

УДК 621.791.72

**И.В. Ситников, Е.С. Саломатова, Т.В. Ольшанская, В.Я. Беленький**

**I.V. Sitnikov, E.S. Salomatova, T.V. Ol'shanskaya, V.Ya. Belen'kiy**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет

Perm National Research Polytechnic University

## **АНАЛИЗ СВАРИВАЕМОСТИ ЖАРОПРОЧНЫХ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ С ТИТАНОВЫМИ СПЛАВАМИ**

### **THE ANALYSIS OF WELDABILITY HEAT RESISTING NICKEL STEEL WITH TITANIUM ALLOY**

Целью данной работы являются анализ свариваемости жаропрочных никелевых сплавов с титановыми сплавами и разработка технологии получения сварных соединений этих материалов. Сварка данных разнородных материалов возможна. Для получения более качественной оценки свариваемости необходимо продолжать исследования в данном направлении.

**Ключевые слова:** свариваемость, разнородные материалы, титановые сплавы, жаропрочные стали, высококонцентрированные источники тепла.

Purpose of the given paper is to analyze the weldability of heat resisting nickel steels with titanium alloys and the development of technology for welded joints of these materials. Welding of dissimilar materials of data is possible. For a more qualitative assessment of the weldability is necessary to continue research in this direction.

**Keywords:** weldability, dissimilar materials, titanium alloys, heat resisting steel, highly concentrated heat sources.

Современное машиностроение развивается в направлении разработки и производства высокотехнологичных конструкций. Одним из направлений повышения качества и снижения материалоемкости изделия является получение сварных соединений из разнородных металлов.

Разнородными металлами обычно принято считать металлы и сплавы на их основе, отличающиеся химическим и базовым составами. Сварные конструкции из разнородных металлов могут различаться между собой сочетанием свариваемых металлов, условиями работы и областью применения. Область применения конструкций со сварными соединениями из разнородных металлов достаточно обширная [1, 2]. Их используют в авиационной, химической промышленности, ракетно-, судостроении.

Для соединения разнородных металлов часто применяют различные способы сварки – как плавлением, так и давлением.

Особенности сварки разнородных материалов в большинстве случаев связаны с существенным различием физических и химических свойств соединяемых материалов. К числу таких особенностей необходимо отнести:

- резкое различие в химическом составе материалов;
- отличие в теплофизических свойствах;
- несовпадение диапазонов сварочных температур одного материала с допускаемой температурой, при которой не происходит ухудшения характеристик другого металла;
- различия электрических и магнитных свойств материалов;
- неодинаковая способность растворять газы;
- несовпадение диапазонов режимов термической обработки, требуемой в ряде случаев для снятия остаточных напряжений.

При сварке разнородных сплавов их склонность к образованию горячих и холодных трещин определяется показателями, характерными для более жаропрочных сплавов, а механические свойства – менее жаропрочных сплавов. На рис. 1 представлена возможность сварки различных разнородных металлов друг с другом [3, 4].

Большое количество сочетаний свариваемых металлов представлено в литературе, однако обширных исследований некоторых вариантов соединений пока не проводилось, и на сегодняшний день существует потребность в их изучении.

	Ag	Al	Au	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Mo	Nb	Ni	Pb	Pt	Re	Sn	Ta	Ti	V	W	Zr
Ag		C	S	X	C	D	C	C	D	X	C	D	N	C	C	S	D	C	D	C	D	D	X
Al	S		X	C	X	X	X	C	X	C	X	X	X	X	C	X	N	C	X	X	X	X	X
Au	S	X		X	X	C	D	S	C	X	X	C	N	S	X	S	N	X	N	X	D	N	X
Be	X	C	X		N	X	X	X	X	X	X	X	X	X	N	X	X	D	D	X	X	X	X
Cd	C	X	X	N		D	D	X	D	S	D	N	N	D	C	X	N	C	N	X	N	N	D
Co	D	X	C	X	D		C	C	C	X	C	X	X	S	C	S	S	X	X	X	X	X	X
Cr	C	X	D	X	D	C		C	C	X	C	S	X	C	C	C	S	C	X	S	D	S	X
Cu	C	C	S	X	X	C	C		C	X	S	D	D	S	C	S	D	C	D	X	D	D	X
Fe	D	X	C	X	D	C	C	C		D	C	C	X	C	C	S	X	X	X	X	S	X	X
Mg	X	C	X	X	S	X	X	X	D		X	D	N	X	X	X	N	X	N	D	N	D	D
Mn	C	X	X	X	D	C	C	S	C	X		D	X	C	C	X	N	X	X	X	X	D	X
Mo	D	X	C	X	N	X	S	D	C	D	D		S	X	D	D	X	D	S	S	S	S	X
Nb	N	X	N	X	N	X	X	D	X	N	X	S		X	N	X	X	X	D	S	S	D	S
Ni	C	X	S	X	D	S	C	S	C	X	C	X	X		C	S	D	X	X	X	X	X	X
Pb	C	C	X	N	C	C	C	C	C	X	C	D	N	C		X	N	C	N	X	N	D	X
Pt	S	X	S	X	X	S	C	S	S	X	X	D	X	S	X		C	X	X	X	X	X	X
Re	D	N	N	X	N	S	S	D	X	N	N	X	X	D	N	C		D	D	X	D	X	X
Sn	C	C	X	D	C	X	C	C	X	X	X	D	X	X	C	X	D		X	X	X	D	X
Ta	D	X	N	D	N	X	X	D	X	N	X	S	D	X	N	X	D	X		S	D	D	X
Ti	C	X	X	X	X	X	S	X	X	D	X	S	S	X	X	X	X	X	S		S	C	S
V	D	X	D	X	N	X	D	D	S	N	X	S	S	X	N	X	D	X	D	S		D	X
W	D	X	N	X	N	X	S	D	X	D	S	D	X	D	X	X	D	D	D	C	D		X
Zr	X	X	X	X	D	X	X	X	X	D	X	X	S	X	X	X	X	X	X	S	X	X	X

Рис. 1. Прогноз возможности сварки разнородных металлов по диаграммам состояния: X – свариваемые пары, образующие интерметаллические соединения; S – хорошо свариваемые пары, образующие твердые растворы; C – поддающиеся сварке пары, отличающиеся образованием сложной микроструктуры; D – данных недостаточно, для сварки необходимы особые меры; N – сведения отсутствуют

Одним из таких сочетаний является жаропрочный никелевый сплав – титановый сплав. В настоящее время для сварки этого сочетания металлов оптимальные режимы сварки не определены, поэтому требуется проводить исследования в данной области.

Свариваемость жаропрочных никелевых сплавов определяется их склонностью к образованию трещин при сварке, термической обработке и степенью разупрочнения сварных соединений. В зависимости от содержания алюминия и титана (таблица) сплавы классифицируются как хорошо и удовлетворительно свариваемые, удовлетворительно свариваемые, склонные к образованию температурных трещин, и ограниченно свариваемые [5].

Влияние содержания Al и Ti на свариваемость жаропрочных никелевых сплавов

Сплав	Содержание, %	
	Al	Ti
Хорошо свариваемые		
ЭИ435 (ХН78Т)	<0,15	0,15–0,35
ЭИ602 (ХН75МБТЮ)	0,35–0,75	0,35–0,75
ЭИ868 (ХН60ВТ)	<0,5	0,3–0,7
Удовлетворительно свариваемые		
ЭП437 (ХН30ВМТ)	<0,5	1,8–2,3
ЭИ437Б (ХН77ТЮР)	0,6–1,0	2,4–2,8
ЭП718 (ХН45МВТЮБР)	0,9–1,4	1,9–2,4
Удовлетворительно свариваемые, склонные к образованию температурных трещин		
ЭП708 (ХН62МВЮТ)	1,9–2,3	1,0–1,4
ЭИ698 (ХН73МБТЮ)	1,4–1,8	2,35–2,75
ЭП199 (ХН56МВТЮ)	2,1–2,6	1,1–1,6
Ограниченно свариваемые		
ЭИ826 (ХН70ВМТЮР)	1,7–2,2	2,4–2,9
ЭП742 (ХН62БМКТЮ)	2,4–2,8	2,4–2,8
ЭП881 (ХН55ТВКТЮР)	3,0–3,5	1,8–2,5

Основная проблема сварки титановых сплавов – получение сварных соединений с хорошей пластичностью, зависящей от качества защиты и чувствительности металла к термическому циклу сварки. Заметное насыщение металла шва кислородом, азотом и водородом в процессе сварки происходит при температуре  $\geq 350$  °С. Это резко снижает пластичность и длительную прочность сварных конструкций, поэтому зона сварки, ограниченная изотермой  $\geq 350$  °С, должна быть тщательно защищена от взаимодействия путем сварки в среде инертных газов высокой чистоты, под специальными флюсами, в вакууме. Таким образом титановые сплавы обладают удовлетворительной свариваемостью.

Наиболее распространенными дефектами сварных соединений из титановых сплавов являются поры и холодные трещины. Основная причина обра-

зования пор в швах – газовые примеси (в первую очередь водород), растворенные в основном и присадочном металле и адсорбированные на проволоке, флюсе и поверхностях свариваемых кромок. Поры в сварных соединениях, чаще всего располагающиеся в виде цепочки по зоне сплавления, снижают их статическую и динамическую прочность.

Для сварки жаропрочных никелевых сплавов применяют следующие способы сварки: газовую, ручную дуговую, под флюсом, вольфрамовым электродом в среде инертных газов, электронно-лучевую и диффузионную.

Для сварки титановых сплавов применяют следующие способы сварки: под слоем флюса, аргоно-дуговую сварку неплавящимся электродом, сварку давлением, электронно-лучевую, лазерную, плазменную сварку и др.

Наиболее оптимальным способом сварки для обоих материалов является сварка высококонцентрированными источниками нагрева (электронно-лучевая, лазерная и плазменная сварка). Их можно применять для всех сплавов, свариваемых другими способами, а также для сплавов, которые до последнего времени считались трудносвариваемыми. Этим способом можно сваривать материалы различных толщин и, что особенно важно для жаропрочных никелевых сплавов, за один проход с большой скоростью. Сварные соединения имеют высокие эксплуатационные свойства [6, 7].

Титан хорошо сваривается с небольшим числом металлов (цирконием, гафнием, ниобием, танталом и ванадием) в связи с их неограниченной взаимной растворимостью.

Сварка титановых сплавов с распространенными сплавами на основе никеля затруднена в связи с большими различиями в кристаллохимических и физических свойствах и со сложностью ограничения процессов взаимной диффузии, приводящих к развитию химической неоднородности и появлению хрупких промежуточных фаз и соединений. Наличие интерметаллидов в сплаве титана с никелем значительно повышает прочность металла и резко снижает его пластичность.

Получение сварных соединений титановых сплавов со сплавами на основе никеля с помощью сварки плавлением возможно при сварке через промежуточные вставки и с расплавлением более легкоплавкого из соединяемых металлов.

При использовании первого метода в качестве промежуточных вставок можно использовать монель-металл (сплав на основе никеля, до 67 % Ni, до 38 % Cu), ванадий, легированный вольфрамом или хромом (5–10 %).

При использовании второго метода применяют сварку-пайку в процессе расплавления только сплава на основе никеля без расплавления титанового сплава. Химическая связь в таких соединениях образуется в процессе смачивания жидким металлом поверхности твердого металла [2, 8].

Таким образом, говоря о свариваемости жаропрочных никелевых сплавов с титановыми сплавами, можно сделать вывод о том, что сварка данных разнородных материалов возможна. Для получения более качественной оценки свариваемости нужно продолжать исследования в данном направлении.

Для разработки технологии получения сварных соединений на данном этапе работы необходимо подобрать оптимальные режимы электронно-лучевой сварки и выполнить сварку нескольких образцов для дальнейшего их исследования.

### Список литературы

1. Будкин Ю.В. Электронно-лучевая сварка тонкостенных конструкций из разнородных металлических материалов // Сварочное производство. – 2009. – № 11. – С. 37–42.
2. Будкин Ю.В. Получение сварных соединений из разнородных металлов // Сварочное производство. – 2010. – № 1. – С. 13–16.
3. Николаев Г.А. Сварка в машиностроении: справ. изд.: в 4 т. / под ред. А.И. Акулова. – М.: Машиностроение, 1978. – 462 с.
4. Ольшанская Т.В. Конструкционные материалы. Свариваемость и сварка: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. – 242 с.
5. Волченко В.Н. Сварка и свариваемые материалы: в 3 т. Т. 1. Свариваемость материалов / под ред. Э.Л. Макарова. – М.: Металлургия, 1991. – 528 с.
6. Сорокин Л.И. Свариваемость жаропрочных никелевых сплавов (обзор). Часть 1 // Сварочное производство. – 2004. – № 9. – С. 3–7.
7. Сорокин Л.И. Свариваемость жаропрочных никелевых сплавов (обзор). Часть 2 // Сварочное производство. – 2004. – № 10. – С. 8–17.
8. Рябов В.Р. Сварка разнородных металлов и сплавов. – М.: Машиностроение, 1984. – 239 с.

Получено 21.09.2016

**Ситников Илья Владимирович** – магистрант кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов», механико-технологический факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: [www.sitya@mail.ru](mailto:www.sitya@mail.ru).

**Саломатова Екатерина Сергеевна** – аспирант кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов», механико-технологический факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: [weld-katy@mail.ru](mailto:weld-katy@mail.ru).

**Ольшанская Татьяна Васильевна** – кандидат технических наук, доцент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: [mtf@pstu.ru](mailto:mtf@pstu.ru).

**Беленький Владимир Яковлевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Сварочное производство и технология конструкционных материалов», декан механико-технологического факультета, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: [mtf@pstu.ru](mailto:mtf@pstu.ru).