

УДК 629.7+621.791

ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ ТОНКИХ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

© 2014 В.Г. Смелов, А.В. Сотов, М.В. Львов

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

В статье рассмотрена методика оптимизации технологического процесса лазерной сварки малых толщин конструкций авиационно-космической техники. Суть методики заключается в многовариантном итерационном выборе технологических параметров. Использование данной методики позволяет существенно уменьшить время технологической подготовки производства, а также долю экспериментальных исследований. Экспериментальным подтверждением стало проведение работ по лазерной сварке встык деталей малых толщин 0,12 мм, материал свариваемых образцов - сплав на никелевой основе. Были проведены работы по определению химического состава сплава образцов, моделированию и разработки специального приспособления для сварки изделий. Лазерная сварка проводилась на технологической установке, включающей в себя импульсный твёрдотельный лазер на YAG:Nd с длиной волны излучения 1,06 мкм. На основании разработанной методики оптимизации были подобраны параметры технологического процесса сварки. По результатам работы определялось качество сварного соединения образцов с помощью металлографического исследования сварного шва, также были выполнены испытания механических свойств стыкового сварного соединения образцов, определялся предел прочности при растяжении. Разработанная методика оптимизации технологического процесса лазерной сварки деталей малых толщин позволяла добиться высокого качества сварного соединения, не содержащего дефектов в поверхностном слое.

Лазерная сварка, сварка встык, детали малой толщины, оптимизация параметров сварки.

Технология лазерной сварки доказала своё соответствие жёстким требованиям аэрокосмической промышленности в области качества и стабильности, и предстала в качестве привлекательной альтернативы для таких более традиционных способов сварки, как пайка, точечная контактная сварка, газовольфрамовая и электронно-лучевая сварка. Благодаря судам коммерческой авиации нового поколения, сконструированным российскими производителями, главными требованиями клиентов стали менее шумные, топливосберегающие суда, не оказывающие отрицательного воздействия на окружающую среду. Изготовители воздушных судов также обеспокоены влиянием их производственных процессов на окружающую среду и хотят снизить его посредством применения технологий с минимальной затратой энергии и максимально эффективными материалами.

Одним из способов достижения данных задач и создания более экономичных

судов является использование конструкций, снижающих массу воздушного судна. Использование лазерных технологий позволяет решить эту задачу [1].

До применения лазера считалось, что металлический шов непригоден для самолётов — слишком слабый и легко разрушаемый. Его требовалось укреплять клёпкой, что сильно снижало такую характеристику, как обтекаемость. Лазер же позволяет значительно уменьшить общий вес конструкции, а главное получить высококачественный прочный шов.

Геометрия шва или размеры литой зоны (диаметр и глубина проплавления) определяют прочность соединения. Эти параметры зависят от плотности мощности излучения, времени длительности импульса и диаметра сфокусированного луча на поверхности свариваемых деталей. Для подбора оптимальных режимов лазерной сварки конструкций малых толщин была разработана методика.

На этапе оценки начального состояния поверхностей необходимо определить свариваемость сталей, характеризующую качество сварного шва. Обобщённо под свариваемостью понимают возможность получения на данной стали сварного соединения с высокими свойствами, не уступающими свойствам основного свариваемого металла и высокого качества — отсутствия различного рода сварочных дефектов (пор, трещин, шлаковин и др.). Ухудшение свариваемости стали вызывает образование горячих трещин при сварке и холодных трещин в сварных соединениях, сильный рост зерна в околошовной зоне, с образованием в зоне теплового влияния мартенсита или бейнита полностью или частично с высокой хрупкостью, значительно превышающей хрупкость свариваемой стали; образование разупрочнённых участков в зоне теплового влияния; возникновение в зоне нагрева участков, склонных к дисперсионному упрочнению, либо сразу после сварки, либо со временем; возникновение высоких остаточных напряжений и деформаций.

С использованием разработанной методики был проведён подбор параметров технологического процесса. При относительно низких плотностях мощности $10^5 \dots 10^6$ Вт/см² и длительностях импульса излучения $10^{-3} \dots 10^{-2}$ с передача тепла в глубь свариваемых материалов осуществляется в основном по механизму теплопроводности. Как ванна расплава, так и зона проплавления после затвердевания в этом случае имеют форму, близкую к сферической. Выбор соответствующих значений длительности импульса и плотности мощности даёт возможность достаточно точно регулировать глубину проплавления и осуществлять сварку тонкостенных изделий [2].

Длительность импульса излучения определяет время, в течение которого происходит воздействие излучения на свариваемый материал. Для стали оптимальный диапазон длительности импульса лазерного излучения составляет $5 \cdot 10^{-3} \leq \tau \leq 8 \cdot 10^{-3}$ с. После подбора соответствующих

параметров производится операция лазерной сварки.

Экспериментальным подтверждением разработанной методики было проведение работ по импульсной лазерной сварке пластин малых толщин (0,12 мм). Материал свариваемых образцов - сплав на никелевой основе. Химический состав сплава представлен в табл. 1.

Таблица 1 - Химический состав сплава

Химический элемент	Массовая доля элемента, %
Никель	основа
Марганец	34,0-37,0
Хром	17,0-20,0
Бор	0,1-0,2
Кобальт	8,0-10,0

Анализ химического состава показал, что влияние марганца на свариваемость связано главным образом с повышением склонности к появлению элементов закалочных структур в зоне теплового влияния, повышением хрупкости в этих участках и вероятностью появления холодных трещин. Увеличение склонности к образованию структур закалки увеличивает также эффект изменения объёма в зоне теплового влияния после сварки. Наличие никеля в сплаве измельчает зёрна, повышает пластичность сталей, не ухудшает их свариваемость [3].

Следующим этапом было моделирование и разработка специального приспособления для сварки образцов встык. Приспособление состоит из следующих элементов, показанных на рис. 1: разъёмное основание 1а, 1б и опорные пластины 2, закреплённые винтами 3.

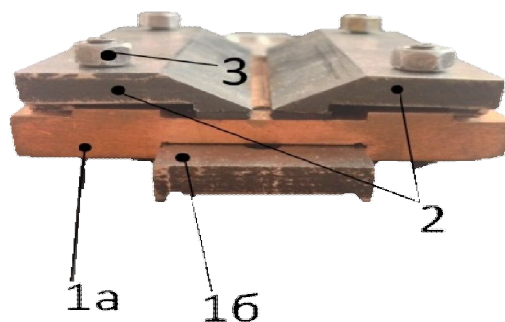


Рис. 1. Приспособление для сварки изделий встык

На основании приспособления располагаются опорные детали, упоры и опоры, определяющие положение устанавливаемых изделий. Основание обеспечивает точность расположения установленных деталей, отсутствие смещений и вибраций, а также воспринимает все усилия, возникающие в процессе сварки.

Опорные пластины подводятся к установленной детали, тем самым придавая изделиям дополнительную жёсткость и устойчивость. Свариваемое изделие фиксируется в приспособлении в упорах. В качестве упоров, размещаемых по контуру монтируемой детали, используются рёбра. Для рациональности упор одновременно является опорной базой.

После этапа проектирования оснастки была произведена лазерная сварка образцов на технологической установке, включающей в себя импульсный твёрдотельный лазер на YAG: Nd с длиной волны излучения 1,06 мкм, длительность импульса излучения от 0,2 до 20 мс, частота следования импульсов излучения от 1 до 20 Гц, диаметр сфокусированного пучка от 0,2 до 2 мм.

Получение сварного соединения высокого качества требует правильного подбора режима сварки. Под режимом лазерной сварки понимают определённое сочетание таких характеристик лазерной установки, как плотность мощности импульса, длительность импульса и диаметр пучка. На основании разработанного алгоритма были подобраны параметры технологического процесса сварки. При сварке образцов использовали длительность импульса по значениям, близким к верхнему пределу, что благоприятно влияет на качество сварного соединения. Диаметр сфокусированного излучения выбирался из диапазона от 0,05 до 1,0 мм. Форма импульса трапецеидальная с крутым передним и пологим задним фронтом [4-6].

При сварке образцов в местах, где образовался прожог сварного шва, был увеличен диаметр излучения. Результат лазерной сварки встык образцов (с прожогом и без прожога) представлен на рис. 2.

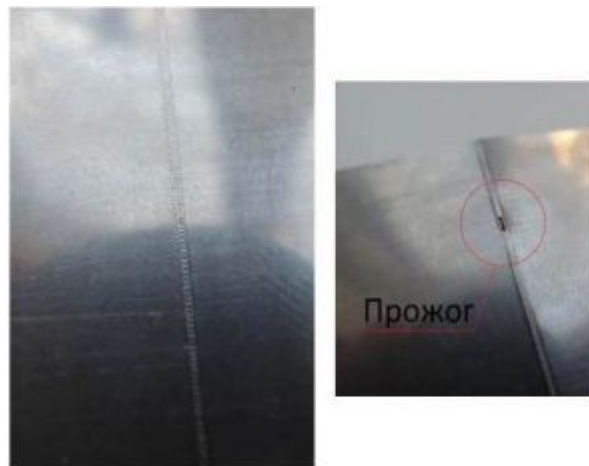


Рис.2. Сварной шов образцов пластин малой толщины

Один из главных критериев качества сварного шва – это прочность соединения. Прочность непосредственно связана с расположением шва относительно стыка свариваемых поверхностей, со структурой шва и околошовной зоны, с размерами поперечного сечения шва. Качество полученного сварного соединения определяется двумя основными характеристиками:

- геометрия сварного шва (высота выпуклости, ширина шва и зона термического влияния);
- отсутствие или наличие дефектов в соединении.

Для определения качества сварного соединения пластин было произведено металлографическое исследование сварного шва. Внешний осмотр образца показал, что перекрытие сварных точек составляет 20-60 %. Ширина сварного шва на лицевой стороне 0,45-0,5 мм. Формирование сварного соединения с лицевой и обратной стороны показано на рис.3.

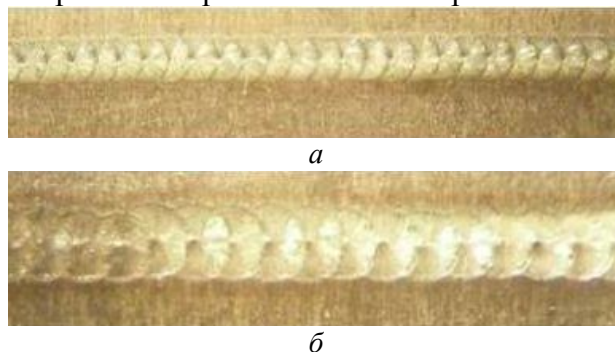


Рис. 3. Формирование сварного шва:
а) лицевая сторона, ~ ×10;
б) обратная сторона, ~ ×20

Результаты металлографического исследования продольных и поперечных шлифов показали, что суммарное местное занижение сварного шва 0,02 мм, минимальная толщина в зоне шва 0,09 мм, ширина литой зоны сварного шва 0,23 мм, смещение сваренных кромок 0,04 мм, высота проплавления 0,01 мм. Все полученные размеры полностью удовлетворяют техническим требованиям к сварным соединениям пластин малой толщины.

Механические свойства стыковых сварных швов пластин должны обеспечить её прочность. Исходя из технической требований к сварному соединению, установлен предел прочности на растяжение не ниже 30 кгс/мм². Проверка механических свойств проводилась на контрольных образцах после процесса импульсной лазерной сварки.

Результаты испытаний механических свойств стыкового сварного шва образцов пластин толщиной 0,12 мм сведены в табл.2.

Таблица 2 – Результаты испытаний механических свойств сварного шва

№ образца	Предел прочности при растяжении, кгс/мм ²	По требованиям, кгс/мм ²
1	80,0	≥30
2	83,3	
3	83,3	

Анализ полученных результатов показал, что качество сварки на исследованных образцах соответствует техническим

требованиям по высоте проплавления, минимальной толщине в зоне шва, смещению сваренных кромок по толщине ленты, смещению сваренных отрезков ленты по торцам.

По результатам проведённой работы можно сделать следующие выводы:

1. Разработана методика оптимизации технологического процесса лазерной сварки малых толщин конструкций авиационно-космической техники. Экспериментальным подтверждением разработанной методики стало проведение работ по лазерной сварке встык пластин малых толщин 0,12 мм.

2. По результатам металлографического исследования качество сварки определено как удовлетворяющее техническим требованиям.

3. Сварной шов не содержит дефектов и отвечает требованиям механических свойств стыкового сварного шва.

Таким образом, импульсная лазерная сварка малых толщин конструкций авиационно-космической техники позволяет получать высококачественные сварные соединения, что позволит применять облегчённые конструкции для уменьшения массы самолёта.

Работы проводились на оборудовании ЦКП САМ-технологий в рамках проекта № RFMEFI59314X0003.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (Минобрнауки) на основании постановления №218 от 09.04.2010 (шифр темы 2013-218-04-4777).

Библиографический список

1. Терри ВандерВерт Перспективы лазерной сварки в Российской промышленности - обеспечение наиболее эффективного производственного процесса // Комплект: ИТО. Инструмент, Технология, Оборудование. 2013. № 3. С. 50-53.

2. Григорьянц А.Г. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. по-

собие для вузов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 665 с.

3. Профессиональный портал «Сварка. Резка. Металлообработка. <http://www.autowelding.ru>

4. Сотов А.В., Смелов В.Г. Импульсная лазерная наплавка лопаток газотурбинных двигателей // Известия Самарского науч-

ного центра РАН. 2013. Т. 15, № 6(4). С. 973-977.

5. Дёмичев С.Ф., Рясный А.В., Усольцев А.Л. Основные способы сварки и их применение при изготовлении узлов летательных аппаратов и их двигателей: учеб. пособие. Самара: Самарский государственный аэрокосмический ун-т, 2007. 76 с.

6. Мурзин С.П., Артюшина В.И. Формирование сварного соединения импульсным лазерным излучением с регулируем

ым пространственным распределением мощности // Известия Самарского научного центра РАН. 2006. Т. 8, № 2. С. 441-444.

7. Dong W., Kokawa H., Tsukamoto S., Sato Y.S, Ogawa M. Mechanism Governing Nitrogen Absorption by Steel Weld Metal during Laser Welding // Metallurgical and Materials Transactions B. 2004. V. 35, no. 2. P. 331-338.

Информация об авторах

Смелов Виталий Геннадиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: pdla_smelov@mail.ru. Область научных интересов: использование аддитивных технологий в изготовлении деталей.

Сотов Антон Владимирович, инженер, аспирант кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмиче

ский университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: SotovAnton@yandex.ru. Область научных интересов: использование аддитивных технологий в изготовлении деталей.

Львов Михаил Владимирович, студент, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: mikesamara93@gmail.com. Область научных интересов: использование аддитивных технологий в изготовлении деталей.

PECULIARITIES OF LASER WELDING OF THIN PARTS OF AEROSPACE EQUIPMENT

© 2014 V.G. Smelov, A.V. Sotov, M.V. L'vov

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

In this paper, the laser welding methodology technological process optimization of shallow thickness aerospace constructions was considered. The methodology consists in selecting of multivariate iterative process parameters. Using this methodology can significantly reduce the technological preparation time of production and the proportion of experimental research. Experimental confirmation was work on laser butt welding parts for shallow thicknesses, material welded samples - nickel-based alloys. Work was carried out to determine the chemical composition of the alloy samples, modeling and development of a special device for welding products. Laser welding is carried out on the process plant includes a pulsed solid-state laser YAG:Nd with a wavelength of 1,06 microns. On the basis of the developed method of optimization parameters were selected welding process. According to the results of work defines the quality of the welded joint specimens using metallographic examination of the weld, and testing of mechanical properties of butt weld specimens were performed, the tensile strength was determined. The developed method of process optimization of laser welding of parts of small thickness allows for high quality welds free of defects in the surface layer.

Laser welding, butt weld, constructions of shallow thickness, optimization of welding parameters.

References

1. Terri VanderVert Prospects for laser welding in the Russian industry - to ensure the most efficient production process // *Complete: Tools, Technology, Equipment*. 2013. No. 3. P. 50-53. (In Russ.)
2. Grigoryants A.G. Tehnologicheskie protsessy ilazernoy obrabotki: uchebnoe posobie dlya vuzov [Technological processes of laser processing: textbook for high schools]. Moscow: Bauman Moscow St. Tech. University Publ., 2006. P. 665.
3. Professional'nyy portal «Svarka. Reзка. Metalloobrabotka». <http://www.autowelding.ru>.
4. Sotov A.V., Smelov V.G. Impulse laser build-up welding blades of gas turbine engines // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2013. V. 15, no. 6(4). P. 973-977. (In Russ.)
5. Dyomichev S.F. Osnovnyie sposoby svarki i ih primenenie pri izgotovlenii uzlov letatelnyih apparatov I ih dvigateley: uchebnoe posobie dlya vuzov [Basic welding techniques and their application in the manufacture of aircraft components and their engines: textbook for high schools]. Samara: Samara State Aerospace University Publ., 2007. 76 p.
6. Murzin S.P., Artyushina V.I. Formation of welded connection by pulse laser radiation with adjustable spatial distribution of capacity // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2006. V. 8, no. 2. P. 441-444. (In Russ.)
7. Dong W., Kokawa H., Tsukamoto S., Sato Y.S, Ogawa M. Mechanism Governing Nitrogen Absorption by Steel Weld Metal during Laser Welding // *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2004. V. 35, no. 2. P. 331-338

About the authors

Smelov Vitaly Gennadievich, Candidate of Science (Engineering), Associate Professor of Aircraft Engine Production Department, Samara State Aerospace University. E-mail: pdla_smelov@mail.ru. Area of Research: the use of additive technology in the manufacture of components.

Sotov Anton Vladimirovich, Post-graduate student, Engineer of Aircraft Engine Production Department, Samara State Aero-

space University. E-mail: SotovAnton@yandex.ru. Area of Research: the use of additive technology in the manufacture of components.

L'vov Mihail Vladimirovich, student of aircraft engine faculty, Samara State Aerospace University. E-mail: mikesamara93@gmail.com. Area of Research: the use of additive technology in the manufacture of components.