

ВЫБОР ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ГИБРИДНОЙ СВАРКИ СТАЛЕЙ ПО УРОВНЮ ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

В. Н. Сидорец, д. т. н., А. И. Бушма, к. т. н.,
В. Ю. Хаскин, д. т. н., Е. Н. Бердникова, к. т. н.

Институт электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины

Постановка проблемы. Развитие лазерных техники и технологий позволило решать значительное количество инженерных задач в области обработки материалов и изготовления ответственных конструкций из сталей и сплавов. Мощное лазерное излучение обеспечивает сварку за один проход без разделки кромок и, в большинстве случаев, без присадочных материалов. При этом образуется узкий шов с отношением ширины шва к глубине проплавления не превышающим единицу – т.е. коэффициентом формы шва, соответствующем кинжальному проплавлению.

Анализ состояния проблемы. Вместе с этим лазерная сварка имеет определенные недостатки. Высокая концентрация энергии в сочетании с высокой скоростью сварки увеличивают скорость охлаждения литого металла шва и ЗТВ, что приводит к образованию в них твердых и хрупких структур – например, мартенсита. Также, в случае сварки низкоуглеродистых сталей, при этом могут образовываться холодные трещины. При лазерной сварке со скоростью 14...27 мм/с скорость охлаждения ЗТВ в интервале температур 773...873 К составляет 373...553 К/с, что значительно превышает оптимальную скорость охлаждения (274...298 К/с) [1]. В случае применения гибридной лазерно-дуговой сварки дополнительный источник энергии в виде электрической дуги за счет повышения производительности и глубины провара позволяет снизить скорости охлаждения ЗТВ примерно в два раза и приблизить их к оптимальным значениям, что устраняет в сварных соединениях нежелательные закалочные структуры.

Поэтому **цель данной работы** – определение областей энергетического воздействия лазерного и дугового тепловых источников, обеспечивающих минимальное термическое влияние и высокую стабильность гибридной лазерно-дуговой сварки низкоуглеродистых сталей.

Описание технологического процесса и экспериментальной установки. В ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины была разработан процесс гибридной сварки в защите углекислого газа и газовых смесей (например, 18%CO₂+82%Ar) [2]. В той же работе [2] приведена технологическая схема этого вида сварки. Согласно данной схеме проводили исследования с использованием излучения Nd:YAG-лазера модели DY 044 (Rofin Syngar, Германия) с мощностью генерируемого излучения до 4,4 кВт. Для питания дуги плавящегося электрода использовали сварочный трансформатор ВДУ-601, обеспечивающий ток сварки до 600 А. В качестве материала образцов использовали стали 09Г2С (толщиной δ=10 мм) и 13Г1С (толщиной δ=13,5 мм). Применялась электродная проволока марки Св-08Г2С (Ø1,6 мм).

В ходе проводившихся технологических исследований определяли ос-

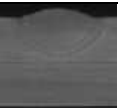

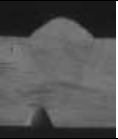



новые тенденции формирования швов и область варьирования режимов при скоростях сварки 15...300 м/ч. Также проводилось сравнение результатов лазерной и лазерно-дуговой сварки. Было установлено, что в случае гибридной сварки твердость литого металла швов меньше, чем в случае лазерной сварки. Дендритные структуры этой зоны является более выраженным в случае гибридной сварки (величина дендритов больше, особенно в верхней части шва – из-за влияния дуговой составляющей процесса). При гибридной сварке в литом металле шва образуются, преимущественно, феррито-перлитные структуры, в отличие от случая лазерной сварки, при которой в рассматриваемой зоне преобладают бейнитные и даже мартенситные структуры. В ЗТВ наблюдается обратная картина – твердость ЗТВ выше в случае гибридной сварки. Это происходит из-за увеличения погонной энергии по сравнению с лазерной сваркой, что приводит к увеличению размера ЗТВ и образованию в ней закалочных структур.

Также было установлено, что гибридная сварка не всегда может способствовать увеличению глубины провара. Это зависит от гидродинамических течений жидкого металла в сварочной ванне и происходит из-за наличия или отсутствия резонанса между частотой переноса капель дугой плавящегося электрода и частотой автоколебаний парогазового канала, образованного лазерным излучением [2, 3]. Кроме того, установили, что независимо от описанных явлений при гибридной сварке улучшаются условия формирования сварного шва и повышается качество верхнего валика усиления. При этом сфокусированное лазерное излучение стабилизирует электрическую дугу, привязывает столб дуги к зоне своего действия на металл и заставляет дугу опускаться в парогазовый канал [4]. Эффект стабилизации дуги тем больше, чем выше мощность лазерного излучения. Так, для стабилизации дуги плавящегося электрода при сварочных токах до 200 А ($U \approx 24$ В) и скорости сварки до 75 м/ч потребовалась мощность непрерывного лазерного излучения не ниже 300 Вт.

Обработка и обсуждение результатов. Таким образом, в ходе проведения экспериментов установили, что совместное действие лазерного излучения и дуги плавящегося электрода при сварке сталей с защитой углекислым газом решает задачу ввода в сварочную ванну присадочных материала, благодаря чему формируется высококачественный верхний валик шва. Кроме того, при этом достигается снижение мощности лазерного излучения за счет его частичной замены мощностью электрической дуги, а также снижается твердость сварных швов, они становятся более пластичными.

Выполненные исследования позволили перейти к изучению влияния энергетики процесса гибридной сварки на стабильность этого процесса, формирование сварного шва и изменение глубины провара. Для этого лазерно-дуговым способом в защите CO_2 выполняли провары в пластинах из стали 13Г1С ($\delta = 13,5$ мм) на различных режимах. Затем из полученных образцов изготавливали макрошлифы поперечных сечений этих проваров. Травление шлифов выполняли в водном растворе хлорного железа. При расчете величин погонной энергии учитывали КПД дугового процесса (приняли равным 80% [5]) и не учитывали отражение лазерного излучения от сварочной ванны (т.е. в расчетах использовали мощность падающего на образец сфокусированного излучения).

Параметры режима гибридной сварки низкоуглеродистых сталей, обеспечивающие стабильное протекание тепловых процессов

$V_{св}$, М/ч	$V_{пр}$, М/ч	I, А	U, В	E, Дж/мм	Угол наклона электрода	Вылет элек- трода, мм	Геометри- ческие пара- метры прова- ра	Макрошлиф
Для толщины стыкового соединения $\delta = 5...7$ мм								
60	445	416	30 → 31	837	56°	12	$B=10$ мм $a=2$ мм $h=5,5$ мм	
60	445	463	28 → 34	950	30°	18	$B=11,9$ мм $a=2,2$ мм $h=6,4$ мм	
Для толщины стыкового соединения $\delta = 7...9$ мм								
90	960	600	35	832	56°	12	$B=10$ мм $a=2,5$ мм $h=6$ мм	
Для толщины стыкового соединения $\delta = 9...12$ мм								
60	734	600	28 → 35	1160	30°	18	$B=10$ мм $a=3,5$ мм $h=9$ мм	
60	960	573	28 → 35	1118	30°	18	$B=8,2$ мм $a=4,1$ мм $h=10,5$ мм	
60	558	484	28 → 31	935	30°	12	$B=8,5$ мм $a=3$ мм $h=9$ мм	

Примечания: $P_{лаз}=4$ кВт; фокус линзы $F=300$ мм; заглубление фокуса $\Delta F=-2$ мм; расход защитного газа $Q_{CO_2}=14...20$ л/мин.; B – ширина верхнего валика усиления шва, a – его высота, h – глубина провара (без учета a). Электрод был направлен углом вперед.

По результатам исследований, собранных в таблице, можно выделить параметры режимов гибридной сварки низкоуглеродистых сталей, обеспечивающих стабильное протекание тепловых процессов и формирование оптимальной конфигурации сварных швов.

С помощью программного продукта, который был разработан в отделе № 77 ИЭС им. Е.О.Патона при выполнении работы [6], были проведены расчеты термических циклов лазерной и гибридной лазерно-дуговой сварки (рис.1-2). При выполнении этих расчетов учитывали следующие допущения. Расчеты выполняли для проваров в пластине из низкоуглеродистой стали толщиной 10 мм со скоростью 60 м/ч при помощи излучения Nd:YAG-лазера. Коэффициент поглощения излучения выбрали $A=0,45$, а коэффициент полезного действия дуговой источники – 0,6. Во всех случаях (т.е. при расчете термических циклов лазерной и гибридной сварки) мощность лазерного излучения составляла 3,5 кВт. В случае гибридной сварки добавляли мощность дугового источника для случая сварочного тока $I=350$ А при напряжении на дуге $U=26$ В.

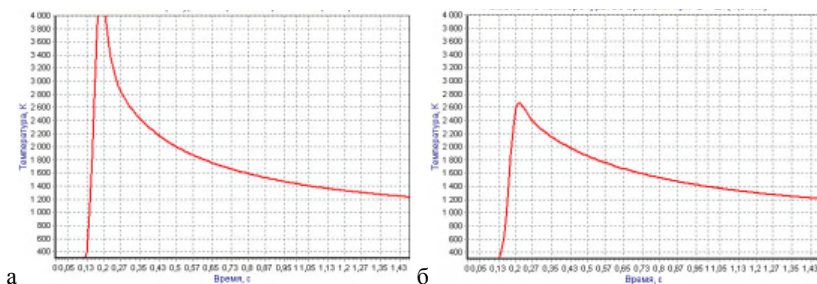


Рис. 1. Термические циклы лазерной сварки низкоуглеродистой стали: а – на поверхности образца; б – в нижней части провара (на глубине 4 мм).

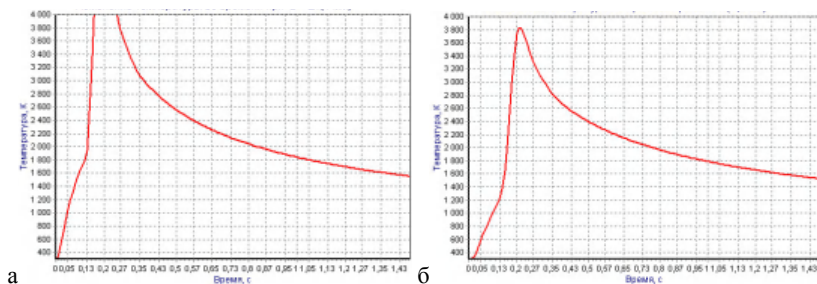


Рис. 2. Термические циклы гибридной лазерно-дуговой сварки низкоуглеродистой стали: а – на поверхности образца; б – в нижней части провара (на глубине 4 мм).

Приведенные термические циклы позволяют определить скорости охлаждения металла шва в интервале температур 1600...2000 К. Для рассматриваемого случая лазерной сварки она составила около 1330 К/с, в то время, когда для гиб-

ридной сварки – порядка 730 К/с. Данный расчет показывает, что повышение погонной энергии с ~210 до ~750 Дж/мм приводит к снижению скорости охлаждения литого металла шва при гибридной сварке, что способствует повышению ударной вязкости сварного соединения. Напротив, высокие скорости охлаждения металла при лазерной сварке могут приводить к образованию структур закалки (например, мартенсита или верхнего бейнита) в литом металле швов и ЗТВ, что в свою очередь повышает хрупкость сварных соединений. Таким образом, проведенные расчеты показывают, что введение вдвое более мощного дополнительного дугowego источника в процесс лазерной сварки низкоуглеродистых сталей позволяет снизить скорости охлаждения получаемых сварных соединений примерно в 1,5 раза.

Выводы

1. Исследования термического влияния и особенностей формирования швов при гибридной сварке позволяют рекомендовать следующие области энергетического воздействия, обеспечивающие стабильное протекание процесса сварки и получение качественных стыковых соединений деталей из низкоуглеродистой стали: для толщины $\delta=5\ldots 7$ мм лазерно-дуговую сварку осуществлять с погонной энергией 830...950 Дж/мм, для $\delta=7\ldots 9$ мм – 850...950 Дж/мм, для $\delta=9\ldots 12$ мм – 930...1150 Дж/мм. При этом соотношение лазерной и дуговой мощностей должны составлять от 1:3 до 1:5 при скоростях сварки 60...120 м/час.
2. Также установлено, что при гибридной сварке сталей и сплавов лучше формирование швов в сочетании с образованием приемлемых структур ЗТВ наблюдается в случаях, когда соотношение лазерной и дуговой мощностей составляют около 1:1. Возможно также повышение мощности дуговой составляющей таким образом, чтобы указанное соотношение составляло от 1:1 до 1:2.
3. Выполненные сравнительные исследования термического влияния лазерной и гибридной сварки на низкоуглеродистые стали показывают, что повышение производительности за счет дополнения процесса лазерной сварки вдвое более мощным дугowym источником позволяет снизить скорости охлаждения получаемых сварных соединений примерно в 1,5 раза.

Список использованных источников

1. Григорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
2. Гибридная сварка излучением CO₂-лазера и дугой плавящегося электрода в углекислом газе / В.Д. Шелягин, В.Ю. Хаскин, В.П. Гарашук и др. // Автомат. сварка. – 2002. – №10 – С.38-41
3. Гибридная лазерно-плазменная сварка алюминиевых сплавов / И.В. Кривцун, В.Д. Шелягин, В.Ю. Хаскин и др. // Автомат. сварка. – 2007. – №5 – С. 49-53
4. Шелягин В.Д. Тенденции развития лазерно-дуговой сварки / В.Д. Шелягин, В.Ю. Хаскин // Автомат. сварка. – 2002. – №6 – С.28-33
5. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением. Под ред. акад. Б.Е. Патона. – М., Машиностроение, 1974. – 768 с.
6. Хаскин В.Ю. Научно-технологические основы лазерных и гибридных процессов наплавки и модификации поверхностей металлических изделий: Дис... д.т.н. по специальности 05.03.07 – Процессы физико-технической обработки // Киев, НТУУ «КПИ», 2010. – 491 с.