

УДК 539.51

## СОЕДИНЕНИЕ ТИТАНОВЫХ И НЕРЖАВЕЮЩИХ ТРУБЧАТЫХ СЕКЦИЙ КРИОМОДУЛЕЙ ПС

**В.Е. Ковтун, Н.И. Навальнев**

*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, Украина, 61077, Харьков, пл. Свободы, 4*

*[kovtun@pht.univer.kharkov.ua](mailto:kovtun@pht.univer.kharkov.ua)*

Поступила в редакцию 8 декабря 2008 г.

В криогенных структурах (гелиевопроводах ускорительной техники) электронного коллайдера ПС предполагается использовать соединение двух разнородных материалов – титана и нержавеющей аустенитной стали. В рамках совместной работы (ОИЯИ, Дубна - ХНУ) нами изучены технологические возможности таких соединений методами электронно-лучевой сварки и диффузионной сварки в вакууме, а также приборный контроль над процессом сварки в условиях существующего производства. Данные методы недостаточно хорошо изучены для материалов «титан-сталь», особенно возможности использования таких соединений при низких температурах. Однако соединения «титан-титан» и «титан-другие материалы» находят широкое применение в аэрокосмической технике. Использовалось стандартное оборудование и технологические вакуумные стенды Харьковского машиностроительного завода «ФЭД».

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** линейный электронный коллайдер, криомодуль, титан, нержавеющая сталь, электронно-лучевая сварка, диффузионная сварка.

В настоящее время международным сотрудничеством ПС [1] проводятся многочисленные этапы (R&D) по разработке технологий сварки криогенных модулей и методов контроля качества сварного шва. Задача возникла в связи с необходимостью замены в криомодулях стальных трубопроводов на титановые, как менее подверженных влиянию сильных магнитных полей. Длина таких трубопроводов составит десятки километров.

Для целей сварки двух таких разнородных материалов предполагается использовать электронно-лучевую сварку (ЭЛС), диффузионную сварку (ДС), сварку взрывом. При выборе вида сварки криомодулей необходимо руководствоваться энергетическими, финансовыми, материальными затратами при получении требуемого качества соединения. Обычно для новых задач в области сварки требуется пройти кропотливый путь предварительных лабораторных исследований, не гарантирующий получение положительного конечного результата. Необходимо также учитывать возможность использования разработанных методов при массовом изготовлении в производственных (цеховых или заводских) условиях на существующем оборудовании и разумных, хорошо себя зарекомендовавших (опять же в производстве) методах контроля.

Титан и его соединения можно сваривать различными видами сварки, но, во-первых, общепринятые или литературные рекомендации [2,3] носят общий характер, и, во-вторых, стоимость технологического производственного оборудования сварки является здесь определяющей.

Сварка взрывом требует специфической квалификации и глубокого знания свойств свариваемых материалов для дальнейшей технологической проработки самого процесса сварки. Требуется тщательное соблюдение количества взрывчатого вещества, учёт скорости распространения детонационной волны в свариваемых материалах, учёт размеров деталей и т.п. Как правило, сварка взрывом используется для сваривания однородных титановых сплавов. В нашем случае (титановый сплав - нержавеющая аустенитная сталь) данный вид сварки теоретически плохо изучен и о качестве свариваемого шва можно говорить только после детальных лабораторных исследований. Получение же качественного сварного шва возможно, но после использования дополнительных и обязательных технологических процессов: многочасовой (от 16 до 24 часов) отжиг, закалка и старение. При сварке взрывом, в основном, для однородных титановых сплавов используется сплав ВТ1. При этом предел прочности сварного шва составляет не менее 90% от предела прочности основного материала. Кроме того, при очень низких температурах сплав ВТ1 более склонен к охрупчиванию, чем другие титановые сплавы. Открытым, на наш взгляд, остаются вопросы производственного контроля процесса сварки и последующих этапов, а также возможность использования данного типа сварки [4,5] при массовом производстве.

Диффузионная сварка и электронно-лучевая сварка хорошо отработаны для титановых сплавов. Довольно хорошо изучены свойства свариваемого шва. Процессы сварки контролируются на типовом заводском оборудовании. Меняя параметры сварки можно доводить процесс сварки до желаемого результата в условиях цеха. В некоторых случаях можно использовать процесс интенсификации процесса сварки (например, ультразвуковой), что даёт отчётливо положительный эффект.

Для диффузионной сварки из литературных данных и многолетнего производственного опыта известно, что наилучшие результаты для разнородных материалов (один из которых титановый сплав) получаются с использованием промежуточной прокладки или специального покрытия торцов свариваемых деталей. При этом химический состав прокладки не влияет на качество свариваемого шва. Использование промежуточных

прокладок для сварки разнородных материалов (титановый сплав – аустенитная сталь) также хорошо изучено.

Наша работа по использованию различных видов сварки разнородных материалов (титановый сплав ВТЗ-1 – нержавеющая аустенитная сталь 08X18H10T) для целей ИС носила скорее «разведочный» характер в силу ограниченных возможностей исследовательской группы. Однако, мы считаем, что данный опыт производственных экспериментов и консультации специалистов-практиков позволяют надеяться на получение оптимального решения для этой задачи.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Разработка ускорителя ИС нового поколения выдвигает ряд новых задач в области криогенного материаловедения со специфическими технологическими требованиями. Одной из таких задач является технология получения сварного шва из разнородных материалов типа титан – аустенитная сталь. Изделия из таких материалов (криомодули) будут работать при гелиевых температурах в условиях сильных магнитных полей. Контроль за швом крайне затруднителен из-за вакуумного кожуха и конструкции криомодуля. Поэтому предъявляются жёсткие требования к качеству такого соединения на этапе изготовления.

В данной работе на предварительном экспериментальном материале рассматривается технология сварки таких материалов и обсуждаются сопутствующие вопросы контроля получаемого шва, как в процессе сварки, так и в процессе последующей отбраковки, прогнозирования эксплуатационных свойств и т.д. в условиях работающего цеха Харьковского машиностроительного завода «ФЭД». Целью работы является получение образцов свариваемых соединений именно на производственном оборудовании.

При проведении экспериментов использовались следующие материалы:

1-й материал - титановый сплав ВТЗ-1, ГОСТ 19807-74. Согласно этому ГОСТу [6,7] содержание примесей (в %) в этом сплаве составляет: Al – 5,5÷7,0%; Mo – 2,0÷3,0%; Cr – 0,8÷2,31%, Si – 0,15÷0,40%, Fe – 0,2÷0,70%. Остальные примеси (не более): C – 0,10%, Zr – 0,50%, O – 0,18%, N – 0,05%, H – 0,015%.

Для экспериментов была изготовлена трубка из полуфабриката (титановый пруток с механическими свойствами  $\alpha+\beta$  класса).

Определены следующие свойства прутка после отжига (нагрев до  $t \approx 300^\circ\text{C}$ ) (ЦЗЛ ХМЗ «ФЭД»): предел прочности (временное сопротивление при растяжении) –  $\sigma_b \approx 1000\div 1250$  МПа; относительное удлинение при разрыве –  $\delta = 12\%$ ; относительное сужение при разрыве –  $\psi \approx 32\div 35\%$ ; коэффициент ударной вязкости (КСУ) –  $0,3$  МДж/м<sup>2</sup>. Кроме того, была известна длительная прочность, которая имела следующую величину –  $\sigma_{100} \approx 550$  МПа.

2-й материал – коррозионно-стойкая сталь 08X18H10T аустенитного класса, ГОСТ 5582-75, состав [7,8,9]: Cr – 18%, Ni – 10%, T – 1%. Предел прочности (временное сопротивление при растяжении) –  $\sigma_b \approx 490$  МПа. Относительное удлинение при разрыве –  $\delta = 40\%$ . Относительное сужение при разрыве –  $\psi \approx 55\%$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ЭЛС

Желание использовать метод ЭЛС основан на его свойствах производить исключительно локальный нагрев, что важно для сохранения механических свойств материалов, используемых в криогенной технике.

В качестве станда использовался сварочная машина типа ESA 30/5 (максимальная мощность до 6 кВт). В качестве присадочного материала для комбинации материалов «титан-хромоникеливая сталь» использовалась ванадиевая фольга толщиной 0,02 мм.



Рис.1. Образец, полученный методом ЭЛС.

Были подобраны экспериментально следующие параметры сварочной машины: ускоряющее напряжение  $U_B = 1,5 \div 3,0$  кВ; мощность  $P_{St} = 1,0 \div 4,0$  кВт. Варьировались также удельная мощность  $i_F$ , диаметр луча  $d_F$  и скорость сварки  $v_s$ . При этом разрежение составляло ориентировочно  $10^{-5}$  мм рт.ст.

Недостаточное количество образцов трубок (рис.1.) не позволило подобрать оптимальные параметры сварки в условиях действующего производства, где вообще достаточно проблематично производить перенастраивание параметров сварочной машины. Однако, мы считаем, что дополнительное исследование микродефектов является основной задачей данного этапа исследования (также, как и подбор режимов сварочной машины).

К явным, общеизвестным недостаткам отнесём резкое ухудшение вакуума в области нагрева, что приводит к аккумуляции в области шва различных примесей и возникновение микропористости, что естественным образом приводит к ухудшению результата. Данные недостатки устраняются улучшением точности размеров деталей, уменьшением зазоров, тщательной дегазацией установки и предварительным контролем за свариваемыми материалами.

Для выявления качества сварочного шва применялся ультразвуковой дефектоскоп УДЗ-71 (производства

«Промприлад», г. Киев, Украина [10,11]) и контактный, наклонный совмещённый пьезокерамический преобразователь типа ПЭП121-5-40-28-003 с характеристиками: угол призмы -  $45^\circ$ , эффективная частота – 5 МГц, отношение сигнал/шум 16 дБ. Датчик прилегал к наружной поверхности свариваемых трубок.

Для проведения контроля, в силу того, что титановый сплав более однороден, чем аустенитная сталь, датчик устанавливался на стороне титанового сплава. При контроле использовались специальные пьезоэлектрические преобразователи из материала ЦТС-19 для получения оптимального угла входа ультразвука в материал.

Данный экспресс-метод удобен в условиях цеха при подборе параметров сварочной машины и позволяет контролировать качество изделия.

### РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ДС В ВАКУУМЕ

Современная теория ДС в вакууме достаточно хорошо объясняет все процессы, происходящие при соединении двух разнородных материалов. Общий подход состоит в том, чтобы для прохождения диффузии в объёме необходимо сблизить соединяемые поверхности на расстояние действия металлической связи. Однако имеющиеся всегда микровыступы в плоскости соединения не позволяют это осуществить до тех пор, пока не произойдёт их пластическое сминание [3].

В условиях ДС рост площади контакта поверхностей происходит в несколько последовательных этапов [2]: активная деформация, ползучесть и диффузионное зарастание несплошностей, сохранившихся в плоскости контактирования.

В начальный момент приложения нагрузки, когда поверхности контактируют по отдельным выступам, действующие напряжения значительно превышают предел текучести и происходит активная упруго-пластическая деформация микровыступов. Увеличение площади фактического контакта сопровождается релаксацией действующих напряжений, которые через 1-2 секунды снижаются на 2-3 порядка.

Для ДС использовалось серийное оборудование типа А306.08. Мощность установки – 6 кВт, с регулируемым высокочастотным нагревом, вакуум –  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  мм рт.ст., давлением  $p_{st} = 2,0 \div 2,5$  кг/мм<sup>2</sup>, время сварки – варьировалось.

Дополнительно проверены (ЦЗЛ ХМЗ «ФЭД») механические свойства титана (свойства которого гораздо сильнее зависят от температуры, чем стали) после нагрева в диффузионной печи до  $t \approx 900^\circ\text{C}$ . Свойства ВТЗ-1 изменились до следующих значений: предел длительной прочности –  $\sigma_{0,2/100} \approx 1100$  МПа; предел выносливости –  $\sigma_b \approx 1100$  МПа,  $\delta = 12\%$ ,  $\psi \approx 31\%$ .

Наша задача состояла в том, чтобы подобрать такие значения параметров процесса (давления, температуры и времени сварки), чтобы обеспечить необходимое качество шва (рис.2.).



Рис. 2. Образец, полученный методом ДС.

В этом случае формирование фактического контакта, как известно, происходит только на этапе активного деформирования и, следовательно, длительная изотермическая выдержка не приведёт к приросту площади контактирования. Однако, в контактной зоне могут сохраняться крупные «незарастающие» микропустоты.

Контроль над этими дефектами также осуществлялся вышеприведенным способом с помощью метода ультразвуковой дефектоскопии.

Так как в нашем случае, не рекомендуется применять высокие температуры, то для повышения эффективности ДС в целом и для ограничения длительности сварки или уровня прикладываемого давления, могут применяться различные способы интенсификации развития рассматриваемой стадии: повышение класса чистоты обработки поверхностей, воздействие переменных напряжений, введение пластических прокладок, активация поверхности и применение более высокого вакуума. Особо отметим такой метод интенсификации как наложение ультразвуковых продольных колебаний в направлении перпендикулярном плоскости стыка [12]. Разработанный нами стенд состоял из лабораторного генератора ультразвуковых колебаний и пьезоэлектрического преобразователя из керамики ЦТС-19. Частота ультразвуковых колебаний составляла от 16 до 20 кгц. Амплитуда могла варьироваться в интервале 2-5 мкм, а время озвучивания – до 1 с. В дальнейшем данный стенд будет опробован на указанном оборудовании.

### ВЫВОДЫ

Для сварки титанового сплава и аустенитной стали криомодулей ИС более надёжно и технологично использование диффузионной или электронно-лучевой сварки. На действующем производственном оборудовании режимы ЭЛС и ДС сварки подобраны для титанового сплава ВТЗ-1 и нержавеющей аустенитной стали 08Х18Н10Т. Возможно улучшение параметров сварочного оборудования при достаточном количестве экспериментальных образцов, что потребует решения организационных вопросов в условиях работающего

цеха.

Относительно удобными и информативными в производственных условиях являются ультразвуковые методы. Метод исследования озвученного сварного шва может быть очень эффективно применяться для готового изделия при его контроле при низких температурах. Во-первых, при низких температурах такие относительно мягкие материалы как титановые сплавы становятся «слышны». Во-вторых, ультразвуковая акустика более чувствительна на ранних стадиях выявления микродефектов, когда ещё не работает, например, метод использования гелиевых течеискателей.

В настоящее время нами разрабатывается стенд с жидкоазотной ванной и акустическим генератором и пьезокерамическим датчиком для контроля сварных швов после сварки и во время экспериментов по термоциклированию готовых образцов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ILC, <http://www.linearcollider.org> R&D for the International Linear Collider // GDE R&D Board. - April 2007. - P. 1-25.
2. Диффузионная сварка в вакууме металлов, сплавов и неметаллических материалов: //Под ред. Казакова Н.Ф. - М.: Машиностроение, 1973.- 170с.
3. Справочник по сварке, пайке, склейке и резке металлов и пластмасс: /Перевод с нем. /Под ред. А. Ноймана, Е.Рихтера. - М.: Металлургия, 1980. – 450с.
4. Basti A., Bedeschi F., Beghini M. at el. Mechanical tests of Titanium-Stainless Steel bimetallic transition joints // ILC-NOTE-2008-046. - 2008. - June 6. - P.1-11.
5. Basti A., Bedeschi F., Budagov J. at el. Characterization measurements of Ti-SS Bimetallic transition joint samples // ILC-NOTE-2008-044. - 2008. - May 13. - P.1-17.
6. Титан и сплавы титановые деформируемые. Марки: ГОСТ 19807-74, 19807-91. - М.: Госстандарт. - 01.04.2001, 7с.
7. Конструкционные материалы: Справочник / под ред. Б.Н.Арзамасова - М.: Машиностроение, 1990. - 687с.
8. Прокат тонколистовой коррозионно-стойкий, жаростойкий и жаропрочный. Технические условия: ГОСТ 5582-75. - Межгосударственный стандарт // Высококачественные стали. – 2002, 23с.
9. Каховский Н.И. Сварка нержавеющей сталей. - К.: Техніка, 1968. - 312 с.
10. Дефектоскоп ультразвуковой УДЗ-71: [руководство по эксплуатации / УДЗ-71.23535778.03.01.05РЭ]. - К.: ООО «Промприлад», 2006.
11. Дефектоскоп ультразвуковой УДЗ-71 // Неразрушающий контроль. - 2007. - № 2. - С.28.
12. Котельников А.А. Диффузионная сварка титановых сплавов с наложением ультразвуковых колебаний // Автоматическая сварка. - 1978. - № 1. – С.5.

#### WELDING TITANIUM AND STAINLESS STEEL CRYOGENIC SECTIONS OF THE ELECTRON COLLIDER ILC

V.E. Kovtun, N.I. Naval'nev

*Kharkov Karazin national university, Ukraine, 61077, Kharkov, Svoboda sq., 4*  
[kovtun@pht.univer.kharkov.ua](mailto:kovtun@pht.univer.kharkov.ua)

We suggest to use the joint of the two heterogeneous materials – titanium and austenitic stainless steel (Ti – SS) in the cryogenic (helium guide in accelerator's technique) structures of the electron collider ILC. The technological possibilities of the cryomodule's two pipe sections connection by the methods of electron-beam welding and diffusion vacuum welding, and also instrumental control of the welding process in the existed production conditions has been studied by us in the R&D framework (JINR, Dubna – KhNU, Kharkov). Such a methods has not been studied good enough for the “titanium-steel” materials, especially the possibilities for the usage of such a joints at low temperatures. Nevertheless the “titanium-titanium” and the “titanium-other materials” joints are widely used in the aerospace technique. The standard equipment and the vacuum technological stands of the Kharkov machine building factory “FED” has been used.

**KEY WORDS:** linear electron collider, cryomodule, titanium, stainless steel, electron-beam welding, diffusion welding.