

Получение сваркой взрывом и свойства композитов TiNi-сталь

О.Е. Рубаник, д.т.н., проф. В.В. Клубович, Институт технической акустики НАН Беларуси
к.ф.-м.н. В.В. Рубаник мл., Витебский государственный технологический университет

Abstract: *In terms of materials technology promising method for TiNi joining with other metals is welding explosion. Due to its fleeting, it suppresses the development of active diffusion processes at the interface between dissimilar metals and alloys that allows effective joining. Bimetallic samples obtained by explosive welding of nitinol (Ti-54 %Ni) and stainless steel plates. Differential scanning calorimetry testing showed that explosive welding leads to strong increasing of temperature ranges of both the direct and reverse transformations and decreasing of the latent heat phase transformation. The follow-up heat treatment restores the thermoelastic properties of TiNi, the characteristic temperatures and the latent heat of transformations corresponds to the values of the original material. Welding provides high adhesion between the components, melting of metal parts, pores, cracks and other defects are not observed.*

Key words: *welding, shape memory effect, nitinol.*

В последнее время одной из актуальных задач является создание новых интеллектуальных устройств, основу которых составляют «умные» материалы, т.е. материалы, обладающие следующими основными функциями: чувствительность (учитывает изменения окружающей среды), побуждаемость (оценивает ситуацию и побуждает активационную функцию) и активационная (реализует отклик материала на изменение внешних условий).

Несомненно, сплавы с памятью формы (ПФ) удовлетворяют всем вышеперечисленным функциональным свойствам [1]. Например, в сплаве TiNi при повышении температуры происходит процесс обратного мартенситного превращения, и сплав способен изменять свою форму. Поэтому он используется при разработке различных силовых элементов, которые представляют собой взаимосвязанную пару из сплава с ПФ и упругого контртела и использующих работу материала. Сплав с ПФ во время нагрева способен совершать определенную работу, деформируя при этом контртело и тем самым, запасая упругую энергию в системе. При охлаждении контртело деформирует сплав с ПФ (реализуется эффект пластичности превращения), высвобождая запасенную энергию. Жесткость контртела определяет величину рабочего хода и усилий, развивающихся в сплаве с памятью формы. В качестве контртела или возвратного элемента используют различные устройства: пружины, пластины и т.д., выполненные из упругих материалов, например, стали. Таким образом, основное назначение никелида титана в интеллектуальных устройствах – функция силового привода для создания усилий и перемещений в ответ на изменение внешних условий. Важным преимуществом таких силовых элементов является то, что им можно задавать любой вид деформации: сжатие, растяжение, изгиб или/и их сочетание, которые в процессе нагрева в заданной последовательности восстанавливаются. В свете вышесказанного актуальной представляется задача соединения TiNi сплава с упругим металлом в биметаллическую композицию.

Однако соединение никелида титана с другими металлами является сложным технологическим процессом. Основная проблема при получении композитов – это обеспечение адгезии между матрицей и сплавом с памятью формы и необходимых параметров фазового перехода в композиционном материале, которые обуславливают функциональную пригодность композита, а также стойкость композита к термодиклированию. Часто получаемые соединения обладают низкой прочностью, что препятствует разработке новых приборов и приспособлений работающих на эффекте памяти формы. В настоящее время в основном для соединения TiNi с металлами и сплавами используют сварку трением, контактную и лазерную сварку, причем последняя используется для соединения малогабаритных изделий.

Сварка трением. Сварка за счет трения – сравнительно новый способ получения неразъемных соединений разнородных металлических материалов. Его технологической основой является цилиндрический профилированный вращающийся стержень (инструмент), который соприкасается с металлом в месте

предполагаемого соединения прижатых друг к другу заготовок. В результате трения происходит разогрев заготовок до температур размягчения, но не плавления. Перемещение инструмента вдоль линии контакта инициирует интенсивное перемешивание металла и формирование сварного шва. Метод является достаточно перспективным и интенсивно изучается с привлечением физико-аналитических методов. Однако выводы и технологические рекомендации, к которым приходят разные авторы, порой противоречивы. Результаты опубликованных работ подтверждают известные факты образования неоднородной структуры зерен в зоне сварки. На шлифах и поверхностях изломов разрушенных образцов в зоне сварного соединения присутствуют фрагментации высокопрочных интерметаллидных фаз [2, 3]. Поэтому данный способ сварки для соединения TiNi образцов не получил широкого распространения.

Лазерная сварка. Лазерная сварка нитинола применяется в основном для сварки TiNi сплавов между собой [4, 5]. Число материалов, которые можно сварить лазером с TiNi, очень ограничено. Среди них – тантал, медь и платина. Недостатком сварки плавлением TiNi с нержавеющей сталью, титаном и никелем является образования ломких интерметаллических фаз, что сдерживает ее практическое применение. Был разработан интересный способ для соединения TiNi с несходными материалами, использующий лазерную пайку твердым припоем, когда локальный нагрев соединяемых участков может сохранять эффект памяти формы и свойство суперэластичности. Однако высокие температуры твердого припоя (800-900°C) и низкие скорости охлаждения (по сравнению со сваркой) приводят к изменению исходной микроструктуры материала.

Контактная сварка. Во время контактной сварки сварной шов располагается между двумя охлаждаемыми и хорошо проводящими электродами, при этом сжимающая сила в зоне сварного шва передается через эти электроды [2, 6]. При последующем охлаждении сварной шов находится под воздействием большой сжимающей силы, так что образовавшиеся во время сварки усадочные трещины как бы «захлопываются» под воздействием этой гигантской сжимающей силы. Таким образом, давление проковки предотвращает образование трещин, противодействуя усадочным напряжениям в сварном шве. Граница зерна интерметаллической фазы нечеткая и более равномерно распределяется в сварном шве. Однако наблюдается тенденция развития трещин в основном металле, или зоне термического влияния. Наиболее вероятная причина такого растрескивания – перегревание зоны во время сварки. Чрезмерное перегревание может вызвать плавление границы раздела материалов или ликвацию.

Сварка взрывом. Сварка взрывом является одним из эффективных методов создания качественных слоистых материалов различного назначения. Это высокоэкономичный и производительный процесс, который не требует дорогостоящего оборудования и оснастки. Из-за своей быстротечности, он подавляет развитие активных диффузионных процессов на границе раздела разнородных металлов и сплавов, позволяет получать равнопрочные соединения из практически любых сочетаний металлов и сплавов площадью до нескольких квадратных метров [7]. Метод сварки взрывом основан на высокоскоростном косом соударении двух металлических пластин. В зависимости от скорости столкновения получают либо волнистую, либо плавную границу соединения. Необходимо отметить, что если требуется последующая обработка образца, такая, как прокатка или волочение, то плавная граница более предпочтительна, поскольку облегчает эти технологические процессы.

Схемы проведения сварки взрывом достаточно известны [7]. Метаемая пластина, покрытая однородным слоем взрывчатого вещества, устанавливается на поверхности опорной плиты с некоторым зазором. При инициировании детонации метаемая пластина в одном конце начинает быстро изгибаться под углом, стремясь с определенной скоростью к плите, и сталкивается с опорной плитой под углом (рис. 1).

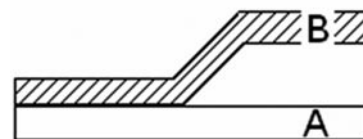


Рисунок 1 – Схема проведения сварки взрывом: А – опорная плита, В – метаемая пластина

Если скорость пластины слишком большая, то большая кинетическая энергия преобразуется в тепло и ведет к расплавлению материала. Вследствие этого образуются нежелательные интерметаллидные фазы.

Двухслойные соединения TiNi-сталь. Для исследования были использованы листовые пластины никелида титана (*Ti-54 вес. %Ni*) толщиной 2 мм и пластины стали марки (*12X18H10T*) толщиной до 5 мм. Для выбранного TiNi сплава прямой и обратный фазовые переходы реализуются по схеме B2→B19'. Электронно-микроскопические исследования показали (рис. 2), что сварка взрывом обеспечивает высокую адгезию между сплавом с ЭПФ и металлом, отсутствуют участки оплавленного металла, поры, трещины и другие дефекты [8]. Подвергнув поверхность образца химическому травлению и исследовав микроструктуру сварного соединения получили незначительные изменения распределения элементов в зоне сварки. Сварной шов

имеет волновой характер раздела, что является оптимальным с технологической точки зрения, обеспечивает сильную блокировку двух металлов.

Для более наглядного представления картины распределения элементов вблизи сварного шва, рассмотрен участок сварного соединения в плоскости, перпендикулярной границе раздела (рис. 3). Установлена также зависимость весового процента содержания элементов соединения в плоскости, перпендикулярной границе шва (рис. 4).

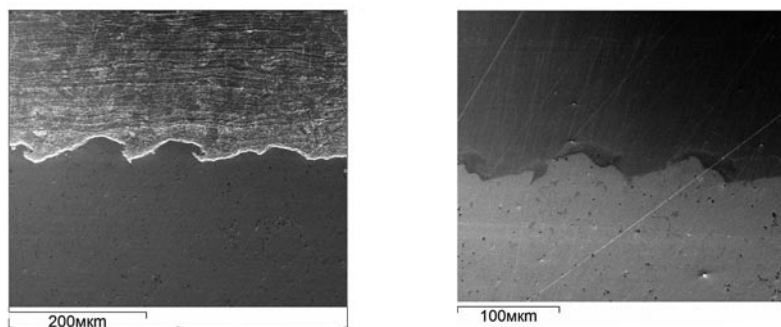


Рисунок 2 – Микроструктура сварного шва

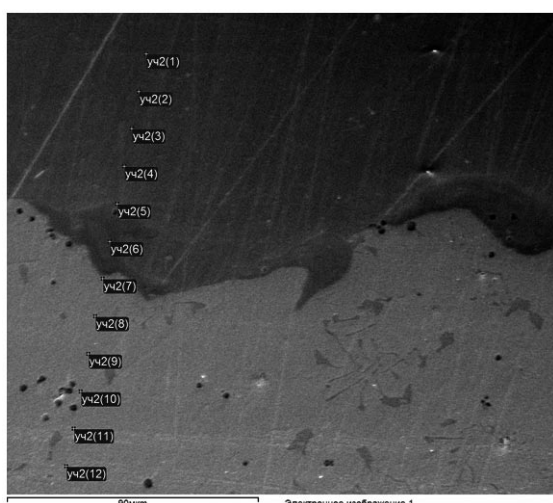


Рисунок 3 – Исследуемый участок сварного соединения

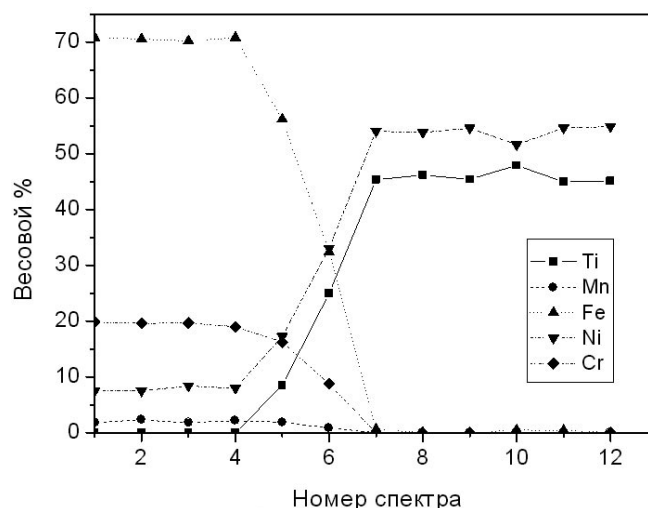


Рисунок 4 – Кривые распределения элементов (весовой %) в зоне сварного шва до травления

Обнаружено, что сварка взрывом приводит к увеличению температурных интервалов как прямого, так и обратного превращений и уменьшению скрытой теплоты фазового перехода. Причина такого увеличения интервалов может быть связана с сильной пластической деформацией, приобретенной образцами в процессе изготовления.

Для того чтобы снять действие пластического деформирования образцы отожгли при температуре от 500°C и выше. Последующие измерения теплового потока в дифференциальном сканирующем калориметре показали, что отжиг приводит к восстановлению температурных интервалов мартенситных превращений. При этом, как прямое, так и обратное превращения реализуются в две стадии. Специальное исследование изменения потока тепла при охлаждении в интервале неполного прямого перехода показало, что двухстадийное тепловыделение не связано с реализацией $B2 \rightarrow R \rightarrow B19'$ превращения. Таким образом, и прямое и обратное превращение происходит по схеме $B2 \rightarrow B19'$. При этом скрытая теплота превращения увеличивается до 9,5 Дж/г.

Проведенные измерения относительного электрического сопротивления недеформированного и деформированного образцов также подтверждают изменение характеристических температур материала после сварки взрывом. Необходимо отметить, что в зависимости от исходного фазового состояния никелида титана при сварке взрывом могут образовываться трещины, что приводит к неустраняемому браку заготовки.

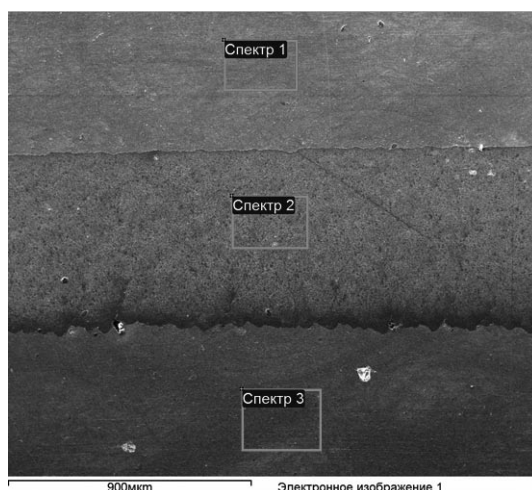


Рисунок 5 – Микроструктура сварного соединения сталь-TiNi-сталь

Таблица – Содержание элементов соединения

№ спектра	Ti, %	Cr, %	Fe, %	Ni, %
Спектр 1	1.00	18.13	70.13	10.74
Спектр 2	46.28	0.00	0.00	53.72
Спектр 3	0.97	17.93	70.79	10.30

Трехслойное соединение сталь-TiNi-сталь. Слои металла наносили друг на друга методом сварки взрыва в два этапа. Вначале проводили сварку пластин TiNi-сталь, затем на двухслойный пакет наносился третий слой – нержавеющая сталь [10]. Такая технология обеспечивала получение прочного трехслойного соединения с границами сталь-TiNi и TiNi-сталь (рис. 5). Как видно на рисунке 6, на границах соединения, полученного сваркой взрывом, не происходит образования физических и химических неоднородностей, т.е. отсутствуют различного рода дефекты. Здесь же приведена зависимость весового процента содержания элементов соединения в плоскости перпендикулярной границе шва. Происходит образование прочного соединения слоев металла в твердой фазе.

Методами ДСК установлено, что во всех образцах, полученных сваркой взрывом, в незначительной степени сохраняются термоупругие свойства. При этом высокоскоростное деформирование приводит к некоторому расширению температурных интервалов превращений и скрытой теплоты превращений. При последующей термообработке термоупругие свойства TiNi восстанавливаются, характеристические температуры и скрытая теплота превращений соответствует значениям исходного материала [23]. Т.е. сварка взрывом, как технологический процесс не приводит к необратимым изменениям свойств термоупругих фазовых превращений в TiNi.

Выводы. Таким образом, сварка за счет высокоскоростного соударения пластин при подрыве взрывчатого вещества обеспечивает высокую адгезию между сплавом с ПФ и металлом. Сварной шов имеет волновой характер раздела и обеспечивает блокировку двух металлов. При этом сплав TiNi сохраняет термоупругие свойства. Однако наблюдается расширение температурных интервалов превращений и уменьшение скрытой теплоты превращения, что связано с сильной пластической деформацией TiNi в процессе сварки.

Применяемая технология сварки взрывом позволяет получать композитные материалы, сочетающие как функции исполнительного механизма с ПФ, так и контртела. Установлено, что посредством подбора режимов термообработки можно полностью восстановить термоупругие свойства TiNi сплава, подвергнутого высокоскоростной деформации сваркой взрывом. Биметалл, включающий сплав TiNi с памятью формы, может с успехом использоваться при разработке термореле, термopереклyчателeй, терморегуляторов и других устройств [11].

Литература:

1. Ооцука, К. Сплавы с эффектом памяти формы / К.Ооцука, К.Сумидзу, Ю.Судзуки и др.// Под ред. Х.Фунакубо: Пер. с японск.– М.: Металлургия, 1990.– 224 с.

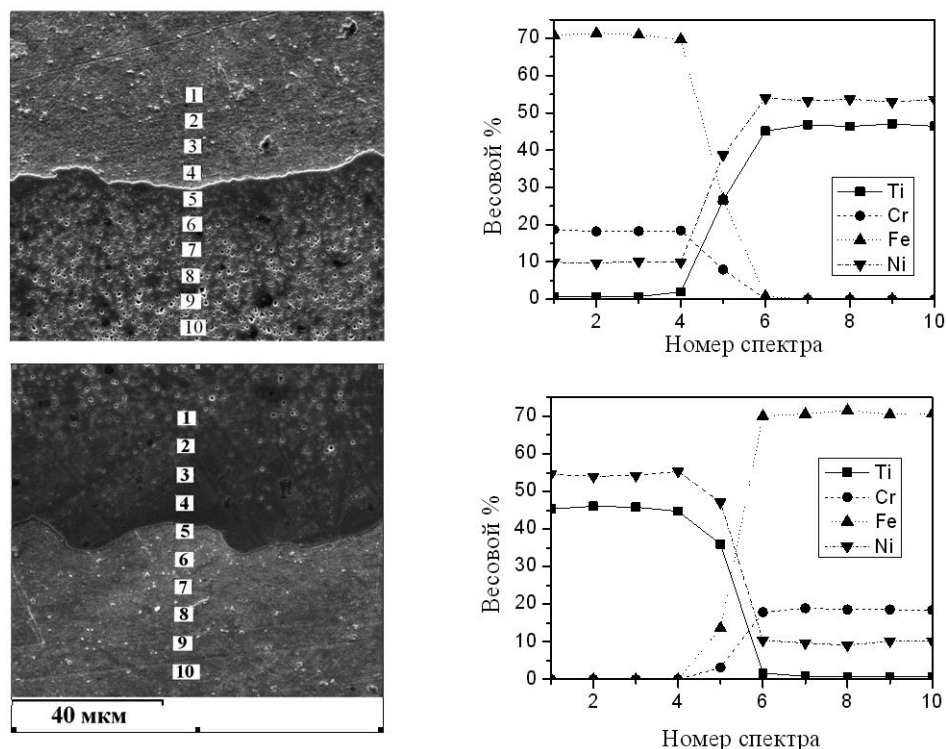


Рисунок 6 – Микроструктура сварного соединения сталь-TiNi-сталь и распределение элементов

- Wang, G. Welding of nitinol to stainless steel / Ge Wang // SMST-97: Proceeding of the 2 International conference on shape memory and superelastic technologies. – Asilomar, California, USA, 1997. – P. 131-136.
- Fuji, A. Friction welding of titanium alloy to stainless steel / A.Fuji, T.H.North, K.Ameyama, M.Futamata // Materials Sci. Technol., 1992. – Vol. 3 – P.219
- Schloßmacher, P. Laser-welding of a Ni-rich TiNi shape memory alloy: pseudoelastic properties / P. Schloßmacher, T. Haas, A. Schüßler // SMST-97: Proceeding of the 2 International conference on shape memory and superelastic technologies. – Asilomar, California, USA, 1997. – P. 137-142.
- Schuessler, A. Laser processing of nitinol materials / A. Schuessler // SMST-2000: Proceeding of the International conference on shape memory and superelastic technologies. – Asilomar, California, USA, 2000. – P. 25-32.
- Hall, P. Resistance welding Ti-rich nitinol wire / P.C.Hall // SMST-2001: Proceeding of the International conference on shape memory and superelastic technologies. – Asilomar, California, USA, 2001. – P. 67-74.
- Захаренко, И.Д. Сварка металлов взрывом. Минск, Наука и техника. 1990. 205 с.
- Рубаник, О.Е. Получение тонколистовых биметаллических соединений на основе никелида титана / О.Е. Рубаник, В.В. Клубович, В.В. Рубаник, В.В. Рубаник (мл.) // VI МНТК «Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин». – Новополоцк, 2007. – С. 69-71.
- Prümmer, R. Nitinol-stainless steel compound material, made by explosive welding / R.Prümmer, D.Stöckel // http://www.nitinol.info/pdf_files/014.pdf.
- Рубаник, О.Е. Получение трехслойных соединений СТАЛЬ-NiTi-СТАЛЬ сваркой взрывом / О.Е.Рубаник, В.В.Рубаник (мл.), В.В.Клубович, И.В.Петров // XLVI междунар. конф. «Актуальные проблемы прочности»: материалы конф.: в 2-х ч.– Витебск, 2007. – Ч.1. – С. 330-331.
- Хусаинов, М.А. Биметаллический хлопун / М.А. Хусаинов, В.В.Рубаник, А.Б.Бондарев, Г.В.Пластинка // XLVI междунар. конф. «Актуальные проблемы прочности»: материалы конф.: в 2-х ч., 15-17 октября 2007 г., Витебск. – Витебск, 2007. – Ч.1. – С. 293-294.