

УДК 537.312.62

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Академик АН УССР Б. Г. ЛАЗАРЕВ, О. Н. ОВЧАРЕНКО, И. С. МАРТЫНОВ

**ПРЯМОЕ НАБЛЮДЕНИЕ МАГНИТНОЙ МИКРОСТРУКТУРЫ
В ДЕФОРМИРУЕМЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СПЛАВАХ
НА ОСНОВЕ НИОБИЯ**

Экспериментальное наблюдение картины проникновения магнитного поля в сверхпроводники 2-го рода было очень важно для развития детальных представлений о природе сверхпроводимости. В соответствии с теорией сверхпроводников этого типа⁽¹⁾ было найдено, что по мере увеличения потока индукции B в сверхпроводнике растет число n элементарных потоков, каждый из которых несет квант потока $\phi_0 = 2 \cdot 10^{-7}$ Гс·см² и остается постоянным, так что $B = n\phi_0$. Непосредственное наблюдение такой картины было сделано с применением крайне дисперсных ферромагнитных частиц, осаждающихся в местах выходов трубок потока магнитного поля на поверхности сверхпроводника⁽²⁾.

В настоящем сообщении эта методика наблюдения тонкой магнитной структуры потока применена для исследования проникновения магнитного поля в сверхпроводящие сплавы, более сложные, чем однородные однофазные сверхпроводники 2-го рода. Исследовались сплавы Nb — 60 ат. % Ti и Nb — (30—37) ат. % Ti — (25—28) ат. % Zr. Проволока из этих сплавов (особенно первого) в настоящее время является наиболее отработанным материалом для изготовления сверхпроводящих устройств для получения сильных магнитных полей (например, ⁽³⁾) или полей в больших объемах. Она обладает высокими критическими магнитными полями (у Nb — Ti $H_{k_1} = 145\,000$ э, у Nb — Zr — Ti $H_{k_2} = 117\,000$ при 2°К) и большой плотностью критического тока в значительных магнитных полях⁽⁴⁾. Последнее существенно отличает эти материалы от однородных сверхпроводников 2-го рода, у которых, как известно, плотность критического тока низка. Высокие критические токи у проволок рассматриваемых сплавов обусловливаются, как нам представляется, развитой объемной сеткой токовых путей, образующихся в процессе глубокой пластической холодной деформации (для проволоки — волочением) и последующей термообработки. По этим представлениям густая сетка элементарных актов пластической деформации при последующей термообработке превращается в сетку вышадений практически чистого ниобия, обеспечивающую развитую сверхпроводящую токонесущую систему^(5—7). Для развития этих представлений существенно, по возможности непосредственно, исследовать микроструктуру распределения магнитного потока и токовых путей в сверхпроводящем состоянии в рассматриваемых сплавах.

В настоящем сообщении приводятся экспериментальные результаты наблюдения магнитной микроструктуры. Исследования проведены на образцах проволоки диаметром около 0,25 мм при температуре 4,2°К в магнитных полях 6750 и 22 200 э. Рассматривалась магнитная структура на шлифах, поперечных и продольных к оси проволоки.

Для получения микрокартины магнитной структуры потоков, выходящих на рассматриваемую поверхность, как уже сказано, использовалась методика декорирования этой картины ферромагнитными частицами. В наших условиях это осуществлялось следующим образом. Образец помещали на дне трубки, погруженной в жидкий гелий, нижняя часть которой (с об-

разцом) находится в сверхпроводящем соленоиде. В трубке на высоте 15 см над образцом располагалась железная проволока (диаметром 0,5 мм), нагреваемая током. Трубка заполнена газообразным гелием при давлении ~ 1 мм рт. ст. При нагреве проволоки до предплавильной температуры (или при ее расплавлении) в этих условиях из пара металла образуются частицы железа размером $\sim 20\text{--}50$ Å. Частицы выпадают в магнитноненеоднородных местах шлифа и образуют картину с хорошим разрешением

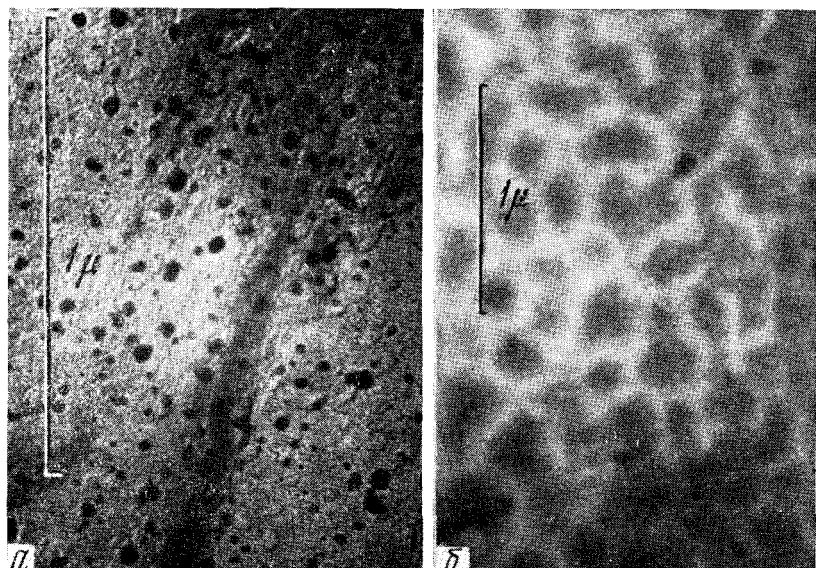


Рис. 1. Магнитные структуры на торце образцов проволоки сплава Nb — Ti — Zr, магнитное поле параллельно оси образца a — $H = 6750$ э, b — $H = 22\,200$ э

(⁸). Полученная картина фиксируется угольной репликой и изучается в электронном микроскопе УЭМВ-100.

На рис. 1 приведены примеры магнитных структур, полученных при 4,2° К в полях 6750 (а) и 22 200 э (б) на торце образцов проволоки сплава Nb — Ti — Zr, магнитное поле параллельно их длине. Проволока оптимально термообработана при ~ 400 ° С в течение 2 час. и имеет критический ток ~ 30 ампер при 4,2° К в магнитном поле, перпендикулярном длине проволоки 60 000 э (плотность тока $6 \cdot 10^4$ А / см²). Видно, что плотность выходов трубок магнитного потока уменьшается при росте внешнего магнитного поля. На рис. 1а, кроме скоплений частиц на выходах трубок потока (более крупные пятна), видны очень мелкие частицы размером 15—20 Å. При повышенном поле (рис. 1б) остаются только большие пятна, покрытые частицами. Можно думать, что мелкие частицы на рис. 1а — это исходные частицы железа, образующиеся при испарении проволоки и не притянутые в места наибольшего градиента поля при малых значениях поля намагничения. В больших полях их лет, так как все частицы железа высыпаются на выходах магнитного потока.

Знание магнитной индукции в сверхпроводнике в зависимости от внешнего поля этих образцов (⁹) позволяет оценить величину отдельного потока. Измерение числа выходов потоков на 1 см² на ряде полученных электронномикроскопических снимков в поле 6750 э дает величину 10^{10} см⁻², отдельный поток при этом близок к кванту потока. В поле 22 200 э плотность выходов потоков падает до $\sim 10^9$ см⁻², величина отдельного потока возрастает до $\sim 10^{-5}$ Гс · см², т. е. $\sim 10^2$ квантов потока.