Zwick/Roell с нагрузкой до 10 кН и изме-

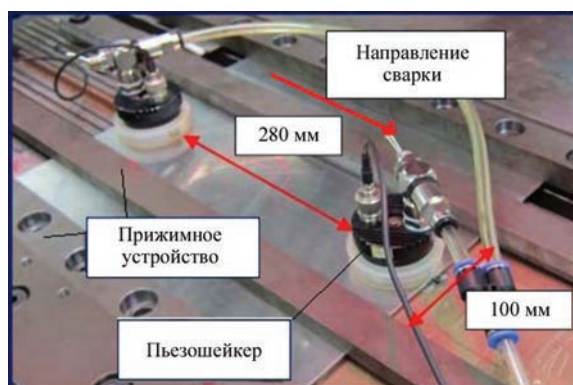


Рис. 1. Вид образцов с зафиксированными пьезошейкерами перед лазерной сваркой

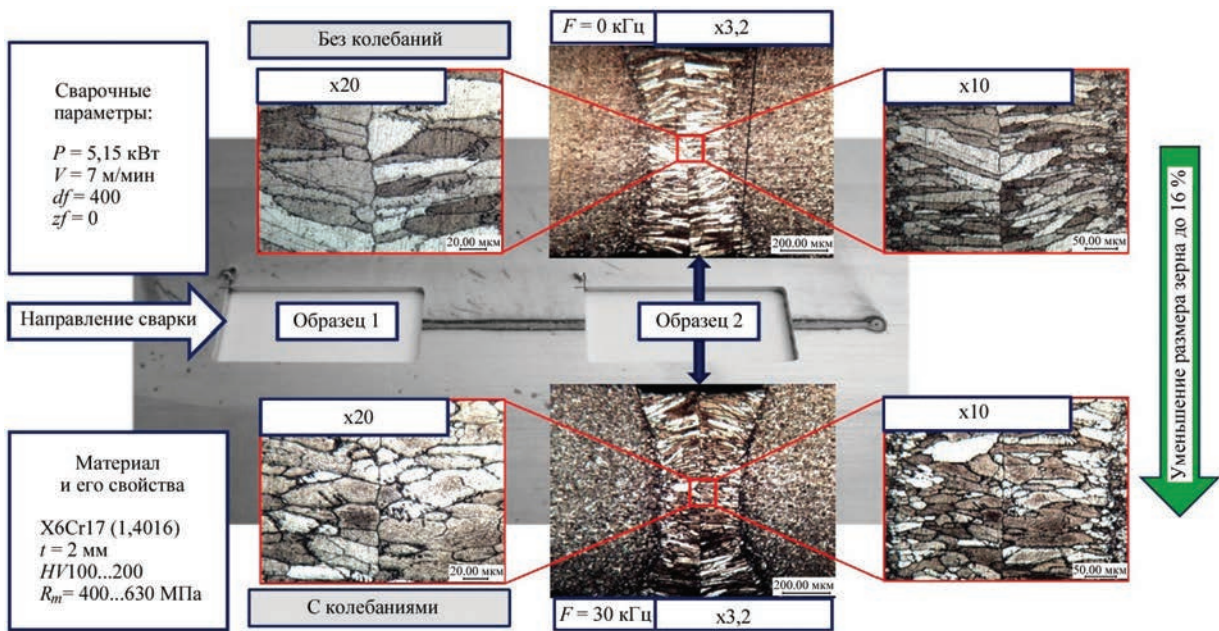


Рис. 2. Микроструктура сварных швов после лазерной сварки без и с дополнительными механическими колебаниями, созданными пьезошейкером

рена микротвердость металла сварного шва и прилегающей зоны по методу Виккерса при нагрузке в 1000 Н на автоматическом твердоме UT200 фирмы ВАQ. Микроструктура полученных образцов приведена на рис. 2. Характер разрушения образцов после испытаний и результаты измерения микротвердости приведены на рис. 3. С целью получения более подробного представления о влиянии параметров колебаний и усиления эффекта проведены исследования, позволившие определить оптимальное положение для пьезошейкеров и прижимов относительно будущего сварного стыка. Был разработан экспериментальный стенд, состоящий из камеры для сдвиговой спекл-интерферометрии (ширографии), снабженной системой диодной лазерной подсветки, пьезошейкера модели PS-X03-6/500, усилителя сигнала пьезошейкера фирмы Isi-sys GmbH и вакуумного насоса, обеспечивающего фиксацию пьезошейкера на поверхности образцов.

В ходе этих экспериментов регистрировались собственные колебания поверхности образцов, вызываемые пьезошейкером. Для разработки концепции оптимального положения пьезошейкеров было рассмотрено влияние на образование механических колебаний различных факторов, таких как: параметры самого пьезошейкера (амплитуда колебаний A (В), определяемая подаваемым напряжением, частота колебаний f (кГц), создаваемых пьезошейкером; позиция пьезошейкера относительно стыка (расстояние между краем пьезошейкера и стыком x_1 (мм) и относительно края образца y_1 (мм), а также расположение на лицевой или обратной стороне образца); толщина образца h (мм), расположение прижимов под но-

мерами 1–4 относительно краев образца и будущего стыка (рис. 4). В ходе экспериментов прижимы 1 и 2 изменяли свое положение относительно стыка, оно определялось расстоянием между центром прижима и границей стыка x_2 (мм). Перед началом экспериментов поверхность образца покрывалась тонким слоем белой краски, предназначенной для широкографии, что снижало отражение и давало возможность получить более четкий сигнал. Схема расположения пьезошейкера, прижимов 1–4 приведена на рис. 4. Стрелками обозначены направления изменения положения пьезошейкера и прижимов 1 и 2. Границей будущего стыка считалась ближайшая к наблюдателю кромка образца.

Результаты измерений пластичности и микротвердости образцов металла шва (см. рис. 2), полученного без воздействия колебаний: $\delta = 15\%$; $HV_{0,1} = 205...381$, после дополнительных колебаний с частотой 30 кГц: $\delta = 40\%$; $HV_{0,1} = 223...434$.

Результаты (см. рис. 3) свидетельствуют о влиянии создаваемых при помощи ультразвука механических колебаний на свойства сварного шва (пластичность и микротвердость). В основном микротвердость металла шва после использования дополнительных механических колебаний стала распределяться равномернее в пределах $HV 284...314$, тогда как до этого присутствовало большое количество хаотично расположенных областей с повышенной по значению микротвердостью $HV 331...381$.

Эксперименты по широкографии проводились сериями с изменением одного из параметров. В ходе них изменялась амплитуда колебаний A (3,

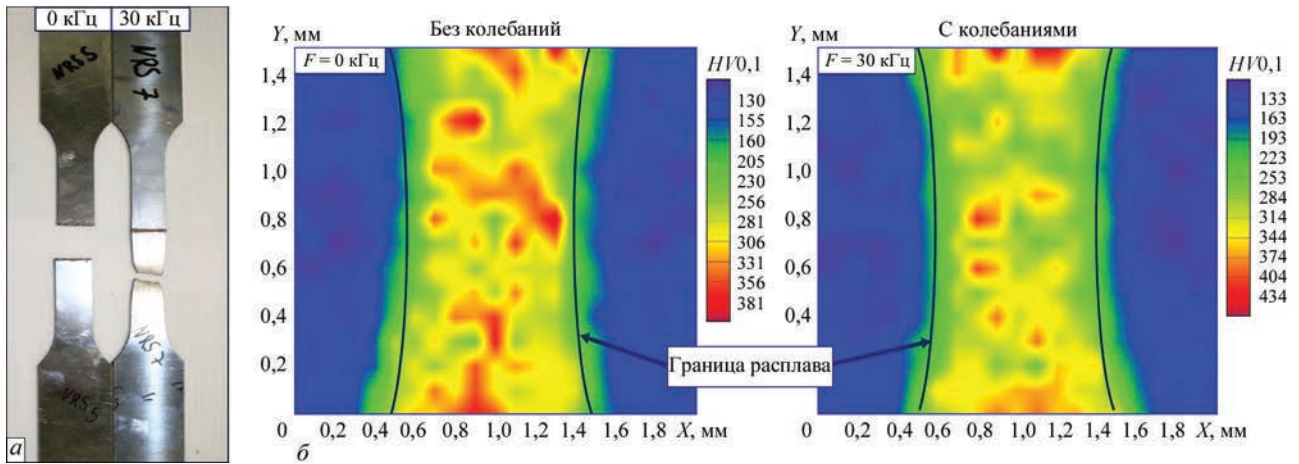


Рис. 3. Результаты механических испытаний: а — характер разрушения образцов при испытаниях на растяжение; б — результаты измерения микротвердости

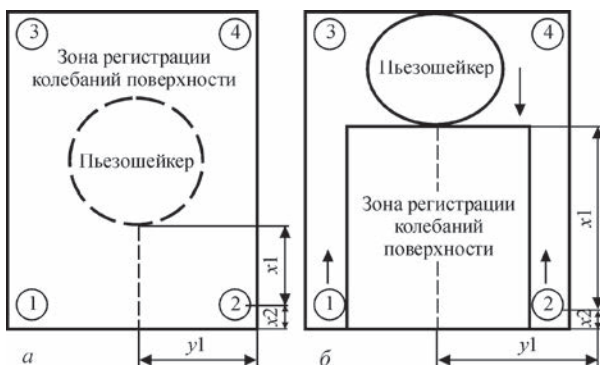


Рис. 4. Схема расположения пьезошейкера и прижимов (1–4) относительно поверхности образца: а — с обратной стороны образца без перемещения; б — с лицевой стороны образца с изменением его позиции, а также прижимов 1 и 2

5 В), частота колебаний f в интервале от 10 до 30 кГц с шагом 100 Гц, изменялась толщина используемых образцов в интервале от 2 до 8 мм путем совмещения пластин толщиной 2 мм друг с другом с помощью прижимов, менялось расположение прижимов и пьезошейкера относительно поверхности образца и менялась сама поверхность, на которой он располагался (лицевая или обратная сторона). Значения параметров экспериментов по ширографии приведены в таблице.

При сварке рассматриваемых сталей металл шва, как правило, имеет ферритную микроструктуру.

Это вызвано отсутствием α - γ -превращения при 1000 °С, необходимого для роста зерна. Эти стали при сварке характеризуются образованием в зоне сплавления крупнозернистой структуры (см. рис. 2, образец 2, верхний), что невозможно предотвратить традиционными способами. После сварки обычно наблюдается снижение ударной вязкости при увеличении содержания хрома в сварном шве. Это ведет к увеличению склонности к МКК. В результате исследований выяснилось, что при лазерной сварке данной стали ультразвуковые волны влияют на сварочную ванну, способствуя измельчению кристаллической структуры сварного шва (уменьшение размера зерна до 16 %) (см. рис. 2, образец 2, нижний), сопротивляемости деформациям при более низкой микротвердости и более равномерном ее распределении в объеме металла шва за счет перемешивания расплава в сварочной ванне.

Из этих экспериментов выяснилось, что механические колебания, создаваемые в образце при помощи пьезошейкера, расположенного в центре обратной стороны образца, даже на выставленных не максимальных параметрах распространяются на глубину более 8 мм. Были зарегистрированы заметные зоны колебаний в области будущего стыка при увеличении толщины образца с 2 до 8 мм. Это позволит применять этот метод воздей-

Параметры, изменяемые в ходе экспериментов по ширографии образцов, выполненных с применением УЗ-колебаний

Номер серии экспериментов	Расположение пьезошейкера относительно образца	Расположение пьезошейкера на поверхности образца ($x_1; y_1$), мм	Толщина образца h , мм	A, B	Позиция зажимов 1 и 2 (x_2), мм
1	Обратная сторона образца	В центре образца	2	3	5
2			2+2	3	5
3			2+2+2	3	5
4			2+2+2	3	5
5	Лицевая сторона образца	5...45 (с шагом 10);50	2	3;5	5
6		15...45 (с шагом 10);50	2	3;5	10
7		15...45 (с шагом 10);50	2	3;5	15
8		15...45 (с шагом 10);50	2	3;5	30

Примечание. Частота УЗ-колебаний f во всех экспериментах менялась от 10 до 30 кГц с (с шагом 100 Гц).

ствия для сварки конструкций из плоских листов, так как обычно толщина листа из данной стали не превышает 8 мм. Самые стабильные и сильные колебания в области стыка при расположении пьезошейкера на лицевой поверхности образца возникали на частотах 13,4; 18,6 и 24,7 кГц. Наибольший эффект на границу будущего стыка оказывает частота 18,6 кГц. С увеличением амплитуды колебаний с 3 до 5 В эффект усиливался незначительно. При приближении пьезошейкера к границе стыка колебания, возникающие на ней, дробились на части, но при этом они объединялись из отдельных зон в новую небольшую. Удаление прижимов 1 и 2 от границы стыка приводит к ослаблению передачи колебаний от пьезошейкера и, соответственно, ослаблению регистрируемого сигнала. Так как во время сварки близко располагать прижимы и пьезошейкеры нежелательно для обеспечения их сохранности, было выбрано минимально возможное для реализации своих функций расстояние, а именно 15 мм от края стыка.

В качестве оптимальной комбинации параметров, связанных с механическими колебаниями, для продолжения дальнейших экспериментов по лазерной сварке были выбраны следующие: частоты колебаний 18,6 и 24,7 кГц; амплитуда колебаний — 5 В; позиция шейкера относительно стыка в интервале от 15 до 25 мм; позиции прижимов относительно стыка не более 15 мм.

Пример регистрации колебаний при сочетании таких параметров приведен на рис. 5.

На рисунке видно изменение контрастности цвета возникших зон колебаний в области стыка, а также их уплотнение, что свидетельствует о большой величине оказываемого ими влияния на будущую сварочную ванну.

В заключение следует отметить следующее. Разработан экспериментальный стенд для лазерной стыковой сварки с воздействием ультразвука на сварочную ванну. Проведены исследования вибрационных характеристик ферритной нержавеющей стали 1.4016. Определены оптимальные параметры для создания максимальных механических колебаний в области стыка: частота — 18,6 кГц; амплитуда колебаний — 5 В; позиция пьезоэлектрического шейкера относительно стыка — 15 мм; расположение прижимов относительно стыка — 15 мм. Выяснено, что при сварке применение колебаний сварочной ванны позитивно влияет на образование мелкозернистой структуры или уменьшение размера зерна, приводя к увеличению сопротивляемости деформациям при более низкой микротвердости металла шва. Замечено влияние этих колебаний на степень перемешивания расплава, что подтверждается получением бо-

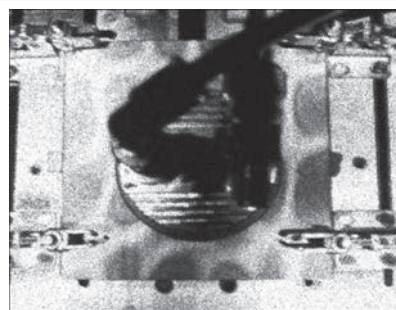


Рис. 5. Зарегистрированные колебания поверхности образца при частоте колебаний пьезошейкера 18,6 кГц, амплитуде 5 В, расстоянии между границей будущего стыка и пьезошейкером 15 мм, расстоянии между границей будущего стыка и позицией центра прижимов 15 мм

лее однородной структуры в сварном шве и равномерным распределением микротвердости в нем.

Результаты можно применить при дальнейших исследованиях по лазерной сварке сталей подобного класса, а также перенести их для дуплексных нержавеющей сталей и мелкозернистых сталей, либо учесть для соединений другого типа и толщины.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках программы «Михаил Ломоносов» (2016–2017).

1. Исследование влияния вибрационных колебаний в процессе сварки на свойства сварных соединений нефтегазового оборудования из стали 12X18H10T / М. З. Зарипов и др. // Нефтегазовое дело. – 2010. – № 2. – С. 1–12.
2. Повышение качества изготовления сварных нефтехимических аппаратов применением вибрационной обработки в процессе сварки / А. Л. Карпов и др. // Башкирский химический журнал. – 2005. – Том 12, № 1. – С. 27–29.
3. Manufacturing technology upgrading of welded sheets of vessels for oil and gas refining / D. V. Karetnikov et al. // Electronic scientific journal «Oil and Gas Business». – 2012. – № 4. – P. 490–500.
4. Герике А., Банасик Р., Хенкель К.-М. Повышения вязкости расплава вибрацией. Отчет DVS. – Научный конгресс в Нюрнберге, 2015.
5. Watanabe T. Improvement of mechanical properties of ferritic stainless steel weld metal by ultrasonic vibration // Journal of Materials Processing Technology. – 2010. – Group 210, Issue 12. – P. 1646–1651.
6. Venkannah S., Mazumder J. Changes in Laser Weld Bead Geometry with the Application of Ultrasonic Vibrations // Proceedings of the World Congress on Engineering. – 2009. – Vol II, WCE 2009, July 1–3, 2009, London, U.K.
7. Venkannah S., Mazumder J. Effects of Ultrasound on the Weld Bead Surface of High Carbon Steel Sheets // Journal of Mechanics Engineering and Automation. – 2011. – Issue 1. – P. 87–99.
8. Оршич А. М. Лазерное преобразование сварки // Наука из первых рук. – 2010. – № 2(32). – С. 18–19.
9. Николаев Г. А. Сварка в машиностроении. Справочник. – Т. 1. – С. 375–376.
10. Банников Е. А., Ковалев Н. А. Сварочные работы. Современное оборудование и технология. – М.: Астрель, 2009. – 448 с.
11. British standart BS EN 10088-1:2005 «Stainless steels — Part 1: List of stainless steels», Standards Policy and Strategy Committee. – 30.06.2005. – 42 p.

В. В. Сомонов

Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого.
195251, м. Санкт-Петербург, вул. Политехнична, 29, РФ.
E-mail: ballak@inbox.ru

ВЛИВ ПАРАМЕТРІВ УЛЬТРАЗВУКОВИХ
МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ НА СТРУКТУРУ
ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛУ ШВА
ПІД ЧАС ЛАЗЕРНОГО ЗВАРЮВАННЯ
ФЕРИТНИХ СТАЛЕЙ

Розглянуто проблеми управління зварювальною ванною при зварюванні феритних нержавіючих сталей. Проведено порівняльний аналіз робіт в області впливу ультразвукових та

вібраційних коливань на зварний шов. Відображено результати попередніх експериментальних та металографічних досліджень з'єднань, виконаних лазерним зварюванням при додатковому впливі ультразвуковими коливаннями на зварювальну ванну. Досліджено вплив позиціонування притискачів та джерела ультразвукових хвиль щодо границі стику на характер коливань, що виникають в ньому. Визначено найбільш сприятливі частоти і амплітуди коливань для генерації коливань у зоні стику. Отримано результати впливу товщини матеріалу на виникаючі в ньому коливання, які можуть вплинути на стабільність і швидкість охолодження зварювальної ванни і, як наслідок, на мікроструктуру металу зварного шва. Бібліогр. 11, табл. 1, рис. 5.

Ключові слова: лазерне зварювання, ультразвукові хвилі, феритні нержавіючі сталі, зварювальна ванна, мікроструктура

Поступила в редакцію 01.11.2016

СВАРКА И РЕЗКА-2017

17-я Международная специализированная выставка

4.04.2017–7.04.2017, Республика Беларусь, г. Минск, проспект Победителей, 20/2
<http://www.minskexpo.com/svarka-i-rezka>

Тематика

- Материалы для сварки, наплавки и пайки
- Оборудование и технологии сварки, резки, наплавки, пайки и термообработки
- Источники питания и системы управления сварочным оборудованием
- Оборудование для орбитальной сварки и обработки труб
- Электронно-лучевая, лазерная, плазменная сварка и резка
- Автоматизированные комплексные системы и агрегаты для сварки и резки
- Автоматизация сварочных производственных и технологических процессов, программное обеспечение
- Приборы для неразрушающего контроля сварных соединений
- Научное и информационное обеспечение сварки
- Система подготовки, переподготовки и аттестации сварщиков
- Охрана труда и экологическая безопасность в сварочном производстве
- Сертификация сварочного оборудования.

Выставка проводится одновременно с международными специализированными выставками «Металлообработка» и «Порошковая металлургия», а также 10-м Международным симпозиумом «ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ: инженерия поверхности, новые композиционные материалы, сварка» (5–7 апреля 2017 г., Институт порошковой металлургии, г. Минск, ул. Платонова, 41, <http://pminstitute.by>).



IX Международная конференция молодых ученых и специалистов «Сварка и родственные технологии WRTYS-2017»

23–26 мая 2017 г.

г. Киев, Украина

Организаторы конференции:

Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины
Международный институт сварки
Представительство Польской академии наук в Киеве
Национальная академия наук Украины
Посольство Франции в Украине
Французский институт в Украине

Детальную информацию можно найти на сайте конференции: <http://wrtys.com.ua>