

**Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича
Столетовых» (ВлГУ)**

**Институт машиностроения и автомобильного транспорта
Кафедра «Тепловые двигатели и энергетические установки»**

**Методические указания к лабораторным работам
по дисциплине «Конструирование двигателей внутреннего сгорания»**

Направление подготовки 13.03.03 – энергетическое машиностроение
Профиль подготовки – двигатели внутреннего сгорания
Уровень высшего образования – бакалавриат
Форма обучения очная

Составитель: проф. Гуськов В.Ф.

Владимир 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1. Конструктивные схемы клапанных механизмов газораспределения.....	3
Лабораторная работа № 2. Профилирование кулачков распределительного вала.....	7
Лабораторная работа № 3. Приведение масс элементов механизма газораспределения.....	13
Лабораторная работа № 4. Конструкция и назначение тензодатчиков...	16
Лабораторная работа № 5. Тарировка проволочных датчиков сопротивления.....	25
Лабораторная работа № 6. Контроль затяжки резьбовых соединений....	29

Лабораторная работа № 1. Конструктивные схемы клапанных механизмов газораспределения

Цель работы: Изучение конструктивных схем клапанных механизмов газораспределения.

Исходная информация. Назначение механизма газораспределения (МГР) – своевременное открывание и закрывание газораспределительных органов с целью обеспечения максимально возможного наполнения цилиндров свежим зарядом и очистки их от отработавших газов в строго определенные фазы рабочего цикла при минимальной работе насосных ходов.

Различают клапанные и золотниковые механизмы газораспределения. Преимущественное применение клапанных МГР обусловлено их более простой конструкцией, герметичностью и надежностью. Золотниковые МГР, где роль золотника выполняет поршень, широко используются в двухтактных двигателях.

Клапанные механизмы газораспределения выполняют с нижним (рис. 1) или верхним (рис. 2) расположением клапанов. Известны также конструкции двигателей со смешанным размещением клапанов: впускной – верхний, выпускной – нижний (рис. 3), а также с горизонтальными клапанами (рис. 4).

Нижнеклапанные механизмы газораспределения продолжают применять лишь на малоразмерных низкофорсированных двигателях, предназначенных для средств малой механизации, с учетом простоты конструкции, малых габаритных размеров и массы. Однако использование таких механизмов в автомобильных двигателях нецелесообразно вследствие следующих недостатков: повышенная передача теплоты в систему охлаждения через большую площадь поверхности камеры сгорания; опасность детонационного сгорания за счет увеличения расстояния распространения фронта пламени от свечи до наиболее удаленного участка камеры сгорания; большие потери давления на впуске из-за неоднократного изменения направления движения свежего заряда; невозможность применения в дизелях, так как неизбежно большой объем камеры сгорания не позволяет получить требуемую степень сжатия. Двигатели с нижним расположением клапанов отличаются повышенным расходом топлива.

Верхнеклапанные механизмы газораспределения свободны от указанных недостатков и обладают возможностью значительного расширения

круга конструкторских решений: применение нескольких одноименных клапанов на цилиндр; наклонное расположение клапанов; формирование

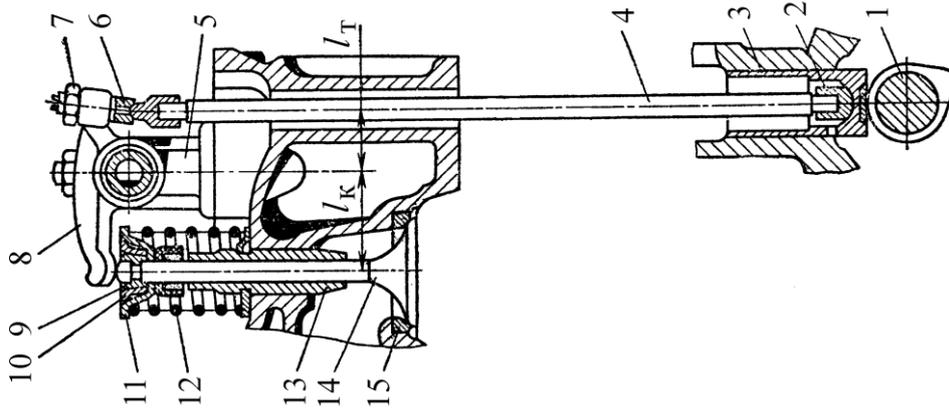


Рис. 2. Верхнее расположение клапанов: 1 – кулачок распределителя; 2 – толкатель; 3 – направляющая втулка толкателя; 4 – штанга; 5 – стойка оси коромысел; 6 – регулировочный винт; 7 – контргайка; 8 – коромысло; 9 – сухари; 10 – промежуточная коническая втулка; 11 – тарелка; 12 – пружина; 13 – направляющая втулка клапана; 14 – клапан; 15 – седло клапана

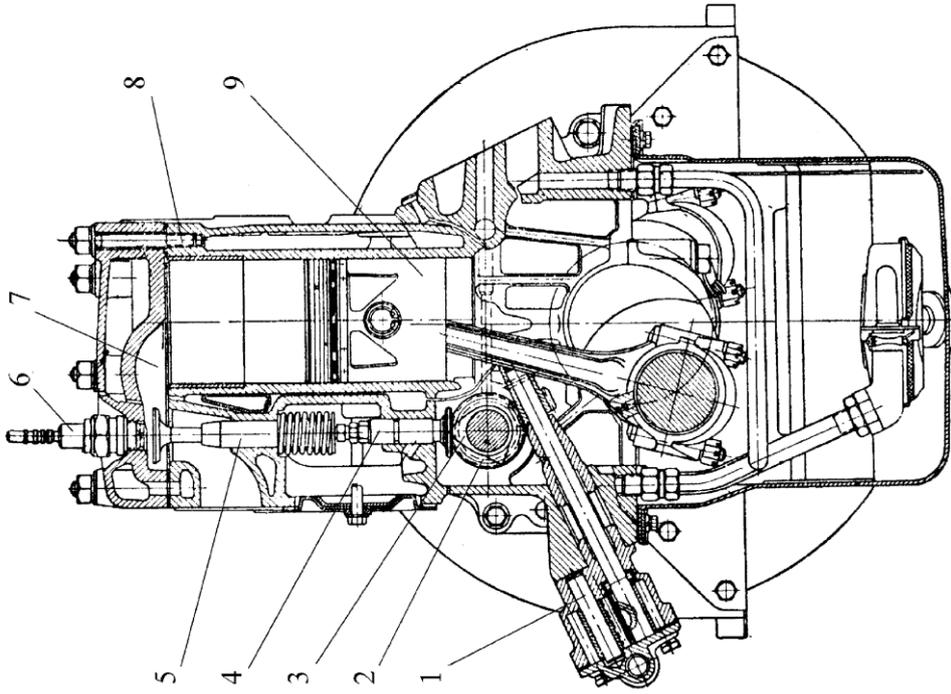


Рис. 1. Двигатель с нижним расположением клапанов:
 1 – масляный насос; 2 – винтовая шестерня распределительного вала; 3 – кулачок; 4 – толкатель; 5 – клапан; 6 – свеча зажигания; 7 – камера сгорания; 8 – цилиндр; 9 – поршень

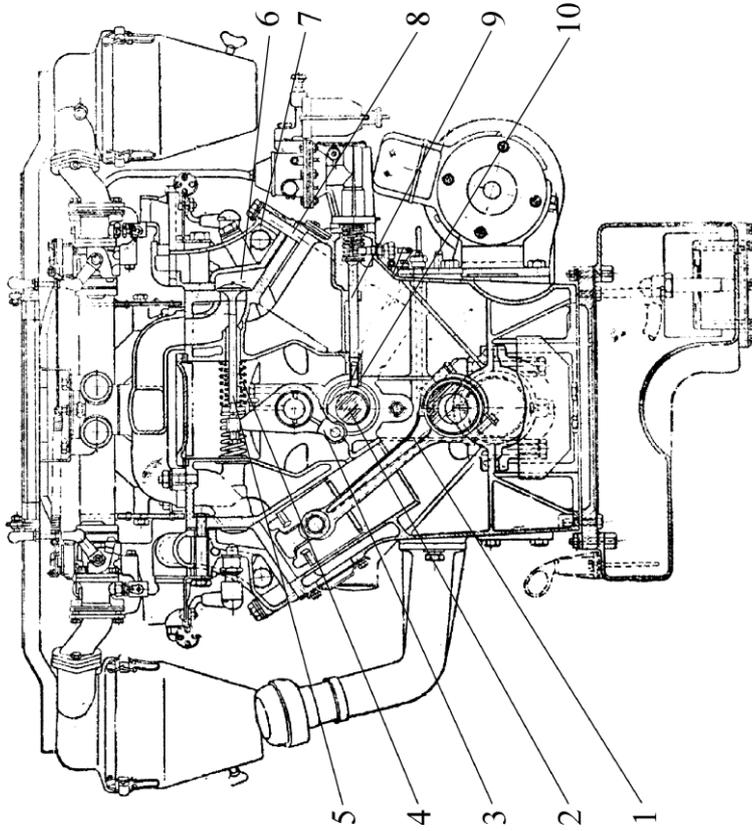


Рис. 4. Двигатель с горизонтальным расположением клапанов: 1 – трехрядная цепная передача; 2 – распределительный вал; 3 – коромысло; 4 – пружина; 5 – клапан; 6 – камера сгорания; 7 – головка блока цилиндров; 8 – болты крепления головки цилиндров; 9 – штанга привода бензонасоса; 10 – эксцентрик привода бензонасоса

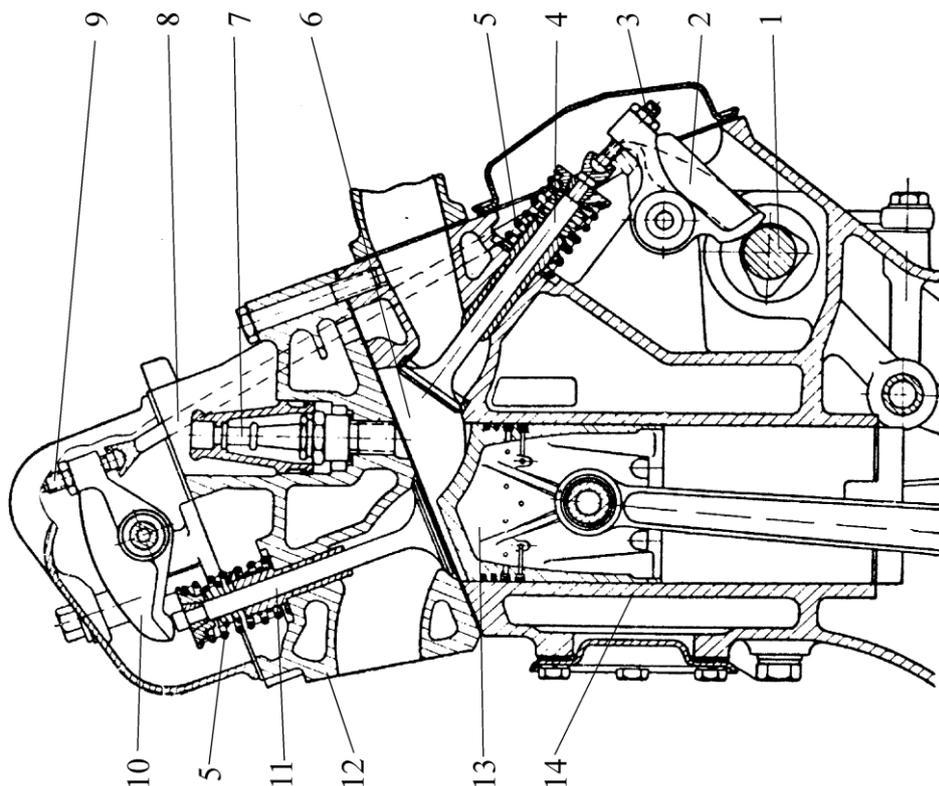


Рис. 3. Смешанное расположение клапанов: 1 – распределительный вал; 2, 10 – коромысла; 3, 9 – регулировочные винты; 4 – выпускной клапан; 5 – пружина; 6 – камера сгорания; 7 – свеча зажигания; 8 – штанга; 11 – впускной клапан; 12 – головка цилиндра; 13 – поршень; 14 – цилиндр

геометрии впускных каналов, обеспечивающих вихревое движение заряда; уменьшение массы деталей привода клапана при непосредственном приводе; формирование компактной камеры сгорания и др.

При верхнем расположении клапанов распределительный вал (распредвал) может быть размещен в блок-картере или в головке цилиндров. Выбор решения определяется степенью быстроходности двигателя. Чем больше частота вращения, тем большая сила инерции действует на клапан в момент его полного открытия и, следовательно, тем большее должно быть усилие пружины клапана. С целью уменьшения силы инерции сокращают массу деталей привода клапана, исключая промежуточные детали – толкатель, штангу, коромысло.

Привод нижнего распредвала, расположенного в блок-картере, осуществляется обычно парой шестерен. Для уменьшения шума, как правило, применяются косозубые шестерни, с этой же целью часто ведомую шестерню изготавливают из пластмассы и закрепляют на стальной ступице. В некоторых конструкциях между ведомой и ведущей шестернями устанавливают паразитную шестерню из компоновочных соображений или для

уменьшения длины штанги. Паразитная шестерня не изменяет передаточное число привода и направление вращения.

Верхние распредвалы (ВРВ) приводят цепной передачей или зубчатым ремнем (рис. 5, 6). Несмотря на достигнутую высокую прочность ремней, существует опасность перескакивания ремня по зубьям шкива, поэтому предусматривают выточки в днищах поршней, чтобы избежать встречи клапана с поршнем. Применение цепи или ремня требует наличия натяжных и направляющих устройств. В случае шестеренного привода ВРВ от коленчатого вала промежуточные шестерни передают вращение топливному насосу высокого давления, водяному насосу, муфте привода вентилятора и т. п., в приводе также предусматривается автоматическое устройство для компенсации межосевого расстояния шестерен.

Привод клапанов от верхнего распредвала имеет три разновидности: через коромысло, через одноплечий рычаг, непосредственный привод (рис. 7, 8).

Передачу вращения с коленвала на распредвал следует осуществлять с хвостовика коленвала, где амплитуда крутильных колебаний минимальна (двигатели VR6VW, ЯМЗ-740 и др.). Это способствует точности исполнения фаз газораспределения и закона топливоподачи в дизелях.

С целью уменьшения габаритных размеров цепного привода ВРВ его делают двухступенчатым, при этом передаточное число 2:1 обеспечивается в первой ступени, большая промежуточная звездочка, размещаемая на блок-картере, позволяет значительно уменьшить высоту двигателя, а звездочки ВРВ имеют такой же размер, как звездочки коленвала (двигатели ЗМЗ-4062, VR6 и др.).

Порядок выполнения работы. Самостоятельное ознакомление с содержанием лабораторной работы, изучение клапанных механизмов газораспределения по конструкциям автотракторных двигателей в лаборатории кафедры, проведение собеседования на рабочем месте, составление отчета.

Контрольные вопросы

1. В чем состоят основные недостатки двигателей с нижним расположением клапанов?
2. В чем преимущества конструкций с верхним расположением клапанов?

3. С какой целью применяют верхние распределительные валы?
4. Каким образом достигается уменьшение шума привода нижнего распределительного вала?
5. Как уменьшить габаритные размеры цепного привода верхнего распределительного вала?
6. С какой целью применяется смещенное расположение клапанов?
7. Укажите разновидности привода клапанов от верхнего распределительного вала?

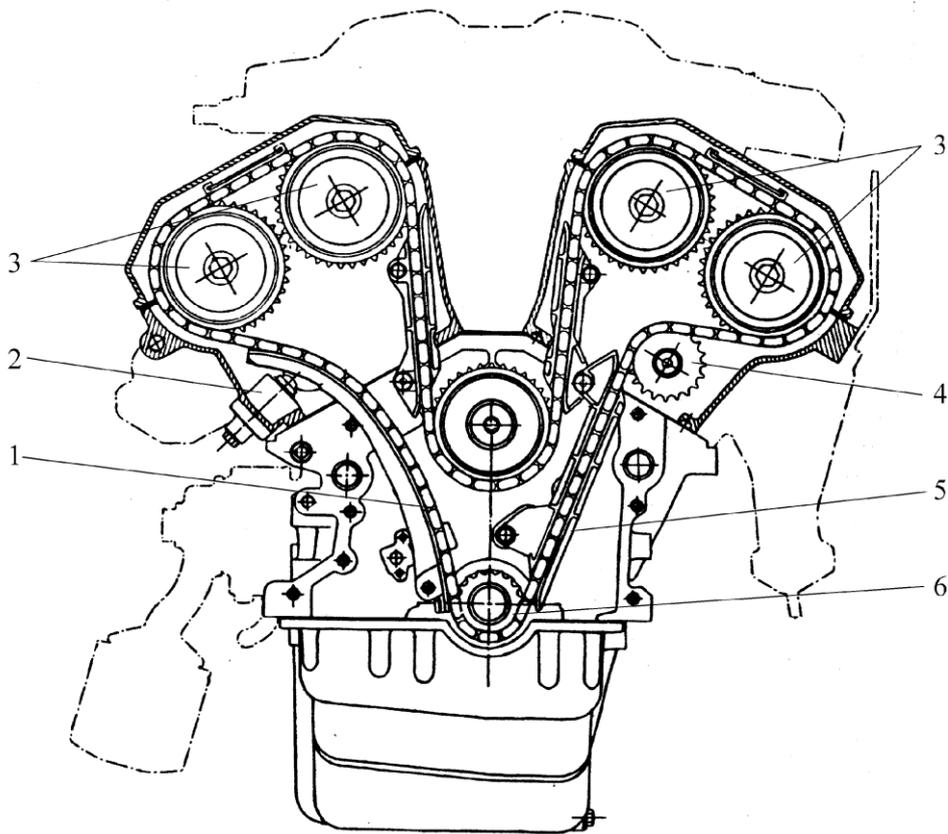
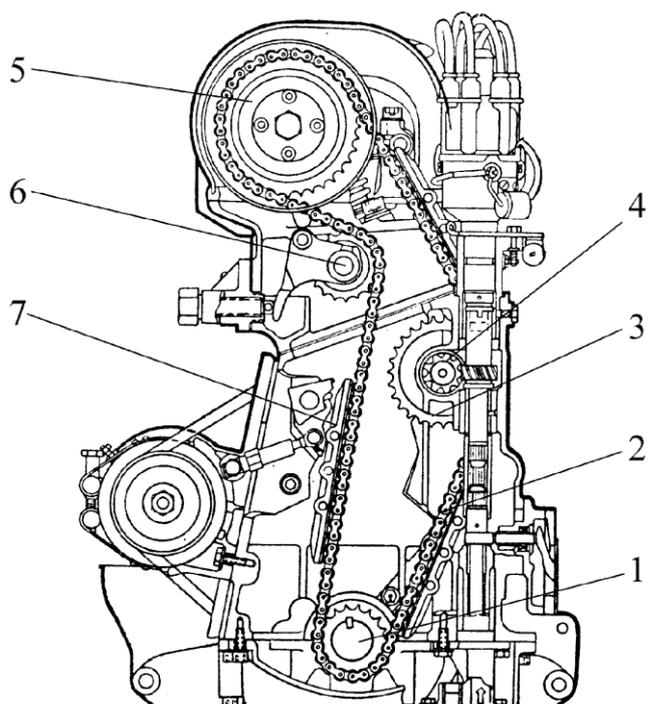


Рис. 6. Цепной привод ВРВ:

1 – ведущая звездочка коленчатого вала; 2 – цепь; 3 – промежуточная звездочка



ка; 4 – винтовые шестерни привода масляного насоса и прерывателя-распределителя; 5 – звездочка привода распределительного вала; 6 – звездочка натяжного устройства; 7 – направляющие шины

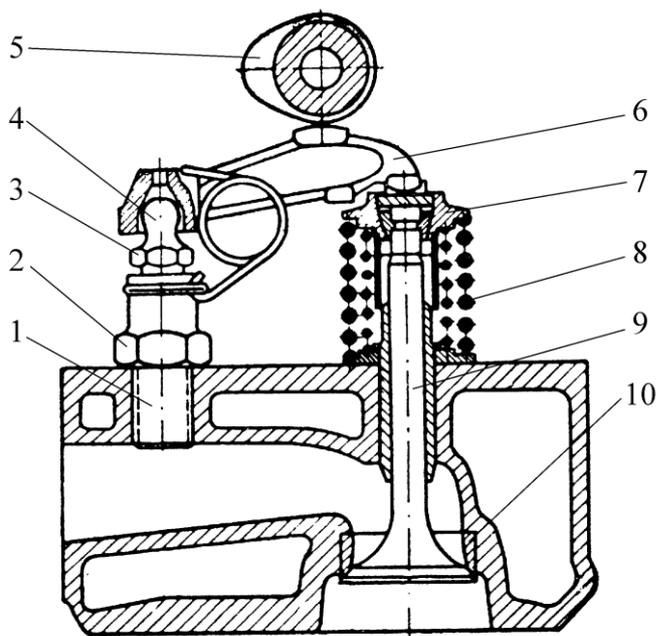


Рис. 7. Привод клапана через одноплечий рычаг: 1 – опора; 2 – контргайка; 3 – регулировочный болт; 4 – сферический наконечник регулировочного болта; 5 – кулачок распределительного вала; 6 – рычаг; 7 – тарелка; 8 – пружина клапана.

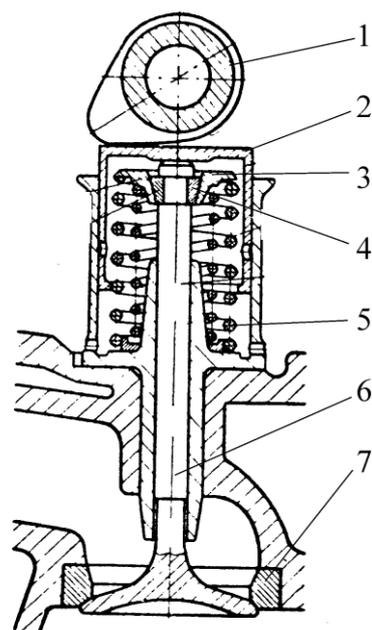


Рис. 8. Непосредственный привод клапана: 1 – кулачок распределительного вала; 2 – толкатель; 3 – тарелка; 4 – сухари; 5 – пружина; 6 – клапан.

Лабораторная работа № 2. Профилирование кулачков распределительного вала

Цель работы: Получение практических навыков профилирования безударного кулачка распределительного вала с использованием компьютерной программы.

Исходная информация. На современных автомобильных и тракторных двигателях применяются безударные кулачки, которые профилируют, задаваясь законом изменения ускорения толкателя (клапана) (рис.9), не содержащим скачков ускорений, т.е. мгновенного изменения этой величины от положительного до отрицательного значения. Кривая ускорений состоит из четырех участков: Φ_0 – участок выбора зазора – косинусоида; Φ_1 – участок положительных ускорений – полуволна синусоиды; Φ_2 – первый участок отрицательных ускорений – 1/4 синусоиды; Φ_3 – второй участок отрицательных ускорений – парабола. Профиль кулачка строится по результатам расчета (см. приложение). Для получения результата расчета необходимо ввести исходные данные: $\Phi_1 = \Phi/12$, где Φ – продолжительность открытого состояния клапана, $\Phi = \alpha_1 + 180 + \alpha_2$, где α_1 – угол опережения открывания клапана, α_2 – угол запаздывания закрывания клапана. Продол-

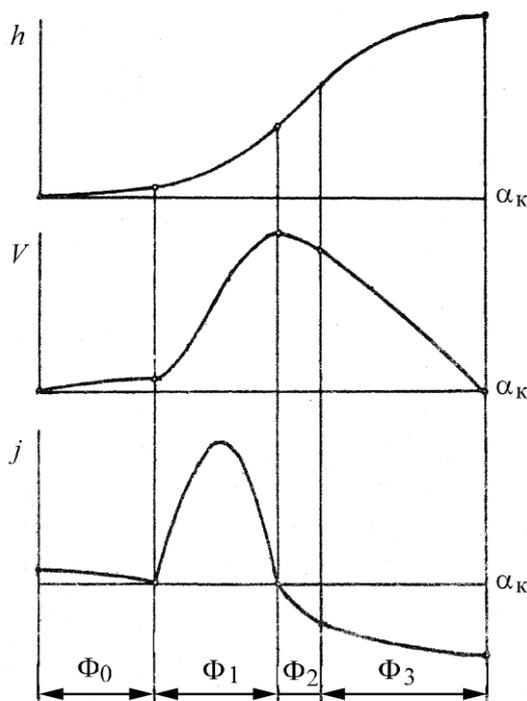


Рис. 9. Графики хода h , скорости V и ускорения j толкателя с безударным кулачком

жительность остальных участков определяется из соотношений: $\Phi_2 + \Phi_3 = (1,5...3)\Phi_1$;

$\Phi_2 = (0,1...0,15)\Phi_3$; $\Phi_0 = 15...35^\circ$ поворота распределительного вала или $30...70^\circ$ поворота коленчатого вала.

Основные параметры кулачка (рис. 10):

- 1) Радиус начальной окружности кулачка r_0 принимается как $r_0 = (1,5...2) h_{T \max}$, где $h_{T \max} = h_{кл \max} l_T / l_{кл}$, l_T и $l_{кл}$ – соотношение плеч коромысла или рычага, обращенных к клапану $l_{кл}$ и к толкателю l_T .
- 2) Радиус затылка кулачка $r_k = r_0 - \Delta$, где Δ – тепловой зазор.
- 3) $h_{T \max}$ – максимальный ход толкателя, откладываемый от окружности r_0 по вертикальной оси кулач-

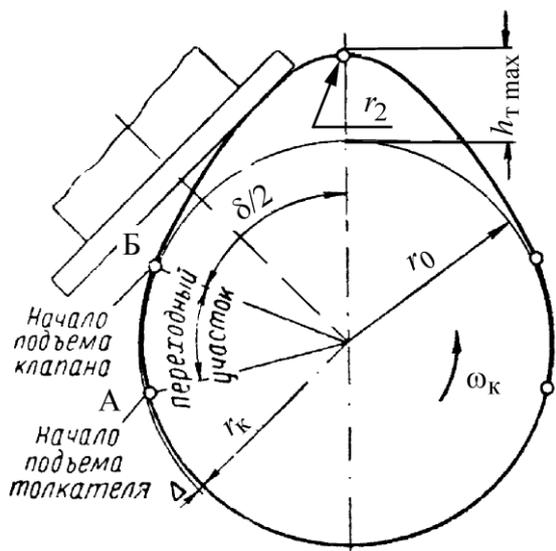


Рис. 10. Основные параметры кулачка: r_0 – начальный радиус; r_k – радиус затылка кулачка; $\delta/2$ – угол профиля кулачка (центральный угол); $h_{T \max}$ – максимальная высота подъема кулачка; ω_k – угловая скорость вращения распредвала; r_2 – радиус кривизны вершины кулачка

зор, после чего начинается перемещение клапана. Выбору теплового зазора соответствует угол поворота кулачка $15...35^\circ$. Например, для дизелей ВТЗ тепловой зазор составляет 0,3 мм, что соответствует повороту кулачка в среднем на 20° , а коленчатого вала – на 40° . Таким образом, увеличение теплового зазора на 0,1 мм смещает фазы газораспределения на $13,3^\circ$ п.к.в.

В конце распечатки файла (приложение) приведены значения A_{\max} , то есть j_{\max}^+ – максимальное положительное ускорение толкателя, и A_{\min} – j_{\min}^- – максимальное отрицательное ускорение толкателя. Величины этих ускорений используются при расчете силы инерции, действующей на кулачок от толкателя (j_{\max}^+), и при расчете пружины клапана (j_{\min}^-).

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с распечаткой результатов расчета безударного профиля кулачка (приложение).
2. Сформировать исходные данные для расчета кулачка безударного профиля (впускного или выпускного), используя для этого результаты расчета механизма газораспределения двигателя, согласно заданию на курсовой проект по дисциплине «Конструирование двигателей внутреннего сгорания»

ка.

- 4) Угол действия кулачка $\delta = \Phi/2$, так как распределительный вал вращается в два раза медленнее коленчатого вала. Обычно кулачки выполняются симметричными, поэтому можно обозначать на профиле $\delta/2 = \Phi/4$.
- 5) Радиус кривизны r_2 на вершине кулачка не должен быть менее двух миллиметров.

Следует отметить важное обстоятельство: когда кулачок касается толкателя точкой А начинается движение толкателя, в период поворота кулачка от точки А к Б выбирается тепловой зазор,

3. Выполнить расчет профиля кулачка по вычислительной программе.
4. Проанализировать результаты выполненного расчета. При необходимости изменить исходные данные и повторить расчет.
5. Рассчитать третью условную среднюю скорость газа за такт впуска (выпуска), как отношение рабочего объема цилиндра к времени – сечения одноименных клапанов.
6. Осуществить проверку выбранных фаз газораспределения и профиля кулачка путем сравнения расчетной величины третьей условной средней скорости газа за такт впуска (выпуска) с допускаемой (бензиновые двигатели: 90-150 м/с; дизели: 80-110 м/с)
7. Построить графики перемещения, скорости и ускорения толкателя в функции угла поворота распределительного вала.
8. Сделать вывод о проделанной работе.
9. Составить отчет.

Контрольные вопросы

1. Какие профили кулачков распределительного вала применялись ранее и применяются в настоящее время?
2. В чем заключается основное отличие безударного профиля кулачка от других?
3. Укажите причины перехода на безударный профиль кулачка?
4. Какие основные параметры кулачков распределительного вала?
5. Что представляет третья условная средняя скорость газа в проходном сечении клапана?
6. Что проверяют по величине третьей условной скорости газа?

РАСЧЕТ БЕЗУДАРНОГО ПРОФИЛЯ КУЛАЧКА

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

ТИП КЛАПАНА (1-ВПУСКНОЙ; 2-ВЫПУСКНОЙ)	NK=1
ТАКТНОСТЬ ДВИГАТЕЛЯ	КТ=4
УГОЛ ПРЕДВАРЕНИЯ ОТКРЫТИЯ КЛАП., ГРАД. ПКВ ДО ВМТ	JN=20
УГОЛ ЗАПАЗДЫВ. ЗАКРЫТИЯ КЛАП., ГРАД. ПКВ ПОСЛЕ НМТ	JK=45
УГОЛ УЧАСТКА СБЕГА, ГРАД. ПРВ	JZ=21
УГОЛ ПОЛОЖ. УСКОРЕНИЯ НА УЧ. ПОДЪЕМА КЛАП., ГРАД. ПРВ	J1=20
УГОЛ ОТРИЦ. УСКОРЕНИЯ, ГРАД. ПРВ	J2=5
УГОЛ ПОЛОЖ. УСКОРЕНИЯ НА УЧ. ОПУСКАНИЯ КЛАП., ГРАД. ПРВ	J1K=20
РАЗМЕРНОСТЬ ВЕКТОРОВ НК, S (JX=JN+181=JK)	JX=246
СКОРОСТЬ ТОЛКАТЕЛЯ В КОНЦЕ СБЕГА, ММ/ГРАД.	WS=.020
ДИАМЕТР ГОРЛОВИНЫ КЛАПАНА, ММ	DK=30.00
УГОЛ ФАСКИ КЛАПАНА	YF=45.0
МАКСИМАЛЬНЫЙ ПОДЪЕМ ТОЛКАТЕЛЯ, ММ	НТО=7.600
ОТНОШЕНИЕ ПЛЕЧ КОРОМЫСЛА КЛАПАНА LK/LT	AT=1.450
РАДИУС НАЧАЛЬНОЙ ОКРУЖНОСТИ, ММ	RO=17.00
ЧАСТОТА ВРАЩЕНИЯ ВАЛА ДВИГАТЕЛЯ, ОБ/МИН	ОВ=4500.0
ЗАЗОР В КЛАПАНАЕ, ММ	Z=.200
ШАГ ПЕЧАТИ ПОДЪЕМА ТОЛКАТЕЛЯ	HP=2

УЧАСТОК СБЕГА

ПРВ	НО, мм	W, мм/с	J, мм/с ²
0	.00000E+00	.00000E+00	.25334E+01
2	.15406E-02	.88104E-01	.25051E+01
4	.61279E-02	.17424E+00	.24209E+01
6	.13659E-01	.25648E+00	.22825E+01
8	.23967E-01	.33300E+00	.20932E+01
10	.36820E-01	.40207E+00	.18571E+01
12	.51932E-01	.46217E+00	.15796E+01
14	.68965E-01	.51194E+00	.12667E+01
16	.87539E-01	.55027E+00	.92557E+00

18	.10724E+00	.57631E+00	.56374E+00
20	.12762E+00	.58948E+00	.18933E+00
21	.13793E+00	.59113E+00	.34001E-05

УЧАСТОК ПОДЪЕМА

ПРВ	НТ, мм	W, мм/с	J, мм/с ²	НК, мм	S, мм ²	VRS, мм ² с	VS, мм ² -град
0	.00000E+00	.27000E+03	.00000E+00	.00000E+00	.00000E+00	.00000E+00	.00000E+00
2	.43340E-01	.33740E+03	.90245E+06	.62842E-01	.41924E+01	.37688E-03	.10176E+02
4	.10632E+00	.53301E+03	.17166E+07	.15417E+00	.10301E+02	.15308E-02	.41331E+02
6	.20667E+00	.83769E+03	.23626E+07	.29968E+00	.20071E+02	.39100E-02	.10557E+03
8	.35845E+00	.12216E+04	.27774E+07	.51976E+00	.34938E+02	.81942E-02	.22124E+03
10	.57069E+00	.16472E+04	.29204E+07	.82750E+00	.55908E+02	.15237E+01	.41141E+03
12	.84650E+00	.20727E+04	.27774E+07	.12274E+01	.83473E+02	.25995E-01	.70187E+03
14	.11828E+01	.24566E+04	.23626E+07	.17150E+01	.11756E+03	.41445E-01	.11190E+04
.....							
60	.75967E+01	.90298E+02	-.12188E+07	.11015E+02	.86885E+03	.20587E+01	.55586E+05
61	.76000E+01	.00000E+00	-.12191E+07	.11020E+02	.86929E+03	.21070E+01	.56890E+05

УСКОРЕНИЯ: АМАХ = .29204E+04 АМИН = -.12191E+04

ВРЕМЯ - СЕЧЕНИЕ КЛАПАНА: .01420 + 4.01460 + .17150 = 4.20030ММ²С

РАДИУС КРИВИЗНЫ ВЕРШИНЫ ПРОФИЛЯ КУЛАЧКА, ММ

RMIN = .2778E+01

МАХ РАДИУС КРИВИЗНЫ ПРОФИЛЯ КУЛАЧКА, ММ

RMAX = .7031E+02

Примечание: ВМТ, НМТ – соответственно верхняя и нижняя мертвые точки; град. ПРВ – градусы поворота распределительного вала.

Лабораторная работа № 3. Приведение масс элементов механизма газораспределения

Цель работы: Ознакомиться с методами приведения масс элементов механизма газораспределения.

Исходная информация. Для определения сил инерции механизма газораспределения массы всех его подвижных элементов заменяют приведенной массой, сосредоточенной на оси клапана и движущейся вместе с ним. Принцип приведения масс: кинетическая энергия приведенной массы, перемещающейся со скоростью клапана, равна кинетической энергии абсолютной массы, перемещающейся с собственной скоростью.

Приведенная масса верхнеклапанного механизма газораспределения с нижним (верхним) расположением распределительного вала включает следующие массы:

$$m_{\text{МГР}} = m_{\text{кл}} + m_{\text{тар}} + m_{\text{сух}} + \mu_{\text{пр}} + \mu_{\text{т}} + \mu_{\text{шт}} + \mu_{\text{кор}},$$

где $m_{\text{кл}}$, $m_{\text{тар}}$, $m_{\text{сух}}$ – абсолютные массы соответственно клапана, тарелки и сухарей; $\mu_{\text{пр}}$, $\mu_{\text{т}}$, $\mu_{\text{шт}}$, $\mu_{\text{кор}}$ – приведенные к оси клапана массы соответственно пружины, толкателя, штанги и коромысла.

Для толкателя принцип приведения масс запишется так:

$$\frac{\mu_{\text{т}} V_{\text{кл}}^2}{2} = \frac{m_{\text{т}} V_{\text{т}}^2}{2}.$$

Учитывая, что скорость толкателя

$$V_{\text{т}} = V_{\text{кл}} \frac{l_{\text{т}}}{l_{\text{кл}}},$$

то

$$\mu_{\text{т}} = m_{\text{т}} \left(\frac{l_{\text{т}}}{l_{\text{кл}}} \right)^2,$$

где $m_{\text{т}}$ – абсолютная масса толкателя, $V_{\text{т}}$ – его скорость.

Аналогично, допуская, что штанга перемещается соосно с толкателем,

$$\mu_{\text{шт}} = m_{\text{шт}} \left(\frac{l_{\text{т}}}{l_{\text{кл}}} \right)^2,$$

где $m_{\text{шт}}$ – абсолютная масса штанги.

Коромысло качается относительно неподвижной оси, поэтому аналогом массы служит осевой момент инерции $J_{\text{кор}}$:

$$\frac{\mu_{\text{кор}} V_{\text{кл}}^2}{2} = \frac{J_{\text{кор}} \omega_{\text{кор}}^2}{2},$$

где $\omega_{\text{кор}}$ – угловая скорость коромысла; $V_{\text{кл}} = \omega_{\text{кор}} \cdot l_{\text{кл}}$, тогда $\mu_{\text{кор}} = \frac{J_{\text{кор}}}{l_{\text{кл}}^2}$.

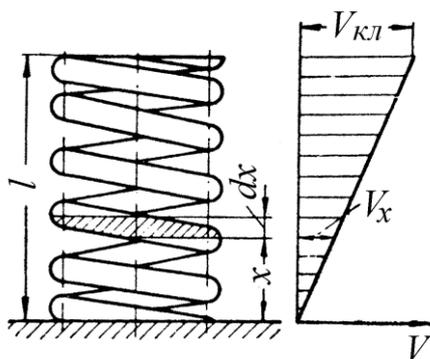


Рис. 11. Приведение массы пружины к оси клапана: l – длина пружины; $V_{\text{кл}}$ – скорость перемещения клапана; V_x – скорость перемещения элементарного участка dx

стей витков по длине, можно записать $V_x = V_{\text{кл}} x/l$, тогда принцип приведения массы пружины определится как

$$\frac{\mu_{\text{пр}} V_{\text{кл}}^2}{2} = \int_0^l \frac{V_x^2}{2} dm_{\text{пр}} = \frac{m_{\text{пр}} V_{\text{кл}}^2}{2l^3} \int_0^l x^2 dx$$

или при $x = l$

$$\mu_{\text{пр}} = \frac{1}{3} m_{\text{пр}}.$$

Если величины абсолютных масс неизвестны, то вычислить приведенную к оси клапана массу деталей МГР $m_{\text{мгр}}$ можно по конструкционной массе, являющейся отношением приведенной массы $m'_{\text{мгр}}$ к площади горловины клапана, см^2 : $m'_{\text{мгр}} = m_{\text{мгр}}/f_{\Gamma}$, где $m'_{\text{мгр}} = 15 \dots 25 \text{ г/см}^2$ при непосредственном приводе клапана; $m'_{\text{мгр}} = 30 \dots 45 \text{ г/см}^2$ при использовании толкателей, штанг и коромысел.

Порядок выполнения работы

1. Выполнить разборку механизма газораспределения двигателя по заданию преподавателя.
2. Произвести взвешивание масс элементов механизма газораспределения и длины плеч коромысла (рычага) на электронных весах.
3. Расчетным путем определить приведенную к оси клапана массу подвижных элементов механизма газораспределения.

4. Найти конструкционную массу механизма газораспределения как приведенную массу, отнесенную к единице площади проходного сечения в горловине клапана.
5. Сравнить полученную конструкционную массу со статистическими данными.
6. Сделать вывод о проделанной работе.
7. Составить отчет.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте принцип приведения масс.
2. Как определяется приведенная масса клапанной пружины?
3. Как определяется приведенная масса коромысла (рычага)?
4. Почему конструкционная масса при непосредственном приводе клапанов примерно в два раза меньше конструкционной массы привода при использовании толкателей, штанг, коромысел.
5. Почему штанга имеет трубчатое сечение и изготавливается из легких материалов.
6. Почему плечо коромысла, обращенное к клапану, больше плеча, обращенного к толкателю, в 1,2 – 1,8 раза?

Лабораторная работа № 4. Конструкция и назначение тензодатчиков

Цель работы: Изучить конструкцию тензодатчиков и технологию оценки напряженно-деформированного состояния деталей.

Исходная информация. Электрические методы измерения деформаций являются косвенными: деформация преобразуется в изменение какого-либо электрического параметра (сопротивления, индуктивности, емкости), а уже это изменение воспринимается регистрирующим устройством.

Таким образом, аппаратура для электрического измерения деформации состоит из двух обязательных частей: датчика, т.е. элемента, воспринимающего деформации детали, и регистрирующего прибора (стрелочный прибор, осциллограф и т. п.). В большинстве случаев имеется еще и третий элемент – усилитель, усиливающий снимаемые с датчика сигналы. Благодаря отделению датчика от регистрирующей аппаратуры имеется возможность сделать датчик достаточно легким и малогабаритным, устанавливать его в труднодоступных местах, а также на движущихся деталях машин.

Электрические методы позволяют регистрировать не только статические деформации, но и динамические, как при периодических, так и при неустановившихся процессах (например, при ударе). Одновременно могут быть зафиксированы показания ряда датчиков, установленных в различных точках детали или на разных деталях.

В зависимости от того, какой электрический параметр датчика изменяется при деформации, датчики носят название индукционных, емкостных, магнитострикционных, датчиков сопротивления.

Мы будем рассматривать лишь датчики сопротивления, которые благодаря своей универсальности, удобству применения и широким возможностям эксперимента получили исключительно широкое распространение в лабораторной практике.

Датчики имеют стандартную конструкцию и, в зависимости от характера исследуемых процессов (статические или динамические деформации), меняется лишь регистрирующая аппаратура.

Устройство датчиков сопротивления. Проволочные тензосопротивления (рис. 12) преимущественно изготавливают из медноникелевых сплавов типа константана и железо-никельхромовых типа элинвара. Первые из них, имеющие небольшой коэффициент линейного расширения и приемлемую тензочувствительность, применяют в установках для статических испыта-

ний. Вторые, имеющие в 50 раз больший температурный коэффициент линейного расширения, но и большую в 1,5 раза чувствительность к механическим воздействиям, – для динамических испытаний, в том числе, для электрических динамометров.



Рис. 12. Проволоочное тензосопротивление

Устройство наиболее распространенных наклеиваемых проволоочных тензосопротивлений показано на рисунке. Проволоку диаметром 0,02...0,05 мм, равными зигзагообразными петлями укладывают на тонкую бумажную полосу, покрытую слоем клея. К концам проволоки припаивают или приваривают более толстые выводные

проводники, при помощи которых сопротивление включают в измерительную цепь. Сверху его покрывают защитным слоем лака или заклеивают с этой целью полоской тонкой бумаги, а иногда фетром. В результате получают отдельный тензочувствительный элемент в виде пакетика, толщиной всего в несколько десятых долей миллиметра. Базой датчика является длина петли проволоки l .

Фольговые тензосопротивления представляют собой весьма тонкие ленты или круглые пластинки толщиной 4...12 мкм, из которых часть металла вытравлена с помощью кислоты, а оставшаяся его часть образует решетку с выводами. Решетка может иметь любой нужный рисунок, что является существенным преимуществом фольговых тензосопротивлений.

Пленочные тензосопротивления получают путем вакуумной возгонки тензочувствительного материала с последующей конденсацией его на заранее подготовленную подложку, вследствие чего на последней образуется тончайший слой металла, напоминающий пленку. Такой способ обеспечивает массовое изготовление пленочных тензочувствительных элементов. Для пленочных, как и для фольговых тензосопротивлений, помимо обычных материалов применяют соединения германия, кремния и иных полупроводников, а также другие эффективные сплавы. Например, титаноалюминиевый сплав, позволяющий измерять деформации, достигающие до 12%.

Концы датчика припаиваются или привариваются к выводам, изготовленным из более толстого проводника.

Датчик наклеивается на исследуемую деталь, деформации которой передаются проволоке. Изменения омического сопротивления проволоки, соответствующие этим деформациям, регистрируются с помощью соответствующей аппаратуры.

Изменение сопротивления датчика при его деформации определяется как изменением геометрических размеров (длины и поперечного сечения) проволоки, так и изменением ее удельного сопротивления.

Экспериментально установлено, что при растяжении проволоки ее сопротивление меняется линейно в зависимости от деформации в соответствии с формулой

$$\Delta R = \gamma_0 R \varepsilon, \quad (1)$$

где ΔR – изменение сопротивления проволоки; R – её начальное сопротивление; ε – относительное удлинение; γ_0 – коэффициент тензочувствительности материала.

Сопротивление датчика, наклеенного на деталь, также линейно связано с деформациями последней. Эта зависимость может быть выражена формулой

$$\frac{\Delta R}{R} = \gamma \varepsilon_x + \delta \varepsilon_y \quad (2)$$

ΔR – изменение сопротивления датчика при деформации; R – его начальное сопротивление; ε_x и ε_y – относительные удлинения детали в месте наклейки датчика в направлении его петель и в поперечном направлении. Коэффициенты γ и δ называются коэффициентами продольной и поперечной тензочувствительности датчика.

Ввиду того, что деформация полностью передается только участкам проволоки, ориентированным в направлении базы, а криволинейные участки петель датчика не являются активными, коэффициент продольной тензочувствительности датчика γ меньше, чем коэффициент тензочувствительности проволоки.

Чем меньше база датчика, тем больше относительная роль криволинейных участков проволоки, не участвующих в продольной деформации, и тем меньше, следовательно, продольная тензочувствительность датчика. Поперечная тензочувствительность тензодатчиков, как правило, невелика

и коэффициентом δ в формуле (2) обычно пренебрегают. Однако с уменьшением базы датчика чувствительность его к поперечным деформациям возрастает.

При малых базах (2,5...5 мм) неучет поперечной чувствительности датчика может повести к существенным погрешностям измерения. В этих случаях коэффициент поперечной тензочувствительности датчика должен определяться специальной тарировкой.

Обычно применяются датчики с базой 20, 10, 5 и 2,5 мм. Выбор базы датчика определяется задачами исследования. Как правило, следует выбирать датчики с наибольшей возможной по условиям опыта базой, исходя лишь из требования, чтобы на длине базы датчика деформации детали были в достаточной степени однородными.

Наклеенный на деталь датчик не может быть снят с нее неповрежденным. Поэтому тарировка каждого датчика невозможна.

Обычно тарировке подвергается несколько датчиков от партии, изготовленной из одной катушки проволоки на одном и том же приспособлении. Чувствительность остальных датчиков партии принимается равной средней чувствительности испытанных. В случае большого разброса в чувствительности датчиков партия бракуется. Иногда датчики могут быть протарированы непосредственно на детали; в этих случаях разброс в чувствительности датчиков не ведет к ошибкам при измерениях.

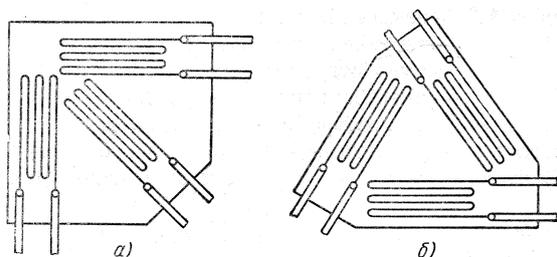


Рис. 13. Розетки датчиков: а – прямоугольная, б – равноугольная

Наряду с одиночными датчиками применяются также розетки из датчиков сопротивления, служащие для определения величины и направления главных деформаций.

Эти розетки бывают двух типов – прямоугольные (рис. 13, а) и равноугольные (рис 13, б). Каждая из таких розеток состоит из трех одинаковых датчиков, наклеенных

на общей подложке. Розетка датчиков позволяет определить деформации в трех направлениях. По значениям этих деформаций можно подсчитать величину и направление главных деформаций. В случае необходимости розетки датчиков могут быть получены и посредством соответствующей наклейки на деталь трех одинаковых датчиков.

Приклейка датчиков. Успешность измерения деформаций с помощью проволочных тензодатчиков во многом зависит от качества их приклейки. Необходимо, тщательно зачистить и обезжирить место приклейки. Слои клея должны быть тонкими и они должны быть хорошо высушены. Обычно используется довольно густой клей. Клей наносится на деталь, к которой затем прижимается датчик: при этом удаляются пузырьки воздуха и выжимается лишний клей так чтобы между деталью и датчиком оставался лишь тонкий слой.

Для приклейки датчиков могут быть использованы различные типы клея, но наибольшее применение получили целлулоидный клей, бакелитовый лак и бутварно-фенольные клеи (марки БФ-2 и БФ-4).

Целлулоидный клей представляет собой раствор целлулоида в ацетоне. Преимуществом этого клея является быстрое высыхание. В естественных условиях он полностью высыхает примерно в течение часа. Ускорять сушку датчика с помощью прогрева теплым воздухом или инфракрасными лучами не рекомендуется. Однако целлулоидный клей обеспечивает достаточную прочность приклейки лишь при хорошем качестве целлулоида и чистом растворителе.

Целлулоидный клей нетермостоек, при высокой температуре (больше 60°) он размягчается.

Бутварно-фенольный клей дает очень большую прочность приклейки при высокой термостойкости.

Для реализации этих качеств он должен быть подвергнут полимеризации – клей БФ-4 при температуре 60°, а клей БФ-2 при 140° в течение 20...30 мин. Подогрев производится только после полного высыхания клея.

Можно и не подогревать наклеенные датчики для полимеризации, однако, в этом случае измерения следует начинать не ранее чем через сутки после приклейки датчика. Датчики, приклеенные без полимеризации клея БФ, не пригодны для работы при температуре свыше 50°. Для защиты датчика от атмосферных влияний рекомендуется после приклейки покрыть его лаком. Для этого может быть использован бакелитовый лак или тот же клей БФ, который применяется для приклейки датчика. При работе в усло-

виях повышенной влажности поверхность лака датчика покрывается слоем вазелина.

Для того чтобы предотвратить обрыв выводов от датчика, следует выводные провода закреплять на детали в непосредственной близости от датчика.

Очень удобны для этой цели переходные колодочки, приклеиваемые на детали рядом с датчиком. Такая колодочка может быть изготовлена из двух листков тонкого (0,5 мм) гетинакса. В отверстия верхнего листка продеты латунные полоски (толщиной 0,1 мм), к которым с одной стороны припаиваются выводы датчика, а с другой – провода, идущие к измерительной аппаратуре. Листки склеиваются между собой и приклеиваются к детали.

Включение проволочных датчиков.

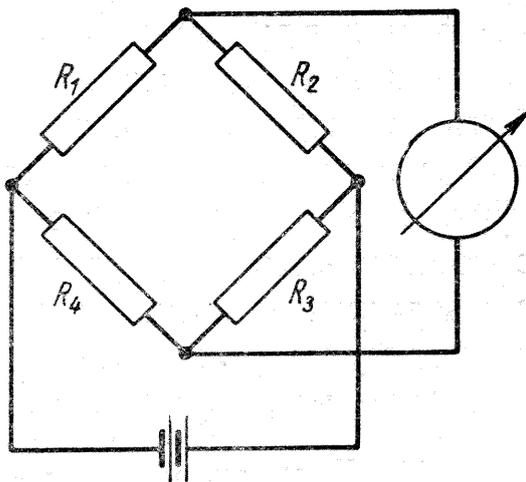


Рис. 14. Мостовая схема включения датчиков

При измерении деформаций с помощью проволочных датчиков используются две схемы их включения – мостовая и потенциометрическая.

Простейшая мостовая схема представлена на рис. 14. Мост составлен из четырех сопротивлений, из которых R_1 – датчик, R_2 , R_3 и R_4 – постоянные проволочные сопротивления. К одной из диагоналей моста подведено питающее напряжение, а к другой подключен измерительный прибор.

Ток, проходящий через прибор, сопротивление которого предполагается малым, равен

$$I = U \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{R_1 R_2 R_3 + R_1 R_2 R_4 + R_4 R_2 R_3 + R_1 R_3 R_4} \quad (3)$$

где U – напряжение источника тока.

Условием отсутствия тока в измерительном приборе (балансировки моста) является равенство

$$R_1 R_3 = R_2 R_4$$

Обычно сопротивления R_2 и R_3 делают одинаковыми $R_2 = R_3 = R$, а в качестве сопротивления R_4 используют такой же датчик, как и R_1 ($R_4 = R_1 = R_d$).

Если теперь вследствие деформации сопротивление наклеенного на деталь датчика изменится на ΔR и станет равным $R_1 = R_d + \Delta R$, через прибор моста пойдет ток.

Величину этого тока можно найти по формуле (3), полагая в ней $R_2 = R_3 = R$; $R_1 = R_d + \Delta R$; $R_4 = R_d$ и пренебрегая в знаменателе малой величиной ΔR по сравнению с R_d .

Тогда

$$I = \frac{U}{2(R + R_d)} \frac{\Delta R}{R_d}.$$

Поскольку величина

$$\frac{U}{R + R_d} = I_d$$

представляет собой ток, протекающий через датчик, то

$$I = I_d \frac{\Delta R}{2R_d}. \quad (4)$$

Таким образом, ток, протекающий через гальванометр, пропорционален изменению сопротивления датчика, а значит и деформации.

Сопротивление датчика изменяется не только в связи с деформациями детали, но и при изменении температуры.

В последнем случае ввиду различия коэффициентов линейного расширения провода датчика и материала детали, на которую он наклеен, в проводе датчика возникают температурные напряжения, в связи с чем изменяется его сопротивление. Кроме того, с изменением температуры изменяется и удельное сопротивление материала.

Температурные изменения сопротивления датчика довольно велики. Так, например, при изменении температуры на 1°C сопротивление наклеенного на стальную деталь датчика из константановой проволоки изменяется так же, как и при деформации детали напряжением 7 кг/см^2 .

При изготовлении датчика из других материалов влияние температуры еще больше.

Это приводит при измерении статических деформаций к необходимости температурной компенсации. При мостовой схеме включения датчика температурная компенсация выполняется без затруднений. Для этого в качестве сопротивления R_4 применяется компенсационный датчик, т.е. такой же точно датчик, как измерительный, наклеенный на пластинку из того же материала, что и деталь, находящуюся в таких же температурных условиях.

Тогда при изменении температуры сопротивления измерительного и компенсационного датчиков изменяется одинаково, и балансировка моста не нарушится.

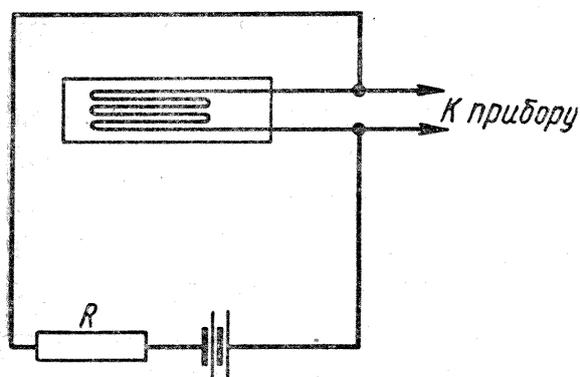


Рис. 15. Потенциометрическая схема включения датчиков

равно

$$U_d = \frac{UR_d}{R + R_d},$$

где U – напряжение источника тока, изменится на величину

$$\Delta U = U_d \frac{R}{R + R_d} \frac{\Delta R}{R_d}.$$

Это изменение напряжения весьма мало по сравнению с U_d . Поэтому потенциометрическая схема включения применяется только при использовании для измерения динамических деформаций усилителей переменного тока, не реагирующих на величину постоянного напряжения U_d , и регистрирует лишь его изменения при деформации.

Потенциометрическая схема включения датчика представлена на рис. 15. В этом случае источник тока подключается к датчику через добавочное сопротивление R , а измерительный прибор, сопротивление которого весьма велико, регистрирует изменение напряжения на датчике.

Если сопротивление датчика изменяется на ΔR вследствие деформации, то напряжение на нем U_d , которое до деформации было

При потенциометрической схеме, так же как и при мостовой схеме, может быть применена температурная компенсация. Компенсационный датчик, идентичный с активным, включается последовательно с ним вместо сопротивления R (рис. 4). Если внутреннее сопротивление источника тока мало по сравнению с сопротивлением датчика, то при одновременном и одинаковом изменении сопротивления активного и компенсационного датчиков, в связи с изменением температуры, напряжение на каждом из датчиков остается постоянным и равным половине напряжения источника тока.

Порядок выполнения работы. Самостоятельное ознакомление с содержанием лабораторной работы, изучение устройства тензодатчиков, способов их установки в лаборатории кафедры, проведение собеседования на рабочем месте, составление отчета.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит принцип измерения деформации проволочным тензодатчиком?
2. Устройство тензодатчика.
3. Каким образом датчик устанавливается на поверхность детали?
4. Какие электрические схемы включения тензодатчиков для измерения деформаций?
5. Что понимается под «базой» тензодатчика?

Лабораторная работа № 5. Тарировка проволочных датчиков сопротивления

Цель работы: Получение знаний в области тарировки тензодатчиков.

Исходная информация. Для тарировки датчиков используются тарировочные балочки – консольные или двухопорные.

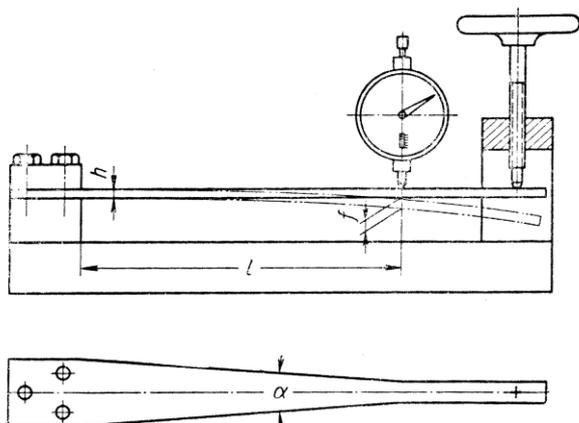


Рис. 16. Консольная тарировочная балочка равного сопротивления

Консольная тарировочная балочка представлена на рис. 16. Эта балочка имеет в плане треугольную форму (балочка равного сопротивления) и нагружается винтом в точке пересечения боковых сторон балочки.

В этом случае балочка изгибается по цилиндрической поверхности, причем в пределах клиновидной ее части деформации по длине постоянны. Эта часть балочки используется для наклейки тарируемых датчиков. Величина деформации

рассчитывается по прогибу f балочки, измеряемому индикатором на расстоянии l от заделки:

$$\varepsilon = \frac{h}{l^2} f .$$

Для того чтобы указанный способ тарировки давал необходимую точность нужно выполнить всё приспособление и особенно заделку балочки достаточно жесткими. Угол клина α не должен превышать $6 \dots 8^\circ$. Чтобы расширить пределы деформаций, при которых тарируются датчики, и избежать пластических деформаций балочки, она должна быть изготовлена из стали с высоким пределом текучести и термообработана. После термообработки плоскости балочки шлифуются.

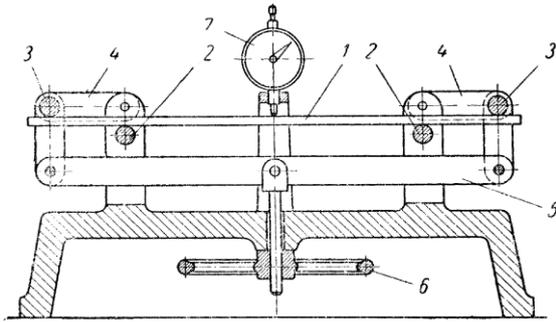


Рис. 17. Тарировочная балочка, работающая на чистый изгиб
балочка поворотом маховичка 6, прогиб измеряется индикатором 7.

Другой вариант тарировочного устройства – с балочкой, работающей на чистый изгиб – изображен на рис. 17. Балочка 1 лежит на неподвижных опорах 2 и нагружается роликами 3. Звенья 4 обеспечивают одинаковое расстояние роликов от опор.

Равномерное распределение нагрузки на ролики достигается с помощью рычага 5. Нагружается

При установке индикатора в середине пролета балочки деформация выражается через прогиб f уравнением

$$\varepsilon = \frac{4h}{l^2} f,$$

где l – расстояние между неподвижными опорами балочки; h – ее толщина.

Для определения как продольной, так и поперечной тензочувствительности датчиков используются результаты тарировки двух датчиков, один из которых наклеивается вдоль балочки, а другой – поперек. Допустим, что в первом случае продольной деформации балочки $\varepsilon_x = \varepsilon$ и поперечной деформации $\varepsilon_y = -\mu\varepsilon$, где μ – коэффициент Пуассона для материала балочки, соответствует относительное изменение сопротивления датчика $(\Delta R/R)_1$.

При той же деформации балочки относительное изменение сопротивления датчика, наклеенного в поперечном направлении, составит $(\Delta R/R)_2$ (для этого датчика $\varepsilon_x = -\mu\varepsilon$, $\varepsilon_y = \varepsilon$).

Для этих датчиков:

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_1 = (\gamma - \delta\mu)\varepsilon;$$

$$\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_2 = (-\mu\gamma + \delta)\varepsilon.$$

Отсюда находим:

$$\gamma = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_1 + \frac{\mu}{(1-\mu^2)\varepsilon} \left[\mu \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_1 + \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_2 \right];$$

$$\delta = \frac{1}{(1-\mu^2)\varepsilon} \left[\mu \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_1 + \left(\frac{\Delta R}{R} \right)_2 \right].$$

Обычно $(\Delta R/R)_1$ и $(\Delta R/R)_2$ имеют различные знаки и второе слагаемое в формуле для γ весьма мало по сравнению с первым.

Коэффициент Пуассона μ , необходимый для расчета по приведенным формулам, можно определять с помощью механических тензометров, устанавливаемых на тарировочной балочке.

Тарировка партии датчиков обязательна в том случае, когда датчики предназначены для исследования распределения деформаций в деталях сложной формы.

В ряде случаев, когда целью эксперимента является установление нагрузок, воздействующих на деталь (в статически неопределимой конструкции или при динамической нагрузке), датчики с успехом могут быть протарированы непосредственно на детали.

Для этого деталь с наклеенными датчиками подвергается предварительному нагружению известными силами с помощью грузов или в испытательной машине и при этом определяется отношение между нагрузкой и изменением сопротивления датчиков.

Используя это отношение, можно в дальнейшем по измеренному изменению сопротивления датчика определить воспринимаемую деталью нагрузку.

Порядок выполнения работы

1. Самостоятельное ознакомление с содержанием лабораторной работы.
2. Выполнить тарировку тензодатчика на лабораторной установке, измеряя деформацию балки с помощью индикатора и фиксируя показания тензодатчика.
3. Построить тарировочную кривую, как показания тензодатчика в функции перемещения, фиксируемого индикатором.
4. Сформулировать вывод о проделанной работе.

5. Составить отчет.

Контрольные вопросы

1. Что понимается под тарировкой тензодатчика?
2. Какие требования к установке для тарировки тензодатчиков?
3. Какие требования предъявляются к тарировочной балке?
4. Зачем при тарировке на балку устанавливают два тензодатчика?
5. Зачем при тарировке тензодатчика необходимо обеспечить только изгиб тарировочной балки?

Лабораторная работа № 6. Контроль затяжки резьбовых соединений

Цель работы: Изучить расчетные и экспериментальные методы исследования резьбовых соединений.

Исходная информация

1. Определение напряжений в болтах или шпильках при затяжке резьбовых соединений

Изложим методику расчетно-экспериментального исследования напряжений от изгиба в шатунных болтах по данным экспериментального определения нормальных напряжений в трех точках поперечного сечения болта A_1, B_1, C_1 (рис. 18). При выводе полученных соотношений опирались на допущение, что в поперечном сечении болта суммарные нормальные напряжения в от растяжения и изгиба имеют линейный закон распределения. Представив нормальные напряжения в поперечном сечении болта в виде векторов, с учетом принятого допущения можно утверждать, что концы векторов σ ($\sigma_{A1}, \sigma_{B1}, \sigma_{C1}$ – напряжения в точках A_1, B_1, C_1 поперечного сечения болта) располагаются на некоторой плоскости q (рис.18). Точки A_1, B_1, C_1 поперечного сечения могут быть произвольные, однако для упрощения полученных соотношений расположим эти точки на внешней окружности поперечного сечения симметрично через 120° . Начало координат O выбираем в центре поперечного сечения F , а ортогональная координатная система $Oxuz$ выбрана так, что ось x проходит через точку A_1 (рис. 18). Уравнение плоскости q , проходящей через три точки (концы векторов напряжений в точках A_1, B_1, C_1): $A(r, 0, \sigma_{A1}); B(-r/2, r\sqrt{3}/2, \sigma_{B1}); C(-r/2, -r\sqrt{3}/2, \sigma_{C1})$ имеют вид :

$$\begin{vmatrix} r \cos \varphi - r & r \sin \varphi & \sigma - \sigma_{A1} \\ -\frac{3r}{2} & r \frac{\sqrt{3}}{2} & \sigma_{B1} - \sigma_{A1} \\ -\frac{3r}{2} & -r \frac{\sqrt{3}}{2} & \sigma_{C1} - \sigma_{A1} \end{vmatrix} = 0, \quad (1)$$

где σ – напряжение в произвольной точке М поперечного сечения на окружности болта; φ – центральный угол, отсчитываемый от оси x так, что с положительного направления оси z поворот виден против хода часовой стрелки.

Раскрыв определитель (1), найдем напряжение

$$\sigma = \frac{1}{3}(\sigma_{A1} + \sigma_{B1} + \sigma_{C1}) + \frac{\sqrt{3}}{3}(\sigma_{B1} - \sigma_{C1})\sin\varphi - \frac{1}{3}(\sigma_{B1} + \sigma_{C1} - 2\sigma_{A1})\cos\varphi. \quad (2)$$

Экстремальные значения напряжений будут при $\left. \frac{d\sigma}{d\varphi} \right|_{\varphi=\varphi_0} = 0$.

Тогда из уравнений (2) определим:

$$\operatorname{tg}\varphi_0 = -\frac{\sqrt{3}(\sigma_{B1} - \sigma_{C1})}{\sigma_{B1} + \sigma_{C1} - 2\sigma_{A1}} \quad (3)$$

или

$$\left. \begin{aligned} \sin\varphi_0 &= -\frac{\sqrt{3}(\sigma_{B1} - \sigma_{C1})}{\sqrt{(\sigma_{B1} + \sigma_{C1} - 2\sigma_{A1})^2 + 3(\sigma_{B1} - \sigma_{C1})^2}}; \\ \cos\varphi_0 &= \frac{\sigma_{B1} + \sigma_{C1} - 2\sigma_{A1}}{\sqrt{(\sigma_{B1} + \sigma_{C1} - 2\sigma_{A1})^2 + 3(\sigma_{B1} - \sigma_{C1})^2}}. \end{aligned} \right| \quad (4)$$

Подставив в выражение (2) значения (4), получим максимальное σ_{\max} или минимальное σ_{\min} напряжение в поперечном сечении болта. Заметим, что проводить дополнительно исследование найденного корня не требуется. Действительно, если при $\varphi = \varphi_0$ из уравнения (2) найдем σ , которое по величине больше σ_{A1} , σ_{B1} , σ_{C1} , то полученное значение – максимальное напряжение σ_{\max} , а тогда при $\varphi = (\varphi_0 \pm \pi)$ – минимальное напряжение σ_{\min} (или наоборот). При $\varphi = (\varphi_0 \pm \pi/2)$ значение σ равно напряжению от растяжения. Впрочем по вычисленным напряжениям σ_{\max} и σ_{\min} напряжение изгиба $\sigma_{\text{и}}$ равно:

$$\sigma_{\text{и}} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}; \quad (5)$$

напряжение растяжения σ_p :

$$\sigma_p = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}. \quad (6)$$

Значение усилия затяжки Q_3 в болте или шпильке равно

$$Q_3 = \sigma_p F. \quad (7)$$

Таким образом, соотношения (2), (3), (4) позволяют провести исследование напряженного состояния шатунного болта.

Момент на ключе можно определить как

$$M_{\text{кл}} = Q_3 \cdot d_0 \cdot k,$$

где d_0 – средний диаметр резьбы шатунного болта; k – коэффициент трения в резьбе. Отсюда можно определить k :

$$k = \frac{M_{\hat{\epsilon}\hat{\epsilon}}}{Q_3 d_0} = \frac{M_{\hat{\epsilon}\hat{\epsilon}}}{\sigma_{\delta} F \cdot d_0}.$$

С учетом выражения (4) экстремальные напряжения в поперечном сечении болта

$$\sigma_{\text{экстр}} = \frac{1}{3}(\sigma_{A1} + \sigma_{B1} + \sigma_{C1}) - \frac{(\sigma_{B1} - \sigma_{C1})^2}{\sqrt{(\sigma_{B1} + \sigma_{C1} - 2\sigma_{A1})^2 + 3(\sigma_{B1} - \sigma_{C1})^2}} - \frac{1}{3} \frac{(\sigma_{B1} + \sigma_{C1} - 2\sigma_{A1})^2}{\sqrt{(\sigma_{B1} + \sigma_{C1} - 2\sigma_{A1})^2 + 3(\sigma_{B1} - \sigma_{C1})^2}}.$$

2. Экспериментальные методы исследования резьбовых соединений

При экспериментальных исследованиях обычно находят экспериментальную зависимость между моментом на ключе (моментом затяжки) и усилием в болте или шпильке.

Значение момента на ключе M_3 при затяжке записывается через динамометр при известном плече рычага.

Напряжение в болте или шпильке определяется с помощью наклеенных на внешней поверхности симметрично через 120° тензорезисторов. Такое расположение тензорезисторов позволяет вычислить величину напряжений от изгиба и от растяжения. Осевое усилие в болте определяется по известному напряжению при растяжении и площади поперечного сечения.

На рис.2 приведен эскиз дообработанного под наклейку тензорезисторов шатунного болта с указанием места наклейки тензорезисторов.

3. Испытательное оборудование и приборы.

Испытания проводятся на безмоторной установке, принципиальная схема которой приведена на рис.3.

В состав установки входят:

- тарировочный ключ с наклеенными на рычаг тензорезисторами;
- преобразователь угловых перемещений фотоэлектрической модели

ПУФ ВЕ-178 класса точности 8 по ГОСТ 26242-84;

- корпус преобразователя, который жестко закрепляется к основанию, на которое устанавливается шатун;
- резьбовое соединение - шатун.

Преобразователь угловых перемещений 3 закрепляется в корпусе 4. Вал преобразователя 1 спомощью торсиона связан с вращающейся головкой ключа. Питание ПУФ ВЕ-178 осуществляется от блока питания. Выходной сигнал от ПУФ через преобразователь подается на осциллограф или другой прибор.

Сигнал от тензорезисторов, наклеенных на рычаг ключа, через усилитель подается также на осциллограф или на измеритель деформаций ИДЦ-1. Градуировка сигнала проводится на величину момента.

Сигналы от тензорезисторов, наклеенных на болт, подаются аналогично. Градуировка сигналов проводится на величину относительной деформации.

Таким образом обеспечивается одновременная запись на осциллограмму момента на ключе при затяжке M_z , угла поворота гайки, а также напряжений в трех точках на поверхности болта.

4. Порядок проведения испытаний

Перед началом испытаний шатунный болт с наклеенными на внешней поверхности поперечного сечения симметрично через 120° тремя тензорезисторами устанавливаются в шатун и проводят градуировку тензорезисторов для определения величины напряжения.

На головку ключа устанавливается корпус преобразователя угловых ПУФ, а вал его соединяется с помощью торсиона с головкой ключа. Сигнал от ПУФ должен быть отградуирован при записи на осциллограмму.

Затем производится затяжка резьбовых соединений и сигналы от тензорезисторов и ПУФ одновременно записывают на осциллограф.

Записывать угол поворота головки шатунного болта рекомендуется, когда момент затяжки равен $5 \dots 10$ Н·м.

5. Обработка результатов испытаний.

Если при проведении испытаний в точках A_1 , B_1 , C_1 получены значения деформации (в единицах относительной деформации – ЕОД), то пересчет в напряжения проводится по известной формуле:

$$\sigma = E \cdot \epsilon,$$

где $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа - модуль упругости материала болта;

Определение напряжений от растягивающей нагрузки (силы затяжки Q_3) и от изгиба (см. п.1 описания) можно провести вручную или по специально разработанной программе для ЭВМ (программа Bolt).

Результаты обработки рекомендуется записать в таблицу :

№№ по п.п.	Момент затяжки M_3 , Нм	Сила затяжки Q_3 , Н	Угол поворота головки болта
---------------	------------------------------	---------------------------	--------------------------------

По полученным результатам строят график зависимости Q_3 и угла поворота головки болта от момента затяжки.