

P13-2010-57

Ю. Будагов, Б. Сабиров, А. Сисакян, Г. Трубников,
Г. Ширков, В. Жигалов¹, И. Малков¹, В. Рыбаков¹,
Ю. Самароков¹, Б. Кепхарт², Д. Митчелл², С. Нагайцев²,
Б. Сойарс², А. Басти³, Ф. Бедески³

ЦИЛИНДРИЧЕСКИЙ
НИОБИЙ – НЕРЖАВЕЮЩАЯ СТАЛЬ
ПЕРЕХОДНЫЙ ЭЛЕМЕНТ,
ИЗГОТОВЛЕННЫЙ СВАРКОЙ ВЗРЫВОМ

¹РФЯЦ ВНИИЭФ, Саров, Россия

²FNAL, Батавия, США

³INFN, Пиза, Италия

Будагов Ю. и др.

P13-2010-57

Цилиндрический ниобий – нержавеющая сталь переходный элемент, изготовленный сваркой взрывом

Представлены новые разработки биметаллических переходников Nb + нержавеющая сталь (SS) для гелиевого дьюара криомодуля IV поколения ILC. Рассмотрены различные схемы сварки взрывом переходника Nb + SS, и приняты две схемы, предложенные ОИЯИ: с наружной и с внутренней плакировкой. Отработана новая технология сварки взрывом необходимых компонентов ниобия и нержавеющей стали, и изготовлено 4 опытных образца переходников. Проведены предварительные тесты в Сарове (РФЯЦ ВНИИЭФ) и Пизе (INFN) в вакууме при термоциклировании в жидком азоте и облучении ультразвуком. Образцы также были подвержены макро- и микроанализу. Результаты тестов показали удовлетворительные характеристики соединений Nb + SS. Измеренный в Сарове уровень течи составил величину $Q \approx 10^{-9}$ атм · см³/с. В Пизе после термоциклирования и облучения ультразвуком определена верхняя граница течи для всех образцов: $Q \leq (3-5) \cdot 10^{-10}$ атм · см³/с. Переходники будут испытаны при гелиевой температуре (1,8 К) в FNAL (США).

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Дзелепова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2010

Budagov J. et al.

P13-2010-57

Cylindrical Niobium – Stainless Steel Transition Element
Manufactured by Explosion Welding

New results in development of the Nb + stainless steel (SS) bimetallic transition elements for the helium Vessel of the fourth-generation ILC cryomodule are presented. Various schemes are considered for explosion welding of the Nb + SS transition element, and two schemes proposed by JINR are adopted: with inner cladding and with outer cladding. A new technology is optimized for explosion welding of the necessary niobium and stainless steel components, and four test specimens of the transition elements are made. Preliminary tests in vacuum with thermal cycling in liquid nitrogen and exposure to ultrasound were carried out in Sarov (RFNC) and Pisa (INFN). Macro- and microanalyses were also given to the specimens. The tests showed satisfactory characteristics of the Nb + SS joints. The leak rate measured in Sarov was $Q \approx 10^{-9}$ atm · cm³/s. In Pisa, after thermal cycling and exposure to ultrasound, the upper limit of the leak rate for all test joints was found to be $Q \leq (3-5) \cdot 10^{-10}$ atm · cm³/s. The transition elements will be tested at the helium temperature (1.8 K) at FNAL (USA).

The investigation has been performed at the Dzhelapov Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2010

ВВЕДЕНИЕ

Международный линейный коллайдер (ILC) — одна из фундаментальных альтернатив на дальние, после LHC, перспективы развития физики частиц. В международном физическом сообществе есть мнение, что успехи исследований на LHC определяют физическую программу, сроки сооружения и энергию столкновения e^+e^- -пучков на ILC.

После достижения результатов принципиальной важности по созданию цилиндрических Ti + SS биметаллических переходников для криомодуля ILC методом взрыва коллаборацией ОИЯИ/Дубна–ВНИИЭФ/Саров–INFN/Пиза–FNAL/Батавия [1–8] авторы перешли к следующей, более сложной, но очень важной задаче по изменению дизайна криомодуля ILC — к решению проблемы замены титановой оболочки дьюара на оболочку из нержавеющей стали. Задача нетривиальная и осложняется тем, что ниобиевый резонатор (Nb cavity), который, собственно, и ускоряет электроны (позитроны), изготавливается с применением технологии высочайшего уровня и весьма чувствителен ко всем окружающим дополнительным элементам конструкции криомодуля, что может повлиять на параметры формируемого e^-e^+ -пучка. Конструкция этого переходника была обсуждена и сформулирована на трехстороннем совещании в феврале 2009 г. в Пизе представителями ОИЯИ, FNAL и INFN. Рассмотрены различные схемы сварки взрывом переходника Nb + SS, и приняты две схемы, предложенные ОИЯИ: а) с наружной плакировкой и б) с внутренней плакировкой. По схеме а) к ниобиевой трубке снаружи методом взрыва приваривается трубка SS, а к ней электронно-лучевой сваркой приваривается SS-фланец. По схеме б) ниобиевая трубка при взрыве внутри нее сразу приваривается к SS-фланцу.

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

В соответствии с требованиями новой схемы криомодуля IV поколения ILC необходимо было провести исследования возможности получения сваркой взрывом биметалла (сталь 08X18H10T + ниобий НБ-1) цилиндрического типа с целью применения его в качестве переходных элементов для криомодуля международного линейного коллайдера.

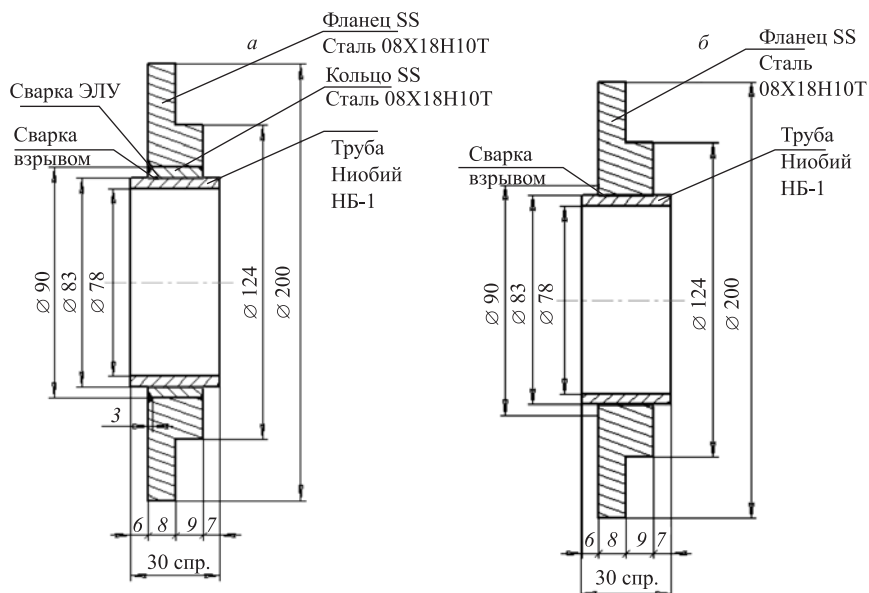
В настоящей работе ставились задачи:

- 1) разработать опытные технологические процессы изготовления сваркой взрывом переходных элементов цилиндрического типа с наружным и внутренним расположением заряда взрывчатого вещества (ВВ);
- 2) провести испытания сварного соединения на герметичность;
- 3) исследовать макро- и микроструктуры сварного соединения.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Постановка опытов. Постановка опытов включала в себя решение ряда следующих конструктивных и технологических задач:

- разработку конструкций биметаллических переходных элементов трубного типа;



1. Ниобиевая трубка сваривается сваркой взрывом со стальной трубкой 08X18H10T
2. Стальное кольцо сваривается со стальным фланцем 08X18H10T электронно-лучевой сваркой (ЭЛУ) на глубину 3 мм с обоих торцов

Ниобиевая трубка сваривается сваркой взрывом со стальным фланцем 08X18H10T

Рис. 1. Конструкции биметаллического (сталь 08X18H10T+ниобий НБ-1) трубного переходного элемента: с наружной (а) и внутренней (б) плакировкой

- выбор конструктивных и технологических параметров исходных заготовок и вспомогательной оснастки;
- выбор схем сварки взрывом;
- выбор технологических параметров сварки взрывом;
- разработку конструкции макетов для проведения испытаний на герметичность.

Разработка конструкции биметаллического переходного элемента и макетов для испытаний на герметичность. Согласно техническим требованиям, предъявляемым к конструкции криомодуля международного линейного коллайдера, была разработана конструкция опытного образца его переходного элемента (рис. 1).

Для оценки герметичности биметаллического переходного элемента при комнатной температуре были разработаны специальные макеты (рис. 2).

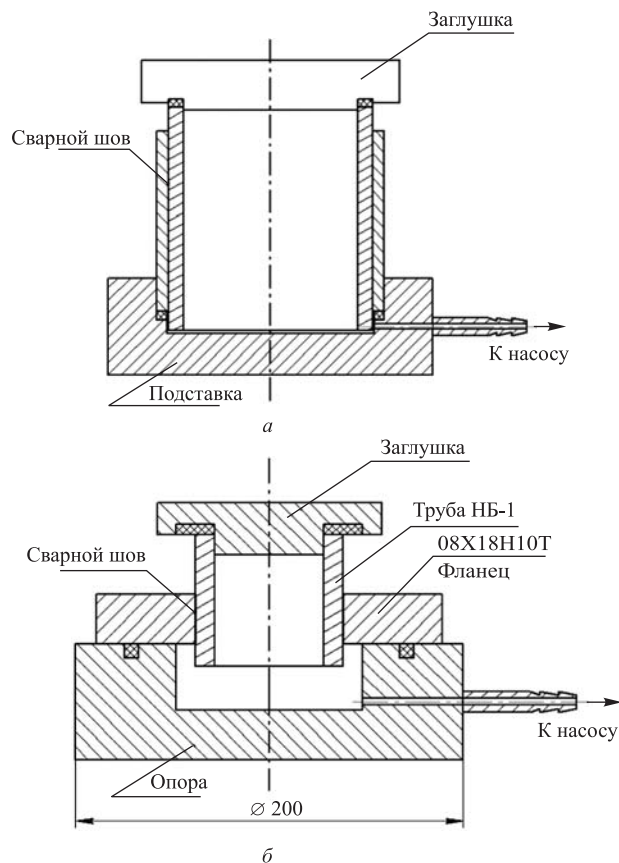


Рис. 2. Конструкции макетов для проверки герметичности с наружной (а) и внутренней (б) плакировкой стали ниобием

Методика проведения экспериментов по сварке взрывом трубных биметаллических (сталь 08X18H10T + ниобий НБ-1) переходных элементов. Целью настоящего исследования являлось получение максимума прочности и герметичности сварных соединений в зависимости от трех параметров: скорости детонации, высоты заряда $H_{ВВ}$ и сварочного зазора h , т. е. такой совокупности этих параметров, при которой предел прочности $\tau_{ср}$ на срез слоев максимален.

При проведении исследований технологии изготовления сваркой взрывом трубных биметаллических (сталь 08X18H10T + ниобий НБ-1) переходных элементов были приняты две схемы: наружной и внутренней плакировки (см. рис. 1).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ ПО СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

В результате проведенных работ по сварке взрывом изготовлено 3 шт. переходных элементов с наружным и 2 шт. с внутренним расположением заряда ВВ. Размеры трех переходных элементов с наружным расположением заряда ВВ после механической обработки приведены на рис. 3–5.

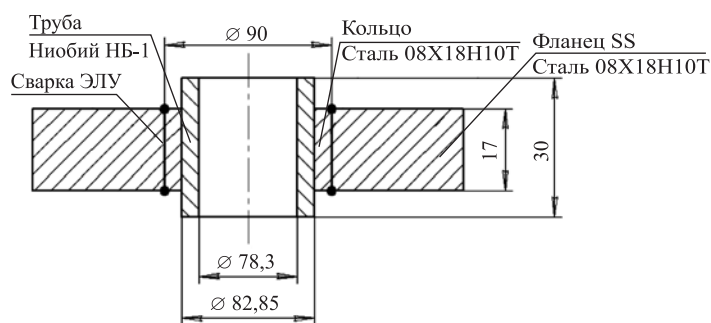


Рис. 3. Эскиз переходного элемента № 1

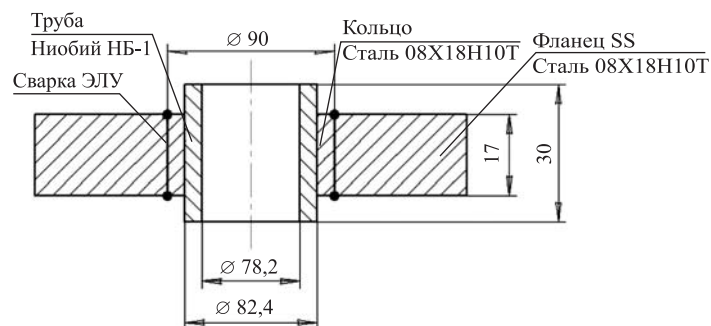


Рис. 4. Эскиз переходного элемента № 2

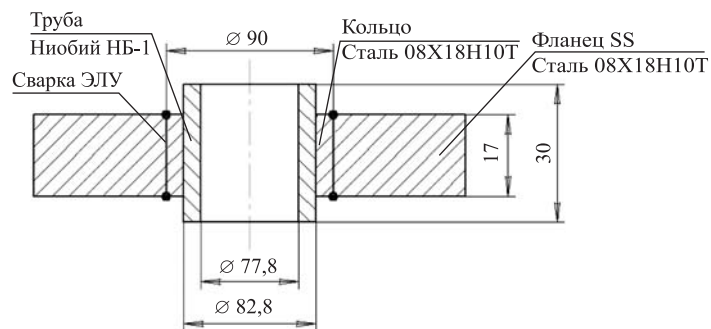


Рис. 5. Эскиз переходного элемента № 3

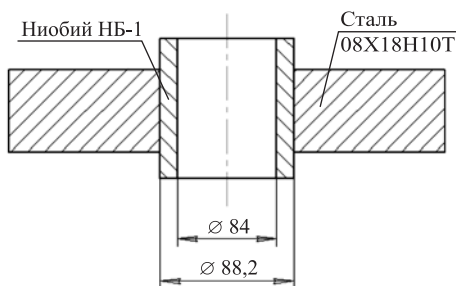


Рис. 6. Эскиз переходного элемента № 4

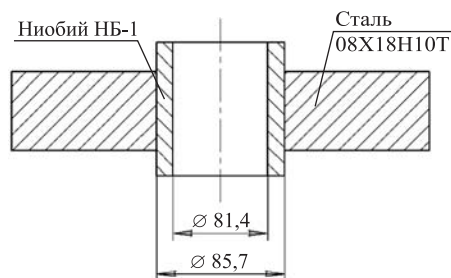


Рис. 7. Эскиз переходных элементов № 5, 6

Размеры трех переходных элементов с внутренним расположением заряда ВВ после механической обработки приведены на рис. 6, 7.

4. ИСПЫТАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ

Контроль герметичности сварного соединения проводился на пяти переходных элементах с применением прибора типа ПТИ (определение гелиевых течей). Образцы были проконтролированы при комнатной температуре. Результаты измерения герметичности показали, что переходные элементы герметичны ($< 1 \cdot 10^{-9}$ атм \cdot см³/с).

5. МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ НИОБИЯ НБ-1 И СТАЛИ 08Х18Н10Т

Металлографическим исследованиям подвергались два образца № 1, 2 сварного соединения ниобия и стали 08Х18Н10Т, выполненного сваркой взрывом (рис. 8).

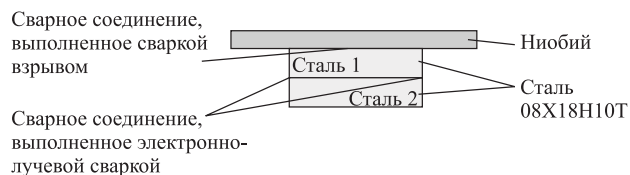


Рис. 8. Схема исследованных образцов

Для проведения металлографического исследования из каждого образца изготавливался микрошлиф по следующей методике. Образцы, для удобства приготовления микрошлифов и последующего металлографического исследования, закреплялись в специальных цилиндрических формах путем их заливки эпоксидным клеем. Эпоксидный клей получали путем смешивания эпоксидной смолы марки ЭД20 и отвердителя типа полиэтиленполиамин в пропорции 5 : 1 (по весу). Затем микрошлифы последовательно шлифовались на шлифовальных шкурках различной зернистости (К35, М40, М28) и полировались на ватмане с помощью алмазной пасты марки АСМ2/1.

В процессе металлографического исследования сварных соединений проводились:

- макроанализ;
- микроанализ;
- измерение микротвердости.

Макроанализ сварных соединений проводился для выявления возможных макродефектов (трещин, непроваров, расслоений) сварных соединений и определения параметров волны поверхности раздела ниобия и стали

08X18H10T (формы, длины, амплитуды). Макроструктура сварных соединений исследовалась на микроскопе МБС-2 при увеличениях до 56 раз.

Микроанализ проводился для исследования микроstructures свариваемых материалов в зоне сварных соединений, выявления возможных микродефектов (интерметаллидных соединений, микронесплошностей). Микроstructure материалов исследовалась после последовательного травления в реактивах 1 (1 мл плавиковой кислоты, 2 мл азотной кислоты, 1 мл серной кислоты, 1 мл воды) и 2 (5 мл азотной кислоты, 50 мл соляной кислоты, 50 мл воды). Реактив 1 применялся для выявления структуры ниобия, а реактив 2 — для выявления структуры стали 08X18H10T. Исследование и фиксирование микроstructure сварных соединений проводились на микроскопе «Axiovert 25» при оптических увеличениях до 1000 раз.

Измерение микротвердости проводилось для определения изменения механических свойств материалов в зоне сварных соединений. Метод измерения микротвердости заключается в том, что на исследуемую поверхность при определенной нагрузке P (0,1 Н) вдавливается алмазная пирамидка с квадратным основанием правильной четырехгранной формы с углом при вершине, равным 136° . После выдержки в течение 15...20 с нагрузка с пирамидки снимается, на исследуемой поверхности остается отпечаток, диагонали которого измеряются, и далее вычисляется их среднее значение (d).

Значение микротвердости HV подсчитывается как частное от деления нагрузки на условную площадь боковой поверхности полученного отпечатка F :

$$HV = \frac{P}{F}, \text{ где } F = \frac{d^2}{1,8544}.$$

Измерение микротвердости проводилось на приборе MICROMET 5114.

Макродефекты типа трещин, непроваров, расслоений не обнаружены.

В исследованных образцах после сварки взрывом наблюдается волнообразный характер сварного соединения ниобия и стали (рис.9). Волны,

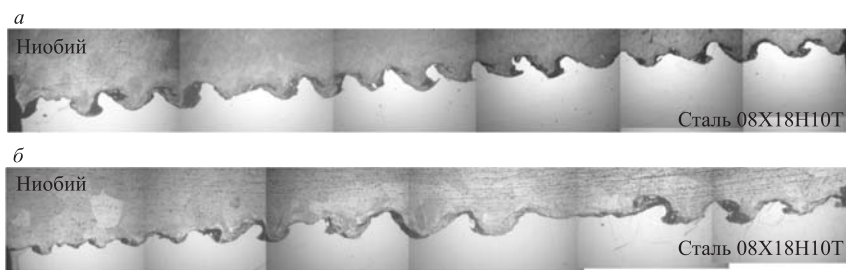


Рис. 9. Макроструктура сварного соединения ниобий+сталь 08X18H10T: а) образец №1; б) образец №2

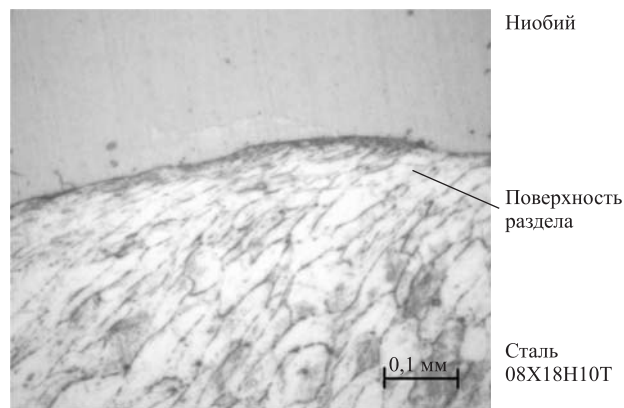


Рис. 10. Микроструктура сварного соединения ниобия и стали 08X18H10T, выполненного методом сварки взрывом

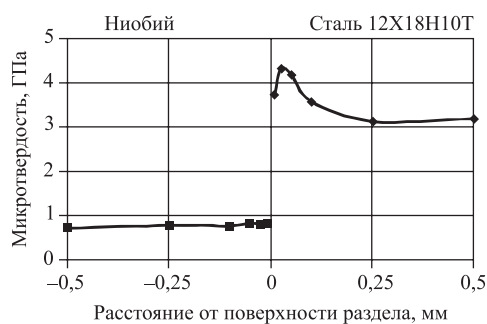


Рис. 11. Типичное распределение микротвердости в зоне сварного соединения ниобия и стали 08X18H10T, полученного сваркой взрывом (образец № 1)

образовавшиеся при сварке взрывом, имеют форму, близкую к синусоидальной. Амплитуды и длины волн в обоих образцах практически одинаковы и равны $\approx 0,2 \dots 0,5$ мм, $\approx 0,5 \dots 1,5$ мм соответственно.

Типичная микроструктура сварного соединения ниобия и стали 08X18H10T приведена на рис. 10.

Распределение микротвердости материалов около поверхности раздела показано на рис. 11. Наиболее интенсивное упрочнение стали 08X18H10T происходит в узкой зоне шириной $\approx 0,2 \dots 0,25$ мм, около поверхности раздела. Изменение микротвердости ниобия не обнаружено.

При сварке взрывом ниобия и стали 08X18H10T в зоне контакта материалов происходит образование микродефектов типа микронесплошностей и интерметаллидных фаз (рис. 12). Микродефектов в исследованных образцах достаточно много, но они не образуют сплошной прослойки.

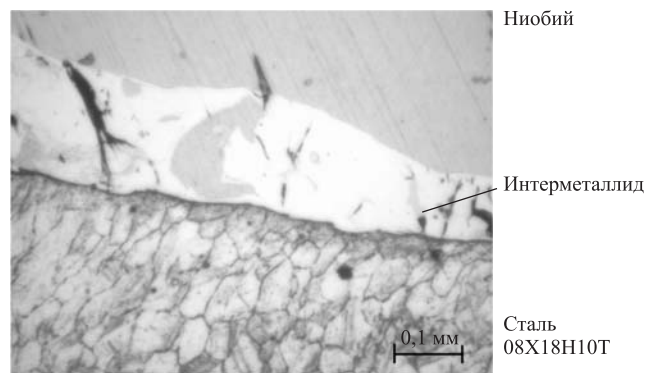


Рис. 12. Типичная микроструктура сварного соединения в зоне интерметаллида

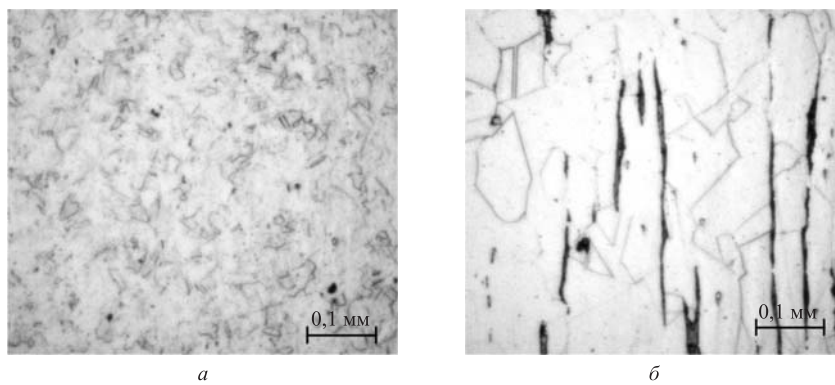


Рис. 13. Микроструктура стали 08Х18Н10Т: *а* — сталь 1; *б* — сталь 2 (см. рис. 8)

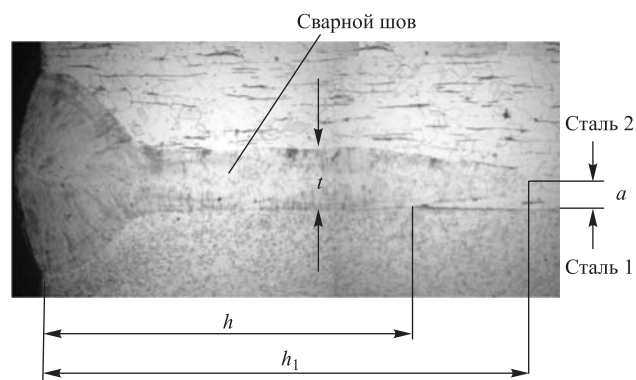


Рис. 14. Характерный вид сварного шва, выполненного электронно-лучевой сваркой

Интерметаллиды, образовавшиеся при сварке взрывом, отличаются высокими твердостью ($\approx 8,5 \dots 10,5$ ГПа) и хрупкостью.

Структура свариваемых материалов приведена на рис. 13.

Сварной шов имеет форму, характерную для сварного соединения, выполненного электронно-лучевой сваркой (рис. 14).

Результаты металлографического исследования сварных швов приведены в таблице.

Результаты исследования сварных швов

№ образца	№ сварного шва	Глубина провара (h), мм	Глубина проплавления (h_1), мм	Смещение сварного шва (a), мм	Ширина сварного шва (t), мм	Дефекты
1	1-1	3,0	3,8	0,2	0,5	Нет
	1-2	2,9	3,1	0,15	0,6	2 поры $\approx \varnothing 0,01$ мм
2	2-1	2,8	2,8	0,05	0,4	4 поры $\approx \varnothing 0,01$ мм
	2-2	2,9	3,7	0,2	0,5	Нет

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате использования уникального метода сварки взрывом разнородных материалов по цилиндрической схеме впервые в мире получены цилиндрические биметаллические переходники Nb + SS для использования в криомодуле IV поколения международного линейного коллайдера ILC. Первые опытные образцы переходников прошли первичные испытания на герметичность, подвержены макроанализу и микроанализу с целью проверки герметичности и прочности соединения в результате сварки взрывом. В этих испытаниях достигнуты следующие результаты: измеренный уровень течи в сварном соединении составил величину $Q \approx 10^{-9}$ атм · см³/с, сварные швы обладают необходимой твердостью и не имеют дефектов. На рис. 15 приведен один из образцов Nb + SS переходника. Предварительные тесты с применением термоциклирования в жидком азоте и облучения ультразвуком, осуществленные в INFN (Пиза, Италия), позволили оценить верхнюю границу течи во всех образцах: $Q \leq (3-5) \cdot 10^{-10}$ атм · см³/с. Далее предстоит провести основные криогенные испытания при температуре жидкого гелия в FNAL (США) на специальных криогенных стендах, на которых, собственно, тестируются изготавливаемые в США криомодули.



Рис. 15. Образец переходника Nb + SS, полученный методом внутренней плакировки

ЛИТЕРАТУРА

1. *Sabirov B.* Production of Bimetallic Transition Tube Elements for the ILC Cryomodule // JINR News. 2008. No. 4. P. 19.
2. *Malkov I. et al.* Investigation of the Possibility of Production the Bimetallic Tube Transition Element by Explosion Welding for the Cryomodule of the International Linear Collider. JINR, E13-2008-109. Dubna, 2008.
3. *Basti A. et al.* Leak Rate Measurement on Bimetallic Transition Samples for the ILC Cryomodules. ILC-REP-PIS-002. 2007; JINR, E13-2008-110. Dubna, 2008.
4. *Basti A. et al.* Characterization Measurements of Ti + SS Bimetallic Transition Joint Samples. ILC-NOTE-2008-044. 2008; JINR, E13-2008-111. Dubna, 2008.
5. *Valentini R. et al.* Microstructural and Qualitative Chemical Analysis of a SS–Ti Transition Joint Obtained by Explosion Bonding Technique. Laboratorio di Scienza dei Metali. Univ. di Pisa, 2007.
6. *Basti A. et al.* Mechanical Tests of Titanium–Stainless Steel Bimetallic Transition Joints. ILC-NOTE-2008-046. 2008.
7. *Budagov J. et al.* Superfluid He Testing of Stainless Steel–Titanium Transitions Fabricated by Explosive Welding. JINR, E13-2009-99. Dubna, 2009.
8. *Soyars W. et al.* Superfluid Helium Testing of a Stainless Steel to Titanium Piping Transition Joint. Cryogenic Engineering Conference at Tuscon, Arizona, USA, 2009.

Получено 12 мая 2010 г.

Редактор *А. И. Петровская*

Подписано в печать 30.06.2010.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 1,11. Тираж 325 экз. Заказ № 57030.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/