



УДК 621.791.75/76

УДАРНАЯ КОНДЕНСАТОРНАЯ СВАРКА ПРОВОЛОКИ ИЗ КОМПОЗИТНОГО СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО СПЛАВА

Д. М. КАЛЕКО

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Актуальность применения сверхпроводящих проводов в медицинской технике и научной аппаратуре требует, с учетом ограниченности отпускной длины провода и его дороговизны, разработку методов соединения, сохраняющих эксплуатационные характеристики основного металла. Конструкция композитного провода, состоящего из нескольких десятков жил сверхпроводящего сплава в медной матрице, допускает применение только методов сварки в твердой фазе. Для стыкового соединения таких проводов малого диаметра наиболее перспективна ударная конденсаторная сварка, которая дает возможность одновременно сваривать и жилы, и матрицу, имеющие резко отличающиеся термофизические характеристики. Показано, что этот способ позволяет получать соединения промышленных композитных проводов диаметром 0,85 и 1,0 мм из ниобий-титанового сплава НТ-50 в медной матрице без существенного снижения критического тока в полях до 80 кЭ. Библиогр. 2, табл. 2, рис. 4.

Ключевые слова: ударная конденсаторная сварка, композитная проволока, сверхпроводящие провода, сплав ниобий–титан.

В последние годы в связи с работами по проекту Международного экспериментального реактора (ИТЭР) расширилось производство сверхпроводящих материалов на основе сплава Nb–Ti и интерметаллида Nb₃Sn. Благодаря высоким технологическим характеристикам — прочности и пластичности — ниобий-титановый сплав (Nb — 47,5 % Ti) является основным материалом для технического применения сверхпроводников, главными из которых являются катушки томографов для магнитно-резонансной терапии (МРТ) и ядерного магнитного резонанса (ЯМР). Сверхпроводники нашли также применение в магнитах исследовательских энергетических установок типа ТОКАМАК, в проектных моделях сверхпроводящих индукционных накопителей энергии, кабелей, магнитных сепараторов и др.

Производство ниобий-титановой проволоки диаметром от 0,3 до 2,0 мм освоили и предлагают на продажу в настоящее время ряд фирм, в том числе «Supercon» (США), «Western Superconducting Technologies Co.» (Китай), Чепецкий механический завод Корпорации «ТВЭЛ» (Россия) и другие.

Конструкция проволоки — жилы сплава Nb–Ti в медной матрице — определяется требованиями к сохранению сверхпроводящих характеристик в магнитном поле величиной до 10 Тл. Для этого ниобий-титановые прутки укладывают в цилиндрические каналы медной заготовки и такую композицию обрабатывают давлением, вытягивая в проволоку. Холодное деформирование приводит к появлению высокой плотности дис-

локаций и структурных дефектов, которые служат центрами зацепления магнитных вихрей, так называемого пиннинга, благодаря чему после соответствующего отжига обеспечивается необходимая плотность тока при высокой напряженности магнитного поля [1]. Еще одним условием успешной работы ниобий-титанового композитного проводника является винтовое скручивание ниобий-титановых жил («твистирование»). Такая особенность конструкции приводит к изменению ориентации приложенного поля, что позволяет уменьшить время затухания экранирующих токов, образующих петли, проходя по одной стороне проводника и возвращаясь через медную матрицу на обратную сторону. Шаг закручивания в общем зависит от условий эксплуатации провода и имеет порядок нескольких сантиметров. Поперечный разрез сверхпроводящего ниобий-титанового провода показан на рис. 1.

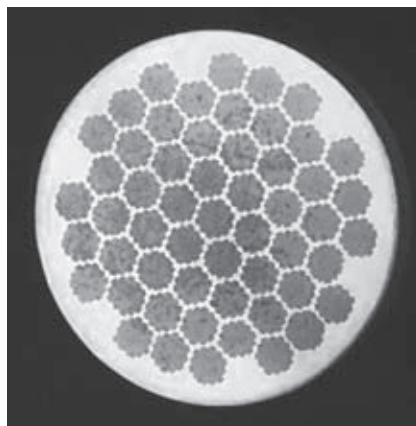


Рис. 1. Поперечный разрез провода из сплава НТ-50 диаметром 1 мм

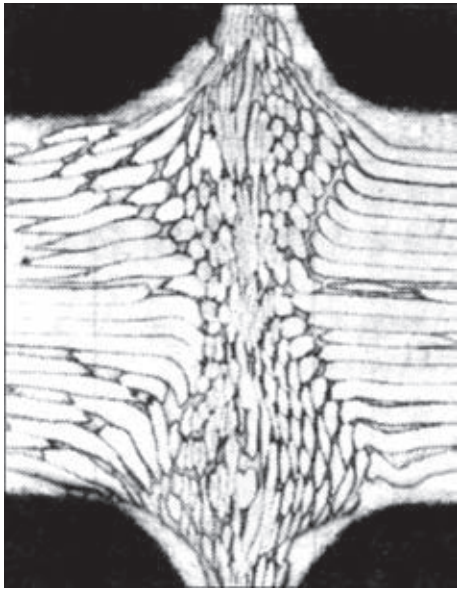


Рис. 2. Макроструктура холодносварного соединения композитного сверхпроводящего провода [2]

При изготовлении аппаратов, использующих сверхпроводящую проволоку, учитывая ее дороговизну и ограниченную технологией производства длину, приходится соединять провода между собой. Сейчас это осуществляется параллельной укладкой соединяемых концов проводов с последующей пропайкой медной матрицы на значительной длине, поскольку нужно обеспечить не только прочность соединения, но и возможность передавать ток в несколько десятков килоампер через медь, сохраняющую электросопротивление.

Были предприняты попытки соединять отрезки проводов, освободив жилы сверхпроводящего сплава из медной матрицы (травлением) с последующим покрытием сварного соединения медью [2]. В работе [2] показано, что наилучший результат получается при соединении жил без оплавления, например, при обжатии медной трубкой композиции жил, взаимно проникающих в стыкуемые отрезки проводов. При этом эксперименты с электронно-лучевой сваркой жил показали серьезное (на 2 порядка) снижение критических токов через соединение.

Трудоемкость описанной операции механического соединения делает актуальным поиск методов стыкового соединения проводов таким образом, чтобы одновременно сваривались жилы из сверхпроводящего металла и медная матрица. Очевидно, что поиск может идти только среди методов сварки в твердой фазе. Такими, учитывая форму соединения, могут быть холодная и ударная конденсаторная сварка. Преимущество последней состоит в меньшей степени деформации и, благодаря этому, сохранению конструкции композита. Холодная сварка требует приложения значительных усилий, которые приводят к дроблению жил сверхпроводящего ма-

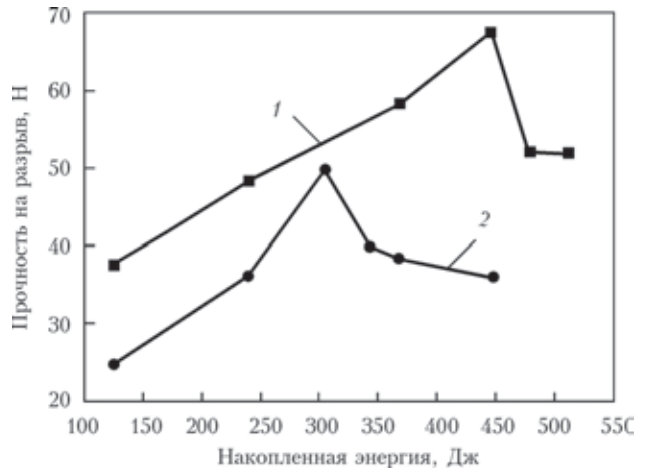


Рис. 3. Зависимость прочности соединения композитных сверхпроводящих проводов НТ-50 в медной матрице, полученных ударной конденсаторной сваркой, от накопленной энергии (диаметр соединяемых проволок 1,0 мм (1) и 0,85 (2)

териала и их искривлению (рис. 2). Поэтому предпочтительнее для сварки композиционного провода ударная конденсаторная сварка.

При ударной конденсаторной сварке соединение происходит при осадке стыкуемых проволок после очистки и нагрева свариваемых поверхностей дугой, горячей при разряде конденсаторов. Сжатие проволок приводит к удалению расплавленного металла в грат и образованию металлических связей соединяемых поверхностей. Благодаря этому сохраняются исходные характеристики металла, а некоторое увеличение площади соединения делает его равнопрочным с основным металлом. Эксперименты проводили с проволоками композитного сплава НТ-50 (47,5 мас. % титан, остальное — ниобий) в медной матрице диаметром 1 мм (количество жил $n = 37$, коэффициент заполнения $K_3 = 45,4 \%$), 0,85 ($n = 37$, $K_3 = 46,38 \%$) и 0,5 мм ($n = 24$, $K_3 = 32,12 \%$). Сварку вели на универсальной установке для дуговых методов конденсаторной сварки А-1091. Режимы сварки приведены в табл. 1. Удовлетворительного качества соединений проволоки диаметром 0,5 мм получить не удалось.

На рис. 3 показано влияние параметров режима на прочность соединения на растяжение. Режим сварки, при котором образцы разрушались по целому проводу вдали от места сварки принимался в качестве оптимального. Такой выбор подтвердили измерения эксплуатационных характеристик.

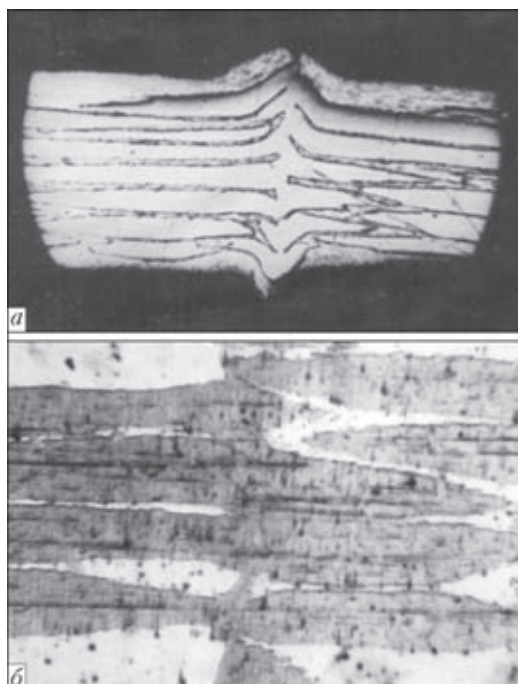
Таблица 1. Режимы ударной конденсаторной сварки композитной сверхпроводящей ниобий-титановой проволоки (сопротивление цепи разряда 1,2 Ом)

Диаметр проволоки, мм	Емкость конденсаторов, мкФ	Напряжение зарядки конденсаторов, В	Усилие соударения, Н
1,0	1500	770	10
0,85	1400	660	8



Таблица 2. Значения токов в жидком гелии

Образец	Критический ток, А (среднее значение) в магнитном поле, кЭ		
	50	60	70
Исходный материал диаметром 1 мм	-	582	438
Сварной образец	-	577	427
Исходный материал диаметром 0,85 мм	414	326	257
Сварной образец	389	299	246

Рис. 4. Микроструктура сварных соединений сверхпроводящего композитного провода НТ-50 диаметром 1 мм: а — без травления ($\times 30$); б — после травления шлифа ($\times 150$)

Микроструктура сварных соединений сверхпроводящего композитного провода НТ-50 диаметром 1 мм (рис. 4) показывает, что в процессе ударной конденсаторной сварки были получены соединения как отдельных жил сверхпроводящего сплава, так и медная матрица. Несплошность жил НТ-50 вне стыка, которая видна на фотографии шлифа, объяс-

няется непараллельностью «твистированной» жилы и плоскости шлифа.

Поскольку при сварке нет возможности точной юстировки жил соединяемых многожильных отрезков композитного провода, в стыке встречаются сварные соединения сверхпроводника с медной матрицей. По

данным металлографического анализа вероятность стыковки отдельных жил между собой составляет около 80 %.

Измерения электрического сопротивления образцов длиной 5 м с 20 стыками проволоки НТ-50 диаметром 1 мм при температуре 4,2 К в магнитном поле напряженностью 80 кЭ, проведенные в ИАЭ им. И. В. Курчатова, показали величину около 0,1 мкОм. Критические токи в жидком гелии, измеренные во ВНИИ кабельной промышленности (Россия), приведены в табл. 2.

Из таблицы видно, что в сварном соединении критический ток, который является одной из основных характеристик сверхпроводящего провода, уменьшается не более, чем на 10 %, что позволяет рекомендовать способ ударной конденсаторной сварки для соединения композитных проводов из сверхпроводящего сплава ниобий-титан в медной матрице.

Таким образом, стыковая ударная конденсаторная сварка сверхпроводящей композитной проволоки из сплава ниобий-титан в медной матрице позволяет получать соединения со свойствами, близкими к исходному материалу.

1. Структура и сверхпроводящие характеристики сверхрешеток Nb-Ti/Ti / О. В. Черный, Е. Н. Решетняк, А. Н. Стеценко, А. С. Похила // *Вопр. атомной науки и техники*. – 2002. – № 1. – С. 84–87.
2. *Joining process and its feature of superconducting materials* / J. Shibuya, M. Mizutame, K. Nakanishi // *J. of the Jap. Weld. Soc.* – 1987. – 56, № 2. – С. 12–16.

Поступила в редакцию 29.01.2014

 **ЗАО «ПСКОВЭЛЕКТРОСВАР»**
ТЯЖЕЛОЕ ЭЛЕКТРОСВАРОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

На ЗАО «Псковэлектросвар» в период с 24 по 26 июня 2014 г. состоится Международная научно-техническая конференция «Трубопроводы в России и за рубежом — их настоящее и будущее».

Предполагается участие в работе конференции представителей ведущих предприятий и организаций, связанных с производством трубной продукции, сваркой, контролем, ремонтом и эксплуатацией трубопроводов, их диагностикой. Предусмотрена также широкая демонстрационная программа показа сварочного оборудования и техники для неразрушающего контроля.

Контакты: тел. 007(8112)700 134 В. М. Александров