



ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ВЗРЫВОМ СТАЛИ С ЧУГУНОМ

И. В. ДЕНИСОВ, Л. Б. ПЕРВУХИН

Ин-т структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН,
142432, г. Черноголовка, ул. Акад. Осипьяна, 8. E-mail: isman@ism.ac.ru

Изделия из чугуна находят широкое применение в современном машиностроении, в частности, для изготовления фрикционных дисков, в которых пластины из чугуна с помощью болтов крепятся к стальным или медным пластинам. В соответствии с гипотезой об образовании на границе раздела ударно-сжатого газа и термической ионизации газа с образованием тонких слоев низкотемпературной («холодной») плазмы в сварочном зазоре при сварке взрывом определены условия образования соединения углеродистой стали с низколегированным чугуном. Установлены режимы сварки взрывом и термообработки для получения равнопрочного соединения и отсутствия дефектов в виде трещин и отколов по всей линии контакта между сталью и чугуном. Проведенные оценочные расчеты параметров УСГ с учетом сверхскоростного обтекания им свариваемой поверхности показали, что изменение скорости точки контакта от 2400 до 4000 м/с приводит к увеличению температуры и уменьшению протяженности области УСГ, времени воздействия плазмы. Библиогр. 6, табл. 1, рис. 1.

Ключевые слова: сварка взрывом, сварочный зазор, ударно-сжатый газ, параметры газа, очистка, точка контакта

При изготовлении фрикционных дисков пластины из чугуна крепятся к стальным или медным пластинам с помощью болтов. Замена болтового соединения на прочное сварное соединение по всей поверхности чугунного диска позволит повысить прочность изделия, его технологичность, сделает возможным применять сварку при изготовлении изделий из чугуна. Однако болтовое соединение не обеспечивает плотного контакта по всей поверхности, что ухудшает отвод тепла от чугунного диска и способствует его неравномерному нагреву. Наличие локальных зон перегрева приводит к растрескиванию и высыпанию чугуна.

Основными недостатками чугуна как конструкционного материала является его низкая пластичность и плохая свариваемость всеми способами сварки, в том числе и сваркой взрывом. Опыт предыдущих работ по получению сваркой взрывом биметалла сталь + чугун показал, что из-за низкой пластичности в процессе сварки взрывом образуются дефекты в виде трещин, отколов, расслоений [1].

При разработке технологии сварки взрывом чугуна со сталью необходимо решить следующие основные задачи:

получение прочного соединения стали с чугуном по всей поверхности;

исключение образования трещин и разрушений чугуна в процессе сварки взрывом;

исследование механических свойств и структуры полученных соединений, а также влияние на них последующей термической обработки.

Для решения поставленных задач разработали методику, которая на основе опубликованных

данных и опыта производства биметаллов сваркой взрывом предусматривала:

оценить принципиальную возможность сварки взрывом чугуна со сталью;

разработать технологические решения, снижающие вероятность образования трещин и разрушений чугуна в процессе сварки взрывом;

разработку опытной технологии получения биметалла сталь + чугун и исследование полученных соединений.

В настоящее время накоплен большой экспериментальный и теоретический материал по вопросу формирования соединения при сварке взрывом, который обобщен в работах [2, 3]. Выдвинут ряд гипотез, объясняющих образование соединения с различных точек зрения. В зоне соударения при сварке взрывом развиваются высокие давления, идет интенсивная пластическая деформация, сопровождаемая значительным повышением температуры металлов в зоне соударения. Для сварки взрывом характерна трехстадийность процесса образования прочных связей между атомами соединяемых металлов, идущего в следующей последовательности: очистка и активация контактных поверхностей; образование физического контакта; объемное взаимодействие. Качество сварки взрывом определяется в первую очередь процессами, идущими в сварочном зазоре впереди точки контакта [4], т. е. очисткой и активацией соединяемых поверхностей.

Оценку параметров ударно-сжатого газа (УСГ) в сварочном зазоре провели по методике [4] для следующих режимов сварки взрывом: скорость точки контакта v_k изменяется от 2400 до 4000 м/с, отношение массы взрывчатого вещества (ВВ) к

массе метаемой пластины от 1,2 до 0,7, сварочный зазор от 8 до 1 мм, число Маха изменяется от 7 до 11,6. Расчеты показали, что параметры УСГ в сварочном зазоре при этом изменяются в следующих пределах: давление от 7 до 13,7 МПа, температура от 2500 до 5000 К.

Проведенные оценочные расчеты по методике [4] показывают, что повышение скорости точки контакта улучшает условия очистки и активации свариваемых поверхностей за счет повышения скорости и температуры УСГ в сварочном зазоре и параметров плазмы на границе между УСГ и свариваемыми поверхностями. Время воздействия плазмы t можно определить по формуле $t = l/v_k$, где l — протяженность области УСГ, определяемая по методике [4]. При повышении скорости точки контакта с 2400 до 4000 м/с время воздействия плазмы снижается с $2,4 \cdot 10^{-5}$ до $1,12 \cdot 10^{-5}$ с.

Повышение скорости детонации ВВ приведет к увеличению скорости и энергии соударения метаемой пластины с основной. Это в свою очередь увеличит пластическую деформацию основного листа и вероятность появления в нем трещин и разрушений. Регулировать скорость метания можно изменением сварочного зазора. Опубликованные в работах [2, 3, 5] методики расчета скорости соударения не учитывают величину сварочного зазора и только в работе [6] предложено угол соударения и скорость метания v_0 определять с учетом величины сварочного зазора:

для смесевых ВВ

$$v_0 = 2D \sin \frac{0,49r}{r + 2,71 + 0,184/h},$$

для аммонита

$$v_0 = 2D \sin \frac{0,416r}{r + 2,71 + 0,184/h},$$

где D — скорость детонации ВВ; r — безразмерный параметр, равный отношению массы ВВ к массе метаемой пластины; h — высота зазора.

Расчет скорости метания и угла соударения по этим формулам для приведенных выше режимов сварки взрывом и при изменении сварочного зазора от 1 до 8 мм показал, что скорость метания при уменьшении сварочного зазора с 8 до 1 мм снижается в 2 раза. Это позволит в 4 раза снизить энергию соударения и, как следствие, уменьшить

вероятность появления трещин и разрушений в чугуне.

Таким образом, для обеспечения прочного соединения при сварке взрывом чугуна со сталью, исключения образования трещин и разрушений чугуна процесс необходимо проводить на режимах с повышенной скоростью детонации 3500...4000 м/с и со сварочным зазором 2...1 мм.

В качестве исходных материалов при проведении экспериментальных исследований использовали лист из стали марки 08кп размерами 4×300×500 мм и литые пластины из легированного ферритно-перлитного низколегированного чугуна с пластинчатым графитом (далее чугун) размерами 8×180×350 мм. Применена параллельная схема сварки взрывом. Использованы два режима сварки взрывом:

скорость детонации ВВ $D = 2400...2500$ м/с; безразмерный параметр $r = 1,2$; сварочный зазор между пластинами 8 мм, что обеспечивает скорость метания 500...550 м/с; расчетный угол соударения 8...9°;

скорость детонации ВВ $D = 3500...3700$ м/с, безразмерный параметр $r = 0,7$; сварочный зазор 1,8 мм, что обеспечивает скорость метания 340...400 м/с; расчетный угол соударения 2...3°.

В результате проведения экспериментов установлено, что при сварке по первому варианту наблюдается обрезка нависания стальной пластины, значительная деформация пластины из чугуна с частичным ее разрушением и полным отсутствием соединения по всей поверхности плакирования с отпечатками на стальной поверхности рельефа механической обработки пластины из чугуна. Отсутствие очагов схватывания на свариваемых поверхностях указывает на то, что заданный режим сварки взрывом не обеспечил очистку и активацию поверхности чугуна впереди точки контакта.

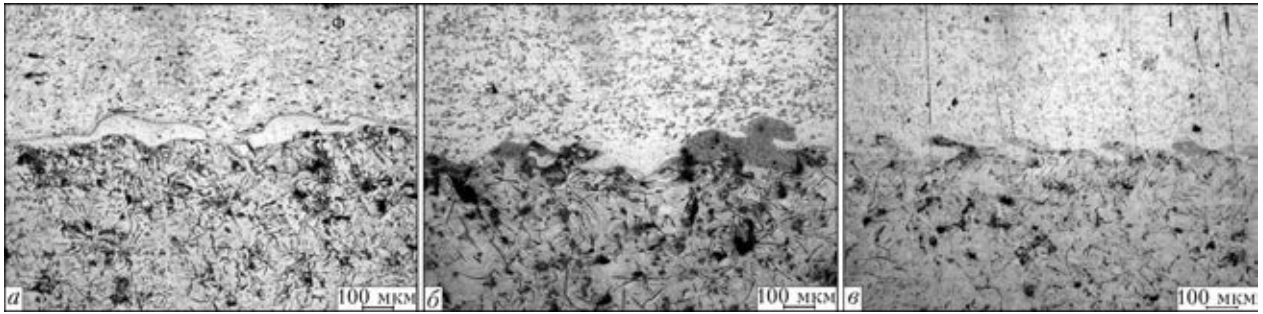
Эксперименты по второму варианту показали, что соединение сталь с чугуном происходит по всей поверхности с незначительной деформацией сваренных пластин. При ультразвуковом контроле на некоторых двухслойных пластинах выявлены небольшие (2...3 см²) угловые непровары.

Испытание прочности соединения на отрыв плакирующего слоя проводили на образцах без термообработки и образцах с двумя различными термообработками. Первый режим — нагрев до

Прочность соединения сталь + чугун и твердость чугуна* в зависимости от термической обработки

Термическая обработка	Предел прочности соединения σ_B , МПа	Твердость чугуна HB	Твердость белой фазы HV
Без термической обработки	130...135	220	514
Нагрев до 550 °С, выдержка от 4 до 6 ч, охлаждение с печью	145...150	175	322
Нагрев до 700 °С, выдержка 1 ч, охлаждение с печью	155...160	160	Отсутствие белой фазы

* σ_B исходного чугуна 200 МПа, твердость HB 163...219, белая фаза отсутствует.



Микроструктура соединения сталь 08кп + легированный чугун: *а* — без термообработки; *б* — термообработка – нагрев до 550 °С – выдержка от 4 до 6 ч – охлаждение с печью; *в* — термообработка – нагрев до 700 °С – выдержка 1 ч – охлаждение с печью

550 °С, выдержка 4...5 ч и охлаждение с печью; второй — нагрев 700 °С, выдержка 1 ч и охлаждение с печью (таблица). Испытания показали, что прочность соединения после сварки взрывом составляет 130...135 МПа, термообработка по первому режиму повышает прочность соединения до 145...150 МПа и снижает его твердость. Прочность соединения образцов, термообработанных по второму режиму, составила 155...160 МПа.

В микроструктуре соединения образцов без термообработки обнаружено наличие белой фазы (рисунок, *а*), твердость которой составляет *HV* 514 (таблица). Химический состав белой фазы соответствует чугуну. Исследование микроструктуры соединения образцов после термообработки нагрев до 550 °С, выдержка от 4 до 6 ч, охлаждение с печью показало уменьшение размеров и количество белой фазы (рисунок, *б*), твердость которой составляет *HV* 322 (таблица). Микроструктура соединения образцов после нагрева до 700 °С, выдержке 1 ч, охлаждении с печью показало отсутствие белой фазы (рисунок, *в*), следовательно, этот режим термообработки позволяет отжечь включения отбеленного чугуна (белой фазы) на границе соединения, что повышает механические свойства соединения.

Металлографическое исследование соединения стали 08кп + чугун показало, что в соединении отсутствуют крупные участки литых включений. Не выявлено растрескивание чугуна, которое могло образоваться при получении биметалла, что свидетельствует о положительном влиянии малых сварочных зазоров и использования ВВ с повышенной скоростью детонации.

Анализ исследования микротвердости образцов показал, что при термообработке по режиму отжига чугуна (нагрев до 700 °С, выдержка 1 ч, охлаждение с печью) в зоне соединения твердость выравнивается и повышается прочность соединения.

Выводы

1. Снижение сварочного зазора с 8 до 1,8 мм приводит к уменьшению скорости соударения металлической пластины с основной практически в 2 раза, а следовательно снижается в 4 раза энергия соударения.

2. Эксперименты по сварке взрывом стали с чугуном подтвердили оценочные расчеты и показали, что повышение скорости точки контакта с одновременным уменьшением параметра *r* и сварочных зазоров до 1,8 мм создают условия получения равнопрочного соединения между углеродистой сталью и низколегированным чугуном, при отсутствии деформации и дефектов (трещин) на поверхности хрупкого чугуна.

3. Исследование микроструктуры соединения стали с чугуном до и после термической обработки показало, что химический состав включений белой фазы соответствует низколегированному чугуну, т. е. является отбеленным чугуном. Термическая обработка в режиме отжига обеспечивает преобразование структуры отбеленного чугуна в исходный.

1. Алексеев Ю. А. Структурные особенности сварного шва и их влияние на качество соединения металлов при сварке взрывом с малыми зазорами: Дис. ... канд. техн. наук. — Черноголовка, 1997. — 125 с.
2. Лысак В. И., Кузьмин С. В. Сварка взрывом. — М.: Машиностроение, 2005. — 544 с.
3. Петушков В. Г. Применение взрыва в сварочной технике. — Киев: Наук. думка, 2005. — 756 с.
4. Определение параметров ударно-сжатого газа в сварочном зазоре впереди точки контакта при плакировании взрывом / С. Ю. Бондаренко, Д. В. Рихтер, О. Л. Первухина, Л. Б. Первухин // Автомат. сварка. — 2009. — № 11. — С. 46–48.
5. Первухин Л. Б., Первухина О. Л., Бондаренко С. Ю. Очистка свариваемых поверхностей от оксидов и загрязнений и их активация в процессе сварки взрывом // Там же. — 2010. — № 7. — С. 46–49.
6. Конон Ю. А., Первухин Л. Б., Чудновский А. Д. Сварка взрывом. — М.: Машиностроение, 1987. — 216 с.

Поступила в редакцию 19.02.2013