

УДК 621.318.3:537.312.62

## ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВТСП-2-ПРОВОДОВ С ЛЕНТОЙ-ПОДЛОЖКОЙ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ AISI 310S ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ЖИДКОГО ГЕЛИЯ И АЗОТА

*А.В. Кривых, А.В. Поляков*

*НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия*

В настоящее время обсуждается вопрос о возможности создания компактного термоядерного реактора, на тороидальных обмотках которого магнитное поле достигает 18—20 Тл. Такие параметры в настоящее время могут быть обеспечены только с использованием проводников на основе высокотемпературных сверхпроводниковых материалов. Оценки показывают, что механические напряжения в таких системах могут превышать 1000 МПа. Проведены электромеханические испытания первых образцов ВТСП-2-проводов производства НИИ «Курчатовский институт» с подложкой из нержавеющей стали 310S при температурах жидкого гелия (4,2 К) и жидкого азота (77 К). Электрические и механические характеристики провода измерялись одновременно, причём деформация образцов определялась по показаниям экстензометра. Во время электромеханических испытаний получены кривые растяжения провода в жидком гелии и азоте. Определены уровни растягивающего механического напряжения и деформации, при которых начинается падение критического тока, и степень деградации токонесущей способности ВТСП-2-провода в собственном магнитном поле. В гелиевых испытаниях на образцах с остаточным критическим током измерено изменение электрического напряжения при уровнях растягивающего механического напряжения 850—1100 МПа.

**Ключевые слова:** электромеханические свойства, ВТСП-2-провод, азотная температура (77 К), гелиевая температура (4,2 К), механическое напряжение.

## ELECTROMECHANICAL PROPERTIES OF HTSC-2G WIRE WITH AISI 310S STAINLESS STEEL SUBSTRATE IN LIQUID HELIUM AND NITROGEN

*A.V. Krivyykh, A.V. Polyakov*

*NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

Now the possibility of creating a compact thermonuclear reactor with magnetic field 18—20 T is under consideration widely. It is obvious that only by the use of conductors based on HTSC-G2 materials such parameters can be provided. Estimates show that mechanical stresses in such systems can exceed 1000 MPa. Electromechanical tests of the first samples of HTSC-2G wires produced by NRC KI with a stainless steel substrate 310S at of liquid helium (4.2 K) and liquid nitrogen (77 K) temperatures has been carried out. Electrical and mechanical characteristics of the wire were measured simultaneously. The deformation of the samples was established by the readings of the extensometer. Wire stretching curves in liquid helium and nitrogen were obtained during electromechanical tests. The stress and strain values at which degradation of the current begins have been determined. The electrical voltage was measured in HTSC-2G wire with a critical current at levels of mechanical stresses 850—1100 MPa.

**Key words:** electromechanical properties, HTSC-2G wire, liquid nitrogen (77 K), liquid helium (4,2 K), mechanical stresses.

DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-3-41-46

### ВВЕДЕНИЕ

Высокотемпературные сверхпроводниковые провода второго поколения (ВТСП-2), производство которых сейчас активно наращивается в различных странах, рассматриваются в качестве токонесущей основы для проводников электромагнитных систем термоядерных установок будущего, например, обмоток тороидального поля электромагнитной системы ТИН (термоядерного источника нейтронов). Однако задача определения пределов работоспособности проводов на основе ВТСП-2 при высоких механических напряжениях ещё не решена, поскольку влияние механических напряжений актуально прежде всего для магнитов, предназначенных для работы на гелиевом уровне температур. В опубликованных ранее работах утверждалось, что данных в жидком азоте достаточно, чтобы точно количественно спрогнозировать электромеханическое поведение ВТСП-2-проводов в жидком гелии [1—7]. Обычно сравнивались нормированные значения критических токов в жидком азоте и гелии, но в азоте в собственном поле, а в жидком гелии — во внешнем магнитном поле до 19 Тл. При этом не учитывались нагрузки, вызванные дополнительными механическими напряжениями, возникавшими от пондеромоторной силы. В большинстве упомянутых работ с применением гелия деформация провода, которая помогла бы точ-

нее определить истинное механическое напряжение, измерялась только косвенно, поскольку измерение деформации экстензометром во внешнем магнитном поле — отдельная, далеко не простая задача.

В нашей работе измерение критических токов проводилось в жидком гелии при атмосферном давлении в собственном магнитном поле. При этом, естественно, не возникало дополнительной ponderomotive нагрузки, поскольку не было внешнего магнитного поля. Практически по сравнению с испытанием в жидком азоте менялась только температура.

## МЕТОДИКА

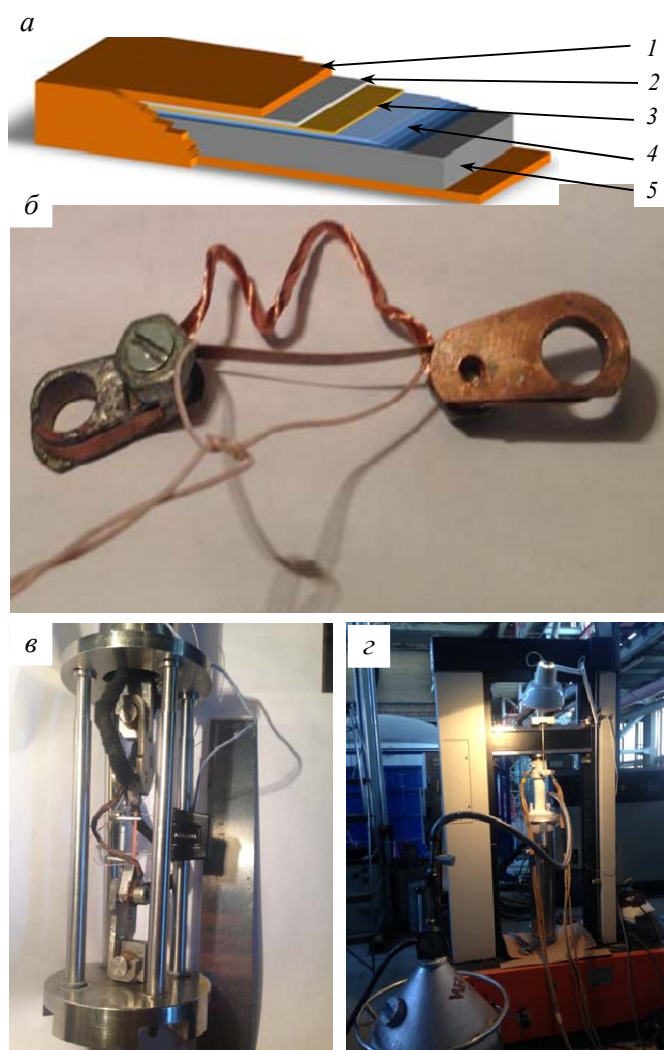


Рис. 1. Принципиальная послойная схема провода ВТСП-2 (толщина слоёв показана не в масштабе): 1 — медь (суммарно 25 мкм); 2 — серебро 2 мкм; 3 — ВТСП-2 1,5 мкм; 4 — буферный слой (YSZ) 2 мкм; 5 — нержавеющая сталь 310S 100 мкм (а); образец с серьгами, шунтом и потенциальными концами (б); внешний вид силового узла вставки с образцом провода ВТСП-2 с экстензометром (в); стенд для электромеханических испытаний в жидком гелии (г)

токовводами и надёжного механического сцепления образца с тягами. Важно также, что при этом одновременно можно было измерять и электрические, и механические характеристики провода, меняя транспортный ток и/или деформацию.

Относительная продольная деформация ( $\Delta L/L$ ) непрерывно измерялась штатным экстензометром машины Инстрон-1195 с базой  $L = 25$  мм во время всего процесса испытаний. Экстензометр был предва-

Проведены исследования электромеханических параметров пилотных образцов ВТСП-2 проводов в жидком азоте и гелии. Образцы провода шириной 4 мм были произведены на линии, поставленной в НИЦ «Курчатовский институт» фирмой Bruker. Технология изготовления провода презентована фирмой в работе [1]. Структура ВТСП-2-провода показана на рис. 1, а. Подложка провода изготовлена из нержавеющей стали марки AISI 310S толщиной 100 мкм.

Длина каждого образца 150 мм, образец разделён на три участка по 50 мм каждый. На центральном рабочем участке проводятся измерения, из крайних сформированы контактные соединения. Контактное соединение показано на рис. 1, б. Образец припаян на длине 50 мм по огибающей поверхности серьги силовой вставки. Пайка припоем с температурой плавления 110 °С обеспечивала механическую фиксацию, исключая проскальзывание ВТСП внутри меди образца, которое наблюдалось при меньших длинах контакта. Использование серьги обеспечивало отсутствие изгибающего момента в области выхода образца из захвата. Расстояние между захватами составляло 50 мм, между потенциальными концами — 35 мм. Для защиты образца от перегорания в жидком гелии параллельно ему устанавливалось шунтирующее сопротивление.

Нижняя часть криогенной вставки с образцом перед испытанием показана на рис. 1, в. При криогенных электромеханических испытаниях использовалась силовая вставка, где само крепление образца в захватах происходило путём припайки провода со стороны ВТСП к медным серьгам на концах силовых тяг. Это делалось для достижения хорошего электрического контакта с

рительно отградуирован при соответствующей температуре и повышал точность измерения деформации на рабочем участке образца.

Стенд во время испытаний в жидком гелии показан на рис. 1, з.

Стандартная процедура измерения заключалась в снятии вольт-амперных характеристик образца при фиксированных механических нагрузках. Критерием достижения критического тока в наших измерениях был уровень напряжённости электрического поля 1 мкВ/см на потенциальных концах. Полученные данные представлялись в виде зависимости механического напряжения и нормированного критического тока от деформации. Поскольку электрические и механические параметры образца можно было измерять одновременно, то дополнительно для высоких механических напряжений (850—1100 МПа) была опробована другая методика. В образец вводился ток, равный или больше критического, а измерялись электрическое и механическое напряжения от деформации и/или тока. Графики в этом случае строились в зависимости от времени.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 показаны результаты измерения механического напряжения и нормированной величины критического тока от деформации по экстензометру для образца ( $I_{c77K} = 54$  А), изготовленного в НИЦ «Курчатовский институт», т.е. с критическим током 54 А в жидком азоте. При азотной температуре испытания образцов проводились без шунта.

В процессе испытания образец несколько раз разгружался с целью определения величины деформации, при которой начиналась необратимая деградация токонесущей способности. Если деформация не превышала 0,3%, нормированный критический ток образца обратимо падал до уровня  $I_c/I_{c0} = 0,95$ . Этой деформации соответствует уровень механического напряжения 550 МПа. При напряжении растяжения 650 МПа нормированный критический ток резко уменьшался до уровня  $I_c/I_{c0} = 0,5$  и частично восстанавливался после снятия нагрузки.

На предварительном этапе было испытано более 30 различных образцов ВТСП-2-проводов. Иногда во время ввода тока наблюдалось появление омической составляющей электрического напряжения, достигавшей нескольких микровольт. Такое, например, могло быть, когда ВТСП-2-провод был припаян к сережке со стороны нержавеющей стали. После вычитания омической составляющей электрического напряжения для одинаковых образцов не наблюдалось существенных видоизменений графиков зависимости нормированной величины критического тока от деформации.

Критический ток ВТСП-2-провода в гелии в собственном магнитном поле в 10—15 раз выше его величины в азоте [8]. Во всех экспериментах, проведённых нами в гелии, ток всегда возрастал более чем десятикратно. Установка компактная, поэтому для неё возникают ограничения на величину максимального тока, который не должен превышать 500 А из-за разогрева медных токовыводов и контактных соединений.

Для гелиевых измерений были подобраны два образца, критические токи которых в азоте оказались минимальны. Низкий критический ток этих образцов был связан только с уменьшением количества центров пиннинга. Измеренные бесконтактным методом в азоте на этапе выходного контроля производственной линии, критические токи этих образцов не имели провалов и были однородны на длине 150 мм. По всей видимости, толщина слоя сверхпроводника, его целостность и механические свойства оставались без изменения. При контактных измерениях в азоте они показали токи соответственно 28,5 и 22,5 А. В гелии образцы защищались низкоомным шунтом.

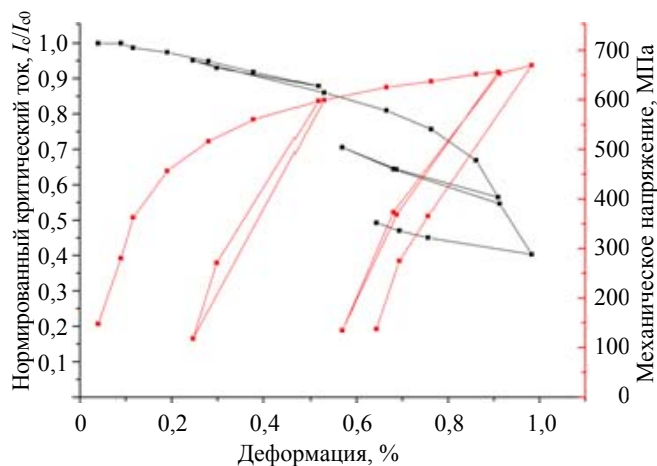


Рис. 2. Зависимости механического напряжения (■) и нормированной величины критического тока (■) от относительной деформации при температуре жидкого азота образца провода ВТСП-2

Несмотря на относительно низкое значение для первого образца ( $I_{c77K} = 28,5$  А), его критический ток в жидком гелии без нагрузки определить не удалось из-за возникавшего омического сопротивления. Линейная составляющая электрического напряжения, появлявшаяся при токе 260 А, достигала 4 мкВ уже при 300 А. Вплоть до значения 500 А экспоненциальная составляющая электрического напряжения не появлялась. Сопротивление использованного шунта  $0,4 \cdot 10^{-8}$  Ом оказалось слишком мало. Значительная часть тока, превышавшего 260 А, уходила в шунт. Экспоненциальная вольт-амперная характеристика (ВАХ) появилась только после того, как под действием растягивающей механической нагрузки критический ток упал ниже значения 260 А. Это произошло, когда механическое напряжение от растяжения превысило 750 МПа.

С учётом этого факта для второго образца ( $I_{c77K} = 22,5$  А) сопротивление шунта было увеличено в 4 раза. Кроме того, была изменена схема подключения шунта. Дополнительное контактное сопротивление при этом, по всей видимости, увеличило итоговое сопротивление шунта более чем на порядок.

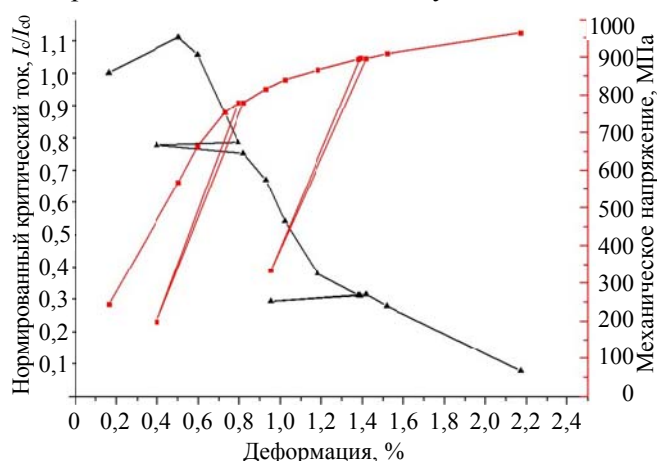


Рис. 3. Зависимости механического напряжения (■) и нормированной величины критического тока (▲) от относительной деформации при температуре жидкого гелия образца провода ВТСП-2

образцу и шунту в гелии вырос десятикратно по отношению к значению в жидком азоте. Он составил 230 А. Нормировка критических токов под нагрузкой проводилась путём деления на эту величину. Для построения графика нормированного критического тока линейная составляющая вычиталась подобно тому, как это делалось в подобных случаях в жидком азоте.

Допустимое механическое напряжение по сравнению с азотом выросло до 750 МПа. Нормированное значение критического тока сначала возросло до  $I_c/I_{c0} = 1,1$ , а затем уже упало до уровня  $I_c/I_{c0} = 0,95$ . Об этой особенности ВТСП-2-проводов производства

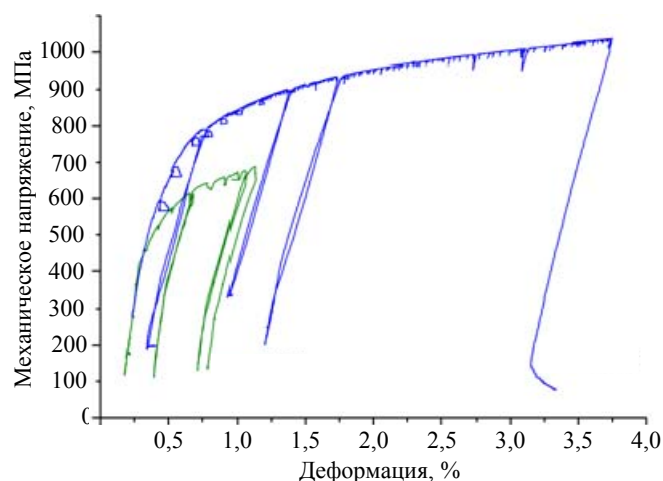


Рис. 4. Диаграммы растяжения провода ВТСП-2 с подложкой из ленты нержавеющей стали марки AISI 310S при температуре жидкого гелия 4,2 К (—) и азота 77 К (—)

На рис. 3 представлены результаты измерения механического напряжения и нормированной величины критического тока от деформации, измеренной по экстензометру на образце ( $I_{c77K} = 22,5$  А) в жидком гелии. На его ВАХ резистивная составляющая электрического напряжения хотя и появилась уже при токе 35 А, но была всего 5 мкВ при токе 200 А, а экспоненциальный загиб на ВАХ образца без нагрузки появлялся при 230 А. Нельзя было точно определить долю тока, ушедшего в шунт, но подавляющая его часть продолжала течь по образцу. Этот вывод основан на том, что экспоненциальная составляющая напряжения на образце ( $I_{c77K} = 22,5$  А) в жидком гелии без механической нагрузки достигла критических 3,5 мкВ (разность потенциалов, отвечающая критическому току), когда суммарный ток по

образцу и шунту в гелии вырос десятикратно по отношению к значению в жидком азоте. Он составил 230 А. Нормировка критических токов под нагрузкой проводилась путём деления на эту величину. Для построения графика нормированного критического тока линейная составляющая вычиталась подобно тому, как это делалось в подобных случаях в жидком азоте.

Допустимое механическое напряжение, при котором произошло резкое необратимое снижение критического тока до уровня  $I_c/I_{c0} = 0,50$ , в гелии составило 850 МПа (в азоте было 650 МПа). После разгрузки ток в гелии восстанавливался слабее, чем в жидком азоте.

На рис. 4 показаны диаграммы растяжения ВТСП-2-провода, снятые во время электромеханических испытаний для образца ( $I_{c77K} = 28,5$  А) в жидком гелии и для образца ( $I_{c77K} = 54$  А) в жидком азоте. Петли на гелиевой кривой растяжения и провалы на азотной кривой возникали в про-



цессе вводов тока в образец. Их форма и размер зависели от величины тока. Предел упругости в жидком азоте составил 600 МПа, в жидком гелии он вырос до 800 МПа. Этому уровню механического напряжения как в азоте, так и в гелии отвечало падение критического тока до  $I_c/I_{c0} = 0,90$ . В гелии пластическая деформация ВТСП-2-провода сопровождалась скачками деформации.

Результаты следующих гелиевых испытаний при механических напряжениях 850—1100 МПа представлены в виде зависимостей электромеханических параметров от времени. На рис. 5 и 6 шкалы электрических характеристик образцов располагаются слева, механических — справа.

На рис. 5 показаны результаты испытаний для образца ( $I_{c77K} = 28,5$  А) по этой методике. После пластической деформации образца в гелии до  $\epsilon = 2,3\%$  (1000 МПа) его нормированный критический ток упал до уровня  $I_c/I_{c0} \sim 0,1$ . Затем образец разгрузили до 600 МПа и ввели фиксированный ток 40 А, равный остаточному критическому току (электрическое напряжение на потенциальных концах составило 3,5 мкВ). При повторном нагружении, поскольку образец уже был предварительно нагружен до 1000 МПа, он вплоть до этого уровня нагрузки работал упруго и электрическое напряжение на нём оставалось постоянным. Предел упругости образца в гелии после первого нагружения вырос с 800 до 1000 МПа. Когда уровень нагрузки превысил 1000 МПа, электрическое напряжение на потенциальных концах начало плавно расти, несмотря на появление скачкообразной деформации. Когда нагрузка возросла до 1100 МПа, произошёл скачок электрического напряжения, который соответствовал одному из скачков деформации. Рост электрического напряжения при этом скачке составил около 10 мкВ. После разгрузки очередной ввод тока в образец показал, что после этого его критический ток упал до 12 А.

На рис. 6 показаны результаты подобных гелиевых испытаний на образце ( $I_{c77K} = 22,5$  А). Его максимальная деформация при первом растяжении составляла 1,3% (880 МПа). Затем в него вводился ток 85 А и одновременно увеличивалась деформация. Потом ток и деформация менялись уже по отдельности. Видно, что и то, и другое приводит к изменению электрического напряжения. С ростом деформации электрическое напряжение необратимо плавно возрастает, несмотря на скачки деформации. При напряжении 900 МПа отдельный скачок деформации привёл к скачку электрического напряжения на 10 мкВ.

В следующий раз образец разгружался и нагружался с током 70 А. Процесс сопровождался небольшим обратимым изменением величины электрического напряжения. Выше 900 МПа появилась скачкообразная деформация и начался плавный рост электрического напряжения. Новый скачок электрического напряжения на 10 мкВ произошёл при нагрузке 930 МПа и соответствовал одному из скачков деформации.

При возрастании механических напряжений от 850 до 1100 МПа нормированный критический ток ВТСП-2-провода продолжал уменьшаться с уровня  $I_c/I_{c0} = 0,5$  до  $I_c/I_{c0} \sim 0,1$  и ниже. Предел упругости при этом возрастает как минимум до 1000 МПа после предварительного механического нагружения провода.

Пластическая деформация провода выше предела упругости в жидком гелии приобретает скачкообразный характер. Отметим, что скачки температуры, которые возникали вследствие скачков деформации, не вызывают срывов сверхпроводимости в ВТСП в отличие от низкотемпературных сверхпроводников [9]. Пока

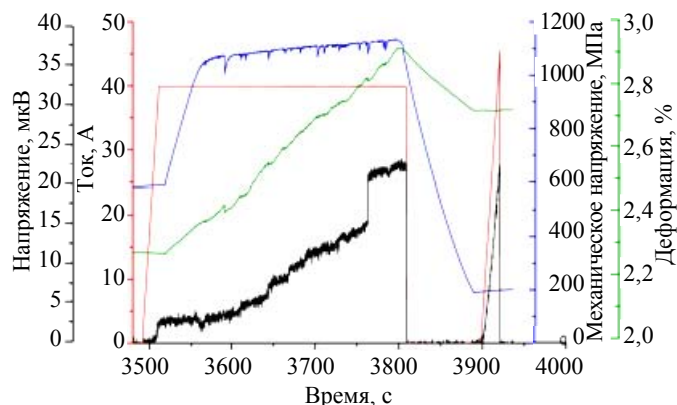


Рис. 5. Временная зависимость тока (—), деформации (—), механического (—) и электрического (—) напряжения на образце провода ВТСП-2 ( $I_{c77K} = 28,5$  А) в жидком гелии

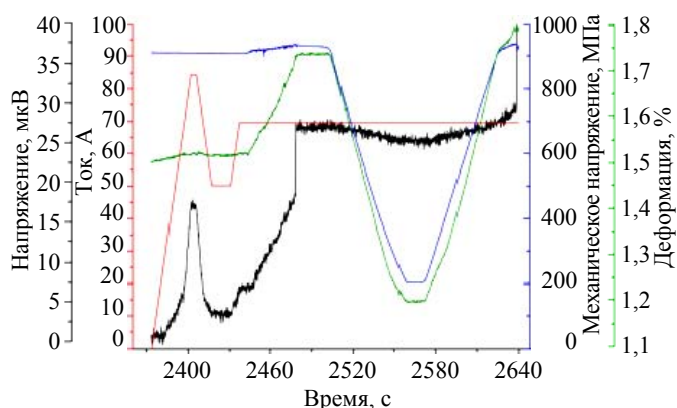


Рис. 6. Временная зависимость тока (—), деформации (—), механического (—) и электрического (—) напряжения на образце провода ВТСП-2 ( $I_{c77K} = 22,5$  А) в жидком гелии

при растяжении образца с током скачки деформации происходят в подложке из нержавеющей стали [10], электрическое напряжение на потенциальных концах продолжает плавно расти. Возможно, что рост электрического напряжения скачком происходит только тогда, когда скачок деформации происходит в ВТСП-2-слое.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые электромеханические испытания пилотных образцов ВТСП-2 провода производства НИЦ «Курчатовский институт» при температурах жидкого гелия (4,2 К) и жидкого азота (77 К) показали рост допустимых механических напряжений при понижении температуры. Допустимый уровень растягивающего механического напряжения ( $I_c/I_{c0} = 0,95$ ) составил 550 и 750 МПа соответственно в жидком азоте и жидком гелии.

На диаграммах растяжения видно, что при температуре жидкого азота предел упругости составляет 600 МПа, в жидком гелии возрастает до 800 МПа. Падение нормированного критического тока при достижении пределов упругости превышает допустимое значение  $I_c/I_{c0} = 0,9$ . Восстановления критического тока в жидком гелии после разгрузки практически не происходило. При гелиевой температуре значение критического тока с ростом нагрузки сначала возрастает до  $I_c/I_{c0} = 1,1$ , затем уже падает до уровня  $I_c/I_{c0} = 0,95$ , при этом допустимая деформация растяжения может достигать 0,5%.

С ростом растягивающих нагрузок до 650 и 850 МПа соответственно в жидком азоте и жидком гелии происходит снижение критического тока до  $I_c/I_{c0} = 0,5$ . В жидком гелии при механических напряжениях 850—1100 МПа начинается область пластической скачкообразной деформации. Нормированный критический ток падает с  $I_c/I_{c0} = 0,5$  до  $I_c/I_{c0} \sim 0,1$ . Если растяжение провода проводилось с введённым критическим током, то электрическое напряжение остаётся стабильным, пока растягивающая нагрузка не превышает предела упругости. При нагрузках выше предела упругости на образцах наблюдался как плавный, так и скачкообразный рост электрического напряжения. Предел упругости ВТСП-2-провода после предварительного механического нагружения может быть увеличен как минимум до 1000 МПа.

Результаты настоящей работы могут быть использованы при создании компактного сверхпроводникового термоядерного реактора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Usoskin A., Rutt A., Knoke J., Krauth H., Arndt T. — IEEE Trans. Appl. Supercond., 2005, vol. 15, Iss. 2, p. 2605—2607.
2. Uglietti D., Seeber B., Abacherli V., Pollini A., Eckert D., Flukiger R. — Supercond. Sci. Technol., 2003, vol. 16, p. 1000—1004.
3. Bautista Z., Diaz M., Shin H., Lee J., Oguro H., Awaji S. — IEEE Trans. Appl. Supercond., 2018, vol. 28, Iss. 2, p. 18411117.
4. Chen X., W., Zhang H., Chen Y., Liu L., Shi J., Yang X., Zhao Y. — IEEE Trans. Appl. Supercond., 2018, vol. 28, Iss. 1, p. 18400905.
5. Ilin K., Yagotintsev K., Zhou C., Gao P., Kosse J., Otten S., Wessel W., Haugan T., Van der Laamand D., Nijhuis A. — Supercond. Sci. Technol., 2015, vol. 28, doi: 10.1088/0953-2048/28/5/055006.
6. Barth C., Mondonico G., Senatore C. — Supercond. Sci. Technol., 2015, vol. 28, doi: 10.1088/0953-2048/28/4/045011.
7. Shin H., Bautista Z. — IEEE Trans. Appl. Supercond., 2018, vol. 28, Iss. 4, p. 180612532.
8. Abraimov D. et al. — Supercond. Sci. Technol., 2015, vol. 28, Iss. 11, doi: 10.1088/0953-2048/28/11/114007.
9. Anashkin O., Varlakhin V., Keilin V., Krivikh A., Lyikov V. — IEEE Trans. on Mag., 1977, Mag.-13, Iss. 1, p. 673—677.
10. Krivikh A., Irodova A., Keilin V. — Techn. Physics, 2015, vol. 28, Iss. 1, p. 73—79.



Анатолий Владимирович Кривых, в.н.с., д. техн. н., чл.-корр. АЭН, лауреат премий Московского и Ленинского комсомола, лауреат премий им. И.В. Курчатова; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия  
Krivikh\_AV@nrcki.ru



Алексей Вячеславович Поляков, м.н.с., лауреат конкурса студенческих работ им. И.В. Курчатова; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия  
alxadress@gmail.com

Статья поступила в редакцию 8 апреля 2020 г.

После доработки 15 июня 2020 г.

Принята к публикации 5 августа 2020 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 3, с. 41—46.