

**ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ, ПРОЧНОСТИ И ПЛАСТИЧНОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ В ХФТИ**

**Неклюдов И.М., Соколенко В.И.**

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,*

*г. Харьков, Украина*

*E-mail: vsokol@kipt.kharkov.ua*

Обзор посвящен 90-летию Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины (наименование при основании – УФТИ).

Первым директором УФТИ И.В.Обреимовым были организованы криогенная лаборатория, ставшая в предвоенные годы центром низкотемпературных исследований в СССР, чему способствовало широкое использование в экспериментах жидкого водорода (получен в 1931 г.) и гелия (получен в 1932 г.), и лаборатории физики кристаллов, в которой впервые было начато комплексное изучение прочности и пластичности твердых тел.

Впервые в стране в 40-е годы проведены исследования механических свойств ряда чистых металлов, сталей и сплавов в условиях статических и ударных испытаний при 20-300 К и получены данные, необходимые для выбора материалов криогенных устройств [1]. В 50-е годы впервые исследовано поведение металлов и сплавов в условиях сжатия при гелиевых температурах и влияние пластической деформации на электропроводность и критические параметры сверхпроводников [2]. Исследование аномалий низкотемпературной деформации щелочных металлов привело к обнаружению низкотемпературного деформационного полиморфизма – превращению кристаллической решетки из ОЦК в ГЦК [3], объяснению явления сверхпластичности некоторых материалов в метастабильном состоянии.

Систематические и широкомасштабные исследования в области физики прочности и пластичности твердых тел при низких температурах (1,4-77 К) были начаты во второй половине 50-х годов. Выполнение этих работ было стимулировано развитием отраслей новой техники – криогенной и аэрокосмической; а также представляло фундаментальный интерес в связи с необходимостью выяснения физических процессов пластической деформации и механического поведения материалов вблизи абсолютного нуля температуры.

Для аэрокосмических предприятий, руководимых С.П.Королевым и А.А.Люлькиой, был выполнен большой объем работ по изучению механических свойств и характера разрушения в температурном интервале 4,2-300 К широкого класса сталей и специальных сплавов на железной, ниобиевой, молибденовой, алюминиевой, медной и титановой основах в различных состояниях; установлены температурные границы, в которых возможно применение исследованных материалов в узлах авиационной и космической техники.

В 70-80 годы в рамках работ по выполнению заданий отраслевого министерства изучены механические свойства технических композитных сверхпроводников на основе деформируемых сплавов и интерметаллических соединений. Установлен ряд закономерностей изменения механических свойств и деградации критического тока в зависимости от конструктивных особенностей композитов [4,5]. Показано, что для ниобий-титановых сверхпроводников наблюдаемый эффект обратимого снижения тока под нагрузкой обусловлен упругим мартенситным превращением.

Проведен цикл исследований физической природы хладноломкости металлов и взаимосвязи между механическим двойникованием и хрупким разрушением [6]. При низкотемпературном деформировании высокочистых ОЦК металлов впервые обнаружено межзеренное скольжение и скольжение по границам двойников, возвратное двойникование при приложении нагрузки противоположного знака, термическое упрочнение двойниковых прослоек после отогрева до 300 К, явление развития механических двойников в условиях высокотемпературной ползучести. В результате этих исследований изменились представления о роли механического двойникования в общей пластической деформации и разрушении ОЦК металлов и сплавов. Показано, что

двойникованием можно эффективно управлять, используя его как разновидность предварительной механико-термической обработки с целью изменения ряда физико-механических свойств.

Исследованы физические эффекты при взаимодействии дислокаций с решеточной, электронной и магнитной подсистемами. Впервые показано, что ползучесть никеля вблизи абсолютного нуля температуры осуществляется путём преодоления потенциальных барьеров за счёт квантово-механического туннелирования дислокаций и энергии нулевых колебаний дислокационной линии [7]. Подробно изучено явление разупрочнения металлов при переходе из нормального в сверхпроводящее состояние (рис.1), что связано с исчезновением или ослаблением механизма торможения дислокаций электронами проводимости вследствие образования куперовских пар [8]. В 70-е годы всесторонне исследовано влияние постоянных и переменных магнитных полей на процессы пластической деформации магнитоупорядоченных металлов в условиях активного нагружения и ползучести при 4,2-300 К - магнитопластический эффект (МПЭ) [9]. В течение последних лет (2007-2017 г.г.) исследования МПЭ и воздействия магнитных полей были продолжены в фундаментальном и прикладном аспектах, в том числе применительно к конструкционным материалам атомной энергетики [10].

В температурном интервале 4,2-300 К изучены механические свойства, акустическая эмиссия, ползучесть, характеристики внутреннего трения и упругие модули керамических ВТСП. Показана общность диссипативных процессов в высокотемпературных и низкотемпературных сверхпроводниках, проявляющаяся в разупрочнении и пластификации при n-s переходе [11].

Подавление возвратных процессов при понижении температуры деформации дает возможность создавать в массивных кристаллах структуры со значительно более высокой концентрацией дефектов и степенью дисперсности по сравнению с деформацией при комнатной и более высоких температурах. В Институте с использованием разработанных уникальных видов деформации (прокатка, волочение, кручение, квазигидроэкструзия, ковка) в области криогенных (4,2...77 К) температур) при переходе в область больших пластических деформаций проведены приоритетные исследования формирования в металлах и сплавах с различным типом кристаллической решетки структур с предельно высокой плотностью дефектов, в том числе наноструктур.

Впервые наноструктурное состояние в металле (медь) было получено в ХФТИ в 1967 г. [12]. В результате деформации прокаткой в среде жидкого водорода и гелия на степени  $\delta \geq 40\%$  средний размер дислокационной ячейки меди находится в нанометровом диапазоне (рис.2). Низкотемпературная квазигидроэкструзия (КГЭ) дает возможность осуществлять низкотемпературное деформирование на большие степени не только пластических, но и слабoplastических металлов при существенном их упрочнении [13].

Развит метод больших пластических деформаций, основанный на сочетании различных способов обработки давлением и обоснован структурно-фазовый критерий оптимизации соотношения используемых способов деформации при их комбинации (рис.3).

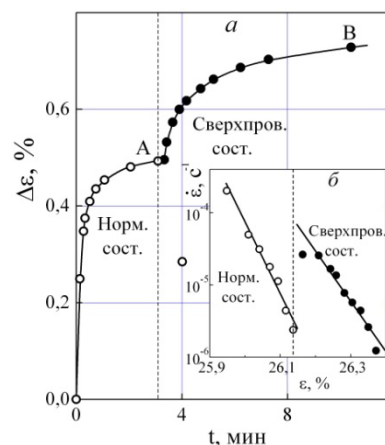


Рисунок 1- Зависимости деформации ползучести Pb от времени (а) и скорости деформации от степени деформации (б) на неустановившейся стадии ползучести при n-s переходе ( $T=1,8$  К,  $\sigma=2,7$  кг/мм<sup>2</sup>,  $H=3500$  Э). Увеличение ползучести в точке А – результат разупрочнения металла при n-s переходе.

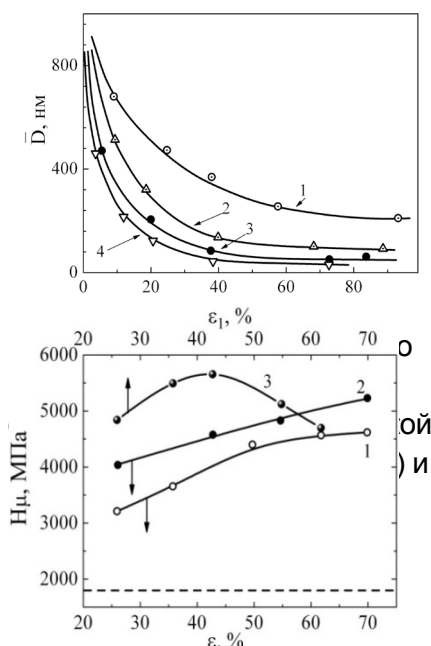


Рисунок 3 -Зависимость микротвёрдости стали 06X16N15M3B от степени деформации волочением при 77 К (1); КГЭ (2); от доли деформации волочением при сочетании волочения и КГЭ (3); исходное состояние - (---);  $\varepsilon_{\text{фин}} = \text{const} = 70\%$ .

В работах ряда последних лет при сочетании обычных методов интенсивной пластической деформации и низкотемпературной КГЭ получен и исследован нанокристаллический титан повышенной чистоты с размером зерна 75 нм, высокими значениями прочности ( $\sigma_B = 930$  МПа) и пластичности ( $\delta \approx 12\%$ ). При сочетании пластических деформаций прокаткой при комнатной и низких температурах в Zr и сплавах Zr1Nb и Э125 (Zr-2,5%Nb) получены наноструктуры и исследованы их физико-механические свойства. Показано, что кинетика формирования основной части границ субзерен имеет дисклинационный характер и не является результатом динамической полигонизации и рекристаллизации.

Обнаружен ряд новых эффектов, связанных с большими пластическими деформациями материалов в области низких температур: аномально высокий массоперенос внедренных атомов [14], изменение кинетики диффузионного распада сплава Nb-Ti [15], осцилляции механических и структурных характеристик [16], изменение закона низкотемпературной ползучести [17] и др.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Костенец В.И. Автореф. канд. дис. \_Харьков, 1953.
2. Хоткевич В.И., Голик В.Р. В кн.: Сборник, посвященный 70-летию академика А.Ф.Иоффе. М., 1950.
3. Гиндин И.А., Лазарев Б.Г., Стародубов Я.Д., Хоткевич В.И. // ЖЭТФ, 1958, 35, 802.
4. Гиндин И.А., Лазарева М.Б., Стародубов Я.Д., Старолат М.П., Соколенко В.И., Гогуля В.Ф. и др. // ВАНТ. Сер.: Атомное материаловедение, 1981, вып.1 (7), 42.
5. Соколенко В.И., Стародубов Я.Д. // ВАНТ. Сер.: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники (11), 2000, №5.
6. Гиндин И.А. // Металлофизика, 1971, вып.35, 59.
7. Аксенов В.К., Карасева Е.В., Стародубов Я.Д. // УФЖ, 1978, 23, №10, 1621.
8. Гиндин И.А., Лазарев Б.Г., Стародубов Я.Д., Лебедев В.П. // ФММ, 1971, 31, 1043.
9. Неклюдов И.М., Стародубов Я.Д., Соколенко В.И. // УФЖ, 2005, 50, №8А, 131.
10. Неклюдов И.М., Ажажа В.М., Соколенко В.И. та ін. Патент на винахід №94178, 2011.
11. Лазарев Б.Г., Стародубов Я.Д. и др. // ФНТ, 1996, 22, 825-827.
12. Гиндин И.А., Лазарева М.Б., Лебедев В.П. и др. // ФММ, 1967, 24, с.347-353.
13. Хаймович П.А., Черняева Е.В. Гл. 12 в монографии «Перспективные материалы и технологии» под ред. В.В.Клубовича. Витебск, УО «ВГТУ», 2017.
14. Аксенов В.К., Мац А.В., Стародубов Я.Д. // Физика и техника высоких давлений. 1994, №3-4, 97.
15. Аксёнов В.К., Волчок О.И. и др. Авт. свид. СССР, №1616401, 1990.
16. Mats A.V., Sokolenko V.I. // Вопросы материаловедения. 2007, №4 (52), с.224-228.
17. Аксенов В.К., Волчок О.И., Карасева Е.В., Стародубов Я.Д. // ФНТ, 2004, т.30, №4, с.458-462.