

ИМПУЛЬСНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СВАРКА ЭЛЕМЕНТОВ ИЗДЕЛИЙ, СОДЕРЖАЩИХ ГИДРИДООБРАЗУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

Н. Ю. Дьянов, И. Л. Малков, Н. Т. Казаковский

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров Нижегородской обл.

Введение

Одной из важнейших задач при создании сборок (с использованием сварки), содержащих чувствительные к тепловому воздействию материалы (гидридообразующие и легковоспламеняющиеся материалы, взрывчатые вещества), является обеспечение в процессе сварки минимальной температуры нагрева в зоне расположения данных материалов и всего изделия в целом с целью предотвращения возможного возгорания или разложения термически-нестойкого материала. Для этого приходится применять специальные теплоотводящие конструкции, компенсационные вставки, что вызывает усложнение конструкции и увеличение ее массогабаритных характеристик.

Для обеспечения минимальной температуры нагрева при сварке необходимо уменьшить тепловложения и использовать источники с высокой плотностью мощности. Такими возможностями обладает электронно-лучевая (ЭЛС) и лазерная сварка. Они обеспечивают герметичность и высокое качество сварного шва. ЭЛС выдает непрерывный «луч», в то же время импульсная лазерная сварка позволяет делать сварные точки с заданной частотой. При этом формирование герметичного сварного шва происходит путем перекрытия сварных точек с коэффициентом перекрытия более 0,55 [1]. За счет изменения частоты следования лазерных импульсов, мы можем влиять на поступление энергии в единицу времени, без ущерба качеству сварного шва. Тем самым обеспечивается необходимая скорость отдачи излишнего тепла в окружающее пространство.

Целью данной работы являлась проработка технической возможности применения импульсной лазерной сварки для герметизации узлов, содержащих чувствительные к тепловому воздействию материалы (в нашем случае гидриды и гидридообразующие материалы [2]).

1. Методика исследований

В работе представлены результаты измерений температуры цилиндрической сборки (макета) из стали 12Х18Н10Т во время сварки импульсным лазером на расстоянии от 2 до 10 мм от сварного шва (рис. 1). Рассмотрено влияние основных параметров режима лазерной сварки на температуру нагрева в исследуемой области. Сварке подвергались крышка и корпус макета. По-

лученные сварные соединения испытывались на герметичность, проводились металлографические исследования и испытания на несущую способность.

Сварка проводилась на установке PiccoLaser – 40. Данная установка укомплектована твердотельным импульсным лазером (длина волны 1,064 мкм). Детали перед сваркой отжигались (температура отжига – 1075 °С, время отжига – 1 час). Поверхности деталей зачищались наждачной бумагой зернистостью 320 и обезжиривались этиловым спиртом. Сварка проводилась в токе инертного газа (аргон) с коэффициентом перекрытия сварных точек более 0,55.

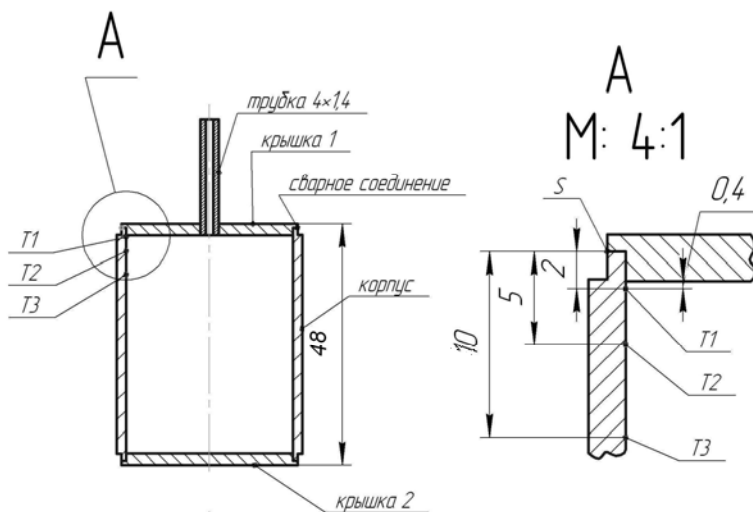


Рис. 1. Схема расположения термопар на макете: T1, T2 и T3 - термопары, приваренные на расстоянии 2, 5 и 10 мм от торца корпуса соответственно

Сварка проводилась в режимах I и IV (см. табл. 1), выбранных по результатам предварительных исследований.

Таблица 1

Параметры режимов лазерной сварки макетов

Режим сварки	U , %	τ , мс	d , мм	f , Гц
I	55	8	0,6	1,2
IV	60	20	0,6	1,2

Примечание. U – масштабирование максимального напряжения накопителя; τ – длительность импульса лазерного излучения; d – диаметр сфокусированного луча лазера (d) – 0,2–2,0 мм; f – частота повторения импульсов излучения.

1.1. Методика измерения температуры

Измерение температуры на внутренней поверхности макета (рис. 1) во время сварки проходило в два этапа:

1. Определение максимально возможной температуры в процессе сварки. Проводится на внутренней поверхности макета в квазистационарном состоянии [1], реализуемым при длительном воздействии лазерного излучения, при котором измеряемая на определенном расстоянии от места действия ла-

зерного излучения температура достигает максимума и остается практически постоянной;

2. Измерение температуры корпуса во время сварки макета.

Измерение температуры осуществлялось термопарами (хромель-алюмель диаметром 0,1 мм), приваренными к внутренней поверхности корпуса макета (рис. 1). Регистрация температуры проходила в автоматическом режиме. Обработка и запись данных осуществлялась посредством персонального компьютера (ПК).

1.2. Методика оценки качества сварных соединений

Качество сварных соединений макетов оценивалось по результатам испытаний на герметичность, прочность и металлографических исследований [3].

Герметичность сварных соединений определялась методом обдувки гелием при остаточном давлении во внутренней полости макетов не более 10^{-2} мбар. Контроль герметичности макетов проводился прибором ТИ1-14М при чувствительности $7 \cdot 10^{-12}$ м³ Па/с.

На несущую способность макеты испытывались на установке высокого давления путем подачи во внутреннюю полость макета, помещенного в ёмкость с водой, давления азота со скоростью ~ 50 кгс/см² в минуту до момента разрушения одного из сварных швов.

Металлографические исследования сварных соединений макетов проводилось в продольном сечении, проходящем через центральную ось. Шлифы сварных швов приготавливались на установке Phoenix 4000. Структура сварного соединения выявлялась путем травления шлифов в горячем реактиве Круппа. Изучение макро- и микроструктуры сварных соединений проводилось на микроскопах Nikon SMZ1500 и Axiovert 25.

2. Результаты исследований и их обсуждение

2.1 Измерение температуры в квазистационарном равновесии

При измерении температуры на внутренней поверхности корпуса макета в квазистационарном состоянии лазерное излучение воздействовало на место контакта крышки 1 и корпуса в точке S (см. рис. 1), расположенной на одной прямой с термопарами Т1, Т2, Т3, приваренными к внутренней поверхности корпуса на расстоянии 2, 5 и 10 мм от торца соответственно.

Параметры режимов лазерной сварки, а также экспериментальные данные по максимальной температуре нагрева корпуса приведены в табл. 2. В основе режимов сварки, приведенных в табл. 2, – режимы I и IV. Диаметр сфокусированного луча лазера (d) для режимов, приведенных в табл. 3, был увеличен с 0,6 мм (в режимах I и IV) до 1 мм для предотвращения разбрызгивания и прожога материала из-за длительного действия лазерного излучения. Такое изменение параметра d не оказывает значимого влияния на температуру в точках измерения (см. рис. 1), но позволяет снизить плотность мощности излучения почти в 3 раза.

Таблица 2

Результаты измерения температуры

Режим сварки	U , %	τ , мс	f , Гц	d , мм	$T1_{\max}$, °C	$T2_{\max}$, °C	$T3_{\max}$, °C
I	55	8	1,2	1,0	77,6	48,2	40,0
I-1	55	8	2	1,0	112,2	70,5	53,4
I-2	55	8	3	1,0	153,5	94,2	68,2
I-3	55	8	4	1,0	204,7	124,6	89,5
I-4	55	8	5	1,0	247,0	147,9	102,6
IV	60	20	1,2	1,0	125,6	70,6	51,9
IV-1	60	20	2	1,0	189,6	110,4	75,7

Примечание. $T1_{\max}$, $T2_{\max}$ и $T3_{\max}$, – максимальные температуры макета, фиксируемые термопарами T1, T2 и T3 соответственно.

Для режимов I и IV максимальная температура нагрева корпуса макета на расстоянии 2 мм от сварной точки составляет 77,6 и 125,6 °C соответственно; на расстоянии 5 мм – 48,2 и 70,6 °C.

На рис. 2 представлены зависимости температуры корпуса от времени воздействия лазерного излучения при сварке в режиме I-1.

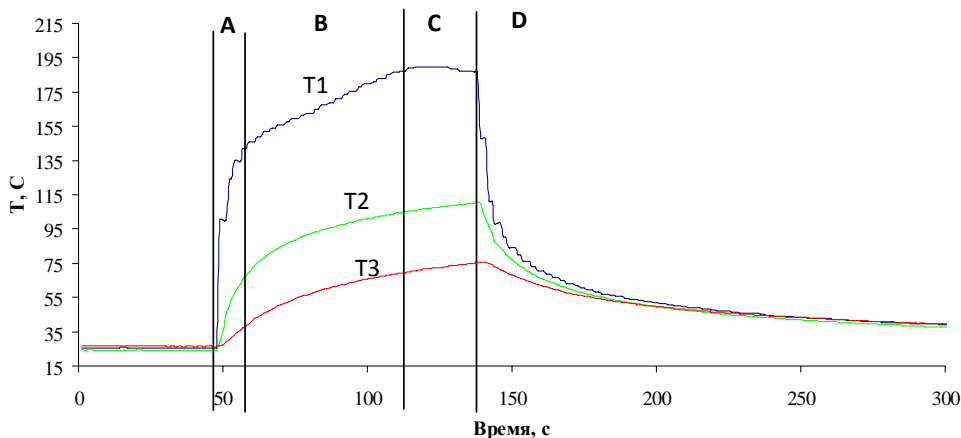


Рис. 2. Зависимости температур T1, T2 и T3 корпуса от времени воздействия лазерного излучения при сварке в режиме I-1

На графике можно выделить 4 основных участка:

1. Участок А – начало действия лазерного излучения; характеризуется резким повышением температуры;
2. Участок В – зона плавного роста температуры;
3. Участок С – достижение квазистационарного состояния;
4. Участок D – прекращение воздействия лазерного излучения; снижение температуры.

На рис. 3 представлен график зависимости максимальной температуры корпуса макета от частоты следования лазерных импульсов при постоянных параметрах $U = 55 \%$, $\tau = 8$ мс, $d = 1,0$ мм. График построен по данным табл. 2.

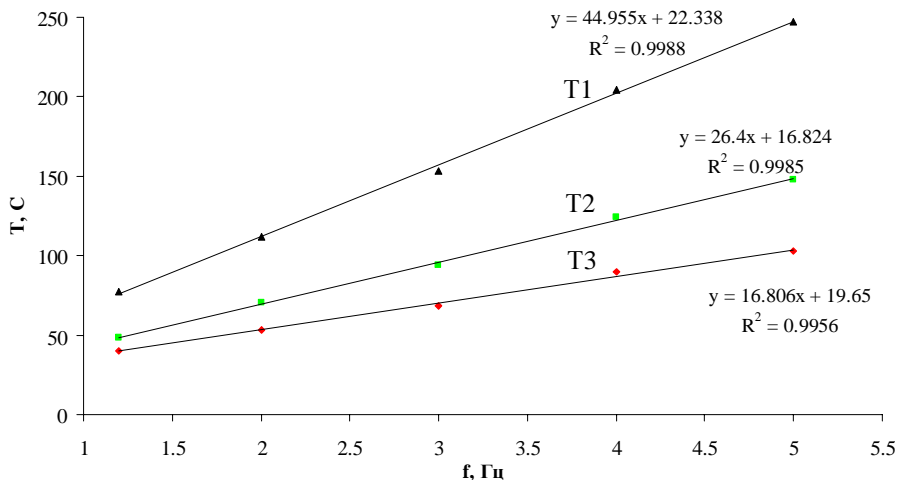


Рис. 3. Зависимость температуры макета от частоты следования лазерных импульсов при режимах сварки с параметрами: $U = 55 \%$, $\tau = 8$ мс, $d = 1,0$ мм

Ниже приведены уравнения аппроксимации зависимостей $T(f)$:

$$T_1 = 44,96 f + 22,34; R^2 = 0,9988; S_1 = 2,70 \%; \quad (1)$$

$$T_2 = 26,4 f + 16,82; R^2 = 0,9985; S_2 = 1,81 \%; \quad (2)$$

$$T_3 = 16,81 f + 19,65; R^2 = 0,9956; S_3 = 1,97 \%; \quad (3)$$

где: R^2 – квадрат коэффициента корреляции, T_1, T_2, T_3 – температура на расстоянии 2, 5, 10 мм от точки действия лазера соответственно; S_1, S_2 и S_3 – относительные стандартные отклонения температур T_1, T_2 и T_3 соответственно.

По данным уравнениям (1)–(3) можно оценить предельнодопустимую температуру разогрева корпуса при воздействии лазерного излучения с определенной частотой следования импульсов и, исходя из этого, определить время (скорость) сварки макета:

$$t_{\text{свар}} = \frac{N}{f}, \quad (4)$$

где: $t_{\text{свар}}$ – время сварки макета, с; N – количество сварных точек,

$$N = \frac{3,14 d_{\text{мак}}}{d(1-k)}, \quad (5)$$

$d_{\text{мак}}$ – диаметр свариваемого макета, мм; k – коэффициент перекрытия сварных точек.

2.2. Измерение температуры в процессе сварки

Измерение температуры корпуса макета во время сварки в двух режимах – I-2 (при $d = 0,6$ мм) и IV (см. табл. 3) осуществлялось термопарами T1 и T2, приваренными к внутренней поверхности корпуса на расстоянии 2 мм от его торца симметрично относительно оси макета (рис. 4).

В режиме I-2 сварка проведена по всей окружности макета. В режиме IV, в связи с возможным перегревом системы охлаждения лампы накачки лазерной установки PiccoLaser-40, проведена частичная сварка (половина) макета. В табл. 3 приведены полученные экспериментальные данные по измерению температуры.

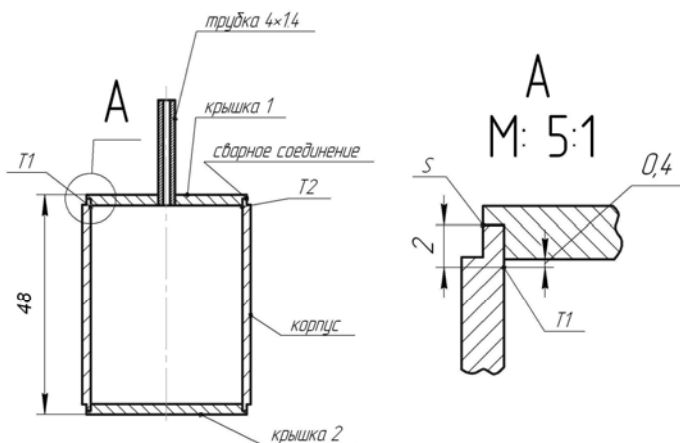


Рис. 4. Схема расположения термопар на корпусе макета

Таблица 3

Экспериментальные данные по измерению температуры при сварке в режимах I-2 и IV

Режим сварки	U , %	τ , мс	f , Гц	d , мм	$T1-1_{\max}$, °C	$T2_{\max}$, °C	$T1-2_{\max}$, °C
I-2	55	8	3,0	0,6	77,4	127,8	132,7
IV	60	20	1,2	0,6	77,5	116,7	–

Примечание. $T1-1_{\max}$, $T1-2_{\max}$ – максимальная температура корпуса, фиксируемая термопарой T1 в начальный и конечный моменты сварки соответственно; $T2_{\max}$ – максимальная температура корпуса, фиксируемая термопарой T2.

На рис. 5 представлен график изменения температуры корпуса в процессе сварки в режиме I-2.

На рис. 5 имеется 3 характерных пика. Температура в начальный момент сварки ($T1-1_{\max}$) имеет меньшее значение, чем температуры $T2_{\max}$ и $T1-2_{\max}$, которые практически совпадают. В начальный момент сварки макета температура на определенном расстоянии от сварного шва резко достигает локального максимума, затем спадает, и приблизительно через 300 секунд начинает медленно расти и достигает своего максимального значения в конце сварки.

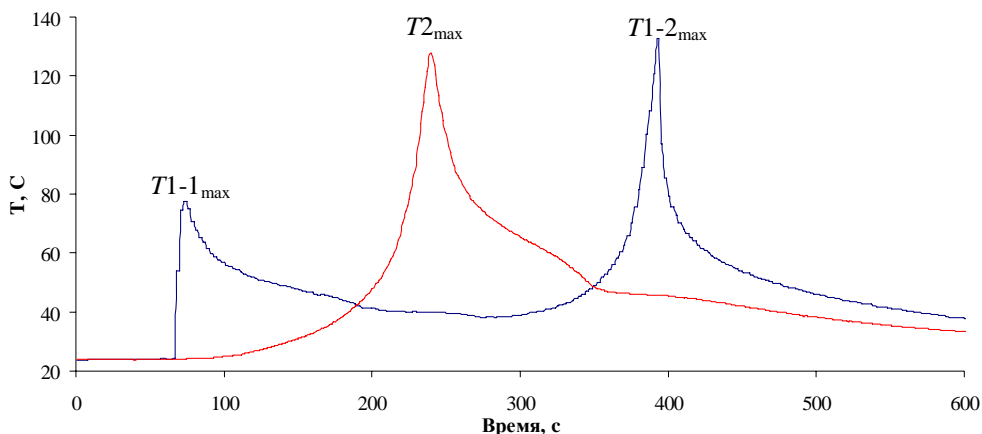


Рис. 5. Изменение температуры корпуса при сварке в режиме сварки I-2

Максимальная температура нагрева корпуса на расстоянии 2 мм от сварного шва при сварке в режиме I-2 равна 132,7 °С, при режиме сварки IV – 116,7 °С (см. табл. 3). Необходимо отметить, что значения температур, измеренные в квазистационарном состоянии, имеют несколько большую величину (при режимах сварки I-2 и IV, соответственно, 153,5 и 125,6 °С).

Таким образом, предельная температура нагрева корпуса в процессе сварки достигается при реализации квазистационарного состояния. Поэтому, для предварительной оценки возможной максимальной температуры нагрева макета во время сварки, целесообразно использовать данные, полученные в квазистационарном состоянии.

2.3. Испытания на герметичность и несущую способность

Исследования по оценке качества сварных соединений, выполненных в режимах сварки I, IV, показали (табл. 4):

- сварные соединения, выполненные в режимах I и IV, герметичны на уровне чувствительности прибора ТИ1-14М ($7 \cdot 10^{-12}$ м³ Па/с);
- давление разрушения сварных швов составляет 200...280 кгс/см²;
- средняя глубина провара для режимов I и IV составляет 0,75 и 1 мм соответственно.

Таблица 4

Результаты металлографического исследования и испытаний на несущую способность

№ режима сварки	$P_{пред}$, кгс/см ²	Глубина провара, мм	Дефекты	Характер предельного состояния
I	200	0,75	пора $\approx \varnothing 0,1$ мм	Течь по сварному шву
IV	220	1,04	поры $\approx \varnothing 0,1$ мм	
	280	1,01	нет	

Таким образом, исследования по оценке качества сварных соединений показали, что оба режима сварки (режимы I и IV) обеспечивают получение герметичного сварного соединения корпуса и крышки, при этом несущая способность сварных соединений находится на достаточно высоком уровне.

2.4. Сравнение полученных данных с электронно-лучевой сваркой

Проведенные исследования по измерению температуры при сварке импульсным лазером показали незначительный разогрев деталей в процессе сварки. Кроме того, используя полученные аппроксимационные зависимости можно прогнозировать температуру в зависимости от параметров лазера.

При ЭЛС аналогичных образцов температура разогрева на расстоянии 3–5 мм от сварного шва составляет 270 °С. На рис. 6 приведена сравнительная гистограмма температуры разогрева на расстоянии 2–5 мм от сварного шва при импульсной лазерной сварке (режимы I и IV) и при ЭЛС. Как видно, максимальная температура разогрева при лазерной сварке значительно меньше, чем при ЭЛС. В то же время, в силу физических принципов работы, ЭЛС обладает рядом недостатков:

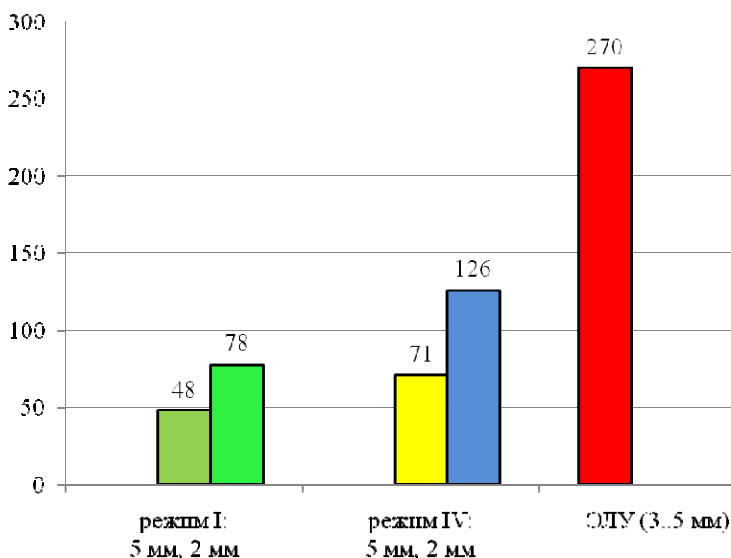


Рис. 6. Сравнительная гистограмма температуры разогрева детали при импульсной и электронно-лучевой сварке.

1. Необходимость создания в рабочей камере вакуума порядка 10^{-4} – 10^{-6} мм рт. ст., что значительно увеличивает продолжительность технологического процесса сварки и требует дорогостоящей и достаточно громоздкой системы вакуумной откачки;

2. Габариты рабочей камеры ограничивают размеры свариваемых деталей;

3. Так как при ЭЛС ускоряющее напряжение достигает величин порядка 50–100 кВ, то при определенных условиях может возникать явление пробоя, значительно изменяющее параметры сварки (сила тока, напряжение) и приводящее к образованию дефектов;

4. Тормозное рентгеновское излучение, образующееся при воздействии пучка электронов на свариваемые материалы, представляет угрозу для персонала и требует применения дополнительных мер для обеспечения радиационно-безопасной работы;

5. На пучок электронов оказывают влияние магнитные поля внутри рабочей камеры, что затрудняет сварку магнитных материалов.

Лазерная сварка лишена этих недостатков. И при сопоставимом качестве сварного шва обеспечивает меньшую температуру разогрева детали.

Таким образом, проведенные исследования показали:

- Проработана техническая возможность применения импульсной лазерной сварки для герметизации узлов, содержащих чувствительные к тепловому воздействию материалы;

- Максимальная температура разогрева в процессе лазерной сварки на расстоянии 5 мм от торца макета составляет 48 и 71 °С для режимов I и IV соответственно, что значительно меньше чем при ЭЛС (270 °С);

- Получены зависимости максимальной температуры нагрева свариваемой детали от параметров режимов сварки. Они позволяют в зависимости от чувствительности к тепловому воздействию материалов, содержащихся в свариваемых сборках, предварительно спрогнозировать и подобрать соответствующий режим сварки, обеспечивающий необходимую герметичность и несущую способность при минимальном разогреве без ущерба качеству сварного шва;

- Полученные сварные соединения не имеют недопустимых дефектов и герметичны на уровне чувствительности гелиевого течеискателя;

- Полученные экспериментальные данные могут быть использованы для других импульсных лазерных установок при расчетах параметров лазера и максимальной температуры разогрева.

Список литературы

1. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006.

2. Жигач А. Ф., Стасиневич Д. С. Химия гидридов. Изд-во. «Химия», 1969.

3. Технология металлов и материаловедение / Под ред. Л. Ф. Усовой. М.: Металлургия, 1987.