

УДК 541.64:539.199

© В. А. Ломовской, 2019

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ДИССИПАТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ В ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛАХ РАЗЛИЧНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ, СТРОЕНИЯ И СТРУКТУРЫ

Рассматривается устройство и проводится теоретический анализ выявления локальных областей диссипативных потерь по спектрам внутреннего трения локальных областей неупругости для решения основной задачи физико-химической механики: (химическая природа, строение, структура)—(физико-химические и физико-механические характеристики)—(синтез материалов с заданными свойствами).

Кл. сл.: динамические режимы исследований, диссипативные процессы, спектры внутреннего трения, дефект модуля

ВВЕДЕНИЕ

Основной задачей физико-химической механики является анализ взаимосвязи: (химическая природа, строение, структура)—(физико-химические и физико-механические характеристики)—(синтез материалов с заданными свойствами). Изучение многих физико-механических характеристик в различных веществах основано на исследовании параметров переходных процессов от одного равновесного или неравновесного состояния к другому равновесному состоянию. Динамические свойства этих переходных процессов оцениваются по характеристикам переходных функций, представляющих собой реакцию системы как на изменения внутри самой системы, так и на изменение внешних воздействий на эту систему. По интенсивности изменения параметров переходных функций можно получить определенную информацию о структуре исследуемых систем. Наличие переходных процессов от неравновесного к равновесному состоянию неконсервативной системы приводит к термодинамической необратимости данного процесса и, как следствие этого, диссипации в исследуемой системе части энергии внешнего силового воздействия. Количественной характеристикой диссипации энергии в системе является коэффициент поглощения:

$$\Psi = \frac{\Delta W}{W}, \quad (1)$$

где ΔW и W — величина необратимо рассеянной и подведенной к системе энергии соответственно.

Величина коэффициента Ψ непосредственно влияет на параметры переходных функций колебательных процессов, возбуждаемых в исследуемой системе. Определение этих параметров или параметров их изменений позволит количественно определить и значение внутреннего трения $\operatorname{tg} \delta = \Psi$. Внутренним трением называется процесс необратимого рассеяния в объеме исследуемой системы части энергии внешнего силового механического воздействия, деформирующего эту систему. Данное определение предполагает, что исследуемая система является непрерывным сплошным телом. Исключение составляет метод свободных затухающих крутильных колебаний, который позволяет проводить теоретический анализ полученных спектров внутреннего трения $\lambda = f(T)$, полученных в широком температурно-частотном интервале, с позиций атомно-молекулярного дискретного строения исследуемых материалов (систем). Внутреннее трение наиболее отчетливо проявляется при периодических динамических внешних силовых полевых воздействиях на исследуемые системы. Переходные процессы в динамических режимах внешнего деформирующего воздействия на образец исследуемого материала (системы) могут быть получены различными методами, которые не все отвечают требованиям физико-химической механики в установлении связи между локальными диссипативными процессами, наблюдаемыми в различных интервалах температур, и подвижностью тех или иных структурно-кинетических элементов, образующих соответствующие подсистемы. Совокупность этих,



Рис. 1. Методическое соотношение диапазонов частот для различных методов исследования.

@. — радиоскопия, 1 — ИК-область, 2 — видимый свет, 3 — УФ-область, 4 — рентгеновские лучи, 5 — γ -лучи, 6 — инфранизкочастотные механические колебания, 7 — свободно-затухающие механические колебания, 8 — механический резонанс, 9 — ультразвуковые волны, 10 — гиперзвуковые волны, 11 — колебания атомов в молекулах, 12 — переходы электронов в наружных электронных оболочках атомов и молекул, 13 — отделение первого электрона от атомов, 14 — переходы электронов во внутренних оболочках атомов, 15 — ядерные процессы

квазинезависимо реагирующих на внешнее деформирующее воздействие, структурно-кинетических подсистем образует всю исследуемую систему (строение и структуру материала). На рис. 1 представлены все возможные методы динамических исследований материалов. Коэффициенты переходных процессов, характеризующих диссипативные процессы в исследуемых системах различной химической природы, связаны между собой следующим соотношением:

$$Q^{-1} = \operatorname{tg} \delta = \frac{\Psi}{2\pi} = \frac{\Delta W}{2\pi W} = \frac{\lambda}{\pi} = \frac{2\beta}{\omega} = \frac{1}{\omega\tau} = \frac{s}{\tau} = \frac{\Delta\nu}{\sqrt{3}\nu_0} = \frac{2\alpha c}{\omega}, \quad (2)$$

где Q — коэффициент диссипативных потерь, δ — угол сдвига фаз между напряжением σ , возникающем в исследуемой системе и деформацией γ этой системы; Ψ — коэффициент потерь; λ — логарифмический декремент колебательного процесса; β — коэффициент затухания колебательного процесса; τ — время релаксации [с]; s — частота релаксации [Гц]; $\omega = 2\pi\nu$ — угловая час-

тота [с⁻¹]; ν — линейная частота [Гц]; ν_0 — резонансная частота, которой соответствует максимум потерь на спектре внутреннего трения; $\Delta\nu$ — частотный диапазон между восходящей и нисходящей ветвями пика потерь при исследовании резонансного внутреннего трения; α — коэффициент поглощения ультразвуковой (УЗ) волны; c — скорость распространения УЗ-волны.

Различные формы проявления внутреннего трения могут быть сведены к следующим экспериментальным фактам (рис. 2).

а. Для поддержания установившегося колебательного процесса с постоянной амплитудой $A_0 = \text{const}$ необходимо постоянно подводить к системе, в которой этот процесс установился, определенную часть энергии внешнего воздействия. В качестве меры внутреннего трения в этом случае может быть использовано количество энергии ΔW , потребляемой системой за один цикл колебательного процесса;

б. При периодическом деформировании исследуемой системы в ней наблюдается повышение температуры, которая отдается во внешнюю среду. В качестве меры внутреннего трения в этом

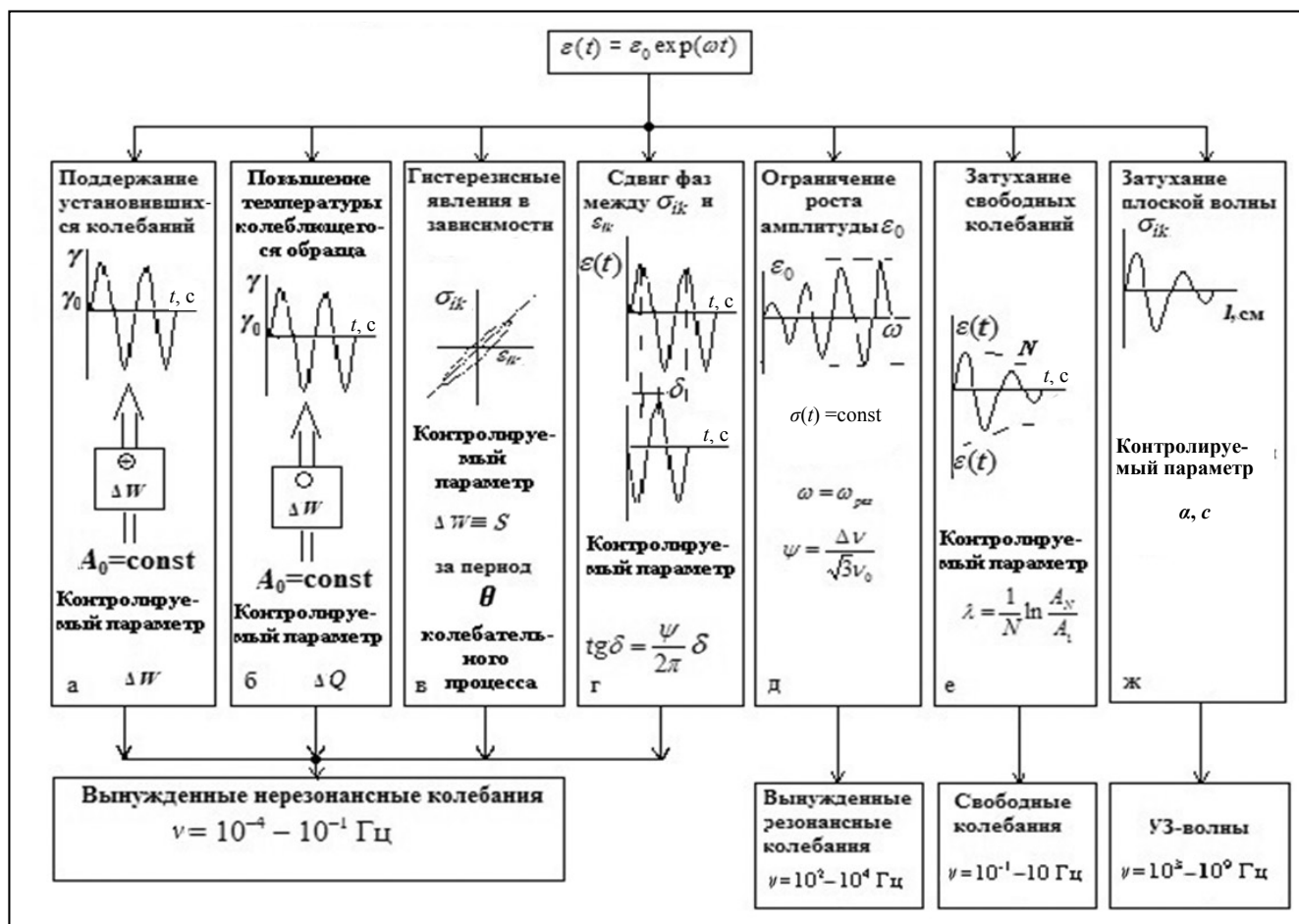


Рис. 2. Методы исследования внутреннего трения

случае может быть использовано количество выделяемого системой тепла ΔQ за один цикл колебательного процесса;

в. Образование петли гистерезиса на зависимости между напряжением σ_{ij} и деформацией ε_{ij} . В качестве меры внутреннего трения в этом случае может быть использована площадь петли гистерезиса одного цикла колебательного процесса.

г. Сдвиг фазы δ между действующим на тело внешним периодически изменяющимся деформирующим воздействием σ_{ij} и деформацией ε_{ij} этого тела. В качестве меры внутреннего трения в этом случае может быть использована величина угла сдвига фаз $\tan \delta$ между внешним возмущающим воздействием и реакцией исследуемой системы на это воздействие.

д. Ограничение роста амплитуды A_0 резонансных колебаний ν_0 системы при действии внешнего возмущающего воздействия постоянной амплитуды $\sigma(t) = \text{const}$. В качестве меры внутреннего

трения в этом случае может быть использована величина ψ относительной амплитуды колебаний.

е. Затухание свободных колебаний, возбуждаемых в исследуемой системе. В качестве меры внутреннего трения в этом случае может быть использован логарифмический декремент λ затухающего колебательного процесса за определенный промежуток времени.

ж. Затухание интенсивности плоской волны напряжения, распространяющейся вдоль или поперек тела. В качестве меры внутреннего трения в этом случае может быть использован коэффициент поглощения α амплитуды и скорость c распространения волны напряжения как функции расстояния, пройденного данной волной.

Соотношение (2) описывает связь между различными физико-механическими характеристиками, получаемыми перечисленными выше методами. Эта связь базируется на основе модельных представлений исследуемой системы как сплош-

ной однородной непрерывной среды. Поэтому любое незначительное (а иногда и значительное) изменение структуры исследуемой системы (например, увеличение атомов примеси в кристаллических структурах или изменения молекулярной массы полимера) практически не фиксируется многими динамическими методами, представленными на рис. 2. Исключение составляет метод свободных затухающих крутильных колебаний, который позволяет проводить теоретический анализ полученных спектров внутреннего трения $\lambda = f(T)$, полученных в широком температурно-частотном интервале, с позиций атомно-молекулярного дискретного строения исследуемых материалов (систем). Анализ спектров внутреннего трения, полученных методом затухающих колебаний в широком температурно-частотном диапазоне исследований для систем различной химической природы, строения и структуры (см. Приложение 1) показал, что внутреннее трение по физической сути гораздо более глубокое явление. Эта глубина обуславливается тем, что спектры внутреннего трения представляют собой целый набор локальных диссипативных процессов, разнесенных по температуре или частоте внешнего воздействия (см. Приложение 1). Каждый локальный диссипативный процесс проявляется на спектре в виде пика потерь определенной интенсивности и соответствует проявлению подвижности определенной структурно-кинетической единицы. На рисунках в Приложении 1 в качестве примеров представлены экспериментально полученные спектры внутреннего трения и температурные зависимости частоты затухающего колебательного процесса, возбуждаемого в исследуемых системах различной химической природы. Из этих результатов следует, что реакция на внешнее воздействие каждого типа определенных структурно-кинетических единиц требует рассмотрения процессов диссипации части энергии внешнего деформирующего воздействия с позиций дискретного, т.е. атомно-молекулярного строения исследуемых систем. Интенсивность пика потерь и его температурный интервал проявления на спектре внутреннего трения позволяет провести теоретический расчет непрерывных спектров времен релаксации процесса, т.е. оценить релаксационную микронеоднородность процесса. Температурное изменение модуля сдвига позволяет рассчитать дефект модуля для каждого из наблюдаемых пиков потерь на спектре внутреннего трения, определить природу внутреннего трения (гистерезисное, релаксационное, фазовое) и найти функцию релаксации для диссипативных процессов, имеющих релаксационную природу.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ДИССИПАТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ

Устройство, позволяющее исследовать реакцию всех элементов образца материала с позиции атомно-молекулярного дискретного строения в широком температурном интервале от $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+800\text{ }^{\circ}\text{C}$ представляет собой маятниковую конструкцию как горизонтального, так и вертикального исполнений [5–7] (рис. 3, Приложение 2).

В режиме свободных затухающих крутильных колебаний одной из основных характеристик диссипации части энергии в исследуемой системе является логарифмический декремент, входящий в уравнение, описывающее колебательный процесс в виде:

$$\varphi(t) = \varphi_0 \exp^{-\beta\theta} = \varphi_0 \exp\left[-\left(\frac{\lambda}{\pi}\right)t\right], \quad (3)$$

где φ_0 и $\varphi(t)$ — соответственно амплитудное и текущее значения угла закручивания незакрепленного конца исследуемого образца; λ — логарифмический декремент затухания процесса; β — коэффициент затухания; θ — период колебательного процесса; t — время.

Другой основной характеристикой является частота ν колебательного процесса и ее изменение при изменении температуры исследуемой системы.

В данном режиме исследования может быть использован образец как круглого (нити, волокна — вертикальное исполнение), так и прямоугольного поперечного сечения (горизонтальное исполнение) с консольным креплением одного конца исследуемого образца. Основным требованием к колебательной системе устройства (как горизонтального, так и вертикального исполнения) является соблюдение условия соосности. Так, (на примере горизонтального маятника, рис. 3) условием соосности является центрирование колебательной системы таким образом, чтобы продольная ось исследуемого образца 5, оси зажимов 4 и 6, ось стержня 7 колебательной системы, центр кольца 9 находились на одной прямой линии, которая в свою очередь проходит через точку касания иглы 10 и агатовой опоры 11.

В горизонтальном исполнении устройство работает следующим образом (рис. 3, 4).

Образец 5 прямоугольного поперечного сечения (размер: длина 60, ширина 5, толщина 0.5–1 мм) жестко закрепляется в неподвижном цанговом зажиме 4 и в зажиме 6 горизонтального стержня 7 колебательной системы. После этого производится операция центрирования (установки на ноль колебательной системы) в системе регистрации

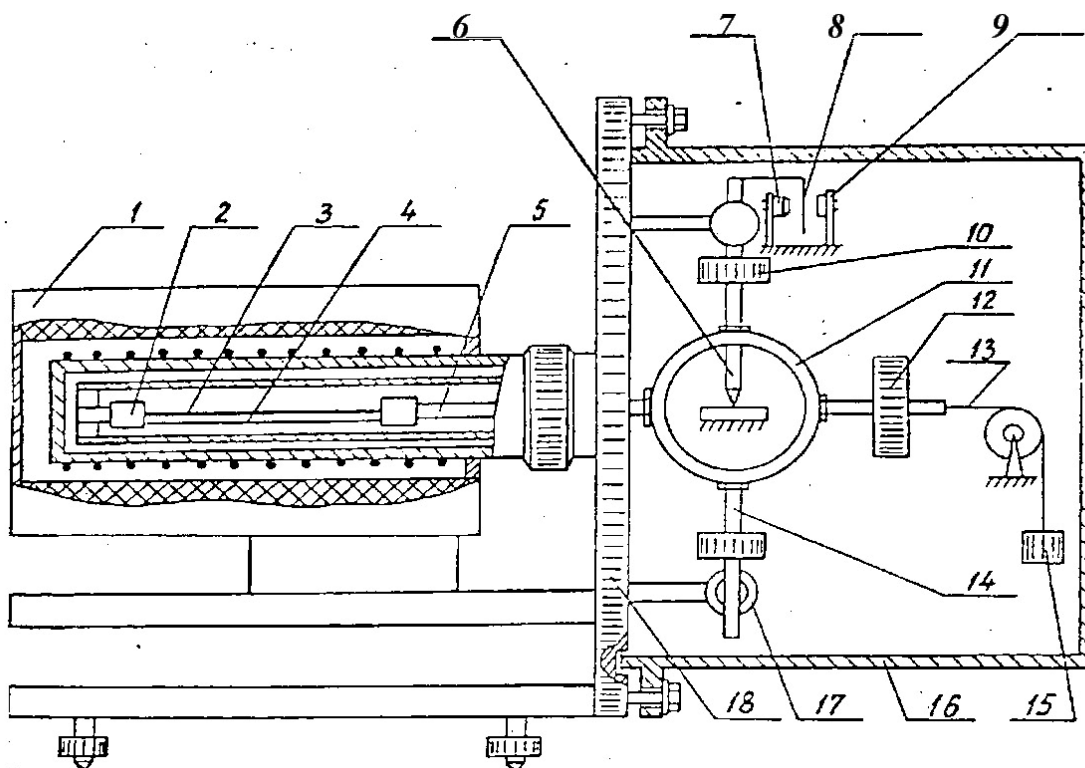


Рис. 3. Горизонтальный крутильный маятник (блок-схема).

1 — регулируемое по уровню основание; 2 — направляющие горизонтального перемещения термокриокамеры 3; 4 — неподвижный цанговый зажим; 5 — исследуемый образец; 6 — цанговый зажим горизонтального стержня 7 колебательной системы; 8 — несущая вертикальная плита; 9 — центральное кольцо колебательной системы; 10 — опорная игла колебательной системы; 11 — агатовая опора; 12 — плечи изменения момента инерции колебательной системы; 13 — грузы изменения момента инерции; 14 — тяговые электромагниты импульсного возбуждения колебательного процесса; 15 — оптическая шторка системы регистрации колебаний; 16 — фотопреобразователь системы регистрации колебаний; 17 — монохроматический излучатель системы регистрации колебаний; 18 — балансир центрирования колебательной системы; 19 — нить противовеса 20; 21 — колпак системы вакуумирования устройства

колебаний (фотопреобразователь 16, оптическая шторка 15, излучатель 17). После этого, на тяговые электромагниты 14 системы возбуждения колебательного процесса, подается импульс напряжения, закручивающий колебательную систему устройства и соответственно исследуемый образец 5, входящий в эту колебательную систему, на угол φ_0 (рис. 4, а). Таким образом, внешний крутящий момент $M_{\text{внеш}}$ прикладывается на свободный конец исследуемого образца в момент времени $t = t_0$ (рис. 4, а), т. е.

$$M_{\text{внеш}} = M(t) \cdot \delta(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < t_0, \\ M_{\text{внеш}} & \text{при } t = t_0, \\ 0 & \text{при } t > t_0, \end{cases} \quad (4)$$

где $\delta(t)$ — дельта-функция Дирака.

Общий реактивный крутящий момент M_{kp} , являющийся откликом колебательной системы на внешнее воздействие, равен:

$$M_{kp} = \begin{cases} M_{\text{внеш}} = \text{const} & \text{при } t = t_0, \\ M_{kp}(t) \neq \text{const} & \text{при } t > t_0. \end{cases} \quad (5)$$

При значении $t > t_0$ момент $M_{kp}(t)$ равен сумме двух моментов: момента M_z , который является равнодействующим моментов внутренних элементарных касательных сил $(\sigma_{zx} \Delta s)y$ и $(\sigma_{zy} \Delta s)x$ относительно оси Z в текущих сечениях образца, и момента M_1 , который вызывается инерционностью колебательной системы устройства без учета исследуемого образца.

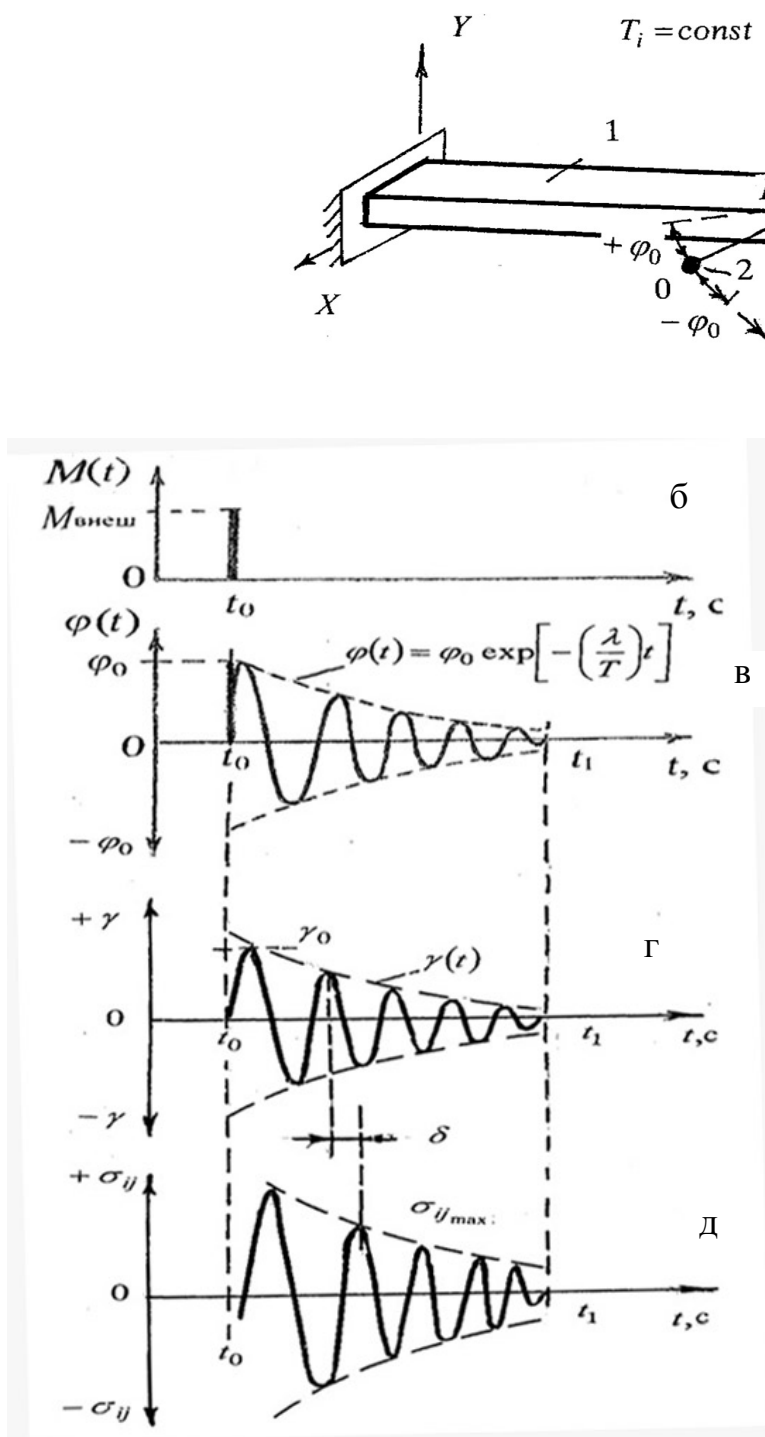


Рис. 4. Схематичное изображение возбуждения колебательного процесса в исследуемом образце прямоугольного поперечного сечения (а) и эпюры затухающего колебательного процесса (б, в, г, д)

Таким образом, имеет место равенство $M_{kp}(t) = M_z + M_1$. Момент M_z определяется в виде $M_z = \int_S (\sigma_{zy}x - \sigma_{zx}y) dS$, где S — площадь поперечного сечения исследуемого образца; σ_{ij} — ме-

ханические касательные напряжения, возникающие в поперечных сечениях образца. Момент инерции колебательной системы определяется в виде

$$M_I = I \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}, \quad (6)$$

где I — момент инерции колебательной системы относительно оси Z , нормальной к поперечным сечениям исследуемого образца; $\varphi(t)$ — угол поворота (закручивания) сечения относительно нулевого положения равновесия колебательной системы (при котором $\varphi(t) = \varphi_0$). В интервале времени $t_0 < t < t_1$ исследуемый образец совершает затухающие крутильные колебания около положения равновесия $\varphi(t) = 0$. При этом образец деформируется $\gamma(t)$ в соответствии с соотношением (3) (рис. 4, г) по закону

$$\gamma(t) = \gamma_0 \exp^{-\beta t} = \gamma_0 \exp\left[-\left(\frac{\lambda}{\pi}\right)t\right]. \quad (7)$$

И также в этом интервале времени $t_0 < t < t_1$ в исследуемом образце возникают касательные напряжения $\sigma_{ij}(t)$, сдвинутые по фазе δ относительно деформации $\gamma(t)$ (рис. 4, д). Этот процесс продолжается до момента времени $t = t_1$, после чего система приходит в состояние равновесия, т.е. $\varphi(t) = 0$. В интервале времени $t_0 < t < t_1$ колебательный процесс характеризуется равенством момента инерции M_1 колебательной системы устройства и внутреннего реактивного момента M_z , т.е.

$$M_{kp}(t) = \int_s (\sigma_{zy}x - \sigma_{zx}y) dS + I \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0. \quad (8)$$

Таким образом, в интервале времени $t > t_0$ колебательный процесс описывается уравнением вида

$$I \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + G \frac{\varphi}{l} I_{\text{обр}} = 0, \quad (9)$$

что соответствует линейному однородному дифференциальному уравнению

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} + k^2 \varphi = 0, \quad \text{где} \quad k = G \frac{I_{\text{обр}}}{I \cdot l}. \quad (10)$$

Логарифмически декремент λ затухающего колебательного процесса определяется для каждой температуры по соотношению

$$\lambda = \frac{1}{N} \ln \frac{\varphi_1}{\varphi_N}, \quad (11)$$

где N — число периодов колебательного процесса от 1-го, где амплитуда равна φ_1 до N -го, где амплитуда равна φ_N . Логарифмический декремент λ связан с внутренним трением $\text{tg } \delta$ соотношением вида

$$\text{tg } \delta = \frac{\lambda}{\pi}. \quad (12)$$

Это позволяет построить спектры внутреннего трения $\lambda = f(T)$ или $\text{tg } \delta = f(T)$ (Приложение 1), что в свою очередь определяет температурные области локальных диссипативных потерь, связанных с подвижностью определенных структурных элементов той или иной структурно-кинетической подсистемы, совокупность которых представляет всю систему в целом.

Кроме спектров внутреннего трения, данное устройство и методики измерения, реализуемые на нем, позволяют выявить и температурные области локальной неупругости исследуемой системы как реакции элементов той или иной структурно-кинетической подсистемы на внешнее динамическое гармоническое воздействие. При этом следует отметить, что при рассмотрении колебательного процесса консольно закрепленной пластинки прямоугольного поперечного сечения принимаются следующие допущения:

- начало координат помещается в точку 0 нейтральной плоскости;
- система координат XYZ (рис. 4, а) неподвижна и не перемещается вместе с пластинкой при ее деформации.

При закручивании образца прямоугольного сечения на угол $\varphi(t) = \varphi_0 = \text{const}$ определенным крутящим моментом M_{kp} (соотношение (5)) экспериментально установлено следующее.

1. Квадратная сетка, нанесенная на исследуемый образец 5 до его деформации, переходит в ромбическую после деформации закручивания.

2. Величина сдвига различна по смежным граням поперечного сечения исследуемого образца и различна по длине этого образца. Максимальный сдвиг наблюдается на середине каждой грани. Наибольшая величина сдвига наблюдается на более широкой грани, т.е. на грани, ближайшей к продольной оси Z образца.

3. Плоские сечения образца искривляются после закручивания на угол $\varphi(t)$. Искривление происходит таким образом, что в первой и третьей четвертях сечения наблюдается опускание точек C контура сечения, а во второй и четвертой — поднятие точек D контура сечения относительно первоначального положения плоскости сечения (рис. 4, а).

4. Обе главные оси каждого поперечного сечения (смежного сечения) исследуемого образца по его длине сохраняются в своей плоскости. Эти оси поворачиваются относительно других смежных сечений на один и тот же угол.

Таким образом, деформированная закручиванием, первоначально плоская поверхность сечения $CDCD$ изгибается по краям контура. Для определения уравнения в искривленной (в результате воздействия крутящего момента M_{kp}) поверхности составляется дифференциальное уравнение, свя-

зывающее крутящий момент $M_{кр}$ с прогибом сечения, т.е. с изгибающим моментом относительно главной оси (например, M_x относительно оси X)

$$M_x = -\frac{E(1-\nu_e)}{(1+\nu_e)(1-\nu_e)} \cdot \frac{h^3}{12} \cdot \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow M_x = -z(1+\nu_e) \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y}, \quad (13)$$

где

$$z = \frac{Eh^3}{12(1-\nu_e^2)}. \quad (14)$$

И окончательный прогиб оси Z изогнутой поверхности определяется в виде

$$\omega = -\frac{M_x}{z(1-\nu_e)} xy. \quad (15)$$

Уравнение (13) представляет собой уравнение, гиперболического параболоида и при кручении, возникающем в результате воздействия несоосной силы F , прямоугольное сечение искривляется по поверхности гиперболического параболоида. Величина сдвига различна по граням и различна по координате x и координате y . Максимальный сдвиг наблюдается на середине каждой грани: при $x = 0$ и при $y = 0$. На более широкой грани, более приближенной к продольной линии образца — оси Z , значение сдвига больше, чем на менее широкой грани более удаленной от оси Z . В силу закона парности касательных напряжений, напряжение на широкой грани (рис. 4, а), т.е. σ_{yx} (направлено к точке C или D), уравновешивается касательным напряжением на узкой грани, т.е. σ_{xy} .

В результате:

$$\begin{cases} \sigma_{yx} = \frac{\sigma_{A\max}}{e} \left(1 - \frac{x^2}{d^2}\right) y = \frac{9M_z}{16d^3e} \left(1 - \frac{x^2}{d^2}\right) y, \\ \sigma_{xy} = \frac{\sigma_{B\max}}{d} \left(1 - \frac{y^2}{e^2}\right) x = \frac{9M_z}{16d^3e} \left(1 - \frac{y^2}{e^2}\right) x, \end{cases} \quad (16)$$

где d, e — соответственно ширина и толщина плоского поперечного сечения исследуемого образца, $d > e$; $\sigma_{A\max}$ и $\sigma_{B\max}$ — соответственно максимальные значения на широкой и узкой грани исследуемого образца. В соответствии с соотношением (16) следует $\sigma_{A\max} > \sigma_{B\max}$. То есть максимально напряжение $\sigma_{A\max}$ наблюдается на грани A , на поверхности той грани образца прямоугольного сечения, которая ближе к продольной оси бруса. Напряжения σ_{xy} и σ_{yx} изменяются пропорционально координатам x и y соответственно.

Максимальное значение напряжения по диагонали равно

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\sigma_{yx}^2 + \sigma_{xy}^2} = \frac{9M_z}{16h^3a} \left(1 - \frac{x^2}{d^2}\right) \times$$

$$\times x \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{h^2}} = \frac{9M_z \sqrt{a^2 + h^2}}{16a^3h^3} \left(1 - \frac{x^2}{a^2}\right) x. \quad (17)$$

Для образцов круглого поперечного сечения (волокна и нити) при вертикальном исполнении устройства амплитудное значение угла закручивания образца относительно оси Z , так же как и для образца прямоугольного поперечного сечения (горизонтальное исполнение), угол начальный закручивания равен $\varphi(t) = \varphi_0 = \text{const}$. Относительная деформация образца при данном угле φ_0 также равна $\gamma(t) = \gamma_0 = \text{const}$ и остается неизменной по всей длине образца. Касательные напряжения σ_{ij} , возникающие в данном режиме внешнего деформирующего воздействия, определяются в соответствии с соотношением

$$\sigma_{ij} = 32 \frac{M_{кр}}{\pi d^4} \rho, \quad (18)$$

где ρ — текущее значение радиуса поперечного сечения образца, изменяющееся в интервале $0 < \rho < r$, r — радиус поперечного сечения образца. Максимальное значение касательных напряжений, возникающих в поперечном сечении образца, будет в случае, когда $\rho = r$, т.е. на поверхности образца.

Таким образом, при исследовании образцов как прямоугольного, так и круглого поперечного сечения исследуемого образца имеет место неравномерное распределение напряжений по сечению, что может внести определенные погрешности при измерениях. Для минимизации этих погрешностей необходимо использовать образцы квадратного и круглого поперечного сечения малых диаметров. Кроме того, вносить определенную поправку (хотя она и незначительна) при расчете и теоретическом анализе непрерывных спектров времен релаксации для того или иного локального диссипативного процесса, обнаруженного на спектрах внутреннего трения.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПОЛУЧАЕМЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Непрерывные спектры времен релаксации любого диссипативного процесса, проявляемого на спектре внутреннего трения и имеющего релаксационный механизм, а также другие физико-механические и физико-химические характери-

стики исследуемых систем могут быть определены как по спектрам внутреннего трения, так и по температурным зависимостям изменения частоты свободных затухающих колебаний, возбужденных в исследуемых системах. Теоретический анализ изменения частоты свободных затухающих колебаний позволяет определить и области локальной неупругости в реакции исследуемой системы на внешнее деформирующее воздействие. Взаимосвязь модуля сдвига исследуемой системы и частоты затухающих крутильных колебаний позволяет определить локальный по температурному проявлению дефект модуля, т.е. степень снижения модуля сдвига вследствие размораживания структурной подвижности элементов той или иной структурно-кинетической подсистемы. В данном устройстве масса и геометрические размеры колебательной системы (как горизонтального, так и вертикального исполнения) в процессе измерений не изменяются, следовательно и не изменяется момент инерции I колебательной системы. Момент инерции I колебательной системы и модуль сдвига G исследуемого образца при заданной температуре определяют частоту затухающего колебательного процесса. По частоте свободных затухающих колебаний может быть определено значение динамического модуля сдвига $G_1(\omega)$ в виде [8]:

$$G_1(\omega) = \frac{I}{T^2} \left[\left(\frac{12\pi^2 L}{bh^3 c} \right) \left(1 + \frac{\lambda^2}{4\pi^2} \right) - \left(\frac{mgb}{4h^3 c} \right) \right] 10^{-2}, \quad (19)$$

где I — момент инерции колебательной системы устройства; T — период колебательного процесса; L, b, h — геометрические размеры образца; m — масса колебательной системы устройства; λ — логарифмический декремент.

Однако использование данного соотношения (с учетом связи периода колебательного процесса T и частоты ν) затруднено вследствие того, что в зависимости (19) прослеживается прямая связь между динамическим модулем сдвига $G_1(\omega)$ и квадратом логарифмического декремента

$$G_1(\omega) \approx I\nu^2 \lambda^2. \quad (20)$$

А учитывая температурную зависимость логарифмического декремента и частоты колебательного процесса зависимость (20) значительно усложняется $G_1(\omega) \approx I\nu^2(T^\circ\text{C})\lambda^2(T^\circ\text{C})$ и не соответствует получаемым экспериментальным результатам. Это связано с тем, что соотношение (20) может удовлетворительно описать частотную зависимость $G_1(\omega)$ в условиях модельного приближения исследуемой системы в виде однородного непрерывного сплошного тела, когда величина диссипативных потерь (или логарифмический декре-

мент) остается постоянным во всем интервале температурно-частотного исследования материалов. Однако, как следует из экспериментальных результатов (Приложение 1), полученных разными авторами, динамический модуль сдвига $G_1(\omega)$ имеет аномальные области, связанные с отклонениями от соотношения (20). В одних интервалах температур частота, следовательно, и модуль резко снижаются, а в других — повышаются. Причем повышение $G_1(\omega)$ может наблюдаться в тех интервалах температур, где имеет место значительное повышение диссипативных потерь (т.е. логарифмического декремента) на спектре внутреннего трения и где имеет место повышение второго слагаемого комплексного модуля сдвига $G_2(\omega)$:

$$G^*(i\omega) = G_1(\omega) + iG_2(\omega). \quad (21)$$

В этом случае следует принять другую модель, описывающую реакцию исследуемой системы на внешнее динамическое воздействие, выводящее данную систему из положения механического и термодинамического равновесия. Это модель, представляющая исследуемую систему в виде совокупности квазинезависимо реагирующих на внешнее воздействие, структурно-кинетических подсистем. В этом атомно-молекулярном дискретном приближении, каждая структурно-кинетическая подсистема будет по-своему реагировать на внешнее воздействие. Реакция может изменяться от упругой до неупругой и вязкотекучей в зависимости от строения и структуры каждой подсистемы, от температуры и от частоты внешнего воздействия. Различие в реакциях подсистем приводит к появлению пиков потерь на спектрах внутреннего трения и аномальности в температурных зависимостях частоты колебательного процесса, получаемых на данных установках. Это в свою очередь приводит к аномальному поведению динамического модуля упругости $G_1(\omega)$ в различных интервалах температур. Данное устройство позволяет определить степень этой аномальности. Это определяется тем, что для колебательной системы данного устройства с одинаковыми плечами системы возбуждения крутильных колебаний в исследуемом материале с жестко зашпеленным одним концом исследуемого образца взаимосвязь квадрата частоты и динамического модуля определяется в виде

$$\nu^2 = \frac{G_1(\omega)}{I \frac{(I_s + 2I)}{I_\alpha}} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} I = \text{const} \\ I_s = \text{const} \\ I = \text{const} \\ I_\alpha = \text{const} \end{array} \right\} \Rightarrow \nu^2 \approx \frac{G_1(\omega)}{k_1} \Rightarrow G_1(\omega) \approx k_1 \nu^2, \quad (22)$$

где l — длина образца; I_s — момент инерции образца; I — момент инерции плеч системы возбуждения крутильных колебаний; I_a — момент инерции поперечного сечения образца относительно полярной оси; k_1 — постоянный коэффициент, определяемый моментами инерции составных частей колебательной системы устройства.

Однако $G_1(\omega)$ зависит не только от частоты ω , но и от температуры $T^\circ\text{C}$ исследуемого материала, и в этом случае

$$k_2 G_1(T) \approx k_1 v^2, \quad (23)$$

где $k_2 = \text{const}$ — коэффициент пропорциональности.

Так как коэффициенты $k_1 = \text{const}$ и $k_2 = \text{const}$, то соотношение (23) может быть представлено в виде

$$\frac{k_2 G_i(T_i)}{k_2 G_0(T_0)} = \frac{k_1 v_i^2(T_i)}{k_1 v_0^2(T_0)} \Rightarrow \Delta G(T) = \Delta v^2(T). \quad (24)$$

Таким образом, температурная зависимость изменения частоты ν колебательного процесса, возбужденного в исследуемом образце, позволяет определить и температурное изменение модуля сдвига G материала, из которого изготовлен данный образец.

При исследованиях, проводимых на данных установках, кроме температурного изменения модуля сдвига (соотношение (24)), для определения влияния каждой структурно-кинетической подсистемы на изменение модуля сдвига всей системы, а также для определения феноменологического механизма диссипативных потерь, обнаруживаемых на спектрах внутреннего трения в различных интервалах температур, вводится понятие дефекта модуля в виде

$$\Delta G = \frac{\nu_0^2(T_0) - \nu_i^2(T_i)}{\nu_0^2(T_0)} =$$

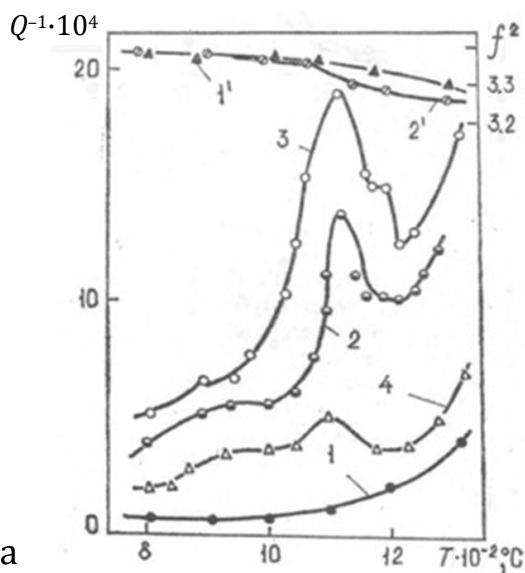
$$= \frac{G_0(T_0) - G_i(T_i)}{G_0(T_0)}, \quad (25)$$

где $\nu_0(T_0)$ и $G_0(T_0)$ — значение частоты и модуля сдвига при температуре T_0 начала отклонения экспериментальной зависимости $\nu_i(T_i)$ и $G_i(T_i)$ от теоретической соответственно $\nu_0(T_0)$ и $G_0(T_0)$; $\nu_i(T_i)$ и $G_i(T_i)$ — соответствующие значения при температуре T_i окончания отклонения. Характер отклонений $\Delta v^2 = f(T)$, а следовательно, $\Delta G = f(T)$ для различных диссипативных процессов в одной исследуемой системе может быть различен. Так, в случае если $\Delta v^2 > 0$ и $\Delta G > 0$, имеет место релаксационный механизм диссипативных потерь локального процесса на спектре внутреннего трения, а если $\Delta v^2 < 0$ и $\Delta G < 0$, то — фазовый механизм диссипативных потерь. Теоретический анализ температурной зависимости дефекта модуля сдвига в свою очередь позволяет найти вид функции релаксации для каждого локального релаксационного процесса, проявляемого на спектре внутреннего трения. Функция релаксации, позволит связать коэффициенты, входящие в нее с релаксационной микронеоднородностью процесса локальной диссипации и снижения общего модуля сдвига исследуемой системы.

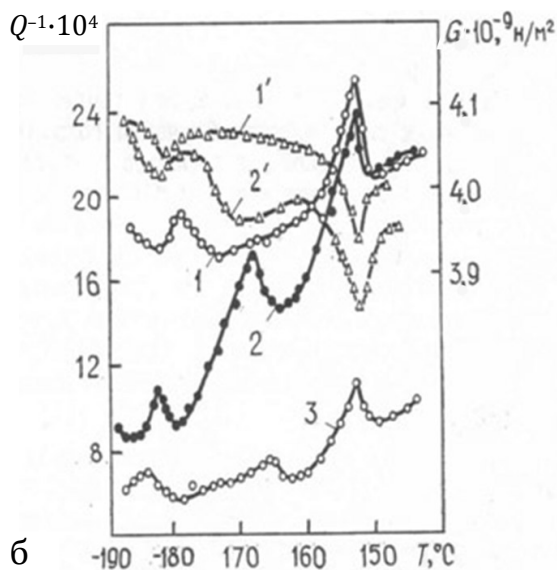
ВЫВОДЫ

Данное устройство (как в горизонтальном, так и вертикальном исполнении) позволяет получить экспериментальные данные для теоретического анализа основной связи физико-химической механики: (химическая природа, строение, структура исследуемой системы)—(физико-химические и физико-механические характеристики)—(синтез материалов с заданными свойствами). Устройства запатентованы (21 авторское свидетельство на изобретения и патенты).

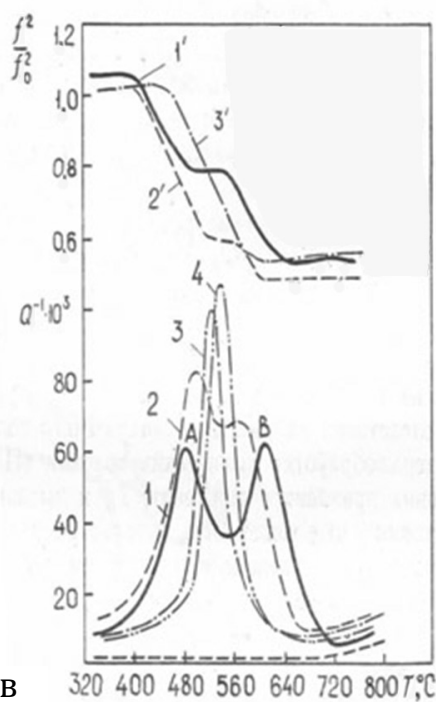
ПРИЛОЖЕНИЕ 1



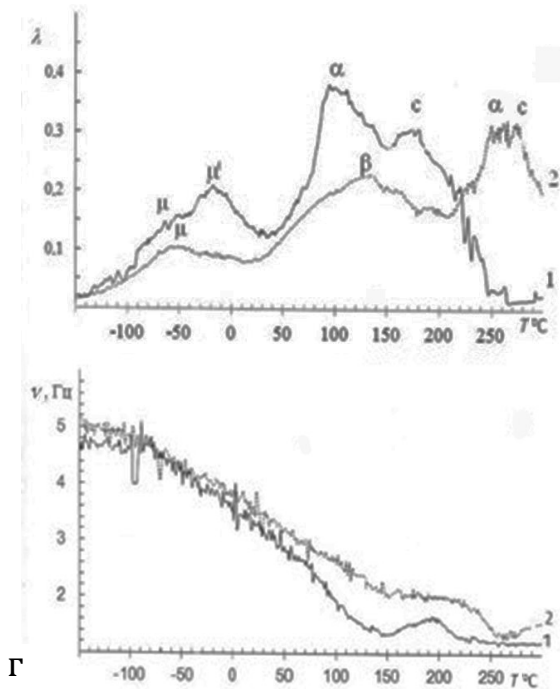
а



б



в



г

Экспериментальные спектры внутреннего трения $Q^{-1} \cdot 10^4$ и температурного изменения частоты колебательного процесса, возбужденного в исследуемых системах.

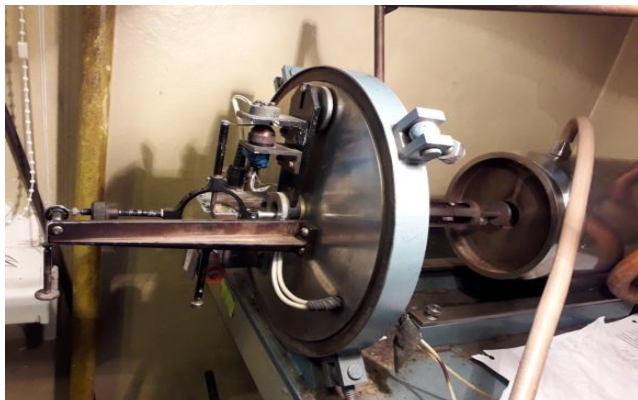
а — нитевидный кристалл корунда: 1 — монокристалл, 2, 3, 4 — поликристаллическая система с различной степенью дефектов структуры (дефектность понижается в ряду 3, 2, 4), температурная зависимость модуля (частоты) для монокристалла: кривая 1' — спад модуля, кривая 2' — дефект модуля в области проявления пика потерь для кривой 2 [1].

б — KNa_2PO_4 с различным содержанием PO_4 (кривые 1, 2, 3), кривые 1' и 2' — температурные зависимости модуля сдвига, соответствующие кривым 1 и 2 [2].

в — ликвирующие стекла $x\text{Na}_2\text{O}-(75-x)\text{SiO}_2$ с различным содержанием Na_2O (x меняется от 0 до 25 мол%) [3].

г — хитозан в солевой (1) и основной (2) форме и соответствующая им температурно-частотная зависимость

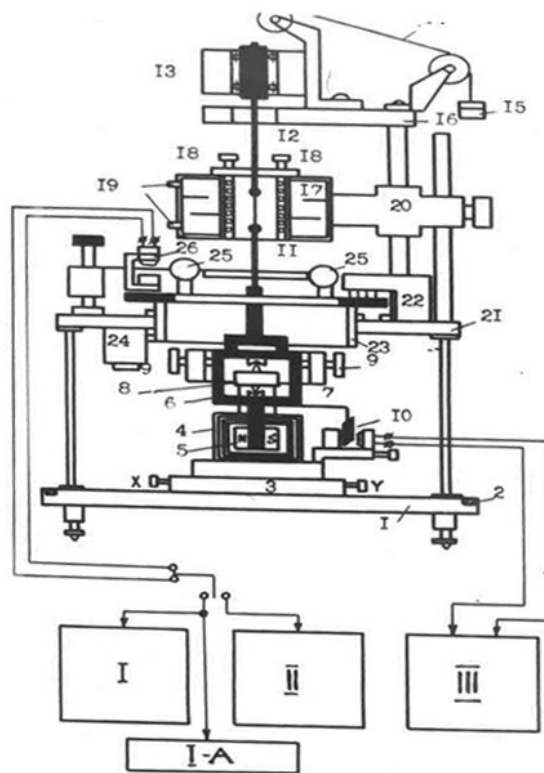
ПРИЛОЖЕНИЕ 2



Горизонтальный крутильный маятник (макет)



а



б

Вертикальный крутильный маятник (макет — а; блок-схема — б).

1 — регулируемое по уровню основание; 2 — вакуумное уплотнение; 3 — двухкоординатный позиционер; 4 — электрическая обмотка системы возбуждения вынужденных крутильных колебаний; 5 — магнит системы возбуждения колебаний; 6 — центральное кольцо колебательной системы; 7 — двухопорный игольный kern системы центрирования исследуемого волокна; 8 — опора; 9 — фиксаторы начального положения колебательной системы; 10 — оптическая шторка фотопреобразователя системы регистрации колебательного процесса; 11 — плечи изменения момента инерции колебательной системы; 12 — исследуемый образец; 13 — узел компенсации дилатометрических эффектов; 14 — нить противовеса; 15 — противовес; 16 — несущая плита узла компенсации дилатометрических эффектов; 17 — термокриокамера; 18 — клеммы подвода напряжения к термокриокамере; 19 — штуцер системы охлаждения; 20 — вертикальный позиционер; 21 — автономный вертикальный позиционер системы установки нулевого положения; 22 — кронштейн блока возбуждения, съема и регистрации свободных затухающих крутильных колебаний; 23 — подвижная несущая гильза системы возбуждения, съема и регистрации; 24 — привод перемещения гильзы 23; 25 — электромагниты системы возбуждения затухающих свободных крутильных колебаний; 26 — система регистрации затухающего колебательного процесса

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аммер С.А., Москаленко А.Г., Ююкин К.П. Дислокационный максимум внутреннего трения в кристаллах корунда // Сб. Механизмы релаксационных явлений в твердых телах. Каунас. 1974. С. 232–235.
2. Бурданина Н.А., Камышева Л.Н., Гриднев С.А., Золототрубов Ю.С., Журов В.И. Диэлектрические и механические потери кристаллов со специально введенными дефектами // Сб. Механизмы релаксационных явлений в твердых телах. Каунас. 1974. С. 239–244.
3. Балашов Ю.С., Носков А.Б., Иванов Н.В. Процессы механического стеклования в ликвидирующих стеклах // Сб. Механизмы релаксационных явлений в твердых телах. Каунас. 1974. С. 344–347.
4. Ломовской В.А., Абатурова Н.А., Ломовская Н.Ю., Хлебникова О.А., Галушко Т.Б. Области локальной неупругости и релаксационные явления в поливинилформале // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2018. Т. 60, № 3. С. 201–207. DOI: 10.7868/S2308112018030045
5. Ломовской В.А., Андреев И.В., Балашов Ю.С. Устройство для определения динамического модуля сдвига тонких стеклянных волокон. А. с. № 1315871. БИ. 1987. № 31.
6. Бондарев М.М., Буйвис С.Б., Ломовской В.А., Шаталов В.Г. Горизонтальный крутильный маятник. А. с. № 1387634. БИ. 1987.
7. Ломовской В.А. и др. Измерительный преобразователь. Патент № 2568963. 2015.
8. Mayer D.R. Prüfung von Kunststoff und Gummimittefreientorsionsschwingungen // Kunststoffe. 1967. Bd. 54, № 4. S. 257–263.

ФГУП Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва

Контакты: Ломовской Виктор Андреевич,
lomovskoy49@gmail.com

Материал поступил в редакцию 28.06.2018

THE DEVICE FOR RESEARCHING OF LOCAL DISSIPATIVE PROCESSES IN SOLID MATERIALS OF VARIOUS CHEMICAL ORIGIN, COMPOSITION AND STRUCTURE

V. A. Lomovskoy

A.N. Frumkin Institute of Physical chemistry and Electrochemistry RAS, Moscow, Russia

Discussion of the aforementioned device and theoretical analysis of detection of the local dissipative losses areas by means of internal friction spectra in local inelasticity areas. The purpose of the analysis is to solve the basic problem of physicochemical mechanics: association of chemical origin, composition, structure (physicochemical and physico-mechanical characteristics) and synthesis of materials with targeted properties.

Keywords: dynamic rating of investigation, dissipative properties, internal friction spectra, modulus defect

REFERENCES

1. Ammer S.A., Moskalenko A.G., Yuyukin K.P. [Dislocation maximum of internal friction in corundum crystals]. *Sb. Mekhanizmy relaksacionnyh yavlenij v tverdyh telah* [Collection of articles. Mechanisms of the relaxational phenomena in solid bodies], Kaunas, 1974, pp. 232–235. (In Russ.).
2. Burdanina N.A., Kamysheva L.N., Gridnev S.A., Zolotrubov Yu.S., Zhurov V.I. [Dielectric and mechanical losses of crystals with expressly injected defects]. *Sb. Mekhanizmy relaksacionnyh yavlenij v tverdyh telah* [Collection of articles. Mechanisms of the relaxational phenomena in solid bodies], Kaunas, 1974, pp. 239–244. (In Russ.).
3. Balashov Yu.S., Noskov A.B., Ivanov N.V. [Processes of a mechanical glass transition in sweating glasses]. *Sb. Mekhanizmy relaksacionnyh yavlenij v tverdyh telah* [Collection of articles. Mechanisms of the relaxational phenomena in solid bodies], Kaunas, 1974, pp. 344–347. (In Russ.).
4. Lomovskoy V.A., Abaturova N.A., Lomovskaya N.Yu., Hlebnikova O.A., Galushko T.B. [Areas of a local unelasticity and the relaxational phenomena in polyvinyl formal]. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya A* [Polymer Science. Series A — Polymer Physics], 2018, vol. 60, no. 3, pp. 201–207. DOI: 10.7868/S2308112018030045 (In Russ.).
5. Lomovskoy V.A., Andreev I.V., Balashov Yu.S. *Ustrojstvo dlya opredeleniya dinamicheskogo modulya sdviga tonkih steklyannyh volokon*. Copyright certificate no. 1315871. [The device for definition of dynamic rigidity modulus of fine spun glasses]. *Bulletin of inventions*, 1987, no. 31. (In Russ.).
6. Bondarev M.M., Bujvis S.B., Lomovskoy V.A., Shatalov V.G. *Gorizontal'nyj krutil'nyj mayatnik*. Copyright certificate no. 1387634. [Horizontal torsional pendulum]. *Bulletin of inventions*, 1987. (In Russ.).
7. Lomovskoy V.A. et al. *Izmeritel'nyj preobrazovatel'*. Patent RF no. 2568963. [Patent for measuring transducer]. *Prioritet* 2015. (In Russ.).
8. Mayer D.R. *Prufung von Kunststoff und Gummimittefreientorsionsschwingungen*. *Kunststoffe*, 1967, bd. 54, no. 4, pp. 257–263.

Contacts: Lomovskoy Viktor Andreevich,
lomovskoy49@gmail.com

Article received by the editorial office 28.06.2018