

УДК 621.79

**МЕТОДЫ ИССЛЕОВАНИЙ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗ
РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ,
ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ДАВЛЕНИЕМ**

**С. И. Мамчур, Д. Р. Павлов, Н. П. Григорчук,
А. В. Величко, Т. В. Носова, Ю. В. Ткачѐв**

Днепропетровский национальный университет им. Олеся Гончара

Введение. Применение в конструкциях сплавов на основе ниобия, титана, нержавеющей коррозионностойких сталей, магниевых сплавов в различных сочетаниях обеспечивает значительную экономию дорогостоящих материалов, уменьшает вес конструкций, снижает стоимость изделий.

При выборе материалов, применяемых для получения ракетных двигателей, руководствовались следующими соображениями:

– для машиностроения и изделий ракетной техники необходимы биметаллические элементы с сочетанием таких свойств как высокая удельная прочность, коррозионная стойкость в агрессивных средах, повышенная прочность при высоких температурах. Из металлических систем, способных дать такие сочетания в биметаллическом соединении, являются системы титан–ниобий, железо–ниобий, железо–магний, титан–магний;

– исследования по изучению механизма сварки, разработке оптимальных режимов сварки трением с применением моделирования процесса требуют проведения экспериментов на парах с однородными и разнородными физико-химическими и механическими свойствами.

В связи с этим в качестве материалов для исследования были приняты: ниобиевый сплав ВН-2АЭ; титановые сплавы ОТ4 и ВТ6; нержавеющая сталь 12Х18Н10Т; магниевый сплав МА2-1. Химический состав, механические и физические свойства применяемых материалов приведены в таблицах 1–3.

Теоретическое обоснование проблемы. Качество сварного соединения обычно оценивали рядом параметров, среди которых наиболее важное место занимают механические свойства. Такие характеристики, как прочность и пластичность сварных соединений, являются определяющими при разработке режимов сварки материалов, однако для изделий ракетной техники часто учитываются также такие характеристики, как герметичность, стойкость в коррозионных средах, радиационная стойкость и др.

Условия эксплуатации сварных соединений также нередко предъявляют специфические требования к материалам, участвующим в сварном соединении и тогда, при разработке режимов сварки, ориентируются на получение таких характеристик качества, как, например, герметичности, эрозивной стойкости. В этом случае недостаточную прочность или пластичность соединения устраняют конструктивными методами. К таким приёмам прибегают в случае соединения плохо свариваемых материалов. К ним, например, относятся металлы, образующие при сварке интерметаллиды.

Проведённые исследования показали, что разработка режимов сварки материалов, образующих интерметаллиды, также необходимо проводить с ориентировкой на показатели прочности соединения, так как хрупкие

интерметаллиды в большинстве случаев сильно снижают пластические характеристики металла сварной зоны.

Таблица 1

Химический состав применяемых материалов

Марка сплава	Основа	Содержание элементов, %					
		Компоненты		Примеси не более			
ВН-2АЭ	Nb	Mo	Zr	C	Si	Ni	
		3.5–4.7	0.5-0.9	0.05	0.03	0.1	
ОТ4	Ti	Al	Mn	O ₂	N ₂	H ₂	
		2.5–4.2	3.8-2.0	0.15	0.05	0.1	
ВТ6	Ti	Al	V	O ₂	N ₂	H ₂	
		5.0–6.8	3.8-4.8	0.20	0.05	0.1	
12Х18Н10Т	Fe	Компоненты					
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti
		0.1	0.6	1–2	18	10	0.9
МА2-1	Mg	Компоненты					
		Al	Zn		Mn		
		3.8–5.0	0.8–1.5		0.4–0.8		

При разработке технологии сварки деталей давлением в требованиях к качеству сварного соединения часто отсутствуют требования по пластичности и оговариваются требования по прочности и специфические требования, определяющие эксплуатационные качества.

Таблица 2

Физические свойства применяемых материалов

Свойства	Материалы				
	ВН-2АЭ	ОТ4	ВТ6	12Х18Н10Т	МА2-1
Плотность ($\cdot 10^{-3}$), кг/см ³	8,6	4,55	4,43	7,90	1,79
Температура плавления, К	2 703	1 998	2 011	1 693	923
Удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К)	284	502	544	468	1 088

Теплопроводность, Вт/(м·К)	8,1	8,4	7,5	16,3	96,3
Коэффициент линейного расширения ($\cdot 10^{-6}$), К ⁻¹	6,25	8	8,4	16,1	26
Удельное электросопротивление, Ом·м	0,13	0,42	1,6	0,8	0,12

Применительно к материалам, выбранным в качестве объектов исследования в данной работе, по условиям работы необходимо было получить надёжное соединение в следующем сочетании: ОТ4 + ВН-2АЭ; 12Х18Н10Т + ВН-2АЭ; 12Х18Н10Т + МА2-1; ВТ6 + МА2-1; МА2-1 + МА2-1 и 12Х18Н10Т + 12Х18Н10Т. Причём, последние две пары были взяты для сравнения полученных результатов исследований с результатами по их сварке, имеющимися в литературе.

Таблица 3

Механические свойства применённых материалов

Сплав	σ_B	σ_T	δ	ψ	КСУ	НВ	Е
	МПа		%			МПа	
ВН-2АЭ	679–637	441–539	24	40	79–98	1 177–1 569	107 910
ОТ4	686–834	540–638	20–35	20–50	34–64	2 844–3 236	107 910
ВТ6	932–1 079	785–883	8–13	30–45	39–79	3 138–3 530	117 720
12Х18Н10Т	500	196	40	55	147	1 275–1 765	184 428
МА2-1	255	196	10	30	7–8	470–490	44 145

По условиям работы к таким соединениям предъявляются следующие требования: сварное соединение должно быть работоспособным в окружающей среде с давлением $1,333 \cdot 10^{-3}$ Па; коррозионностойким в агрессивной среде; прочность соединения должна составлять не менее 0,8 от прочности менее прочного материала в интервале температур 293...773 К, обладать радиационной стойкостью.

Специфичность условий работы этих сварных соединений, а значит и параметры их качества, определяли такими характеристиками, как внутреннее рабочее давление – до 589 МПа и время работы соединения 600 с.

Таким образом, удовлетворение требований по работоспособности в вакууме, радиационной стойкости, стойкости в агрессивной среде обеспечивается выбором материалов. При разработке технологии сварки заданных сочетаний материалов, основной характеристикой качества сварного соединения является прочность, как главный показатель качества сварки.

Значение прочности при растяжении для рассматриваемых материалов колеблется в довольно больших пределах (от 245 до 1 080 МПа), поэтому для сравнения результатов исследований по сварке в работе принята не прочность сварного соединения, а отношение прочности сварного соединения к прочности основного материала; для сварки разнородных материалов за прочность основного материала принималась прочность менее прочного материала при температуре испытаний на растяжение.

Поэтому в дальнейших исследованиях за показатель, характеризующий качество сварного соединения, была принята относительная прочность сварного соединения при растяжении.

Экспериментальная часть. Установка, на которой была выполнена большая часть экспериментов по сварке (машина МСТ-35), обеспечивает полуавтоматический режим работы с регулированием и регистрацией (при необходимости с записью на осциллограф) всех параметров процесса сварки в широких пределах.

Технические характеристики установки:

номинальная мощность – 4 700 Вт; частота вращения шпинделя – $8...33 \text{ с}^{-1}$; тип привода давления – гидравлический; осевое усиление минимальное – 4 900 Н; осевое усиление максимальное – 78 500 Н; регулировка осевого усиления – плавная; диаметр свариваемых заготовок – $(8...35) \cdot 10^{-3}$; пределы регулирования времени нагрева – $0...120 \text{ с}$; пределы регулирования времени проковки – $0...30 \text{ с}$; производительность установки – $40...50 \text{ св/час}$; напряжение питающей сети – 380 В.

Сварка производилась на образцах: 1) ниобиевый сплав ВН-2АЭ (пруток диаметром $(12...14) \cdot 10^{-3}$ или пластина $(20 \times 20 \times 2) \cdot 10^{-3}$ м) и титановый ОТ4 (пруток диаметром $(15...20) \cdot 10^{-3}$ м); 2) сталь 12Х18Н10Т (пруток диаметром $10 \cdot 10^{-3}$ м); 3) ниобиевый сплав ВН-2АЭ (пруток диаметром $(12...13) \cdot 10^{-3}$ или пластина $(20 \times 20 \times 2) \cdot 10^{-3}$ м) и сталь 12Х18Н10Т (пруток диаметром $(16...18) \cdot 10^{-3}$ м); 4) сталь 12Х18Н10Т (пруток диаметром $(12...13) \cdot 10^{-3}$ м) и магниевый сплав МА2-1 (пруток диаметром $15 \cdot 10^{-3}$ м); 5) титановый сплав ВТ6 (пруток диаметром $(12...16) \cdot 10^{-3}$ м) и магниевый сплав МА2-1 (пруток диаметром $(15...20) \cdot 10^{-3}$ м); 6) магниевый сплав МА2-1 и магниевый сплав МА2-1 (пруток диаметром $(13...14) \cdot 10^{-3}$ м); 7) сталь 12Х18Н10Т и сталь 12Х18Н10Т (пруток диаметром $10 \cdot 10^{-3}$ м). длина образцов из прутка бралась $45 \cdot 10^{-3}$ м и $55 \cdot 10^{-3}$ м, причём меньшие значения для материалов, за счёт которых шла деформация в процессе сварки. При такой длине исходных образцов сварной шов у сваренной заготовки получался, примерно, на середине её длины.

При сварке однородных материалов размеры образца были одинаковые, при сварке разнородных материалов диаметры образцов были разные, причём заготовка, которая деформировалась при сварке, имела больший диаметр. В последнем случае разница в диаметрах заготовок под сварку необходима для их более равномерной деформации в процессе сварки. Это обусловлено тем, что процесс деформации при сварке идёт в основном за счёт менее прочного материала (ОТ4 и ВТ6 при сварке с ВН-2АЭ, 12Х18Н10Т при сварке с с ВН-2АЭ, МА2-1 при сварке с ВТ6 и 12Х18Н10Т) и применение образцов одного диаметра может привести к снижению качества сварного соединения. Увеличение диаметра заготовки измене прочного материала на 10–20 % затрудняет его деформацию, уменьшает раскрытие стыка в процессе сварки и способствует более равномерному распределению давления по свариваемым поверхностям, что обеспечивает получение качественного соединения.

Для обеспечения стабильности механических свойств сварных соединений, свариваемые поверхности заготовок из пруткового материала перед сваркой торцевали на токарном станке до 4–5 класса шероховатости обработанной поверхности и обезжировали. Необходимость очистки свариваемых поверхностей перед сваркой вызвана тем, что образующаяся окисная плёнка и различные загрязнения на поверхности могут привести к изменению значений параметров режима сварки (в данном случае – длительность процесса нагрева), хотя, в конечном итоге, и не оказать существенного влияния на качество сварного соединения.

Верхние границы – достижением максимальной прочности сварного соединения.

За минимальные значения давления нагрева приняты значения, при которых можно было получить сварное соединение. Верхнее определялось в зависимости от свойств исследуемых материалов.

Нижнее значение давления при проковке и 0 длительности проковки соответствовало бесступенчатому циклу давления при сварке, верхнее – достижением качественного сварного соединения.

Для замера температуры в зоне сварки использовались хромель-алюмелевые и платино-платинородиевые термопары. Для чего в невращающейся заготовке с торцевой стороны, противоположной зоне стыка сварного соединения, параллельно оси заготовки сверлились по радиусу отверстия диаметром $(2...2,5) \cdot 10^{-3}$ м, в которых устанавливались термопары. Спай термопары не доходил до стыка на $(0,05...0,10) \cdot 10^{-3}$ м.

При сварке фиксировались следующие параметры: величина осадки при нагреве, время нагрева, скорость относительного вращения, давление при нагреве и проковке, длительность проковки и общая осадка. Изменение параметров при проведении экспериментов представлено в таблице 4.

Нижние значения величины осадки при нагреве определялись достижением прочности, обеспечивающей возможность изготовления из сваренных заготовок образцов для механических испытаний.

Таблица 4

Пределы изменения параметров при проведении экспериментов
по сварке трением

Исследуемые пары	Параметры				
	Δl , м	V, м/с	P_H , МПа	P_n , МПа	τ , с
ОТ4 ВН-2АЭ	1–6	0,5–1,4	8–49	98–400	0–3
12Х18Н10Т ВН-2АЭ	4–12	0,8–1,7	59–147	88–250	0–4
12Х18Н10Т МА2-1	2–15	0,5–1,5	20–100	45–200	0–3
ВТ6 МА2-1	2–12	0,6–1,6	29–59	45–180	0–3
МА2-1 МА2-1	1,5–9	0,8–1,0	10–99	39–150	0–3
12Х18Н10Т 12Х18Н10Т	1–6,5	0,2–1,0	19–98	59–250	0–3

При проведении экспериментов по сварке выбранных пар материалов исходили из следующих положений:

- качество сварного соединения (относительная прочность) наряду с химическими и физико-механическими свойствами, в конечном итоге, определяется технологическими параметрами: величиной осадки при нагреве (Δl), скоростью относительного вращения (V), давлением нагрева (P_H), и проковки (P_n), длительностью проковки (τ) и суммарной осадкой при сварке;

- свариваемые материалы существенно различны по своим механическим и физико-химическим свойствам;

- большинство исследуемых материалов при повышенных температурах склонны к газонасыщению (ВН-2АЭ, ОТ4, ВТ6, МА2-1);

- для набора статистических данных необходимо сравнительно большое количество экспериментов с широкой вариацией параметров режима сварки.

Выводы. Проведенные в работе испытания позволили выбрать оптимальные режимы сварки давлением и получить неразъёмные соединения требуемого качества. Проведённые микроструктурные исследования образцов, полученных с применением разных параметров сварки, показали, что образцы с выбранными параметрами, не имеют сетки интерметаллидов в зоне сварки.

Литература

1. Беляков, И. Т. Основы космической технологии: учебн. пособие для вузов/ И. Т. Беляков, Ю. Д. Борисов. – М. : Машиностроение, 1980. – 184 с.
2. Казаков Н. Ф. Диффузионная сварка в вакууме / Н. Ф. Казаков. – М. : Машиностроение, 1968. – 332 с.
3. Кочергин К. А. Сварка давлением / К. А. Кочергин. – Л. : Машиностроение, 1972. – 212 с.

УДК 621.79

Методы исследований сварных соединений из разнородных материалов, полученных сваркой давлением / С. И. Мамчур, Д. Р. Павлов, Н. П. Григорчук, А. В. Величко, Т. В. Носова, Ю. В. Ткачёв // *Металлознавство та термічна обробка металів: науков. та інформ. журнал / Д. : ДВНЗ ПДАБА, 2014. – № 3. – С. –. Табл. 4. – Бібліограф.: (3 назви).*

Получение неразъёмных соединений требуемого качества из разнородных материалов является необходимым для развития ракетостроения. В работе проведён ряд экспериментов по получению сварных соединений с обеспеченными стабильными механическими свойствами и исследована микроструктура образцов, на основе которых выбраны оптимальные параметры сварки. Проведённые микроструктурные исследования образцов, полученных с применением разных параметров сварки, показали, что образцы с выбранными параметрами, не имеют сетки интерметаллидов в зоне сварки.

Отримання нероз'ємних з'єднань необхідної якості з різнорідних матеріалів є необхідним для розвитку ракетобудування. В роботі проведено низку експериментів з отримання зварних з'єднань із забезпеченими стабільними механічними властивостями та досліджена микроструктура зразків, на основі яких обрані оптимальні параметри зварювання. Проведені микроструктурні дослідження зразків, отриманих із застосуванням різних параметрів зварювання, показали, що зразки з обраними параметрами, не мають сітки інтерметалідів в зоні зварювання.

Obtaining permanent joints of the required quality of dissimilar materials is essential for the development of rocketry. We have made a series of experiments designed to produce welds providing stable mechanical properties and microstructure of the samples studied, which are selected on the basis of optimal welding parameters. Carried microstructural studies of the samples obtained using various welding parameters, showed that the samples of the selected parameters are not in mesh intermetallic weld zone.