

PACS numbers: 01.10.Fv, 01.30.Ee, 01.65.+g, 46.40.Ff, 62.20.D-, 62.40.+i, 81.40.Jj

Современные проблемы механической спектроскопии

С. А. Головин, П. П. Паль-Валь*, А. В. Мозговой**

*Тулский государственный университет,
просп. Ленина, 92,
300012 Тула, Россия*

**Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина
НАН Украины,
просп. Ленина, 47,
61103 Харьков, Украина*

***Винницкий государственный педагогический университет
имени Михаила Коцюбинского,
ул. Острожского, 32,
21100 Винница, Украина*

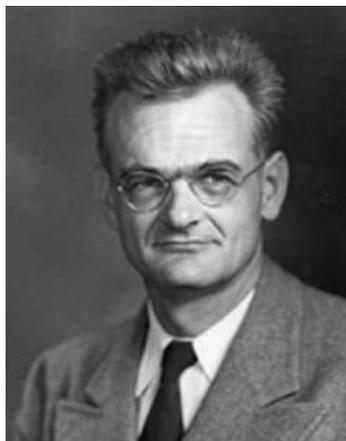
Обзор посвящается 75-летию выхода работы К. М. Зинера «Внутреннее трение в твёрдых телах. Теория и эксперимент». Рассмотрен исторический аспект развития исследований в области механической спектроскопии в Украине, России и других странах. Отмечены основные международные конференции и симпозиумы по данной проблеме, представлены наиболее важные научные результаты исследований процессов и механизмов рассеяния энергии механических колебаний в твёрдых телах.

Огляд присвячено 75-річчю виходу роботи К. М. Зінера «Внутрішнє тертя в твердих тілах. Теорія та експеримент». Розглянуто історичний аспект розвитку досліджень в галузі механічної спектроскопії в Україні, Росії та інших країнах. Відзначено основні міжнародні конференції та симпозиуми за даною проблематикою, представлено найважливіші наукові результати досліджень процесів і механізмів розсіяння енергії механічних коливань у твердих тілах.

A given review article is dedicated to the 75th anniversary of C. M. Zener's published work 'Internal friction in solids. Theory and experiment'. A historical aspect of research in the field of mechanical spectroscopy in Ukraine, Russia and other countries is discussed. The major international conferences and symposia on this problem as well as the most important scientific results on investigation of processes and mechanisms of the energy dissipation of mechanical vibrations in solids are reviewed.

Ключевые слова: упругость и неупругость в твёрдых телах, внутреннее трение, механическая спектроскопия, рассеяние механической энергии, дислокационная структура.

(Получено 28 февраля 2013 г.)



Кларенс Мелвин Зинер родился 1 декабря 1905 г. в США в столице штата Индиана г. Индианаполисе. Здесь же он провёл своё детство. Высшее образование К. Зинер получил в 1926 г., окончив Стэнфордский университет. В 1929 г. он был удостоен степени доктора философии (PhD) по физике в Гарвардском университете. Своё образование он дополнил, пройдя курс обучения в Лейпцигском университете (Германия).

Работы К. Зинера в области физики твёрдого тела довольно быстро привлекли внимание научной общественности. Его теоретические исследования порой на многие годы опережали возможность их практического применения. Его ранняя работа, написанная в 1934 г. и объяснявшая явление электрического туннельного пробоя в изоляторах и полупроводниках, привела к созданию в 1950-х годах диода Зинера (в отечественной литературе — полупроводникового стабилитрона), который нашёл широкое применение в качестве одного из базовых компонентов в современной электронике.

Широкое международное признание К. Зинер получил как основоположник нового научного направления: исследование физических механизмов рассеяния энергии механических колебаний в твёрдых телах. В своей пионерской работе 1937 года К. Зинер утвердил в научном обращении новый для физики твёрдого тела термин «внутреннее трение» [1], который по существу обозначал процесс преобразования энергии колеблющегося твёрдого тела в тепло при затухании колебаний (в частности, в результате необратимого рассеяния энергии при взаимодействии механических колебаний с дефектами кристаллической решётки). Научное мировое сообщество отмечает 75-летие выхода работы К. М. Зинера «Внутреннее трение в твёрдых телах. Теория и эксперимент» [2].

К. Зинер был автором больше чем 125 статей и книг и получил много профессиональных наград и знаков отличия. В частности, он был удостоен премии фон Хиппеля — наивысшей премии Международного общества материаловедов (Materials Research Society), премии Бингхэма Международного общества реологии (Society of

Rheology), медали Ветерилла института Франклина, премии Альберта Сувера и золотой медали американского общества металлургов (American Society for Metals). В 1982 г. Международное общество материаловедов признало К. Зинера «одним из самых основательных и оригинальных учёных 20-го столетия».

К. Зинер преподавал в ряде университетов и колледжей США. Он был преподавателем физики в Вашингтонском университете в 1935–1937 гг., Сити-колледже в г. Нью-Йорке в 1937–1940 гг., адъюнкт-профессором в Университете штата Вашингтон в 1940–1942 гг., после Второй мировой войны работал профессором физики в Чикагском университете. В 1951 г. электроэнергетическая корпорация Вестингауса пригласила его на работу руководителем научных исследований. На этой должности он проработал 14 лет до выхода на пенсию. После этого К. Зинер в течение трёх лет был деканом в Техасском А&М университете, а в 1968 г. получил должность профессора физики в Карнеги–Меллон университете.

Круг научных интересов К. Зинера не ограничивался теоретической физикой твёрдого тела. Он стал одним из пионеров движения за использование тепловой энергии океанов как формы использования солнечной энергии и проделал большую работу для развития этой концепции. Для выработки энергии он предложил использовать температурные градиенты в океанской воде, что позволило бы удешевить получаемую энергию и избежать загрязнения воды океанов. Для внедрения данной концепции в жизнь во многих странах в настоящее время проводятся масштабные исследования.

К. Зинер развил основы «геометрического» программирования, которое используется как стандартный метод, полезный как в математических исследованиях, так и в инженерных разработках, а также решении деловых и административных проблем. Он работал над математическими методами, облегчающими создание новых сплавов. В корпорации Вестингауса он разработал новые фотоэлектрические «мгновенные часы», способные регистрировать временные интервалы в нано- и пикосекундном диапазоне.

Коллеги любили профессора К. Зинера за доброжелательность и готовность помочь при решении различных проблем. Будучи уже немолодым человеком, К. Зинер обладал острым восприятием новых идей, проявлял интерес к науке, много и быстро работал. Его сотрудники утверждали, что один его вид и способность интенсивно работать помогали им преодолевать собственные трудности в работе. Современники отмечали замечательную способность К. Зинера быстро вникать в суть проблем, с которыми ему не приходилось до того сталкиваться, и не менее быстро находить их точное и адекватное решение.

В год своей кончины К. Зинер должен был быть одним из основных докладчиков на 10-й Международной конференции по внут-

ренному трению и поглощению ультразвука в твёрдых телах (ICIFUAS-10), которая состоялась 6–9 сентября 1993 г. в Риме (Италия). Сердце К. Зинера остановилось менее чем за два месяца до начала конференции. Он скончался 15 июля 1993 г. в городе Питтсбурге (штат Пенсильвания, США).

Изучению различных аспектов и механизмов внутреннего трения в твёрдых телах было посвящено огромное количество работ. В этой области знаний работало и работает большое число исследователей, проводились и проводятся авторитетные международные и национальные научные конференции (в том числе в Украине и России).

Монография К. Зинера, где впервые сформулированы физические основы проявления неупругости в твёрдых телах, была переведена и издана в России в 1956 г. Первая международная конференция по проблеме неупругости материалов состоялась в 1956 г. в США под названием «Внутреннее трение и рассеяние ультразвука». В 2002 г. было частично изменено её название на «Внутреннее трение и механическая спектроскопия» (International Conference on Internal Friction and Mechanical Spectroscopy: ICIFMS), а нумерация конференций сохранилась с 1956 года: ICIFMS-14 прошла в 2005 г. в Японии, ICIFMS-15 — в 2008 г. в Италии, ICIFMS-16 — в 2011 г. в Швейцарии; ICIFMS-17 состоится в 2014 г. в Китае. До настоящего времени Россия и страны бывшего СССР не принимали эту конференцию у себя. Помимо конференций этой серии было проведено шесть Европейских конференций ЕСIFAS и три международных школы по механической спектроскопии, в США — серия симпозиумов МЗД (Mechanics and Mechanisms of Materials Damping), в Азии, в Китае проведено девять Национальных конференций по внутреннему трению (ВТ). Аналитические возможности механической спектроскопии материалов широко используются при изучении атомного строения материалов и процессов, формирующих их физические, механические и эксплуатационные характеристики.

Новым импульсом в направлении развития исследований и плодотворного научного обмена между специалистами, работающими в области механической спектроскопии, явились I, II и III Международные конференции «Структурная релаксация в твёрдых телах» в Украине (Винница, ВГПУ им. М. Коцюбинского) в 2003, 2006, 2009 годах (ICRSRS-1, ICRSRS-2, ICRSRS-3). В мае 2012 года состоялась очередная ICRSRS-4 с широким представительством отечественных и зарубежных учёных и специалистов. Эти конференции позволили обсудить вопросы современного состояния и перспектив научных и прикладных разработок в данной области знаний.

В России первая межвузовская конференция «Релаксационные явления в металлах и сплавах» была организована и проведена Б. Н. Финкельштейном в 1958 г. в Москве (МИСиС), а затем с 1960

г. регулярно проводились национальные и международные конференции по проблемам неупругости в твёрдых телах: в Украине (Харьковский университет, Б. Я. Пинес), в Воронеже (ВорГТУ, В. С. Постников, Б. М. Даринский), в Туле (ТулГУ, М. А. Криштал, С. А. Головин), а также в Грузии (Институт металлургии и материаловедения, Ф. Н. Тавадзе) и др. городах. Итоги деятельности учёных СССР, России и стран СНГ по проблеме неупругости в твёрдых телах и развития исследований по проблеме, выполненных в прошлом столетии, были впервые рассмотрены в обзорах [3–5]. В специальной литературе имеется достаточно полное описание наиболее значимых для теории и практики публикаций, трудов международных и национальных конференций, организованных в различных странах [6, 7].

Развитие и создание отечественной школы по изучению релаксационных явлений в твёрдых телах в СССР, прежде всего, обязано научной и организационной деятельности одного из ведущих советских металлофизиков — профессора Б. Н. Финкельштейна (МИСиС, Москва). Работы выпускников и сотрудников многих кафедр МИСиС нашли широкое признание в области изучения различных механизмов релаксации в металлах и сплавах (Вернер В. Д., Ашмарин Г. М., Усова Л. Ф., Блантер М. С., Мозжухин Е. И., Елютин В. П., Иванов А. Н., Фонштейн Н. М., Супрун И. Т.), полупроводниковых и неметаллических материалов (Шаскольская М. П., Векилов Ю. Х., Блистанов А. А., Наими Е. К.), магнитной и магнитоупругой релаксации и гистерезиса (Лившиц Б. Г., Кекало И. Б.) и др. В настоящее время активную роль по проблемам структурной релаксации занимает коллектив исследователей МИСиС под руководством профессора Головина И. С., подготовившего первый учебник по механической спектроскопии металлических материалов для университетов и вузов.

Научные коллективы исследователей внутреннего трения образовались и развивались во многих московских институтах: МГУ (акустопластические, фотоакустические и поверхностные эффекты в ионных кристаллах — Тяпунина Н. А., Бушуева Г. В., Лунин Б. С.), Институты кристаллографии и физики твёрдого тела АН СССР (теории дислокационной релаксации и гистерезиса, фононной и электронной релаксации — Инденбом В. Л., Чернов В. М., Альшиц В. И., Надгорный Э. М., Сойфер Я. М.), ЦНИИЧермет (теории примесной и магнитной релаксации в структурнонеоднородных средах — Любов Б. Я., микропластичность и механизмы ВТ в упрочнённых сплавах — Саррак В. И., Грузин П. Л., Суворова С. О., сплавы высокого демпфирования — Удовенко В. А., Волынова Т. Ф., Чудаков И. Б.), МГАПИ (компьютерное моделирование и анализ атомной релаксации в сплавах — Блантер М. С.), МГПИ (механизмы релаксации в полимерах — Бартенъев Г. М.), МИХМ

(субструктурноупрочнённое состояние металлов — Гордиенко Л. К.), ГИПРОЦМО (цветные сплавы — Пигузов Ю. В.) и др.

Одним из базовых центров изучения релаксационных процессов в 60-е годы стал Воронежский государственный технический университет (Постников В. С.). Проводимые им в соавторстве исследования затронули самый широкий круг неупругих явлений в материалах таких, как: модели температурной, механической, дислокационной и диффузионной релаксации в твёрдых телах (Шермергор Т. Д., Даринский Б. М., Мешков С. И., Фёдоров Ю. А., Белявский В. И., Рощупкин А. М., Батаронов И. Л., Пачевская Г. Н.), температурный спектр релаксации чистых металлов, нитевидных кристаллов и конденсированных плёнок (Шаршаков И. М., Золотухин И. В., Аммер С. А., Косилов А. М., Дрожжин А. И., Беликов А. М., Антипов С. А., Ермаков А. П.), сегнетоэлектриках (Гриднев С. А., Павлов В. С.), силикатных стёклах (Балашов Ю. С.) и аморфных материалах (Калинин Ю. Е., Сайко Д. С.), бездиффузионное термоупругое фазовое поглощение и сверхпроводящий переход (Белко В. Н., Евсюков В. А., Иевлев В. И., Мальцева Г. К., Милошенко В. Е., Евсюков В. А.). В ВорГПУ под руководством Хоника В. А. сформировалось перспективное научное направление — механическая релаксация в металлических стёклах.

Другим организующим центром научных исследований по релаксационной и гистерезисной неупругости в России в 60-е годы стала кафедра металловедения Тульского политехнического института (Криштал М. А., Головин С. А.). Основными результатами экспериментальных и теоретических исследований явились следующие. Изучены температурные спектры диффузионной и дислокационно-примесной релаксации Снука, Снука-Кёстера, Финкельштейна-Розина в металлах с различной упаковкой, легированных твёрдых растворах и в тетрагональном мартенсите железа (Баранова В. И., Драпкин Б. М., Белкин К. Н., Свободов А. Н., Агеев В. С.); определена кинетика процессов распада пересыщенных твёрдых растворов (Власов В. М., Тихонова И. В., Жабо Л. В.); развиты методы определения дислокационных и микродеформационных характеристик металлов на основе ОЦК-, ГЦК- и ГПУ-решёток (Архангельский С. И., Выбойщик М. А., Троицкий И. В., Левин Д. М., Юркин И. Н.); исследованы механизмы изотермического, атермического и термоупругого мартенситного превращения инварных, мартенситностареющих сталей и сплавов с памятью формы (Маркова Г. В., Сержантова Г. В., Канунникова И. Ю., Виноградова В. Л.). Под руководством Головина И. С. выполнены исследования процессов упорядочения в легированных твёрдых растворах на основе железа (Поздова Т. В., Павлова Т. С.).

Экспериментально изучены и дано теоретическое описание микродеформационного поля структурнонеоднородных пористых и

композиционных систем на металлической и полимерной основе — Архипов И. К., Ренне И. И., Головин И. С., Петрушин Г. Д.) и др. На этой основе были разработаны и внедрены новые типы сплавов высокого демпфирования.

На основе Договора между Министерствами РСФСР и Словакии при кафедре в 1980–1990 годы функционировала советско-чехословацкая межвузовская лаборатория «Упругие и неупругие свойства металлов» (С. А. Головин, Антон Пушкар). Основным направлением совместных научных разработок являлась проблема механической спектроскопии усталостных процессов.

Исследования по проблеме ВТ в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН были начаты Давиденковым Н. Н. в конце 30-х годов, а с конца 50-х продолжены в лаборатории физики кристаллов под руководством Степанова А. В. Исследования внутреннего трения в ионных кристаллах были дополнены изучением эффекта электрической поляризации, которая возникает благодаря движению заряженных краевых дислокаций. В течение последних лет эта работа ведётся под руководством Никанорова С. П. На разных этапах в проведении исследований принимали участие: Кардашев Б. К., Лебедев А. Б., Буренков Ю. А., Воинова О. А., Голяндин С. Н., Иванов В. И., Кустов С. Б., Романов А. Д., Сапожников К. В. Был существенно расширен круг исследуемых материалов; это — полупроводники, металлы и сплавы (в частности, сплавы системы V–Ti–Cr, предназначенные для использования в будущем термоядерном реакторе), материалы с эффектом памяти формы, композиционные и керамические материалы (в том числе биоморфные SiC/Si-керамики, получаемые из различных пород дерева) и т.д.

Проблема проявления неупругости в материалах многогранна и нашла широкое отражение в географии СССР. В Грузии в Институте металлургии АН ГрССР под руководством академика Тавадзе Ф. Н. в 1964–1966 годы сформировалась группа талантливых исследователей: Байрамашвили И. А., Бадзошвили В. И., Зоидзе Н. А., Микеладзе А. Г., Цагарейшвили А. Г. и др., решавших вопросы спектра релаксации чистого железа, бора и его влияния на ВТ железа, строения атмосфер Снука и Коттрелла в тетрагональном мартенсите, механизмы бейнитного превращения и взаимодействия дисперсных частиц с железной матрицей и многие другие. В Армении в Ереванском университете под руководством Дургаряна А. А. выполнено систематическое изучение влияния ультразвукового облучения на ВТ кристаллов и дана оригинальная классификационная схема поглощения ультразвука в металлах.

В Украине сформировалось несколько научных коллективов в Киеве, Харькове, Донецке, Черновцах, Виннице. Исследования влияния несовершенств кристаллического строения на упругие и неупругие свойства металлов в 60-е годы начаты в Институте ме-

таллофизики АН УССР Полоцким И. Г. Он в 1935 году одним из первых начал исследования по акустике в Украине, и они были продолжены многими его учениками и сотрудниками. В октябре 1954 года на базе Лаборатории металлофизики создан Институт металлофизики, в который вошёл и отдел ультразвуковых методов исследования металлов. Под руководством Полоцкого И. Г. исследовались упругие и неупругие свойства твёрдых тел в широком диапазоне частот и температур. Активное участие в этой работе принимали участники: З. Л. Ходов, Т. Я. Бениева, В. Ф. Таборов, Н. С. Мордюк, а также молодые специалисты: Г. И. Прокопенко, О. И. Запорожец, В. С. Скопин.

Дальнейшее развитие получили методы внутреннего трения — резонансный и импульсный. Они были усовершенствованы под руководством В. С. Скопина, О. И. Запорожца и Г. И. Прокопенко. Резонансный метод внутреннего трения и измерения модуля Юнга были использованы Т. В. Голуб и О. Н. Кашевской для изучения кинетики распада пересыщенных твёрдых растворов и подвижности дислокаций при периодическом нагружении в области микродеформаций. При применении импульсного метода на частотах 5–30 МГц были изучены процессы дислокационной релаксации в монокристаллах молибдена и ниобия (Г. И. Прокопенко, 1970 г.). Неупругость материалов изучали: Мордюк Н. С. (ультразвук в монокристаллах); Чуистов К. В., Кашевская О. Н. (ВТ в Cu–Mg-сплавах); Кушнарёва Н. П. (ВТ в зависимости от примесей внедрения в Nb, Ni, Co, от концентрации рения в Mo); Гаврилюк В. Г., Дузь В. А. (ВТ в легированном Fe–C-мартенсите); Ягодзинский Ю. Н. (зернограничное ВТ чистых металлов и сплавов) и др.

В Харькове исследования развивались, в основном, в Физико-техническом институте низких температур им. Б. И. Веркина НАН Украины (ФТИНТ), Харьковском физико-техническом институте (ранее УФТИ) и в Харьковском национальном университете (ХНУ) им. В. Н. Каразина (до 1999 г. Харьковский государственный университет им. А. М. Горького).

Во ФТИНТ изучение акустических свойств кристаллов с различной дефектной структурой проводилось в отделе физики реальных кристаллов, практически начиная со дня его основания в 1961 г. известным учёным проф. В. И. Старцевым. Группой по изучению внутреннего трения в этом отделе в те годы руководил В. Я. Платков и позже П. П. Паль-Валь. Главной задачей группы на начальном этапе её деятельности было исследование низкотемпературного динамического поведения дислокаций в щелочно-галлоидных кристаллах, полуметаллах, нормальных и сверхпроводящих металлах и сплавах. Впоследствии рамки исследований были расширены.

Среди полученных сотрудниками ФТИНТ НАН Украины результатов отметим следующие. Для щелочно-галлоидных монокристал-

лов методом внутреннего трения получены данные о динамических характеристиках дислокаций в области низких температур (В. Я. Платков, В. И. Старцев, 1965–1969 гг.). В те годы привлекали также внимание работы В. З. Бенгуса и Ф. Ф. Лаврентьева с сотрудниками по квазистатической релаксации напряжений в щелочно-галлоидных кристаллах, по деформации монокристаллов цинка и в монокристаллах кальцита при расширении двойниковой прослойки. В дальнейшем было подробно изучено влияние сверхпроводящего перехода на условия открепления дислокаций от примесей в чистых индии и свинце, а также в разбавленных твёрдых растворах на их основе. Установлены физические механизмы, ответственные за изменение условий преодоления стопоров при n - s -переходе. Получены численные значения энергии связи дислокаций с целым рядом различных примесей в нормальном и сверхпроводящем состояниях (Л. Н. Паль-Валь, В. Я. Платков, В. И. Старцев, 1971–1983 гг.). Высокочастотным эхо-импульсным методом изучены механизмы квазивязкого торможения дислокаций в Sb в области низких температур и получена температурная зависимость коэффициента торможения дислокаций в Sb. Впервые показано, что обнаруженное аномальное облегчение отрыва дислокаций от закрепляющих центров в Sb при понижении температуры ниже $T \approx 30$ К обусловлено переходом дислокаций в незадемпфированное состояние (П. П. Паль-Валь, В. Я. Платков, В. И. Старцев, 1976–1981 гг.).

Впервые обнаружено явление высокоамплитудного низкотемпературного «динамического отжига» в деформированных монокристаллах In, Bi, Sb и Mo, обусловленного нестабильностью дефектной структуры в мощных ультразвуковых полях при гелиевых температурах (Л. Н. Паль-Валь, В. Я. Платков, П. П. Паль-Валь, 1976–1983 гг.). При изучении амплитудных зависимостей поглощения ультразвука и дефекта модуля в интервале температур 5–320 К установлен термоактивированный характер отрыва дислокаций от закрепляющих стопоров в полуметаллах Sb и Bi, а также в высокочистых монокристаллах ряда ОЦК-металлов: Mo, Fe, Nb. Получены активационные параметры взаимодействия дислокаций с примесями в этих кристаллах (П. П. Паль-Валь, В. Я. Платков, Л. Н. Паль-Валь, В. Д. Нацик, Ю. А. Семеренко, 1980–2004 гг.). В сверхпроводниках второго рода (сплавах на основе свинца) изучены дислокационные гистерезисные потери в магнитных полях, меньших критического. Показано, что вблизи дислокаций локально изменяются сверхпроводящие свойства, установлена и изучена роль вихрей Абрикосова в низкотемпературной динамике дислокаций (В. Я. Белошарпа, В. Я. Платков, В. И. Старцев, 1980–1985 гг.). Изучена роль квазивязкого торможения дислокаций в формировании дислокационного гистерезиса и установлены условия смены статического гистерезиса динамическим. Рассмотрена динамика

циклического движения дислокаций в условиях различного уровня степени их задемпфированности (В. Я. Белошапка, Л. Н. Паль-Валь, В. Я. Платков, А. М. Рощупкин, 1980–1996 гг.). Впервые наблюдалась и детально исследована эволюция низкотемпературного релаксационного спектра керамики $YBa_2Cu_3O_x$ при уменьшении кислородного индекса ($6,95 > x > 6,03$). При термоциклировании впервые обнаружена анизотропия гистерезиса упругих свойств сверхпроводящего монокристалла $YBa_2Cu_3O_{6,7}$, обусловленная бистабильным поведением подрешётки апексных атомов кислорода O(4) (П. П. Паль-Валь, Л. Н. Паль-Валь, В. В. Демирский, В. Д. Нацик, 1987–1996 гг.). Установлена дислокационная природа и предложены соответствующие микроскопические механизмы для ряда низкотемпературных акустических аномалий в ОЦК-кристаллах (Fe, Nb, CsI). Впервые показано, что низкоэнергетические релаксационные пики поглощения ультразвука в Nb и CsI в области гелиевых температур обусловлены релаксацией дислокационных геометрических кинков, движущихся во вторичном рельефе Пайерлса. В Nb впервые экспериментально наблюдалось аномальное снижение подвижности геометрических кинков при уменьшении электронной вязкости в сверхпроводящем состоянии (П. П. Паль-Валь, В. Д. Нацик, Л. Н. Паль-Валь, С. Н. Смирнов, 1995–1998 гг.). В результате статистического анализа низкотемпературных α -пииков внутреннего трения в кристаллах Fe и Nb установлено, что контролирующим элементарным процессом является термоактивированное зарождение пар кинков на дислокациях, т.е. релаксация дислокаций, движущихся в первичном рельефе Пайерлса (В. Д. Нацик, П. П. Паль-Валь, Л. Н. Паль-Валь, Ю. А. Семеренко, 1999 г.). Методами акустической спектроскопии в сплаве In–4,3 ат.% Cu впервые обнаружено и всесторонне изучено спонтанное низкотемпературное структурное превращение гистерезисного типа, имеющее черты фазового перехода 1-го рода (П. П. Паль-Валь, Л. Н. Паль-Валь, С. В. Лубенец, В. Д. Нацик, Л. С. Фоменко, 1999 г.). Впервые обнаружено, что для быстро охлаждённых образцов Nb имеется область температур, в которой наблюдается инверсия индущированного n - s -переходом дефекта модуля, т.е. увеличение упругих модулей при переходе в s -состояние. Показано, что данная аномалия является следствием суперпозиции низкотемпературной динамической дислокационной релаксации и квазистатического изменения электронного вклада ниже критической температуры T_c (П. П. Паль-Валь, В. Д. Нацик, Л. Н. Паль-Валь, 2004 г.).

Кроме перечисленных, был получен ещё ряд интересных результатов при исследовании релаксационных свойств вблизи критических точек в ферро- и антиферромагнетиках, в ВТСП-композитах. В последние годы с помощью методов акустической спектроскопии предпринято изучение новых перспективных материалов: метал-

лических стёкол, наноструктурных металлов и нанокompозитов (П. П. Паль-Валь, В. Д. Нацик, Л. Н. Паль-Валь, Е. Н. Ватажук, 2009–2011 гг.), керамик с необычными магниторезистивными свойствами — манганитов и кобальтитов (П. П. Паль-Валь, Л. Н. Паль-Валь, А. Б. Безносков, Е. Л. Фертман, 2005–2007 гг.).

Исследования внутреннего трения в Харьковском физико-техническом институте (бывшем УФТИ) начаты в 1958 году. Тогда Р. И. Гарбером и Т. Т. Могильниковой был предложен метод высокоточного определения физического предела упругости путём измерения внутреннего трения металлов и сплавов в процессе монотонно увеличивающегося напряжения. Позже, Гарбером Р. И., Гиндиным И. А., Дацко О. И., Солошенко И. И., Чиркиной Л. А., Стародубовым Я. Д., Оковитом В. С., Неклюдовым И. М., Пархоменко А. А. методами низкочастотного внутреннего трения изучались проблемы: низкотемпературного полиморфизма в литии (1965 г.), фазовых превращений в железе (1970–1975 гг.), структурно-фазовой неустойчивости сверхпроводящих Nb–Ti-сплавов в области криогенных температур (1980–1990 гг.); выяснялось влияние магнитных и температурных полей на упругие и диссипативные свойства ВТСП (Y и Bi керамик) (1990–2002 гг.); определялась роль границ раздела (в том числе двойниковых прослоек) и введения малых добавок легирующих элементов в управлении структурой и физико-механическими свойствами чистых, конструкционных, сверхпроводящих и радиационных материалов (1970–2004 гг.). Шаповал Б. И. с сотрудниками (Ажажа В. М., Аржавитин В. М., Тихинский Г. Ф. и др.) изучали фазовые превращения в сверхпроводящем сплаве и зернограничные эффекты ВТ (1980–1985 гг.).

Вторая конференция по внутреннему трению в 1958 году была организована в Харьковском государственном университете, её возглавил профессор Б. Я. Пинес — ученик академика А. Ф. Иоффе. В 1956–1959 гг. Пинес Б. Я. совместно с его аспирантом Ден Ге Сенем (КНДР) изучил закономерности ВТ металлокерамических тел — спечённых порошков чистых металлов Cu, Ni, Fe, двойных Cu–Ni, Cu–Fe и тройных Cu–Ni–Fe смесей. В смесях Cu–Ni, Cu–Fe впервые обнаружены эффекты ВТ, связанные с контактами разноимённых зёрен. Совместно со Старцевым В. И. и Кармазиным А. А. (1969–1971 гг.) им были изучены температурные зависимости высокотемпературного фона ВТ крупнозернистых образцов чистых металлов при разных частотах в инфразвуковом диапазоне частот, дано их аналитическое описание типа $Q^{-1} = K \{ \omega \exp[U_0/(k_B T)] \}^{-n}$ и определены значения n для разных металлов. В те же годы обнаружен примесный зернограничный пик, связанный с границами зёрен, содержащими выделения нерастворимой примеси, и предложен его механизм как скольжение зернограничных дислокаций, блокированных выделившейся примесью. Из данных по ВТ впервые полу-

чены свидетельства в пользу дислокационной структуры большеугловых границ зёрен. Старцевым В. И. и Петченко А. М. в соавторстве с В. И. Альшицем (1974–1976 гг.) изучено высокочастотное ВТ и на его основе установлены закономерности динамического торможения дислокаций в некоторых ЩГК (NaCl, KCl, LiF) и ряде металлов (Zn, Cu, Pb, Al).

Начиная с 60-х годов, В. М. Андроновым изучается ВТ нитевидных кристаллов меди, обнаружено их нелинейное поведение в режиме вынужденных колебаний (асимметричные резонансные максимумы) механизмы пластической деформации на стадии лёгкого скольжения и др. Работами Сиренко А. Ф. (1980–1990-е годы) и его ученика Рохманова Н. Я. с сотрудниками были определены: вклад магнитной составляющей ВТ переходных металлов при пластической деформации, характер амплитудной зависимости пересыщенных твёрдых растворов систем Al–Mg, Al–Cu при непрерывном распаде, низкочастотное ВТ в заэвтектидных Fe–C сплавах вблизи точки Кюри карбида железа. Впервые показано, путём экстрагирования цементита и изучения его теплового расширения, что ВТ вблизи точки Кюри цементита связано с термофлуктуационным межфазным трением магнитной природы. В соавторстве с Головиным И. С. и др. рассмотрены механизмы проявления X-релаксации в DO_3 -структурах системы Fe–Al.

В Киевском национальном университете имени Тараса Шевченко Максимюк П. А. и Онанко А. П. изучали ВТ сурьмы, висмута, кремния и многих сплавов с аморфной и микрокристаллической структурой, эффекты взаимодействия дислокаций и атомов примеси. В Харьковском автодорожном институте Рабухиным В. Б. с начала 80-х годов изучалось ВТ волокон с покрытиями, нитевидных кристаллах и тонких плёнок.

В Донецком физико-техническом институте АН Украины в 1970–1980-х годах сформировалось собственное направление изучения неупругости, сочетающее теоретические и экспериментальные исследования (Барьяхтар Ф. Г., Галкин А. А., Дацко О. И., Зильберман Л. А., Варюхин В. Н., Белошенко В. А. и др.). Наряду с получением опытных данных (ВТ чистого никеля, крупнозернистого алюминия, кобальта), решались задачи о механизме пиков Кёстера при больших деформациях, эффекте Симпсона–Сосина при ультразвуке, о поглощении ультразвука при движении дислокации в рельефе Пайерлса, о «пиковом эффекте» в поглощении ультразвука, о фоне ВТ в условиях гидростатического сжатия и при хрупко-пластичном переходе и др.

В Черновицком университете Стронгиным Б. Г. в 70-е годы создана группа исследователей (Варвус И. А., Олейнич А. В., Яковичин П. А. и др.) материалов с покрытиями, неравновесных систем и бериллия в контакте с жидкими средами.

В Винницком государственном педагогическом университете релаксационные процессы начали изучать с 1973 года, с приходом после аспирантуры Черновицкого университета Зузяка П. М. Объектом исследований являлись полигональные структуры сплавов алюминия (Зузяк П. М., Солоненко В. И., Сумский В. И.), теплофизические свойства и релаксационные явления в полимерах (Кучерук И. М., Заболотный В. Ф., Дидовык Н. В.). Позже начали изучать структурированные эластомеры — химически сшитые и радиационно-облучённые (Заболотный В. Ф. с 1978 г.), низколегированные стали перлитного класса (Атаманюк В. В. 1979–1987 гг.), волокнистые композиты с металлической и полимерной матрицами (Мозговой А. В., Лысый М. В. с 1980 г.), отпускную хрупкость в сталях, микропластичность в области температур хрупкопластического перехода (Недыбалюк А. Ф. с 1982 г.), бериллиевую бронзу (Билюк А. И. с 1987 г.).

В созданной под руководством Мозгового А. В. лаборатории релаксационных явлений (1982 г.) на протяжении тридцати лет постоянно усовершенствовалась экспериментальная база исследований. В результате создано несколько установок для: измерения рассеяния механической энергии в материалах с прямым и обратным маятником и электронной регистрацией параметров свободных затухающих колебаний; исследования поперечных свободных затухающих колебаний в звуковом диапазоне. Использование метода механической спектроскопии позволило изучить влияние: ТЦО на физико-химическое взаимодействие матрицы с армирующими волокнами, величины предварительной деформации на эксплуатационные характеристики волокнистых композиционных материалов с алюминиевыми матрицами и сталей мартенситного класса, что дало возможность решать задачи дальнейшего использования деталей, изготовленных из этих материалов.

Получены и изучены температурные спектры поглощения упругой энергии некоторых низколегированных сталей перлитного класса в температурном интервале 20–500°C, которые являются суперпозицией целого ряда неупругих эффектов ВТ, обусловленных структурно-фазовыми процессами, протекающими в этих сталях (Атаманюк В. В.). Проведённые исследования в инфразвуковом и звуковом диапазоне свободных затухающих колебаний позволили определить эксплуатационные характеристики лопаток газотурбинных двигателей и сталей мартенситного класса для изготовления валов этих двигателей, полимерных композитов с углеродными, стеклянными и базальтовыми волокнами для изготовления лопастей ветряных двигателей (Мозговой А. В.).

Получены сравнительные характеристики релаксационных спектров эластомеров, зашитых серой (до 30%) и радиационно-облучённых (до 1000 Мрад). Предложен способ определения коли-

чества серы, вступившей в реакцию сшивания теплофизическими методами для натурального каучука, СКМС-10, СКМС-30 (Заболотный В. Ф.).

Исследуется влияние термоциклирования в полях внешних нагрузок на структурные и фазовые превращения в бериллиевых бронзах и алюминиевых сплавах (Билюк А. И.). Проведённые исследования показали, что данная технологическая обработка дисперсионно-твердеющих сплавов позволяет стабилизировать субструктуру дисперсными частицами и обеспечивает дополнительное упрочнение материала. Выявлены новые эффекты рассеяния механической энергии в Zn, W в интервале температур хрупко-пластического перехода. Установлено влияние различных видов обработки на развитие микропластической деформации и спектры ВТ Zn, W, Cu, конструкционных сталей. Показана возможность использования метода механической спектроскопии для определения температурных интервалов хрупко-пластического перехода и отпусковой хрупкости (Недыбалюк А. Ф.).

Сказанное выше отражает научные изыскания только в области линейной релаксационной неупругости в твёрдых телах. Вопросы изучения гистерезисного *внутреннего рассеяния энергии механических колебаний в материалах* нашли в Украине и в России своё развитие и отражение на Всесоюзных и российских конференциях в Институте проблем прочности АН УССР («Рассеяние энергии при колебаниях упругих систем», 1960–1990 гг., Писаренко Г. С.), в Тульском государственном университете (с 1969 г. «Взаимодействие дефектов и свойства металлов и сплавов», Головин С. А.), в Вятском государственном техническом университете («Демпфирующие металлические материалы» с 1988 г., Кондратов В. М., Скворцов А. И.).

ПРИЛОЖЕНИЕ

Список ключевых монографий по проблеме в хронологическом порядке (по годам):

- 1948: С. Zener, *Elasticity and Anelasticity of Metals* (Chicago: University of Chicago: 1948).
- 1958: W. P. Mason, *Physical Acoustics and Properties of Solids* (Princeton: Van Nostrand: 1958).
- 1964: М. А. Криштал, Ю. В. Пигузов, С. А. Головин, *Внутреннее трение в металлах и сплавах* (Москва: Металлургиздат: 1964).
- 1972: А. S. Nowick and B. S. Berry, *Anelastic Relaxation in Crystalline Solids* (New York: Academic: 1972); А. Новик, Б. Берри, *Релаксационные явления в кристаллах* (Москва: Атомиздат: 1975) (перевод с англ.).
- 1972: R. De Batist, *Internal Friction of Structural Defects in Crystalline Solids* (Amsterdam: North Holland Publ. Comp.: 1972).
- 1974: В. С. Постников, *Внутреннее трение в металлах* (Москва: Металлургия: 1974).

- 1985: С. П. Никаноров, Б. К. Кардашев, *Упругость и дислокационная неупругость кристаллов* (Москва: Наука: 1985).
- 1987: С. А. Головин, А. Пушкар, Д. М. Левин, *Упругие и демпфирующие свойства конструкционных материалов* (Москва: Металлургия: 1987).
- 1991: *Метод внутреннего трения в металлургических исследованиях* (Ред. М. А. Блантер, Ю. В. Пигузов) (Москва: Металлургия: 1991).
- 2001: *Mechanical Spectroscopy Q^{-1} 2001: with Applications to Materials Science: Proceedings of the Summer School Q^{-1} 2001 (Aussois, France, 2001-06-25–2001-06-25)*. *Materials Science Forum*. Vol. **366–368** (Eds. R. Schaller, G. Fantozzi, and G. Gremaud) (Zuerich-Uetikon: Trans Tech Publication Ltd: 2001).
- 2007: М. S. Blanter, I. S. Golovin, H. Neuhäuser, and H.-R. Sinning, *Internal Friction in Metallic Materials: A Handbook. Handbook, Springer Series in Materials Science* (Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag: 2007).
- 2011: K. L. Ngai, *Relaxation and Diffusion in Complex Systems* (New York–Dordrecht–Heidelberg–London: Springer: 2011).
- 2012: И. С. Головин, *Внутреннее трение и механическая спектроскопия металлических материалов: Учебник* (Москва: Изд. дом МИСиС: 2012).

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. C. Zener, *Phys. Rev.*, **52**, No. 3: 230 (1937).
2. C. Zener, *Phys. Rev.*, **53**, No. 1: 90 (1938).
3. V. D. Natsik and P. P. Pal-Val, *Materials Science and Engineering A*, **164**: 312 (1993).
4. L. B. Magalas, S. A. Golovin, and B. M. Darinskii, *Solid State Phenomena*, **115**: 15 (2006).
5. S. A. Golovin, *Solid State Phenomena*, **137**: 231 (2008).
6. М. S. Blanter, I. S. Golovin, H. Neuhäuser, and H.-R. Sinning, *Internal Friction in Metallic Materials: A Handbook. Handbook, Springer Series in Materials Science* (Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag: 2007).
7. L. B. Magalas, *Materials Science and Engineering A*, **521–522**: 405 (2009).

REFERENCES

1. C. Zener, *Phys. Rev.*, **52**, No. 3: 230 (1937).
2. C. Zener, *Phys. Rev.*, **53**, No. 1: 90 (1938).
3. V. D. Natsik and P. P. Pal-Val, *Materials Science and Engineering A*, **164**: 312 (1993).
4. L. B. Magalas, S. A. Golovin, and B. M. Darinskii, *Solid State Phenomena*, **115**: 15 (2006).
5. S. A. Golovin, *Solid State Phenomena*, **137**: 231 (2008).
6. М. S. Blanter, I. S. Golovin, H. Neuhäuser, and H.-R. Sinning, *Internal Friction in Metallic Materials: A Handbook. Handbook, Springer Series in Materials Science* (Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag: 2007).
7. L. B. Magalas, *Materials Science and Engineering A*, **521–522**: 405 (2009).