

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
Физтех-школа физики и исследований им. Ландау

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2.1.5

Исследование термических эффектов при упругих деформациях

Пилюгин Л. С.
Б02-212
13 февраля 2023 г.

1 Аннотация

Цель работы: экспериментально получить закон упругой деформации резины при постоянной температуре в зависимости от растягивающей силы; измерить нагрев резины при адиабатическом растяжении и определить её теплоёмкость.

Оборудование: образец резины (тонкая полоса), закреплённый в теплоизолированном кожухе; набор грузов; термopара; цифровой осциллограф или микровольтметр.

2 Теоритические сведения

Большинство тел стремится увеличить свой объём при изобарном повышении температуры. Согласно принципу Ле-Шателье–Брауна, их адиабатическое расширение должно сопровождаться понижением температуры. Однако для резины Эти эффекты имеют обратный знак.

Модуль Юнга резины порядка 1 МПа, коэффициент Пуассона близок к 0,5, поэтому при растяжении вдоль оси объём почти не меняется. В отличие от обычных твёрдых тел, резина растягивается за счёт переориентации и перемещения звеньев полимерных цепочек, а не изменения расстояния между атомами.

Рассмотрим движение тонкой полосы длиной l под действием внешней силы f . Работа δA , совершаемая образцом

$$\delta A = -ddl + PdV$$

P — атмосферное давление. Последнее слагаемое мало по сравнению с первым.

Тогда первое начало термодинамики

$$dU = TdS + fdl$$

$$F = U - TS$$

$$dF = -SdT + fdl$$

F — свободная энергия.

$$f = \left(\frac{\partial F}{\partial l} \right)_T, \quad S = - \left(\frac{\partial F}{\partial T} \right)_l$$

Соотношение Гиббса-Гельмгольца:

$$U(T, l) = F(T, l) - T \left(\frac{\partial F}{\partial T} \right)_l$$

Уравнение Максвелла:

$$\left(\frac{\partial F}{\partial T} \right)_l = - \left(\frac{\partial S}{\partial l} \right)_T$$

Для изотермического процесса

$$\delta Q = TdS = T \left(\frac{\partial S}{\partial l} \right)_T dl = -T \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_l dl$$

$$f = \left(\frac{\partial U}{\partial l} \right)_T - T \left(\frac{\partial S}{\partial l} \right)_T$$

Эта формула показывает, что упругие свойства вещества определяются не только зависимостью его внутренней энергии от деформации, но и изменением его энтропии. В большинстве

твёрдых тел доминирующим является первое слагаемое, тогда как в резине (а также в газах) преобладает второе.

Предположим, что внутренняя энергия резины зависит только от температуры. Рассмотрим изотермическое растяжение резины. Тогда внутренняя энергия постоянна и

$$\delta Q = TdS = -f dl$$

$$Q = - \int f dl = -A_{\text{внеш}}$$

При растяжении резина выделяет тепло, а работа силы целиком идёт передаётся окружающей среде в виде тепла.

Исследуем зависимость сил растяжения от температуры.

$$f = -T \left(\frac{\partial S}{\partial l} \right)_T$$

Как видно, упругие свойства резины связаны не с изменением её внутренней энергии при растяжении, а с изменением её энтропии. Данная ситуация вполне аналогична адиабатическому расширению идеального газа, только энтропия резины при растяжении не возрастает, а убывает.

Далее из уравнения Максвелла:

$$f = T \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_l$$

Это может быть выполнено, только если сила прямо пропорциональна температуре, то есть уравнение состояния имеет вид

$$f(T, l) = \frac{T}{T_0} \bar{f} \left(\frac{l}{l_0} \right)$$

$\bar{f} \left(\frac{l}{l_0} \right)$ — некоторая функция, зависящая только от растяжения образца. Тогда модуль Юнга должен быть прямо пропорционален температуре.

Теперь рассмотрим адиабатическое растяжение резины. Квазистатический (обратимый) процесс является изоэнтропическим. Тогда из первого начала

$$dU = f dl$$

$$dU = C_l dT$$

C_l — теплоемкость при постоянном удлинении. Считая изменение температуры малым,

$$\Delta T = \frac{1}{C_l} \int_{l_0}^l f dl = \frac{A_{\text{внеш}}}{C_l}$$

Таким образом, при адиабатическом растяжении резина нагревается пропорционально работе внешних сил.

$$\Delta S = C_l \ln \frac{T}{T_0} - \frac{1}{T_0} \int_{l_0}^l \bar{f} dl$$

При увеличении l энтропия должна убывать, что компенсируется увеличением температуры.

$$\Delta S(\lambda) = -const \cdot \left(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} \right)$$

$$\lambda = l/l_0$$

$$F(T, \lambda) = s_0 E \cdot \frac{1}{3} \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right)$$

s_0 — площадь сечения недеформированного образца, $E = E_0 \frac{T}{T_0}$ — модуль Юнга.

Упругие свойства резины обусловлены её молекулярной структурой. Её молекулы представляют собой длинные цепочки атомов, которые в нерастянутом состоянии свёрнуты в клубки. Переплетающиеся цепочки связаны химическими связями. На молекулярном уровне резина представляет собой практически однородную упругую сетку.

При растяжении расстояния между атомами в цепочках и энергия взаимодействия почти не меняются. Деформация происходит из-за переориентации и перемещения звеньев цепочек, из-за чего клубки разворачиваются. При этом молекулы становятся более упорядоченными, а энтропия снижается.

В адиабатическом процессе энтропия сохраняется, следовательно, ориентационное уменьшение энтропии будет скомпенсировано её ростом за счёт усиления хаотических колебаний атомов, то есть повышением температуры образца. Если же растяжение изотермическое, то уменьшение энтропии произойдёт за счёт выделения тепла в окружающую среду.

При малых растяжениях томы переплетающихся цепочек, оказавшиеся соседними, взаимодействуют между собой слабыми электростатическими (ван-дер-ваальсовыми) силами. Пока эти связи не разорваны, резина ведёт себя как обычное твёрдое тело.

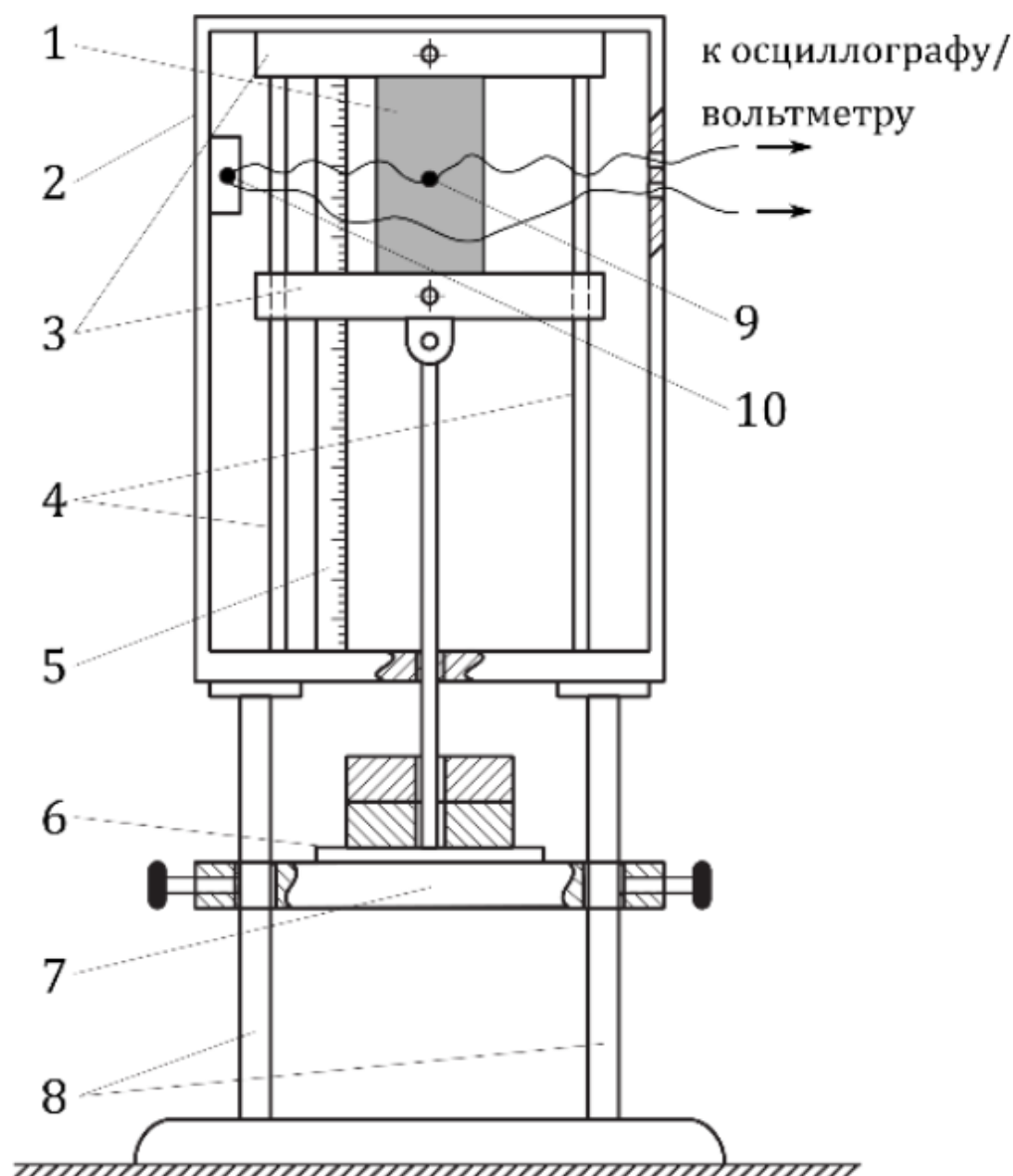
Даже при очень больших растяжениях не происходит разрыва молекулярных связей, поэтому такие растяжения должны быть обратимы. Если сразу после растяжения вернуть резину квазистатически в исходное состояние, её температура должна принять исходное значение. На практике неизбежно имеет место теплообмен с окружающей средой, поэтому растяжение резины не является строго адиабатическим и обратимым. Если же попытаться уменьшить теплообмен за счёт сокращения времени адиабатического растяжения, это приводит к другим необратимым эффектам: становится значимым внутреннее трение (вязкость) резины, возбуждаются затухающие колебания среды и т.п. Таким образом, измеряемое приращение температуры всегда будет несколько меньше теоретического, а при быстром возврате к исходному растяжению температура резины окажется несколько выше исходной.

3 Оборудование

Схема экспериментальной установки изображена на рисунке. Исследуемый образец 1 (плоская резиновая полоса) расположен внутри закрытого кожуха 2 и закреплён в зажимах 3. Верхний зажим неподвижен, а нижний может свободно перемещаться вдоль вертикальных направляющих 4. Положение нижнего зажима измеряется линейкой 5. К нижнему зажиму подвешена платформа 6, на которой могут размещаться грузы. Растяжение образца может быть ограничено положением упора 7, фиксируемого винтами на стойке 8.

Внутри резиновой полосы (в её центре) вшит один из спаев термопары 9 (рабочий спай). Второй (компенсирующий) спай 10 находится внутри кожуха вблизи стенки. Выводы термопар подключаются к микровольтметру, либо через усилитель к цифровому осциллографу. Характеристики термопары и усилителя указаны на установке.

Изменение температуры резины ΔT составляет всего несколько десятых долей градуса. Поэтому в работе важно максимально точно обеспечить равенство начальных температур рабочего и компенсирующего спаев. Чтобы лучше выровнять начальные температуры, образец вместе с термопарами помещён в закрытый кожух, стенки которого для лучшей изоляции покрыты алюминиевой фольгой. При работе необходимо избегать перепадов температур как внутри кожуха, так и вблизи него: в частности, не следует направлять на кожух настольную лампу (для



подсветки можно использовать светодиодный фонарик); не следует без необходимости трогать кожу руками; также стоит убедиться, что в помещении отсутствуют значимые перепады температур (закрывать окна и т.п.).

Измерение термического эффекта при адиабатическом растяжении можно провести двумя способами. Можно быстро растянуть резину и непосредственно измерить возникающий температурный скачок. Либо можно растягивать резину медленнее, а затем экстраполировать кривую зависимости температуры от времени к начальному моменту. Оба способа обладают своими недостатками: при быстром растяжении возможно возникновение необратимых явлений, а при использовании же второго способа неизбежна ошибка экстраполяции, величину которой трудно оценить.

4 Результаты измерений

5 Вывод