

А. П. АМОСОВ

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ПРИ ВНЕШНЕМ ТРЕНИИ

(Представлено академиком Н. Н. Семеновым 29 I 1973)

Существует несколько теорий, в каждой из которых в качестве возможной причины возникновения механических релаксационных колебаний при внешнем трении предполагается зависимость силы трения от какого-нибудь фактора (¹): скорости скольжения, электростатических разрядов при трении, появления мостиков сварки, реологических свойств фрикционного контакта.

Согласно данным работы (²) влияние некоторых факторов на силу трения осуществляется главным образом через температурный режим трения. Поэтому при построении теории механических релаксационных колебаний, особенно для случаев интенсивного торможения, существенным является учет зависимости силы трения от температуры. В работе (³) показано, что при сдвиговом разрушении твердых веществ в случае уменьшения силы трения при увеличении температуры могут возникать затухающие колебания частей вещества. Таким образом, правомерно предложить объяснение, согласно которому причина возникновения релаксационных колебаний при внешнем трении заключается в уменьшении силы трения при повышении температуры на поверхности трения.

Рассмотрим неизотермическую задачу о внешнем трении двух одинаковых бесконечных плоских пластин, которые расположены горизонтально и являются линейно-упругими. Пусть верхняя грань верхней пластины движется относительно закрепленной нижней грани нижней пластины с постоянной скоростью $2V$. Давление прижатия пластин считаем постоянным. До тех пор пока упругое напряжение сдвига в пластинах меньше, чем удельная сила трения в плоскости контакта, проскальзывания пластин не будет. Как только упругая сила станет равной силе трения и превысит ее, начнется проскальзывание. За счет сил трения при скольжении в плоскости контакта начнет выделяться тепло. Температура в ней будет повышаться, а сила трения падать. В результате будет происходить упругая разгрузка пластин, т. е. начнутся упругие колебания этих пластин. Они прекратятся, когда в момент равенства скоростей движения верхней и нижней пластин в плоскости трения упругая сила сдвига станет меньше силы трения. Произойдет сцепление пластин, и они будут упруго деформироваться без проскальзывания до нового момента времени, при котором упругое напряжение в пластинах станет равным, а затем превысит удельную силу трения в плоскости контакта. С этого момента начнется проскальзывание. Снова начнутся упругие релаксационные колебания пластин и т. д.

Исследование (³) проводилось для случая сухого трения с линейной зависимостью силы трения от температуры. В настоящей работе рассматривается более общая степенная зависимость

$$\tau_{\text{тр}}(T) = \tau_{\text{тр}}^0 \{1 - [(T - T_0)/(T_* - T_0)]^n\}, \quad (1)$$

где $\tau_{\text{тр}}^0$ — удельная сила трения при начальной температуре T_0 , n — постоянная величина, характеризующая степень отклонения зависимости от линейной, T_* — температура, при которой сила трения в силу зависимости (1) обращается в нуль (за T_* можно принять, например, температуру плавления материала пластин, как это делалось в (³); если известна дей-

ствительная зависимость $\mu_{\text{тр}}(T)$, то величины T_* и n подбираются из условия наилучшего приближения степенным выражением (1) действительной зависимости).

В действительности трение не исчезает при повышении температуры, поэтому ограничимся исследованием механических релаксационных колебаний при сухом трении с разогревами, температура которых не слишком близка к температуре T_* . В безразмерном виде зависимость (1) запишется как $\bar{\tau}_{\text{тр}}(\theta) = 1 - \theta^n$, где $\theta = (T - T_0)/(T_* - T_0)$, $\bar{\tau}_{\text{тр}} = \tau_{\text{тр}}/\tau_{\text{тр}}^0$. Эта зависимость для различных n представлена на рис. 1.

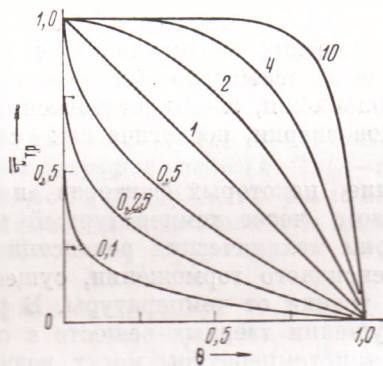


Рис. 1

Рис. 1. Зависимость безразмерной силы трения от безразмерной температуры при различных n (цифры у кривых)

Рис. 2. Изменение во времени температуры (а) и отклонения от положения равновесия (б) в плоскости трения при $n=1$, $\chi=0,1$ и различных v (цифры у кривых)

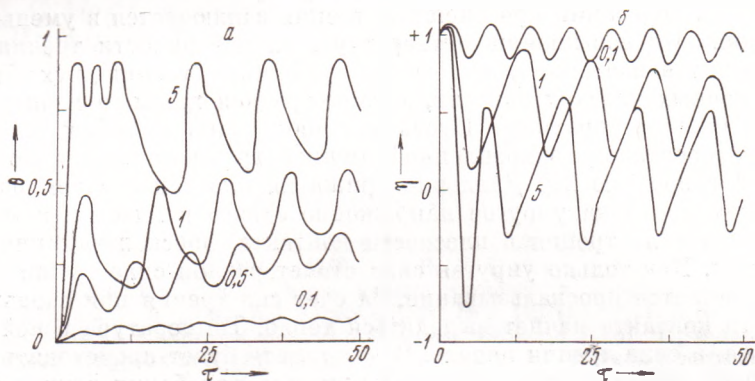


Рис. 2

Вследствие симметричности задачи достаточно рассмотреть поведение одной пластины, например, нижней. Обозначим через y упругое смещение нижней пластины в плоскости трения относительно положения равновесия ($y=0$), x — расстояние от плоскости контакта (трения), t — время, $T(x, t)$ — температуру в пластине. За начальный момент времени принимаем момент начала первого проскальзывания. В этот момент координата y принимает значение $y_0 = \tau_{\text{тр}}^0 h/G$, где h — толщина пластины, G — модуль сдвига.

Исследование удобно проводить в безразмерном виде. Введем безразмерные переменные и параметры следующими соотношениями ⁽³⁾:

$$\eta = yG/(\tau_{\text{тр}}^0 h), \quad \xi = x(3G/(\rho a^2 h^2))^{1/2}, \quad \tau = t(3G/(\rho h^2))^{1/2},$$

$$\chi = V[\rho G/3(\tau_{\text{тр}}^0)^2]^{1/2}, \quad v = [(\tau_{\text{тр}}^0)^2 h/G(T_* - T_0)](3G/\rho(\lambda c \rho h)^2)^{1/2},$$

где ρ — плотность материала пластин, a , λ , c — коэффициенты температуропроводности, теплопроводности, теплоемкости соответственно. Отметим, что параметр v является определяющим и характеризует интенсивность тепловыделения от сил трения при колебании. Если выражением

$t_\tau = [(\tau_{\tau p^0})^2 h / (G(T_* - T_0) c \rho a^{3/2})]^2$ определить время тепловой релаксации тепловыделения трения при колебании, а $t_m = (\rho h^2 / 3G)^{1/2} = 1/\omega$ — время релаксации упругих напряжений (характерное время колебаний, где ω — частота собственных колебаний пластины), то параметр ν представляет собой корень квадратный из отношения времени тепловой релаксации к времени релаксации упругих напряжений: $\nu = (t_\tau / t_m)^{1/2}$. Параметр χ определяет отношение скорости V к характерной скорости колебаний пластины $\nu_m = y_0 / t_m$.

Рис. 3. Зависимость максимальной температуры от $\lg \nu$ для первого скачка при $n=1$ и различных χ (цифры у кривых)

Рис. 4. Зависимость максимальной температуры (а) и максимальной скорости скольжения (б) от $\lg \nu$ для первого скачка при $\chi=0,1$ и различных n (цифры у кривых)

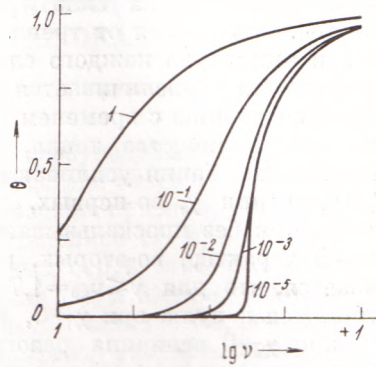


Рис. 3

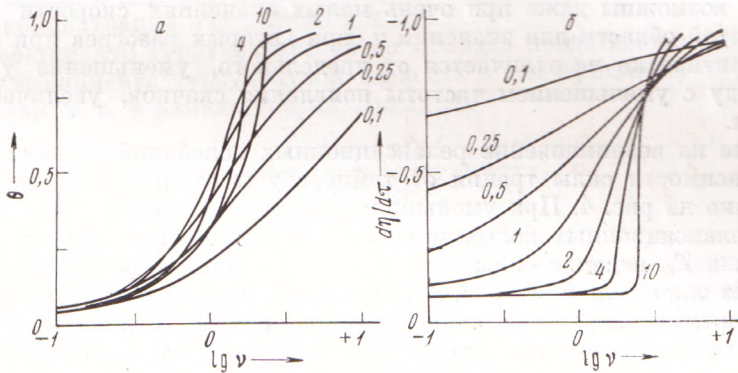


Рис. 4

В соответствии с описанной выше картиной возникновения релаксационных колебаний при трении пластин и с учетом зависимости (1) уравнения движения нижней пластины запишутся в безразмерном виде:

$$d^2 \eta / d\tau^2 + \eta - [1 - \theta^n(0, \tau)] = 0 \quad \text{при} \quad d\eta / d\tau \leq \chi, \quad (2)$$

$$d^2 \eta / d\tau^2 + \eta + [1 - \theta^n(0, \tau)] = 0 \quad \text{при} \quad d\eta / d\tau \geq \chi. \quad (3)$$

Если в момент достижения $d\eta / d\tau = \chi$:

а) $|\eta| \geq 1 - \theta^n(0, \tau)$, то происходит переход от одного уравнения движения к другому;

б) $|\eta| < 1 - \theta^n(0, \tau)$, то далее

$$d\eta / d\tau = \chi \quad (4)$$

до момента достижения $|\eta| \geq 1 - \theta^n(0, \tau)$, после чего (2).

Уравнение теплопроводности для пластины: $\partial \theta / \partial \tau = \partial^2 \theta / \partial \xi^2$.

Начальные условия: $\eta = 1$, $d\eta / d\tau = \chi$, $\theta = 0$ при $\tau = 0$.

Граничные условия:

$$\begin{aligned} \theta &\rightarrow 0 \quad \text{при} \quad \xi \rightarrow \infty, \\ -\partial \theta / \partial \xi &= |\nu [1 - \theta^n(0, \tau)] (\chi - d\eta / d\tau)| \quad \text{при} \quad \xi = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Условие (5) написано в предположении малости размера зоны разогрева по сравнению с толщиной пластины.

Полученная система решалась на ЭВМ. Находилось смещение пластины, скорость ее движения, распределение температур в зависимости от времени и параметров системы.

На рис. 2 показана картина возникновения и протекания релаксационных колебаний при линейной зависимости силы трения от температуры. Видно, что первый скачок является наиболее сильным по сравнению с последующими. Это объясняется тем, что он начинается при температуре T_0 в плоскости трения, когда сила трения имеет наибольшее значение. Вследствие тепловыделения от трения температура в плоскости контакта повышается и амплитуда каждого следующего скачка уменьшается.

При увеличении v увеличивается время тепловой релаксации тепловыделения по сравнению с временем t_m . При этом от плоскости трения отводится меньшее количество тепла, температура в ней увеличивается; релаксационные колебания усиливаются, частота их уменьшается.

При уменьшении χ , во-первых, увеличивается длительность стадии движения пластин без проскальзывания и график движения приобретает пилообразный характер, во-вторых, разогревы уменьшаются (рис. 3). Причем оказывается, что для $v \leq v_{кр} = 1,74$ разогрев от тепловыделения при скачке стремится к нулю при $\chi \rightarrow 0$, т. е. колебания при $\chi \rightarrow 0$ исчезают. Для $v > v_{кр}$ при $\chi \rightarrow 0$ величина разогрева уменьшается, асимптотически приближаясь к предельному значению, которое не равно нулю. (Подробно это явление исследовалось в работе (3).) Таким образом, в случае $v > v_{кр}$ колебания возможны даже при очень малых значениях скорости движения V . В этой области для значений χ , при которых разогрев при первом скачке практически не отличается от предельного, уменьшение χ вызывает, наряду с уменьшением частоты появления скачков, увеличение их амплитуды.

Влияние на возникновение релаксационных колебаний степени отклонения зависимости силы трения от температуры от линейной зависимости показано на рис. 4. При уменьшении величины n облегчается возникновение релаксационных колебаний, так как в области температур, приближающихся к T_0 , падение силы трения с повышением температуры становится более значительным (рис. 1). При этом первый скачок становится более сильным, а следующие скачки начинают резко отличаться от него и становятся значительно мельче первого скачка. Их амплитуда слабо убывает с течением времени и уменьшается при уменьшении v и χ .

Для $n > 1$ в каждом случае следует выделять характерную температуру θ_1 , при которой производная $d\bar{\tau}_{тр} / d\theta = -1$. При $\theta < \theta_1$ зависимость силы трения от температуры слаба ($d\bar{\tau}_{тр} / d\theta > -1$), при $\theta > \theta_1$ эта зависимость сильна ($d\bar{\tau}_{тр} / d\theta < -1$). Значение θ_1 возрастает с увеличением степени n . До достижения на плоскости трения температуры θ_1 колебания слабы. С течением времени их амплитуда и температура постепенно возрастают. При достижении температуры θ_1 колебания усиливаются, причем это усиление происходит тем резче, чем больше величина n . Когда разогрев на плоскости трения становится достаточно высоким, амплитуда скачков начинает убывать.

Автор благодарен А. Г. Мержанову, С. А. Бостанджияну, В. С. Козлову за ценные советы, Ж. А. Зиненко за программирование задачи для численного счета.

Филиал Института химической физики
Академии наук СССР
Черноголовка Московск. обл.

Поступило
25 I 1973

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ И. В. Крагельский, Трение и износ, М., 1968. ² А. В. Чичинадзе, Расчет и исследование внешнего трения при торможении, М., 1967. ³ А. П. Амосов, С. А. Бостанджиян, Ж. А. Зиненко, ДАН, 209, № 6 (1973).