

Плакирование взрывом внутренней части стальной трубы жаропрочным ниобиевым сплавом

А. Ю. Малахов, И. В. Сайков, О. Л. Первухина, Л. Б. Первухин

Исследованы особенности получения сваркой взрывом двухслойных заготовок цилиндрической формы с сочетанием слоев “жаропрочный ниобиевый сплав Н65В2МЦ + высокопрочная сталь ОХНЗМ”. Разработана схема плакирования сплавом Н65В2МЦ внутренней части цилиндрической поверхности из стали ОХНЗМ и получены опытные образцы со 100 % сплошностью слоев по всей длине заготовок. Микроанализ зоны соединения слоев показал необходимость оптимизации режимов сварки взрывом с целью уменьшения толщины переходной зоны и создания более равномерной волновой формы соединения.

Ключевые слова: жаропрочный сплав, сварка взрывом, зона соединения, схема плакирования взрывом, схема с синхронным инициированием противозарядов.

Введение

В настоящее время широкое применение во всем мире нашли биметаллические трубы, использование которых позволяет в несколько раз увеличить срок эксплуатации изделий цилиндрической формы, работающих в условиях сильного износа. Наиболее перспективным способом изготовления таких труб является сварка взрывом (СВ). В силу присущих данному способу уникальных особенностей, можно получать трубные заготовки с практически любым сочетанием слоев [1]. Соединение слоев при сварке взрывом происходит в твердой фазе без расплавления исходных материалов и изменения их химического состава и механических свойств. Структура соединения, как правило, имеет характерную волнообразную форму.

Сплав Н65В2МЦ содержит в своем составе такие тугоплавкие металлы, как ниобий (основа $\approx 92\%$), цирконий, молибден и вольфрам (табл. 1). В силу своих физико-химических свойств, сплавы из данных металлов склонны к интенсивному окислению при

нагреве до 300 – 500 °С. Поэтому все традиционные технологические операции по получению соединений данных сплавов с другими материалами необходимо проводить в защитных средах и за как можно более короткий промежуток времени [2]. Так как СВ это быстротечный процесс ($10^{-4} - 10^{-6}$ с), который характеризуется высокими значениями давления в точке соприкосновения свариваемых поверхностей [3, 4], то получение данным способом биметалла “Н65В2МЦ/сталь ОХНЗМ” является перспективным направлением, которое позволит в будущем расширить ассортимент двухслойных материалов специального назначения, повысить уровень защиты от эрозионного износа изделий, работающих в экстремальных условиях, а также сэкономить дорогостоящие тугоплавкие сплавы [5].

Цель работы — исследование особенностей получения сваркой взрывом двухслойных заготовок цилиндрической формы с сочетанием слоев “жаропрочный ниобиевый сплав Н65В2МЦ + высокопрочная сталь ОХНЗМ”.

Таблица 1

Химический состав исходных материалов

Марка сплава	Nb	Mo	W	Zr	Ni	Fe	Cr	C	Mn	Si
Н65В2МЦ	Осн.	1,7 – 2,3	4,9 – 5,5	0 – 1,2	—	—	—	—	—	—
ОХНЗМ	—	0,3 – 1,0	—	—	3,75 – 4,0	Осн.	0,5 – 1,7	0,4	0,7	0,45

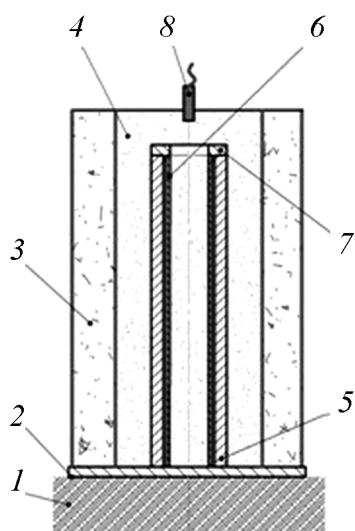


Рис. 1. Сборка исходных элементов для сварки взрывом.

Материалы и методика эксперимента

Для проведения исследований в качестве исходных материалов использовали две трубы — из сплава Н65В2МЦ (32 × 2,5 мм) и стали ОХНЗМ (55 × 9 мм). Химический состав и механические свойства исходных материалов представлены в табл. 1 и 2, соответственно.

СВ исходных материалов осуществляли по схеме с синхронным инициированием противозарядов (рис. 1). Данная схема была выбрана как альтернатива схеме СВ цилиндрических изделий в матрице [6, 7].

Внутри цилиндрической заготовки 5 из стали ОХНЗМ установлена труба 6 из сплава Н65В2МЦ. Для обеспечения требуемого зазора между заготовками и во избежание попадания в него взрывчатого вещества использована специальная крышка 7. Собранные таким образом трубы устанавливали на металлическую пластину 2, затем всю сборку помещали на песчаную основу 1. Для уменьшения разлета взрывчатых веществ (ВВ) использовали забойку из песка 3.

В качестве ВВ использовали аммонит 6ЖВ с насыпной плотностью 1 г/см³.

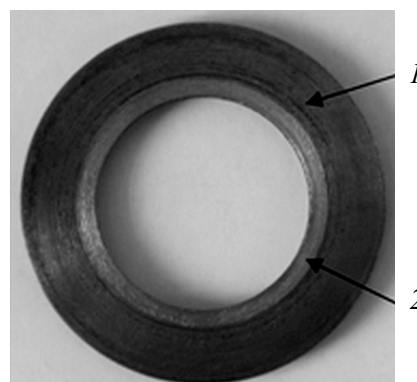


Рис. 2. Кольцевой биметаллический образец. 1 — ОХНЗМ, 2 — Н65В2МЦ.

Образец для исследования (рис. 2) был вырезан с помощью токарно-винторезного станка из середины биметаллической трубы, полученной сваркой взрывом.

Исследование микроструктуры полученных образцов проводили с помощью автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа Zeiss ULTRA plus с приставкой рентгеновского микроанализатора INCA 350 Oxford Instruments. Микротвердость составляющих слоев определяли по методу восстановленного отпечатка вдавливанием алмазного индентора под нагрузкой 100 г на приборе ПМТ-3М.

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 представлена микроструктура зоны соединения «Н65В2МЦ/сталь ОХНЗМ».

Зона соединения исследуемых материалов после СВ представляет собой практически сплошную прослойку, в состав которой входят компоненты свариваемых слоев. Состав переходной структуры почти полностью состоит (в масс. %) из ниобия (47 – 48 %) и железа (45 – 46 %), а так же содержит вольфрам, молибден (около 6 – 8 %), никель и хром (0,6 – 0,9 %). Толщина прослойки достигает 200 – 250 мкм. По всей длине соединения в этой зоне имеются трещины, которые возникли в результате возникновения остаточных напряжений в зоне

Таблица 2

Механические свойства исходных материалов

Марка сплава	Температура испытаний, T, °С	Предел прочности, σ_b , МПа	Предел текучести, $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение, δ , %	Относительное сужение, ψ , %
Н65В2МЦ	20	440 – 470	350 – 400	25 – 28	—
	1250	120 – 140	80 – 110	40 – 45	—
ОХНЗМ	20	950	850	—	40

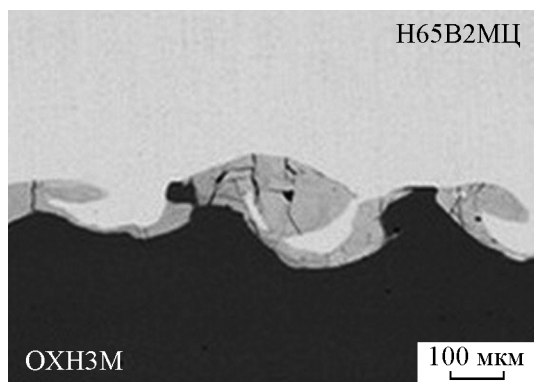


Рис. 3. Микроструктура зоны соединения.

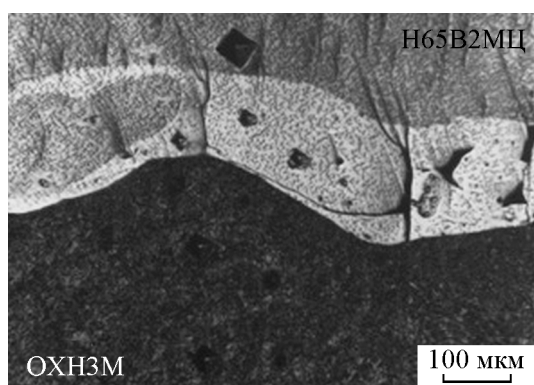


Рис. 4. Отпечатки от алмазного индентора после измерения микротвердости.

соединения. Значения микротвёрдости в плакирующем слое H65B2MЦ, измеренное при нагрузке $P = 100$ г составило 230 HV, в стали ОХНЗМ — 400 HV, в слое переходной структуры — 1200 HV (рис. 4).

Высокая скорость детонации влечет за собой повышение температуры в зазоре между трубами, что провоцирует появление сплошных зон перемешивания и трещин на всю их толщину. Исследование зоны соединения свариваемых материалов выявили наличие интенсивной пластической деформации слоев. При этом волны в соединении не имеют стабильных параметров и правильной формы. Таким образом, режимы СВ требуют корректировки в сторону уменьшения скорости детонации (при использовании смесевых взрывчатых веществ).

Выводы

1. Получено соединение тугоплавкого жаропрочного сплава (H65B2MЦ) с высокопрочной сталью в цилиндрической заготовке со 100 % сплошностью слоев, подтвержденной ультразвуковым контролем.

2. Показано, что использованная схема с синхронным инициированием двух взаимно уравновешивающих зарядов является оптимальной для получения сваркой взрывом цилиндрических изделий.

3. В структуре соединения выявлена сплошная прослойка толщиной 200 – 250 мкм переходной структуры в состав которой входят компоненты свариваемых слоев.

4. Структурный микроанализ зоны соединения слоев показал, что необходима корректировка режимов сварки взрывом в сторону снижения вводимой энергии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-08-00845А.

Литература

1. Чепурко М.И., Остренко В.Я., Когадеев А.А. и др. Производство биметаллических труб и прутков. М.: Металлургия, 1986, 240 с.
2. Макарова Э.Л. Свариваемость материалов. М.: Металлургия, 1991, 523 с.
3. Селиванов В.В., Кобылкин И.Ф., Новиков С.А. Взрывные технологии. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баума, 2008, 648 с.
4. Конон Ю.А., Первухин Л.Б., Чудновский А.Д. Сварка взрывом. М.: Машиностроение, 1987, 216 с.
5. Малахов А.Ю., Первухин Л.Б., Сайков И.В., Вихман В.Б. Создание сваркой взрывом высокопрочных биметаллических материалов с плакирующим слоем на основе ниобиевых и никель-кобальтовых сплавов. Сварочное производство, 2014, № 10, с. 16 – 20.
6. Wei Deng, Ming Lu, Xiaojie Tian, Rxun Dai. Experimental and interfacial waveform investigation on aluminum/stainless steel composite tube by explosive welding. Advanced in Mechanical Engineering and its Applications (AMEA), 2013, no 2, p. 304 – 308.
7. Ehsan Zamani, Gholam Hossien Liaghat. Explosive welding of stainless steel-carbon steel coaxial pipes. Journal Mater. Sci., 2012, no. 47, p. 685 – 695.

References

1. Chepurko M.I., Ostrenko V.Ya., Kogadeev A.A. *Proizvodstvo bimetallicheskih trub i prutkov* [Production of bimetallic pipes and rods]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1986, 240 p.
2. Makarova E.L. *Svarivaemost materilov* [Weldability of materials]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1991, 523 p.
3. Selivanov V.V., Kobylkin I.F., Novikov S.A. *Vzryvnye tehnologii: uchebnik dlya vtuzov* [Explosive technologies: textbook for technical colleges]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2008, 648 p.

4. Konon Yu.A., Pervukhin L.B., Chudnovskii A.D. *Svarka vzryvom* [Explosive welding]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987, 216 p.
5. Malakhov A.Yu., Pervukhin L.B., Saikov I.V., Vikhman V.B. Sozдание svarkoi vzryvom vysokoprochnykh bimetallicheskih materialov s plakiruyuschim sloem na osnove niobievyh i nikel-cobaltovykh splavov [The production of high strength bimetallic materials with a clad layer Nb and Ni-Co alloys by explosive welding]. *Svarochnoe proizvodstvo – Welding industry*, 2014, no. 10, pp. 16 – 20.
6. Wei Deng, Ming Lu, Xiaojie Tian, Rxun Dai. Experimental and Interfacial Waveform investigation on Aluminum/Stainless Steel Composite Tube by Explosive Welding. *Advanced in Mechanical Engineering and its Applications (AMEA)*, 2013, no. 2, pp. 304 – 308.
7. Ehsan Zamani, Gholam Hossien Liaghat. Explosive welding of stainless steel–carbon steel coaxial pipes. *Journal Mater. Sci.*, 2012, no. 47, pp. 685 – 695.

Статья поступила в редакцию 17.04.2015 г.

Малахов Андрей Юрьевич — Учреждение Российской академии наук Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН (ИСМАН, ул. Академика Осипьяна, 8, г. Черноголовка, 142432, Россия), аспирант, инженер-исследователь, специалист в области ударно-волновых процессов. E-mail: sir.malahov2009@yandex.ru.

Сайков Иван Владимирович — Учреждение Российской академии наук Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН (ИСМАН, ул. Академика Осипьяна, 8, г. Черноголовка, 142432, Россия), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, специалист в области ударно-волновых процессов. E-mail: revan.84@mail.ru.

Первухина Ольга Леонидовна — Учреждение Российской академии наук Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения РАН (ИСМАН, ул. Академика Осипьяна, 8, г. Черноголовка, 142432, Россия), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, специалист в области материаловедения и ударно-волновых процессов. E-mail: opervukhina@mail.ru.

Первухин Леонид Борисович — Федеральное государственное унитарное предприятие “Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина” (ФГУП “ЦНИИЧермет им. И.П.Бардина”, Центр физической химии, материаловедения, биметаллов и специальных видов коррозии (ФМК-6 ЦФМК), ул. Радио 23/9, стр. 2, Москва, 105005, Россия), доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией, специалист в области ударно-волновых процессов. E-mail: bitrub@mail.ru.

Cladding explosion of inner part steel tube with heat-resistance niobium alloy

A. Yu. Malakhov, I. V. Saikov, O. L. Pervukhina, L. B. Pervukhin

Features of production two-layer blanks of cylindrical shape to combination layers “heat-resistance niobium alloy N65V2MC+ high-strength steel OHN3M” by explosive welding was investigated. The scheme cladding by N65V2MC alloy the inner part of cylindrical surface OHN3M steel was engineered and received experimental samples with 100% continuity of layers across the length of the blanks. Microanalyses of the joining zone of the layers showed the necessity of optimization regimes of explosion welding for the purpose of reducing the thickness of the transition zone and create a more uniform waveform joining.

Key words: heat-resistant alloy, explosion welding, welding zone, the scheme of explosion cladding, the scheme with simultaneous initiation of opposite charge.

Malakhov Andrei — Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of RAS (ISMAN, Academician Osipyan str., 8, Chernogolovka, Moscow Region, 142432, Russia), postgraduate, research engineer, specialist in shock-wave processes. E-mail: sir.malahov2009@yandex.ru.

Saikov Ivan — Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of RAS (ISMAN, Academician Osipyan str., 8, Chernogolovka, Moscow Region, 142432, Russia), Ph.D., senior researcher, specialist in shock-wave processes. E-mail: revan.84@mail.ru.

Pervukhina Olga — Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science of RAS (ISMAN, Academician Osipyan str., 8, Chernogolovka, Moscow Region, 142432, Russia), Ph.D., senior researcher, specialist of materials science and shock-wave processes. E-mail: opervukhina@mail.ru.

Pervukhin Leonid — I.P. Bardin Central Research Institute for Ferrous Metallurgy (23/9 Radio str., Moscow, 105005, Russia), Dr Sci (Eng), professor, head of laboratory, specialist in shock-wave processes. E-mail: bitrub@mail.ru.