



## СВАРИВАЕМОСТЬ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ Ni–Ti С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Академик **Б. Е. ПАТОН**, **Д. М. КАЛЕКО**, канд. техн. наук, **В. П. ШЕВЧЕНКО**, инж.

(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),

чл.-кор. НАН Украины **Ю. Н. КОВАЛЬ**, **В. Н. СЛИПЧЕНКО**, инж., **Л. М. НЕГАНОВ**, канд. техн. наук,

**Р. Я. МУСИЕНКО**, канд. физ.-мат. наук (Ин-т металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАН Украины)

Для соединения сплавов системы Ni–Ti малого свариваемого сечения наиболее перспективны методы сварки с импульсным нагревом. Исследованы характеристики соединений проволоки и фольги, полученные способами точечной сварки разрядом конденсаторов и переменным током, ударной конденсаторной и лазерной сварки. С использованием методов оптической и рентгеновской микроскопии, микрорентгеноспектрального анализа, резистометрии и трехточечного изгиба показано, что способы конденсаторной и лазерной сварки не изменяют химический состав материала, его термомеханические свойства вблизи места сварки и могут быть рекомендованы для использования при изготовлении изделий из нитинола.

*Ключевые слова:* точечная конденсаторная сварка, ударная конденсаторная сварка, лазерная сварка, термоупругие сплавы, нитинол, микроструктура, механические свойства, термомеханические свойства

В последние десятилетия конструкторы и дизайнеры все чаще обращают внимание на так называемые сплавы с эффектом памяти формы (СЭПФ). Эти сплавы имеют две главные особенности, наиболее привлекающие разработчиков новых изделий, приборов и аппаратов: возможность восстановления заданной формы при нагреве до определенной температуры предварительно деформированного изделия (память формы) и проявление значительной упругой деформации, большей, чем у большинства других металлов и сплавов (сверхупругость).

В настоящее время эффект памяти формы найден и изучен во многих сплавах: Ni–Ti, Fe–Ni, Cu–Al, Cu–Mn, Cu–Al–Ni, Co–Ni, Ni–Al, Cu–Zn–Al и др. [1, 2]. Из этого ряда нами была выбрана система Ni–Ti (нитинолы), нашедшие применение как в технике, так и в медицине благодаря высокой коррозионной стойкости в живом организме, а также биологической совместимости, которая подтверждена во многих примерах имплантации протезов, фиксирующих деталей (скобок, крепок, клипс и т. п.) и приводных механизмов [1, 3–5].

Сварка нитинола между собой и с другими конструкционными материалами может в значительной мере облегчить решение конструкторских задач при создании сложных изделий разного, в том числе и медицинского назначения. Однако при сварочном нагреве возможен распад интерметаллидов эквиатомного состава с образованием  $Ti_2Ni$  и  $TiNi_3$  [3] и появление внутренних термических напряжений, что может привести к из-

менению температурного интервала мартенситного превращения и степени восстановления формы. Сведений об этом еще недостаточно, что сдерживает разработку технологии обработки термоупругих сплавов и изделий из них и соответственно их применение.

Для соединения сплавов системы Ni–Ti ранее были использованы такие процессы сварки плавлением, как сварка вольфрамовым электродом в инертном газе, лазерная и электронно-лучевая сварка. При сварке плавлением возникает несколько проблем, которые приводят к растворению кислорода, водорода и азота, потере сверхупругости и эффекта памяти формы в металле ЗТВ, формированию названных выше интерметаллидных соединений, хрупких и не имеющих памяти формы [6–10]. В результате этого даже при сохранении последней при сварке 10-киловаттным лазером листа нитинола толщиной 3 мм прочность соединения на разрыв оказалась низкой из-за крупного размера зерна в зоне плавления. Вместе с тем поверхностный нагрев нитинола ультракороткими импульсами [11] не приводит к ухудшению структуры.

Перечисленные выше недостатки сварки плавлением вызвали необходимость поиска приемлемых решений среди способов соединения в твердом состоянии, таких как сварка трением или взрывом, контактная, диффузионная и ударная конденсаторная сварка.

В соответствии с данными Edison Welding Institute [12] при сварке сопротивлением нитинол демонстрирует достаточную сверхупругость даже без дополнительной термической обработки сварного образца (в работе не приведены сведения о сохранении при этом процессе критических температур мартенситного превращения).



Таблица 1. Режимы точечной двухимпульсной сварки переменным током фольги из нитинола

№ образца	Толщина фольги, мкм	Значение тока в делениях регулятора тока РКС801	Время нагрева (1-й импульс), мс	Время охлаждения, мс	Время нагрева (2-й импульс), мс	Усилие сжатия, Н	Степень трансформатора
1-1	85	0	3	9	3	10	1
2-1	85	0	3	9	3	10	1
3-1	85	4	3	9	3	10	1
4-1	50	0	1	0	0	10	1
5-1	85	1	1	0	0	36	2
6-1	50	1	1	0	0	36	3
7-1	52	1	1	0	0	36	3
8-1	52	1	1	0	0	36	2

Таблица 2. Режимы точечной конденсаторной сварки

№ образца	Толщина фольги, мкм	Емкость конденсаторов, мкФ	Коэффициент трансформации	Усилие сжатия, Н
1-2	50	20	240	45
2-2	50	10	240	45
3-2	52	20	240	45
4-2	52	10	240	45
5-2	85	20	240	45
6-2	85	10	240	45
7-2	180	20	240	45
8-2	180	10	240	45

Сварка трением [7] является перспективным процессом для соединения СЭПФ, но имеются геометрические ограничения по форме свариваемых деталей, создающие проблему для широкого применения этого способа сварки.

Термодеформационный цикл стыковой ударной конденсаторной сварки [13] привел к охрупчиванию сварного соединения нитиноловой проволоки диаметром 1,8 мм. Применение защитного газа и дополнительная термообработка сварных соединений [14] позволили получить образцы с характеристиками, достаточными для практического применения.

Хороший результат получен при сварке взрывом нитинола со сплавом АМг6 [15]. Контрольные образцы соединений имели минимальное количество дефектов типа интерметаллидных прослоек, усадочных раковин, пор и т. п., сохраняли эффект памяти формы нитинола и состояние поверхности сваренных деталей.

Отмеченное выше свидетельствует, что сварка нитинола малого сечения (фольга, проволока), имеющего преимущественное применение в медицине и автоматике, не описана.

В основу исследования при выборе способов сварки положено предположение о том, что минимальные изменения в структуре и химическом

составе металла в зоне сварки будут в том случае, если последний будет находиться при высокой температуре в течение минимального времени. В качестве источника нагрева нами выбраны конденсаторный разряд (прохождение большого тока за короткое время), импульсы переменного тока и лазерный луч. Были исследованы точечные и стыковые соединения фольги и проволоки из нитинола.

Эксперименты по точечной, ударной конденсаторной, а также лазерной сварке проводили на установке МТК-2201 и специальных лабораторных установках УДК-1 и Alpha Laser ALV 100 (с необходимой модернизацией).

Исходя из предполагаемых изменений в структуре свариваемого металла, исследование соединений, полученных точечной сваркой, проводили с использованием металлографического анализа, сравнительного фазового рентгеноструктурного анализа места сварки и удаленных концов образца, сканирующей электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа. Кроме того, контролировали воспроизведение формы в области контактной сварки.

Исследование поверхности образцов, сваренных разными способами, проводили с помощью металлографического микроскопа «Neophot-32» при разных увеличениях. Для удаления оксидного слоя и выявления структурных микроненородностей все образцы обрабатывали в растворе 47 % HNO<sub>3</sub> + 17 % HF + 36 % H<sub>2</sub>O при комнатной температуре в течение 10 с.

Основные параметры режима *точечной сварки* (табл. 1, 2) определяли экспериментальным путем. Использовали два типа нагрева образцов: переменным (50 Гц) током разного значения и длительности\* и током разряда конденсаторов. В последнем случае длительность прохождения тока регулировали изменением емкости конденсаторов. Амплитудное значение тока, которое определяет

\* Сварку проводил инж. В. Н. Заичко.



коэффициент трансформации (напряжение зарядки конденсаторов оставалось постоянным, равным 600 В), было неизменным (табл. 2).

Исследование поверхности образцов показало значительный нагрев в зоне контакта поверхности фольги с электродами, обусловленный высоким переходным сопротивлением между электродами и фольгой, что связано с наличием на поверхности образца слоя оксида титана и значительной твердости нитинола, увеличивающейся при нагреве. Наблюдается также незафиксированное ранее наличие концентрических окружностей (рис. 1) на поверхности тонкой фольги (табл. 2, образец № 2-2). Это явление может быть связано с появлением значительных растягивающих напряжений, направленных к центру окружности, которые обусловлены затрудненной кристаллизацией расплавленного металла сварной точки.

Методами сканирующей электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа установлено, что при сварке переменным током распределение элементов по поверхности образца в месте сварки соответствует распределению в основном металле. Другие элементы, кроме никеля и титана, не выявлены. При конденсаторной сварке в области отпечатка электрода обнаружены частички вольфрама, который перешел из металла электрода.

Наряду с микрорентгеноспектральным анализом проводили фазовый рентгеноструктурный анализ мест сварки и концов образцов № 3-1, 4-1, 5-1, 6-1, 2-2, 4-2, 5-2, 6-2. Съемку вели на установке УРС 2,0 в  $Cu-K_{\alpha}$ -излучении в камере РКВ-86. На рентгенограммах присутствуют две системы линий, которые относятся к исходной (ОЦК-структура) и мартенситной (моноклинная структура) фазам. Перераспределения интенсивностей между линиями этих фаз на рентгенограммах, снятых в разных местах образца, не наблюдалось, поэтому можно сделать вывод о том, что в результате сварки фазовый состав образцов не изменился. Однако в образцах № 6-1 и 2-2 интенсивность линий мартенситной фазы значительно слабее, чем в других исследованных образцах, но не изменяется при переходе от места сваривания к концам образца. Это дает основание предположить, что происходит смещение температурного интервала прямого мартенситного превращения в этих двух образцах в область более низких температур по сравнению с другими образцами. Поскольку измерения проводили на поверхности образцов, можно сделать вывод, что несмотря на самый мягкий режим сварки, вследствие малой толщины фольги и связанным с этим относительным увеличением механической жесткости, в сопротивлении электрод — деталь выделяется достаточно большая энергия, что приводит к нагреву поверхностей выше температуры распада интер-

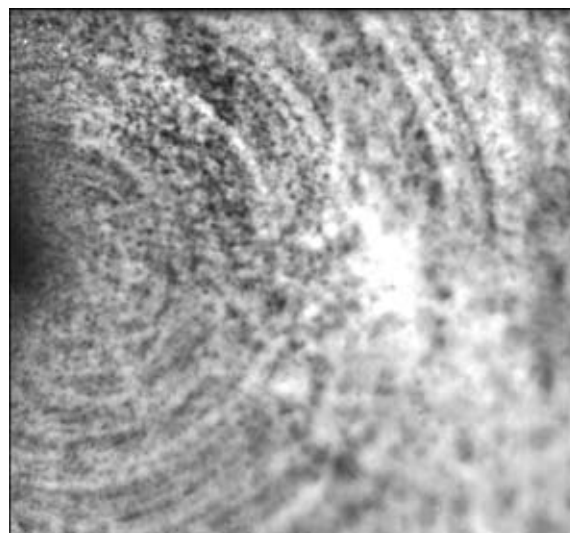


Рис. 1. Концентрические окружности на поверхности образца № 2-2 (точечная сварка фольги толщиной 50 мкм, табл. 2),  $\times 200$

металлидов типа  $Ti_2Ni$  и снижению температуры мартенситного превращения.

Для определения зависимости характеристик точечных сварных соединений от режима сварки провели вторую серию экспериментов. Исследовали образцы сплава  $Ni_{50}Ti_{50}$  в виде полосок толщиной 0,2 мм и шириной порядка 3 мм (табл. 3) и пластин толщиной 0,25...0,28 мм и площадью  $10 \times 14 \text{ мм}^2$  (табл. 4).

Характерное отличие исследованных способов точечной сварки при разном уровне нагрева проявилось в степени деформации свариваемого металла (рис. 2). При этом соединение, полученное точечной сваркой переменным током, происходит в твердой фазе (рис. 2, б и в), а при конденсаторной сварке — с формированием литого ядра (рис. 2, а).

Таблица 3. Режимы точечной конденсаторной сварки фольги из нитинола эквиатомного состава

№ образца	Емкость конденсаторов, мкФ	Напряжение зарядки, В	Коэффициент трансформации
А-1	1100	200	100
А-2	1100	260	100
А-3	1100	200	150
А-4	1100	260	150
А-5	500	260	150

Таблица 4. Режимы точечной сварки переменным током фольги из нитинола эквиатомного состава

№ образца	Длительность (число) импульсов, с	Длительность пауз, с
В-1	0,06 (4) + 0,02 (1)	0,18
В-2	0,06 (3) + 0,02 (1)	0,18
В-3	0,12 (1) + 0,04 (1)	0,36
В-4	0,24 (1) + 0,02 (2)	0,36

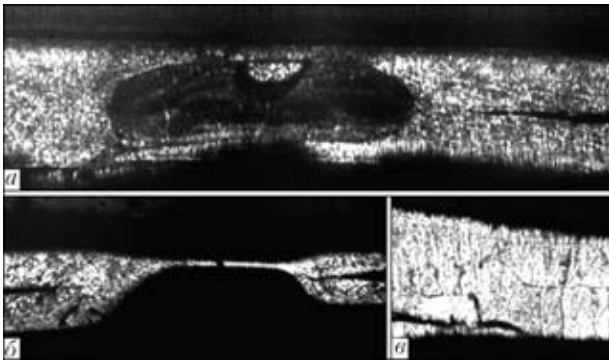


Рис. 2. Поперечные микрошифы образцов, выполненных точечной сваркой разрядом конденсаторов (а) и импульсами переменного тока промышленной частоты (б, в); а, б —  $\times 100$ ; в —  $\times 400$

Металлографический анализ при большом увеличении (рис. 3) показал, что дендриты, формирующиеся у границы литого ядра (рис. 3, а), не успевают прорасти в центральную часть ядра точки, где структура имеет зернистый характер (рис. 3, б), что связано с большой скоростью охлаждения при конденсаторной сварке.

Определение возможного изменения в химическом составе металла ядра и границы точечного конденсаторного соединения проводили сканированием поверхности шлифа в рентгеновском никелевом и титановом излучении. Как оказалось, поверхность отпечатка имела стабильную плотность почернения в обоих случаях, что свидетельствует об отсутствии фазовых изменений состава интерметаллидов.

При механических испытаниях изгибом образцы наибольшей толщины (порядка 180 мкм) после конденсаторной сварки хрупко разрушались при нагрузке. Анализ показал, что такое разрушение характерно для основного металла, а не было вызвано термическими изменениями.

Образцы, деформированные в двухфазном состоянии (исходная  $\beta$ -фаза + мартенситная фаза), нагревали до температуры порядка 120 °С. Большинство из них (№ 1-1, 2-1, 4-1, 5-1, 7-1,

Т а б л и ц а 5. Характеристические температуры мартенситного превращения (степень восстановления формы образцов 100 %)

Режим по рис. 4	$M_n, ^\circ\text{C}$	$M_k, ^\circ\text{C}$	$A_n, ^\circ\text{C}$	$A_k, ^\circ\text{C}$
I	-50	-60	-18	20
II	-50	-65	-21	25

8-1, 1-2, 3-2, 4-2, 5-2, 6-2, за исключением № 6-1 и 2-2, в которых, как было отмечено выше, при комнатной температуре отсутствует мартенситная фаза) показали практически полное восстановление формы. Для восстановления формы образцы № 6-1, 2-2 деформировали при нулевой температуре (вода со льдом). Поскольку образцы имели миниатюрные размеры, определить точный температурный интервал мартенситных превращений не представлялось возможным.

Для определения влияния процесса сварки на характеристические температуры мартенситного превращения и степень восстановления формы во второй серии экспериментов способом конденсаторной сварки были приготовлены модельные образцы в виде пластинок размером  $30 \times 30 \times 0,2$  мм. Зона сварки на образцах № А-1 и А-3 (табл. 3) формировалась двумя способами: группой из девяти точек, примыкающих друг к другу на длине 9 мм в центре пластинки; девять точек на равном расстоянии между собой. На этих образцах резистометрическим методом измерены характеристические точки мартенситного превращения  $M_k, M_n, A_n, A_k$  (рис. 4 и табл. 5).

Количественное измерение степени восстановления формы проводили на специальной установке, в которой образец в состоянии исходной фазы деформировали методом трехточечного изгиба. При этом внешнюю нагрузку подбирали таким образом, чтобы максимальные напряжения были существенно меньше предела текучести материала. При снижении температуры до начала мар-

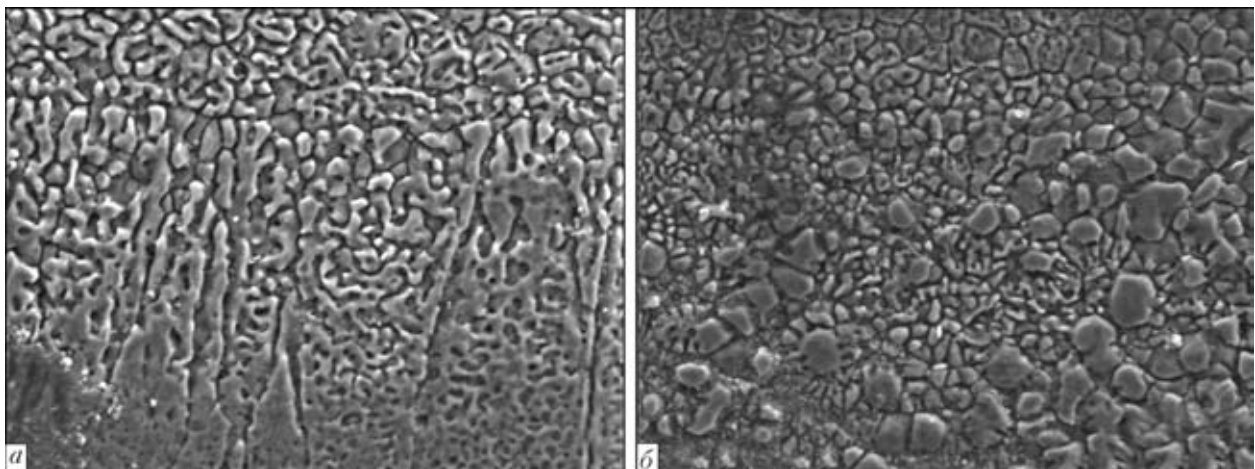


Рис. 3. Микроструктура ( $\times 1000$ ) границы литого ядра с основным металлом (а) и центральной части точечного соединения, полученного конденсаторной сваркой, (б)

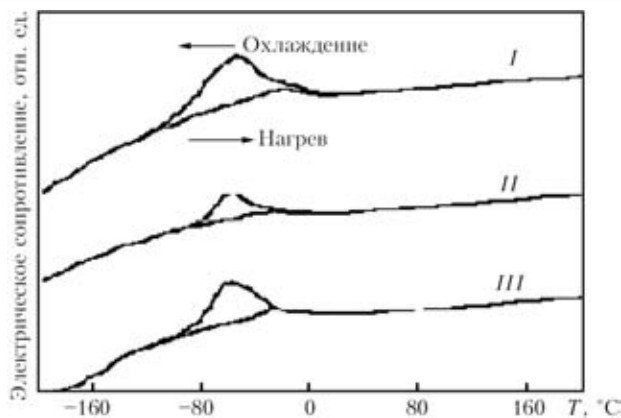


Рис. 4. Температурная зависимость электрического сопротивления образцов, сваренных на разных режимах: I, II — режимы для образца № А-1 соответственно с группой и отдельными точками; III — для образца № А-3 с группой точек

тенситного превращения под действием приложенного напряжения образец претерпевал пластическую деформацию (появляется прогиб) в результате пластичности превращения. По мере увеличения количества мартенситной фазы прогиб увеличивается, что продолжается в течение всего

**Т а б л и ц а 6. Определение степени восстановления формы после деформирования образцов, выполненных точечной сваркой**

№ образца	Толщина отдельной пластинки, мм	Толщина места сварки, мм	Величина заданной деформации, %	Степень восстановления формы η, %
Конденсаторная сварка				
А-1	0,18	0,40	1,80	100
А-2	0,20	0,43	1,95	98
А-3	0,19	0,41	1,58	90
А-4	0,19	0,51	1,96	90
А-5	0,18	0,39	1,77	90
Сварка переменным током промышленной частоты				
В-1	0,26	0,70	2,5	90
В-2	0,27	0,57	1,5	100
В-3	0,28	0,61	1,9	95
В-4	0,25	0,61	3,0	80

**Т а б л и ц а 7. Режимы ударной конденсаторной сварки нитиноловой проволоки**

Материал образца	Емкость конденсаторов, мкФ	Напряжение зарядки конденсаторов, В	Усилие соударения, Н	Сопротивление разрядного контура, Ом	Длина пути соударения, мм	Длина конца проволоки, выступающая из зажима, мм
Проволока Ø 0,6 мм из нитинола	2850	900	30	1,0	6,0	1,5
Проволока из нитинола Ø 0,8 мм + медная проволока Ø 0,6 мм	850	400	20	1,4	5,0	2,0
Проволока из нитинола Ø 0,6 мм + нитиноловая пластина δ = 3 мм	2850	900	35	1,0	12,0	2,5
Проволока из стали 10Х18Н9Т Ø 0,8 мм + нитиноловая пластина δ = 1,4 мм	3000	900	30	1,2	10,0	1,5

интервала мартенситного превращения. При нагреве (вследствие обратного мартенситного превращения) восстанавливается первоначальная форма образца, степень восстановления которой η рассчитывали по формуле

$$\eta = [(\epsilon_n - \epsilon_0) / \epsilon_n] \cdot 100 (\%),$$

где  $\epsilon_n$  — полная деформация образца после прямого мартенситного превращения;  $\epsilon_0$  — остаточная деформация после обратного мартенситного превращения.

В табл. 6 приведена зависимость степени восстановления формы от деформации, задаваемой изгибом вокруг цилиндра и рассчитываемой по формуле

$$\epsilon = \frac{h}{2R} \cdot 100 (\%),$$

где  $R$  — радиус изгиба образца, мм;  $h$  — толщина образца в месте сварки для образцов, сваренных на разных режимах.

Из таблицы видно, что только в образцах № А-1 и В-2, которые отличались наименьшей энергией сварочного нагрева, степень восстановления формы достигала 100 %. В образцах, сваренных на режимах с большой интенсивностью нагрева, восстановление формы было неполным, а у образца № В-4, сваренного при наибольшей энергии нагрева, восстановление формы не превысило 80 %.

Таким образом, нагрев внутренним источником тепла при точечной сварке приводит к значительному локальному изменению структуры, которое тем меньше, чем меньше уровень нагрева. Поэтому, как результат проведенных экспериментов, для сварки фольги из сплавов системы Ni-Ti можно рекомендовать точечную конденсаторную сварку на жестких режимах. При этом нужно принять меры против прилипания электродов к поверхности свариваемой фольги путем зачистки последней от толстого слоя оксида титана.

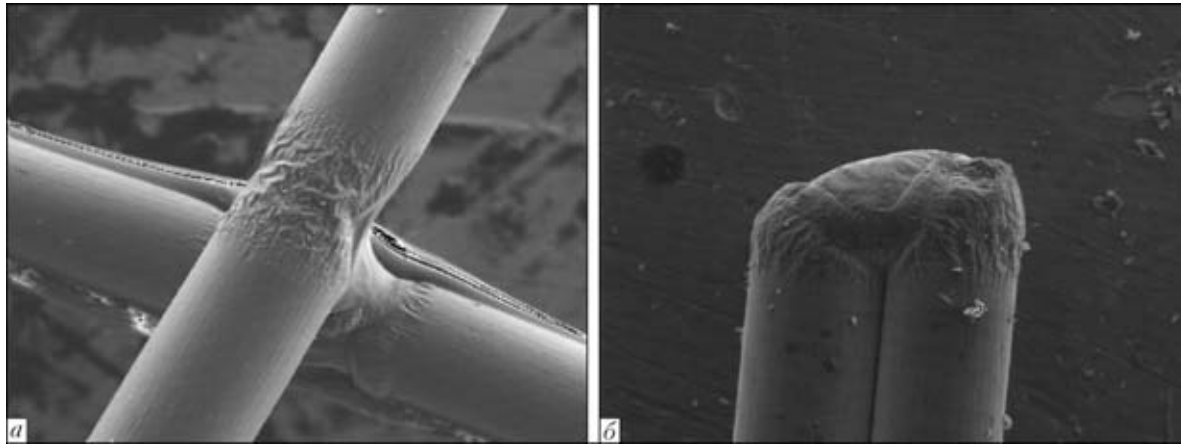


Рис. 5. Образцы нитинола (X100), сваренные лазерным излучением «в крест» (а) и «в шарик» (б)

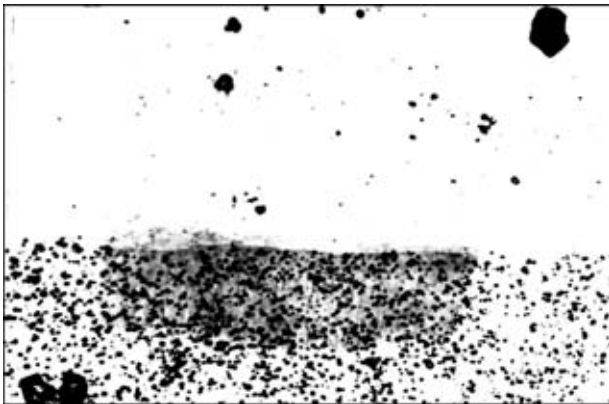


Рис. 6. Микроструктура соединения нитиноловой проволоки Ø0,6 мм с пластиной из никелида титана ( $\delta = 3$  мм), X250

Аналогичные методики применили при исследовании последствий *лазерной сварки* проволочных образцов диаметром 0,28 мм, сваренных «в крест» и «в шарик» (рис. 5).

Анализ сварных соединений при увеличении X400 и 600 показал отсутствие трещин на поверхности. Распределение никеля и титана в литом металле соединений, по данным микрорентгеноспектрального анализа, как и при точечной контактной сварке, оказалось равномерным, а исследование восстановления формы образцов подтвердило приведенный выше вывод о том, что импульсный нагрев не приводит к смещению точек мартенситного превращения.

Режимы *ударной конденсаторной сварки* нитиноловой проволоки приведены в табл. 7. Все эксперименты по сварке Т-образных соединений проводили на обратной полярности, принимая во внимание, что температура плавления нитинола невелика и составляет 1240...1310 °C [16].

Особенностью нитинола (как свариваемого материала), кроме относительно низкой температуры плавления, является высокое электрическое сопротивление и низкая пластичность. Электрическое удельное сопротивление нитинола порядка 70 мкОм·см (для сравнения медь — 1,7, нержавеющая сталь — 8 мкОм·см), твердость HRC 60,

что соответствует твердости закаленной стали. При ударной конденсаторной сварке это влияет, с одной стороны, на ускоренное плавление нитинола вследствие тепловыделения при прохождении тока по проволоке, а с другой — на недостаточное ее деформирование при соударении.

Существенную роль при сварке нитинола (как соединения двух проволок, так и Т-образного соединения проволоки с поверхностью пластины) играют напряжения, которые появляются при фазовом переходе во время охлаждения сварного соединения, что вызывает нестабильность прочности сварного соединения, получаемого ударной конденсаторной сваркой. Для этого способа соединения металлов в твердой фазе характерны относительно небольшие давления осадки. Поэтому в зависимости от случайной кристаллографической ориентации зерен металла, выходящих на поверхность, напряжения второго рода могут складываться в большей или меньшей степени с внешними напряжениями, прикладываемыми при испытании образца на изгиб.

Значительно лучший результат можно получить при сварке нитинола с пластичным металлом, например, медью или нержавеющей сталью. В этом случае на прочность соединения влияют не столько внутренние напряжения, сколько взаимное размещение стыкуемых кристаллических блоков. Вследствие малой пластичности нитинола можно ожидать только поворот зерен при деформации пластичного металла. Однако, как показали эксперименты, для получения прочности соединения, превышающей прочность мягкого металла, нужно увеличивать сечение стыка в 2 раза по сравнению с сечением мягкой проволоки.

Металлографические исследования сварных образцов показали отсутствие пор, трещин или других макродефектов, нарушающих сплошность стыка (рис. 6). Разные «предыстории» проволоки и пластины привели и к разному виду структуры и содержанию второй фазы. В работе [17] предполагается, что ее состав  $Ti_4Ni_2O$ .

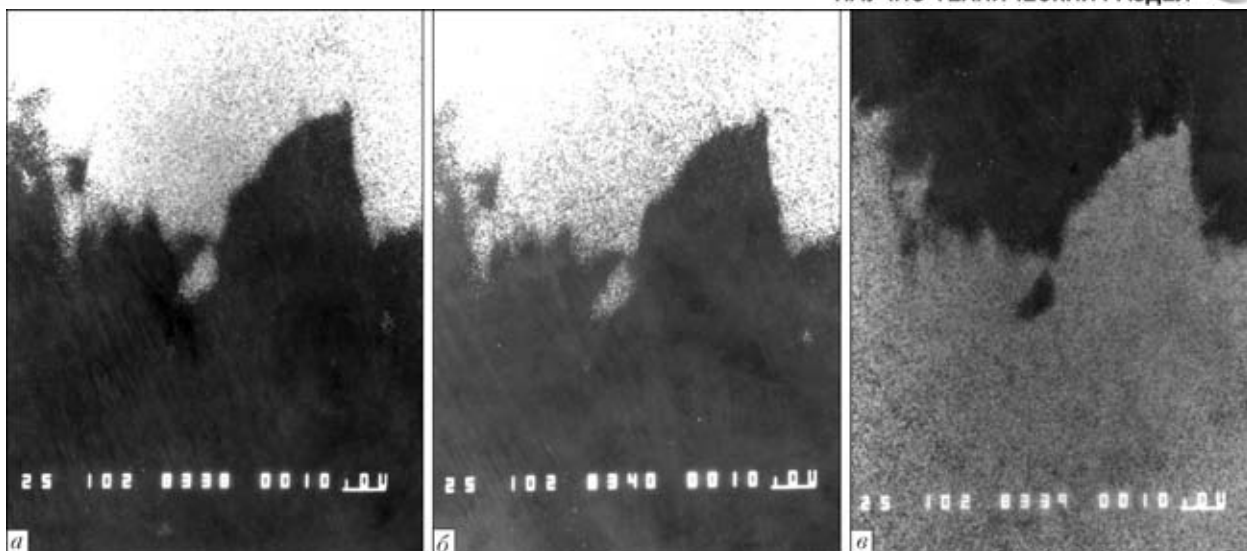


Рис. 7. Рентгенограммы соединений нитинола с медью (X1000), полученные в титановом (а), никелевом (б) и медном (в) облучении

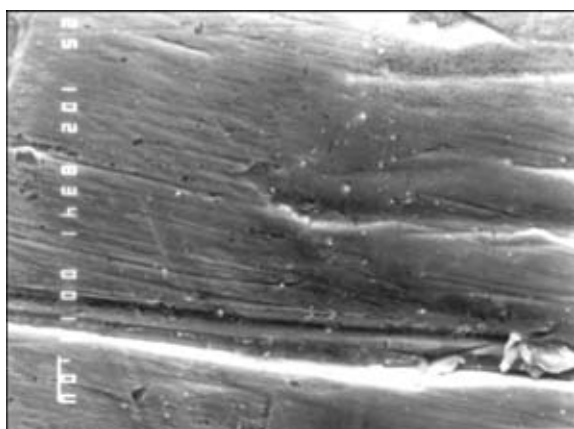


Рис. 8. Поверхность шлифа в режиме сканирования, X1000

В соединениях медной и нитиноловой проволок, сваренных на оптимальном режиме, отсутствует перемешивание свариваемых металлов, не происходит угар компонентов СЭПФ, о чем свидетельствует совпадение формы стыка при съемке в излучении каждого из элементов, присутствующих в соединении (рис. 7), и сохраняется мартенситная структура в соединении обычного металла с СЭПФ (рис. 8).

### Выводы

1. В литературе отсутствуют сведения о влиянии термомеханического воздействия при сварке на характеристики прямого и обратного мартенситного превращений в СЭПФ системы Ni-Ti и о способах сваривания тонких проволок и фольги из этих сплавов. Это сдерживает разработку технологии сварки термоупругих сплавов и использование их в технике и медицине.

2. Анализ физических основ проявления эффекта памяти формы в термоупругих сплавах позволил выбрать из многих способов сварки те, которые используют импульсный нагрев, в част-

ности конденсаторную (точечную и ударную) и лазерную сварку.

3. Показано, что при точечной конденсаторной и лазерной сварке нитинола малого сечения температура мартенситного превращения СЭПФ не изменяется, а степень восстановления формы тем ближе к 100 %, чем жестче импульс нагрева.

4. Соединения нитинола ударной конденсаторной сваркой не имеют необходимой прочности. Однако при сварке нитинола с пластичными металлами получены удовлетворительные механические и термомеханические характеристики сварных образцов.

5. Импульсный кратковременный нагрев нитинола как с формированием внутреннего источника тепла, так и поверхностных зон повышения температуры выше точки плавления металла, не ухудшает состояние материала и не изменяет его термомеханические свойства вблизи участка сварки, поэтому может быть рекомендован для использования при изготовлении изделий из этого материала.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства просвещения и науки Украины.*

1. Апаев Б. А., Вороненко Б. И. Эффект запоминания формы в сплавах // *Металловедение и терм. обработка мет.* — 1973. — № 1. — С. 24–28.
2. Журавлев В. Н., Пушин В. Г. Сплавы с термомеханической памятью и их применение в медицине. — Екатеринбург, 2000. — 150 с.
3. Корнилов И. И. Металлоиды с уникальными свойствами // *Металловедение и терм. обработка мет.* — 1975. — № 10. — С. 19–22.
4. Сплавы с эффектом памяти формы / К. Ооцука, К. Симидзу, Ю. Судзуки и др. — М.: *Металлургия*, 1990. — 224 с.
5. Сплавы с памятью формы в медицине / В. Э. Гюнтер, В. В. Котенко, М. З. Миргазизов и др. — Томск: *Изд-во Том. ун-та*, 1986. — 208 с.
6. *Сверхэластичные имплантаты и конструкции из сплавов с памятью формы в стоматологии* / М. З. Миргазизов,



- В. Э. Гюнтер, В. И. Итин и др. — Moscow; Berlin; Chicago; London; San Paulo & Tokyo: Quintessenz Verl., 1993. — 231 с.
7. *Shinoda T., Tsuchia T., Takachashi H.* Friction welding of shape memory alloy // *Welding Intern.* — 1992. — 6, № 1. — P. 20–25.
  8. *Hirose A., Araki N.* Welding TiNi shape memory alloys // *Metals.* — 1989. — 59, № 8. — P. 61–68.
  9. *Nishikawa M.* Welding shape memory alloys // *Bull. Metals Soci.* — 1985. — 24, № 1. — P. 56–60.
  10. *Characteristics and fracture morphology of Ti–Ni type shape memory alloy and its laser weld joint / T. Araki, A. Hirose, M. Uchihara et al.* // *Materials.* — 1989. — 38, № 428. — P. 478–483.
  11. *Laserwerkstoffbearbeitung von Formgedachtnislegierungen // Schweißen und Schneiden.* — 1999. — 51, № 12.
  12. *Potluri N. B.* Joining of shape memory alloys // *Welding J.* — 1999. — № 3. — P. 39–42.
  13. *Рудаков С. Г.* Разработка и исследование процесса сварки сплавов на основе никелида титана // Тр. 13 науч.-практ. конф. — Юрга, 27–28 апр. 2000 г. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 2000. — С. 11.
  14. *Рудаков С. Г., Катунина А. С., Петриченко О. В.* Изготовление сварных конструкций из сплавов с регулируемым эффектом памяти формы // Тр. 14 науч. конф. — Юрга, 26–27 апр. 2001 г. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 2001. — С. 47–48.
  15. *Изготовление с помощью сварки взрывом композиционного материала «никелид титана + алюминиевый сплав» // Современные проблемы сварочной науки и техники «Сварка-97»: Материалы Российской науч.-техн. конф. 16–18 сент. 1997.* — Воронеж, 1997. — С. 178–179.
  16. *Тихонов А. С., Герасимов А. П., Прохорова И. И.* Применение эффекта памяти формы в современном машиностроении. — М.: Машиностроение, 1981. — 80 с.
  17. *Melton K. N.* Ni–Ti based shape memory alloys. Engineering aspects of shape memory alloys. — Butterworth-Heinemann Ltd., 1990. — P. 21–35.

Welding processes with a pulsed heating are the most promising for joining alloys of Ni-Ti system. We studied the characteristics of wire and foil joints produced by spot welding by a capacitor discharge and alternating current, shock capacitor-type welding and laser welding. Methods of optical and X-ray microscopy, X-ray microprobe analysis, resistance measurement and three-point bending, were used to show that the capacitor-type and laser welding processes do not change the material composition or its thermomechanical properties near the welding site and may be recommended for application in manufacture of nithinol products.

Поступила в редакцию 06.04.2005

## УСТАНОВКА ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОЙ СВАРКИ ТРИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЛЕНТЫ — МОДЕЛЬ EWST



Две электронно-лучевые пушки предназначены для выполнения двух швов одновременно. Источник питания с системой защиты от пробоев на основе электронной лампы. Система вакуумирования воздух-вакуум-воздух (вакуум до  $1 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст. внутри рабочей камеры). Непрерывный контроль качества швов токами Фуко. Устройство для центровки лент обеспечивает их точную установку при сварке. Электронно-лучевые пушки имеют независимую систему турбомолекулярной откачки. Участок катода изолирован вакуумным клапаном, чтобы держать пушку под вакуумом при разгерметизации рабочей камеры. По специальному заказу лентосварочная установка поставляется с автоматической системой слежения по шву и цифровым управлением сварочными параметрами.

### Технические характеристики установки модели EWST

Установленная мощность при 50–60 Гц, В.....	380±10 %
Потребление охлаждающей воды при < 25 °С, л/мин .....	20
Время откачки при вакууме $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., мин .....	8
Производительность:	
толщина лент, мм .....	0,8–1,0
общая ширина лент, мм .....	до 80
скорость сварки, м/мин .....	до 1

**Контакты:** 03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11  
 Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, отд. № 57  
 Тел./факс: (38044) 525 43 19  
 E-mail: nazarenko@technobeam.com.ua