

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 <sup>(1)</sup> 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·см<sup>2</sup> 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 <sup>(2)</sup>.

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, <sup>(3)</sup>) или полей в больших объемах. Она обладает высокими критическими магнитными полями (у Nb — Ti  $H_{k_2} = 145\,000$  э, у Nb — Zr — Ti  $H_{k_2} = 117\,000$  при 2° К) и большой плотностью критического тока в значительных магнитных полях <sup>(4)</sup>. 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 обуславливаются, 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 выпадений практически чистого ниобия, обеспечивающую развитую сверхпроводящую токонесящую систему <sup>(5-7)</sup>. 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  $\sim 1$  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 магнитнонеоднородных местах шлифа и образуют картину с хорошим разрешением

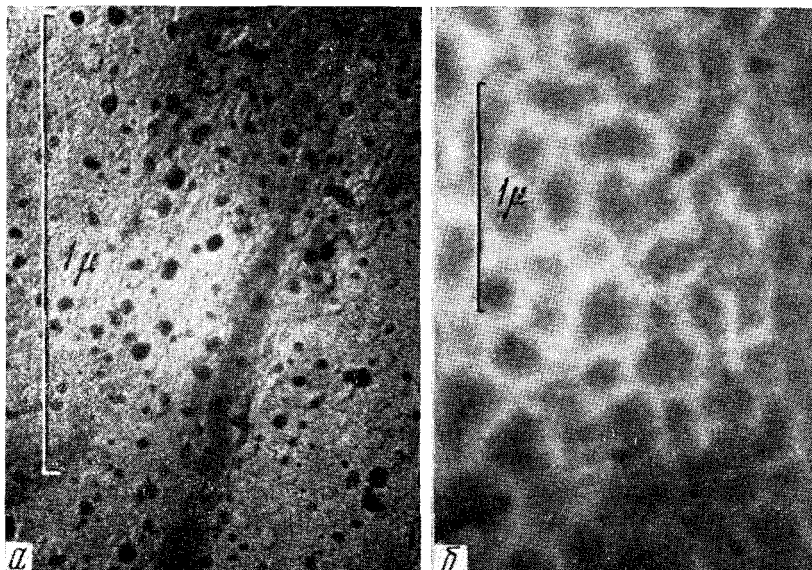


Рис. 1. Магнитные структуры на торце образцов проволоки сплава Nb — Ti — Zr, магнитное поле параллельно оси образца *a* —  $H = 6750$  э, *б* —  $H = 22\,200$  э

(<sup>8</sup>). 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 (*a*) и 22 200 э (*б*) на торце образцов проволоки сплава Nb — Ti — Zr, магнитное поле параллельно их длине. Проволока оптимально термообработана при  $\sim 400^\circ\text{C}$  в течение 2 час. и имеет критический ток  $\sim 30$  ампер при 4,2° К в магнитном поле, перпендикулярном длине проволоки 60 000 э (плотность тока  $6 \cdot 10^4$  А / см<sup>2</sup>). Видно, что плотность выходов трубок магнитного потока уменьшается при росте внешнего магнитного поля. На рис. 1*a*, кроме скоплений частиц на выходах трубок потока (более крупные пятна), видны очень мелкие частицы размером 15—20 Å. При повышенном поле (рис. 1*б*) остаются только большие пятна, покрытые частицами. Можно думать, что мелкие частицы на рис. 1*a* — это исходные частицы железа, образующиеся при испарении проволоки и не притянутые в места наибольшего градиента поля при малых значениях поля намагничивания. В больших полях их нет, так как все частицы железа высаживаются на выходах магнитного потока.

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