

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ И СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 538.9:539.2

К ВОПРОСУ О ТОКОНЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ Nb_3Sn ПОД НАГРУЗКОЙ

В.М. Горбатенко, М.Б. Лазарева, В.И. Соколенко

*Национальный Научный Центр «Харьковский физико-технический институт»,
г. Харьков, Украина; E-mail: mlazareva@kipt.kharkov.ua*

Изучена токонесущая способность композитов различного типа и геометрии на основе интерметаллида Nb_3Sn при 4,2 К в сильных магнитных полях в условиях приложения растягивающих напряжений. Показано, что у проволочных композитов с низким объемным содержанием фазы Nb_3Sn , изготовленных по «бронзовой» технологии, с ростом внешнего растягивающего напряжения появляется локальный максимум J_c , обусловленный компенсацией термических сжимающих напряжений, отсутствующий при увеличении объемного содержания Nb_3Sn и введении в конструкцию стабилизирующего элемента. Для ленточных сверхпроводников, полученных методом жидкофазной диффузии, в макроупругой области характерно незначительное увеличение T_c и практически отсутствует изменение намагниченности. Необратимая деградация сверхпроводящих параметров у всех типов композитов, возникающая при определенных значениях внешней нагрузки, связана с появлением микротрещин в слоях Nb_3Sn .

ВВЕДЕНИЕ

При изготовлении высокополевых лабораторных соленоидов, магнитных систем ускорительной техники, установок термоядерного синтеза и др. [1] используются сверхпроводящие материалы с высокими критическими параметрами (T_c , H_{c2} , J_c). Наряду с техническими сверхпроводниками на основе деформируемых сплавов системы $Nb-Ti$, которые обладают достаточно высокой токонесущей способностью в полях до 10 Тл, для получения более сильных магнитных полей применяются сверхпроводящие композиты на основе соединений со структурой А-15 [2]

Критические параметры сверхпроводящих материалов зависят от ряда факторов, определяющих степень и характер структурной неупорядоченности кристаллической решетки. Если высокие значения таких характеристик, как T_c и H_{c2} определяются особенностями электронного и фононного спектров, то величина J_c существенно зависит от структурно-фазового состояния, связанного с условиями получения и режимами термообработок [2-4].

Как известно, в поперечном магнитном поле на проводник с током действует сила Лоренца, что приводит к возникновению значительных напряжений и деформаций в обмотках магнитной системы. По оценкам работы [5], при радиусе витка соленоида 10 см механические растягивающие напряжения в сечении провода могут достигать величины 500 МПа. Механические воздействия, особенно при резких изменениях тока и поля в соленоидах, могут привести к неконтролируемым изменениям критических параметров в магнитных системах, к отклоне-

нию характеристик магнитных систем от расчетных как сразу после намотки, так и в процессе длительной эксплуатации. Поэтому для разрабатываемых технических сверхпроводников на основе соединений со структурой А-15 (в частности соединений Nb_3Sn) различной конструкции, получаемых по различным технологическим схемам, возникла необходимость выяснить физическую природу и механизмы влияния напряжений, в том числе прикладываемых при температуре жидкого гелия в сильных магнитных полях, на токонесущую способность таких сверхпроводящих материалов.

Целью настоящей работы явилось изучение поведения критических сверхпроводящих параметров композитов на основе интерметаллида со структурой А-15 (Nb_3Sn) различной конструкции (проволока, плющенная проволока и лента, полученные по бронзовой технологии и методом жидкофазной диффузии) в условиях приложения растягивающих нагрузок при криогенных (4,2 К) температурах в сильных магнитных полях напряженностью до 7 Тл.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Проволочные композиты различались числом жил, формой сечения и режимами термообработки. В проводах диаметром $d=0,5$ мм, содержащих $n=7225$ жил в бронзовой матрице, сверхпроводящий слой формировался при отжиге в режиме: $T_{отж}=1020$ К в течении 2 ч. Стабилизированный и нестабилизированный ниобием плющенный провод на основе соединения Nb_3Sn толщиной $h=0,3$ мм (площадь сечения $1,2$ мм²) и стабилизированный

провод круглого сечения диаметром $d=0,3$ мм с $n=14641$ (коэффициент заполнения по ниобию 17,5 %) термообработывались при $T_{отж}=970$ К в течение 2 и 48 ч. В стабилизированных проводах бронзовая матрица была отделена от наружного слоя меди диффузионным ниобиевым барьером.

Ленточные образцы изготавливались из ниобиевой ленты, легированной цирконием (≈ 1 мас. %), с однородными по толщине слоями Nb_3Sn , сформированными в результате жидкофазной диффузии ($T_{отж}=1210$ К, $\tau=0,5$ ч) по 4...5 мкм и с напаянными с каждой стороны слоями меди толщиной ~ 50 мкм [6].

Измерения критического тока и критической температуры выполнялись на установке [7], позволяющей измерять критический ток (J_c) сверхпроводников в поперечном магнитном поле с индукцией до 7 Тл в ненагруженном состоянии и при действии растягивающей нагрузки с одновременной записью кривой растяжения. Исследования влияния растягивающей нагрузки на намагниченность ленточного композита проводились с помощью специального устройства [8].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперименты показали, что для сверхпроводников на основе Nb_3Sn поведение J_c под нагрузкой в значительной мере зависит от их конструкции и режима формирования основной сверхпроводящей фазы Nb_3Sn и отличается от поведения $Nb-Ti$ -сверхпроводников, для которых характерно монотонное снижение J_c с увеличением растягивающего напряжения выше пороговой величины [9,10].

На рис.1 представлены зависимости J_c от растягивающего напряжения σ для нестабилизированного многожильного ($n=7225$) проводника в бронзовой матрице в поле 6,3 Тл.

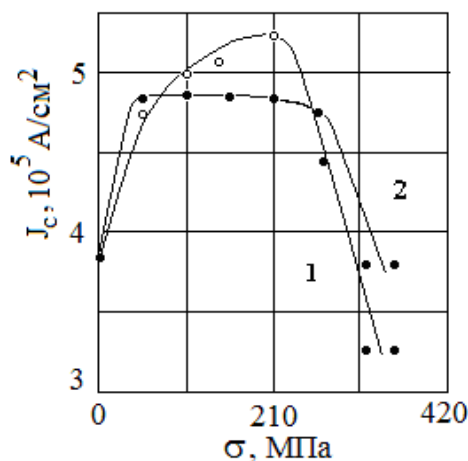


Рис.1. Изменения J_c под действием растягивающей нагрузки при 4,2 К (1) и после разгрузки (2) для нестабилизированного многожильного ($n=7225$) проволочного композита ($d=0,5$ мм, $T_{отж}=1020$ К, $t=2$ ч) [10]

Отличительной особенностью поведения $J_c(\sigma)$ для этого материала является наличие максимума: с ростом напряжения J_c первоначально увеличивается

(максимальный прирост J_c составляет $\sim 35\%$), а затем по достижении некоторого напряжения, близкого к пределу пропорциональности $\sigma_{пр}$, резко уменьшается (см. рис.1, кр.1).

Характер изменения J_c , измеряемого после снятия внешней нагрузки (см. рис.1, кр.2), качественно повторяет ход J_c при увеличении нагрузки. При этом величина J_c после разгрузки для интервала значений предварительно прикладываемого напряжения от ~ 50 до ~ 270 МПа существенно (на $\sim 25\%$) превышает исходную. Лишь на заключительном этапе нагружения (выше макроупругой области) J_c после разгрузки начинает снижаться, оставаясь все же выше значения в нагруженном состоянии.

Сравнение влияния растягивающих напряжений на изменение критического тока стабилизированных и нестабилизированных сверхпроводящих композитов на основе соединения Nb_3Sn (в том числе подвергнутых предварительной деформации прокаткой для плющения) было изучено на образцах, прошедших термообработку различной длительности при $T=1020$ К (рис.2). Как видно из рисунка, поведение под нагрузкой J_c нестабилизированного проводника, отожженного в течение 2 ч (см. рис.2, кр. 1), по характеру зависимости подобно изменению J_c проволочных образцов диаметром 0,5 мм, термообработанных в том же режиме (см. рис.1): с ростом напряжения критический ток сначала увеличивается (на $\sim 20\%$), а при $\sigma > 0,5\sigma_B$ начинает уменьшаться. Для образцов, отожженных в течение 48 ч, поведение критического тока под нагрузкой имеет совершенно иной характер (см. рис.2, кр. 2): до напряжений $\sigma \approx 0,2\sigma_B$ критический ток практически не изменяется, затем в интервале $0,2 \dots 0,85 \sigma_B$ снижается на $\sim 8\%$, после чего резко падает.

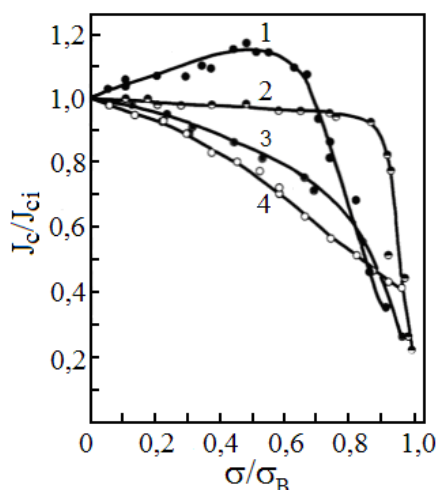


Рис.2. Зависимости нормированной плотности критического тока J_c/J_{ci} при $B=7$ Тл от нормированного напряжения σ/σ_B плющенных проволочных композитов ($n=14641$) толщиной 0,3 мм, отожженных при $T_{отж}=1020$ К в течение 2 (1, 3) и 48 (2, 4) ч: 1, 2 – нестабилизированные ($J_{ci}=2,48 \cdot 10^4$ А/см²); 3, 4 – стабилизированные ($J_{ci}=2,71 \cdot 10^4$ А/см²)

В случае образцов, стабилизированных ниобием, изменение критического тока с ростом растягиваю-

щего напряжения имеет монотонный характер (см. рис.2, кр. 3,4): приложение небольших напряжений ($\sigma \sim 0,1\sigma_B$) приводит к снижению J_c в образцах, отожженных как в течение 2 ч, так и 48 ч, причем в последнем случае эффект снижения J_c более сильно выражен до напряжений $\sim 0,9\sigma_B$.

Повышение критического тока при действии внешней нагрузки в нестабилизированных композициях, термообработанных в течение 2 ч, следует связать с тем, что объемная доля фазы Nb_3Sn в данном случае еще невелика и при растяжении образца при определенном уровне нагрузки происходит компенсация сжимающих внутренних напряжений. В многожильных проводниках на основе Nb_3Sn , изготовленных по бронзовой технологии, возникают при охлаждении до 4,2 К аксиальные сжимающие напряжения, действующие на слои интерметаллида, вследствие более высокого коэффициента термического расширения бронзовой матрицы по сравнению с соединением Nb_3Sn . Согласно [11] в интервале температур 1000...4,2 К бронза, Nb_3Sn и Nb сжимается на 1,82; 0,77 и 0,71 % соответственно. При воздействии внешних растягивающих напряжений в процессе испытаний внутренние сжимающие напряжения снижаются, что приводит к возрастанию критического тока. Кроме того, определенный вклад в увеличение J_c можно ожидать за счет появления субкритических микротрещин и границ двойников. Наблюдаемое максимальное увеличение J_c будет соответствовать уровню напряжений, предшествующему этапу массового возникновения более крупных поперечных микротрещин, в результате чего нарушится сплошность сечения сверхпроводящих жил.

Данные фрактографии, полученные при исследовании нестабилизированного проводника, показали, что при напряжениях $\sigma \sim 0,3\sigma_B$ в слое интерметаллида образуются локализованные поперечные микротрещины, количество которых увеличивается с дальнейшим ростом напряжения. К моменту разрушения композита трещины наблюдаются по всей длине жил. Следует отметить, что вплоть до разрушения трещины, образовавшиеся в слое Nb_3Sn , практически не проникают в центральную часть жилы, состоящую из ниобия.

В случае проводников с более тонкими слоями Nb_3Sn внутренние напряжения в слое будут выше по сравнению с более толстыми слоями. С различием уровня сжимающих напряжений и связаны наблюдаемое первоначальное увеличение J_c у композита после отжига минимальной продолжительности (2 ч) и отсутствие такого эффекта у образцов, отожженных в течение 48 ч, в которых толщина слоя интерметаллида будет выше, что обеспечивает существенное уменьшение уровня сжимающих напряжений. Механические испытания показали, что длительный отжиг приводит к значительному снижению предела текучести композита (на 23, 65 и 34% при 300, 77 и 4,2 К соответственно), что способствует протеканию релаксационных процессов на межфазных границах за счет маломасштабных перемещений дислокаций в матрице под действием нарас-

тающих с понижением температуры термических напряжений. В результате приложение внешней нагрузки к композиту, прошедшему длительный отжиг (48 ч), не приводит к столь резкому изменению критического тока. Слабое снижение J_c при напряжениях вплоть до $0,85\sigma_B$, вероятно, обусловлено постепенным медленным развитием микротрещин, объемная доля и размер которых еще не оказывают значительного влияния на J_c , и лишь по достижению напряжений $\sigma > 0,85\sigma_B$ происходит развитие трещинообразования и лавинообразное разрушение образца.

Роль ниобиевого барьера, как оказалось, в проводах данной конструкции весьма значительна. Он обеспечивает более высокий уровень прочностных характеристик. Так для стабилизированных отожженных при 970 К 2 ч σ_B возрастает на 28%, тогда как после отжига 48 ч - на 36% по сравнению с нестабилизированным сверхпроводником. Последний фактор в большей мере проявляется при меньшем диаметре провода, что связано с ростом объемной доли фазы (v) Nb_3Sn в жилах композита: для проводов с $d=1,5; 1,0$ и $0,5$ мм значение v составляет 77,3, 95,1 и 99,1 %, соответственно. Поэтому для стабилизированного проводника с $d=0,3$ мм (см. рис.2, кр.1), также как и с $d=0,5$ мм [8] эффект первоначального увеличения J_c не выявляется, в то же время в проводнике с $d=0,8$ мм наблюдается рост критического тока при напряжениях до $\sigma \sim 0,5\sigma_B$ [9,10]. На рис. 2 обращает внимание существенная разница в поведении нормированной плотности критического тока под нагрузкой стабилизированных ниобием проводов круглого сечения и плющенных: у образцов круглого сечения критический ток не изменяется до значений $\sigma=0,8\sigma_B$, тогда как у плющенных образцов при $\sigma=0,1\sigma_B$ происходит необратимое падение критического тока. Такой характер изменения критического тока под нагрузкой, по-видимому, связан с увеличенной долей сверхпроводящей фазы в плющенных образцах по сравнению с проволоочными вследствие того, что скорость «восходящей диффузии», контролирующей «наработку» сверхпроводящей фазы, существенно зависит от предварительной деформации материала и в образцах, подвергнутых деформации плющением, будет выше.

Из вышеизложенного следует, что основным фактором, определяющим поведение J_c композитов на основе Nb_3Sn в условиях приложения внешних растягивающих напряжений, является объемная доля сверхпроводящей фазы, скорость образования которой зависит от характера напряженно-деформированного состояния исходного материала, определяемого конечным диаметром провода, а также наличием этапа предварительной деформации плющением. Присутствие стабилизирующего элемента в конструкции сверхпроводящего композита помимо увеличения его механической устойчивости обуславливает снижение уровня сжимающих напряжений, в результате чего у провода с минимальной толщиной слоя Nb_3Sn ($h=0,3$ мм, $t=2$ ч) не возникает стадия увеличения J_c , предшествующая стадии мо-

нотонного снижения критического тока под нагрузкой.

Исследования влияния механических напряжений на намагниченность проводились на ленточном композите со слоем Nb_3Sn в средней части.

На рис.3,а приведен график зависимости намагниченности M в относительных единицах от приложенной нагрузки при фиксированной величине поля ($B=1,4$ Тл), значительно превышающей H_{c1} для Nb_3Sn . Как видно, растяжение образца при 4,2 К в области напряжений $\sigma=0\dots250$ МПа не приводит к изменению величины намагниченности. При напряжениях $\sigma \sim 250$ МПа начинается некоторое плавное снижение величины M , а при $\sigma=440$ МПа намагниченность резко падает. Разгрузка образца в этой области напряжений не восстанавливает значения намагниченности. Вид кривых намагниченности также резко меняется с деформацией - скачки исчезают, кривые становятся гладкими, и при нагрузках, близких к разрывным, величина намагниченности и ее гистерезис резко уменьшается.

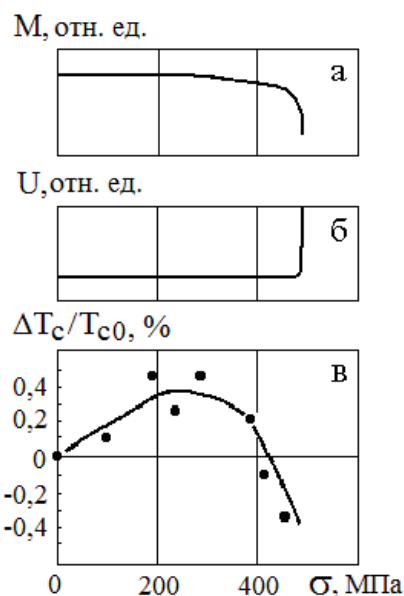


Рис.3. Зависимости намагниченности M (а), потенциала U (б) и $\Delta T_c/T_{c0}$ (в) ленточного сверхпроводящего композита на основе Nb_3Sn , полученного жидкофазной диффузией, от приложенной нагрузки при 4,2 К [8]

На рис.3,в приведено изменение критической температуры сверхпроводящей ленты в условиях растяжения. Видно, что по мере увеличения механических напряжений критическая температура сначала возрастает, достигая максимального значения в интервале $\sigma \approx 200\dots300$ МПа (прирост составляет $\approx 7,5 \cdot 10^{-4}$ К/МПа), а затем снижается.

В области напряжений, близких к 440 МПа, на образце при пропускании через него тока $I=25\dots100$ А (см. рис.3,б) возникает падение напряжения. Исследование структуры поверхности Nb_3Sn после нагружения образца до уровня напряжений, соответствующих началу резкого спада намагниченности,

показало, что в слое Nb_3Sn имеется множество поперечных микротрещин, образующихся при напряжениях, превышающих предел упругости композитной ленты примерно на 60 %. Именно с нарушением сплошности слоя Nb_3Sn следует связать необратимое снижение намагниченности, появление конечного электрического напряжения на образце и снижение температуры сверхпроводящего перехода.

Сравним уровень изменения T_c ленточного композита на основе Nb_3Sn в случае всестороннего сжатия и при одноосном растяжении. Для соединения Nb_3Sn согласно данным [11] в условиях высокой степени гидростатичности приложенного давления величина $\partial T_c/\partial P \approx -2,5 \cdot 10^{-4}$ К/МПа. В наших экспериментах при растягивающем напряжении $\sigma \approx 250$ МПа получены значения $\Delta T_c \approx 7,5 \cdot 10^{-2}$ К и $\delta T_c/\delta \sigma \approx 3 \cdot 10^{-4}$ К/МПа. Близость абсолютных значений $\partial T_c/\partial P$ и $\delta T_c/\delta \sigma$ соответствует существующим теоретическим [15] и экспериментальным данным [11] об уменьшении T_c Nb_3Sn с деформацией. Количественное различие может быть, в частности, связано с отличием эффектов тетрагональных деформаций и деформации всестороннего сжатия с изменением объема.

Учитывая приведенные выше результаты, наблюдаемые в наших экспериментах, попробуем оценить эффекты изменения токонесущей способности сверхпроводящих композитов Nb_3Sn под действием приложенных нагрузок.

Для композита, состоящего из двух компонент с различным температурным ходом коэффициента термического расширения (КТР) и соотношением упругих модулей в пренебрежении различия коэффициентов Пуассона, упругую деформацию нити Nb_3Sn можно приблизительно оценить по формуле [12,13]:

$$\varepsilon_1 \approx \frac{-\Delta \delta}{1 + \mathfrak{K}^{-1} \cdot E_1/E_2}, \quad (1)$$

где $\Delta \delta$ – разница значений термических сжатий компонент, \mathfrak{K} – отношение объемов, занимаемых матрицей и Nb_3Sn , E_1 и E_2 – модули Юнга Nb_3Sn и матрицы. Оценим величину сжимающих напряжений термической природы в приближении $\sigma_T \approx \varepsilon_T E_1$ на примере нестабилизированного плющеного проводника с числом сверхпроводящих жил 14641, термообработанного по режиму $T_{отж} = 970$ К, $t=2$ ч, для которого характерно проявление максимума J_c после приложения растягивающего напряжения $\sigma \approx 0,4\dots0,5\sigma_B$ (см. рис. 1, кр.1). Подставляя в формулу (1) типичные значения $\Delta \delta$ системы медь- Nb_3Sn [14], значения модуля Юнга компонент при 4,2 К [15] и $\mathfrak{K} \approx 4,7$, что соответствует коэффициенту заполнения 17,5 %, имеем $\varepsilon_1 \approx 0,37$. При значении $E_1 = 4,9 \cdot 10^4$ МПа при 4,2 К получаем величину сжимающих напряжений $\sigma_T \approx 180$ МПа, что соответствует значению $\approx 0,32\sigma_B$. Абсолютное значение этой величины с точностью до 80 % соответствует нижней границе интервала растягивающих напряжений, соответствующих достижению максимального значения плотности критического тока.

В случае приложения растягивающих напряжений дополнительным фактором изменения критического тока при малых деформациях может быть образование субкритических трещин в интерметаллическом слое, зарождающихся на локальных неоднородностях структурно-фазового состава, которые будут закрываться (частично либо полностью) после снятия нагрузки. Эти дефекты при размерах, сопоставимых с длиной когерентности (в Nb_3Sn при $T=4,2$ К $\xi \approx 4$ нм [16],) могут служить дополнительными центрами пиннинга. О возможности пиннинга на дефектах данного типа сообщалось в [14]. С другой стороны, микротрещины, как дефекты, с которыми связано локальное разупорядочение Nb_3Sn , должны приводить к снижению T_c , что, как показывает проведенный анализ, будет способствовать уменьшению элементарной силы пиннинга и соответственно деградации критического тока.

Еще одним фактором, который может оказать влияние на изменение токонесущей способности композитов на основе Nb_3Sn , является изменение доменной структуры интерметаллида. Как известно [17,18], при превращении из кубической структуры А-15 в тетрагональную фиксируется образование двойниковой доменной структуры. Для Nb_3Sn превращение идет с уменьшением объема элементарной ячейки. Можно полагать, что после определенного уровня приложенных растягивающих напряжений в зернах Nb_3Sn будет снижаться количество доменных границ двойникового типа. Учитывая, что с двойниковыми границами связаны области искажений шириной несколько параметров решетки, такие границы могут давать определенный вклад в пиннинг вихревой решетки, а снижение их количества будет способствовать уменьшению токонесущей способности. Если провести аналогию с двойникованием в металлических кристаллах, то и в случае Nb_3Sn следует ожидать, что образование двойников с большей вероятностью будет происходить в материале с большим размером зерна. Поэтому для ленточного композита, полученного методом жидкофазной диффузии с размером зерна больше, чем у многожильного провода, возможный эффект изменения доменной структуры под нагрузкой будет большим. С данным обстоятельством может быть связано отсутствие заметного изменения намагниченности вплоть до напряжений $\sigma \approx 0,5\sigma_B$, что можно отнести к компенсации эффекта роста критического тока вследствие увеличения T_c и его снижения из-за уменьшения количества доменных границ.

ВЫВОДЫ

Изучено влияние одноосных растягивающих напряжений при 4,2 К в поперечном магнитном поле напряженностью 7 Тл на критические параметры сверхпроводников на основе Nb_3Sn .

Показано, что у проволочных композитов с низким объемным содержанием фазы Nb_3Sn , изготовленных по «бронзовой» технологии, с ростом внешнего растягивающего напряжения появляется локальный максимум J_c , обусловленный компенсацией термических сжимающих напряжений, отсутствующей

при увеличении объемного содержания Nb_3Sn и введении в конструкцию стабилизирующего элемента.

Для ленточных сверхпроводников, полученных методом жидкофазной диффузии, в макроупругой области характерно незначительное увеличение T_c и практически отсутствует изменение намагниченности.

Необратимая деградация сверхпроводящих параметров у всех типов композитов, возникающая при определенных значениях внешней нагрузки, связана с появлением микротрещин в слоях Nb_3Sn .

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Уилсон. *Сверхпроводящие магниты*. М.: «Мир», 1985, 407 с.
2. В.М. Пан, В.Г. Прохоров, А.С. Шпигель. *Металлофизика сверхпроводников*. К.: «Наукова думка», 1984, 189 с.
3. Б.Г. Лазарев, В.М. Пан. О перспективах повышения критических параметров сверхпроводников // *Металлофизика*. 1979, т.1, в.1, с.52-62.
4. В.П. Коржов. Способы получения сверхпроводящих материалов на основе интерметаллических соединений со структурой А-15 // *Вопросы технической сверхпроводимости*: Обзор. Черноголовка, 1984, с.5-43.
5. Р.Г. Минц, А.Л. Рахманов. *Неустойчивости в сверхпроводниках*. М.: «Наука», 1984, 262 с.
6. Л.С. Лазарева, Б.Г. Лазарев, В.А. Полтавец, Н.А. Черняк. Лента Nb_3Sn с высокими критическими токами // *Труды конференции по техническому использованию сверхпроводимости, Алушта, 1975*. М.: «Атомиздат», 1977. т.4: Сверхпроводящие материалы. С.80-82.
7. И.А. Гиндин, М.Б. Лазарева, Я.Д. Стародубов, М.П. Старолат. Устройство для исследования электрических и магнитных свойств сверхпроводящих материалов под нагрузкой // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Фундаментальная и прикладная сверхпроводимость»*. 1976, в.1(4), с.62-63.
8. И.А. Гиндин, Б.Г. Лазарев, М.Б. Лазарева, В.А. Полтавец, В.И. Соколенко, Л.С. Лазарева, Я.Д. Стародубов, В.М. Горбатенко. Влияние растягивающих нагрузок на критическую температуру и намагниченность ленты Nb_3Sn // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Общая и ядерная физика»*. 1981, в. 3(17), с. 19-21.
9. И.А. Гиндин, М.Б. Лазарева, Я.Д. Стародубов, М.П. Старолат, В.Ф. Гоголя, А.П. Голубь, В.И. Соколенко, А.Д. Никулин. Влияние растягивающей нагрузки на критические токи и температуры сверхпроводящих проводов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Атомное материаловедение»*. 1981, в. 1(7), с.38-41
10. И.А. Гиндин, Я.Д. Стародубов, М.Б. Лазарева, В.М. Горбатенко, А.Д. Никулин, А.П. Голубь, А.Е. Воробьева, А.К. Шиков. Влияние механических напряжений на критический ток сверх-

- проводящих проводов на основе сплава НТ-50 и соединения Nb₃Sn // // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Атомное материаловедение»*. 1987, в.2(25), с.43-45.
11. J.W Ekin. Effect of transversal compressive stress on the critical current and upper critical field of Nb₃Sn // *J. Appl. Phys.* 1987, v.62, №12, p.4829-4834.
 12. G Rupp. Parameters affecting prestrain and B_{c2} in multifilamentary Nb₃Sn conductors // *Adv. Cryog. Eng. Mater.* 1980, v. 26, p.522-528.
 13. D.O Welch. Alteration of the superconducting properties of A-15 compounds and elementary composite superconductors by nonhydrostatic elastic strain // *Adv. Cryog. Eng. Mater.* 1980, v.26, p.48-65.
 14. А.А. Мацакова. Влияние изгибающих напряжений на температуру сверхпроводящего перехода диффузионных слоев Nb₃Sn // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Общая и ядерная физика»*. 1985, в.1(4), с.9-15.
 15. M. Pochier, R Plamondon., J.D.N Cheeke. Elastic constants of polycrystalline Nb₃Sn between 4,2 and 300 K // *J/ Appl/ Phys.* 1984, v.55, № 3, p.3227-3232.
 16. J.W Ekin. Mechanisms for critical current degradation in NbTi and Nb₃Sn multifilamentary wires // *IEEE Trans. Magn.* 1977, v. MAG-13, №1, p.127-130.
 17. J.L McDougall. Copper matrix filamentary Niobium-tin superconductors // *Cryogenics*. 1976, v.16, №6, p.323-325.
 18. С.В Вонсовский, Ю.А., Изюмов, Э.З. Курмаев. *Сверхпроводимость переходных металлов и их сплавов*. М.: «Наука», 1977, 383 с.

ДО ПИТАННЯ ПРО СТРУМОНЕСУЧУ ЗДАТНІСТЬ НАДПРОВІДНИХ КОМПЗИТИВ НА ОСНОВІ Nb₃Sn ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ

В.М.Горбатенко, М.Б.Лазарева, В.І.Соколенко

Вивчена струмонесуча здатність композитів різного типу та геометрії на основі інтерметаліду Nb₃Sn при 4,2 К у високих магнітних полях в умовах накладення напруги що розтягує. Показано, що у дротяних композитах з низьким об'ємним вмістом фази Nb₃Sn, виготовлених по «бронзовій технології» з ростом зовнішнього напруження, що розтягує, з'являється локальний максимум J_c обумовлений компенсацією термічних напружень, які стискають. Він стає відсутній при збільшенні об'ємного вмісту Nb₃Sn та введенні в конструкцію стабілізуючого елемента. Для стрічкових надпровідників, одержаних методом рідиннофазної дифузії в макропружній області характерно незначне збільшення T_c і практично відсутня зміна намагнічування. Безповоротна деградація надпровідних параметрів для усіх типів композитів, виникаюча при визначених значеннях зовнішньої напруги, пов'язана з появою мікротріщин у шарах Nb₃Sn

TO A QUESTION ABOUT CURRENT-CARRYING ABILITIES OF SUPERCONDUCTING COMPOSITES ON THE BASIS OF Nb₃Sn UNDER LOADING

V.M. Gorbatenko, M.B. Lazareva, V.I. Sokolenko

Current-carrying ability in the high magnetic fields at 4,2 K at the action of tension stresses of composites on the basis of compound Nb₃Sn of different type and geometry was studied. It is shown that wire composites manufactured by «bronze» technology, having the low volume content of Nb₃Sn phase, when the external tension rising, have exhibited the local maximum J_c caused by indemnification of thermal compressing pressure, which absent when a volume content of Nb₃Sn increased and a stabilizing element in a design introduced. For the tape-type superconductors obtained by a method of liquid-phase diffusion, in macroelastic area the insignificant increase in T_c is characteristic and practically there is no change of magnetization. Irreversible degradation of superconducting parameters at all kinds of the composites, arising at the certain values of external loading, related to appearance of microcracks in Nb₃Sn layers