

- [5] Digonnet M.J.R., Gaeta C.J., O'Meara D., Shaw H.J. // J. Lightwave Technol. 1987. V. 5. N 5. P. 642-646.
- [6] Tissue B.M., Lu L., Yen W.M. // J. Luminescence. 1990. V. 45. P. 20-22.
- [7] Dieke G.H. Spectra and energy levels of rare earth ions in crystals. N.Y., 1968. 401 p.
- [8] Каминский А.А. Лазерные кристаллы. М., 1975. 256 с.
- [9] Каминский А.А. // ЖЭТФ. 1966. Т. 51. В. 1. С. 49-58.
- [10] McCumber D.E., Sturge M.D. // J. Appl. Phys. 1963. V. 34. N 6. P. 1682-1684.

Поступило в Редакцию  
17 ноября 1989 г.  
В окончательной редакции  
17 сентября 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 22

26 ноября 1990 г.

05.4

© 1990

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ КОЛИЧЕСТВА ЖИЛ  
И ИХ ЛЕГИРОВАНИЯ НА КРИТИЧЕСКИЙ ТОК  
 $Nb_3Sn$  -ПРОВОДА

Б.П. Михайлов, П. Ковач,  
П. Гутька, В.С. Круглов,  
Т.А. Давлатьян

Повышение токонесущей способности многожильных  $Nb_3Sn$  проводов,готавливаемых по методу бронзовой технологии, как правило, достигается за счет увеличения количества жил ( $>1000-10000$ ) [1-2]. При этом в бронзовой матрице формируются ниобиевые волокна диаметром менее 5-10 микрон, которые после термообработки большей частью превращаются в мелкозернистую  $Nb_3Sn$ -фазу. Благодаря этому у проводов с большим количеством жил обеспечиваются более высокие критические токи, чем у проводов с малым количеством толстых жил.

Однако, с другой стороны, процесс изготовления проводов с большим количеством тонких жил имеет существенные недостатки. Основной из них заключается в том, что при этом требуется проведение неоднократных последовательных сборок: сначала из стержней ниобия и бронзовой матрицы, затем из стержней композита и бронзовой матрицы. Указанное обстоятельство при каждой последующей

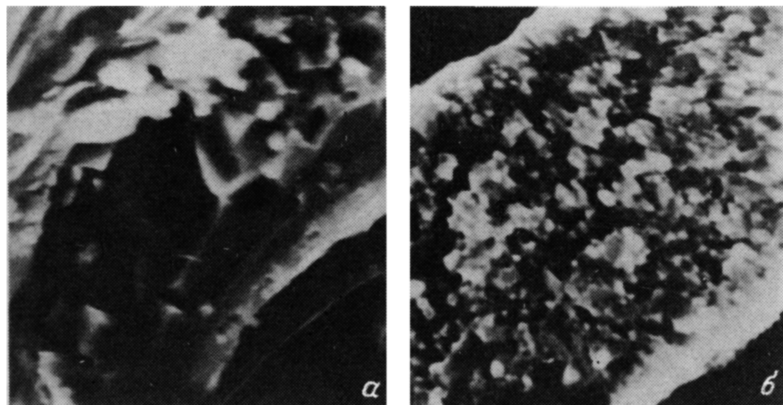


Рис. 1. Структура излома  $Nb_3Sn$  - слоя в 7-жильных проводах, термообработанных при  $750^\circ C$  в течение 50 часов: а - ниобиевые жилы не легированы, б - жилы легированы цирконием 0.8 мас. %, х 3000.

сборке заметно увеличивает в проводе объемное содержание избыточной бронзы и соответственно не достигается ожидаемого повышения критического тока. Существенно осложняется процесс изготовления провода.

Тем самым вопрос оптимизации количества жил приобретает особое значение. Наиболее важным он становится в случаях, когда ниобиевые жилы легированы специальными добавками, повышающими скорость роста  $Nb_3Sn$ -слоя и одновременно задерживающими рост зерен во время диффузионной термообработки готового провода. По литературным данным [3, 4], наиболее подходящими добавками для повышения критического тока  $Nb_3Sn$ -проводов являются цирконий и титан.

В наших экспериментах, проведенных на  $Nb_3Sn$ -проводах с различным количеством жил (-1, -7 и 1615), легированных цирконием (0.8 мас. %), титаном (1.0 мас.%) и без легирующих добавок, установлены следующие основные особенности. В процессе термообработки при  $750^\circ C$  в течение 15-75 часов на легированных цирконием жилах формируется  $Nb_3Sn$  слой с зернами на порядок более мелкими, чем на нелегированных жилах (рис. 1, а, б). При легировании титаном также заметно измельчение зерен (рис. 2, а, б). Объясняется это тем, что цирконий и титан уже при незначительных концентрациях (0.3-2.0 мас.%) в ниобии заметно измельчают зерна. Это можно наблюдать как на литых сплавах, так и после деформации литого слитка в исходные стержни композиционной заготовки. Связано это с тем, что цирконий и титан способствуют образованию в сплавах мелких выделений оксидов, препятствующих росту зерен. Указанные добавки повышают температуру рекристаллизации ниобия [5] и позволяют поднять температурные интервалы диффузии

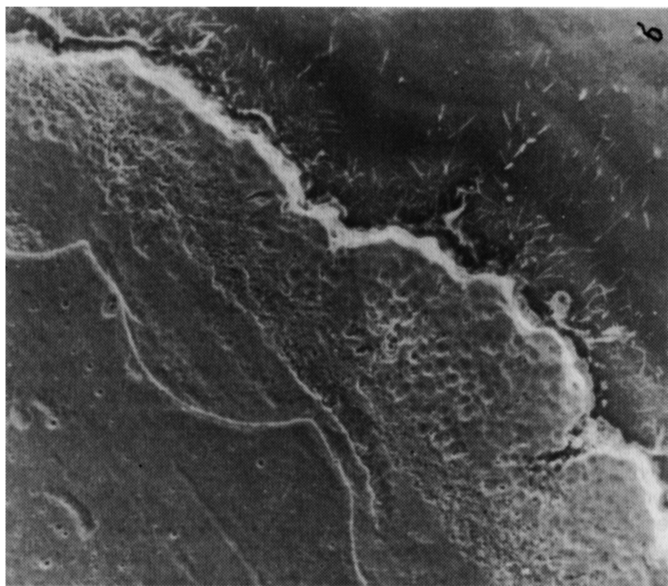
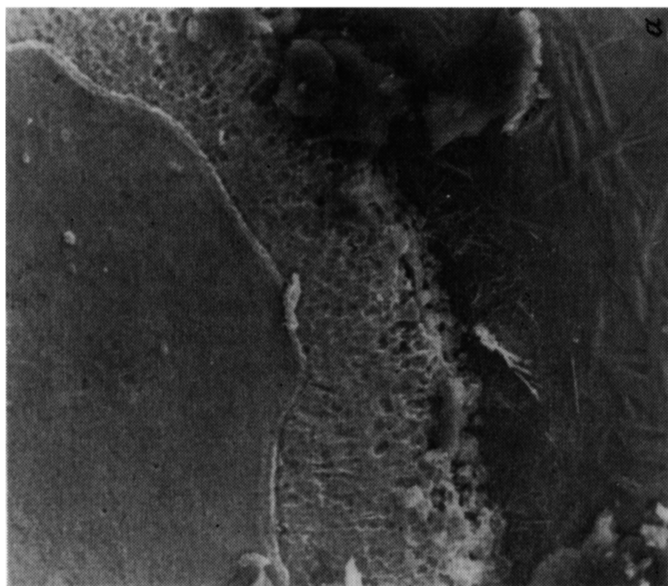
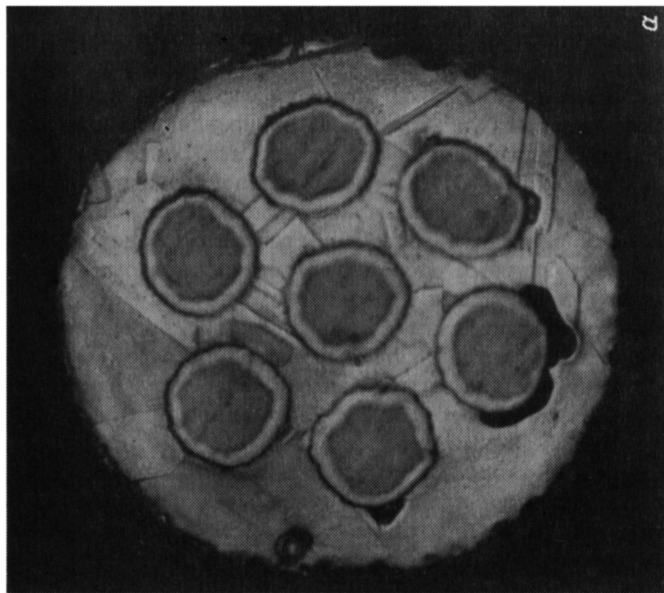
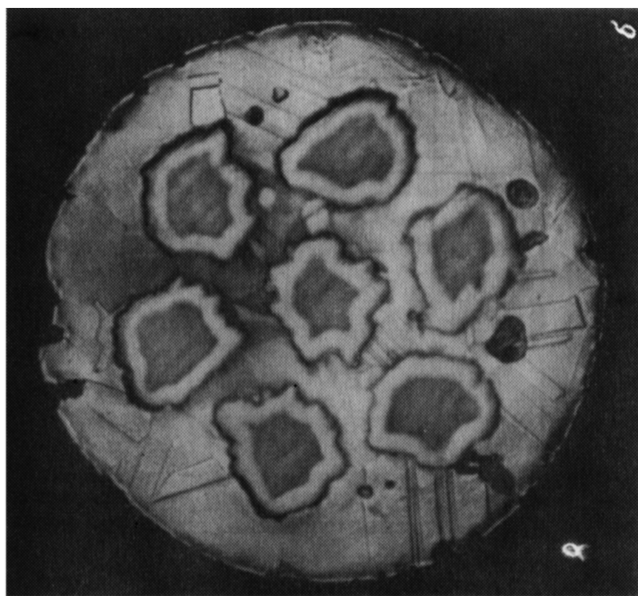


Рис. 2. Структура поперечного сечения  $Nb_3Si$  -слоя в 1-жильных проводках, термообработанных при  $750\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 50 часов: а - нелегированный, б - легированный 1.0 мас. % титана,  $\times 2000$ .



а



б

Рис. 3. Структура поперечного сечения 7-жильных Nb<sub>3</sub>Sn-проводов, термообработанных при 750 °С в течение 50 часов: а - ниобиевые жилы не легированы, б - ниобиевые жилы легированы цирконием 0.8 мас. %; диаметр проводов 0.4 мм.

Плотность критического тока  $Nb_3Sn$ -проводов с различным количеством легированных и нелегированных жил

Химический состав жил, мас. %	Режимы термообработки		Кол-во жил	Плотность критического тока на полное сечение провода в магнитном поле 10 Т А/см <sup>2</sup>
	Т, °С	Время, час		
Ниобий чистый	680	50	1	$1.19 \cdot 10^3$
Ниобий - 1.2 Zr	680	50	1	$1.71 \cdot 10^3$
Ниобий чистый	750	25	7	$1.9 \cdot 10^4$
Ниобий - 0.8 Zr	750	25	7	$4.92 \cdot 10^4$
Ниобий чистый	750	15	1615	$4.04 \cdot 10^4$
Ниобий - 1.0 Ti	750	15	1615	$4.49 \cdot 10^4$

онного отжига от 680–700 °С для проводов с нелегированными жилами до 750 °С и выше для легированных цирконием и титаном проводов.

К преимуществам указанных легирующих добавок следует также отнести то, что они значительно (почти в 2 раза) ускоряют рост  $Nb_3Sn$ -слоя, тем самым относительно толстые ниобиевые жилы (50–100 микрон и более) могут быть превращены в мелкозернистую  $Nb_3Sn$ -фазу без значительного увеличения продолжительности диффузионного отжига. На рис. 3 показана структура поперечного сечения 7-жильных  $Nb_3Sn$ -проводов, легированного цирконием (0.8 мас.%) и нелегированного. Видно, что при одинаковых условиях термообработки (750 °С, 50 часов) на легированных жилах слой  $Nb_3Sn$  толще. При увеличении продолжительности отжига до 100 часов эта разница в толщинах становится более заметной.

Отмеченные структурные особенности безусловно сказываются и на токонесущей способности проводов (см. таблицу).

Приведенные в таблице данные показывают более высокие значения плотности критического тока легированных цирконием и титаном проводов по сравнению с нелегированными. При этом наиболее высокая плотность критического тока у 7-жильного провода, легированного цирконием.

Таким образом, показано, что и в проводах с относительно небольшим количеством жил при легировании можно достигать плотности критического тока близкие к  $10^5$  А/см<sup>2</sup>. Такие провода могут быть применены в магнитных системах с постоянным магнитным полем.

Результаты, представленные в работе, свидетельствуют о возможности значительного уменьшения количества ниобиевых жил в многожильном проводе за счет введения в них специальных добавок,

изменяющих кинетику роста диффузионного  $Nb_3Sn$ -слоя. Можно предполагать, что и легирование бронзовой матрицы будет оказывать подобное влияние на оптимальное количество ниобиевых жил.

### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] K r u z l i a k J., H u t k a P., K o v a c P., S e t i n a P. // Acta Physica Academiae Hungaricae. 1982. V. 53. N 3-4. P. 425-431.
- [2] R u p p G., S p r i n g e r E., R o t h S. // Cryogenics. 1977. March. P. 141-144.
- [3] S u e n a g a M., L u h m a n T.S., S a m p s o n W.B. // J. of Appl. Phys. 1974. V. 45. N 9. P. 4049-4053.
- [4] S u e n a g a M., T s u c h i j a K., H i g u c h i et al. // Cryogenics. 1985. V. 25. P.123-128.
- [5] K r u z l i a k J., S a v i t s k y E.M., M i k h a i l o v B.P. et al. Proceedings 6th International conference on magnet technology (MT-6). 1977. Bratislava. P. 1099-1104.

Поступило в Редакцию  
27 июля 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 22

26 ноября 1990 г.

05.2

© 1990

ОДНОФАЗНЫЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЛЕНКИ  $Pb(Zr,Ti)O_3$ ,  
ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО РАСПЫЛЕНИЯ

С.Х. Е с а я н, О.В. К а н д и д о в а,  
Г.А. В а р д а н я н, Л.П. Г р и г о р я н,  
П.Г. П е т р о с я н

Повышенный интерес к получению и исследованию сегнетоэлектрических пленок в настоящее время связан, в основном, с существенным прогрессом в создании энергонезависимых сегнетоэлектрических запоминающих устройств [1]. В результате начали бурно развиваться и совершенствоваться не только традиционные методы получения пленок (радиочастотное и магнетронное распыление), но и новые технологии, такие как *sol-gel*, *CVD* (*chemical vapor deposition*) и различные комбинированные методы