

ЛАЗЕРНО-АКУСТИЧЕСКАЯ СВАРКА ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 12Х18Н9Т

Горунов Андрей Игоревич

*доктор технических наук,
профессор кафедры лазерных и аддитивных технологий,
Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.И. Туполева – КАИ
Казань, Россия
E-mail: gorunow.andrej@yandex.ru*

Нюхляев Олег Александрович

*аспирант кафедры лазерных и аддитивных технологий,
Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.И. Туполева – КАИ
Казань, Россия
E-mail: 9wikolega@gmail.com*

Гильмутдинов Альберт Харисович

*доктор физико-математических наук,
заведующий кафедрой лазерных и аддитивных технологий,
Казанский национальный исследовательский технический
университет им. А.И. Туполева – КАИ
Казань, Россия
E-mail: albert.gilmutdinov@kai.ru*

Предмет исследования: ультразвуковые колебания в процессах лазерной сварки и наплавки.

Цель исследования: использование ультразвуковых колебаний в процессах лазерной сварки и наплавки.

Объект исследования: структура и свойства сварных соединений в результате воздействий ультразвука на расплав металла.

Методы исследования: для исследования влияния вибраций на соответствующие процессы применяли оптическую и электронную микроскопию, локальный элементный анализ, рентгеновскую томографию и серию испытаний на растяжение.

Основные результаты исследования: показаны возможности использования ультразвуковых колебаний в процессах лазерной сварки труб из стали 12Х18Н9Т. Показано, что ультразвуковые колебания могут быть использованы двумя способами: ультразвуковая оперативная обработка при сварке и наплавке и постобработка готового сварного шва и наплавленного металла. Ультразвуковое воздействие приводит к уменьшению толщины сварного шва и увеличению глубины провара, а также к увеличению предела прочности на разрыв наплавленного материала до 1,3 раза. Показано, что эффект обусловлен образованием ориентированных тонкопластинчатой структуры на поверхности образцов.

Ключевые слова: лазерная сварка, наплавка, прочность, твердость, механические свойства, сварной шов, микроструктура, состав, ультразвук, колебания.

LASER-ACOUSTIC WELDING OF SPECIMENS OF STEEL 12CR18N9T

Andrey I. Gorunov

*Doctor of Technical Sciences,
Professor of the Department of Laser and Additive Technologies,
Kazan National Research Technical
University named after A.I. Tupolev – KAI
Kazan, Russia
E-mail: gorunow.andrej@yandex.ru*

Oleg A. Nyukhlyaev

*postgraduate student of the Department
of Laser and Additive Technologies,
Kazan National Research Technical
University named after A.I. Tupolev – KAI
Kazan, Russia
E-mail: 9wikolega@gmail.com*

Albert Kh. Gilmudinov

*Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Head of the Department of Laser and Additive Technologies,
Kazan National Research Technical
University named after A.I. Tupolev – KAI
Kazan, Russia
E-mail: albert.gilmudinov@kai.ru*

Subject of research: ultrasonic vibrations in the processes of laser welding and surfacing.

Purpose of research: the use of ultrasonic vibrations in the processes of laser welding and surfacing.

Object of research: the structure and properties of welded joints as a result of the effects of ultrasound on a metal melt.

Methods of research: optical and electron microscopy, local elemental analysis, X-ray tomography, and a series of tensile tests were used to study the influence of vibrations on the corresponding processes

Main results of research: the possibilities of using ultrasonic vibrations in the processes of laser welding and surfacing are shown. It is shown that ultrasonic vibrations can be used in two ways: ultrasonic operational processing during welding and surfacing and post-processing of the finished weld and deposited metal. Ultrasonic action leads to a decrease in the thickness of the weld and an increase in the depth of penetration and, leads to an increase in the tensile strength of the deposited material up to 1.3 times. It is shown that the effect is due to the formation of oriented thin-lamellar structures on the surface of the samples.

Keywords: laser welding, guidance, strength, hardness, mechanical properties, weld, microstructure, composition, ultrasound, vibrations

Введение

Лазерная сварка – это современный метод создания неразъемных соединений, в котором используются мощные лазеры для локального плавления и соединения металлических пластин в большие конструкции без использования присадочного материала. Кроме того, при лазерной сварке индуцируется более низкое тепловложение, что приводит к меньшим зонам термического влияния, меньшим термическим искажениям и начальным остаточным напря-

жениям по сравнению с традиционными методами сварки. Формирование сварного шва в процессе лазерной сварки осуществляется в условиях высокоскоростного нагрева и охлаждения, которые достигаются в узкой зоне локального взаимодействия лазерного луча с металлом. В данной связи в процессе затвердевания расплавленного металла в зоне сварного шва фазовые и структурные превращения протекают специфическим образом. При этом также необходимо учитывать, что металл в зоне сварного шва начинает затвердевать из твердого состояния. Таким образом, в сварочной зоне протекают одновременно процессы диффузии и кристаллизации. Указанные условия могут приводить к образованию дефектов в виде трещин и пор. При этом лазерная сварка крупногабаритных труб имеет дополнительные трудности в связи с неравномерностью теплоотвода с внутренней и наружной части трубы. Нержавеющая сталь имеет преимущество перед высокопрочными углеродистыми сталями благодаря повышенному низкому содержанию углерода и легирующих элементов. Благодаря низкому содержанию углерода данная сталь имеет повышенные коррозионные свойства. Такие свойства позволили данной стали хорошо зарекомендовать себя для изготовления насосно-компрессорных труб. Известно, что в доэвтектоидной стали в результате кристаллизации происходит образование Видманштеттова феррита, и на границах аустенитных зерен в результате быстрого охлаждения сварочной ванны могут образовываться игольчатый мартенсит и верхний бейнит [5, 6]. Грубые и крупные пластины феррита и дефекты на границах зерен могут в значительной степени снижать механические характеристики сварного соединения. Также известно, что ультразвук оказывает положительное влияние на микроструктуру металла в процессе его кристаллизации за счет кавитационных эффектов, возникающих в жидком расплаве [7, 8]. Однако эффекты, возникающие в процессе лазерной сварки с применением акустических колебаний, на сегодняшний день изучены достаточно слабо. Таким образом, в настоящей работе предложена технология лазерной сварки труб из стали 12X18H9T с применением акустических колебаний.

Результаты и обсуждение

Исследовали образцы из стали 12X18H9T, имеющие размеры 100x10x3 мм. Во всех экспериментах использовалась роботизированная установка лазерной сварки, оснащенная волоконным лазером IPG Photonics (США) и роботом KUKA (Германия). Сварка осуществлялась волоконным лазером мощностью до 20 кВт и длиной волны излучения 1064 нм. На рисунке 1 показано изображение экспериментальной установки с указанием ориентации лазерного луча относительно оси симметрии свариваемых труб и ориентации ультразвукового волновода относительно свариваемой детали.

Акустическая система предназначена для контактного воздействия ультразвуковых колебаний высокой интенсивности на различные физические объекты с целью изменения свойств или структуры поверхности, или внутренних слоев. Акустическая система в составе: электронный генератор с автоматической подстройкой резонансной частоты и стабилизацией установленной амплитуды колебаний, регулятором мощности и таймером, пьезоэлектрическая колебательная система с монтажным фланцем и рабочий инструмент (сонотрод) в виде усеченного конуса.

В таблице 1 показан химический состав стали, в таблице 2 – используемые параметры сварки.

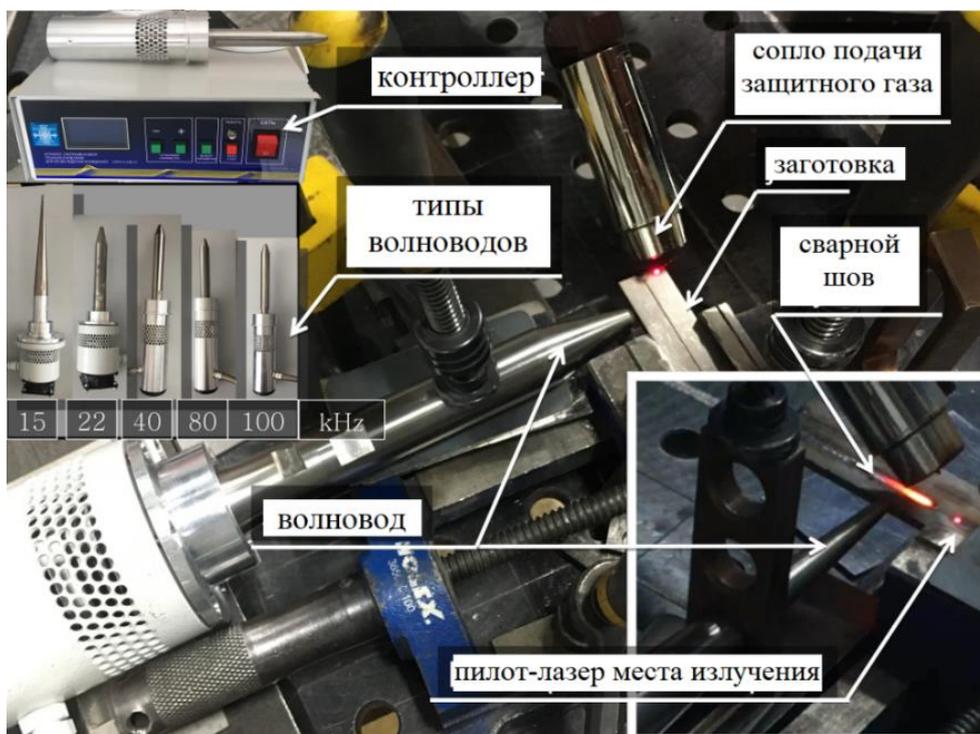


Рисунок 1 – Экспериментальная установка для лазерно-акустической сварки

Таблица 1

Химический состав стали 12X18H9T, %

Содержание элементов, % масс.								
C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	Fe
0.12	0.8	2	10	до 0.02	до 0.035	18	до 0.3	Остаток

Таблица 2

Параметры лазерной сварки стали 12X18H9T

Режим лазерной сварки	Значение параметров
Скорость сварки, мм/с	11
Мощность лазера, кВт	0.5
Расход защитного газа (аргона), л/мин	25
Угол наклона лазерного луча относительно поверхности металла, °	90
Шероховатость свариваемых поверхностей, Ra, мкм	2
Мощность акустического источника, кВт	1.5
Частота акустических колебаний, кГц	15, 22, 40, 80, 100

После сварки поверхности образцов шлифовали, а затем полировали. Химическое травление шлифов проводили следующей смесью: HF – 15 см³, HNO₃ – 35 см³, H₂O – 200 см³, глицерин – 100 см³. Для измерения микротвердости и исследования структуры поверхности образцов использовали твердомер Tukon 2500 (Германия). Во всех экспериментах в качестве защитного газа использовался аргон при расходе 25 л/мин. Сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) и элементный анализ проводили на рабочей станции Auriga Cross Beam (Carl Zeiss, Германия). Томографические снимки получены на промышленной рентгеновской системе North Star Imaging X5000 (США). Результаты исследования показали увеличение механических характеристик сварного соединения за счет термообработки и воздействиями ультразвуковыми колебаниями. Таким образом, на микрофотографиях можно видеть, что в процессе формирования наплавочного валика в нижней части наблюдается сужение, и валик вытягивается (рисунок 2).

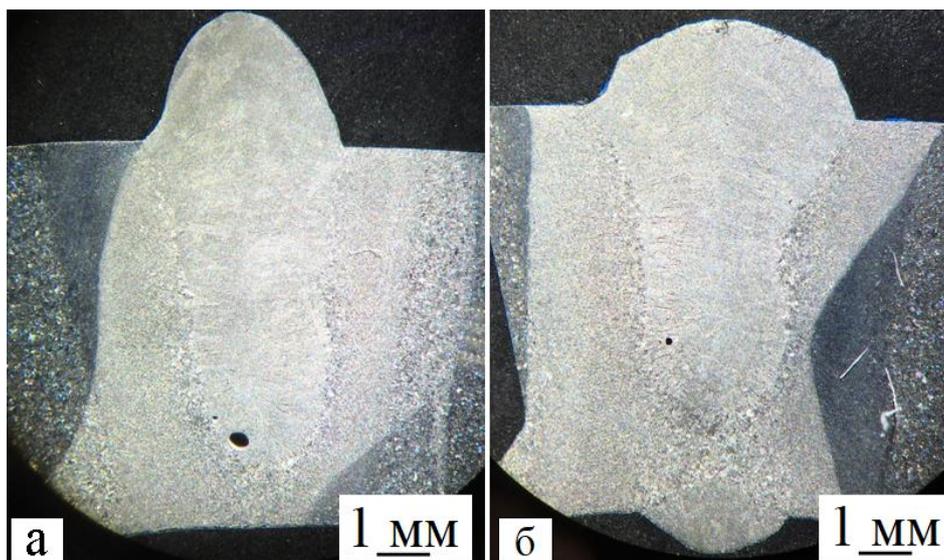


Рисунок 2 – Микрофотографии поперечного сечения наплавленного металла проволоки: а – наплавленный металл проволоки без ультразвуковой обработки, б – наплавленный металл проволоки с ультразвуковой обработкой

Данный эффект вызван ультразвуковыми колебаниями, которые оказывают значительное влияние при увеличении их частоты с 15 до 22 кГц. При этом достигается вытягивание сварочной ванны на всю глубину свариваемой заготовки при тех же параметрах сварки. Ширина сварочной ванны снижается в 1,2 раза (рисунок 2). На рисунке 3 представлен единственный валик наплавленного металла проволоки, полученный при изготовлении компактных образцов прямым лазерным выращиванием из проволоки.

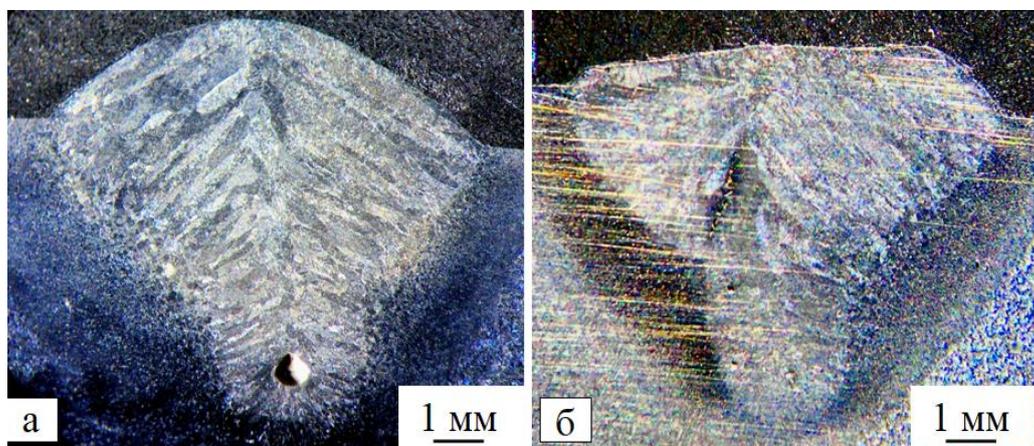


Рисунок 3 – Микрофотографии поперечного сечения наплавленного металла: а – наплавленный металл без ультразвуковой обработки, б – наплавленный металл с ультразвуковой обработкой

Микроструктура представляет собой зерна феррита и перлита. При этом обнаруживаются на поверхности сварного шва небольшие участки мартенсита и верхнего бейнита. Предел прочности образцов без ультразвуковой обработки остается соответствующим основному металлу, так как при растяжении разрушение происходит по основному металлу. Однако, как можно видеть в таблице 3, свойства образцов, полученных с применением ультразвуковых колебаний, выше на 100 МПа.

Механические характеристики образцов
с ультразвуковой обработкой и без ультразвуковой обработки

Метод сварки	Параметры образцов и механические свойства			
	Ширина (мм)	Толщина (мм)	Максимальная нагрузка (кН)	Предел прочности (МПа)
Без уз обработки	7,70	2,02	9,768	527,998
Ультразвуковая обработка	8,75	2,02	11,961	628,704
Влияние ультразвуковой обработки на свойства наплавленного металла 12Х18Н9Т				
Увеличение прочности	16 %			

На рисунке 4 изображена диаграмма растяжения 2 компактных образцов материалов, изготовленных прямым лазерным выращиванием из проволоки, в координатах напряжение – деформация.

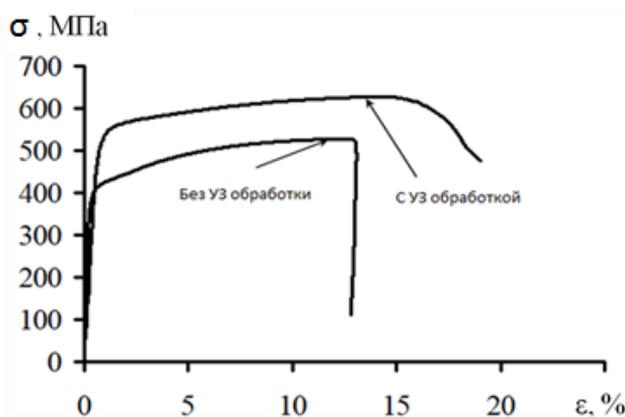


Рисунок 4 – Диаграмма растяжения четырех компактных образцов материалов, изготовленных прямым лазерным выращиванием из проволоки

Как можно видеть из рисунка 4, предел прочности и пластичность образцов, полученных с применением ультразвуковой обработки, повышаются практически в 1,5 раза. В данном случае такой эффект можно объяснить ориентированной структурой в поверхностных слоях полученных образцов. Тонкая, пластинчатая структура формируется в результате ультразвукового ударного воздействия (рисунок 5).

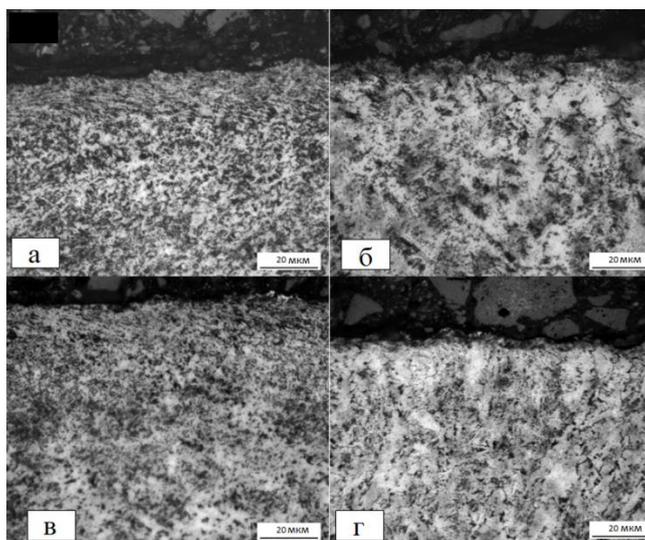


Рисунок 5 – Микроструктура наплавленного металла образцов: а, б – с ультразвуковой обработкой; в, г – без ультразвуковой обработки

На рисунке 6 представлена фрактография разрушения компактных образцов полученных методом прямого лазерного нанесения проволоки с одновременным ультразвуковым воздействием.

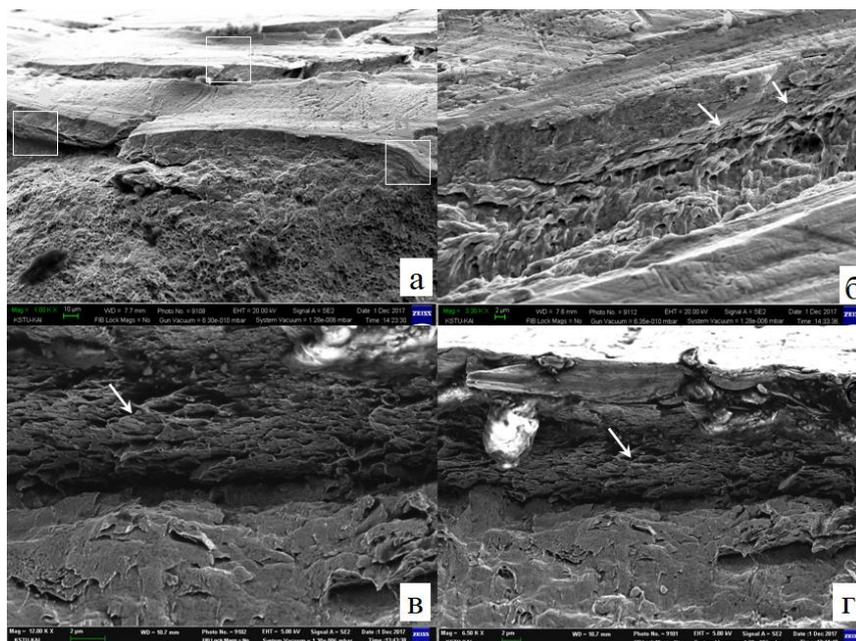


Рисунок 6 – Характерные участки разрушения

Стрелками показаны тонкие пластины в приповерхностных слоях разрушенных образцов. Можно видеть, что ультразвуковая обработка образцов позволила сформировать в поверхности образцов слой толщиной 50 мкм, который оказывает значительное сопротивление разрушению. В данном случае ультразвуковая обработка способствовала заданию ориентировки зерен. Поэтому необходимо учитывать направление приложения растягивающей нагрузки и осуществлять ультразвуковую обработку целенаправленно для заданной ориентации зерен в металле либо по различным направлениям одновременно.

Заключение и выводы

1. Показано, что воздействие ультразвуковой обработки в процессе лазерной сварки с проволокой в направлении параллельном поверхности подложки позволяет сузить сварочную ванну и осуществить проплав на всю глубину свариваемой заготовки.

2. Показаны возможности лазерной сварки толстых труб с использованием присадочной проволоки. Ультразвуковые колебания, воздействующие параллельно поверхности подложки в процессе сварки, позволяют сузить сварочную ванну и выполнить сквозное проплавление свариваемой детали. Ультразвуковая обработка наплавленного материала в направлении, перпендикулярном поверхности подложки, позволяет получить упрочненный поверхностный слой с пластинчатой структурой, способствующей сопротивлению разрушению при приложении статической растягивающей нагрузки к образцам, полученным методом прямого лазерного нанесения проволоки.

Литература

1. Gardner L., Laser-welded stainless steel I-sections: Residual stress measurements and column buckling tests/Gardner L., Bu Y., Theofanous M. // *Engineering Structures* – V. 127. – 2016. – P. 536–548.
2. Bu Y., Local stability of laser-welded stainless steel I-sections in bending/ Bu Y., Gardner L. // *Journal of Constructional Steel Research* – V. 148. – 2018. – P. 49–64.
3. Bu Y., Gardner L., Laser-welded stainless steel I-section beam-columns: Testing, simulation and design/Bu Y., Gardner L. // *Engineering Structures* – V. 179. – 2019. – P. 23–36.

4. Kolubaev Weld structure of low-carbon structural steel formed by ultrasonic-assisted laser welding / Kolubaev A. V., Sizova O. V., Fortuna S. V., Vorontsov A. V., Ivanov A. N., Kolubaev E. A. // Journal of Constructional Steel Research – V. 172. – 2020. – 106190. – DOI:10.1016/j.jcsr.2020.106190
5. Farabi N., Fatigue properties of laser welded dual-phase steel joints/Farabi N., Chen D.L., Zhou Y.//Procedia Engineering – V. 2. – 2010. – P. 835–843.
6. Xu W., Tensile and fatigue properties of fiber laser welded high strength low alloy and DP980 dual-phase steel joints / Xu W., Westerbaan D., Nayak S.S., Chen D.L., Goodwin F., Zhou Y. // Materials and Design – V. 43. – 2013. – P. 373–383
7. Jose M. J. Vibration assisted welding processes and their influence on quality of welds / Jose M. J., Kumar S. S., Sharma A. // Science and Technology of Welding and Joining – V. 21. – 2016. – P. 243–258.
8. Пархимович, Э. М. Сварка и наплавка в ультразвуковом поле / Э. М. Пархимович. – М. : Наука и техника. – 1988. – 207 с. – Текст : непосредственный.