

## ЧТО ТАКОЕ ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ

М. С. БЛАНТЕР

Московская государственная академия приборостроения и информатики

### WHAT INTERNAL FRICTION IS ABOUT

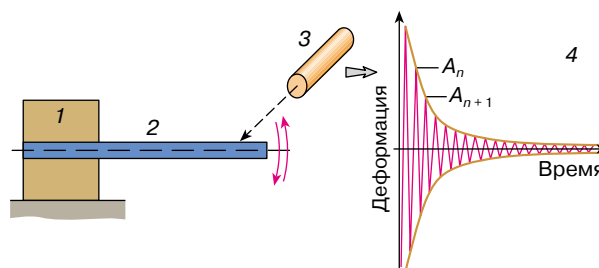
M. S. BLANTER

*The processes going on under small applied mechanical stress are discussed. The processes result in unelasticity and dissipation of the energy of mechanical vibrations – in internal friction. As an example, the mechanism of internal friction caused by diffusion under stress of interstitial atoms in a metal body-centered cubic crystal lattice is considered.*

*Обсуждаются процессы, происходящие в твердом теле под действием малых механических напряжений и приводящие к неупругости и рассеянию энергии механических колебаний – внутреннему трению. В качестве примера рассмотрен механизм внутреннего трения, вызванного диффузией под напряжением внедренных атомов в объемно-центрированной кубической кристаллической решетке металла.*

### ВВЕДЕНИЕ

Проведем простой эксперимент: закрепим металлическую пластину с одного конца и слегка надавим на свободный конец (рис. 1). Пластина упруго изогнется и, после того как мы отпустим свободный конец, начнет колебаться. Колебания будут затухающими, и основной причиной затухания будет сопротивление воздуха, то есть внешнее трение. Казалось бы, что, если теперь устранить внешнее трение, то есть поместить колеблющуюся пластину в глубокий вакуум, затухание будет ничтожно малым. Однако оказывается, что устранение трения о воздух не устраняет полностью затухания: при малом давлении воздуха затухание уже практически не зависит от давления и определяется материалом и состоянием пластины, а также ее температурой, частотой и амплитудой колебаний, то есть процессами, происходящими в самой пластине. Вот это затухание механических колебаний в твердом теле, определяемое внутренними процессами, происходящими в нем под действием знакопеременных напряжений, называется внутренним трением. Можно сформулировать это иначе: *внутреннее трение* – это рассеяние энергии упругих колебаний за счет внутренних процессов в твердом теле. При этом механическая энергия переходит в тепловую, которая отводится постепенно во внешнюю среду. Частным случаем внутреннего трения является поглощение ультразвука в твердом теле.



**Рис. 1.** Схема измерения затухания колеблющейся пластины: 1 – держатель; 2 – образец; 3 – оптическое устройство регистрации колебаний; 4 – изменение амплитуды колебаний со временем

Мерой внутреннего трения является обратная добротность  $Q^{-1}$ , которую можно измерить по уменьшению амплитуды колебаний  $A$  (см. рис. 1):

$$Q^{-1} = \frac{\delta}{\pi} = \frac{\ln \frac{A_n}{A_{n+1}}}{\pi},$$

где  $A_n$  и  $A_{n+1}$  — две последовательные амплитуды затухающих колебаний,  $\delta = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}}$  — логарифмический декремент затухания.

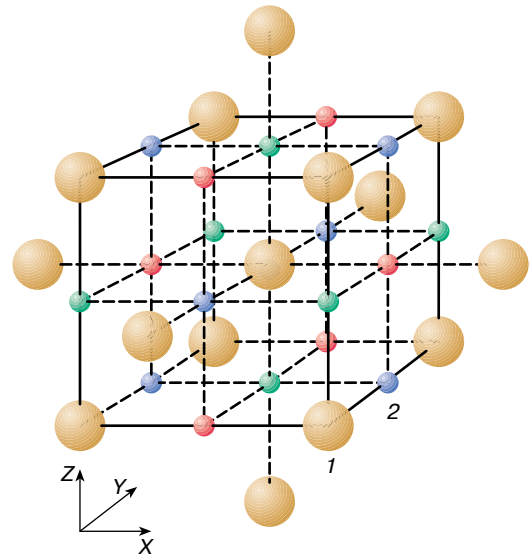
Внутреннее трение может вызываться рядом процессов в твердом теле, и каждый такой процесс дает свой максимум на графике зависимости  $Q^{-1}$  от частоты колебаний образца  $f$ . Эти максимумы составляют спектр внутреннего трения. Измерение внутреннего трения широко используется для изучения вызывающих его процессов и дает уникальную информацию о диффузии, дефектах кристаллического строения, дислокационной структуре, границах зерен и т.д.

Внутреннее трение представляет также интерес и с технической точки зрения. Разработаны специальные материалы с высоким уровнем внутреннего трения (материалы высокого демпфирования), которые применяются для изготовления деталей различных конструкций, машин, приборов, в которых высокий уровень рассеяния энергии механических колебаний приводит к их быстрому гашению. Например, такие функции наряду с чисто конструктивными выполняет чугунная станина металлорежущего станка или металлическая прокладка головки блока двигателя внутреннего сгорания.

В других случаях нужны материалы с очень низким затуханием, например металлические материалы для звукопроводов или кварц для кварцевых генераторов частоты. Кварц используется в очень многих электронных приборах — от часов до компьютеров.

## РЕЛАКСАЦИЯ СНУКА

В качестве примера процесса, приводящего к внутреннему трению, рассмотрим перераспределение внедренных атомов в кристаллической решетке под действием напряжения (Дж. Снок, J.L. Snoek, 1939 г.). На рис. 2 большими кружками обозначено положение атомов металла, образующих объемно-центрированную кубическую решетку (ОЦК) (такую кристаллическую решетку имеют железо, ниобий, ванадий, тантал и другие металлы). Маленькие чужеродные атомы (O, N, C) занимают в такой решетке так называемые октаэдрические междуузлия (позиции между узлами решетки), обозначенные на рис. 2 маленькими кружками. Они называются октаэдрическими потому, что каждое меж-



**Рис. 2.** Расположение атомов металла (1) и октаэдрических междуузлий (2) в объемно-центрированной кубической кристаллической решетке. Красным, синим и зеленым цветами показаны соответственно междуузлия подрешеток X, Y, Z

доузлие окружено шестью атомами металла — двумя ближайшими к междуузлию и четырьмя чуть дальше.

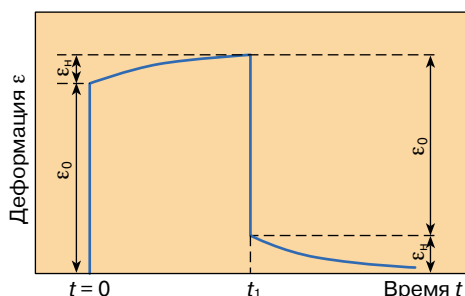
Внедренный атом больше междуузлия и поэтому раздвигает ближайшие атомы металла, преимущественно деформируя кристаллическую решетку вдоль направлений X, Y или Z. Междуузлия можно сгруппировать в три подрешетки — X, Y, Z, различающиеся направлением деформации кристаллической решетки при внедрении чужеродного атома. Например, у междуузлий подрешетки X два ближайших атома металла расположены вдоль оси X. В ОЦК-решетке на один атом металла приходится по одному междуузлию подрешеток X, Y, Z. Концентрация чужеродных атомов мала (0,001–1 ат. %), и потому большинство междуузлий свободно.

При отсутствии внешнего напряжения внедренные атомы с равной вероятностью заполняют междуузлия всех трех подрешеток:  $C_X = C_Y = C_Z = N_{\text{вн}} / (3N_{\text{мет}})$ , где  $C_X, C_Y, C_Z$  — доля занятых междуузлий в подрешетках X, Y, Z соответственно,  $N_{\text{вн}}$  — общее число внедренных атомов,  $N_{\text{мет}}$  — общее число атомов металла. Если приложить внешнее растягивающее напряжение вдоль оси Z, атомы металла вдоль оси Z раздвинутся, а вдоль осей X и Y сблизятся, так что объем междуузлий подрешетки Z немного увеличится, а подрешеток X и Y немного уменьшится. Это облегчит растворение внедренных атомов в междуузлиях подрешетки Z и затруднит в подрешетках X и Y. В результате внедренные атомы будут

переходить из подрешеток  $X$  и  $Y$  в междуузлия подрешетки  $Z$ :  $C_Z > C_X (= C_Y)$ . Такой переход осуществляется диффузионным путем, то есть обычным термоактивированным прыжком из междуузлия  $X$  или  $Y$  в одно из ближайших междуузлий  $Z$ . Внешнее приложенное напряжение мало и не изменяет коэффициент диффузии, а только задает ее преимущественное направление.

Такой процесс получил название диффузии под напряжением. Как любой диффузионный процесс, он постепенно развивается во времени. По мере развития этого процесса и скопления внедренных атомов в междуузлиях подрешетки  $Z$  кристалл будет дополнительно деформироваться (растягиваться) вдоль оси  $Z$ . Это приведет к тому, что деформация твердого тела перестанет быть чисто упругой, то есть в любой момент времени пропорциональной приложенному напряжению (рис. 3). При приложении напряжения в момент времени  $t = 0$  мгновенно возникает чисто упругая деформация  $\epsilon_0$  и в течение некоторого времени нарастает вызванная перераспределением внедренных атомов деформация  $\epsilon_n$ . При снятии внешнего напряжения в момент времени  $t_1$  упругая деформация  $\epsilon_0$  также снимается мгновенно, а  $\epsilon_n$  — постепенно. Эта дополнительная деформация  $\epsilon_n$  является обратимой, как и упругая деформация  $\epsilon_0$  (обратимая означает, что она исчезает после снятия напряжения), и называется неупругой. Неупругая деформация мала:  $\epsilon_n \ll \epsilon_0$ . Деформирование образца после снятия нагрузки называется упругим последствием.

Из-за появления неупругой деформации обратимая деформация отстает по времени от вызывающего ее внешнего приложенного напряжения, то есть изменяется со сдвигом по фазе по отношению к вызывающему ее напряжению. В случае колебаний напряжение  $\sigma$  изменяется со временем  $t$  по синусоидальному закону:  $\sigma = A_\sigma \sin(2\pi ft)$ , где  $A_\sigma$  — амплитуда приложенного напряжения,  $f$  — частота колебаний. Деформация следует за напряжением по такому же закону, но с отставанием по фазе на угол  $\psi$  (угол потерь):  $\epsilon = A_\epsilon \sin(2\pi ft - \psi)$ ,



**Рис. 3.** Зависимость деформации от времени при наличии неупругости

где  $A_\epsilon$  — амплитуда деформации. Сдвиг по фазе отклика тела на какое-нибудь воздействие на это тело приводит к рассеянию энергии (в нашем случае воздействием является приложение напряжения, а откликом — вызываемая этим напряжением деформация). Например, такое рассеяние происходит при перемагничивании ферромагнетика из-за магнитного гистерезиса, то есть расхождения по фазе изменения напряженности намагничивающего поля и намагниченности вещества. В случае неупругости сдвиг по фазе напряжения и деформации приведет к рассеянию энергии механических колебаний — внутреннему трению — и величина внутреннего трения  $Q^{-1}$  определяется величиной фазового сдвига:  $Q^{-1} = \tan \psi$ . Связь внутреннего трения с величиной  $f$  приводит к появлению максимумов внутреннего трения на кривой  $Q^{-1} - f$ .

При очень малых частотах колебаний образца внедренные атомы успевают перераспределяться при изменении напряжения и  $\psi = 0$  и  $Q^{-1} = 0$ . При очень высоких частотах внедренные атомы не успевают перераспределяться, неупругая деформация равна 0 и опять  $\psi = 0$  и  $Q^{-1} = 0$ . Максимальное внутреннее трение будет при некоторой промежуточной частоте колебаний, которая определяется скоростью перераспределения внедренных атомов и скоростью изменения неупругой деформации со временем. Скорость изменения неупругой деформации описывается так называемым временем релаксации  $\tau$ .

### ВРЕМЯ РЕЛАКСАЦИИ

Процесс спада неупругой деформации после снятия приложенного напряжения есть процесс возвращения в равновесное состояние, из которого твердое тело было выведено приложенным напряжением, то есть носит релаксационный характер (релаксация — это возвращение в равновесное состояние). Кинетика релаксационного процесса описывается временем релаксации  $\tau$ , которое определяет изменение неупругой деформации  $\epsilon_n$  со временем  $t$ :

$$\epsilon_n(t) = \epsilon_n(t_1) \exp\left(-\frac{t-t_1}{\tau}\right), \quad (1)$$

где  $\epsilon_n(t_1)$  — неупругая деформация в момент снятия приложенного напряжения  $t_1$  (см. рис. 3).

В случае релаксации Снукса, вызываемой диффузией под напряжением внедренных атомов в кристаллической ОЦК-решетке, скорость процесса определяется диффузией внедренных атомов. Основная диффузионная характеристика — коэффициент диффузии  $D$ :

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{H}{kT}\right), \quad (2)$$

где  $D_0$  – не зависящий от температуры предэкспоненциальный множитель,  $H$  – энергия активации диффузии (величина энергетического барьера при переходе внедренного атома из одного междоузлия в соседнее свободное),  $k$  – постоянная Больцмана ( $k = 8,617 \cdot 10^{-5}$  эВ · К<sup>-1</sup>),  $T$  – абсолютная температура. Время релаксации оказывается тем меньше, чем выше скорость диффузии (больше коэффициент  $D$ ):

$$\tau = \frac{a^2}{\beta D}, \quad (3)$$

где  $a$  – период кристаллической решетки (расстояние между атомами металла на ребре куба, см. рис. 2),  $\beta$  – коэффициент, определяемый путями диффузионных перескоков атомов в кристаллической решетке.

Описанное выше перераспределение внедренных атомов по октаэдрическим междоузлиям при приложении небольшого внешнего напряжения – релаксация Снука – приводит к затуханию при циклической деформации образца (механических колебаниях). Зависимость внутреннего трения от частоты колебаний образца  $f$  и времени релаксации  $\tau$  описывается формулой Дебая

$$Q^{-1} = 2Q_{\max}^{-1} \frac{2\pi f\tau}{1 + (2\pi f\tau)^2}. \quad (4)$$

Максимальное значение внутреннего трения, равное  $Q_{\max}^{-1}$ , наблюдается при  $2\pi f\tau = 1$  ( $Q_{\max}^{-1} \sim \varepsilon_n(t_1)$  в формуле (1)).

Максимум  $Q_{\max}^{-1}$  внутреннего трения в случае релаксации Снука тем больше, чем выше концентрация диффундирующих внедренных атомов и чем сильнее каждый внедренный атом искажает кристаллическую решетку металла. По появлению максимумов Снука можно обнаружить очень малые концентрации внедренных атомов (0,0001–0,001 ат. %).

### СПЕКТР ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ

Если в твердом теле существуют несколько релаксационных процессов с разными значениями времени релаксации (например, вызванные диффузией под напряжением различных внедренных атомов – О, N или С – в одном металле), то на зависимости внутреннего трения от частоты колебаний образца появляется несколько максимумов, каждый из которых определяется своим релаксационным процессом и дает информацию об этом процессе. Эти максимумы образуют спектр внутреннего трения, а метод исследования тонкого строения твердых тел по максимумам внутреннего трения называется механической спектроскопией.

Для того чтобы снять спектр внутреннего трения, нужно изменять частоту колебаний образца в очень

широком диапазоне, что затруднительно, а часто просто невозможно. Проще получить спектр внутреннего трения на температурной зависимости внутреннего трения. Из формул (2) и (3) следует, что время релаксации Снука зависит от температуры:

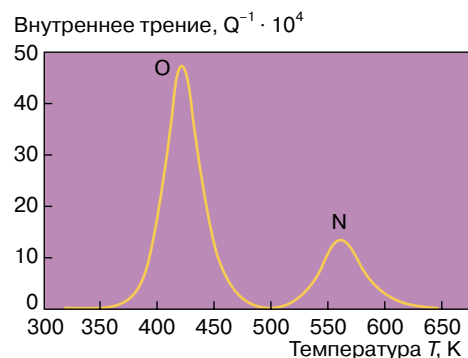
$$\tau = \tau_0 \exp \frac{H}{kT}, \quad \tau_0 = \frac{a^2}{\beta D_0}. \quad (5)$$

Аналогичная сильная экспоненциальная зависимость наблюдается и для других релаксационных процессов, поэтому, изменяя температуру  $T$  и, следовательно,  $\tau$  при  $f = \text{const}$ , можно получить максимум внутреннего трения при  $T_{\max} = -\frac{H}{k \ln(2\pi f\tau_0)}$ , как это следует из формул (4) и (5). Например, для диффузии атомов N и O в Nb энергия активации диффузии  $H$  равна соответственно 1,575 и 1,154 эВ, а  $\tau_0$  –  $1,22 \cdot 10^{-15}$  и  $2,70 \cdot 10^{-15}$  с, и максимумы наблюдаются при частоте колебаний  $f = 1$  Гц при температурах 562 и 422 К соответственно. Эта часть релаксационного спектра ниобия представлена на рис. 4.

Из формул (4) и (5) следует метод определения параметров релаксационного процесса  $\tau_0$  и  $H$ . Для этого нужно определить температуры максимумов  $T'_{\max}$  и  $T''_{\max}$  при двух частотах  $f'$  и  $f''$  (с увеличением частоты максимумы сдвигаются к более высоким температурам):

$$H = \frac{k \ln \frac{f'}{f''}}{\frac{1}{T''_{\max}} - \frac{1}{T'_{\max}}} \quad (6)$$

и



**Рис. 4.** Часть спектра внутреннего трения ниобия (O – максимум из-за диффузии под напряжением атомов кислорода, N – азота). Частота колебаний образца  $f = 1$  Гц

$$\tau_0 = \frac{\exp\left(-\frac{H}{kT_{\max}}\right)}{2\pi f'} \quad (7)$$

Указанный способ используется для исследования процесса диффузии внедренных атомов и определения коэффициентов диффузии. По сравнению с традиционными методами исследования диффузии, в которых измеряется глубина проникновения атомов диффундирующего элемента в твердое тело, метод внутреннего трения имеет некоторые преимущества: относительная простота и малая трудоемкость, возможность изучать твердые растворы с низкой концентрацией и проводить измерения при относительно низких температурах и потому исследовать твердые тела, неустойчивые при высоких температурах (например, металлы в аморфном состоянии) и т.д.

### ДРУГИЕ ИСТОЧНИКИ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ

Описанная выше релаксация Снука является лишь одним из многих процессов, вызывающих внутреннее трение. Среди них можно указать несколько групп процессов.

1. *Диффузия под напряжением* в других типах твердых растворов. В твердых растворах замещения (то есть в таких, в которых растворенные атомы замещают в узлах кристаллической решетки атомы металла-растворителя) наблюдается релаксация Зинера (С. Zener, 1943 г.). В отличие от релаксации Снука этот эффект вызывается переориентацией под действием напряжения не одиночных атомов, а их пар. Указанное различие связано с различной симметрией искажений кристаллической решетки, создаваемой внедренным и замещающим атомами. Поскольку атомы замещения диффундируют намного медленнее, чем атомы внедрения, то есть имеют более низкий коэффициент диффузии  $D$  и большее время релаксации, в спектре внутреннего трения максимумы Зинера появляются при более высокой температуре, чем максимумы Снука.

2. *Зернограничная релаксация*, вызванная движением под действием напряжений границ зерен и растворенных атомов, скапливающихся на этих границах (зерна – это отдельные микрокристаллы, из которых состоит кристаллическое твердое тело). Зернограничная релаксация дает уникальную информацию о состоянии границ зерен, определяющих многие свойства твердого тела, в частности механические.

3. *Дислокационная релаксация*, вызванная движением различных типов дислокаций (релаксация Бордони, P.G. Bordoni, 1949 г.), дислокаций с различными дефектами (релаксация Хасигути, R.R. Hasguti, 1962 г.) или с

сегрегированными на дислокациях растворенными атомами (релаксация Снука–Кестера, W. Koster, 1954 г.) Дислокация – линейный дефект кристалла, движущийся под действием приложенного напряжения; пластическая деформация кристаллов осуществляется в основном путем размножения и движения дислокаций.

4. *Магнитомеханическое внутреннее трение в ферромагнетиках*, вызванное, в частности, движением границ магнитных доменов. Магнитомеханическое внутреннее трение используется для получения материалов высокого демпфирования.

5. *Внутреннее трение*, вызванное фазовыми превращениями. Поскольку фазовые превращения в твердых телах очень разнообразны, то также разнообразны механизмы вызываемого ими внутреннего трения. В частности, оно может вызываться движением межфазных границ, разделяющих кристаллы разных фаз или возникающих при фазовом превращении дислокаций. Механическая спектроскопия дает уникальную информацию о многих типах фазовых превращений.

Каждый из описываемых процессов дает вклад в спектр внутреннего трения. Иногда максимумы, вызываемые различными процессами, накладываются один на другой и их приходится разделять, используя компьютерные методы. Но чаще максимумы различных процессов достаточно удалены один от другого на температурной зависимости внутреннего трения и их можно изучать независимо, то есть метод внутреннего трения обладает очень высокой селективностью при изучении различных дефектов строения твердых тел. То, какой процесс в твердом теле вызывает внутреннее трение, определяется как строением самого твердого тела, так и внешними условиями: частотой возбуждаемых в нем механических колебаний и температурой.

Внутреннее трение исследуется не только в металлах, о которых в основном идет речь в настоящей статье, но также в полупроводниках, диэлектриках, сверхпроводниках.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой статье мы хотели показать, что малые механические напряжения (в упругой области) вызывают в твердом теле движение различных дефектов кристаллического строения, что приводит к рассеянию энергии механических колебаний, то есть внутреннему трению. Измеряя внутреннее трение при различных температурах и частотах колебаний, можно выделить эффекты, вызванные движением того или иного типа дефектов, и получить уникальную информацию о реальном строении твердого тела. Поэтому измерение внутреннего трения (механическая спектроскопия) –

мощный метод изучения тонкого строения твердых тел, обладающий как высокой селективностью, так и высокой чувствительностью.

Знание механизмов внутреннего трения используется также для создания материалов с высоким или низким демпфированием механических колебаний, применяемых в различных областях техники.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Новик А., Берри Б. Релаксационные явления в кристаллах. М.: Атомиздат, 1975.
2. Постников В.С. Внутреннее трение в металлах. М.: Металлургия, 1969.
3. Блантер М.С., Пигузов Ю.В. и др. Метод внутреннего трения в металловедческих исследованиях. М.: Металлургия, 1991.

4. Блантер М.С., Головин И.С., Головин С.А. и др. Механическая спектроскопия металлических материалов. М.: Инж. акад., 1994.

*Рецензент статьи* Б.А. Струков

\* \* \*

Михаил Соломонович Блантер, доктор физико-математических наук, профессор кафедры материаловедения Московской государственной академии приборостроения и информатики. Область научных интересов – внутреннее трение металлов и сплавов, межатомные взаимодействия в металлах, твердые растворы. Автор более 100 научных статей и шести книг.