

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР им. Б. И. ВЕРКИНА

На правах рукописи

ДОЦЕНКО Владимир Иванович

УДК 537.3;538.9;539.3

СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ  
В СВЕРХПРОВОДНИКАХ ВТОРОГО РОДА

01.04.07. - физика твердого тела

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Харьков - 1993

115 20.01.93

Работа выполнена в Физико-техническом институте низких температур им. Б. И. Веркина АН Украины.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Тихинский Г. Ф.  
(ХФТИ АН Украины, г. Харьков)

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00810581 (N)

доктор физико-математических наук,  
профессор Филь В. Д.  
(ФТИНТ АН Украины, г. Харьков)

доктор физико-математических наук,  
профессор Лебедев В. П.  
(ХГУ, г. Харьков)

Ведущая организация: Донецкий физико-технический институт  
АН Украины, г. Донецк

Защита состоится " 7 " *декабря* 1993 г. в \_\_\_\_\_ часов на  
заседании специализированного совета Д 016.27.01 при Физико-тех-  
ническом институте низких температур АН Украины, 310164, Харьков,  
пр. Ленина 47.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИНТ АН  
Украины.

Автореферат разослан " 4 " *ноября* 1993 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета  
кандидат физ.- мат. наук

Е. Ш. Хацько

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. История развития физики убедительно демонстрирует, что многие важные результаты получены на стыках таких ее направлений, которые на первый взгляд представляются мало связанными друг с другом. Наглядным подтверждением этому является совокупность специфических явлений, наблюдающихся в нагруженных или деформируемых сверхпроводниках, которая отражает связь электромагнитных и деформационных процессов и объединена под общим названием деформационные эффекты в сверхпроводниках. К этим явлениям несомненно следует отнести эффект пластификации сверхпроводников при сверхпроводящем переходе, открытие которого дало мощный импульс развитию теоретических представлений о взаимодействии подвижных дислокаций с электронной подсистемой в частности и с элементарными возбуждениями вообще. В результате появился ряд работ, где предложены модели, учитывающие роль вязкости в преодолении дислокациями локальных барьеров. Основными среди этих моделей являются инерционная, термофлуктуационная и термоинерционная. В экспериментальном плане к моменту начала исследований, представленных в настоящей работе, в основном было закончено накопление первичных результатов и были установлены главные закономерности эффекта пластификации (влияние температуры, степени деформации, скорости деформирования) и его проявления в различных режимах деформирования (активная деформация с постоянной скоростью, ползучесть, релаксация напряжений). Эти данные в подавляющем большинстве случаев были получены на чистых пластичных металлах (свинец, индий, олово), являющихся сверхпроводниками первого рода. Чрезвычайно важным представляется распространение таких исследований на более широкий класс материалов, в частности на сверхпроводники второго рода и сверхпроводящие композиты. Эти эксперименты открывают ряд новых возмож-

ностей и перспектив. Например, исследование пластичности сверхпроводников второго рода в смешанном состоянии позволяет регулировать относительную долю нормальной и сверхпроводящей фаз, что дает возможность наблюдать тонкие эффекты взаимодействия подвижных дислокаций с вихревой структурой магнитного потока. Что касается сверхпроводящих композитов, то в первую очередь интерес к ним обусловлен практическими потребностями, т.к. они являются основой быстро развивающегося в последнее время сверхпроводникового электромашиностроения. Необходимо отметить, что здесь круг задач значительно шире, причем он определяется тем обстоятельством, что в процессе эксплуатации сверхпроводящих магнитных систем в них развиваются большие механические напряжения различной природы. Тремя главными источниками напряжений являются:

1. Растягивающие и изгибные деформации при намотке магнита.
2. Термически введенные деформации при захолаживании до криогенной температуры эксплуатации, возникающие в результате различий коэффициентов теплового расширения, как между компонентами самого сверхпроводящего композита, так и между элементами сверхпроводящей магнитной системы.
3. Пондеромоторные силы, действующие на проводник с током во внешнем магнитном поле. Например, виток радиусом 10 см с плотностью тока  $3 \cdot 10^5$  А/см<sup>2</sup> в поле 5 Тл испытывает напряжение 50 кг/мм<sup>2</sup>. Эта величина превышает предел текучести меди и близка к пределу прочности сверхпроводящих сплавов Nb-Ti и интерметаллидов группы А15.

Такие большие механические напряжения, во-первых, вызывают необходимость исследования пластических и прочностных свойств сверхпроводящих композитов при температуре эксплуатации и поиска путей повышения этих свойств.

Во-вторых, статические механические нагрузки могут вызы-

вать значительные изменения основных сверхпроводящих характеристик композитов.

Наконец, в-третьих, релаксация указанных напряжений может приводить к динамическим деформационным эффектам, сопровождающимся тепловыделениями стационарного и импульсного характера, которые вызывают неустойчивости сверхпроводящего состояния и обуславливают деградацию токонесущей способности композитов.

Следует отметить, что эти вопросы далеки от окончательного решения, особенно остро ощущается отсутствие комплексных работ, где с единых позиций исследовался бы весь круг указанных проблем.

Цель исследований. Целью настоящей работы является: изучение эффекта пластификации в мягких и жестких сверхпроводниках второго рода, включая сверхпроводящие композиты; изучение влияния концентрации и морфологии нормальной фазы на деформирующее напряжение сверхпроводников в смешанном состоянии; исследование пластических и прочностных свойств новых типов сверхпроводящих композитов в широком интервале температур (4,2-300K); исследование влияния статических нагрузок при деформациях различного типа на критические параметры сверхпроводящих композитов; изучение устойчивости сверхпроводящего состояния к различным внешним возмущениям (пластическая деформация, внешнее трение, растрескивание и отслаивание компаунда); моделирование процессов тренировки сверхпроводящих магнитных систем.

Научная новизна работы определяется тем, что полученные в ней результаты расширяют и углубляют представления о электронном торможении дислокаций и связи электромагнитных и деформационных процессов в сверхпроводниках. Подавляющее число результатов получено впервые:

1. Показано, что наличие захваченного магнитного потока приводит к значительным погрешностям при определении величины эффекта пластификации при сверхпроводящем переходе. Указаны и продемонстрированы способы учета этих погрешностей.
2. При изучении эффекта пластификации в смешанном состоянии сверхпроводников второго рода показано, что существует сопоставимость характерного размера областей нормальной фазы и активационной площади при термоактивированной пластической деформации. Это обстоятельство не позволяет использовать для анализа полученных данных теоретические представления основанные на простом усреднении подвижности дислокаций в нормальной и сверхпроводящей фазах.
3. Изучен эффект пластификации при сверхпроводящем переходе в композитах и обнаружено проявление эффекта близости.
4. В широком температурном интервале изучены механические свойства нового типа *in situ* композитов медь-ниобий.
5. Исследованы статические деформационные эффекты в модельных и промышленных сверхпроводящих композитах и обнаружена аномально высокая чувствительность к нагрузке температуры сверхпроводящего перехода и второго критического поля.
6. Установлен и изучен спектр механических возмущений, вызывающих неустойчивости сверхпроводящего состояния в сверхпроводящих композитах.
7. Промоделирован и изучен механизм тренировки сверхпроводящих магнитных систем.

Практическая значимость работы. Результаты сформулированные в пунктах 5-7 определяют практическую ценность работы, т.к. они могут быть использованы для обеспечения конструкторских разработок сверхпроводящих магнитных систем. Это связано с тем, что

конструкция магнитной системы, ее эффективность и стоимость в значительной мере определяются необходимостью обеспечения достаточного запаса устойчивости к возникающим в процессе эксплуатации возмущениям. В работе установлены элементарные физико - механические процессы, связанные с пластической деформацией, внешним трением и компаундированием, которые в реальной магнитной системе могут стать источниками возмущений сверхпроводящего состояния, механизмы возникновения и развития этих возмущений, а также их уровень. Это, с одной стороны дает ключ к поиску путей их устранения, а с другой - позволяет заложить при конструировании оптимальный запас устойчивости, т.е. способствует наиболее эффективному использованию преимуществ сверхпроводников при создании магнитных систем.

#### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ, ВНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. При циклической смене состояния с помощью магнитного поля в процессе деформирования сверхпроводников второго рода наблюдается существенный захват магнитного потока, величина которого зависит от деформации, температуры, концентрации и состояния примеси. Полученные без учета захваченного потока данные о эффекте пластификации при сверхпроводящем переходе в ряде случаев содержат большую погрешность в величине эффекта, а характер ее зависимостей от различных параметров не адекватен истинной картине явления.
2. Различие в зависимости деформирующего напряжения от концентрации нормальной фазы в сверхпроводниках первого и второго рода обусловлено морфологией нормальной фазы. В частности, сопоставимость характерного размера вихря магнитного потока в сверхпроводнике второго рода с длиной дислокационного сегмента, определяющей элементарный акт пластической деформации, не позволяет использовать имеющиеся теоретические представления о зави-

симости деформирующего напряжения от концентрации нормальной фазы, которые основаны на учете количества элементарных актов пластической деформации, совершающихся в нормальной и сверхпроводящей фазах соответственно.

3. Наблюдение эффекта пластификации в сверхпроводящих композитах на стадии упругой деформации сверхпроводящей армирующей фазы и пластической деформации несверхпроводящей матрицы является свидетельством проявления эффекта близости.
4. Подавление скачкообразной пластической деформации в сверхпроводящем состоянии подтверждает гипотезу о термомеханической природе неустойчивости пластического течения и отражает то обстоятельство, что в сверхпроводящем состоянии повышение температуры может приводить к уменьшению скорости пластической деформации за счет возрастания вязкости, обусловленного увеличением доли нормальных электронов.
5. Вся совокупность пластических и прочностных свойств *in situ* композитов определяется дисперсностью структурных составляющих и не зависит от угла между направлением армирования и осью растяжения, что подтверждает гипотезу о природе аномально высокой прочности этого класса композитов, согласно которой их прочность определяется рекордно высокой плотностью дислокаций в обеих фазах, обусловленной наличием большого числа межфазных границ.
6. Аномально высокие значения второго критического поля, а также чувствительности второго критического поля и критической температуры сверхпроводящих композитов к нагрузке определяются их дефектной структурой, основным мотивом которой является ячеистая дислокационная структура, и деформационно стимулированными структурными превращениями.
7. Механические возмущения при пластической деформации, внешнем

тренинги, растрескивании и отслаивании компаунда вызывают неустойчивости сверхпроводящего состояния в композитах, проявляющиеся в скачках магнитного потока, а также возникновении и распространении макроскопических нормальных зон, динамика которых определяется степенью локализации, инициировавших их тепловыделений.

8. С помощью тренировки можно устранить только ту часть деградации токонесущей способности, которая обусловлена исчерпывающимися при нагружении возмущениями (отслаивание компаунда от композита, растрескивание компаунда или армирующей фазы). Другая часть деградации, обусловленная возмущениями при пластической деформации, в силу сложного упруго-пластического поведения компонент композита, связанного с термически введенными напряжениями и деформационно стимулированными структурными превращениями, может быть устранена тренировкой лишь частично.

Апробация работы. Основные результаты и положения, вошедшие в настоящую работу доложены и обсуждены на следующих конференциях: 2-5 Школа по физике пластичности и прочности (Харьков, 1981г. 1984г., 1987г., 1990г.); Всесоюзная конференция "Механизмы релаксационных явлений в твердых телах"-Каунас, 1974г.; 4-th Intern. Conf. on the Strength of Metals and Alloys, Nancy, 1977; Всесоюзный семинар "Роль электронов проводимости в пластичности металлов"-Звенигород, 1981; X и XI Всесоюзные конференции по физике пластичности и прочности, Куйбышев, 1983, 1990; Всесоюзная конференция "Металлофизика сверхпроводников"-Киев, 1986; 11 Всесоюзная конференция "Прочность материалов и конструкций при низких температурах"-Житомир, 1986; 1 и 11 Всесоюзные конференции "Действие электромагнитных полей на пластичность и прочность металлов и сплавов"-Юрмала, 1987, 1989.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, приложения и списка цитированной литературы. Объем работы составляет 201 страницу, включая 103 рисунка и 10 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность выбранного направления исследований; определяется его цель; характеризуется новизна и практическая значимость работы; формулируются основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе описаны объекты исследования и экспериментальные методики, использованные при выполнении работы. Исследование особенностей эффекта пластификации в сверхпроводниках второго рода проводилось в основном на сплавах свинца - Pb-In, Pb-Bi, Pb-Sn, Pb-Cd, Pb-Ni. Сплавы в области твердого раствора исследовались в отожженном при предплавиных температурах состоянии. Пересыщенные твердые растворы изучались как в закаленном состоянии, что позволяло фиксировать твердый раствор, так и после старения, позволяющего регулировать содержание второй фазы. Влияние нагрузок и деформаций на критические параметры сверхпроводников и устойчивость сверхпроводящего состояния к механическим возмущениям различной природы исследовались на сверхпроводящих композитах. Использовались композиты трех типов: полученные прокаткой или волочением, так называемые *in situ* композиты медь-ниобий; промышленные сверхпроводящие многожильные композиты на основе сплава ниобий-титан HT-50; полупромышленные композиты на основе станнида ниобия Nb<sub>3</sub>Sn, полученные по бронзовой технологии.

Часть использованных экспериментальных методик являлась

модификацией стандартных низкотемпературных методик исследования физико-механических свойств материалов. К этим методикам относятся: исследование пластичности и прочности, получение и стабилизация низких температур, фрактография, резистометрия и т.д. Среди новых методических решений, разработанных специально для выполнения настоящей работы, следует отметить оригинальную методику комплексного исследования неустойчивостей сверхпроводящего состояния в процессе пластической деформации, внешнего трения или отслаивания и растрескивания эпоксидного компаунда. Эта методика позволяет фиксировать чрезвычайно малые быстропротекающие возмущения, в частности, динамику нормальных зон, инициированных механическими эффектами.

Во второй главе приводятся данные по исследованию, обнаруженного в настоящей работе, влияния захваченного магнитного потока на эффект пластификации при сверхпроводящем переходе. Наличие захваченного потока, в рамках обычно применяемой для исследования эффекта пластификации методики многократного разрушения сверхпроводимости магнитным полем, означает, что сверхпроводящие переходы реализуются не во всем образце, а лишь в его части. Это приводит к тому, что измеряемая величина эффекта пластификации оказывается заниженной. В работе предложены два метода получения истинной величины эффекта, один из которых заключается в измерении величины захваченного потока, определении доли образца, которая претерпевает сверхпроводящий переход, и коррекции измеренной величины в предположении о линейной зависимости величины эффекта от концентрации нормальной фазы. Второй метод основан на том, что первое включение поля позволяет осуществить полный переход образца из сверхпроводящего состояния в нормальное, т.е. однократно можно получить истинную величину эффекта. Эту ситуацию можно многократно воспроизводить с помощью отогрева образца выше температуры сверх-

проводящего перехода, удаляя при этом ранее введенный захваченный поток. К сожалению эту методику можно применять только при активной деформации, так как в процессе ползучести и релаксации напряжений экспериментально наблюдаемый эффект реализуется только при выключении поля, т. е. при переводе образца из нормального состояния в сверхпроводящее.

Использование указанных методов позволило уточнить или даже пересмотреть ряд полученных ранее зависимостей величины скачка деформирующего напряжения при сверхпроводящем переходе ( $\Delta B_{n, S}$ ) от различных параметров. Так, в ряде случаев, измеренная величина  $\Delta B_{n, S}$  уменьшается с деформацией, в то время как исправленная растет. Еще более кардинальные изменения претерпевает концентрационная зависимость величины эффекта. Ранее в нескольких работах был обнаружен минимум на этой зависимости при концентрации примеси около 2 ат.%, что рассматривалось как свидетельство перехода от термофлуктуационного к инерционному механизму эффекта пластификации. Однако, как показано в настоящей работе, этот минимум связан с тем, что вблизи этой концентрации сплавы на основе свинца становятся сверхпроводниками второго рода и появляется захваченный магнитный поток. На истинной концентрационной зависимости наблюдается монотонный рост величины эффекта при увеличении концентрации примеси. Состаренные сплавы, в которых имеются выделения нормальной фазы - эффективные центры пиннинга - обнаруживают наибольшую величину захваченного потока, достигающую 85 %. Поэтому измеренная величина  $\Delta B_{n, S}$  здесь чрезвычайно мала. Однако истинная величина  $\Delta B_{n, S}$  совпадает с соответствующими данными для закаленного сплава, где выделения второй фазы отсутствуют и захват потока является лишь при больших степенях деформации.

При исследовании влияния температуры на захват потока и эффект пластификации в сплавах свинец-олово показано, что при на-

личии выделений второй фазы величина захваченного магнитного потока растет с понижением температуры пропорционально второму критическому полю. Это означает, что доля образца, претерпевающая сверхпроводящий переход, не зависит от температуры. Коррекция температурной зависимости величины эффекта пластификации, сводящаяся в этом случае к простой перенормировке измеренных данных, приводит к единой универсальной зависимости для всех сплавов. В сплавах без выделений захваченный поток появляется при температуре ниже критической и больших степенях деформации, причем он очень быстро растет с понижением температуры, что свидетельствует о термоактивируемом характере преодоления созданных в процессе деформации центров пиннинга. Последнее подтверждается также поведением захваченного потока в процессе деформации. При большой скорости деформации захваченный поток удаляется из образца за время порядка 10 сек, а при малой - за это же время заметных изменений в его величине не наблюдается, что связано с различием в мощности тепловыделений в процессе деформации с разными скоростями. Сильная температурная зависимость величины захваченного потока приводит в этом случае к появлению максимума на температурной зависимости измеренной величины эффекта пластификации, который исчезает при коррекции.

В третьей главе приведены данные по исследованию эффекта пластификации сверхпроводников второго рода в смешанном состоянии. Эксперименты проводились на сплавах свинца с одновременным контролем магнитной индукции для учета возможного захваченного потока. Оказалось, что величина скачка деформирующего напряжения нелинейно связана с концентрацией нормальной фазы ( $c_n$ ) - наблюдается инверсия этой зависимости относительно линии прямой пропорциональности при  $c_n \sim 0,7$ . Анализ существующих по этому вопросу теоретических представлений позволил указать на их непереносимость для объяснения по-

лученных данных. Это связано с тем, что при выводе соответствующих зависимостей предполагалось соответствие концентрации нормальной фазы и относительной доли элементарных актов пластической деформации, совершающейся в этой фазе. Это предположение справедливо только в том случае, если размеры нормальных областей превышают характерные длины дислокационных сегментов, которые определяют элементарный акт при термоактивируемой пластической деформации. Между тем в реальной ситуации эти размеры соизмеримы и это приводит к тому, что при движении дислокации через сетку локальных препятствий и вихрей магнитного потока при небольших концентрациях нормальной фазы лишь отдельные части дислокационного сегмента находятся в ядре вихря потока, где только в центре достигается истинно нормальное состояние. Качественное рассмотрение позволяет предположить, что сопротивление движению дислокаций в такой структуре будет меньше, чем в случае когда относительная часть сегментов, равная  $c_n$ , полностью находилась бы в нормальной фазе. При больших концентрациях нормальной фазы вихри перекрываются и магнитная структура смешанного состояния совершенно иная. В этом случае все дислокационные сегменты находятся в среде с переменной вязкостью, которая, однако, близка к вязкости в нормальном состоянии. По аналогии с первым предельным случаем можно полагать, что здесь сопротивление движению дислокаций будет больше, чем в случае, когда относительная часть сегментов, равная  $(1-c_n)$ , полностью находилась бы в сверхпроводящем состоянии. Указанные рассуждения позволяют объяснить инверсию относительно линии прямой пропорциональности зависимости величины эффекта от концентрации нормальной фазы.

Привлекательна возможность проверки приведенных соображений путем изменения соотношения между характерными размерами фаз в сверхпроводнике и длинами дислокационных сегментов. Реализовать эту возможность удалось при изучении сверхпроводников первого рода

в промежуточном состоянии, где характерные размеры фаз могут быть намного больше. Оказалось, что в этом случае инверсии действительно нет.

Кроме того в этой главе приведены результаты изучения возможности устранения захваченного потока с помощью обратного поля, что было бы удобным способом получения истинной величины эффекта пластификации при сверхпроводящем переходе. Оказалось, что при нулевой средней индукции деформирующее напряжение не достигает уровня соответствующего сверхпроводящему состоянию. Это связано с существованием в образце согласно модели критического состояния разнонаправленных магнитных потоков.

Четвертая глава посвящена исследованию низкотемпературной пластичности и прочности нового класса материалов, так называемых *in situ* композитов. Эти материалы, которые получают прокаткой или волочением гетерофазных сплавов, обладают рядом преимуществ по сравнению с искусственными композитами и в последнее время находят применение как непосредственно в качестве высокопрочного проводникового материала, так и в качестве основы для изготовления сверхпроводящих композитов.

В работе исследовались сплавы медь-ниобий в виде плоских образцов (прокатка) и проволочные образцы (волочение). Плоские образцы выштамповывались из прокатанного листа, так что ось растяжения образовывала с направлением армирования углы  $\theta$  равные 0, 45 и 90°. Оказалось, что механические свойства этих образцов, изученные в интервале температур 2 - 300 К, не зависят от угла  $\theta$ . Этот результат свидетельствует о кардинальном отличии *in situ* композитов от искусственных композитов, где при  $\theta = 45^\circ$  наблюдается глубокий минимум прочностных характеристик, связанный с тем, что при такой ориентации высокопрочная армирующая компонента композита практиче-

ски не воспринимает нагрузку. В *in situ* композитах обе компоненты не отличаются высокими прочностными показателями, но обладают достаточно хорошей пластичностью, что позволяет обеспечить высокие степени деформации при прокатке или волочении. При этом за счет высокой плотности межфазных границ достигается рекордная плотность дислокаций ( $\sim 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ) в обеих фазах. В результате прочностные характеристики значительно превосходят рассчитанные в самом оптимистичном варианте по правилу смеси показатели и не зависят от угла между направлением армирования и осью растяжения.

Еще более высокие прочностные показатели имеют проволочные образцы, причем чем выше дисперсность их структурных составляющих, тем эти показатели выше. На проволочных образцах проведены также фрактографические исследования, которые свидетельствуют о вязком характере разрушения при самых высоких степенях деформации и вплоть до гелиевых температур. Это является важным фактором для их практического использования.

В пятой главе представлены результаты первого исследования влияния сверхпроводящих переходов на пластичность композитов. Эти исследования проведены при активной деформации на полученных прокаткой *in situ* композитах медь-ниобий, механические свойства которых описаны в предыдущей главе. Оказалось, что, как и в ранее изученных материалах, наблюдается два проявления этого эффекта. Первое из них заключается в усилении скачкообразной деформации в нормальном состоянии. Аналогичный результат, полученный ранее на однофазных материалах, трактовался как доказательство того, что термомеханическая неустойчивость не может быть причиной скачкообразной деформации. Это связано с тем, что при сверхпроводящем переходе происходит такое изменение теплофизических характеристик, которое должно было бы усиливать разогрев образца за счет диссипируемой

при пластической деформации энергии. Это, в свою очередь, должно было бы приводить к увеличению вероятности выполнения критерия термомеханической неустойчивости, т.е. к усилению скачкообразной деформации в сверхпроводящем состоянии. Однако, проведенный в настоящей работе анализ, показал, что при этом не учитывается одно немаловажное обстоятельство, связанное с различным влиянием температуры на скорость пластической деформации в нормальном и сверхпроводящем состояниях. Дело в том, что в критерии термомеханической неустойчивости  $A(d \ln \dot{\epsilon}_0 / dT + \Delta H / kT^2) > 1$  множитель  $A$ , содержащий теплофизические параметры, действительно увеличивается при сверхпроводящем переходе. В скобке же первым слагаемым обычно пренебрегают, полагая его малым по сравнению со вторым слагаемым, которое быстро растет при понижении температуры, что может обеспечить выполнимость критерия. Допустимость пренебрежения указанным слагаемым в подавляющем большинстве случаев, в том числе в нормальном состоянии, не вызывает сомнения, однако в сверхпроводящем состоянии предэкспонента  $\dot{\epsilon}_0$  экспоненциально растет с понижением температуры за счет уменьшения коэффициента вязкого торможения, обусловленного уменьшением доли нормальных электронов. В этой связи первое слагаемое в скобке в сверхпроводящем состоянии отрицательно, поэтому выполнимость критерия обусловлена соотношением всех трех величин. Как показывает оценка, первое слагаемое по абсолютной величине может стать даже больше второго, т.е. скобка будет отрицательной и тогда критерий в принципе не выполним.

При изучении влияния сверхпроводящего перехода на деформирующее напряжение установлено, что величина эффекта  $\Delta \sigma_{н.с}$  коррелирует с чувствительностью деформирующего напряжения к скорости деформации. Обе эти величины при переходе от первой стадии кривой упрочнения ко второй увеличиваются в несколько раз, причем  $\Delta \sigma_{н.с}$  достигает величины 4 МПа, что превосходит типичные

сплавов значения примерно на порядок. Отмеченная корреляция указывает на динамическую природу эффекта пластификации и позволяет отдать предпочтение тем теориям эффекта, которые основаны на термофлуктуационных представлениях, т.е. в первую очередь термофлуктуационной и термоинерционной моделям.

Наличие эффекта пластификации на первой стадии требует специального объяснения, поскольку здесь пластически деформируется лишь медь, т.е. несверхпроводящая фаза. Одно из возможных объяснений этого явления связано с эффектом близости, благодаря которому возможно туннелирование куперовских пар в нормальный металл, находящийся в контакте со сверхпроводником на некоторую глубину  $\delta$ . Расчет показывает, что для изученного композита  $\delta = 0,45$  мкм при температуре 4,2 К. Суммарно это составляет приблизительно четверть объема медной фазы, что по-видимому, может обеспечить наблюдаемый эффект. Понижение температуры согласно теории эффекта близости приводит к увеличению  $\delta$ , что должно проявиться в увеличении  $\Delta\sigma_{ns}$ . Специальный эксперимент при температуре 2,2 К показал примерно двукратный рост  $\Delta\sigma_{ns}$ . Этот рост нельзя объяснить температурной зависимостью величины  $\Delta\sigma_{ns}$ , так как экспериментальные и теоретические данные свидетельствуют о независимости величины эффекта от температуры при  $T < T_c/2$  ( $T_c$  для исследованного композита около 8 К).

Шестая глава посвящена изучению влияния статических нагрузок и деформаций на критические параметры сверхпроводящих композитов. Поведение второго критического поля  $H_{c2}$  исследовалось на проволочных композитах медь - ниобий с различной степенью предварительной деформации, накопленной в процессе волочения. Установлено, что по величине  $H_{c2}$  во всех композитах в несколько раз превосходит табличные данные для ниобия, причем эта разница растет по

мере увеличения степени предварительной деформации. Кроме того, чувствительность второго критического поля к одноосной растягивающей нагрузке, также оказалась чрезвычайно большой. Анализ указанных данных в рамках соотношения  $H_{c2} = \sqrt{2} \alpha H_c$  позволил сделать заключение о том, что аномально высокие значения  $H_{c2}$  в этих композитах связаны в основном с ростом параметра Гинзбурга - Ландау  $\alpha$ , обусловленным уменьшением длины свободного пробега электронов за счет частичного растворения меди в ниобии и большой плотностью дислокаций, полученной в процессе волочения. Кроме того, определенную роль, по-видимому, играет здесь ячеистая дислокационная структура. В стенках ячеек плотность дислокаций достигает  $10^{13} \text{ см}^{-2}$ , что за счет концентрации напряжений и размягчения фононного спектра может привести к локальному увеличению, как  $\alpha$ , так и  $H_c$ .

Что касается зависимости второго критического поля от напряжения, то на ней, как и на кривой упрочнения при циклировании нагрузки, также наблюдаются петли гистерезиса. Перестройка указанных данных в координатах  $H_{c2}$  - деформация приводит к тому, что все ветви этой зависимости описываются единой кривой до тех пор пока не превзойден предел текучести ниобия. Это означает, что  $H_{c2}$  является универсальной функцией напряжения действующего на ниобий.

Так как основные изменения второго критического поля происходят в области упругой деформации ниобия, т.е. без дополнительного накопления дефектов, связать это можно только с изменением термодинамического критического поля  $H_c$ , которое, происходит, по-видимому, в стенках ячеек. Это подтверждается измерениями первого критического поля, которое также как и  $H_{c2}$  растет с увеличением нагрузки, что нельзя было бы объяснить ростом  $\alpha$ , так как  $H_{c1} = H_c \ln \alpha / \alpha \sqrt{2}$ .

Влияние нагрузок и деформаций на критическую температуру изучалось как на композитах Cu-Nb, так и на промышленных компози-

тах Cu-NbTi и бронза-Nb<sub>3</sub>Sn. Как и в случае второго критического поля зависимость  $T_c$  от напряжения аналогична кривой упрочнения, причем в композите Cu-Nb  $T_c$  растет под нагрузкой, а в композитах Cu-NbTi и бронза-Nb<sub>3</sub>Sn - снижается. Перестройка этих зависимостей в координатах  $T$  - деформация также приводит к универсальным кривым. Как и ранее это означает, что критическая температура является функцией напряжения действующего на ниобий.

В крупных магнитных системах композиты испытывают воздействия трехосных напряжений, причем поперечные напряжения, как правило, являются сжимающими. В этой связи были проведены эксперименты по изучению влияния поперечных сжимающих нагрузок на  $T_c$  всех композитов. Оказалось, что в композите Cu-Nb критическая температура растет под нагрузкой, причем сдвигка  $T_c$  достигает 0,4К при погонной нагрузке 1,5 МН/м. В композите бронза-Nb<sub>3</sub>Sn  $T_c$  снижается на 0,5К при погонной нагрузке 0,45 МН/м. Что касается композита Cu-NbTi, то заметных изменений критической температуры при таких воздействиях обнаружено не было.

В седьмой главе приведены результаты комплексного исследования неустойчивостей сверхпроводящего состояния, связанных с релаксацией запасенной механической энергии в сверхпроводящих магнитных системах. На коротких образцах моделировались три возможных канала релаксации энергии: пластическая деформация композита, внешнее трение при шевелении витков, а также отслаивание и растрескивание компаунда. Во всех случаях производилось нагружение в деформационной машине при температуре 4.2К некоторого узла, моделирующего соответствующую ситуацию с синхронной регистрацией нагрузки, позволяющей получить данные о высвобождающейся механической энергии, и инициированных этим процессом неустойчивостей сверхпроводящего состояния. Для регистрации последних использовались две

методики: наблюдение за поведением захваченного магнитного потока, специально вводимого в исследуемый образец композита, и изучение динамики нормальных зон, возникающих при развитии указанных неустойчивостей.

Первый метод является чрезвычайно чувствительным. так как захваченный магнитный поток находящийся в метастабильном состоянии, обусловленным балансом сил Лоренца и сил пиннинга, реагирует на любые сколь угодно малые повышения температуры. Второй метод применим только тогда, когда температура в процессе развития неустойчивости превышает  $T_c$ .

При пластической деформации композитов установлено существование трех типов скачков захваченного магнитного потока. Один из них связан с присущей при низких температурах практически всем материалам механической неустойчивостью, так называемой скачкообразной деформацией. При этом, чем больше скачок деформирующего напряжения, тем больше величина скачка захваченного потока и при  $\Delta\sigma = 25$  МПа захваченный поток удаляется полностью. Второй тип скачка потока обусловлен тем, что внешне такой же скачок деформирующего напряжения можно вызвать искусственно - импульсным подгружением деформируемого образца. И, наконец, третий тип наблюдается только в нестабилизированном композите, которому присуща термомагнитная неустойчивость, в силу того, что диаметр сверхпроводящей жилы в нем больше критического. Эксперименты с помощью нескольких измерительных катушек показали, что в первом случае возмущение вызвано локализованным тепловыделением, в то время как во втором и в третьем - делокализованным. Это связано с тем, что естественный скачок деформирующего напряжения, как известно, обусловлен локальным удлинением образца, а при искусственном скачке вдоль образца распространяется упругая волна, срывающая как вихри магнитного потока с центров пиннинга, так и дислокации с центров закрепления.

Последнее вызывает скачок  $\Delta B$ , однако разогрев при этом относительно однороден по длине образца. В случае термомагнитной неустойчивости затравочным возмущением является однородный разогрев при пластической деформации и скачок потока происходит одновременно по всей длине образца.

В соответствии с локализацией тепловыделения нормальная зона при естественном скачке деформирующего напряжения распространяется вдоль образца вместе с тепловой волной. При искусственном скачке  $\Delta B$  нормальная зона возникает одновременно на всей длине образца. Такая же ситуация имеет место в случае термомагнитной неустойчивости. Для естественного скачка  $\Delta B$  проведено количественное сопоставление динамики нормальной зоны, полученной в эксперименте, с известными расчетными данными о длине нормальной зоны, инициированной точечным источником тепла. Оказалось, что наблюдается хорошее согласие эксперимента с теорией.

При исследовании влияния внешнего трения на устойчивость сверхпроводящего состояния композитов производилось нагружение образца с плотно намотанной на него медной спиралью. Этот узел помещался в захват цангового типа, позволяющий регулировать степень обжатия спирали. Установлено, что по мере увеличения степени обжатия происходит эволюция от стабильного к полустабильному и нестабильному трению, характеризующемуся большими скачками силы трения  $F_{\tau}$ . Увеличение разрешения по нагрузке показывает, что при стабильном трении также наблюдаются небольшие скачки  $F_{\tau}$ . Как и в случае пластической деформации скачки силы трения можно вызвать искусственно - импульсом нагрузки. Для всех этих скачков  $F_{\tau}$  можно наблюдать как скачки захваченного магнитного потока, так и развитие нормальных зон. Сопоставление высвобождающейся механической энергии (определенной по скачку силы трения) с рассчитанным количеством тепла, необходимым для перевода соответствующего участка образца в норма-

льное состояние, показывает их хорошее соответствие.

Для исследования влияния компаундирования на устойчивость сверхпроводящих композитов использовался модифицированный полимерный клей ВТ-10. При этом установлено, что механические неустойчивости могут возникать вследствие трещинообразования в компаунде, актов отслаивания компаунда от композита и, после полной потери связи, вследствие трения в паре компаунд - композит. Кроме того эти неустойчивости также можно вызвать искусственно. Как и в предыдущем случае высвобождающаяся при механической неустойчивости энергия хорошо количественно соответствует тепловой, необходимой для возникновения зарегистрированных нормальных зон.

Заключительная восьмая глава посвящена изучению тренировки - процесса, который в реальной магнитной системе позволяет после нескольких последовательных циклов запитки частично устранить деградацию токонесущей способности, обусловленную описанными выше термомагнитомеханическими неустойчивостями. Явление тренировки моделировалось на коротких образцах композита для всех трех возможных каналов релаксации механической энергии с помощью циклирования нагрузки при нагружении соответствующего узла. Дело в том, что с механической точки зрения композит в магнитной системе в процессе тренировки подвергается последовательным циклам нагружения и разгружения под действием магнитных сил. Эксперименты показали, что в тех случаях, когда механические возмущения исчерпываются в ходе нагружения (отслаивание и растрескивание компаунда, растрескивание интерметаллида  $Nb_3Sn$ ) неустойчивости сверхпроводящего состояния возобновляются лишь при превышении уровня предыдущего нагружения, т.е. здесь полная тренировка в принципе возможна. Однако при этом появляются другие отрицательные факторы: растрескивание интерметаллида  $Nb_3Sn$  приводит к необратимому ухудшению его сверхпроводя-

щих свойств; отслаивание компаунда от композита дает возможность реализации механо-фрикционных процессов в паре компаунд - композит и т. д.

Еще более сложная ситуация наблюдается при пластической деформации, так как в этом случае при циклическом нагружении появляются неустраимые при большом количестве циклов петли гистерезиса. Эти петли связаны с различиями коэффициентов теплового расширения компонент композита, вызывающими большие механические напряжения при захлаживании, которые обуславливают сложное упруго-пластическое поведение (в частности, пластическое сжатие матрицы на стадии разгрузки) композита. Для композита Cu-NbTi дополнительным фактором, приводящим к гистерезисному характеру петель нагрузка - разгрузка могут быть деформационно стимулированные структурные превращения.

Установлено, что количество скачков захваченного магнитного потока, по которым регистрировались неустойчивости сверхпроводящего состояния, и которые наблюдаются на обеих ветвях петли гистерезиса, несколько уменьшается в первых 2-3 циклах нагружения-разгрузки, а затем остается постоянным. Что касается тех неустойчивостей, с которыми связано появление нормальных зон, то примерно за полтора десятка циклов они устраняются. Характерно, что отогрев до комнатной температуры приводит к частичной растренировке, так как полная тренировка (исчезновение неустойчивостей приводящих к появлению нормальных зон) достигается после этого за меньшее число циклов.

Следует подчеркнуть, что эти эксперименты, как к стати и эксперименты описанные в предыдущей главе, проведены в мягких условиях - в отсутствии большого транспортного тока, наличие которого может значительно усугубить ситуацию в смысле устойчивости композитов к изученным возмущениям.

## ВЫВОДЫ.

1. Проведено комплексное исследование магнитных и деформационных свойств сверхпроводников второго рода. Установлено, что их исходная и деформационная структуры способствуют значительному захвату магнитного потока, который вносит большие погрешности в измеряемую величину эффекта пластификации при сверхпроводящих переходах. На основе предложенных методов получения истинной величины эффекта и коррекции измеренной величины эффекта уточнены зависимости величины эффекта пластификации при сверхпроводящем переходе от деформации, концентрации и состояния примеси, а также температуры.
2. Изучено влияние концентрации нормальной фазы на деформирующее напряжение сверхпроводников в смешанном и промежуточном состояниях. В рамках качественного анализа термоактивационного движения дислокаций через сетку локальных препятствий показано, что существенно нелинейный характер концентрационной зависимости деформирующего напряжения в сверхпроводниках второго рода, заключающийся в инверсии этой зависимости относительно линии прямой пропорциональности, связан с вихревой природой их магнитной структуры.
3. Впервые изучены низкотемпературные пластические и прочностные свойства нового типа *in situ* композитов медь-ниобий. Установлено, что вся совокупность их механических характеристик определяется дисперсностью структурных составляющих и не зависит от угла между направлением армирования и осью растяжения, чем подтверждена гипотеза о природе аномально высокой прочности этого класса композитов, согласно которой она определяется рекордно высокой плотностью дислокаций в обеих фазах, достигнутой в процессе волочения или прокатки.

4. Впервые изучено влияние сверхпроводящего перехода на пластичность композиционных материалов. Обнаружено, что эффект пластификации наблюдается не только на стадии пластической деформации сверхпроводящей фазы, но и в той области, где пластически деформируется лишь несверхпроводящая матрица. На основе оценки глубины туннелирования куперовских пар и температурной зависимости величины эффекта высказана гипотеза, что причиной этого неожиданного явления может быть эффект близости.
5. Установлено, что в композите, как и в однофазных материалах, в сверхпроводящем состоянии происходит подавление скачкообразной пластической деформации. Анализ этого эффекта с учетом различия температурной зависимости чувствительности скорости пластической деформации к температуре в нормальном и сверхпроводящем состояниях позволил прийти к принципиально отличному от высказанного ранее выводу о том, что причиной скачкообразной деформации является термомеханическая неустойчивость.
6. Исследовано влияние одноосного растяжения и поперечного сжатия на критические параметры сверхпроводящих композитов. Показано, что в *in situ* композитах значительное повышение второго критического поля обусловлено ростом параметра Гинзбурга - Ландау, а высокая чувствительность  $H_{c2}$  и  $T_c$  к нагрузке связана с происходящими в стенках дислокационных ячеек вариациями термодинамического критического поля. В промышленных композитах Cu-NbTi понижение  $T_c$  под нагрузкой вызвано деформационно стимулированным структурным превращением.
7. Определен спектр механических возмущений, способных инициировать неустойчивости сверхпроводящего состояния, приводящие к деградации токонесущей способности сверхпроводящих магнитных систем: скачкообразная пластическая деформация, скачкообразное внешнее трение, растрескивание и отслаивание компаунда. Для всех указан-

- ных типов возмущений обнаружены два проявления неустойчивости сверхпроводящего состояния - скачок захваченного магнитного потока, а также возникновение и распространение нормальных зон.
8. Установлено, что динамика нормальных зон полностью определяется степенью локализации тепловыделения, которое ее инициировало. Показано, что наблюдается хорошее количественное соответствие между высвобождающейся в результате механической релаксации энергией и рассчитанным количеством тепла, необходимым для зарождения зарегистрированных нормальных зон.
9. Для всех трех возможных каналов релаксации запасенной механической энергии проведено моделирование на коротких образцах процесса тренировки сверхпроводящих магнитных систем. Установлено, что для тех возмущений, которые исчерпываются в процессе циклирования нагрузки (трещинообразование в сверхпроводящей фазе, отслаивание и растрескивание компаунда) полная тренировка в принципе возможна, если при этом не происходит стационарного необратимого снижения сверхпроводящих характеристик композита.
10. Сделан вывод о принципиальной невозможности полной тренировки в том случае, когда деградацию токонесущей способности определяют неустойчивости при пластической деформации композита. Это обусловлено тем, что термически введенные напряжения, связанные с различиями коэффициентов теплового расширения компонент композита, и обратимые деформационно стимулированные структурные превращения приводят к неустранимой при большом числе циклов гистерезисности кривых нагрузка - разгрузка.

Основные результаты диссертации изложены в следующих публикациях:

1. Диденко Д. А., Пустовалов В. В., Стафинова В. Ф., Фоменко В. С., Доценко В. И. О релаксации напряжений в металлах с ГЦК-решеткой при температурах 1,4-77,3 К // Физ. конд. сост. - 1970. - вып. X. - С. 26-38.
2. Доценко В. И., Пустовалов В. В., Фоменко В. С. Особенности релаксации напряжений при сверхпроводящем переходе // Физ. конд. сост. - 1971. - вып. XIV. - С. 42-49.
3. Доценко В. И., Пустовалов В. В., Фоменко В. С. Особенности релаксации напряжений при сверхпроводящем переходе // ФТТ. - 1972. - 14, N1. - С. 201-205.
4. Dotsenko V. I., Landau A. I., Pustovalov V. V. Kinetics of stress relaxation in normal and superconducting states // Phys. stat. sol. (b). - 1974. - 66, N1. - P. 279-283.
5. Доценко В. И. Анализ кинетики релаксации напряжений и возможности разделения компонент деформирующего напряжения при низких температурах // Проблемы прочности. - 1974. - N11. - С. 91-95.
6. Доценко В. И., Пархоменко Т. А., Пустовалов В. В. Особенности релаксации напряжений в металлах при низких температурах // В сб.: Механизмы релаксационных явлений в твердых телах. - Каунас, 1974, С. 72-76.
7. Доценко В. И., Пустовалов В. В., Фоменко В. С., Щербина М. Е. Закономерности изменения деформирующего напряжения при сверхпроводящем переходе в сплавах Pb-In // ФНТ. - 1976. - 2, N6. - С. 775-780.
8. Pustovalov V. V., Dotsenko V. I., Fomenko V. S. Effect of superconducting transition on flow stress and relaxation in lead alloys // Proceed. 4-th Intern. Conf. on the Strength of Metals and Alloys - Nancy, 1977, Vol. 3, P. 1230-1234.
9. Dotsenko V. I. Stress relaxation in crystals // Phys. stat. sol. (b). - 1979. - 93, N1. - P. 11-41.
10. Доценко В. И., Пустовалов В. В., Сиренко В. А. Влияние сверхпроводя-

- шего перехода на пластичность в условиях захвата магнитного потока // ФНТ.- 1981.- 7, N1.- С.100-110.
11. Dotsenko V. I., Pustovalov V. V., Sirenko V. A. Effect of N-S transition upon metal plasticity revealed in the presence of trapped magnetic flux // Scr. Met.- 1981.- 15, N8.- P.857-859.
12. Доценко В.И. Влияние старения на пиннинг флюксоидов и дислокаций в сплавах свинец-кадмий // ФНТ.- 1982.- 8, N10.- С.1078-1083.
13. Доценко В.И., Сиренко В.А. Влияние концентрации и морфологии нормальной фазы на деформирующее напряжение сверхпроводников // ФНТ.- 1983.- 9, N4.- С.412-418.
14. Доценко В.И., Сиренко В.А. Проявление критического состояния в эффекте разупрочнения жестких сверхпроводников второго рода // ФНТ.- 1983.- 9, N5.- С.539-542.
15. Dotsenko V. I., Pustovalov V. V., Sirenko V. A., Fomenko V. S. Effect of the magnetic flux trapping upon the temperature dependence of the flow stress change at the superconducting transition // Cryst. Res. Technol.- 1984.- 19, N8.- P.1031-1038.
16. Тихоновский М.А., Доценко В.И., Кисляк И.Ф., Петренко В.Т. Низкотемпературная пластичность композитов медь - ниобий, полученных in situ // Металлофизика.- 1986.- 8, N2.- С.73-78.
17. Доценко В.И., Кисляк И.Ф., Петренко В.Т., Старцев В.И., Тихоновский М.А. Влияние сверхпроводящего перехода на пластичность многоволоконных композитов медь-ниобий, полученных in situ // ФНТ.- 1986.- 12, N7.- С.741-749.
18. Доценко В.И., Кисляк И.Ф., Чайковская Н.М. Экспериментальное изучение термомагнитомеханических неустойчивостей в сверхпроводящих композитах // В сб. Низкотемпературное электромашиностроение.- Киев, Наукова думка.- 1987.- С.44-50.
19. Доценко В.И., Кисляк И.Ф., Лаврентьев Ф.Ф., Петренко В.Т., Похил Ю.А., Тихоновский М.А. Влияние дисперсности на механические свойства

- тва и характер разрушения многоволоконных композитов Cu - Nb // Механика композитных материалов.- 1988.- N1.- С.50-57.
20. Dotsenko V. I., Kislyak I. F., Chaykovskaya N. M. Experimental study of the thermomagneto mechanical instabilities in superconducting composites. Part 1: magnetic flux jumps induced by plastic deformation // Cryogenics.- 1989.- 29, N1.- P.10-15.
21. Dotsenko V. I., Kislyak I. F., Chaykovskaya N. M. Experimental study of the thermomagneto mechanical instabilities in superconducting composites. Part 11: dynamics of normal zones // Cryogenics.- 1989.- 29, N1.- P.16-21.
22. Bronina E. M., Dotsenko V. I., Kislyak I. F., Chaykovskaya N. M. Stability of superconducting composites under cyclic loading // Cryogenics.- 1990.- 30, N9.- P.889-893.
23. Dotsenko V. I., Kislyak I. F., Chaykovskaya N. M. Stability of superconducting composites during external friction // Cryogenics.- 1990.- 30, N9.- P.894-899.
24. Горобцов В. Г., Доценко В. И., Кисляк И. Ф., Крот О. И. Влияние одноосного сжатия на температуру сверхпроводящего перехода нитрида титана // Порошковая металлургия.- 1990.- 14.- С.13-14.
25. Dotsenko V. I., Kislyak I. F. Effect of epoxy debonding and cracking on stability of superconducting composites // Cryogenics.- 1991.- 31, N10.- P.906-912.

Ответственный за выпуск В.В.Демирский

---

Подписано к печати 20.X.1993. Физ. п. л. 2.

Уч.-изд. л. 2. Заказ № 75. Тираж 100 экз.

---

Ротапринт ФТИНТ АН Украины, 310164, Харьков, пр.Ленина 47

AB 28.513

11