УДК 621.791.13

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-11-246-87-91

*А. Ю. Малахов, канд. техн. наук, И. В. Сайков, канд. техн. наук, И. В. Денисов, канд. техн. наук***СВАРКА ВЗРЫВОМ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ С ВЫСОКОПРОЧНОЙ СТАЛЬЮ***ИСМАН им. А. Г. Мерджанова РАН, г. Черноголовка, malakhov@ism.ac.ru*

В работе были установлены параметры сварки взрывом листов и труб из жаропрочных сплавов Н65В2МЦ/ЭК102 с высокопрочной сталью ОХНЗМ. Выявлено, что для обеспечения прочного сцепления необходимо в разы увеличить кинетическую энергию метаемого элемента из жаропрочного сплава по сравнению со сваркой взрывом стальных листов. Металлографические исследования показали, что при близких режимах сварки взрывом в цилиндрических изделиях количество литых включений значительно увеличено по сравнению с листами, вплоть до появления сплошной прослойки на границе соединения Н65В2МЦ+ОХНЗМ. При этом, биметалл ЭК102+ОХНЗМ имел бездефектную структуру. Механические испытания подтвердили качество соединения.

Ключевые слова: сварка взрывом, ниобиевый сплав, никель-кобальтовый сплав, граница соединения

*A. Yu. Malakhov, I. V. Saikov, I. V. Denisov***EXPLOSIVE WELDING OF HEAT RESISTANT ALLOYS BASED ON REFRACTORY METALS WITH HIGH STRENGTH STEEL***Merzhanov Institute of Structural Macrokinetics and Materials Science RAS, Chernogolovka, malakhov@ism.ac.ru*

In this work, the parameters of explosive welding of plates and pipes from heat resistant alloys with high-strength steel were established. It was found that to ensure strong adhesion, it is necessary to increase the kinetic energy of a flyer plate made of a heat-resistant alloy several times in comparison with the explosion welding of steel sheets. Metallographic studies have shown that at similar modes of explosion welding in cylindrical products, the number of cast inclusions is significantly increased compared to sheets up to the appearance of a continuous layer at the weld interface. Mechanical tests have confirmed the quality of the joint. This material is promising for work in structures experiencing thermal and erosive effects.

Keywords: explosive welding, niobium alloy, nickel-cobalt alloy

Повышение эксплуатационных характеристик изделий, работающих при воздействии на них высоких температур, интенсивного газового потока, механических нагрузок возможно за счёт применения новых композиционных материалов с рабочим слоем их жаропрочных сплавов. Получение прочного соединения таких сплавов с другими металлами часто является трудной технологической задачей, вследствие их тугоплавкости, труднодеформируемости, наличия комплексной оксидной плёнки и др. В основном жаропрочные сплавы используются в авиационном двигателестроении [1, 2].

Одним из способов получения композиционных материалов с резко различающимися свойствами является сварка взрывом.

При данном процессе образование соединения происходит в результате совместной пластической деформации соударяющихся поверхностей. Степень пластической деформации металла в зоне соединения обуславливается кинетической энергией соударения свариваемых металлов [3]. Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования процесса столкновения свидетельствуют о том, что он гармонично вписывается в ряд твердофазных способов соединения металлов, протекающих в условиях термосилового воздействия по единой схеме [4]. В работах [5, 6] была выдвинута гипотеза: в сварочном зазоре впереди точки контакта при гиперзвуковом (5-8 Махов) обтекании свариваемых поверхностей ударно-сжатый газ, нагретый до 3000 К на гра-

нице их раздела, происходит термическая ионизация газа с образованием тонких слоев низкотемпературной нестационарной ударной плазмы. Область ударно-сжатого газа, находящаяся впереди точки контакта в каждый момент времени, имеет конечные размеры, зависящие от режима сварки, длины и ширины листа. Воздействуя на свариваемые поверхности до соударения, ударно-сжатый газ может существенно влиять на качество соединения.

Цель настоящей работы заключалась в разработке схем и режимов сварки взрывом жаропрочных сплавов на ниобиевой и никель-кобальтовой основах с высокопрочной сталью, которые бы обеспечили необходимую степень пластической деформации и термодинамические параметры в сварочном

зазоре, тем самым позволили бы активировать межатомные связи в поверхностном слое и очистить поверхности до начала схватывания свариваемых материалов.

Методика исследования

Расчёт основных параметров сварки взрывом проводился по методикам, указанным в работах [7 ... 9].

Сварка взрывом сплавов Н65В2МЦ и ЭК102 со сталью ОХНЗМ производилась по плоскопараллельной схеме, представленной на рис. 1.

Для сварки взрывом трубных образцов использовались трубы длиной 300 мм из жаропрочных сплавов ЭК102/Н65В2МЦ ($\varnothing 32 \times 2,5$ мм) и стали ОХНЗМ ($\varnothing 55 \times 9$ мм). Согласно разработанной схеме (рис. 2, а) внутри цилиндрической заготовки 8 из ста-

Рис. 1. Схема сборки:

1 – детонатор; 2 – заряд ВВ; 3 – метаемая пластина; 4 – основная пластина; 5 – подкладной лист; 6 – песчаная основа; 7 – технологический элемент; h – сварочный зазор, $H_{ВВ}$ – толщина взрывчатого вещества

а)

б)

Рис. 2. Сборка исходных элементов для сварки взрывом:
а – схема сборки; б – сборка на полигоне

ли ОХНЗМ устанавливается труба 7 из жаропрочного сплава.

Для обеспечения требуемого зазора между заготовками и во избежание попадания в него продуктов детонации взрывчатого вещества использовалась специальная крышка 6. Собранные таким образом трубы уста-

таллов, сплавов, стекла, в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 и ГОСТ 9450-76. Ультразвуковой контроль плоских образцов проводился с использованием прибора УД2В-П45 с отдельно-совмещёнными преобразователями типа П112-2,5 и П112-5. Для проведения УЗК поверхности биметалличе-

Таблица 1 – Параметры сварки взрывом

Материал			Скорость детонации D , м/с*	Параметр r	Скорость метания v_0 , м/с	Кинетическая энергия, ω МДж/м ²	Предел прочности соединения на отрыв $\sigma_в$, МПа
№	Основы	Метаемая пластина					
№	12ХМ	12Х18Н10Т	2400	1,0	446	№	12ХМ
1	ОХНЗМ	Н65В2МЦ	2500	1,6	782	1	ОХНЗМ
2	ОХНЗМ	ЭК102	2500	1,6	782	2	ОХНЗМ
3	ОХНЗМ	ЭК102	2800	2,2	1050	3	ОХНЗМ

навливались на металлическую пластину 2, затем вся сборка помещалась на песчаную основу 1. Для уменьшения разлета взрывчатого вещества использовалась забойка из песка 3 (рис. 2, б).

Изготовление микрошлифов производилось на установке ШЛИФ-1М/V. Микроструктура образцов изучалась с помощью автоэмиссионного сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) сверхвысокого разрешения ZeissUltraplus на базе Ultra 55 с приставкой рентгеновского микроанализа INCA 350 Oxford Instruments. Микротвёрдость определяли методом Виккерса (HV) при помощи микротвёрдомера ПМТ-3, предназначенного для измерения твёрдости ме-

ских цилиндрических заготовок были использованы специальные отдельно-совмещённые преобразователи DFI50410 с частотой 5 МГц.

Результаты и их обсуждение

В результате первого этапа экспериментальной работы были получены образцы листового биметалла размером 11,5(10+1,5)×100×300 мм. Толщина плакирующего слоя составляла 1,5 мм. Ультразвуковой контроль образцов №1 и №3 показал 100% сплошность соединения.

Параметры сварки взрывом и прочность соединения слоёв указаны в таблице 1.

Анализ результатов экспериментов показал, что при параметре $r=1,6$ не обеспечи-

а)

б)

Рис. 3. Граница соединения биметаллических листов:

а – с плакирующим ниобиевым слоем; б – с никель-кобальтовым слоем

Рис. 4. Биметаллические трубные заготовки: а – после ультразвукового контроля; б – кольцевые биметаллические образцы (внутренний слой – жаропрочный сплав, наружный – сталь ОХНЗМ)

Рис. 5. Граница соединения в биметаллических трубах:
а – с плакирующим ниобиевым слоем; б – с никель-кобальтовым

вается равнопрочное соединение ниобиевого сплава Н65В2МЦ с высокопрочной сталью (образец № 1), а при сварке сплава ЭК102 соединение не образовывалось (образец № 2). Увеличение скорости детонации в 1,2 раза и параметра r до 2,2 обеспечило получение равнопрочного соединения сплава ЭК102 со сталью ОХНЗМ (образец № 3).

Металлографические исследования соединения Н65В2МЦ+ОХНЗМ показали, что граница соединения сформирована в виде неравномерной волнистой линии с локальными микроучастками литых включений, расположенных на гребнях волн. Микроструктурные исследования зоны соедине-

ния ЭК102+ОХНЗМ показали, что граница соединения представляет собой равномерную симметричную пологоволнистую линию с длиной волны 900-950 мкм и высотой 200-250 мкм (рис. 3).

На втором этапе были получены биметаллические трубные заготовки длиной 300 мм (рис. 4). Параметры сварки взрывом указаны в таблице 2.

Зона соединения Н65В2МЦ+ОХНЗМ представляла практически сплошную прослойку литых включений толщиной 250-300 мкм. (рис. 5). Микротвердость составляла 1200 НВ.

Характер распределения микротвёрдости

Таблица 2 – Параметры сварки взрывом трубных образцов

№ обр.	Материал	Скорость детонации D , м/с	Параметр r	Скорость метания V_0 , м/с
	Метаемая труба			
1	Н65В2МЦ/ЭК102	3700	1,2	959
2	ОХНЗМ	3700	0,4	413

в зоне соединения Н65В2МЦ+ОХНЗМ типичный для сварки взрывом. Наблюдается упрочнение слоёв в контактной зоне, микротвердость стали ОХНЗМ меняется от 450HV до 510HV, а в сплаве Н65В2МЦ имеет место резкое повышение микротвердости в зоне, прилегающей к границе соединения с 280HV до 480HV. Для биметаллической трубы ОХНЗМ+ЭК102 в стали ОХНЗМ выявлено резкое увеличение значения микротвердости с 460HV на расстоянии 150-200 мкм от зоны соединения до 630-650HV на границе соединения. В слое из жаропрочного сплава ЭК102 микротвердость увеличивается плавно, достигая своего максимального значения на границе соединения.

Проведенные испытания на сплющивание цилиндрических образцов биметалла показали отсутствие участков расслоения и трещин на образцах, что свидетельствует о прочном соединении составляющих слоев.

Выводы

Трудности сварки взрывом сплава ЭК102 с высокопрочной сталью, связанные с наличием стойкой оксидной пленки из оксида хрома на поверхности сплава, его труднодеформируемостью и тугоплавкостью, были преодолены усилением режимов сварки. Эксперименты и механические испытания показали, что для качественной сварки взрывом жаропрочных сплавов с высокопрочной сталью необходимо повысить кинетическую энергию метаемой пластины в 3 раза для сварки ниобиевого сплава и в 7 раз для сварки никель-кобальтового сплава путем повышения скорости детонации. Прочность соединения слоёв для биметалла, содержащего ниобиевый сплав, составляет 250-300 МПа, а для биметалла, содержащего сплав ЭК102, достигает 950-1000 МПа.

Анализ результатов исследований зоны соединения биметаллических трубных заготовок и механических испытаний позволил сделать вывод, что получены качественные двухслойные изделия цилиндрической формы с заданным сочетанием слоев «жаропрочный сплав ЭК102 и высокопрочная сталь ОХНЗМ». Для пары материалов сталь ОХНЗМ и ниобиевый сплав Н65В2МЦ необходима разработка режимов и схемы сварки взрывом для исключения появления сплошных прослоек расплавов, что является дальнейшей целью исследования.

Библиографический список

1. Применение нового жаропрочного сплава ВЖ171 в конструкции перспективного двигателя / Ю. Г. Быков, С. В. Овсепян, И. С. Мазалов, А. С. Ромахов // Вестник двигателестроения. – 2012. – № 2. – С. 246-249.
2. Высокотемпературная прочность ниобиевого сплава 5ВМЦ с силицидно-керамическим защитным покрытием: сообщение 1. Характеристики кратковременной прочности / В. В. Бухановский, В. А. Борисенко, В. К. Харченко, И. Мамулич // Проблемы прочности. – 2004. – № 2. – С. 119-129.
3. Lysak, V. I. Energy balance during explosive welding / V. I. Lysak, S. V. Kuzmin // Journal of Materials Processing Technology. – 2015. – Vol. 222. – Pp. 356-364.
4. Лысак, В. И. Развитие представлений о нижней границе сварки металлов взрывом / В. И. Лысак, С. В. Кузьмин // Автоматическая сварка. – 2009. – № 11. – С. 7-14.
5. Первухин, Л. Б. Очистка свариваемых поверхностей от окислов и загрязнений и их активация в процессе сварки взрывом / Л. Б. Первухин, О. Л. Первухина, С. Ю. Бондаренко // Автоматическая сварка. – 2010. – № 7. – С. 46-49.
6. Первухин, Л. Б. Взаимодействие ударно-сжатого газа в сварочном зазоре со свариваемыми поверхностями при сварке взрывом / Л. Б. Первухин, О. Л. Первухина // Сварочное производство. – 2016. – № 6. – С. 20-25.
7. Конон, Ю. А., Сварка взрывом / Ю. А. Конон, Л. Б. Первухин, А. Д. Чудновский. – М.: Машиностроение, 1987. – 216 с.
8. Дерибас, А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом / А. А. Дерибас. – Новосибирск.: Наука, 1980. – 222 с.
9. Lysak, V. I. Lower boundary in metal explosive welding. Evolution of ideas / V. I. Lysak, S. V. Kuz'min // Journal of Materials Processing Technology. – 2012. – Vol. 212. – Vol. 1. – Pp. 150-156.