

Рассмотрим несколько подробнее вопрос разграничения понятий **дискретного косвенного измерения** и **непрерывного косвенного измерения в дискретной форме**. При проведении ДКИ определение значения искомой дискретной величины на основании результатов прямых измерений других дискретных величин, функционально связанных с искомой дискретной величиной осуществляется исключительно в дискретном виде. При проведении НКИдф предварительно проводится операция интерполяции интерполяционным многочленом результатов дискретных прямых измерений непрерывных величин, функционально связанных с искомой величиной. Другими словами проводится переход от дискретной формы представления исходного дискретного сигнала к непрерывной (кусочно-непрерывной) форме представления. И только затем проводится собственно косвенное измерение искомой величины. При этом определение значения искомой величины осуществляется численными методами. Подчеркнем, что игнорирование принципиальных отличий этих двух подходов приводит к ошибочным научным и практическим выводам относительно метрологических характеристик средств измерений [3].

Остановимся кратко на проблеме противопоставления **измерительных** и **вычислительных преобразований**. В результате развития измерительных приборов появились процессорные измерительные средства (ПриС), которые принципиально отличаются от простого применения средств вычислительной техники для обработки результатов измерений. В ПриС перепрограммируемые средства вычислительной техники непо-

средственно входят в состав измерительной процедуры и используются для получения результатов измерений. К вычислительным, а не измерительным преобразованиям следует относить преобразования, выполняемые в числовой форме (в том числе и на программной основе) и не входящие в состав той или иной измерительной процедуры. Отметим, что разграничение понятий **измерительное преобразование** и **вычислительное преобразование** является важным и принципиальным шагом в общей теории измерений [4].

1. Опенгейм Э. Применение цифровой обработки сигналов Перев. с англ. М.: Мир. –1980. –552 с.
2. Пономарева О.В., Пономарев В.А., Пономарев А.В. Иерархическая морфологическо-информационная модель системы функционального диагностирования объектов на основе цифровой обработки сигналов // Датчики и системы. – 2014. – № 1(176). – С. 2-8.
3. Кравчук А.С., Кравчук А.И., Рымуза З. Вычисление достоверных коэффициентов Фурье цифрового сигнала // Цифровая обработка сигналов. – 2010. – №2. – С.19-21.
4. Пономарева О.В., Алексеев В.А., Пономарев В.А. Методология определения погрешностей измерения вероятностных характеристик случайных процессов, реализуемых процессорными измерительными средствами // Интеллектуальные системы в производстве. – 2010. – № 2(16). – С. 91-99.

УДК 681

#### БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЙ КОМПОЗИТ «Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub> - БЕРИЛЛИЕВАЯ БРОНЗА», ПОЛУЧЕННЫЙ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ

Рубаник В.В.<sup>1,2</sup>, Беляев С.П.<sup>3</sup>, Рубаник В.В.мл.<sup>1,2</sup>, Реснина Н.Н.<sup>3</sup>, Петров И.В.<sup>4</sup>, Гамзеева Т.В.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Витебский государственный технологический университет, Витебск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Институт технической акустики НАН Беларуси, Витебск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>4</sup>Институт порошковой металлургии НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Использование биметаллического композита из пластин сплава с памятью формы и стали в качестве силовых приводов в электронике и технике привлекает большое внимание к изучению способов соединения этих двух материалов, исследованию механических и функциональных свойств полученных композитов. Исследование свойств композитов, полученных с помощью плазменной или лазерной сварки, показывает, что в них наблюдается значительное уменьшение предела прочности и деформации до разрушения, по сравнению с исходными материалами [1],

ухудшаются функциональные свойства, способность композита восстанавливать неупругие деформации [2]. Главным образом эти недостатки обусловлены локальным разогревом поверхности материалов в зоне сварки. Одним из способов избежать этих негативных последствий является использование сварки взрывом. Полученные биметаллические образцы «сплав TiNi – сталь» методом сварки взрывом [3] проявляют эффект памяти формы и могут служить в качестве термомеханических актуаторов [4, 5]. Использование бериллиевой бронзы в составе композита

позволит получить более высокие значения эффекта памяти формы, улучшить функциональные свойства биметаллического композита.

Для получения биметаллического композита использовали пластины никелида титана с избытком никеля состава  $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$  и бериллиевой бронзы БрБ2 размером 50 мм\*200 мм. Последняя обладает хорошими пружинящими свойствами, а также высокой стойкостью к коррозионной усталости. Упругая деформация бериллиевой бронзы в 2-3 раза выше, чем у стали.

Сварку взрывом осуществляли по режиму описанному в [3] в ОХП "НИИ импульсных процессов с опытным производством" ГНУ «Институт порошковой металлургии». При изготовлении образцов использовали взрывчатое вещество аммонит с содержанием 30 % NaCl в качестве пламегасителя. Угол налета пластин при сварке составлял  $12^\circ$ , а скорость налетающей пластины составляла 450 м/с. После сварки взрывом толщина биметаллической пластины составляла 2,55 мм. В дальнейшем из полученных пластин на электро-эрозионном станке вырезали образцы для структурных, механических и калориметрических испытаний.

Полученный сваркой взрывом биметаллический композит состава « $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$  – бериллиевая бронза» состоит из двух слоев (рисунок 1), один из которых слой никелида титана с избытком никеля обладает эффектом памяти формы и играет роль исполнительного элемента в этой композиции, а второй, бериллиевая бронза, – роль упругого элемента.

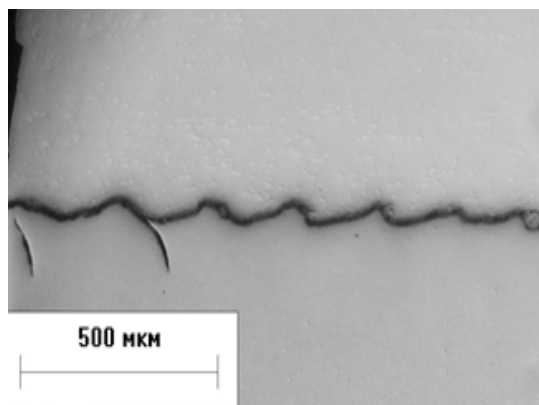


Рисунок 1 – Структура сварного шва биметаллического композита « $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$  – бериллиевая бронза»

Из полученного биметаллического композита состава  $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$  – бериллиевая бронза БрБ2 для исследования распределения химических элементов и толщины зоны смешивания вырезали образцы размером  $5 \times 5 \text{ мм}^2$ . На сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения "Mira" фирмы "Tescan" в режиме вторичных электронов при ускоряющем напряжении

20 кВ определяли геометрические размеры сварного шва с погрешностью 5 %. Исследование элементного состава проводили с помощью микрорентгено-спектрального анализатора «INCA 350» фирмы «Oxford Instruments». Минимальный предел обнаружения элемента составлял 0,5 %, погрешность метода 3-5%, область возбуждения рентгеновского излучения – 0,5 мкм.

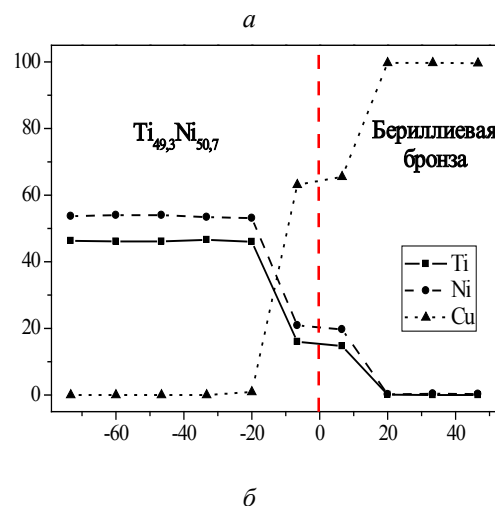
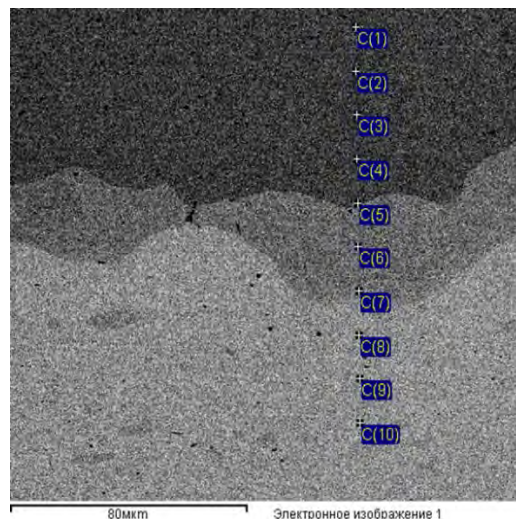


Рисунок 2 – Микроструктура переходной зоны в биметаллическом композите состава « $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$  – бериллиевая бронза» (а) и распределение химических элементов в поперечном сечении (б)

Установлено, что в полученном биметаллическом композите наблюдается равномерное распределение химических элементов по толщине каждого слоя, граница зоны раздела носит волнообразный характер. Ширина зоны смешивания составляет до 40 мкм и на отдельных участках не прослеживается (рисунок 2а). Сварной шов не имеет участков неплотного прилегания слоев, но наблюдается незначительное число трещин ориентированных поперек границы раздела. Микрорентгено-спектральный анализ свидетельствует

об образовании в зоне сварки равномерного по структуре промежуточного слоя примерного химического составом Ti15Ni20Cu65 вес.% (рисунок 2б).

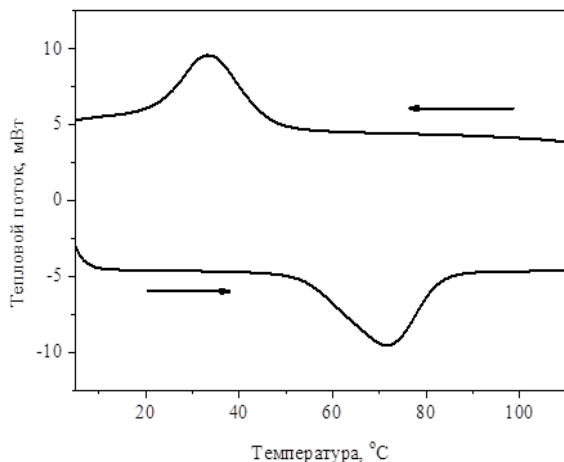


Рисунок 3 – Калориметрические кривые, полученные при нагреве и охлаждении биметаллического композита «Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub> – бериллиевая бронза» после сварки взрывом

В полученном сваркой взрывом биметаллическом композите состава Ti<sub>49,3</sub>Ni<sub>50,7</sub> – бериллиевая бронза также проведены исследования температур и последовательности термоупругих мартенситных превращений, которые изучали на дифференциальном сканирующем калориметре DSC822° фирмы Mettler Toledo. Скорость нагрева и охлаждения образцов составляла 2 °С/мин.

Установлено, что мартенситные превращения развиваются по схеме B2→B19' (рисунок 3). После сварки взрывом происходит изменение температур обратного мартенситного превраще-

ния, расширение температурных интервалов фазовых переходов, уменьшается скрытая теплота превращения, что связано с сильной пластической деформацией, приобретенной в процессе сварки.

Работа выполнена в рамках Российско-Белорусского гранта (БРФФИ № T14P-232 и РФФИ № 14-01-90007).

1. Falvo, A. Laser welding of NiTi alloy: Mechanical and shape memory behaviour / A. Falvo, F.M. Furgiuele, C. Maletta // Mater. Sci. Eng. – A 412 . – 2005. – P. 235-240.
2. Falvo, A. Functional behaviour of NiTi-weld joint: Two-way shape memory effect behaviour / A. Falvo, F.M. Furgiuele, C. Maletta // Mat. Sci. Eng. – A 481-482. – 2007. – P.647-650.
3. Рубаник, О.Е. Получение сваркой взрывом и свойства композитов TiNi-сталь / О.Е. Рубаник, В.В.Клубович, В.В.Рубаник // 8 Intern. conference advanced manufacturing operations, Kranevo. – 2008. – С. 185-189.
4. Беляев, С.П. Влияние предварительной деформации на функциональные свойства биметаллического композита «TiNi-сталь» / С.П.Беляев, В.В.Рубаник, Н.Н.Реснина и др. // Вестник Тамбовского ун-та. – 2010. – № 15. – С.1152-1155.
5. Беляев, С.П. Биметаллы с эффектом памяти формы / С.П.Беляев, В.В.Рубаник, Н.Н.Реснина и др. //Междун. симпозиум «Перспективные материалы и технологии», 27–29 мая 2015 г. – Витебск: УО «ВГТУ». – 2015 – С.37-40.

УДК 53.082.5:621.373.826

## УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРОВЕРКИ КАЧЕСТВА ПОКРЫТИЯ НА ВНУТРЕННЕЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Рыжевич А.А., Солоневич С.В., Смирнов А.Г., Лепарский В.Е.

Институт физики НАН Беларуси  
Минск, Республика Беларусь

В настоящее время проблема автоматизированного определения качества защитного покрытия на плоских, внешних и внутренних цилиндрических металлических поверхностях является весьма актуальной, т.к. в подавляющем большинстве случаев имеющиеся детекторы позволяют производить только локальную проверку толщины, причем на каждое измерение требуется значительное время. Особый интерес вызывает проверка качества внутренних цилиндрических поверхностей большого диаметра, поскольку заблаговременное обнаружение дефектов покрытия позволяет избежать в будущем

непредвиденных затрат на проведение ремонта создаваемых трубопроводов различного назначения и на реабилитационные мероприятия в отношении окружающей среды, необходимость которых вполне вероятна в случае аварии трубопровода. В подавляющем большинстве случаев как поверхность покрытий, так и поверхность металлических основ не обладают оптической чистотой, поэтому для них известные методы интерферометрической профилометрии оказываются непригодными. Дополнительно ситуация осложняется тем, что материал покрытия чаще всего непрозрачен в оптическом диапазоне. Про-