

## МОДЕРНИЗАЦИЯ КРИОМОДУЛЯ ЛИНЕЙНОГО КОЛЛАЙДЕРА ILC

*А. Басти*<sup>1</sup>, *Ф. Бедески*<sup>1</sup>, *А. Брызгалин*<sup>2</sup>, *Ю. Будагов*<sup>3</sup>,  
*П. Фаббрикаторе*<sup>1</sup>, *Э. Хармс*<sup>4</sup>, *С. Илларионов*<sup>2</sup>, *С. Нагайцев*<sup>4</sup>,  
*Е. Пекар*<sup>2</sup>, *В. Рыбаков*<sup>5</sup>, *Б. Сабиров*<sup>3,\*</sup>, *Ю. Самароков*<sup>5</sup>,  
*Г. Ширков*<sup>3</sup>, *В. Солярс*<sup>4</sup>, *Ю. Таран*<sup>3</sup>, *Г. Трубников*<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Национальный институт ядерной физики, Пиза и Генуя, Италия

<sup>2</sup> Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

<sup>3</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>4</sup> Национальная ускорительная лаборатория им. Э. Ферми, Батавия, США

<sup>5</sup> Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия

Суммируются результаты создания и тестирования модифицированных компонентов криомодуля международного линейного коллайдера (ILC). Для удешевления проекта ILC предложено заменить титановые компоненты криомодуля на нержавеющей сталь (SS). Новые биметаллические переходники (Ti/SS, Nb/SS) были изготовлены по уникальной методике, основанной на сварке взрывом. Последовательное совершенствование этих компонентов до последней версии Nb/Ti/SS переходного элемента привело к существенной модификации криомодуля ILC. Этот новый элемент решил проблему остаточных напряженностей, а его специфическая конструкция предотвращает возможное смещение из-за разницы в коэффициентах линейного расширения составляющих деталей металлов. Тесты на течь с газом He не показали течи при ее фоновой скорости  $\approx 0,2 \cdot 10^{-10}$  атм  $\cdot$  см<sup>3</sup>/с. Результаты этих тестов весьма обнадеживающие. Новейшая разработанная конструкция триметаллического образца Nb/Ti/SS сулит более технологичное и более дешевое производство криомодулей ILC. Исследования показали, что методика сварки взрывом применима не только для дешевого массового производства криомодулей ускорителей, но и для лабораторных исследовательских приборов и для общинженерных задач.

This paper summarizes test results of modified components for the cryomodule of the International Linear Collider (ILC). To make the ILC project even cheaper, it is proposed to replace titanium cryomodule components with stainless steel (SS) ones. New bimetallic transitions (Ti/SS, Nb/SS) have been produced by a unique method based on explosion welding. Stepwise upgrading of these components to the latest version of the Nb/Ti/SS

---

\*E-mail: sabirov@jinr.ru

transition element has led to an improvement of the ILC cryomodule. This new component resolves problems of residual stress, and its peculiar design prevents the possibility of a shift due to the difference in the linear expansion coefficients of the constituent metals. He-gas leak testing found no leaks at the background rate of  $\approx 0.2 \cdot 10^{-10}$  atm · cm<sup>3</sup>/s. The results of these tests are very encouraging. The newly developed design of triple-metallic Nb/Ti/SS samples promises more technological and cheaper manufacture. Investigations have shown that explosion welding allows unique tri-metallic components to be made for cryogenic units of accelerators, for research equipment, and for civil engineering tasks.

PACS: 29.27.Eg; 41.75.Ht; 29.20.Ej

## ВВЕДЕНИЕ

В мае 2005 г. Международный комитет по будущим ускорителям (ICFA) при Международном союзе чистой и прикладной физики (IUPAP) объявил о достижении консенсуса и вытекающей из него необходимости глобализации и объединения усилий научных центров мира в создании ускорительного комплекса нового поколения: электрон-позитронного линейного коллайдера. Сегодня этот уникальный проект XXI в. обрел общепринятое название — международный линейный коллайдер (International Linear Collider, ILC).

Коллайдер обеспечит столкновения электронов с позитронами при значениях энергии 500–1000 ГэВ и больше. ILC является следующим шагом после Большого адронного коллайдера (ЛHC), крупнейшего в мире ускорителя частиц, построенного в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН, Женева).

В Объединенном институте ядерных исследований работы по теме ILC были включены в Проблемно-тематический план ОИЯИ.

В настоящей статье суммированы результаты НИОКР, достигнутые группой ОИЯИ в сотрудничестве с группой FNAL (Батавия, США), INFN (Пиза и Генуя, Италия), ВНИИЭФ (Саров, Россия) и ИЭС им. Е. О. Патона (Киев, Украина) по тематике ILC.

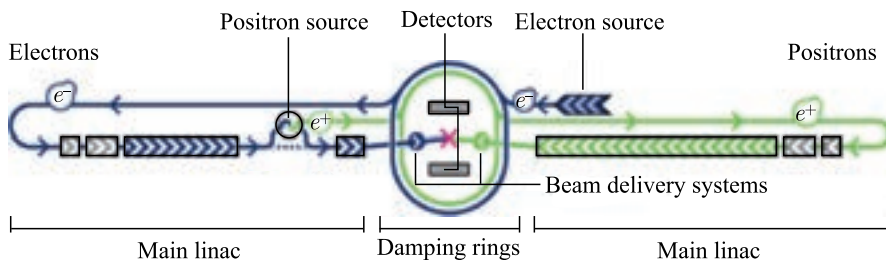


Рис. 1. Схематический вид ускорителя ILC

Ускоритель предназначен для ускорения электрон-позитронных пучков до энергии 0,5 ТэВ (в первом варианте), общая длина ускоряющей части  $\sim 35$  км (рис. 1).

На этой длине электроны и позитроны ускоряются с помощью сверхпроводящих резонаторов, изготовленных из сверхчистого ниобия (Nb). Всего понадобится около 20 000 таких резонаторов. Резонаторы должны находиться при температуре 1–2 К, для чего их помещают в титановые (Ti) сосуды, наполненные жидким гелием. Для непрерывного питания этих сосудов по всей длине ускорителя протянута гелиопитающая труба из титана. Выбор рабочего материала из титана обусловлен особенностями свойств сварки ниобия и титана.

### БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ Ti + SS-ПЕРЕХОДНИКИ

Руководящим органом ILC был рассмотрен и исследовался в ОИЯИ вариант изготовления гелиопитающей трубы из нержавеющей стали (SS), что сулит весьма существенное удешевление проекта. Ключевой проблемой такой конструкции оказалась проблема обеспечения перехода от нержавеющей трубы к титановому сосуду (рис. 2).

Как известно, SS и Ti общепринятыми методами электронно-лучевой сварки не свариваются. Японская группа из известного физического центра КЕК попробовала сварить SS и Ti двумя нетрадиционными методами: методом фрикционной сварки и методом горячего изостатического давления. Детали в общем-то сварились, но место соединения оказалось хрупким, как стекло, при воздействии сверхнизких температур, при которых работают сверхпроводящие криомодули. Нужно было искать более надежный метод сварки. Такой метод был найден в ФГУП РФЯЦ ВНИИЭФ в г. Сарове Нижегородской области [1, 4, 9].

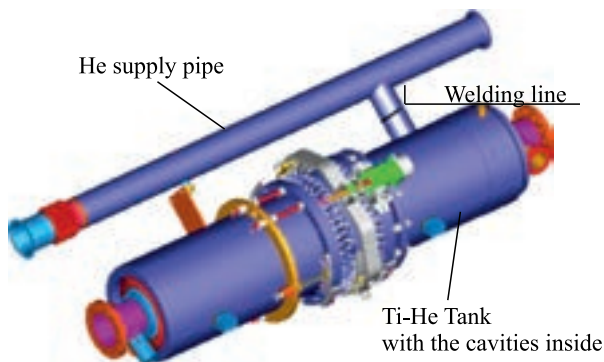


Рис. 2. Способ соединения гелиопитающей трубы с титановым сосудом, внутри которого находится ниобиевый резонатор

Уникальный метод сварки, предложенный в Сарове, основан на эффекте использования энергии взрыва. Эта методика в мире в общем-то известна, но она применялась для сварки *плоских деталей*. В Сарове была разработана и осуществлена методика сварки цилиндрических деталей. При этом были поставлены следующие задачи:

- разработка опытного техпроцесса изготовления сваркой взрывом биметаллического переходного трубного элемента;
- исследование микроструктуры сварного соединения;
- проведение испытаний герметичности соединения при комнатной и криогенной температурах.

Первый образец трубного биметаллического переходного элемента получен на основе российского материала: стали 12X18H10T и титана BT1-0 [2, 3]. Были проведены металлографические исследования. Результаты этих испытаний следующие:

- 1) макродефекты сварных соединений не обнаружены;
- 2) наблюдался волнообразный синусоидальный характер сварного соединения, что способствует повышению прочности соединения; длина и амплитуда волн были 0,3 и 0,05 мм соответственно;
- 3) при сварке взрывом произошло образование отдельных микродефектов, но они расположены локально и не образуют сплошной прослойки;
- 4) наблюдается упрочнение металла в зоне сварного соединения; наиболее интенсивное упрочнение материала происходит в узкой зоне около поверхности раздела титана и стали шириной  $\sim 0,5$  мм, вне этой зоны упрочнение снижается;
- 5) проведен тест на измерение прочности сварного соединения на срез. Результат оказался весьма впечатляющим —  $\tau_{ср} \approx 250$  МПа.

Образец был представлен на совещании по ILC в Милане в 2006 г., где произвел огромное впечатление на участников и получил их всеобщее одобрение.

Рабочий вариант переходника был изготовлен из Ti китайского производства марки GRADE2 и нержавеющей стали (SS) австрийского производства марки 316L. Методом взрыва была изготовлена переходная трубка с использованием связующего бандажа из российской нержавеющей стали (рис. 3).

Этот биметаллический образец был подвергнут масштабному испытанию в Дубне и Пизе [5, 6].

1. В Дубне образец прошел 6 циклов термотеста: охлаждение в жидком азоте (77 K)  $\rightarrow$  нагревание (300 K); охлаждение  $\rightarrow$  нагревание и т. д. 6 раз. Измерение герметичности выполнено с помощью течеискателя PFEIFER-VACUUM HLT160 при комнатной температуре; результат:  $Q \leq 10^{-7}$  атм  $\cdot$  л/с. Затем внутри образца было создано давление гелием 6,5 атм, образец подвержен облучению ультразвуком при различных температурах и с различной

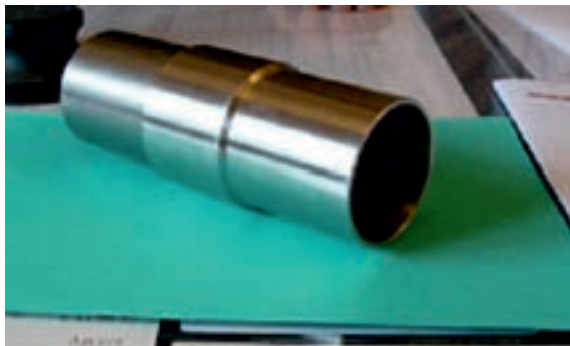


Рис. 3. Пилотный образец биметаллической трубки, изготовленный из китайского титана и австрийской стали

экспозицией — показание течеискателя по-прежнему  $Q \leq 10^{-7}$  атм·л/с. Следующим тестом был тест при криотемпературе: образец охлаждался в криокулере до температуры  $\sim 6$  К и нагревался до комнатной температуры. Таких циклов было 6. Затем измерение герметичности при комнатной температуре:  $Q \leq 10^{-7}$  атм·л/с.

2. В Пизе термоциклы с жидким азотом были повторены. Герметичность измерялась течеискателем Wis Technologies MODUL200 при комнатной температуре (300 К) и составила  $1,2 \cdot 10^{-10}$  мбар·л/с, при температуре 200 К —  $8,6 \cdot 10^{-9}$  мбар·л/с и при температуре, близкой к температуре жидкого азота, 83 К —  $3,4 \cdot 10^{-9}$  мбар·л/с.

По согласованию с партнерами из FNAL и INFN решено для большей статистики результатов тестов изготовить 10 биметаллических образцов и повторить на них масштабные испытания в Сарове, Дубне, Пизе и Батавии.

Образцы были изготовлены в Сарове, затем подвержены многократной процедуре термоциклов последовательно в Дубне и Пизе. Измерения герметичности показали результаты:

- а) при комнатной температуре 300 К —  $7,5 \cdot 10^{-10}$  Торр·л/с;
- б) при температуре 77 К —  $7,5 \cdot 10^{-9}$  Торр·л/с;
- в) при давлении 6,5 атм —  $< 5 \cdot 10^{-10}$  Торр·л/с.

Следующим шагом исследования свойств полученных образцов было тестирование их в реальных рабочих условиях во FNAL: эти трубки предполагается испытать при криогенной температуре 1,6 К и в реальных условиях соединения биметаллических трубок в криомодуле и с нагрузкой высокой радиочастоты 3,9 ГГц. В сотрудничестве с криогенным отделом ускорительного департамента FNAL и ОИЯИ была выработана стратегия работ и последовательность их проведения.

Испытание с высокой радиочастотой предполагалось провести в горизонтальной тестовой системе (HTS). Для этого трубки попарно были сварены между собой титановыми концами в специальном шкафу в аргоновой атмосфере (Glove Box).

Предварительно все трубки были повторно подвержены термоциклированию и испытаны на вакуум при температуре 77 К. Результаты тестов в Дубне и Пизе были подтверждены. Начата подготовка испытаний при криотемпературе в вертикальном тестовом дьюаре (VTD). Трубки поочередно были соединены с высоковакуумной системой RGA (Residual Gas Analyser), и результаты измерений на течь повторились.

Испытания трубок при температуре сверхтекучего гелия (2 К) были осуществлены в двух установках: в вертикальном тестовом дьюаре и в горизонтальной тестовой системе.

Для тестирования в VTD исследуемая пара присоединялась к анализатору RGA, откачивалась и затем окуналась в гелий в сверхтекучем состоянии. В HTS переходники тестируются в реальных условиях сверхтекучего гелия, окруженные вакуумной изоляцией. Пара трубок 5 + 6 испытывалась дважды в вертикальном тестовом дьюаре в течение короткого времени (0,3 и 1,5 ч) и в горизонтальной тестовой системе в течение 30 ч. Результаты измерений продемонстрировали устойчивые и стабильные показания: течь отсутствует на уровне  $Q < (2 - 3) \cdot 10^{-11}$  Па · м<sup>3</sup>/с. Пара трубок 9 + 11 из последней партии трубок с измененными размерами была испытана в VTD в течение 23 ч, а пара 5 + 6 — в течение 20 ч. Результат также весьма впечатляющий: течь не обнаружена на уровне  $Q < 10^{-12}$  Па · м<sup>3</sup>/с [6].

## БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ Nb + SS-ПЕРЕХОДНИКИ

Опираясь на приобретенный опыт с Ti + SS-образцами, мы взяли за следующую задачу по программе ИЛС: исследовать возможность замены титановой оболочки гелиевого криостата на оболочку из нержавеющей стали, что существенно удешевило бы стоимость ускорителя. Для этого нужно было создать переходник от оболочки из нержавеющей стали к ниобиевому резонатору — основному ускоряющему элементу ускорителя [8].

В Сарове впервые были изготовлены 4 Nb + SS-образца по предложенным ОИЯИ двум схемам сварки взрывом: наружная плакировка (рис. 4, а) и внутренняя (рис. 4, б).

Помимо первоначальной задачи — создания методом взрыва переходника Nb → SS — перед нами стояла важная задача по определению возможности использования Nb + SS-переходников, изготовленных методом сварки взрывом, в криомодулях IV поколения ИЛС. Суть вопроса состояла в том, что переход от ниобиевого резонатора к стальному фланцу в нашем образце про-

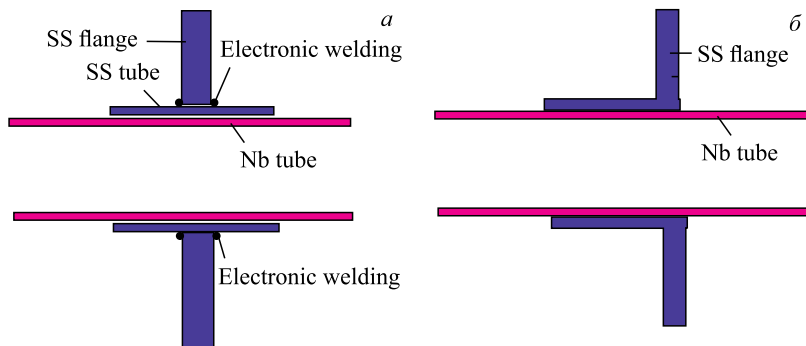


Рис. 4. Схемы сварки Nb-трубок с нержавеющей фланцем

исходит путем приваривания электронно-лучевой сваркой ниобиевой трубки к ниобиевому резонатору.

Температура плавления ниобия  $2460^{\circ}\text{C}$ , поэтому возникает вопрос: как выдержит место соединения Nb + SS такую огромную термонагрузку? Предварительные тесты на плотность соединения Nb с нержавеющей сталью, проведенные с одним образцом методом термоциклирования в жидком азоте, показали вполне удовлетворительные результаты: после 6 термоциклов и ультразвуковой очистки при фоновом значении на детекторе течи  $2 \cdot 10^{-9}$  атм  $\cdot$  см<sup>3</sup>/с течь в образце не обнаружена (образец обдувался газом He). Решающим тестом должен был быть тест на устойчивость сварного соединения под воздействием высокой температуры, так как переходник для функционирования в рабочем положении должен быть приварен к ниобиевому резонатору. Для этого теста были заготовлены ниобиевые кольца с размерами, соответствующими размерам ниобиевой трубы в переходнике. Эти кольца были приварены к трубе с обоих концов электронно-лучевой сваркой в чикагской фирме Sci-aku. При первом же измерении уровня течи при комнатной температуре была обнаружена большая течь в трех точках по линии соединения Nb и нержавеющей стали (рис. 5). Таким образом было продемонстрировано огромное влияние экстремальных температур на плотность соединения, полученного сваркой взрывом. Решение проблемы надо было искать в структурных видоизменениях материалов в результате сварки взрывом и воздействия экстремальных температурных колебаний [10, 11].

Известно, что в результате механической обработки (ковки, прокатки или сварки) металлических изделий могут возникнуть остаточные механические напряжения внутри материала или изделия из-за его пластической деформации. Разрушение механических компонент или конструкций есть следствие не только напряжений, возникающих во время эксплуатации, но также нало-



Рис. 5. Nb + SS-переходник с обнаруженными точками течи

жения их на остаточные напряжения. Для измерения остаточных напряжений мы применили метод нейтронной дифракции. Нейтроны как пробник атомной структуры имеют существенное преимущество перед рентгеновскими лучами и электронами, так как нейтроны взаимодействуют с атомными ядрами, вследствие чего возможна их дифракция. Мы провели измерения остаточной деформации в биметаллических трубках Ti + SS, изготовленных сваркой взрывом. Выбрав для этих измерений трубки Ti + SS, мы исходили из того, что методика сварки идентична для соединений Ti + SS и Nb + SS, а значит, и физика диффузии материалов при взрыве, и возникновение остаточных напряжений в месте их соединения должны быть идентичными. Измерение проводилось на нейтронном пучке реактора ISIS Института Пауля Шеррера (Швейцария) с помощью стресс-дифрактометра POLDY [7]. Результат измерения остаточных напряжений в биметаллической трубке Ti + SS при сканировании соединения титан – нержавеющая сталь показан на рис. 6.

Остаточная напряженность достигает весьма внушительной величины  $\sim 1000$  МПа. При электронно-лучевой сварке или при глубоком охлаждении в жидком гелии возникают дополнительные термические напряжения, и их суперпозиция может вызвать переход титана в состояние глубокой пластической области. Это может привести к локальным микротрещинам в месте соединения Ti + SS (или Nb + SS). К образцам Nb + SS была применена процедура термического отпуска для релаксации остаточных напряжений, причем термоотпуск до процедуры электронно-лучевой сварки и после: нагрев в вакууме со скоростью  $3^\circ\text{C}/\text{мин}$  до температуры  $750^\circ\text{C}$ , выдержка при этой температуре в течение 120 мин и естественное остывание в течение ночи при



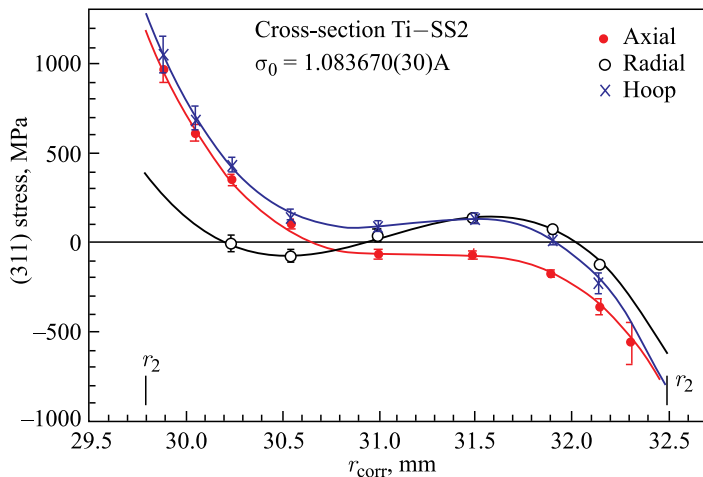


Рис. 6. Измеренная (точки) и фитированная (кривые) радиальные зависимости компонент тензора напряжения, полученные для пика (311), в поперечном сечении Ti + SS

выключенной термопечи в вакууме. После остывания образцы были подвергнуты ультразвуковой очистке в 2%-м растворе реагента Micro90 в деионизированной воде при комнатной температуре в течение 30 мин. Тест на течь производился в режиме термоциклирования в жидком азоте с помощью детектора течи Dupont (Ametek upgrade) с чувствительностью  $10^{-10}$  атм · см<sup>3</sup>/с. Детектор был откалиброван образцом со стандартной течью  $5,3 \cdot 10^{-8}$  атм · см<sup>3</sup>/с. Всего проведено 6 термоциклов. Отличия результатов измерений от цикла к циклу минимальны. В табл. 1 приведены результаты измерений одного из циклов.

Следующим шагом был тест при гелиевой температуре 2 К. Для этого образец был закреплен в специальной оснастке, которая опускалась в вертикальный тестовый дьюар с жидким гелием (рис. 7). Процесс охлаждения длился от 15 до 20 ч: охлаждение жидким азотом, затем заполнение двухфаз-

Таблица 1

Цикл 2	Образец № 1	Образец № 2
Фоновая течь при комнатной температуре, атм · см <sup>3</sup> /с	$1,0 \cdot 10^{-9}$	$5,3 \cdot 10^{-9}$
Фоновая течь при 77 К	Без изменений	Без изменений
Образец в полиэтиленовом пакете, впрыснут газ He, 77 К, атм · см <sup>3</sup> /с	$1,2 \cdot 10^{-9}$	$5,0 \cdot 10^{-9}$
Образец нагрет до комнатной температуры, впрыснут газ He, атм · см <sup>3</sup> /с	Без изменений	$4,9 \cdot 10^{-9}$



Рис. 7. Собранный в рабочее положение образец перед погружением в VTG

ным гелием и охлаждение до 4 К и на последней стадии откачка и переход гелия в сверхтекучее состояние при температуре 1,6–2,0 К. В результате измерений анализатором остаточных газов (Residual Gas Analyser, RGA) распределений по массе газов, находящихся в анализаторе после откачки до вакуума  $10^{-9}$  Торр, в часовой экспозиции при температуре 2 К при уровне фона  $4,6 \cdot 10^{-9}$  атм·см<sup>3</sup>/с течь не наблюдалась.

### МОДИФИКАЦИЯ Nb + Ti + SS-ПЕРЕХОДНИКА

Для исключения влияния остаточных напряженностей на качество Nb + SS-переходника было необходимо найти способ соединения разнородных материалов, подверженных экстремальным термическим и механическим нагрузкам, без влияния на плотность и прочность соединения. Также было необходимо решить проблему влияния на параметры адаптеров разницы в коэффициентах линейного расширения элементов, изготовленных из различных металлов, при огромном изменении температурных нагрузок. Такое решение

было найдено в совместных обсуждениях с группой специалистов из всемирно известного Института электросварки им. Е. О. Патона в Киеве (Украина).

Известно, что наиболее качественные сварные соединения получаются при сварке однородных материалов, например ниобия с ниобием или нержавеющей стали с нержавеющей сталью. В нашем случае переходник должен состоять как минимум из двух металлов — ниобия и нержавеющей стали. Использование для получения соединения ниобия с нержавеющей сталью любых способов сварки плавлением, в том числе электронно-лучевой сварки, неприемлемо для решения поставленной задачи в связи с образованием интерметаллидов типа  $Nb_xFe_y$ , которые не позволяют обеспечить требуемую плотность переходников.

Ранее проведенные эксперименты показали, что при электронно-лучевой сварке ниобия с титаном не образуются интерметаллиды и обеспечивается необходимая плотность соединений по гелию и вакууму. В связи с этим был предложен следующий вариант изготовления переходника.

Диск из нержавеющей стали вначале плакируется с двух сторон титаном с помощью сварки взрывом, затем после придания полученному триметаллу необходимой формы (путем правки и обточки в размер) вырезается отверстие под ниобиевый патрубок. Патрубок вставляется в отверстие и приваривается

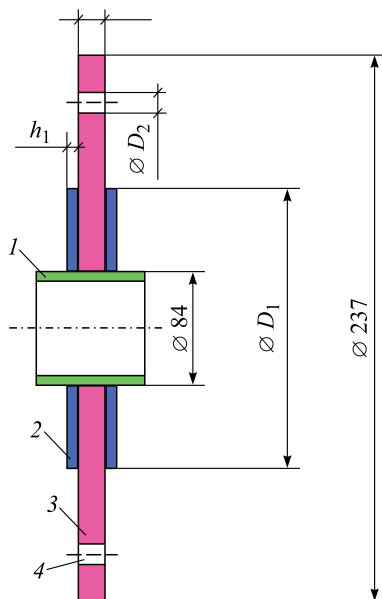


Рис. 8. Конструкция переходника, обеспечивающая отсутствие образования при сварке интерметаллидов ниобия: 1 — ниобиевый патрубок; 2 — титановые пластины; 3 — диск из нержавеющей стали; 4 — технологические отверстия

к титану электронно-лучевой сваркой (рис. 8). Преимущества предлагаемого варианта изготовления переходника:

- гелиевая плотность обеспечивается сваркой ниобия с титаном, которые обладают хорошей свариваемостью;
- отверстие во фланце изготавливается в размер ниобиевой трубки, при этом может быть вварен патрубок резонатора вместо трубки-переходника;
- возможное образование интерметаллидов в соединении титана со сталью, получаемом сваркой взрывом, не влияет на работоспособность переходника, так как через него гелий не может попасть в полость ниобиевой трубы;
- технологически сварка взрывом плоских образцов существенно проще сварки трубных заготовок и позволяет получать соединения с максимально возможной стабильностью качества, что уменьшает вероятность брака;
- после сварки взрывом в случае необходимости будут отбраковываться более дешевые сталь-титановые заготовки;
- максимально возможная стабильность качества, что уменьшает вероятность брака;
- сталь-титановый фланец при необходимости может быть подвергнут термообработке для снижения остаточных напряжений в обычной (не вакуумной) печи;
- уменьшается расход стали и ниобия.

По этой схеме в Институте электросварки им. Е. О. Патона было изготовлено 2 образца триметалл-переходников Nb + Ti + SS: фланец переходника изготавливается из стали 10X17H13M2E (316L), трубка — из ниобия марки NbRRR 300 (рис. 9).

Качество полученного сваркой взрывом соединения титана со сталью оценивали стандартными методами испытаний: на загиб, на отрыв слоев и срез слоев. На рис. 10 показан образец после испытания на загиб. При загибе на



Рис. 9. Образец Nb + Ti + SS-переходника



Рис. 10. Образец биметалла сталь-титан после испытания на загиб

угол  $180^\circ$  образец сохранил свою целостность, расслоения не произошло. Это довольно жесткий вид испытаний, при некачественной сварке граница соединения металлов разрушается.

На рис. 11 представлена схема испытания на отрыв слоев биметалла.

Разрушение образцов произошло по границе раздела сталь–титан, что характерно для этой пары металлов. Прочность на разрыв составила 375 МПа. Испытания на растяжение листового титана в исходном состоянии показали, что предел текучести составляет 390 МПа, предел прочности — 430 МПа.

Испытания на срез слоев (рис. 12) показали прочность на уровне 350 МПа. Такая высокая прочность на срез, сопоставимая с прочностью на отрыв, достигается благодаря волновой границе соединения сталь–титан.

Условия эксплуатации переходника не предполагают приложения к нему нагрузок, приводящих к срезу или отрыву слоев, прочность соединения можно считать удовлетворительной.

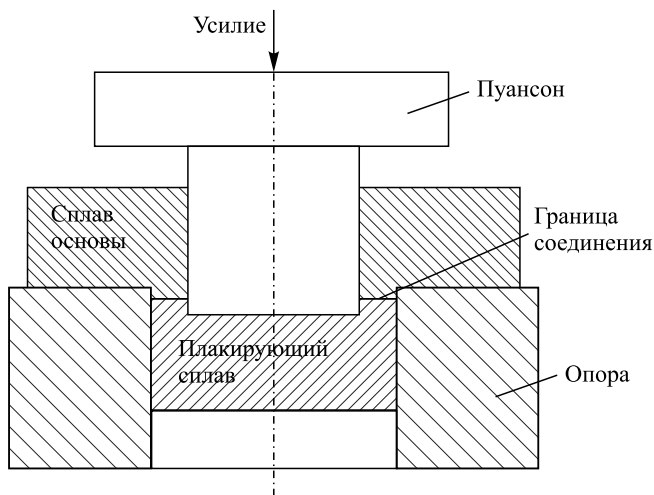


Рис. 11. Схема испытания на отрыв слоев



Рис. 12. Схема испытания образца на срез слоев

Для определения прочности сварочного соединения проведены исследования микротвердости методом Виккерса. Результаты измерений твердости при нагрузке 100 г представлены на рис. 13.

Из рис. 13 видно, что титан и сталь претерпели значительное упрочнение в результате соударения при сварке взрывом, титан уже на расстоянии

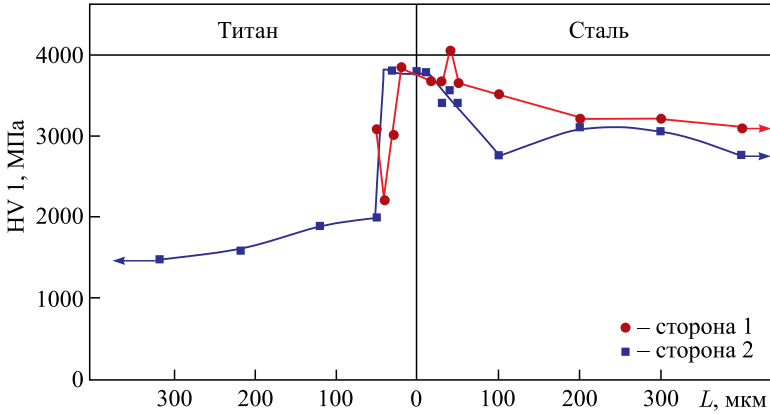


Рис. 13. Микротвердость на границе сварки взрывом сталь–титан

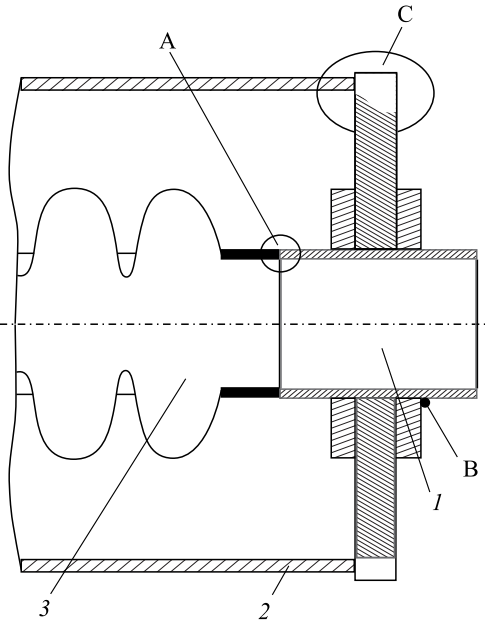


Рис. 14. Соединение Nb + Ti + SS-переходника с криомодулем: 1 — ниобиевый патрубков; 2 — оболочка криомодуля из нержавеющей стали; 3 — ниобиевый резонатор

300 мкм от границы имеет свою начальную твердость, сталь упрочняется на большую глубину.

Таким образом, проведенные исследования позволяют утверждать, что разработанный режим сварки триметаллической заготовки переходника является близким к оптимальному. Согласованным решением коллаборации ОИЯИ–FNAL–INFN для большей статистики было предложено изготовить 10 триметаллических Nb + Ti + SS-образцов в Институте электросварки им. Е. О. Патона и повторить на них масштабные испытания в Киеве, Дубне, Пизе и Генуе.

На рис. 14 показан фрагмент криомодуля, который должен быть соединен с Nb + Ti + SS триметаллическим переходником. Позиции А (сварка Nb + Nb) и В (сварка Ti + Nb) соединены электронно-лучевой сваркой, позиция С (сварка SS + SS) — обычной электродуговой сваркой.

Для имитации позиции А к концам ниобиевой трубы приваривались электронно-лучевой сваркой ниобиевые кольца соответствующего диаметра и длиной 20 мм.

Испытания на плотность проводились в INFN (Пиза и Генуя, Италия). Для этого было создано тестовое устройство (рис. 15), обеспечивающее надежную герметизацию с помощью индиевых уплотнителей при испытаниях в условиях экстремально низких температур — в жидком гелии 4,2 К.



Рис. 15. Тестовое устройство

На первом этапе в Пизе проведены тесты на герметичность при температуре жидкого азота 77 К в режиме термоциклов. Измерения проводились с помощью течеискателя VARIAN979, обеспечивающего вакуум  $10^{-4}$  Торр и чувствительность измерения  $0,1 \cdot 10^{-10}$  атм · см<sup>3</sup>/с.

Тесты проводились по отработанной схеме термоциклов в жидком азоте: образец Nb + Ti + SS закреплялся в тестовом устройстве, который откачивался до вакуума  $10^{-4}$  Торр и опускался в дьюар с жидким азотом. Степень охлаждения образца до температуры 77 К определялась по прекращению «кипения» азота. Затем образец извлекался и нагревался тепловыми пистолетами (HEAT GUN) до комнатной температуры и снова в жидкий азот → нагрев и т. д. до 6–7 раз. Измерение фоновой скорости течи проводилось при комнатной температуре. Для теста на течь с газом гелия образец помещался в пластиковый пакет, пакет плотно закрывался и с помощью иглы проделывалось отверстие в пакете и вдувался газ гелий внутрь пакета.

Тесты с жидким гелием проводились на жидко-гелиевой установке INFN в Генуе. В целях экономии дорогостоящего гелия и времени для охлаждения установки до гелиевой температуры было изготовлено устройство, в котором одновременно могли быть собраны пять Nb + Ti + SS-образцов (рис. 16), которые опускались в дьюар и одновременно охлаждались.

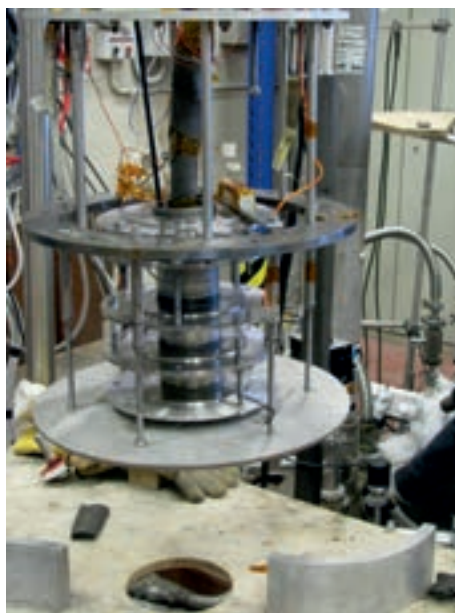


Рис. 16. Собранный ансамбль из пяти образцов перед погружением в гелиевый дьюар



Для контроля достижения температуры жидкого гелия к верхнему и нижнему переходникам прикреплялись термодатчики. Входная горловина дьюара диаметром 80 см находится на уровне пола, дьюар высотой 4 м зарыт в землю и наполняется жидким гелием. Процесс наполнения длится около 1 ч, и по достижении температуры 4,2 К (рис. 17) на обоих термодатчиках охлаждение прекращается. Процесс нагревания длится примерно столько же. Образцы извлекаются из дьюара, нагреваются до комнатной температуры, после чего



Рис. 17. Показания термодатчиков: слева — верхний; справа — нижний

Таблица 2. Результаты тестов на течь в процессе термоциклов в жидком гелии (при 300 К,  $10^{-10}$  атм · см<sup>3</sup>/с)

№ образца	Перед термоциклами в жидком гелии		После термоциклов в жидком гелии	
	Фон	Газ He	Фон	Газ He
1	0,2	0,3	0,2	Без изменений
2	0,2	Без изменений	0,1	Без изменений
3	0,5	0,2	0,1	Без изменений
4	2,0	0,2	0,1	Без изменений
5	0,2	2,1	0,7	3,0
6	0,1	0,3	0,1	0,7
7	0,9	1,5	0,1	0,2
8	0,4	1,0	0,3	1,0
9	0,1	1,7	0,3	0,2
10	0,1	Без изменений	0,2	0,6

процесс охлаждения повторяется. В целях экономии времени и дорогого газа Не мы ограничились двумя термоциклами с жидким гелием.

В табл. 2 приведены результаты тестов для всех 10 образцов Nb + Ti + SS-переходников в процессе термоциклов в жидком гелии [12, 13].

Как видно по результатам тестов, все переходники соответствуют требованиям, предъявляемым к устойчивой и стабильной работе криомодуля. Разработанная технология сварки взрывом разнородных материалов обеспечила надежное по плотности и прочности соединение компонентов криомодуля.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приводимые в данной работе результаты являются завершающими в серии исследований по определению возможности применения уникальной технологии сварки взрывом для создания элементов криогенных систем, работающих в экстремальных условиях сверхнизких температур. Для замены титанового корпуса криостата для жидкого гелия (1,8 К) на нержавеющую сталь создан совершенно новый переходной элемент для связи ниобиевого резонатора с оболочкой из нержавеющей стали. Физико-технические свойства этого уникального нового узла линейного ускорителя чрезвычайно чувствительны к точности реализации проектных параметров. Поэтому осуществлены технологические разработки высочайшего качества как для обеспечения этих точностей, так и для устойчивости выходных характеристик изделия к неизбежным вариациям производственных точностей в крупномасштабных промышленных сериях.

В результате наших исследований показано, что методом взрыва возможно изготовление вполне адекватных биметаллических и триметаллических компонентов криогенных деталей линейных ускорителей. Показано также, что величина остаточных напряжений, возникших в результате сварки взрывом, и наличие их в условиях экстремально низких и высоких температур имеет довольно большое значение ( $\approx 1000$  МПа), которое может вызвать пластическую деформацию и разрушение связи материалов. Применение соединения ниобия с нержавеющей сталью (Nb + SS) через промежуточный связующий титан сваркой взрывом привело к достижению результата принципиального научно-технического значения: впервые в мире создано соединение Nb + Ti + SS (триметалл), предназначенное для реконструкции криомодуля ускорителя ИС. Следует помнить, что создание промышленно-приемлемой (для массового производства) технологии соединения Nb + Ti + SS кардинально упрощает конструкцию криомодуля IV поколения: жидко-гелиевые коммуникации и криостат (с Nb-резонатором внутри) изготавливаются не из титана, а из нержавеющей стали, что привносит исключительную экономию в стоимость криомодуля. Предварительные тесты на плотность соединения Nb с нержавеющей сталью методом термоциклирования в жид-

ком азоте и в жидком гелии при фоновом значении на гелиевом детекторе течи  $0,2 \cdot 10^{-10}$  атм  $\cdot$  см<sup>3</sup>/с показали отсутствие течи в образце (образец обдувался газом He), что говорит о высоком качестве плотности и прочности соединения.

В предложенной нами конструкции исключены возможности влияния остаточных напряжений на качество соединений и появления течи в соединении Nb + Ti + SS, а также влияния разности коэффициентов линейного расширения компонентов сборки. На сегодня сварка взрывом является безальтернативным методом создания Nb + SS-переходников. Эта методика может быть применима и для любых других криогенных систем.

**Благодарности.** Мы хотим выразить огромную признательность нашим соавторам проф. А. М. Балагурову из ЛНФ им. И. М. Франка ОИЯИ, д-ру Ф. Вентеру из PSI (Швейцария), И. Малкову, В. Перевозчикову из РФЯЦ–ВНИИЭФ (Саров, Россия), Н. Дханарай, М. Фоллий, Р. Кефарту, А. Клебанеру, Д. Митчеллу из FNAL (Батавия, США) за их неоценимый вклад в публикации в процессе экспериментальных работ.

Мы выражаем нашу благодарность К. А. Андерсону, Г. Картеру, Л. Кули, Р. Монтье, Д. Планту, Б. Смиту, Б. Теннису и В. Ярбе из криогенного отдела и технического отделения ускорителя FNAL за организационную и техническую помощь в подготовке и проведении тестов, а также техническому персоналу INFN (Пиза и Генуя, Италия) за создание оборудования для тестов и помощь в их проведении в Пизе и Генуе.

Мы хотим выразить особую благодарность техническому персоналу РФЯЦ–ВНИИЭФ за их плодотворную творческую работу по созданию уникального биметаллического трубного соединения.

Мы также глубоко благодарны бывшему директору ОИЯИ акад. А. Н. Сисакяну, научному руководителю РФЯЦ–ВНИИЭФ акад. Р. И. Ильякаеву, бывшему директору FNAL проф. Пьеру Оддону, директору Института электросварки им. Е. О. Патона акад. Б. Е. Патону и дирекции INFN (Пиза) за их дальновидную инициативу, которая привела к многообещающему подходу к решению использования методики сварки взрывом для модернизации криосистемы международного линейного коллайдера (ILC). Достигнутые успехи в создании упомянутого подхода стали возможными только при их постоянной поддержке.

Эта статья написана в сотрудничестве с Fermi Research Alliance LLC по контракту № DE-AC02-07CH11359, с Department of Energy (Office of Science, Office of High Energy Physics) США.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Malkin I. et al.* Investigation of the Possibility of Production of the Bimetallic Tube Transition Element by Explosion Welding for the Cryomodule of the International Linear Collider. JINR Commun. E13-2008-109. Dubna, 2008.

2. *Sabirov B.* Production of Bimetallic Transition Tube Elements for the ILC Cryomodule // JINR News. 2008. No. 4. P. 19.
3. *Sabirov B.* Explosion Welding: New Design of the ILC Cryomodule // JINR News. 2010. No. 3. P. 16.
4. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Под ред. Б. Е. Патона. М.: Машиностроение, 1974.
5. *Sabirov B. et al.* Recent Advances in Ti and Nb Explosion Welding with Stainless Steel for 2 K Operating (ILC Program) // Proc. of the Intern. Workshop on Future Linear Colliders (LCWS11), Granada, Spain, Sept. 26–30, 2011; arXiv:1201.3472.
6. *Sabirov B., Budagov J., Shirkov G.* First Samples of Ti and Nb Tubes Explosion Welding Joint with Stainless Steel for ILC 1.8 K Cryomodule // Phys. Part. Nucl. 2013. V. 44, No. 4. P. 1388.
7. *Taran Yu. V. et al.* Residual Stresses in an Explosion Welding Titanium–Steel Bilayer Pipe by Neutron Diffraction // JINR News. 2011. No. 4. P. 16.
8. *Sabirov B. et al.* Modernisation of the ILC Cryomodule Using High-Tech Technology — Explosion Welding // XXIV Russ. Particle Accelerator Conf. (RuPAC'2014), Obninsk, Russia, Oct. 6–10, 2014.
9. *Лусак В. И., Кузьмин С. В.* Сварка взрывом. М.: Машиностроение, 2005.
10. *Basti A., Sabirov B. et al.* Optimization of ILC Cryomodule Design Using Explosion Welding Technology // Intern. Particle Accelerator Conf. (IPAC'15), Richmond, Virginia, May 3–8, 2015.
11. *Сабиров Б. С. и др.* Способ изготовления переходника для соединения резонатора с кожухом криомодуля коллайдера. Патент RU2540978C1. М., 2015.
12. *Sabirov B. et al.* High Technology Application to Modernisation of International Electron–Positron Linear Collider (ILC) // Proc. of the Conf. “New Trends in High-Energy Physics”, Budva, Montenegro, Oct. 2–8, 2016. P. 284–291.
13. *Sabirov B. et al.* Recent Optimized Design of ILC Cryomodule with Explosion Welding Technology. JINR Commun. E9-2017-23. Dubna, 2017.