



И.С. Головин

**каф. физического материаловедения
ИНСТИТУТ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ**



**Внутреннее трение и механическая спектроскопия
металлических материалов**

курс по выбору



Терминология:

ВТ - Внутреннее трение:

совокупность физических процессов, приводящих к рассеянию энергии механических колебаний в упругой области нагружения материалов.

МС - Механическая спектроскопия:

метод исследования частотных, температурных и амплитудных спектров рассеяния энергии в материалах при их циклическом нагружении.





МИСиС в 50-60-е годы:

Б.Н. Финкельштейн, Ю.В. Пигузов,
Г.М. Ашмарин, М.Л. Бернштейн,
Ю.Х. Векилов, В.П. Елютин,
И.Б. Кекало, И.А. Томилин и др.

Систематическое исследование физических механизмов неупругости в материалах начато в МИСиС в 50-е годы под руководством профессора Б.Н. Финкельштейна

М И С и С

1st All-Union Scientific Conference on
Relaxation Phenomena in Metals and Alloys,
1958, Moscow

Published in: Relaxation Phenomena in Metals and Alloys.

Ed. by B.N. Finkelstein, Moskva,

GNTI on Ferrous and Non-ferrous Metallurgy, 1960, pp. 320 



Метод ВТ и МС в МИСиС развивали:

Ю.С. Авраамов, А.Н. Иванов,
М.А. Штремель, С.Д. Прокошкин, Е.К.
Наими, Д.Е. Капуткин и другие.

Именем Финкельштейна и Розина назван в мировой литературе эффект неупругой релаксации, связанный с переориентацией под напряжением пар атомов внедрения в сплавах с ГЦК решеткой, открытие которого ранее считалось принадлежащим Кê и Тсьену:

Rosin, K.M., Finkelshtein, B.N. (1953) Dok Akad Nauk SSSR **91**:811–814
Kê, T.S., Tsien, C.T. (1956) Scientia Sinica **5**:625
Kê, T.S., Tsien, C.T. (1957) Fiz Metallov I Metallovedenie **4**:291–305



Внутреннее трение:

способность материала трансформировать энергию механических колебаний в тепло за счет различных процессов на атомном уровне.

При этом подразумевается, что материал не претерпевает необратимых структурных изменений



Внутреннее трение

совокупность физических процессов, приводящих к неупругому поведению материалов в упругой области нагружения.

$$(\sigma + \Phi \tau_\varepsilon) = M_R (\varepsilon + \Xi \tau_\sigma)$$

Уравнение стандартного неупругого твердого тела (Зинера)

$$\operatorname{tg}\varphi(\omega) = \frac{\eta\omega}{E}$$

$$J_U = 0 \text{ и } \tau_\sigma = \tau = \eta/E$$

Модель Кельвина-Войгта нет
мгновенной деформации

$$\operatorname{tg}\varphi(\omega) = \frac{\Delta}{\sqrt{1+\Delta}} \frac{\omega\sqrt{\tau_\sigma\tau_\varepsilon}}{1+\omega^2\tau_\sigma\tau_\varepsilon}$$

Уравнения Дебая
(внутреннее трение: $Q^{-1}(\omega) = \operatorname{tg}\varphi$)

$$\operatorname{tg}\varphi(\omega) = \frac{1}{\omega\tau}$$

$$E_2 = 0 \text{ и } \tau = \eta/\delta E$$

Модель Максвелла

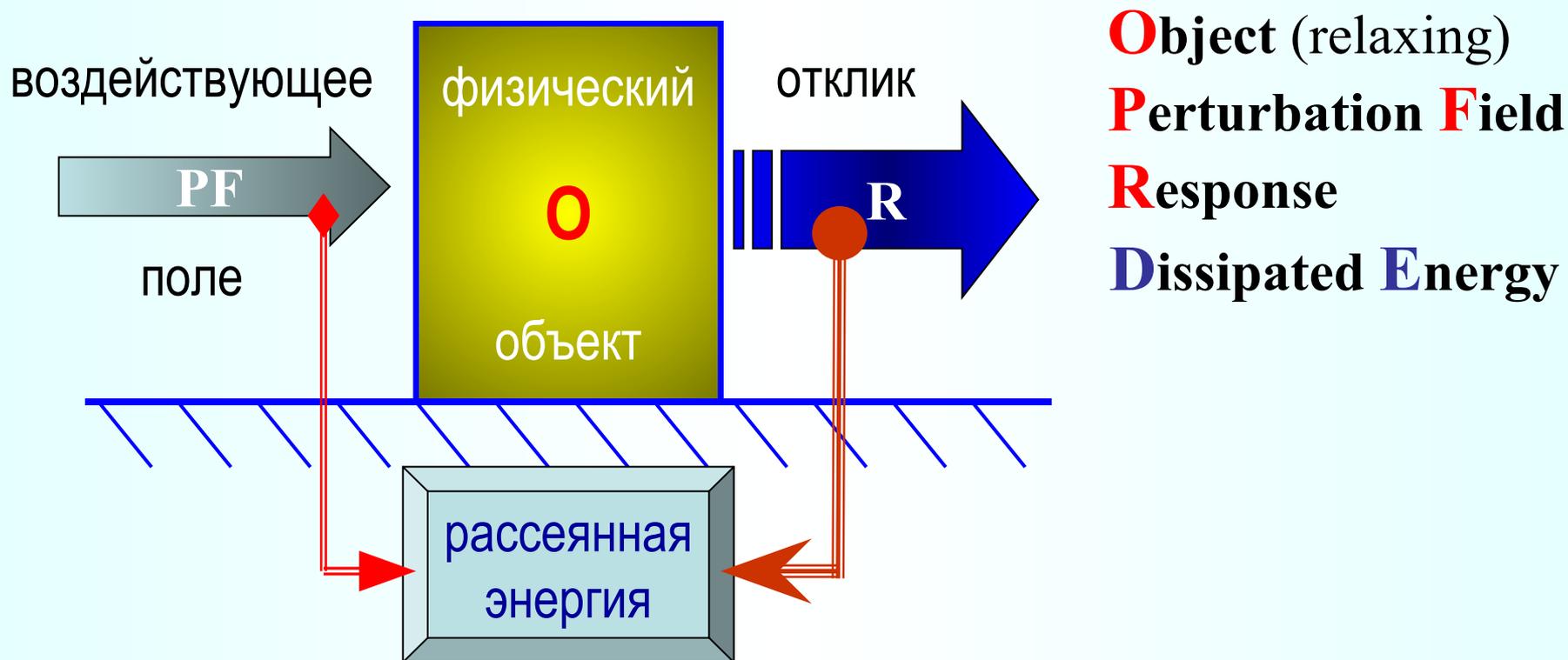
нет полного восстановления

Внутреннее рассеяние энергии

близкое понятие, однако в этом случае поведение материала не ограничено рамками упругости



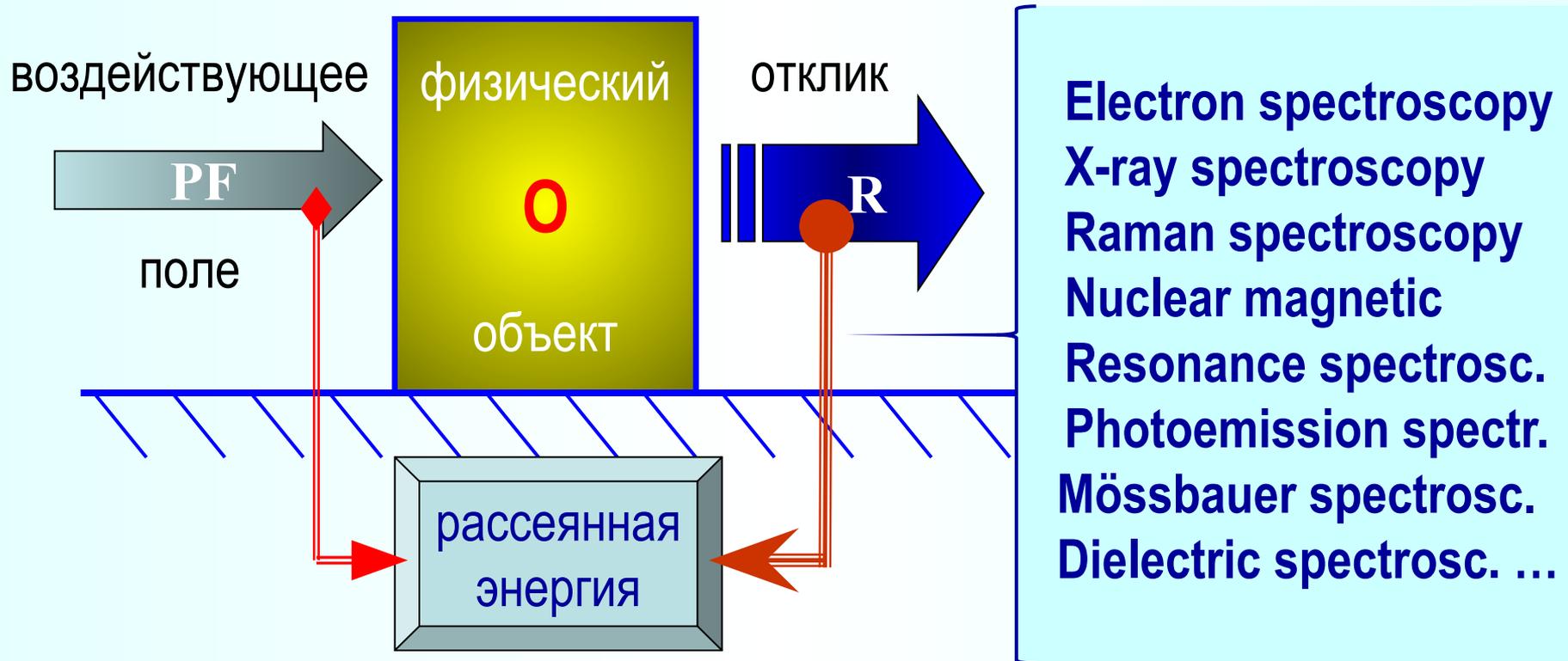
Концепция механической спектроскопии



Спектроскопия - раздел физики и аналитической химии, посвященный изучению спектров взаимодействия воздействующего поля (часто излучения) и материи.



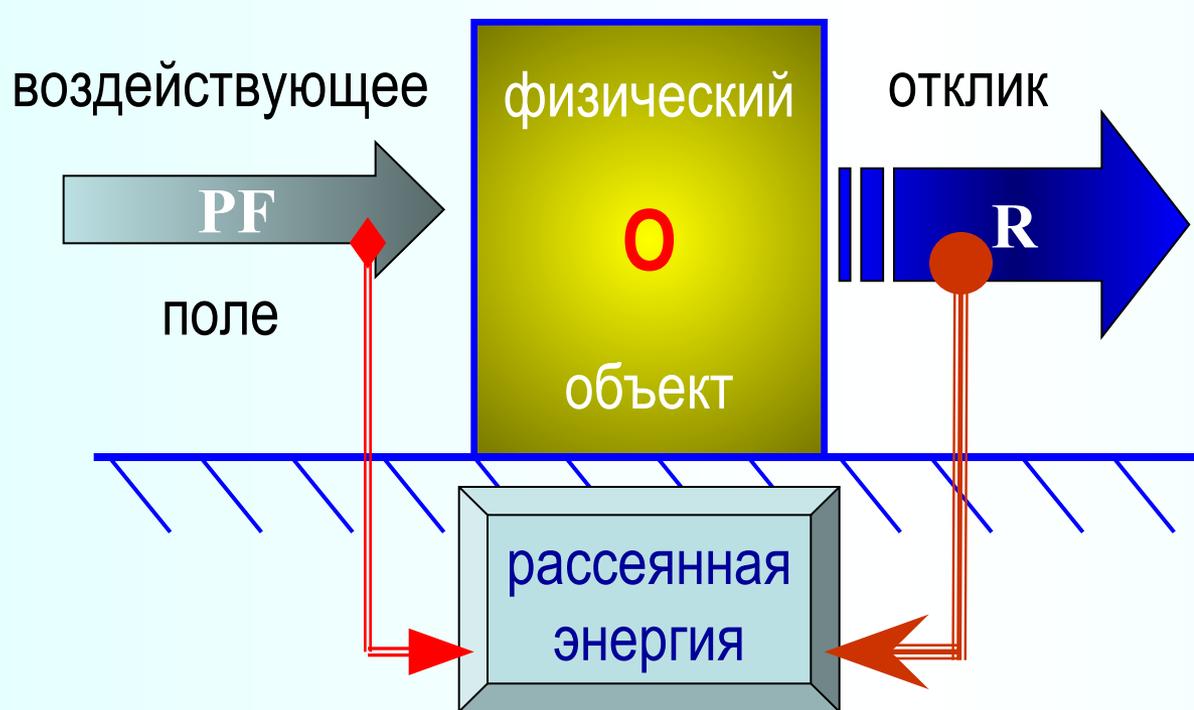
Различные спектроскопические методы:



Любой вид спектроскопии заключается в изучении энергии *поглощенной или рассеянной* физическим объектом, подвергнутым воздействию **возбуждающегося поля**



Концепция **МЕХАНИЧЕСКОЙ** спектроскопии



Object (relaxing)
Perturbation **F**ield
Response
Dissipated **E**nergy

Воздействующее поле σ поле механических напряжений
Отклик ε деформация
Рассеянная энергия Q^{-1} внутреннее трение



Механическая спектроскопия изучает:

- **Частотные** ЧЗВТ,
- **Температурные** ТЗВТ,
- **Временные** ВЗВТ,
- **Амплитудные** АЗВТ

зависимости (спектры) рассеянной энергии (внутреннего трения) и модулей упругости



Механическая спектроскопия позволяет исследовать поведение:

- *Атомов* внедрения и замещения (эффекты Снука, Зинера, Финкельштейна)
- *Дислокаций* и дислокационно-примесное взаимодействие (эффекты Бордони, Хасигути, Кёстера, Гранато и Люкке)
- *Границ* зерен (релаксация Ке)
- Магнитных *доменов*
- *Фазовые* диффузионные и сдвиговые превращения

и многое другое



Механическая спектроскопия позволяет решать следующие задачи материаловедения:

- диффузионные задачи, адсорбция
- определение границ растворимости,
- взаимодействие между атомами, вакансиями, дислокациями,
- закалочное и деформационное старение,
- дефекты в облученных кристаллах,
- пластическая деформация и рекристаллизация
- сплавы-накопители водорода
- сплавы памяти формы
- высокодемпфирующие и высокооборотные сплавы



Пример:

СВД – Сплавы Высокого Демпфирования

В них способность рассеивать энергию механических колебаний является основной эксплуатационной характеристикой.

СВД должны обеспечить гашение колебаний в широком интервале температур, частот и амплитуд.

Только ограниченное количество физических механизмов демпфирования в металлических материалах способно обеспечить это требование.



Примеры нежелательных вибраций

Строительство

Мосты

(теле) Башни

Ветряки (Европа)

(высотные) Здания

при землетрясениях

нефте-газо трубопроводы

Транспорт

Железная дорога,

метрополитен, трамваи ..

Оборонка

Подводные лодки

Прицелы (авиация, танки)

Авиация, ракетостроение

Промышленность

Турбины

Механические цеха

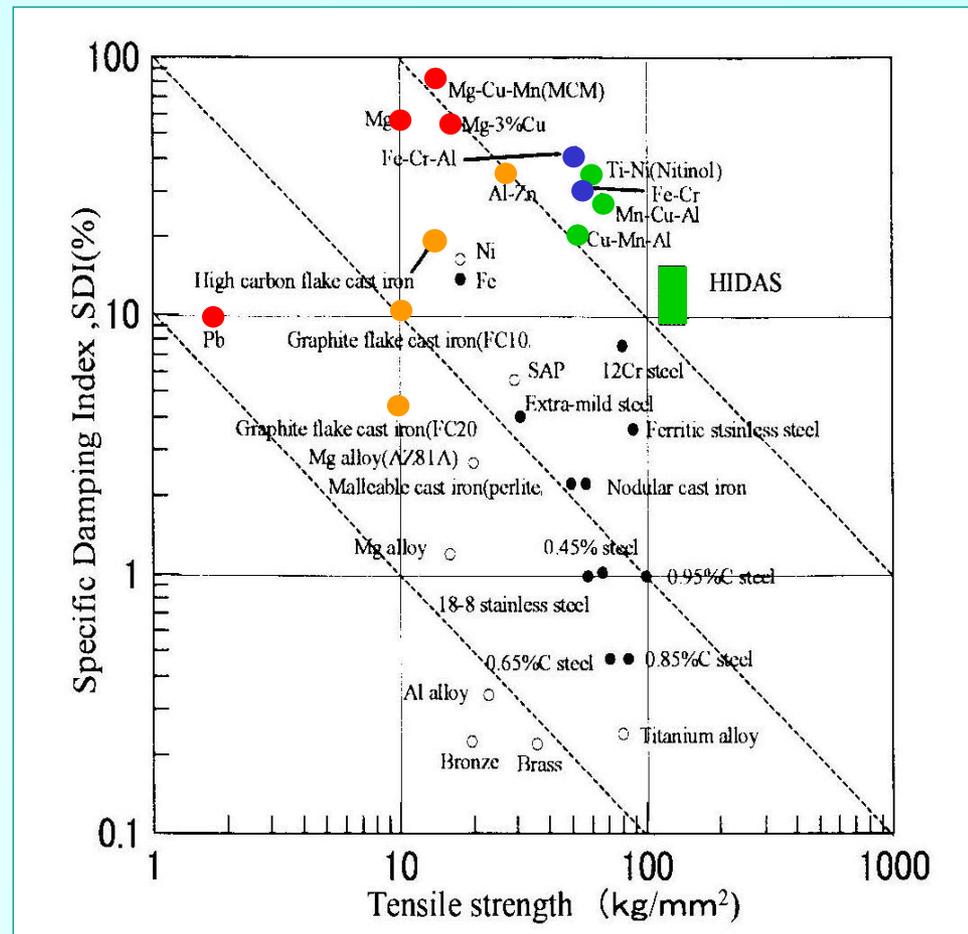
Пилы, державки резцов,

Отбойный инструмент



Классификация СВД

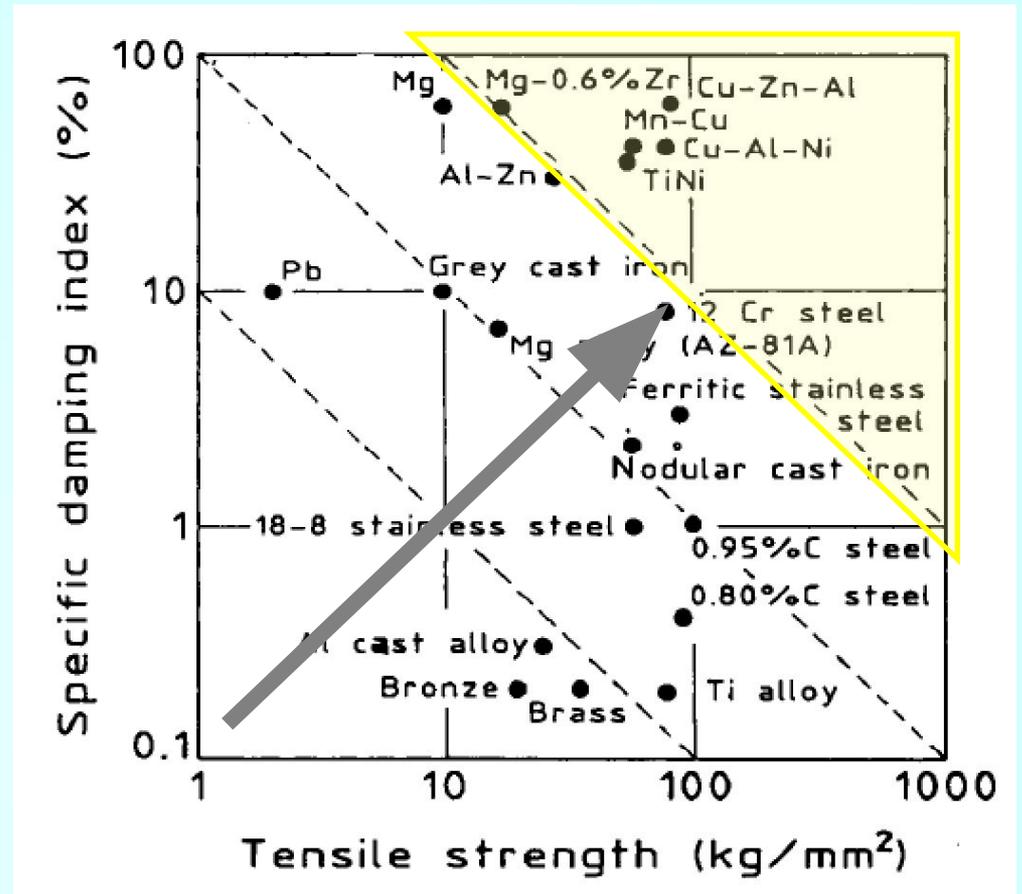
По уровню демпфирования
Демпфирование – прочность
Механизм демпфирования
Структурная особенность,
обеспечивающая работу
(группы) механизмов



1. **Материалы** с высокой гетерогенностью структуры - чугуны
 2. **Материалы** с термоупругим мартенситом - TiNi, Mn-Cu, Cu-Al
 3. **Материалы** с магнитными доменами - Fe-Al, Fe-Cr, NiCo
 4. **Материалы** с легкоподвижными дислокациями - сплавы Mg
1. **Материалы** с экстремально высоким содержанием водорода Pd, Zr, Ti



СВД



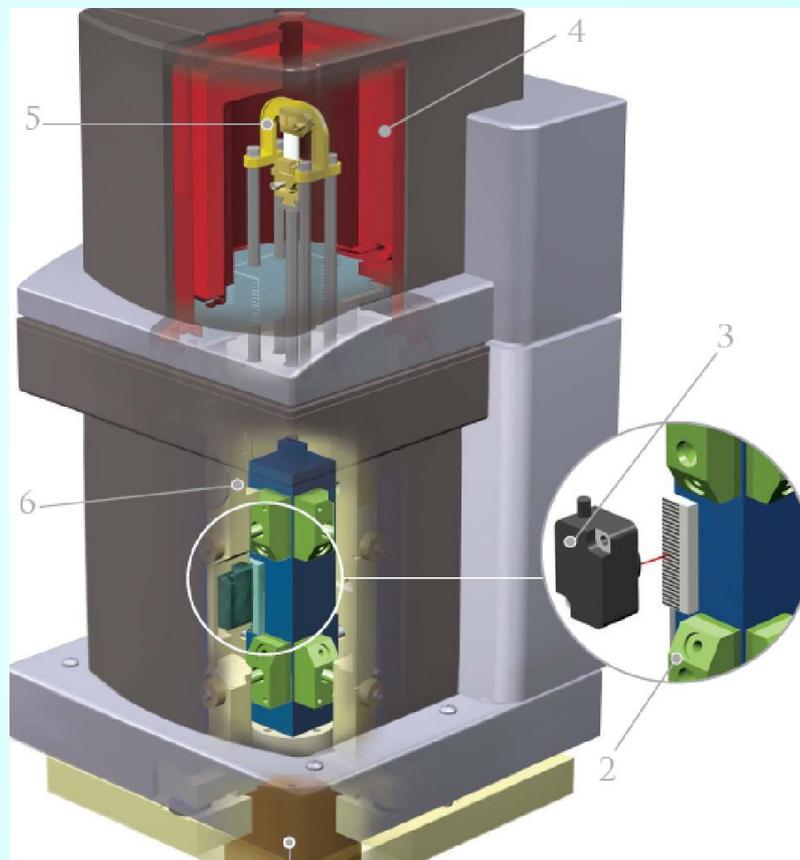
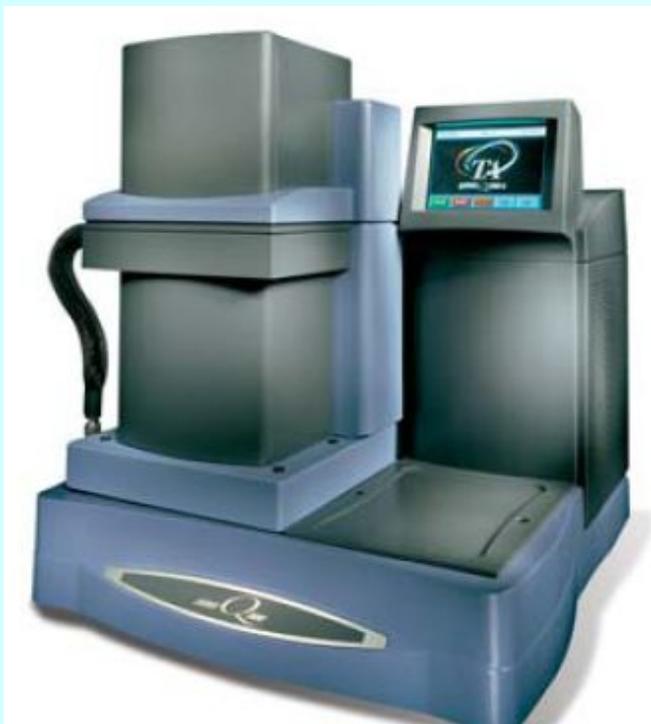
Главная идея:

Одновременное обеспечение высоких прочностных и вибропоглощающих свойств материалов! Механизмы обсуждаются.



Оборудование ИНМиНТ

Динамический механический
анализатор
DMA Q800 TA Instruments



Оснащен
оптической системой
(optical encoder) регистрации деформации (разрешающая
способность 1 нм) и воздушным подшипником плавного нагружения



Обеспечивает работу с использованием различных схем напряженного состояния в материале



Динамический анализатор DMA Q800 TA Instruments (2008)



Возможности:

Вынужденные колебания

Мера неупругости: $\tan\phi \approx Q^{-1}$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cos(\omega t)$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cos(\omega t - \phi)$$

Режимы:

Температурные зависимости:

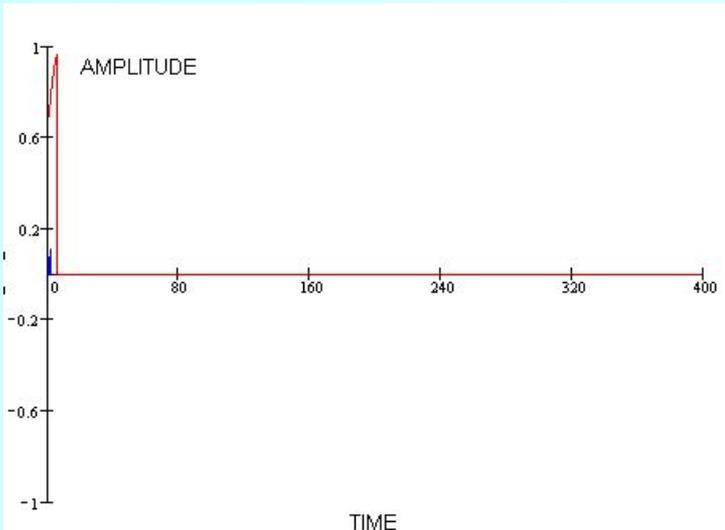
25-400 °C: T3BT и T3МУ

Частотные зависимости:

0.01-200 Гц: ЧЗBT и ЧЗМУ

Амплитудные зависимости:

<18 МПа: АЗBT и АЗМУ



принцип измерений



1. Научная работа - оборудование



Динамический анализатор DMA Q800 TA Instruments (2008)

Возможности:

Вынужденные колебания

Мера неупругости: $\tan\phi \approx Q^{-1}$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cos(\omega t)$$
$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cos(\omega t - \phi)$$

Режимы:

Температурные зависимости:

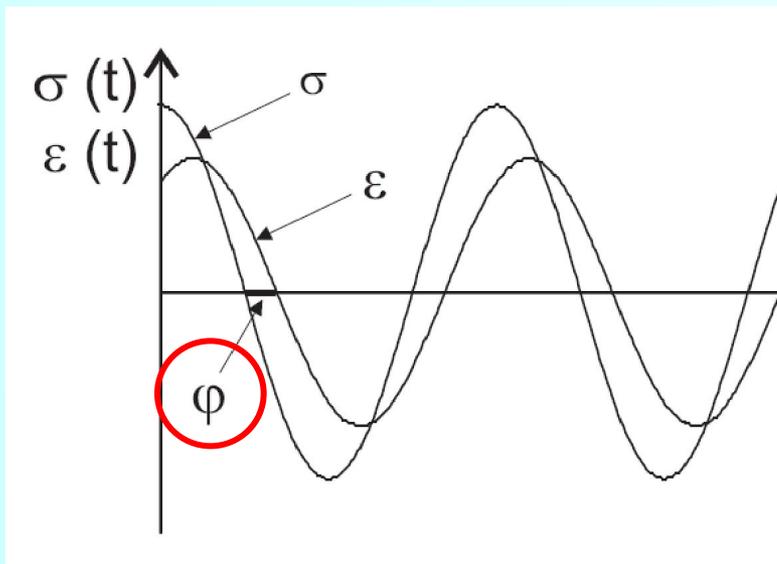
25-400 °C: ТЗВТ и ТЗМУ

Частотные зависимости:

0.01-200 Гц: ЧЗВТ и ЧЗМУ

Амплитудные зависимости:

<18 МПа: АЗВТ и АЗМУ



Динамический анализатор DMA Q800 TA Instrument (2008)



Области перспективного применения:

- 1) Сплавы с регламентируемым уровнем демпфирующей способности (СВД, высокодобротные материалы)
- 2) Сплавы памяти с обратимым мартенситным превращением, СПФ, метамагнитные сплавы типа Ni_2MnGa
- 3) Ультра мелко кристаллические и наноструктурированные материалы (напр., эффекты зернограничной релаксации)
- 4) Неметаллические (полимеры, керамики) материалы
- 5) Сплавы – накопители водорода (охлаждающая система), высокопористые материалы (напр., металлические пены) и другие.



Часть 1.

Лекция 1. Внутреннее рассеяние энергии

Лекция 2. Сплавы высокого демпфирования

Лекция 3. Упругость или неупругость?

Лекция 4. Внутреннее трение и механическая спектроскопия. Реологические модели.

Лекция 5. Основы теории «внутреннего трения». Стандартное твёрдое тело. Дебаевский пик.

Лекция 6. Динамические свойства стандартного неупругого тела при изменении температуры.

Лекция 7. Определение энтальпии активации.

Лекция 8. Правило отбора. Обзор релаксационных эффектов.

Лекция 9. Релаксация Снука.

Презентация по СВД

Индивидуальная работа с англоязычной литературой

Тест №1



Часть 2.

Лекция 11. Техника эксперимента.

Лекция 12. Динамические свойства нестандартного неупругого тела.

**Лекция 13. Релаксация Снука: от металлов к сплавам.
Релаксация Зинера и ФР.**

Лекция 14. Релаксационные эффекты, обусловленные дислокациями и дислокационно-примесным взаимодействием.

Лекция 15. Гистерезисные и резонансные эффекты, обусловленные дислокациями.

Лекция 16. Магнитоупругое рассеяние энергии.

Лекция 17. Неупругость, обусловленная фазовыми и структурными превращениями

Лабораторные работы

Индивидуальная работа с оригинальной литературой

Тест №2 / Общий зачет

