

ВЛИЯНИЕ СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ТРАНСПОРТНОГО ТОКА НА МИКРОПЛАСТИЧНОСТЬ ВТСП КЕРАМИКИ В ОБЛАСТИ $S \rightarrow N$ ПЕРЕХОДА

В. В. Шпейзман, Б. И. Смирнов, Н. Н. Песчанская, Л. К. Марков

Методом лазерного интерферометра исследовано влияние слабого магнитного поля и транспортного тока на скорость неупругой деформации нагруженных образцов ВТСП керамики системы $Y-Ba-Cu-O$ в области $S-N$ перехода. Установлено, что после $S \rightarrow N$ перехода независимо от способа его реализации всегда происходит уменьшение скорости деформации. Обратный $N \rightarrow S$ переход, напротив, приводит к ее увеличению. В моменты $S \leftrightarrow N$ переходов за счет резкого включения (выключения) транспортного тока наблюдаются кратковременные деформационные неустойчивости. Они отсутствуют при плавном изменении тока, а также при $S \leftrightarrow N$ переходах, вызванных магнитным полем. Предложена дислокационная модель, качественно объясняющая наблюдаемые экспериментальные результаты.

В [1-3] нами было показано, что керамики высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) обладают заметной микропластичностью при сверхпроводящем переходе наблюдается аномалия их деформационных свойств. При этом были установлены и описаны следующие основные проявления этой аномалии: существование пика в температурном спектре скоростей неупругой деформации в области критической температуры: T_c , замедление деформации при $S \rightarrow N$ переходе и ускорение ее при обратном переходе, ускорение деформации при циклически повторяющихся $S \leftrightarrow N$ переходах. Сверхпроводящее состояние в [1-3] достигалось понижением температуры до $T < T_c$, а перевод в нормальное состояние осуществлялся транспортным током j , большим критического j_c при данной температуре. В [1] приводятся также результаты контрольных опытов, показывающих, что изменение скорости деформации при воздействии током связано именно со сверхпроводящим переходом, а не с другими факторами, в частности разогревом образца. Так, если скорость неупругой деформации от нагрузкой была нулевой, то включение или выключение тока не приводило к ее появлению. Сравнение же изменений скорости при воздействии током для $T < T_c$ и $T > T_c$ показало отличие не только в величине эффекта, но и в его знаке, что доказывало решающее влияние именно $S \leftrightarrow N$ переходов на изменение скорости деформации при $T < T_c$. Изменение микропластичности ВТСП керамики при $S \rightarrow N$ переходе наблюдалось также авторами [4].

В настоящей работе приводятся новые результаты исследования скоростей малых неупругих деформаций ВТСП керамик в области $S \leftrightarrow N$ переходов при воздействии не только транспортного тока, но и слабых магнитных полей, а также рассматривается возможная дислокационная модель микропластичности.

1. Методика эксперимента

В работе исследовались керамические образцы $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ и $YBaSrCu_3O_{7-x}$, полученные из порошков Y_2O_3 , CuO , $BaCO_3$ и $SrCO_3$ и прошедшие стандартную для керамической технологии термообработку

[⁵]. Образцы изготавливали в форме прямоугольных параллелепипедов с размерами от $2 \times 2 \times 4$ до $4 \times 4 \times 8$ мм. Температура сверхпроводящего перехода T_c для различных образцов составляла 90–93 К, а электросопротивление в нормальном состоянии вблизи T_c было порядка 10^{-3} Ом·см. Критический ток в отсутствие магнитного поля для разных режимов термомеханической обработки менялся в широких пределах от 10 до 250 А/см².

Для измерения электрических характеристик и осуществления $S \rightarrow N$ перехода на образец наносились индиевые контакты: токовые — на торцевые поверхности, потенциальные — на одну из боковых поверхностей. Расстояние между потенциальными контактами составляло 1–2 мм. Магнитное поле было направлено вдоль оси образца и создавалось катушкой с током, внутри которой находился образец.

Нагружение образцов производилось путем сжатия вдоль максимального размера. Осевые напряжения σ во время опыта оставались постоянными и находились в пределах 10–30 МПа, что составляло менее половины от средних разрушающих напряжений.

Для измерения скорости $\dot{\epsilon}$ и величины ϵ относительной деформации применяли разработанное ранее устройство на основе лазерного интерферомера [¹, ⁶], которое позволяет производить прецизионное определение величины $\dot{\epsilon}$ при изменении длины образца на $\Delta l = 0.15$ мкм. Результирующая интерферограмма имела вид синусоиды, частота которой пропорциональна скорости деформации, а число периодов — величине деформации. Средняя скорость деформации, соответствующая изменению длины образца на Δl , могла быть определена в любой момент времени t .

2. Результаты опытов и их обсуждение

Влияние $S-N$ перехода, вызванного транспортным током, на микропластичность ВТСП керамики. В [¹] было показано, что если осуществлять $S \rightarrow N$ переход включением тока $j > j_c$ в момент, когда скорость неупругой деформации нагруженного образца отлична от нуля ($\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_1^S$), то вначале наблюдается остановка деформации на какое-то время, а затем деформация продолжается с некоторой скоростью $\dot{\epsilon}^N$, меньшей $\dot{\epsilon}_1^S$. При выключении же тока наблюдался обратный эффект, который также осуществлялся в две стадии — на первой происходило кратковременное резкое ускорение деформации, а затем устанавливалась скорость деформации, близкая к $\dot{\epsilon}_1^S$. В настоящей работе мы исследовали зависимость описанного эффекта от величины транспортного тока, включая область $j < j_c$. В результате было обнаружено (рис. 1), что, во-первых, эффект заметен уже с некоторого значения $j_1 < j_c$, измеренного по ВАХ при напряжении на контактах $U = 1$ мкВ; во-вторых, чем больше величина тока, тем больше наблюдаемый эффект, если его оценивать, например, по изменению скорости или по времени задержки деформации после включения тока (рис. 1). Последнее справедливо только для токов $j < j_2$, где $j_2 \approx 2j_c$. Затем влияние величины тока на скорость деформации пропадало, а при еще больших токах наблюдались эффекты, не связанные со сверхпроводящим переходом [¹].

Заметим, что быстрое изменение тока даже на сравнительно небольшую величину, как правило, вызывало эффекты, аналогичные изображенным на рис. 1. На рис. 2 показано изменение скорости деформации при ступенчатом нарастании тока и быстром его выключении. Ступенчатое возрастание тока в интервале $j_1 < j < j_2$ оказывало такое же воздействие на скорость деформации, что и один большой по величине скачок тока.

Изложенные выше и описанные в [¹, ³] результаты можно, как нам кажется, объяснить с помощью следующей модели (рис. 3). Пластические свойства поликристаллических и керамических материалов в значительной степени определяются сопротивлением границ зерен движению носи-

телей деформации, в первую очередь — дислокаций. Считается [7], что это сопротивление τ_b преодолевается за счет образования вблизи границ дислокационных скоплений, являющихся локальными концентраторами сдвиговых напряжений τ_d (рис. 3, а). В первом приближении можно считать, что сопротивление границы будет преодолено, когда суммарные напряжения $\tau_{\Sigma} = \tau + \tau_d$ (τ — внешние приложенные напряжения) окажутся равными τ_b . Подобная ситуация продемонстрирована на рис. 3, а, где штриховой линией показано распределение суммарных напряжений вблизи границы, а вертикальная линия на границе соответствует уровню τ_b .

В принципе величина τ_b может зависеть от того, в каком состоянии находится граница — нормальном или сверхпроводящем. Судя по тому, что в металлических сверхпроводниках напряжения течения в сверхпроводящем состоянии меньше, чем в нормальном [8], будет иметь место соотношение $\tau_b^S < \tau_b^N$.

Исходя из описанных представлений, рассмотрим схему (рис. 3), на которой последовательно показаны различные состояния заторможен-

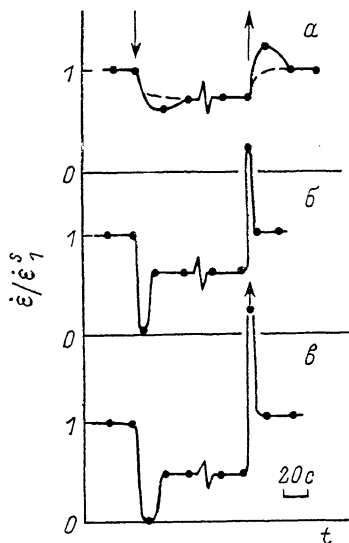


Рис. 1. Изменение скорости неупругой деформации (в относительных единицах) нагруженного образца керамики $\text{YBaSrCu}_3\text{O}_{7-x}$ при включении (\uparrow) и выключении (\downarrow) тока разной величины.

j , A/cm^2 : 12 (а), 21 (б), 30 (в). $T=77$ К, $\sigma=12$ МПа, $j_c=13.5$ A/cm^2 . Штрихами на рис. 1, а показано наблюдавшееся на некоторых образцах плавное изменение скорости $\dot{\epsilon}$. $\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_1^S \approx 4$ для точки со стрелкой.

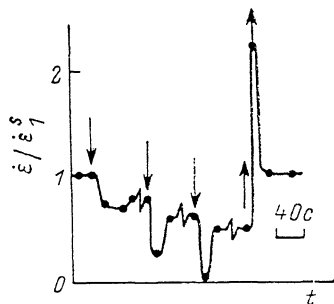


Рис. 2. Изменение отношения $\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_1^S$ при ступенчатом нарастании тока и быстром его выключении.

Материал, температура опыта, напряжения σ и значения плотности тока j те же, что и на рис. 1.

ного границей дислокационного скопления, когда данный участок границы находится в S -состоянии (а), сразу после $S \rightarrow N$ перехода (б), в N -состоянии (в) и сразу после обратного $N \rightarrow S$ перехода (г). На рис. 3, а изображено некоторое равновесное положение, соответствующее равенству $\tau_{\Sigma}^S = \tau_b^S$ и отвечающее скорости неупругой деформации $\dot{\epsilon}_1^S$. В момент $S \rightarrow N$ перехода (включение тока) сопротивление границы резко возрастает до величины $\tau_{\Sigma}^N > \tau_b^S$ (рис. 3, б) и деформация резко замедляется ($\dot{\epsilon}^{SN} \ll \dot{\epsilon}_1^S$). Такая ситуация сохраняется до тех пор, пока источник дислокаций не восстановит равенство $\tau_{\Sigma}^N = \tau_b^N$ (рис. 3, в), соответствующее N -состоянию и скорости неупругой деформации $\dot{\epsilon}^N < \dot{\epsilon}_1^S$. Наконец, в момент $N \rightarrow S$ перехода (выключение тока) сопротивление границы резко уменьшается до $\tau_b^S < \tau_{\Sigma}^N$ (рис. 3, г), а избыток головных дислокаций быстро преодолевает границу, что дает резкий скачок скорости деформации ($\dot{\epsilon}^{NS} \gg \dot{\epsilon}^N$). В дальнейшем происходит восстановление первоначальной ситуации $\tau_{\Sigma}^S = \tau_b^S$ (рис. 3, а) и соответствующей скорости $\dot{\epsilon}_2^S = \dot{\epsilon}_1^S$.

Очевидно, что описанное выше изменение скорости деформации в моменты $S \leftrightarrow N$ переходов должно быть чувствительно к изменению соотношения между скоростью нарастания тока и возможностью изменить дислокаций реагировать на это изменение. Экспериментально это можно проверить, если сравнивать деформационные эффекты при различных скоростях изменения величины тока. На рис. 4 приведены результаты эксперимента с постепенным увеличением и уменьшением тока (соответственно со скоростью 0.5 и 0.2 А/см²·с). Видно, что при плавном изменении величины тока эффекты резкого изменения скорости деформации при $S \leftrightarrow N$ переходах отсутствуют.

Таким образом, наблюдаемые экспериментальные эффекты изменения скорости неупругой деформации нагруженной ВТСП керамики в моменты $S \leftrightarrow N$ переходов находят качественное объяснение в рамках предложенной модели. Естественно, что описанная схема является достаточно условной и конкретные механизмы деформации могут быть различными,

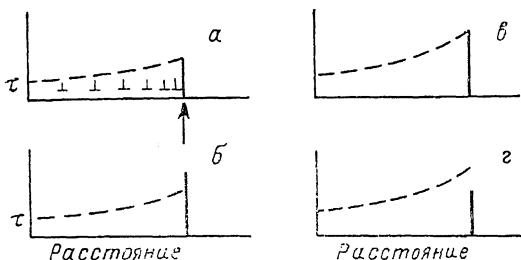


Рис. 3. Дислокационная модель распространения деформации в соседнее зерно через границу зерна (отмечена стрелкой), находящуюся в сверхпроводящем (а) и нормальном (б) состояниях, а также в момент $S \rightarrow N$ (б) и $N \rightarrow S$ (в) переходов.

Вертикальная линия на границе зерна соответствует величине τ_b . Штриховая кривая показывает распределение напряжений τ_z вблизи границы.

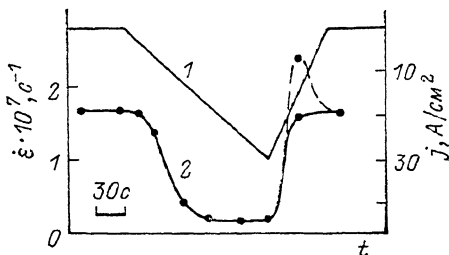


Рис. 4. Изменение скорости деформации (2) при плавном возрастании и убывании плотности тока (1) в образце керамики $YBaSrCu_3O_{7-x}$. $T=77$ К, $\tau = 12$ МПа, $j_c = 13.5$ А/см².

в частности при движении или пересечении двойниковых границ скопления будут составлять из двойникующих дислокаций.

Остановимся теперь кратко на обнаруженной зависимости изменения скорости деформации при включении или выключении тока от его величины. Заметим, что для металлических сверхпроводников I рода при разрушении сверхпроводящего состояния магнитным полем диаграмма нагружения реагирует исключительно на сам переход и величина эффекта $\Delta\tau_{SN}$ не зависит от начального H_1 и конечного H_2 значений напряженности магнитного поля [8]. Для получения скачка на кривой деформации достаточно реализации соотношения $H_1 < H_c < H_2$, где H_c — критическое поле. Однако для сверхпроводников II рода (металлов с примесями и сплавов) величина скачка $\Delta\tau_{SN}$ уже зависит от напряженности магнитного поля, причем эта зависимость появляется при $H_2 > H_{c1} > H_1$, близка к линейной в области $H_{c1} < H_2 < H_{c2}$ и обусловлена увеличением доли нормальной фазы по мере увеличения поля H_2 . Поскольку исследованная нами керамика является сверхпроводником II рода и $S \leftrightarrow N$ переходы в ней являются размытыми, то этим можно, по-видимому, объяснить наблюдаемую в наших опытах зависимость изменения скорости деформации при переходах от величины вызвавшего переход тока.

В заключение заметим, что наличие обсуждаемого эффекта при токах, слегка меньших критического, возможно, связано с условностью измерения j_c по появлению напряжения на контактах в центральной части образца $U=1$ мкВ. Поскольку начальная часть ВАХ имеет очень малый наклон к оси j , то можно полагать, что это напряжение отлично от нуля и в некоторой области ниже определенного нами j_c . Однако причины снижения порога чувствительности скорости деформации к току до мень-

ших, чем j_c , значений могут быть и более глубокими, о чем будет сказано ниже.

Влияние $S-N$ перехода, вызванного магнитным полем, на микропластичность ВТСП керамики. Поскольку критические поля для достижения $S \rightarrow N$ перехода в высокотемпературных сверхпроводниках достаточно велики, то осуществление прямого опыта, в котором исследовалась бы деформация в магнитном поле с $H > H_{c2}$, вызывает определенные экспериментальные трудности. Конечно, повышая температуру, можно было бы приблизиться к T_c и тем самым уменьшить H_{c2} , но тогда возросли бы трудности, связанные с необходимостью очень точного поддержания постоянства температуры. Мы пошли по другому пути. Известно [9, 10], что в ВТСП существует очень сильная зависимость j_c и ВАХ от напряженности магнитного поля уже в слабых магнитных полях. Поэтому нетрудно подобрать ток такой

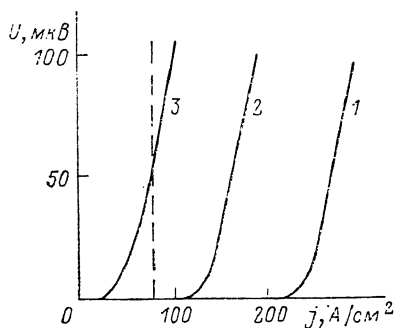


Рис. 5. Вольт-амперные характеристики керамики $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ в отсутствие магнитного поля (1) и в слабых магнитных полях $H=25$ (2) и 50 Э (3).

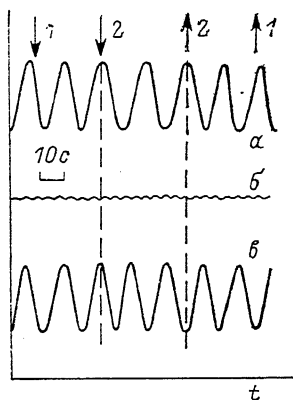


Рис. 6. Интерферограммы, полученные при деформации керамики $YBa_2Cu_3O_{7-x}$.

Стрелками обозначены моменты включения (\downarrow) и выключения (\uparrow) тока (1) $J=80$ А/см² и магнитного поля (2) $H=50$ Э (см. рис. 5).
Условия опыта: а — $\sigma=26$ МПа, $T=77$ К; б — 13, 77; в — 26, 100.

величины $j < j_c$, чтобы небольшое магнитное поле разрушало сверхпроводящее состояние образца.

На практике эксперимент проводился таким образом, что вначале включался ток через образец, а затем уже добавлялось магнитное поле. Обратный переход осуществлялся выключением поля. Опыты проводились при температуре 77 К. Для того чтобы избежать возможного изменения температуры образца в момент включения поля, магнитная катушка была выполнена из двух одинаковых обмоток, ток в которых первоначально имел противоположное направление ($H=0$), а включение поля создавалось изменением направления тока в одной из обмоток. Как было показано в [11], для ВТСП керамик влияние направления поля по отношению к току не сказывается сколько-нибудь существенно на ВАХ в магнитном поле. Поэтому для облегчения проведения опытов с деформацией в поле в нашем случае поле было направлено параллельно току.

На рис. 5 приведены ВАХ исследуемой керамики $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ в слабых магнитных полях при 77 К, на основании которых был выбран конкретный режим испытаний: $j=80$ А/см², $H=50$ Э. Опыты, результаты которых приведены на рис. 6, а и 7, а, проводились следующим образом. Сначала образец нагружали до $\sigma=26$ МПа при $T=77$ К и фиксировали некоторую скорость деформации $\dot{\epsilon}_1^S$; затем включали ток $j=80$ А/см², заметно меньший критического, что не вызывало каких-либо изменений $\dot{\epsilon}_1^S$; наконец, переключением полярности тока в одной из обмоток катушки

создавали магнитное поле, которое при данном токе разрушало сверхпроводящее состояние. Как видно из рис. 6, а и 7, а, скорость неупругой деформации при этом уменьшалась. При выключении поля скорость деформации, напротив, возрастала. При этом следует особо подчеркнуть отсутствие кратковременных резких изменений $\dot{\epsilon}$ в момент $S \leftrightarrow N$ переходов, наблюдавшихся в опытах с разрушением сверхпроводящего состояния током. Заметим, что точное совпадение начальной скорости $\dot{\epsilon}_1^S$ и скорости последовательных $S \rightarrow N$ и $N \rightarrow S$ переходов $\dot{\epsilon}_2^S$ при любом способе их реализации происходило редко, что, вероятно, можно объяснить свойствами самой деформации керамики, которая протекает крайне неравномерно. Однако характер изменения скоростей деформации, описанный выше, прослеживается отчетливо.

Для того чтобы убедиться в том, что изменения скорости деформации связаны именно со сверхпроводящим переходом, были проделаны контрольные опыты, аналогичные сделанным в [1] и повторенным в [4] при обсуждении влияния на деформацию $S-N$ перехода под действием транспортного тока. При этом, во-первых, оказалось (рис. 6, б), что если скорость деформации нагруженного образца при 77 К равна нулю, то включение и выключение поля не вызывает деформации. Во-вторых, было показано (рис. 6, в), что при $T > T_c$, т. е. в нормальном состоянии, интерферограмма не реагирует на включение и выключение магнитного поля (скорость неупругой деформации остается неизменной).

На рис. 7, б приведены результаты опытов, которые отличались от описанных выше (рис. 7, а) лишь очередностью включения транспортного тока и магнитного поля, а именно вначале включалось поле, а разрушение сверхпроводящего состояния осуществлялось током. Как видно из сравнения рис. 1, б и 7, б, добавление слабого магнитного поля не повлияло на характер изменения $\dot{\epsilon}$ при токовых $S \leftrightarrow N$ переходах. В то же время поведение скорости деформации в момент $S \leftrightarrow N$ переходов на рис. 7, а и 7, б принципиально отличается. Как уже отмечалось, в случае разрушения (восстановления) сверхпроводящего состояния магнитным полем изменение $\dot{\epsilon}$ происходит плавно. Подобная же картина наблюдается и при $S \leftrightarrow N$ переходах под действием медленно изменяющегося тока (рис. 4).

Такое различное воздействие транспортного тока и магнитного поля, казалось бы, можно объяснить более медленным проникновением поля в сверхпроводник и, как следствие, размыванием переходных процессов в изменении $\dot{\epsilon}$ на большое время. Однако если судить о проникновении поля по напряжению на потенциальных контактах при одновременном воздействии тока и магнитного поля, то напряжение при любой очередности включения тока и поля устанавливается за время, значительно меньшее длительности аномалий в скорости деформации. В то же время можно полагать, что из-за структурной неоднородности существуют различные пути проникновения магнитного поля в образец со своими характерными временами (временами релаксации). Электрические свойства определяются сравнительно быстрыми процессами, поэтому при изменении очередности включения тока и поля мы приходим практически в одну и ту же точку ВАХ. Если же учесть, что измеряемая средняя деформация всего образца определяется большим (по сравнению с током) числом мест, в которых она развивается, т. е. в их число входят и такие, куда поле проникает за достаточно большое время, то этим можно объяснить,

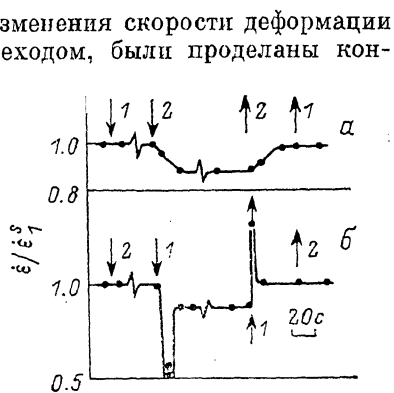


Рис. 7. Изменение скорости деформации нагруженного образца при одновременном действии магнитного поля и транспортного тока.

Обозначения соответствуют рис. 6, а. $\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_1^S \approx 2$ для точки со стрелкой.

почему при воздействии магнитным полем отсутствуют этапы быстрой деформации при $N \rightarrow S$ и остановки при $S \rightarrow N$ переходах. Отмеченное различие в уровнях локализации деформации и тока может быть причиной появления деформационных эффектов при $j \lesssim j_c$.

Таким образом, можно считать установленным, что перевод керамики в N -состояние при ее первоначальном деформировании в S -состоянии в условиях постоянства механических напряжений и температуры $T < T_c$ всегда приводит к уменьшению скорости деформации $\dot{\epsilon}$ независимо от способа реализации $S \rightarrow N$ перехода. Обратный $N \rightarrow S$ переход приводит к увеличению $\dot{\epsilon}$.

При $S \leftrightarrow N$ переходах, вызванных магнитным полем или медленным нарастанием (убыванием) транспортного тока, изменение скорости деформации происходит плавно. При резком включении или выключении тока дополнительно наблюдаются кратковременные эффекты соответственно резкого замедления или ускорения деформации с последующим выходом на некоторое значение скорости, близкое к измеренному при плавном изменении тока.

Наблюдаемые экспериментально деформационные эффекты находят качественное объяснение на основе дислокационной модели, учитывающей изменение при $S \leftrightarrow N$ переходах сопротивления межзеренных границ движению дислокаций, образующих заторможенные скопления на этих границах.

Настоящая работа выполнена в рамках проекта № 90156 «Магнэль» Государственной программы по высокотемпературной сверхпроводимости.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Песчанская Н. Н., Смирнов Б. И., Шпейзман В. В., Якушев П. Н. // ФТТ. 1988. Т. 30. № 11. С. 3503—3506.
- [2] Песчанская Н. Н., Смирнов Б. И., Степанов Ю. П., Шпейзман В. В., Якушев П. Н. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 4. С. 271—273.
- [3] Песчанская Н. Н., Смирнов Б. И., Шпейзман В. В. // ФТТ. 1989. Т. 31. № 8. С. 292—294.
- [4] Солдагов В. П., Нацик В. Д., Чайковская Н. М. // ФТТ. 1991. Т. 32. № 6. С. 1777—1783.
- [5] Shpeizman V. V., Orlova T. S., Smirnov B. I., Markov L. K., Engert J., Kaufmann H.-J., Rudolf K., Matz W. // Cryst. Res. Technol. 1990. V. 25. N 7. P. 827—831.
- [6] Песчанская Н. Н., Пугачев Г. С., Якушев П. Н. // Механика полимеров. 1977. № 2. С. 357—358.
- [7] Stroh A. N. // Adv. Phys. 1957. V. 6. N 24. P. 418—465.
- [8] Старцев В. И., Ильичев В. Я., Пустовалов В. В. Пластичность и прочность металлов и сплавов при низких температурах. М.: Металлургия, 1975. 328 с.
- [9] Kostorz G. // Acta Met. 1973. V. 21. N 6. P. 813—820.
- [10] Meisels R., Bungre S., Caplin A. D. // J. Less-Common Metals. 1989. V. 151. N 1/2. P. 83—88.
- [11] Evetts J. E., Glowaski V. A. // Cryogenics. 1988. V. 28. N 10. P. 641—649.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Поступило в Редакцию
12 марта 1991 г.