

ПРИМЕНЕНИЕ СВАРКИ ВЗРЫВОМ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ТРИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДНИКОВ КРИОМОДУЛЕЙ ЛИНЕЙНОГО КОЛЛАЙДЕРА

А. Г. БРЫЗГАЛИН¹, Е. Д. ПЕКАРЬ¹, П. С. ШЛЕНСКИЙ¹, Г. Д. ШИРКОВ², Ю. А. БУДАГОВ², Б. М. САБИРОВ²

¹ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03150, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

²ОИЯИ. 141980, Россия, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6. E-mail: post@jinr.ru

Предложена оригинальная конструкция переходника для соединения криомодулей линейного коллайдера, обеспечивающая необходимые прочность, гелиевую и вакуумную плотность при относительно низкой себестоимости. Разработаны режимы сварки взрывом плоских заготовок титан–нержавеющая сталь–титан, при которых практически отсутствуют интерметаллиды в зоне соединения. Экспериментальным путем подобраны режимы электронно-лучевой угловой сварки ниобиевого патрубка с титаном переходного диска. Изготовлены опытные образцы переходников, которые успешно прошли испытания на термодублирование и гелиевую плотность. Библиогр. 8, рис. 11.

Ключевые слова: коллайдер, сварка взрывом, гелиевая плотность, переходник, ядерные исследования

Разрабатываемый в настоящее время уникальный международный проект линейного коллайдера имеет важное значение для фундаментальных исследований в области ядерной физики и энергетики [1]. Особенность его заключается в том, что разгоняемые частицы будут соударяться в вакуумном пространстве при температуре, близкой к абсолютному нулю. Длина коллайдера будет более 50 тыс. м. Состоять он должен из отдельных криомодулей длиной 1 м, соединяемых между собой переходниками.

Соединяемые элементы криомодуля — ниобиевый сверхпроводящий резонатор, который должен быть приварен электронно-лучевой сваркой (ЭЛС) к ниобиевому патрубку переходника, и коаксиально расположенный по отношению к ниобиевому резонатору кожух из нержавеющей стали (типа 316L), привариваемый к диску переходника, изготавливаемого из той же нержавеющей стали. Вакуумируемый ниобиевый резонатор находится внутри кожуха из нержавеющей стали, под кожух заливается жидкий гелий (рис. 1). Таким образом, переходник должен обеспечивать вакуумную и гелиевую плотность и работоспособность узла в условиях высокочастотных электромагнитных нагрузок при криогенных температурах [2].

Известно, что наиболее качественные сварные соединения получаются при сварке однородных материалов. Таким образом, переходник должен обеспечить выполнение сварных соединений ниобия с ниобием, а нержавеющей стали с нержавеющей сталью, т.е. 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 ЭЛС,

неприемлемо для решения поставленной задачи в связи с образованием интерметаллидов типа Nb_xFe_y , которые не позволяют обеспечить требуемую плотность переходников.

В ИЭС был изготовлен переходник путем приварки взрывом ниобиевого патрубка непосредственно к диску из нержавеющей стали. Ожидалось, что будет образовываться гораздо меньше интерметаллидов из-за отсутствия высокотемпературного нагрева при сварке взрывом и они не нарушат плотности благодаря большой площади соединения [3]. При этом для сохранения целостности ниобиевой трубы в момент взрыва ширина стальной заготовки должна быть не меньше ширины ниобиевой трубы. На рис. 2 пунктиром указан габарит стальной заготовки до взрыва.

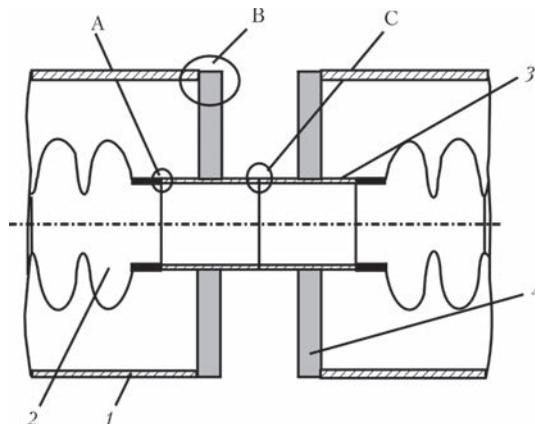


Рис. 1. Схема соединения криомодулей: 1 — кожух из нержавеющей стали; 2 — ниобиевый резонатор; 3 — ниобиевая трубка; 4 — диск из нержавеющей стали; А — соединение резонатора с ниобиевой трубкой ЭЛС; В — соединение кожуха с диском переходника ЭЛС или аргонодуговой сваркой; С — соединение ниобиевых трубок переходников ЭЛС

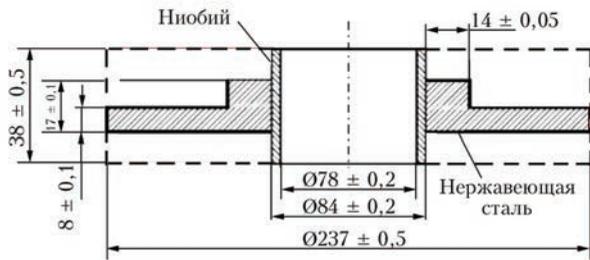


Рис. 2. Схема изготовления переходника с применением сварки взрывом ниобия с нержавеющей сталью

Для обеспечения требуемых геометрических размеров переходника с учетом неизбежных деформаций ниобия от взрыва потребуется использовать ниобиевую трубу с меньшим наружным диаметром и большей толщиной стенки с тем, чтобы после сварки взрывом изготовить переходник с необходимыми размерами с помощью механической обработки. При механической обработке часть ниобия и значительная часть нержавеющей стали уйдет в стружку, такой способ не годится для промышленного применения из-за высокой трудоемкости, дороговизны и большого расхода дефицитного ниобия. Гелиевая плотность соединения не исследовалась.

Ранее проведенные эксперименты показали, что при электронно-лучевой сварке ниобия с титаном не образуется интерметаллидов 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 к титану ЭЛС (рис. 3). 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.

Преимущества предлагаемого варианта изготовления переходника:

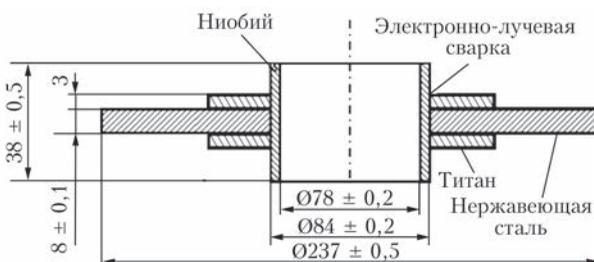


Рис. 3. Конструкция переходника, обеспечивающая отсутствие образования при сварке интерметаллидов ниобия

- гелиевая плотность обеспечивается сваркой ниобия с титаном, обладающими хорошей свариваемостью;

- отверстие во фланце изготавливается в размер ниобиевой трубки, при этом может быть вварен патрубок резонатора вместо трубки-переходника;

- возможное образование интерметаллидов в зоне соединения стали с титаном при сварке взрывом не влияет на гелиевую плотность;

- 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, отбраковываться будут более дешевые сталь-титановые заготовки;

- сталь-титановый фланец может быть подвергнут термообработке для снижения остаточных напряжений в обычной (не вакуумной) печи;

- уменьшается расход стали и ниобия.

Соединение титан–сталь весьма трудно сваривается взрывом в связи с тем, что эти металлы образуют хрупкие химические соединения при сварке и при последующей термической обработке. Стоит отметить, что титан образует интерметаллиды почти со всеми металлами за исключением ниобия, тантала и ванадия. В частности, при сварке титана со сталью образуются хрупкие интерметаллидные соединения Fe_2Ti и $FeTi$. В случае образования значительного количества интерметаллидов (в виде сплошной прослойки) прочность соединения снижается до нуля. Отдельные редкие точечные включения не влияют на статическую прочность соединения [4].

Для роста интерметаллидной фазы необходимым условием является не только высокая температура, но и некоторое время существования высоких температур – латентный период. Сварка взрывом как очень быстротечный процесс обеспечивает минимальное время нахождения контактной зоны под воздействием высоких температур. В этом заключается преимущество использования сварки взрывом для создания подобных сочетаний металлов и сплавов [5].

Экспериментально были подобраны режимы сварки взрывом триметалла титан–сталь–титан. Толщина титана 3 мм, стали 8 мм. Сваривались пластины размером 250×250 мм и 300×700 мм. Правка пластин после первого взрыва и после изготовления триметалла осуществлялась на промышленных вальцах вначале трехвалковых (заготовке придавалась дугообразная форма) для устранения локальных деформаций, а затем на девятивалковых

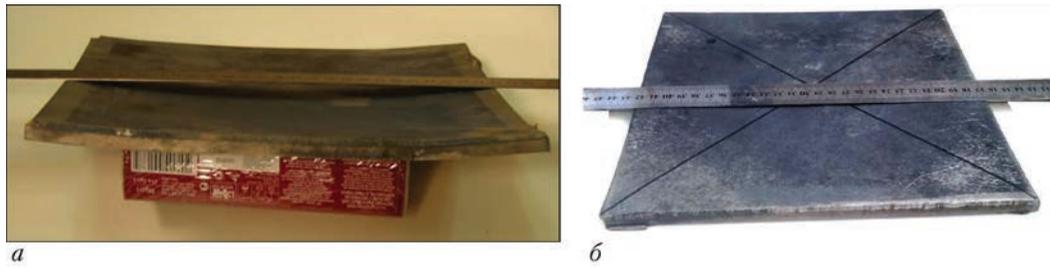


Рис. 4. Внешний вид сваренной взрывом заготовки: *а* — до правки, *б* — после



Рис. 5. Микроструктура ($\times 400$) соединения сталь–титан, полученного сваркой взрывом

для придания заготовке плоской формы. Необходимость правки продемонстрирована на рис. 4.

Из триметаллических заготовок вырезались диски диаметром 237 мм с центральным отверстием под ниобиевый патрубок диаметром 84 мм. Максимальный остаточный прогиб диска составил 0,5 мм.

На рис. 5 приведены фотографии микрошлифов с характерными участками соединения сталь–титан, полученного на выбранных режимах сварки. Волнообразование практически отсутствует, что свидетельствует о выборе оптимального для данного случая режима с минимальным энерговыделением, что уменьшает количество и размер образующихся интерметаллидов.

На микрошлифе по границе соединения видны удлиненные темные полосы, а также, изредка, белые пятна небольшого размера, которые могут быть интерметаллидами.

Для определения природы полос и пятен проведены исследования микротвердости методом Виккерса. Результаты измерений твердости при нагрузке 100 г представлены на рис. 6.

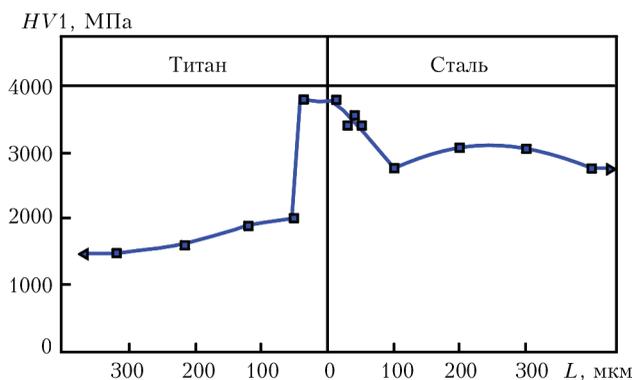


Рис. 6. Микротвердость на границе сварки взрывом сталь–титан

Ширина темных полос составляла порядка 10 мкм. Вблизи границы соединения микротвердость измерялась по темным полосам. Твердость исходного титана 1300...1600, исходной стали 1700...1900 МПа. Известно, что твердость интерметаллидов типа Fe_xTi_y выше 9000 МПа. Из рис. 6 видно, что титан и сталь претерпели значительное упрочнение в результате соударения при сварке взрывом, титан уже на расстоянии 300 мкм от границы имеет свою начальную твердость, сталь упрочняется на большую глубину. Достигнутое упрочнение не может повлиять на рабочие свойства переходника [6]. Отсутствие резких скачков твердости вблизи границы свидетельствует о том, что темные полосы не являются интерметаллидами.

В процессе исследования было установлено, что на границе соединения имеется ступенька, которая могла образоваться в результате травления при изготовлении шлифа или по другим причинам. По-видимому, темные полосы представля-



Рис. 7. Образец биметалла сталь–титан после испытания на загиб

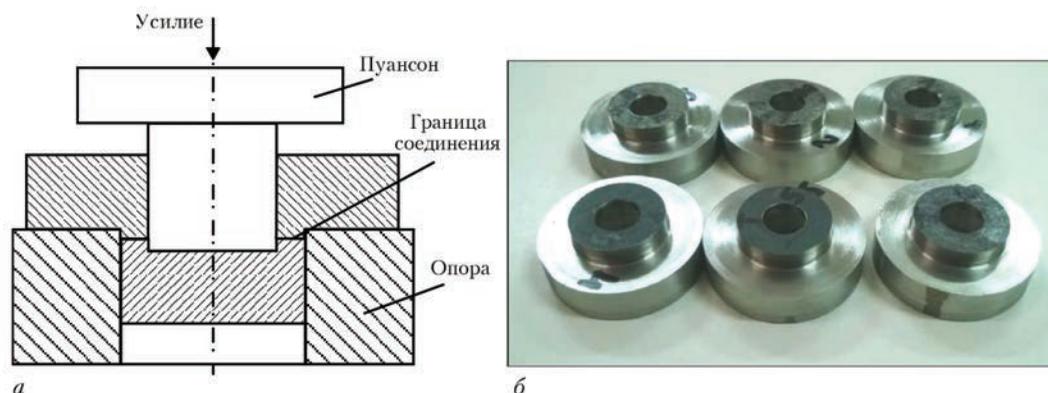


Рис. 8. Схема испытания на отрыв слоев биметалла (а) и общий вид образцов (б)

ют собой либо загрязнение, скопившееся вдоль ступеньки при шлифовке, либо тень от ступеньки, образующуюся в результате освещения шлифа лампой микроскопа.

Измерение микротвердости белых пятен и стали вокруг них при нагрузке 10 г показало их равнозначность и свидетельствует о том, что это не интерметаллиды.

Качество полученного сваркой взрывом соединения титана со сталью оценивали стандартными методами испытаний: на загиб, на отрыв слоев и срез слоев [7].

На рис. 7 показан образец после испытания на загиб. При загибе на угол 180° образец сохранил свою целостность, расслоения не произошло. Это довольно жесткий вид испытаний, при некачественной сварке граница соединения металлов разрушается.

На рис. 8 представлены схема испытания на отрыв слоев биметалла и общий вид образцов.

Разрушение образцов произошло по границе раздела сталь–титан, что характерно для этой пары металлов [8]. 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. Прочность соединения ненамного уступает прочности менее прочного из соединяемых металлов.

Испытания на срез слоев (рис. 9) 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 приложение к нему нагрузок, приводящих к срезу или отрыву слоев, прочность соединения можно считать удовлетворительной.



Рис. 9. Схема испытания образца на срез слоев

Таким образом, проведенные исследования позволяют утверждать, что разработанный режим сварки триметаллической заготовки переходника является близким к оптимальному.

Наклеп металлов и остаточные напряжения в получаемом триметалле могут быть сняты термообработкой. Безопасным нагревом для этой композиции является нагрев до 600°C . При нагреве свыше 700°C начинается интенсивное формирование интерметаллидов и карбидов [4].

В случае сварки титана с нержавеющей аустенитными сталями вопрос необходимости термообработки должен быть отдельно проработан, так как при нагреве и остывании аустенит может преобразовываться в мартенсит, что изменяет свойства стали, в том числе ее намагничиваемость, которая снижает эффективность коллайдера.

Эффективность применения термообработки для повышения механических свойств триметалла исследована на образцах после термообработки заготовки по режиму 600°C , выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе. Прочность на отрыв слоев составила 325 МПа (375 МПа без термообработки), прочность на срез слоев — 345 МПа (350 МПа без термообработки). Не обнаружено существенных отличий в микроструктуре металлов в зоне соединения по сравнению с образцом без термообработки, изготовленном из той же заготовки триметалла. Микротвердость по Виккерсу при нагрузке 10 г составила: для стали 2500 МПа (2600 МПа без термообработки), для титана 2600 МПа (2150 МПа без термообработки). На микрошлифах на границе соединения обнаружено большее количество белых пятен, которые имеют микротвердость 2300 МПа и не являются интерметаллидами. Скорее всего, это участки микроплавов металла, образующиеся при сварке взрывом. Интерметаллидов в исследованных шлифах не обнаружено. Таким образом, термообработка по приведенному режиму не повлияла на требуемые в работе свойства триметалла. Увеличение температуры отжига нежелательно, так как может привести к появлению ин-

терметаллидов и изменению свойств аустенитной стали. Предварительно можно заключить, что термообработку заготовок триметалла проводить целесообразно, так как это лишь увеличивает стоимость переходника.

Выбор режимов ЭЛС. Использование для изготовления резонаторов высокочистого ниобия вынуждает любые термические операции с ним, в том числе сварку, выполнять в вакууме. ЭЛС наилучшим образом подходит для нашего случая, так как процесс проходит в камере с высокой степенью вакуумирования.

Для выполнения ЭЛС необходимо как можно более плотное прилегание свариваемых деталей друг к другу. Поскольку ниобиевая труба имеет исходную овальность, по окружности прилегания ниобиевого патрубка к кромке отверстия в триметаллическом диске имеются места с большим зазором, не пригодным для ЭЛС. Для устранения этого недостатка изготовлено приспособление, фиксирующее патрубок в отверстии диска. Диск с зажатым патрубком вставлялся в патрон токарного станка, вместо резца крепился ролик. Обкаткой ниобиевого патрубка изнутри достигалось плотное его прилегание к кромкам отверстия диска.

При изготовлении опытного переходника применен предварительный режим ЭЛС. Исследование структуры соединения показало, что глубина проплавления титана составила примерно 1 мм. По утверждению специалистов ЭЛС, имеющих большой опыт в выполнении плотных, в том числе по гелию, швов, такого проплавления вполне достаточно для обеспечения гелиевой плотности. В то же время

на переходник могут действовать нагрузки, образующиеся от избыточного давления внутри криомодуля вследствие наличия вакуума с внешней стороны переходника, а также возможного нагрева жидкого гелия от элементов конструкции криомодуля в процессе заполнения его жидким гелием и теплопроводности переходника, контактирующего по контуру с кожухом. В связи с этим представляется целесообразным выполнять шов по возможности более мощным, в то же время не допуская полного проплавления титана и ниобия электронным лучом. На модельном образце в титановый диск толщиной 3 мм был варен ниобиевый патрубок с использованием четырех режимов ЭЛС. На рис. 10 представлены шлифы полученных соединений и указана ширина сварного соединения.

Наибольшее проплавление достигнуто на режимах 3 и 4. Эти режимы будут использоваться при изготовлении последующих переходников. Конкретный выбор будет зависеть от толщины титана, остающейся после механической обработки при изготовлении диска из триметаллической заготовки.

На сегодня изготовлено два переходника, причем один из них подвергнут термообработке. Оба переходника прошли испытания на термоциклирование в жидком азоте, затем в жидком гелии. После каждого вида термоциклирования переходники испытывались на гелиевую плотность. Во всех случаях получены положительные результаты испытаний.

На рис. 11 показаны варианты внешнего вида переходника. Отверстия выполнены для проведе-

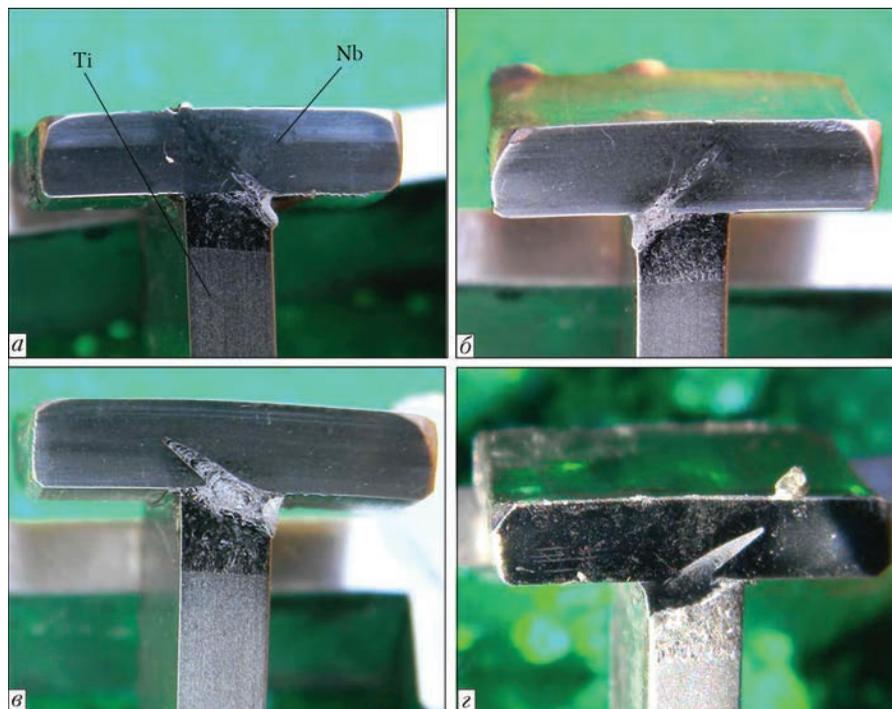


Рис. 10. Шлифы соединения титана с ниобием, полученного ЭЛС: *а* — режим 1 (ширина соединения 1,5 мм); *б* — режим 2 (ширина соединения 1,9 мм); *в* — режим 3 (ширина соединения 2,75 мм); *z* — режим 4 (ширина соединения 2,1 мм)

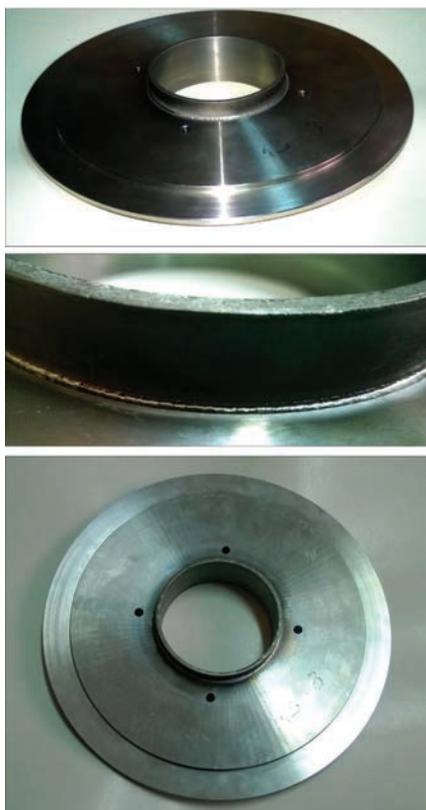


Рис. 11. Внешний вид изготовленного переходника
 ния некоторых исследований, в реальном переходнике отверстий не будет.

Выводы

1. Разработана конструкция переходника, пригодная для изготовления криомодуля линейного коллайдера и позволяющая исключить приварку ниобия к стали.
2. Разработана технология сварки взрывом триметаллической заготовки для изготовления переходника, обеспечивающая отсутствие интерметаллидов на границе соединения сталь–титан.
3. Выбраны режимы ЭЛС ниобия с титаном, которые, по предварительным оценкам, должны удовлетворять эксплуатационным требованиям переходника.

Список литературы/References

1. International Linear Collider. (2013) *Technical Design Report*. www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report.
2. Sabirov B. (2010) Explosion welding: New Design of the ILC Cryomodule. *JINR NEWS*, 3, 16–20.
3. Лысак В. И., Кузьмин С. В. (2005) *Сварка взрывом*. Москва, Машиностроение.
 Lysak, V.I., Kuzmin, S.V. (2005) *Explosion welding*. Moscow, Mashinostroenie.
4. Гуревич С. М. (1981) *Справочник по сварке цветных металлов*. Киев, Наукова думка.
 Gurevich, S.M. (1981) *Reference book on welding of non-ferrous metals*. Kiev, Naukova Dumka.
5. Ryabov V. R., Dobrushin L. D., Moon J. G. (2003) *Welding of bimetal*. Paton B. E. (ed.), Kiev, E. O. Paton Electric Welding Institute.

6. Petushkov V. G., Fadeenko Yu. I. (1995) *Explosion-thermal treatment of welded joints*. Paton B. E. (ed.) *Welding and Surfacing Review*; Vol. 8, Pt. 2. London, Harwood acad. publ.
7. Petushkov V. G., Simonov V. F., Sedykh V. S., Fadeenko Yu. I. (1996) *Explosion welding criteria*. Paton B. E. (ed.) *Welding and Surfacing Review*, Vol. 3, Pt. 4. London, Harwood acad. publ.
8. Petushkov V. G. (2009) *Explosion and its applications in metalworking*. New York, Nova Science publ.

А. Г. Брызгалін¹, Є. Д. Пекар¹, П. С. Шльонський¹,
 Г. Д. Ширков², Ю. А. Будагов², Б. М. Сабіров²

¹ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАН України.

03150, м.Київ-150, вул. Казимира Малевича, 11.

E-mail: office @ paton. kiev.ua

²ОИЯД. 141980, Росія, м Дубна, вул. Жоліо-Кюрі, 6.

E-mail: post@jinr.ru

ЗАСТОСУВАННЯ ЗВАРЮВАННЯ ВИБУХОМ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ТРИМЕТАЛІЧНИХ ПЕРЕХІДНИКІВ КРІОМОДУЛІВ ЛІНІЙНОГО КОЛЛАЙДЕРА

Запропоновано оригінальну конструкцію переходника для з'єднання криомодулів лінійного коллайдера, що забезпечує необхідні міцність, гелієву і вакуумну щільність при відносно низькій собівартості. Розроблено режими зварювання вибухом плоских заготовок титан–нержавіюча сталь–титан, при яких практично відсутні інтерметаліди в зоні з'єднання. Експериментальним шляхом підбрано режими електронно-променевого кутового зварювання ніобієвого патрубку з титаном перехідного диска. Виготовлено дослідні зразки перехідників, які успішно пройшли випробування на термоцикування і гелієву щільність. Бібліогр. 8, рис. 11.

Ключові слова: коллайдер, зварювання вибухом, гелієва щільність, перехідник, ядерні дослідження

A.G. Bryzgalin¹, E.D. Pekar¹, P.S. Shlensky¹,
 G.D. Shirkov², Yu. A. Budagov², B.M. Sabirov²

¹E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine,
 11 Kazimir Malevich Str., 03150, Kiev-150, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

²JINR, 6, Joliot Curie str., 141980, Dubna, Russia. E-mail:
 post@jinr.ru

APPLICATION OF EXPLOSION WELDING FOR MANUFACTURE OF TRIMETALLIC TRANSITION PIECES OF CRYOMODULES OF LINEAR COLLIDER

An original design of transition piece for joining cryomodels of linear collider was proposed, providing necessary strength, helium and vacuum density at relatively low cost. The modes of explosion welding of plane billets titanium–stainless steel–titanium at which intermetallics in the joining zone are almost absent. The modes of electron beam fillet welding of niobium branch pipe with titanium transition disc were selected experimentally. The experimental specimens of transition pieces were manufactured which successfully passed tests on thermocycling and helium density. 8 Ref., 11 Fig.

Keywords: collider, explosion welding, helium density, transition piece, nuclear research

Поступила в редакцію 27.11.2017