



Министерство образования и науки Российской Федерации

Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Факультет «Робототехника и комплексная автоматизация»

Кафедра РК5 «Прикладная механика»

#### РАБОТА № 4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ УПРУГОСТИ ИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Целью работы является экспериментальное определение модуля упругости  $E$  и коэффициента Пуассона  $\nu$  изотропного материала.

#### Характеристика лабораторной установки.

В качестве объекта испытаний используется стержень прямоугольного сечения, закрепленный в захватах испытательной машины (рис. 4.1) и нагруженный продольной силой  $F$ .

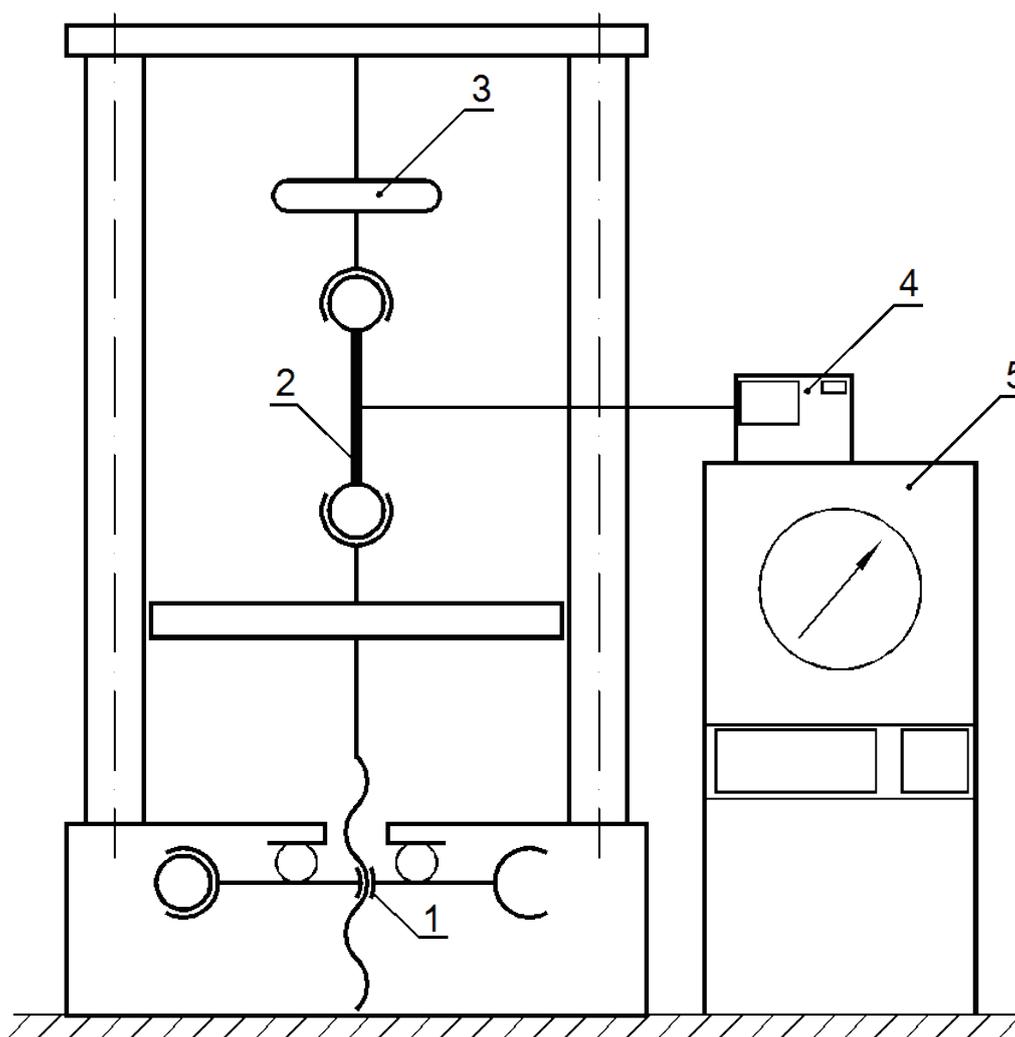


Рис. 4.1 Схема лабораторной установки:

1- силовозбуждающее устройство, 2- стержень, 3- силоизмерительное устройство, 4- электронный измеритель деформации, 5- пульт управления.

На образец до испытаний наклеиваются два тензорезистора (рис. 4.2): один в продольном направлении (для измерения продольной деформации  $\varepsilon_z$ ) другой - в поперечном (для измерения поперечной деформации  $\varepsilon_x$ ). Оба тензорезистора фольгового типа. Схема тензорезистора приведена на рис. 4.3.

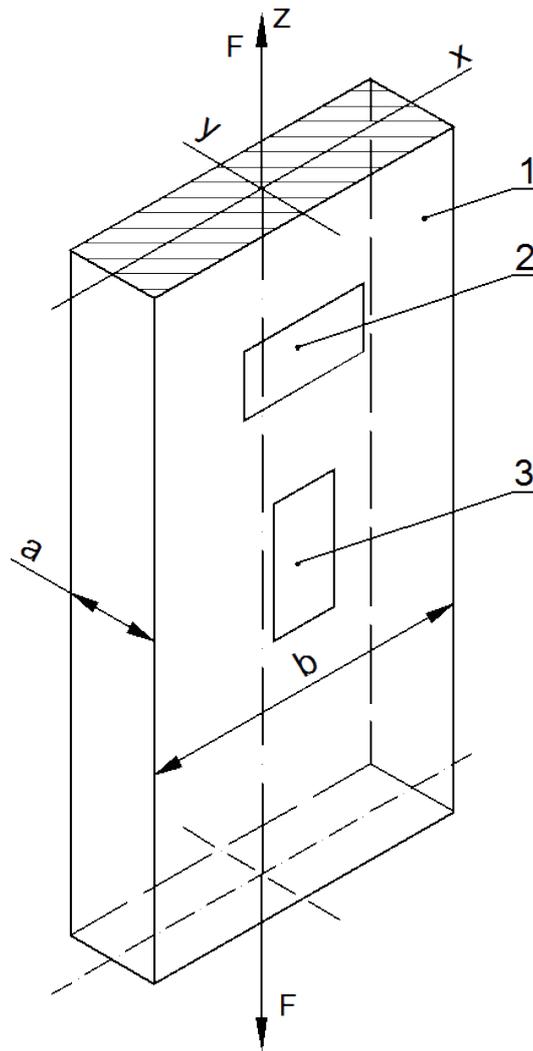


Рис. 4.2 Расположение тензорезисторов на стержне:  
1- стержень, 2- поперечный тензорезистор, 3- продольный тензорезистор.

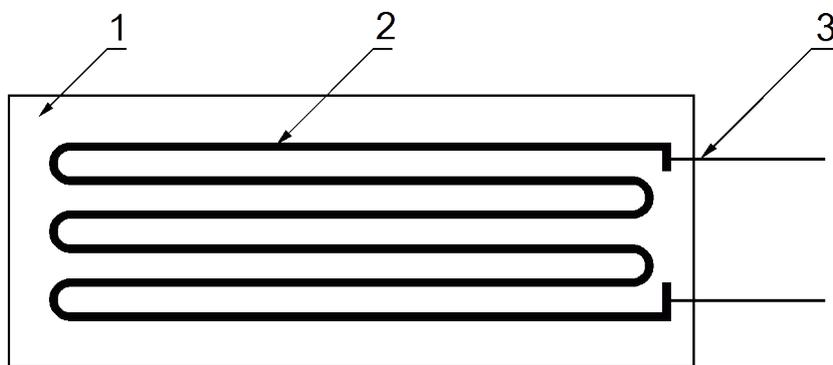


Рис. 4.3 Схема тензорезистора:  
1- подложка, 2- тензочувствительный элемент, 3- выводные проводники.

Принципиальная схема подключения тензорезисторов к измерителю деформаций приведена на рис. 4.4. Температурная компенсация осуществляется включением в одно из плеч мостовой схемы компенсационного тензорезистора ( $R_2$ ), который наклеен на брусок из того же материала, что и испытуемый образец, но не нагружается в процессе испытаний.

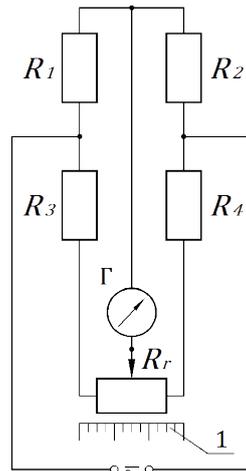


Рис. 4.4 Принципиальная схема прибора для измерения деформаций с помощью тензорезисторов:

- $R_1$  - сопротивление рабочего тензорезистора;
- $R_2$  - сопротивление компенсационного тензорезистора;
- $R_3, R_4$  – сопротивления, встроенные в прибор;
- 1 – шкала реохорда;
- Г – гальванометр.

Лабораторная установка оснащена приспособлением для проведения градуировки измерителя деформаций (рис. 4.5).

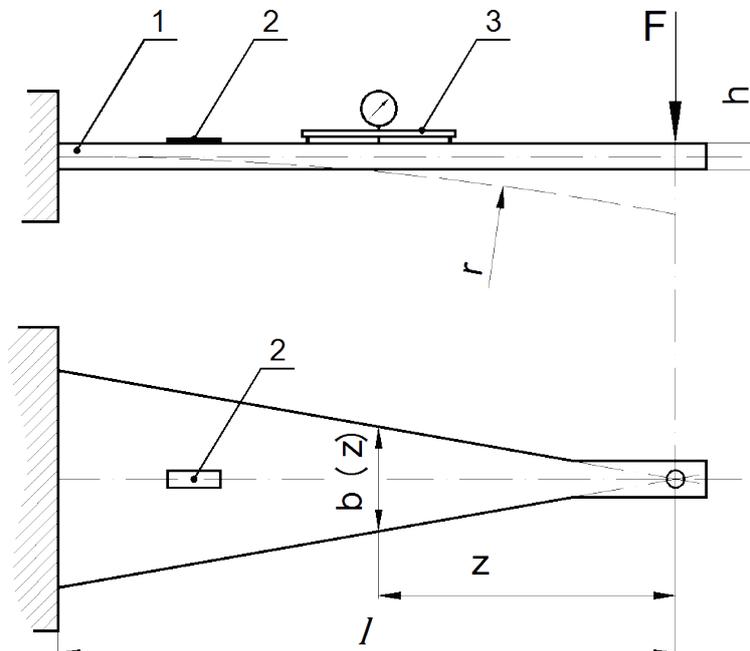


Рис. 4.5 Устройство для градуировки шкалы измерителя деформации:  
1- балка, 2- тензорезистор, 3- прогибомер.

#### Краткие теоретические сведения.

Закон Гука определяет пропорциональность между напряжениями и упругими деформациями:

$$\sigma_z = E \cdot \varepsilon_z,$$

где  $E$  - модуль упругости 1-го рода.

Закон Гука справедлив до напряжения  $\sigma_{пц}$ , называемого пределом пропорциональности материала.

При осевом нагружении стержня имеют место не только продольные ( $\varepsilon_z$ ), но и поперечные деформации ( $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ ).

При нагружении образца до предела пропорциональности материала отношение между поперечной и продольной деформациями оказывается постоянным. Абсолютное значение отношения поперечной деформации к продольной называется коэффициентом Пуассона или коэффициентом поперечной деформации:

$$\nu = \frac{\left| \varepsilon_{\text{попер}} \right|}{\left| \varepsilon_{\text{прод}} \right|} = \frac{\left| \varepsilon_x \right|}{\left| \varepsilon_z \right|} .$$

Модуль упругости и коэффициент Пуассона полностью определяют упругие свойства изотропного материала.

Постоянные упругости материала могут быть определены экспериментально динамическим и статическим методами. В настоящее время считается, что динамический метод позволяет получить постоянные упругости с более высокой точностью, чем статический метод. Динамический метод основан на зависимости частоты колебаний исследуемого образца (резонансные методы) или скорости звука в нем (импульсные методы) от констант упругости. Статический метод предполагает плавное нагружение образца материала с одновременным измерением продольной и поперечной деформаций.

Для измерения деформаций используются приборы, называемые тензOMETрами. Разработаны и применяются различные типы тензOMETров: механические, оптические, пневматические, электрические и другие. Наибольшее распространение получили электрические тензOMETры. Их действие основано на изменении параметров электрической цепи тензOMETра (сопротивления, емкости или индуктивности) в соответствии с измеряемой деформацией. В настоящей экспериментальной работе применены электротензOMETры сопротивления. ЭлектротензOMETр сопротивления состоит из двух частей: тензорезистора (рис. 4.3) и регистрирующего прибора (электронного измерителя деформаций).

Тензорезисторы прочно приклеиваются к внешней поверхности образца. При деформации образца деформируются и тензорезисторы, вследствие чего изменяется их электрическое сопротивление.

Широко распространены проволочные и фольговые тензорезисторы. Тензочувствительные элементы проволочных тензорезисторов выполняются в виде петлеобразной решетки из тонкой (диаметром 0,01-0,03 мм) проволоки. Тензочувствительные элементы фольговых тензорезисторов выполнены из тонкой фольги (толщина 0,005-0,01 мм). Фольговые тензорезисторы по сравнению с проволочными имеют лучшие метрологические характеристики. В качестве материалов тензочувствительного элемента применяются: константан (Cu 58,5%, Ni 40%, Mn 1,5%), элинвар (Ni 36%, Cr 8%, Fe 56%), нихром (Ni 80%, Cr 20%) и другие сплавы.

Конструктивно тензорезисторы (рис. 4.3) состоят из лаковой, бумажной или металлической подложки, на которой при помощи клея укреплен тензочувствительный элемент. Тензорезистор присоединяется к измерителю деформации при помощи припаянных к нему выводных проводников.

Важной характеристикой тензорезистора является его база. В настоящее время применяются проволочные тензорезисторы с базой от 3 до 50 мм, фольговые тензорезисторы имеют базу от 0,3 до 100 мм. Применение тензорезисторов той или иной базы связано с характером деформированного состояния исследуемого объекта. Чем выше градиент изменения деформаций, тем меньше должна быть база применяемых тензорезисторов.

Измеритель деформации (рис. 4.4) чаще всего собран по мостовой схеме. При использовании тензорезисторов важным является вопрос температурной компенсации, так как изменение температуры вызывает изменение электрического сопротивления тензорезистора. Температурная компенсация осуществляется введением компенсационного тензорезистора в соответствующее плечо

мостовой схемы. Компенсационный тензорезистор приклеивается к свободному от нагрузки бруску материала той же марки, что и материал исследуемого объекта, и помещается в те же температурные условия, что и рабочий тензорезистор. Компенсационный тензорезистор выбирается из той же партии, что и рабочий.

#### **Градуировка электронного измерителя деформации.**

Для определения деформации при помощи тензорезистора необходимо знать цену деления шкалы измерителя деформации. Процесс определения цены деления шкалы прибора называется его градуировкой. Градуировка осуществляется при помощи специальных приспособлений - градуировочных балок (рис.4.5). Часто используется балка равного сопротивления изгибу. Это консольная балка, имеющая клиновидную форму в плане при постоянной толщине.

Кривизна упругой линии балки:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M_x}{E \cdot I_x},$$

где  $\rho$  – радиус кривизны дуги упругой линии балки,

$M_x$  – изгибающий момент,

$E$  – модуль Юнга,

$I_x$  – момент инерции сечения относительно оси  $x$ .

У балки равного сопротивления изгибу:

$$M_x = P \cdot z,$$

$$I_x = \frac{bh^3}{12} = \frac{z \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot h^3}{12} \quad (\alpha - \text{угол клина}),$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{12P}{E \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} h^3} = \operatorname{const}.$$

т. е. упругая линия является окружностью, поэтому деформации на верхней и на нижней поверхностях балки одинаковы по длине.

На верхнюю и нижнюю поверхности клиновидной части балки наклеиваются тензорезисторы, которые выбираются обязательно из той же партии, что и рабочие тензорезисторы, т.е. наклеенные на исследуемый образец.

При градуировке деформация  $\varepsilon_z$  определяется двумя независимыми способами – электротензометром и механическим прибором (прогибомером). Сопоставляя показание электротензометра с величиной деформации, измеренной механическим прибором, можно найти цену деления шкалы измерителя деформации.

Деформацию  $\varepsilon_z$  можно определить с помощью механического прогибомера, схема которого приведена на рис. 4.6. Непосредственно прогибомер позволяет измерить стрелу прогиба  $f$  градуировочной балки на базе  $a$ . Необходимо связать стрелу прогиба  $f$  с деформацией  $\varepsilon_z$  верхней поверхности балки (рис. 4.7).

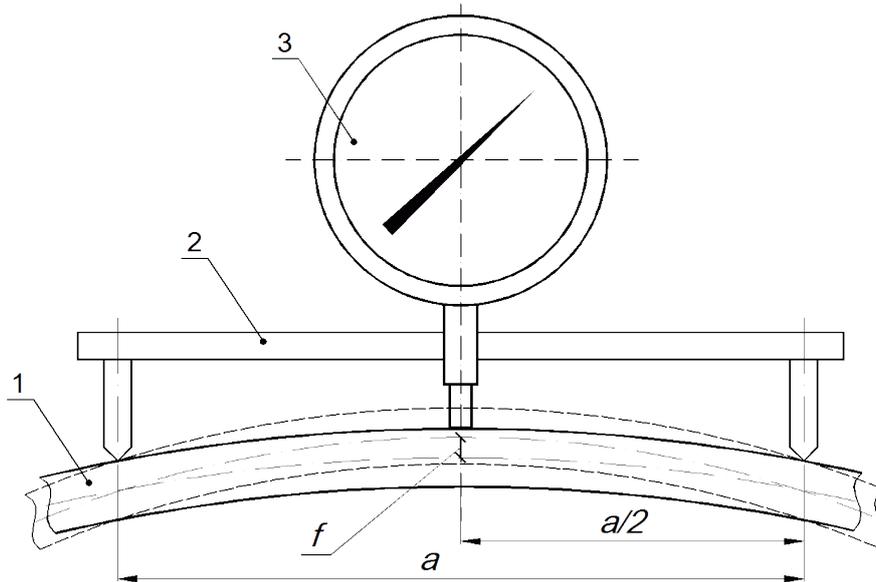


Рис. 4.6 Схема прогибомера:  
1- балка, 2- основание прогибомера, 3- индикатор часового типа.

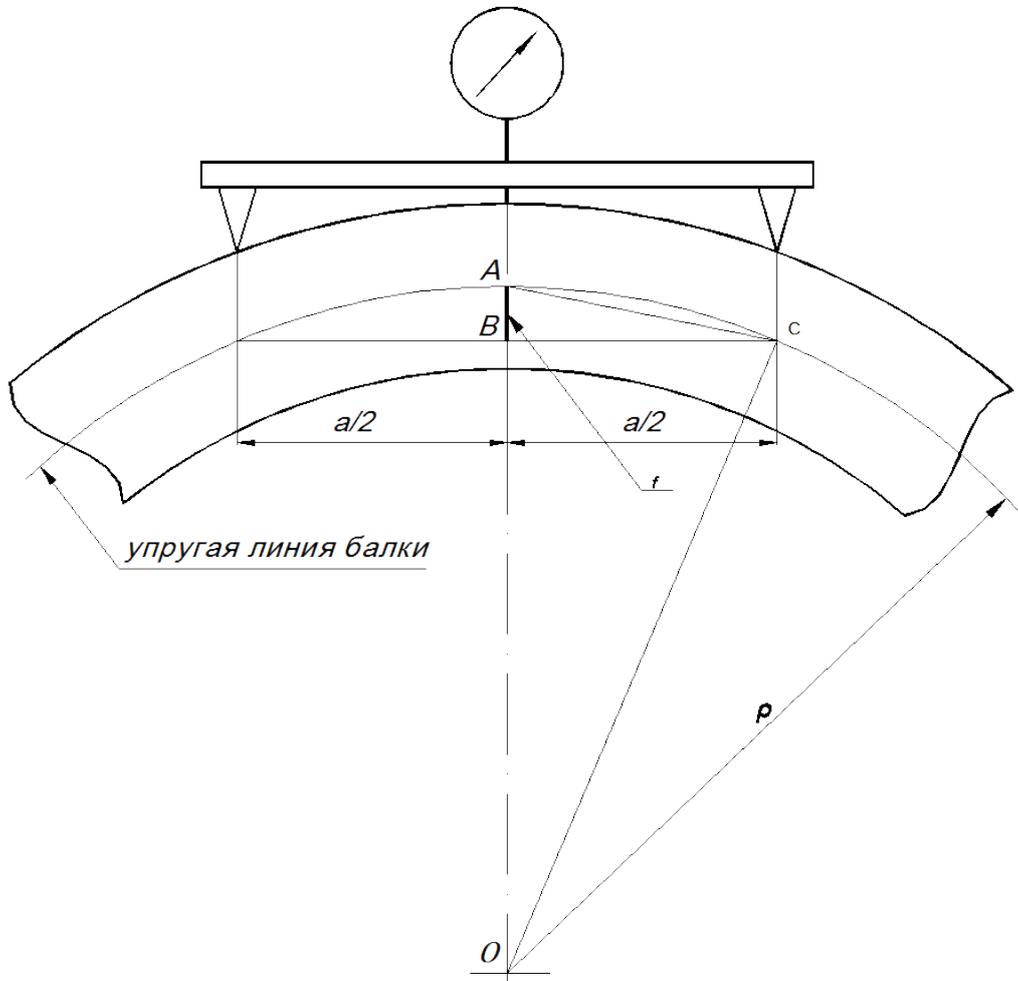


Рис. 4.7 Схема измерения прогиба градуировочной балки.

На рис. 4.7 треугольник OBC – прямоугольный:  
 $OC^2 = BC^2 + OB^2$

$$\rho^2 = \left(\frac{a}{2}\right)^2 + (\rho - f)^2$$

$$\frac{a^2}{4} - 2\rho f + f^2 = 0$$

Величина  $f^2$  мала по сравнению с другими слагаемыми, ею можно пренебречь.

Тогда

$$\rho = \frac{a^2}{8f}$$

Деформация в точках верхней грани

$$\varepsilon_z = \frac{\left(\rho + \frac{h}{2}\right)d\varphi - \rho d\varphi}{\nu d\varphi} = \frac{h}{2\rho},$$

откуда

$$\varepsilon_z = \frac{4 \cdot f \cdot h}{a^2}$$

С другой стороны, деформация  $\varepsilon_z$ , измеряемая тензорезистором, составляет

$$\varepsilon_z = K_\varepsilon \cdot n_\varepsilon,$$

где  $K_\varepsilon$  – цена деления шкалы измерителя деформации,  
 $n_\varepsilon$  – число делений шкалы измерителя информации.

Для цены деления получаем

$$K_\varepsilon = \frac{4 \cdot f \cdot h}{n_\varepsilon \cdot a^2}.$$

### Порядок выполнения работы

1. Градуировка электронного измерителя деформации
  - 1.1. Подключить к измерителю деформации тензорезистор №3, установленный на градуировочной балке
  - 1.2. Нагружать градуировочную балку последовательно силами  $P$  равными 0, 20, 40 Н, снимая каждый раз показания прогибомера и измерителя деформаций.
  - 1.3. Вычислить цену младшего разряда цифрового измерителя деформаций, которую использовать в основном опыте.
2. Определение модуля упругости и коэффициента Пуассона.
  - 2.1. Подключить к измерителю деформаций тензорезистор №1 (продольный), установленный на образце.
  - 2.2. Нагрузить образец последовательно силами 5, 10, 15, 20 кН, снимая каждый раз показания прогибомера.
  - 2.3. Разгрузить образец.
  - 2.4. Подключить к измерителю деформаций тензорезистор №2 (поперечный), установленный на образце.
  - 2.5. Повторить пункты 2.2 и 2.3
  - 2.6. Вычислить коэффициент Пуассона  $\nu$  и модуль упругости  $E$ .