

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА**

13-88-60

И.Вавра, С.А.Коренев

**ОБРАБОТКА ИМПУЛЬСНЫМ
ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ ПОВЕРХНОСТИ
ТОНКИХ ПЛЕНОК Nb_3Ge
НА ЛЕНТЕ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ**

Направлено в Оргкомитет II Международной
конференции по электронно-лучевым технологиям
ЭЛТ-88, Варна, НРБ, май 1988

1988

При использовании сверхпроводящих пленок из Nb_3Ge , Nb_3Sn на ленточной основе в различных электротехнических устройствах возникает задача обработки поверхности с целью снижения микронеровностей^{1/1}. Хрупкость сверхпроводящей пленки со структурой AlO делает практически невозможной механическую обработку - полировку поверхности. Поэтому поиск новых методов обработки поверхности хрупких сверхпроводников является весьма актуальным.

В данной работе предложен метод обработки поверхности тонких пленок оплавлением поверхности импульсным электронным пучком. Приводятся результаты применения этого метода для пленочного образца из сверхпроводника со структурой AlO (Nb_3Ge).

Анализ современных направлений в технологии обработки материалов, связанных с использованием импульсных электронных пучков, показывает, что электронный пучок может быть мощным энергоносителем^{1/2}.

Теоретический анализ распределения температуры в образце при импульсном нагреве проводился по модели, описанной в^{1/3}, для длительности импульса тока пучка, меньшей или равной тепловой постоянной образца. В этой модели перенос теплоты происходит в одном направлении, нормально к поверхности образца. При этом функция, характеризующая распределение температуры по толщине образца, имеет вид

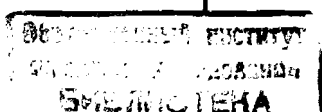
$$T(x,t) = \frac{W}{2\lambda h_3} \left[(h_3+x)^2 f(\alpha_1) + (h_3-x)^2 f(\alpha_2) \right], \quad (1)$$

где $f(\alpha_1)$ и $f(\alpha_2)$ - сложные функции, определяемые уравнениями

$$f(\alpha) = \left[\exp\left(-\frac{\alpha^2}{2}\right) \right] \left[2,5\alpha \right]^{-1} + \alpha^{-2} \operatorname{erf}(\alpha) + \operatorname{erf}(\alpha) - 0,5 \quad (2)$$

$$\alpha_1 = (h_3+x) (2\lambda t/c\rho)^{-0,5}; \quad \alpha_2 = (h_3-x) (2\lambda t/c\rho)^{-0,5}. \quad (3)$$

В этих уравнениях $\operatorname{erf}(\alpha)$ - специальная функция, а λ , c и ρ - соответственно коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность материала образца; h_3 - глубина проникновения электронов, $h_3 = u^2 A / g \rho Z$ (u - ускоряющее напряжение на источнике



электронов; A, Z - соответственно атомный номер и вес, g - физическая постоянная, $g = 7,8 \cdot 10^{10}$ эВ \cdot м 2 \cdot кг $^{-1}$).

Расчеты показывают, что температура на поверхности образца может достигать 2000°C при плотности тока $j = 1000$ А/см 2 .

Анализ распределения температуры в исследуемой структуре (пленка + подложка) показывает следующее. Поскольку тепловая постоянная времени облучаемого образца τ_p , определяемая по формуле

$$\tau_p = \frac{2h_3^2 \rho c}{\lambda}, \quad (4),$$

превышает длительность импульса тока пучка электронов примерно в 100 раз, то отсюда следует тот факт, что нагрев образца носит адиабатический характер. На рис.1 приведены безразмерные распределения температуры в образце для времени $t = \tau_u$ ($\tau_u/\tau_p \approx 1,7 \cdot 10^{-2}$ (кривая 1)) и $t = \tau_p$ ($\tau_u/\tau_p = 1$ (кривая 2)). Из них видно, что при длительности импульса тока пучка электронов $\tau_u = 300$ нс возможен переплав тонкой пленки. Необходимо отметить при этом, что такое короткое время переплава может привести к созданию чистых соединений без примесей различных загрязнений.

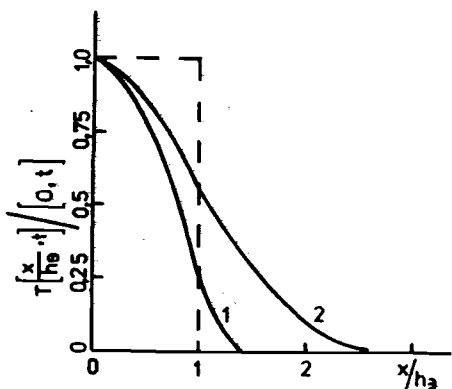


Рис.1. Безразмерные распределения температуры в образце для различных времен в безразмерных координатах.

Эксперименты по поверхностной обработке токонесущего слоя ленточного сверхпроводника импульсным электронным пучком проводились на установке, описанной в [4]. Установка включает в себя плазменный источник электронов и промышленный генератор импульсного напряжения Аркадьева-Маркса типа ГИН-500.

В экспериментах использовался электронный пучок со следующими параметрами:

кинетическая энергия.....100 кэВ
 плотность тока пучка.....400+1000 А/см 2
 длительность импульса тока пучка.....300 нс
 поперечная неоднородность плотности тока не более 5%
 диаметр пучка электронов.....5 мм

Для фотографирования поверхности пленок использовался микроскоп марки BS -350, ЧССР. Критическая температура T_k сверхпроводящей пленки измерялась индуктивным методом.

Образцы облучались электронным пучком в вакуумной камере при давлении остаточного газа $P \sim 10^{-5}$ Тор. Образцы были изготовлены в ЭИ ЦЭФИ САН (г.Братислава, ЧССР) методом осаждения из паровой фазы слоя Nb_3Ge сверхпроводника толщиной около 5 мкм на ленту из нержавеющей стали IX18H9T толщиной 50 мкм [5]. Сверхпроводящий слой состоит в основном из Al_2O_3 фазы Nb_3Ge с преимущественной ориентацией $\langle 002 \rangle$ перпендикулярно поверхности подложки. Кроме того, в слое имеется гексагональная фаза Nb_5Ge_3 , которая расположена вблизи поверхности. Шероховатость поверхности покрытий значительна, см. фотографии на рис.2.

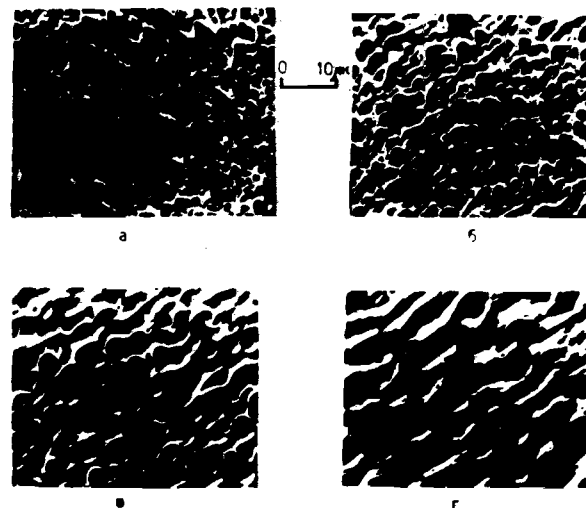


Рис.2. Фотографии поверхности Nb_3Ge до облучения электронным пучком (а) и после однократного облучения пучком с плотностью тока $j = 400$ А/см 2 (б), $j = 600$ А/см 2 (в) и $j = 1000$ А/см 2 (г) и кинетической энергией электронов 100 кэВ.

Критическая температура перехода в сверхпроводящее состояние $T_K = 20,95$ К; ширина перехода $T_K = 350$ мК [6]. Температура плавления Nb_3Ge , равна 1910°C , а температура плавления подложки — 1425°C .

Проведенные эксперименты показали, что в зависимости от плотности тока наблюдаются разные степени обработки поверхности, начиная с оплавления самых высоких неровностей и кончая полной рекристаллизацией сверхпроводящего покрытия (рис. 2б, в, г). Фотографии поверхности Nb_3Ge соответствуют однократным облучениям образцов электронным пучком. Рентгенодифракционный анализ рекристаллизованного слоя показывает, что при такой обработке исчезает преимущественная ориентация Nb_3Ge покрытия. На дифрактограмме не появляются дифракционные пики от Nb_5Ge_3 гексагональной фазы и повышается фон дифрактограмм. Из этого следует, что приповерхностный слой (с большим количеством Nb_5Ge_3 фазы) расплавился и вследствие быстрого охлаждения стал аморфным.

При этом по расчетным оценкам температура поверхности облучаемого образца составляет 2000°C при плотности тока пучка электронов 1000 А/см². Фотография поверхности Nb_3Ge на рис. 2г показывает переплав Nb_3Ge пленки, у которой $t = 1910^\circ\text{C}$, что соответствует расчетам.

В заключение можно сделать следующий вывод: в работе продемонстрирован метод обработки поверхности сверхпроводника оплавлением его поверхности с сохранением сверхпроводящих параметров импульсным электронным пучком.

Литература

1. Казовский Е.А., Карцев В.И., Шахтарин В.Н. Сверхпроводящие магнитные системы. Наука, Ленинград, 1967.
2. Сильноточные импульсные электронные пучки в технологии. Под редакцией Месяца Г.А. Наука, Сибирское отделение, Новосибирск, 1983.
3. Francis M. et al. — J. Appl. Phys, 1967, v. 38, No. 2, p. 627.
4. Корнев С.А. ОИЯИ 9-81-753, Дубна, 1981.
5. Cernusko V. et al. — J. de Physicul, 1984, v. 45, p. c1-429.
6. Вавра И., Корнев С.А. ОИЯИ № Р13-86-000, Дубна, 1986.

Рукопись поступила в издательский отдел
22 января 1988 года.

Вавра И., Корнев С.А.
Обработка импульсным электронным пучком поверхности
тонких пленок Nb_3Ge на ленте из нержавеющей стали

13-88-60

Рассматриваются результаты экспериментов по обработке импульсным электронным пучком поверхности тонких пленок Nb_3Ge на ленте из нержавеющей стали. Параметры пучка электронов: энергия 100 кэВ; плотность тока 400 ± 1000 А/см²; длительность импульса тока 300 нс. Теоретический анализ этого метода обработки показывает адиабатический процесс нагрева пленочного образца. В приведенных экспериментальных данных подтверждается этот результат на фотографиях поверхности сверхпроводящей пленки, показывающих ее переплав. При этом сверхпроводящие параметры пленки после ее обработки пучком электронов не ухудшаются. Приводятся данные рентгенодифракционного анализа рекристаллизованного слоя Nb_3Ge .

Работа выполнена в Общественном институтском научно-методическом отделении ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1988

Перевод О.С. Виноградовой

Vavra I., Korenev S.A.
Electron Pulsed Beam Induced Processing of Thin Film Surface
by Nb_3Ge Deposited into a Stainless Steel Tape

13-88-60

A surface of superconductive thin film of Nb_3Ge deposited onto a stainless steel tape was processed using the electron beam technique. The electron beam used had the following parameters: beam current density from 400 to 1000 А/см²; beam energy 100 keV; beam impulse length 300 ns. By theoretical analysis it is shown that the heating of film surface is an adiabatic process. It corresponds to our experimental data and pictures showing a surface remelting due to electron beam influence. After beam processing the superconductive parameters of the film remain unchanged. Roentgenograms have been analysed of Nb_3Ge film surface recrystallized due to electron beam influence.

The investigation has been performed at the Scientific-Methodical Division, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1988