

Факультет «Энергомашиностроение»
Кафедра «Поршневые двигатели»

Н.Д. ЧАЙНОВ, Л.Л. МЯГКОВ, А.В. СЯЧИНОВ, И.В. ОБОЛОННЫЙ

**Определение деформаций и напряжений в шатуне
быстроходного двигателя**

*Методические указания к выполнению лабораторных работ
по курсу
«Конструирование двигателей»*

Москва

2018

Оглавление

Введение	3
1. Цель и задачи работы, требования к результатам ее выполнения	4
2. Система измерений и приборы	5
3. Тарировка датчиков	12
4. Правила техники безопасности	15
5. Оценка погрешностей при тензометрировании	15
6. Краткая характеристика объекта исследования	16
7. Обработка результатов тензометрирования, сравнение результатов расчета и эксперимента	20
8. Задачи и порядок выполнения работы	26
Литература	

ВВЕДЕНИЕ

Целью лабораторных работ по курсу «Конструирование двигателей» является знакомство студентов с экспериментальными методами определения напряжений и деформаций в основных деталях двигателей, с методикой проведения экспериментов, с измерительной аппаратурой, а также сравнение полученных опытных данных с результатами расчетов по методикам, изучаемым в указанном курсе. Проведение отдельных работ должно быть увязано с планом чтения лекций по соответствующим разделам курса.

Лабораторные занятия предусматривают проведение работ по изучению напряженно-деформированного состояния основных элементов шатуна рядных двигателей при действии статической механической нагрузки, имитирующей максимальные силы давления газов в цилиндре и максимальную приведенную инерционную нагрузку, действующую на шатун.

Физическое моделирование, используемое в данной работе, получило в настоящее время широкое применение. Непосредственный замер деформаций в подвижных деталях работающего двигателя весьма сложен и достаточно трудоемок. При моделировании напряженно-деформированного состояния (НДС) натурных образцов шатуна от действия механической нагрузки, в первом приближении, не воспроизводят переменное во времени давление в цилиндре, а ограничиваются статическим давлением p , равным или несколько превосходящим максимальное давление сгорания p_z . При исследовании напряженно-деформированного состояния элементов шатуна особое внимание должно быть обращено на условия нагружения в поршневой и кривошипной головках, принадлежащих модели и реальному двигателю. Значительные трудности связаны здесь с наличием масляного слоя в подшипниках работающего двигателя, который при безмоторных испытаниях отсутствует.

1. Цель и задачи работы, требования к результатам её выполнения

При разработке конструкций шатунов (в том числе выполненных из композиционных материалов) рационально сочетание расчетных и экспериментальных методов исследования. Особенно эффективен такой подход при разработке конструкций шатунов, выполненных с применением нетрадиционных материалов.

При экспериментальных исследованиях прочности и жесткости конструкций наибольшее применение получили статические испытания, позволяющие решить полностью или частично следующие задачи:

- выбор конструкционного материала,
- выбор рациональных конструктивных схем,
- проверка методики расчета,
- получение экспериментальных данных и эмпирических зависимостей для приближенных расчетов,
- исследование новых закономерностей, отработка методики и техники экспериментальных исследований,
- оценка прочностных качеств конструкции.

Важнейшим вопросом при проведении экспериментальных исследований являются методы и технические средства измерений деформаций, характеризующих воздействия различных силовых факторов на объект исследования. Применительно к исследованию шатунов такими параметрами являются: нагрузка, относительные деформации, напряжения и перемещения.

Напряженное и деформированное состояние конструкций может быть определено с использованием следующих основных методов:

- метод хрупких покрытий,
- метод сеток,
- метод полос муара,
- электротензометрирование,
- метод оптически чувствительных покрытий,
- поляризационно-оптический метод [1].

В данной работе исследования проводятся для проверки возможности использования разработанной методики расчета при дальнейшем совершенствовании существующего шатуна реального двигателя, разработки новых его конструкций и отработки методики и техники экспериментальных исследований. В качестве основного метода исследования НДС используется электротензометрирование.

2. Системы измерений и приборы

При экспериментальном изучении напряженно-деформированного состояния деталей двигателей внутреннего сгорания (равно как и других объектов энергетического и общего машиностроения) широкое распространение получили тензорезисторы, которые часто называют тензодатчиками. Принцип действия тензорезистора заключается в изменении электрического сопротивления проводника при воздействии на этот проводник механического усилия растяжения или сжатия. Тензорезисторы могут быть изготовлены из полупроводника или из очень тонкой проволоки (рис.1).



Рис.1 Внешний вид тензорезистора

В этой работе использованы проволочные тензорезисторы в виде петлеобразной решетки с базой 1мм (рис.1). Свойства тензорезистора, используемые для измерений, представлены на рис. 2.

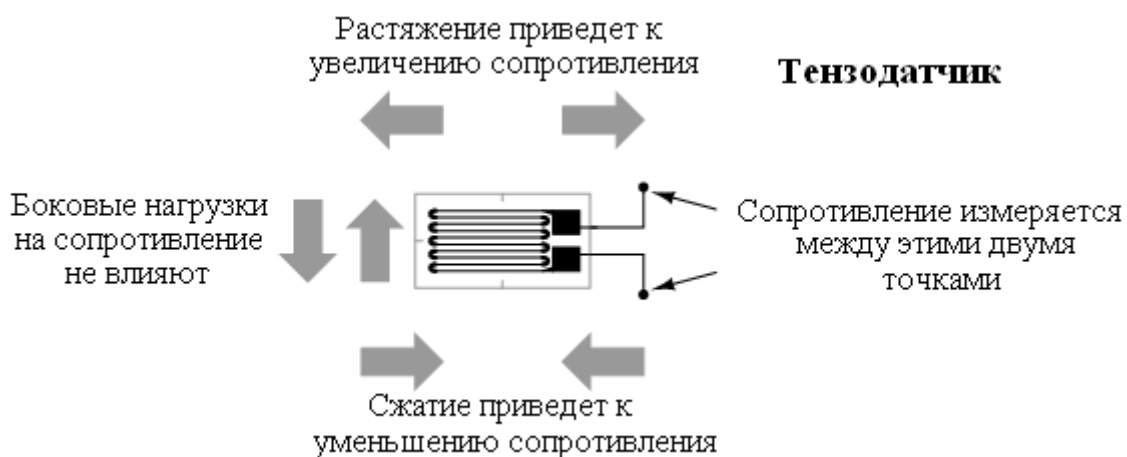


Рис. 2 Принцип действия тензорезистора

В настоящее время известно большое число типов тензодатчиков, предназначенных для работы как в условиях нормальной, так и повышенной температуры. Тензометрирование в условиях нормальных температур

осуществляется достаточно просто, **наклеивая с помощью специального клея тензорезистор на испытываемую деталь.**

Так как конструктивные элементы деталей двигателей, вызывающих наибольшие опасения с точки зрения их прочности и жесткости, имеют формы с резким изменением уровней деформации по длине датчика, предпочтение следует отдавать датчикам с малой базой, несмотря на имеющее при этом место снижение коэффициента продольной тензочувствительности. В настоящей **лабораторной работе** используются датчики базой 1мм типа КФ5 **или аналогичные тензодатчики фирмы KYOWA.**

При исследовании деталей сложной формы тензометрирование осуществляют с помощью розеток датчиков (**рис. 3**). В общем случае для определения значения и направлений главных деформаций и напряжений следует измерить в заданном месте деформации по трем различным направлениям.

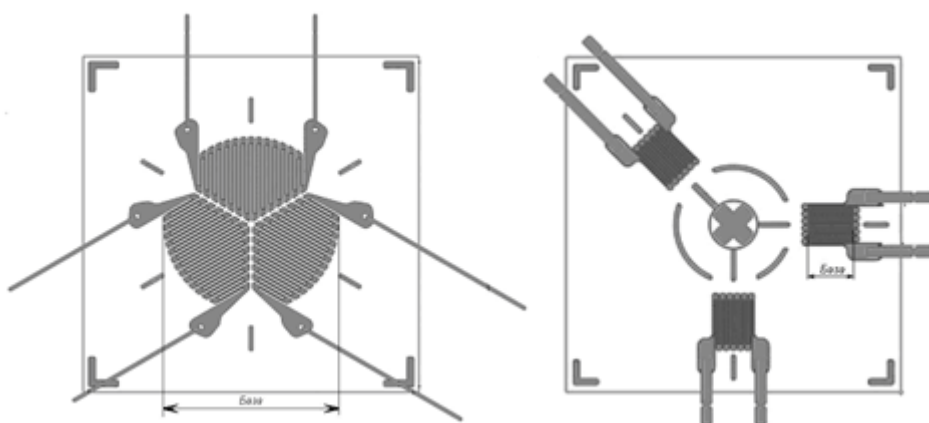


Рис. 3. Внешний вид тензорезисторных розеток

Если на сложной поверхности детали заранее точно не известно место наибольших напряжений, то используют цепочки тензорезисторов (рис.4).

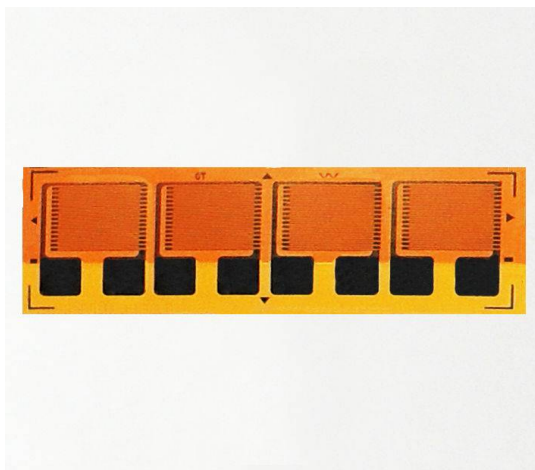


Рис.4. Внешний вид цепочки тензорезисторов

Для некоторых элементов шатуна направления главных деформаций приблизительно известны, поэтому в таких случаях можно не ставить розетки, а ориентировать датчики по главным направлениям деформаций.

Большое значение имеет наклейка датчиков на деталь. Качество наклейки во многом определяет достоверность и качество результатов тензометрирования. Поверхность детали в месте установки датчиков должна быть зачищена и обезжирена бензолом или дихлорэтаном (обращение с последним требует осторожности). Затем на поверхность наносят тонкий слой клея (например, циакрин). При достаточной толщине бумажной подложки ее также целесообразно смазать клеем. Затем датчик осторожно **ориентируют по направлению**, и плотно прижимают к детали, чтобы между ней и датчиком не оставалось воздушных пузырьков. После приклейки датчик должен быть тщательно просушен, сушку датчиков необходимо производить в термошкафу с регулятором температуры по заданному в инструкции **на клей** режиму. Выводные провода целесообразно подсоединять к датчику через переходные **контактные площадки, к которым** припаиваются выводы от тензочувствительной решетки датчика, что позволяет избегать отрывов **контактов** датчика при монтаже **детали**.

При замере деформаций проволоочными датчиками, **необходимо использовать прецизионные усилители, которые преобразуют изменение сопротивления тензорезистора в напряжение или электрический ток. Основной схемой подключения тензорезистора к усилителю является мостовая схема. Одна диагональ мостовой схемы запитывается прецизионным источником электропитания, с другой диагонали результирующий сигнал подается на усилитель (измерительный прибор).**

На рис. 5 представлена полумостовая схема подключения тензорезисторов. Изображенные на рисунке активный (или измерительный) и компенсационный тензорезисторы расположены на испытуемой детали, а резисторы R_1 и R_2 - в

измерительном приборе. Активный тензорезистор используется для измерения деформации и наклеен на деталь, а компенсационный тензорезистор используется для компенсации влияния температуры на сигнал активного тензорезистора в зоне установки на испытуемой детали. Активный и компенсационный тензорезисторы выбирают из одной партии изготовления.

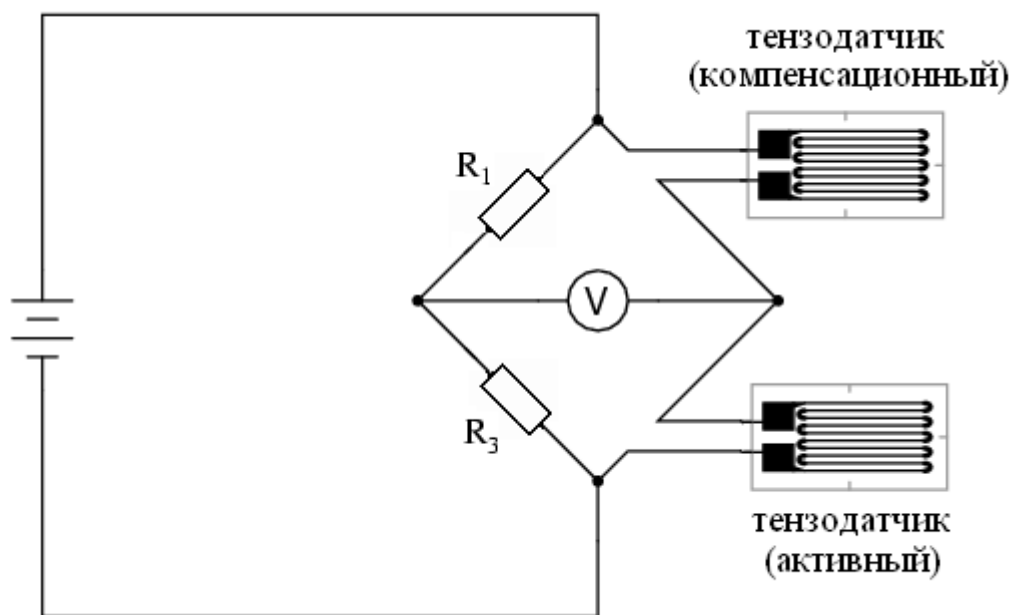


Рис. 5. Полумостовая схема включения тензорезистора

Постоянные сопротивления R_1 и R_2 могут быть тензорезисторами с классом точности 0,1 или 0,05. Изменение сопротивления активного датчика вызывает разбаланс моста и ведет к появлению на измерительных концах диагонали разности потенциалов. Если в диагональ моста включить измерительный прибор, то он покажет разность потенциалов, пропорциональную изменению сопротивления активного датчика и, следовательно, измеряемой деформации. Подробнее о схемах подключения тензодатчиков можно узнать на сайте www.zetlab.com фирмы ZETLab.

В лабораторной работе по исследованию напряжений в шатуне двигателя внутреннего сгорания (ДВС) для измерения статических деформаций в шатуне использованы приборы фирмы ZETLab.

Описание и принцип действия прибора

Для измерения и преобразования в цифровой сигнал относительной деформации с помощью первичных преобразователей, выполненных на базе

тензорезисторов, предназначен модуль ZET 7010 (зарегистрирован в государственном реестре средств измерений Регистрационный № 52802-13). К этому модулю можно подключить только 1 тензорезистор. Внешний вид и назначение контактов модуля ZET 7010 представлен на рис. 6.

Модуль ZET 7010 имеет магнит, который позволяет разместить ZET 7010 на детали в непосредственной близости места установки тензорезистора. В зависимости от расстояния до размещения измерительного тензорезистора и необходимости температурной компенсации можно использовать схемы подключения тензодатчиков, изображенные на рис. 7.

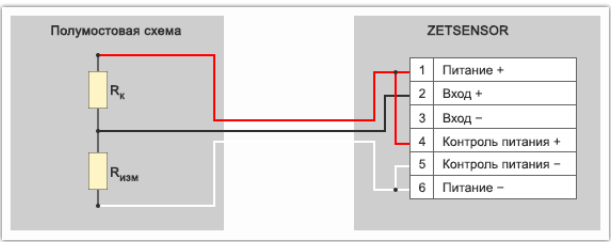


Рис. 6. Внешний вид назначение контактов модуля ZET 7010

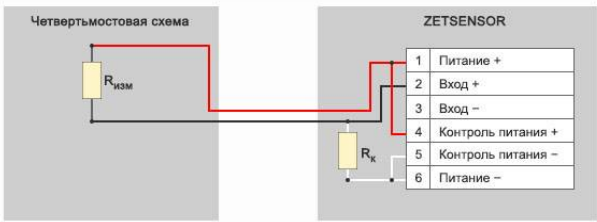
Модуль ZET 7010 имеет магнит, который позволяет разместить ZET 7010 на детали в непосредственной близости места установки тензорезистора. В зависимости от расстояния до размещения измерительного тензорезистора и необходимости температурной компенсации можно использовать схемы подключения тензодатчиков изображенные на рис.7.

В нашем случае длина соединительных проводов не превышает 1м, а температура шатуна равна комнатной температуре. Поэтому используем схему подключения тензодатчика, представленную на рис. 7б.

3-проводное подключение полумостовых тензометрических схем



2-проводное подключение четвертьмостовых тензометрических схем



а)

б)

Рис.7. Схема подключения тензорезистора к модулю ZET 7010

Технические и метрологические характеристики модуля ZET 7010 представлены, соответственно, в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Технические характеристики модуля ZET 7010

Наименование	Значение	
	ZET 7010	ZET 7110
Диапазон напряжений питания, В	9...24	9...24
Потребляемая мощность, мВт	не более 500	не более 500
Входной первичный преобразователь	Тензодатчик мостовой или полумостовой	
Диапазон измерений сигналов напряжения, мВ/В	-6...6	-6...6
Частота опроса, Гц	5, 10, 25, 50, 125	5, 10, 25, 50, 125
Максимальное напряжение питания датчика от источника постоянного тока, В	4,2	4,2
Максимальный ток питания датчика, мА	25	25
Схема подключения	6-ти проводная, 5-ти проводная, 4-х проводная и 3-х проводная	
Интерфейс связи с ПК	RS-485	CAN 2.0
Протокол передачи данных	MODBUS	MODBUS
Максимальная скорость передачи данных	230 Кбит/с	1 Мбит/с
Максимальная длина линии	500 м	500 м
Габаритные размеры не более, мм	65×34×14	
Вес не более, г	35	

Таблица 2. Метрологические характеристики модуля ZET 7010

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ZET 7010	
Диапазон измерений электрических напряжений от подключаемых первичных преобразователей (ПП)	от -6 до +6 мВ/В
Порог чувствительности (минимальное значение, на которое различаются две последовательно измеренные величины)	0,0001 мВ/В
Абсолютная погрешность измерения (от верхнего предела диапазона измерений)	0,05%
Относительная погрешность измерения (от измеряемой величины)	0,05%
Дополнительная погрешность измерения (от измерения температуры)	0,05 %/10°C
ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	
Тип подключаемых датчиков	датчик силы, мостовые или полумостовые тензодатчики (тензорезисторы)
Постоянное напряжение, подаваемое на ПП	4,2 ± 0,2 В
Максимальный ток, подаваемый на ПП	25 ± 1,5 мА
Частота обновления данных	1 Гц
Интерфейс передачи данных	RS-485
Скорость обмена	4800, 9600, 14400, 19200, 38400, 57600, 115200 бит/с
Контроль четности	0 — нет контроля; 1 — есть контроль (нечетность, ODD)
Протокол обмена	Modbus RTU
Метод расчета	входные данные преобразуются в результирующую величину или по линейному закону с наклоном, заданным в виде коэффициента передачи или по кусочно-линейному закону по калибровочной таблице

Модули ZET 7010 могут быть разнесены в пространстве на расстояние до 500 м от места измерения и подключаются к компьютеру с помощью преобразователя интерфейса ZET 7070 (рис. 8).

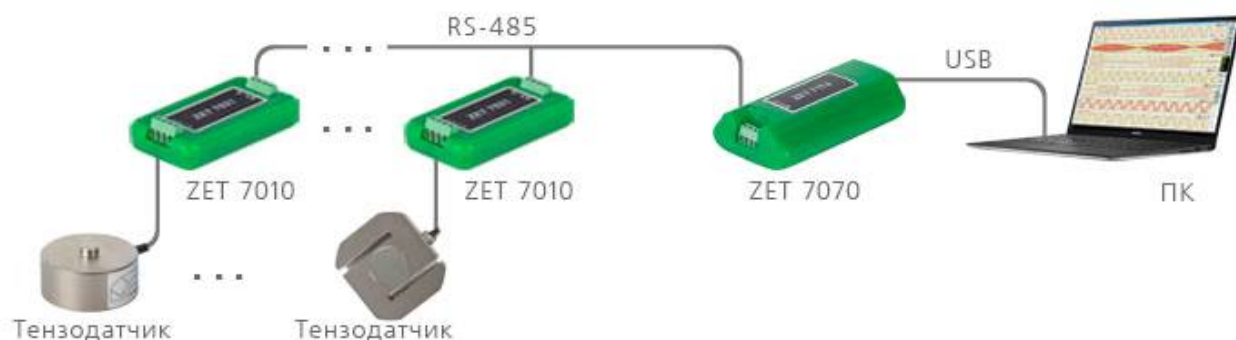


Рис. 8. Структурная схема подключения модулей ZET 7010 к компьютеру

К одному модулю ZET 7070 непосредственно можно подключить четыре модуля ZET 7010, а при наличии внешнего блока питания до 60 модулей ZET 7010, и соответственно, тензорезисторов.

3. Тарировка датчиков

Чтобы расшифровать показания прибора и получить значение деформации, нужно провести механическую тарировку датчиков, т. е. экспериментально установить зависимость между деформацией материала и показанием прибора ZET 7010.

Тарировка осуществляется на стандартном тарировочном устройстве с прямоугольной балочкой 1, работающей в условиях чистого изгиба, функциональная схема которого представлена на рис. 9. Пластина должна быть изготовлена из того же материала, из которого изготовлена испытываемая деталь. Из курса сопротивления материалов известно, что относительная деформация балочки прямо пропорциональна прогибу и ее толщине и обратно пропорциональна квадрату расстояния между опорами. Кроме того, деформация пластины (рис.9.) не будет зависеть от расстояния между опорами. Прогиб балочки определяют с помощью индикатора перемещений 2 (рис. 9.), установленного посередине между опорами.

Вследствие деформаций растяжения или сжатия меняется электрическое сопротивление проволоки датчика. По указанному изменению сопротивления и судят об имеющей место деформации детали в месте установки датчика. Изменение сопротивления проволоки датчика, наклеенного на деталь, линейно зависит от деформации последней и может быть представлено формулой:

$$\Delta R = R (\gamma \epsilon_{\text{пр}} + \delta \epsilon_{\text{пол}}) \quad (1)$$

где ΔR - изменение сопротивления проволоки датчика (положительное при растяжении);

$\varepsilon_{пр}$, $\varepsilon_{поп}$ - деформации в продольном и поперечном направлениях соответственно;

γ , δ - коэффициенты продольной и поперечной тензочувствительности датчика.

В этом случае по замеренному индикатором 2 (рис. 9) прогибу f балочки **относительная** деформация в месте установки датчика определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{4h}{l^2} f \quad (2)$$

где f - прогиб балочки, мм;

$h = 5$ мм - толщина балочки;

$l = 200$ мм - длина, на которой изгибающей балочку момент постоянен.

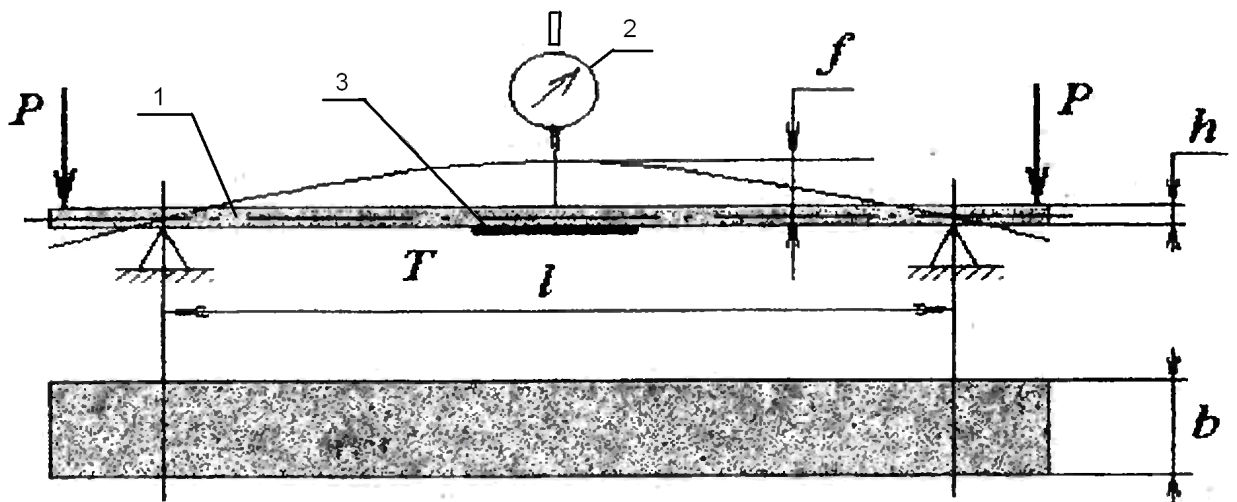


Рис. 9. Функциональная схема тарировочного устройства

Так как наклеенный на **балочку** датчик (3) не удастся снять не поврежденным, тарировка всех датчиков невозможна. Из изготовленной партии

тарировке выборочно подвергаются несколько датчиков, осредняя результаты тарировки которых, строят общую для всей партии датчиков тарировочную характеристику. Тарировка проводится на этапе нагружения и разгрузки **балочки** путем 3-5-кратного повторения с последующим осреднением результатов.

На рис. 10 представлены результаты механической тарировки датчика, включенного по схеме с компенсационным датчиком, при этом по оси абсцисс отложен угол поворота стрелки φ измерителя деформаций ЦТК-1. Переход от замеренных деформаций ε_x и ε_y по направлениям X и Y (или, например, от радиальных ε_r и окружных ε_o деформаций) к соответствующим нормальным напряжениям осуществляется по формулам:

$$\sigma_x = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_x + \mu \varepsilon_y); \sigma_y = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_y + \mu \varepsilon_x) \quad (3)$$

где E, μ - модуль упругости первого рода и коэффициент Пуассона материала.

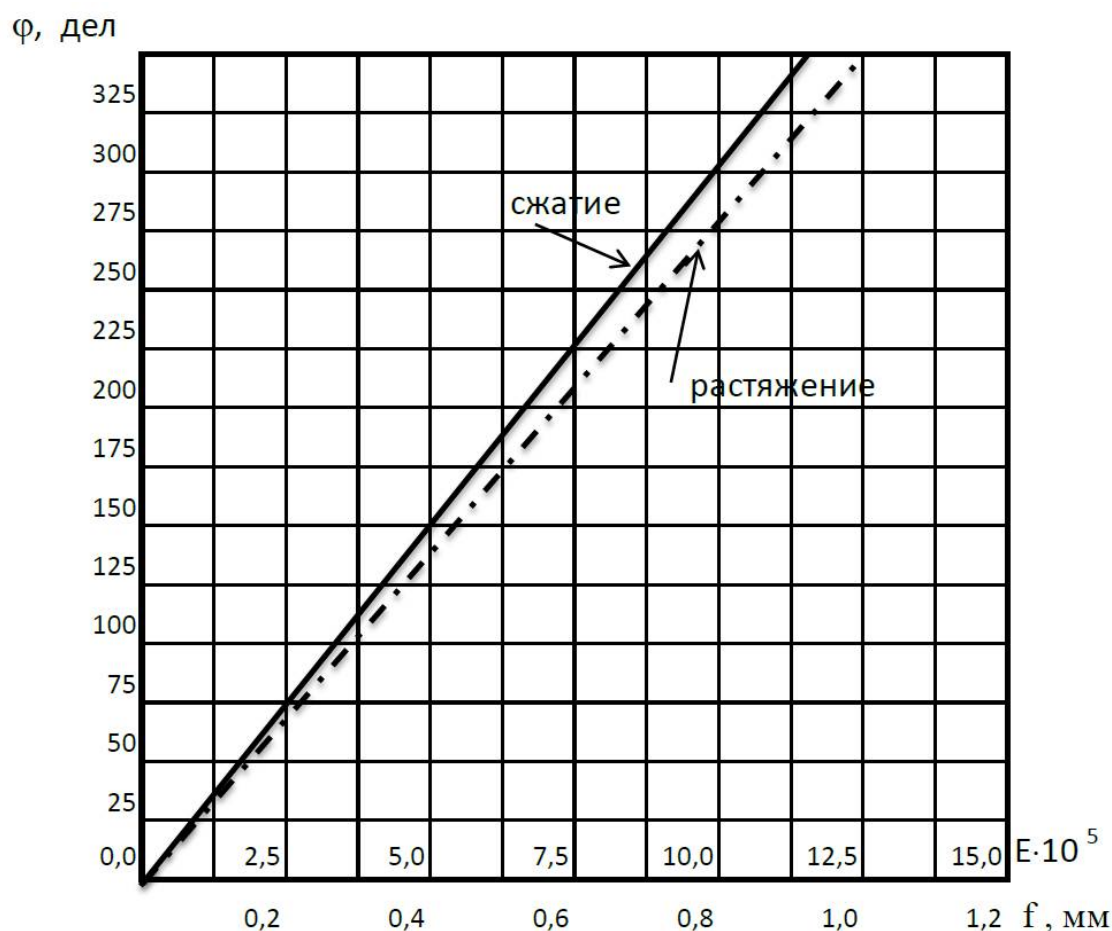


Рис. 10. Тарировочная зависимость относительной деформации от показаний индикатора перемещений

4. Правила техники безопасности

1. К работе на установке допускаются лица, ознакомившиеся с правилами техники безопасности.
2. Инструктаж по технике безопасности проводится преподавателем перед началом работ.
3. Запрещается работать с неисправными приборами.

5. Оценка погрешностей при тензометрировании

Погрешности при тензометрировании вызываются несовершенством средств и методов измерения и подразделяются на систематические, случайные и промахи.

Систематические погрешности учитываются путем тарировки при последующей обработке результатов. Случайные погрешности различаются даже при повторении измерений в одинаковых условиях с одним экспериментатором. Что касается промахов, то они являются следствием невнимательности экспериментатора и исключаются при обработке результатов измерений.

В статических испытаниях основную роль играют погрешности измерений усилий (давления), относительных деформаций, а также температуры, особенно при различии температурных состояний датчиков R_1 и R_2 в случае применения магазина сопротивлений вместо компенсационного датчика. За наиболее вероятное измеряемое значение обычно принимают среднеарифметическое:

$$a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \quad (4)$$

где a_i - результат i -го измерения;

n - число измерений.

Абсолютная ошибка i -го измерения:

$$\Delta a_i = |a_i - a|; \quad (5)$$

Относительная погрешность результата измерений:

$$\delta_i = \frac{\Delta a}{a}; \quad (6)$$

Погрешность определения напряжений в условиях нормальной постоянной температуры складывается из следующих составляющих:

- δ_1 - неточности при тарировке,
- δ_2 - разброс характеристик тензодатчиков,
- δ_3 - координатные ошибки вследствие неточного расположения датчиков в розетках и относительно осей детали,
- δ_4 - влияние ползучести датчика,
- δ_5 - погрешность измерительного прибора,
- δ_6 - ошибки при отсчете по шкале прибора,
- δ_7 - различие между истинными и расчетными значениями E и μ .

В этом случае результирующая суммарная относительная погрешность определения напряжений подсчитывается по формуле:

$$\delta_{\Sigma} = \pm \sqrt{\sum \delta_i^2} ; \quad (7)$$

На основании имеющегося опыта в области тензометрирования в соответствии с литературными данными перечисленные величины δ_i , а также суммарная относительная погрешность оценивается следующими значениями (в %):

$$\delta_1=\pm 1; \delta_2=\pm 2; \delta_3=\pm 1; \delta_5=\pm 1; \delta_6=\pm 1,5; \delta_7=\pm 4; \delta_{\Sigma}=\pm 5.$$

В условиях повышенных температур добавляется ряд дополнительных погрешностей и $\delta_{\Sigma} = 11 - 12\%$.

6. Краткая характеристика объекта исследования

Установка для статического нагружения шатунов (рис. 11) состоит из следующих основных элементов: нижнего 4 и верхнего 6 поршней, гильзы 5, соединительных пальцев 2 и 3, плиты 18, устройства для воспроизведения сжимающей или растягивающей шатун нагрузки и контрольно-измерительной аппаратуры.

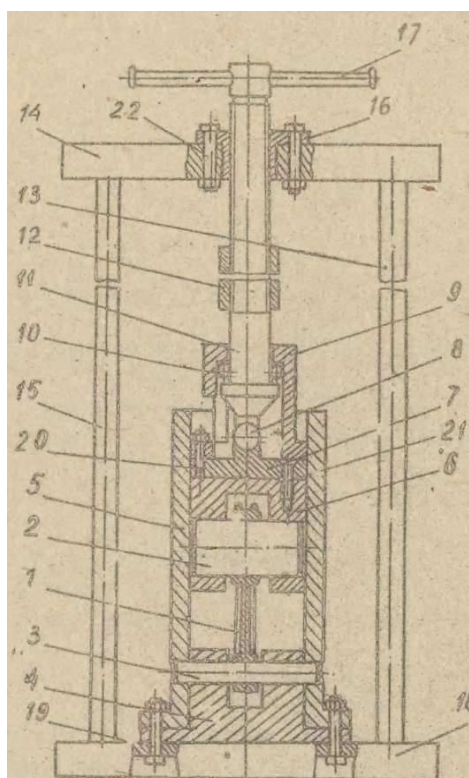


Рис. 11. Функциональная схема стенда по исследованию напряженно деформированного состояния шатуна двигателя внутреннего сгорания

Исследуемый шатун 1 с наклеенными на него тензодатчиками при помощи пальца 2, проходящего через кривошипную головку шатуна, соединяется с поршнем 6, а при помощи пальца 3, проходящего через поршневую головку шатуна, соединяется с нижним поршнем 4 и гильзой 5. Нижний поршень и гильза болтами 19 крепятся к плите основания 18.

Усилие, нагружающее шатун, создается при повороте рычага 17 ходовым винтом II (с муфтой 12), проходящим через гайку 16, закрепленную болтами 22 к верхней плите 14. Верхняя плита 14 четырьмя стойками 13 и 15 соединена с нижней плитой.

Сжимающее шатун усилие через шарик 8 передается на фланец 7, прикрепленный винтами 21 к верхнему поршню 6.

Растягивающее шатун усилие создается при движении винта 11 вверх и передается через упорный подшипник 10 на стакан 9, прикрепленный болтами 20 к фланцу 7, который соединен с поршнем 6. Гильза имеет окна, через которые выводятся провода от тензодатчиков, наклеенных на шатун.

Усилие, нагружающее шатун, контролируется по показаниям четырех тензодатчиков, наклеенных на наружную поверхность гильзы 5 в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Устройство с тензодатчиками тарируется на испытательной машине и во время испытаний шатунов нагрузка отсчитывается

по тарировочному графику усилие - угол отклонения стрелки измерителя деформации ЦТК-1.

Установка позволяет воспроизводить растягивающие и сжимающие шатун усилия, исследовать влияние зазоров в кривошипной и шатунной головках шатуна, натяга вкладышей в кривошипной головке шатуна, значения предварительной затяжки шатунных болтов на характер его напряженно-деформированного состояния.

Для имитации изменения зазоров в сопряжениях кривошипная шейка - кривошипная головка и палец - поршневая головка шатуна установка снабжена набором пальцев 2 и 3, имеющих различные диаметры с градацией 50 мкм.

Параметры объекта исследования быстроходного автомобильного двигателя

Шатун двигателя.

Материал шатуна - сталь 40Х

Модуль упругости $2,1 \cdot 10^5$ МПа

Коэффициент Пуассона 0,3

Ширина стержня шатуна..... 0,024 м

Радиус сопряжения поршневой головки со стержнем . . 0,04 м

Наружный радиус поршневой головки 0,036 м

Расстояние между шатунными болтами. 0,061 м

Ширина крышки кривошипной головки 0,03 м

Толщина крышки 0,007 м

Препарирование шатуна

Деформации шатуна исследуются с помощью тензодатчиков с базой 1мм фирмы Kyowa. Схема установки тензодатчиков на шатуне приведена на рис. 12.

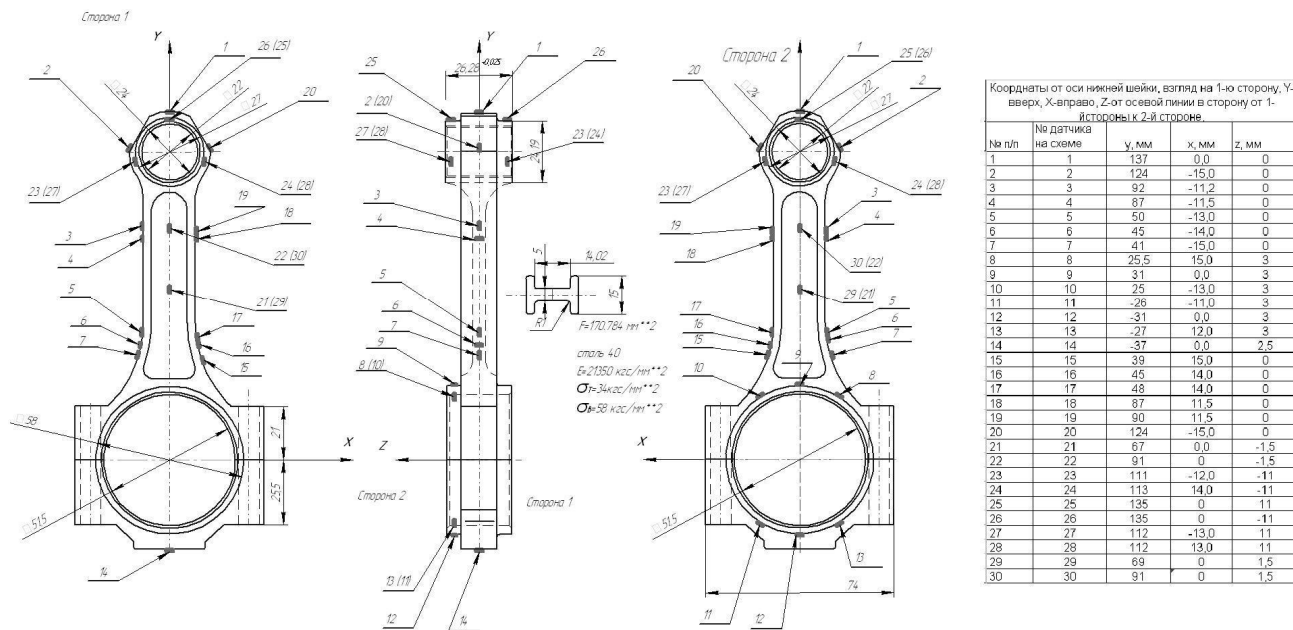


Рис. 12. Схема расположения тензорезисторов на шатуне

Тензодатчики наклеиваются на подготовленную поверхность шатуна циакриновым клеем. Провода марки МГТФ–0,07, соединяющие датчики с распределительной колодкой, закрепленной на шатуне, приклеены к шатуну этим же клеем.

После наклеивания тензодатчиков и проводов на шатун осуществлена их термообработка в термошкафу вместе с шатуном по следующему режиму: нагрев до 110°C в течение часа, выдержка при этой температуре в течение 3 часов с последующим остыванием вместе со шкафом.

Для расшифровки показаний измерительного прибора тензодатчики тарированы на стандартном тарировочном устройстве с прямоугольной пластиной, работающей в условиях чистого изгиба. По результатам тарировки нескольких датчиков из партии, к которой принадлежали наклеенные на шатун датчики, строится осредненная тарировочная кривая.

Усилие, создаваемое ходовым винтом, практически пропорционально приложенному к нему крутящему моменту. Значение момента задается с помощью динамометрического ключа, а усилие определяется по тарировочному графику, представленному на рис. 13. Параллельно возможен контроль усилия с помощью тензодатчиков по описанному ранее методу.

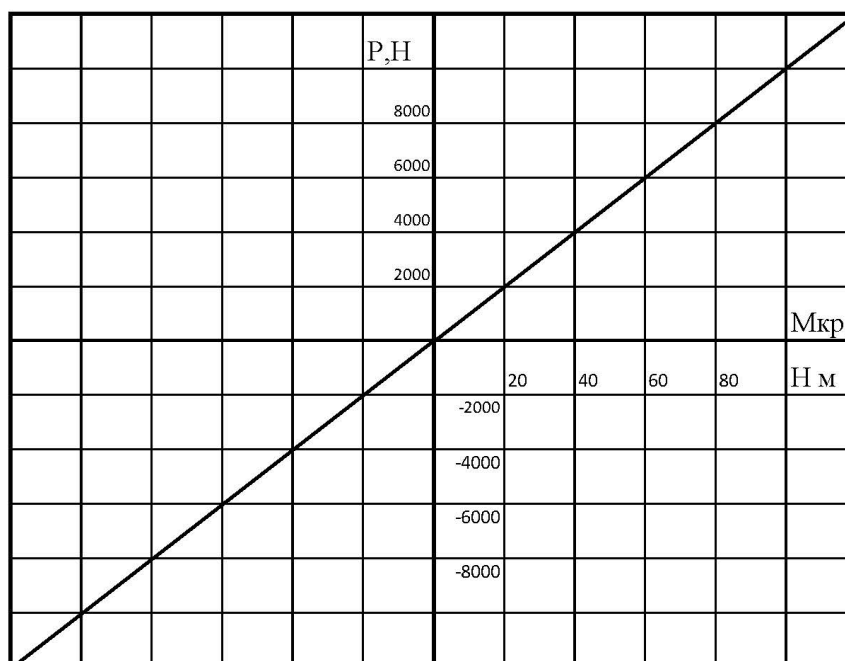


Рис. 13. Тарировочный график винтового пресса

7. Обработка результатов тензометрирования, сравнение результатов расчета и эксперимента

Показания тензодатчиков регистрируются при помощи **цифрового** измерителя деформаций **модуля ZET 7010**. Поскольку все тензодатчики расположены в плоскости симметрии шатуна, то напряженно-деформированное состояние в условиях приложенной нагрузки можно считать одноосным. В этом случае переход от измеренных деформаций ε_x к напряжениям осуществится по формуле:

$$\sigma_x = E \varepsilon_x ; \quad (8)$$

В программе сбора и обработки результатов испытаний, относительные деформации сразу пересчитываются в напряжения. Результаты измерений выводятся в файл в табличном виде. Образец файла представлен в таблице 3. В строке «датчик №» указан номер датчика, координаты расположения датчика на шатуне приведены на рис. 12. В процессе получения измерительной информации для одного значения момента затяжки показания датчиков записывают несколько раз для последующей статистической обработки.

Таблица 3. Образец файла результатов измерений

датчик №	22	21	29	30	3	4	23	28	17	5	7	27	10	8	9
Mкг	канал 0	канал 1	канал 2	канал 3	канал 4	канал 5	канал 6	канал 7	канал 8	канал 9	канал10	канал11	канал12	канал13	канал14
Нм	кг/см**2	кг/см**2	кг/см**2	кг/см**2	кг/см**2	кг/см**2	кг/см**2	кг/см**2	кг/см**2	кг/см**2	кг/см**2	кг/см**2	кг/см**2	кг/см**2	кг/см**2
0	2,07	15,49	-65,67	-1,02	-41,84	-12,02	-32,46	-13,76	-13,3	-9,38	-284,43	-83725,3	129,64	-117,39	83577,73
0	-0,7	13,65	-70,25	-3,93	-41,84	-16,61	-32,46	-17,34	-15,02	-11,22	-286,63	-83727,6	125,71	-119,96	83577,73
0	-1,85	13,58	-68,47	-3,2	-41,84	-16,25	-32,46	-18,1	-13,95	-12,59	-288,45	-83726,9	126,26	-118,58	83577,73
0	-1,06	14,38	-68,14	-2,2	-41,84	-15,89	-32,46	-18,53	-15,18	-10,89	-286,81	-83726,7	128,19	-118,16	83577,73
0	-0,97	13,49	-68,34	-3,65	-41,84	-15,02	-32,46	-18,43	-17	-9,2	-287,65	-83727,7	127	-120,38	83577,73
0	-0,93	13,93	-66,58	-4,63	-41,84	-14,63	-32,46	-16,39	-15,58	-10,28	-287,04	-83727,2	129,48	-120,14	83577,73
0	-0,07	13,32	-65,82	-5,59	-41,84	-14,42	-32,46	-16,69	-16,97	-9,76	-286,66	-83727,8	129,45	-121,84	83577,73
0	-1,22	11,1	-69,13	-6,2	-41,84	-16,68	-32,46	-17,23	-17,9	-11,29	-287,43	-83730,2	126,98	-121,67	83577,73
5,5	-98	-40,58	-60,45	-14,81	-41,84	-30,67	-32,46	-28,55	-26,24	-42,45	-384,33	-83781,5	134,75	-130,45	83577,73
5,5	-96,35	-40,38	-58,38	-13,38	-41,84	-29,97	-32,46	-29,13	-26,18	-43,13	-383,68	-83781,7	136,58	-129,8	83577,73
5,5	-97,91	-41,43	-58,59	-13,95	-41,84	-31,87	-32,46	-30,56	-29,09	-45,66	-384,98	-83783	137,05	-129,22	83577,73
15	-235,19	-122,42	-90,34	-74,73	-41,84	-57,33	-32,46	-49,2	-61,12	-105,22	-520,72	-83863,1	105,86	-189,97	83577,73
15	-233,31	-121,51	-91,17	-73,73	-41,84	-57,56	-32,46	-49,19	-59,94	-102,64	-520,46	-83863,4	104,78	-189,21	83577,73
15	-230,82	-118,82	-89,01	-71,85	-41,84	-54,53	-32,46	-47,94	-57	-100,54	-517,35	-83860,2	106,99	-187,09	83577,73
25	-355,99	-190,15	-145,01	-157,62	-41,84	-71,4	-32,46	-67,76	-111,38	-155,38	-642,84	-83930,3	51,37	-273,92	83577,73
25	-356,86	-191,31	-146,16	-159,03	-41,84	-73,92	-32,46	-67,83	-110,8	-157,24	-643,34	-83931,7	51,42	-274,06	83577,73
25	-357,16	-191,34	-149,34	-160,31	-41,84	-75,08	-32,46	-67,14	-109,59	-156,2	-644,66	-83932,1	47,69	-275,23	83577,73
25	-358,2	-192,82	-147,85	-159,77	-41,84	-75,74	-32,46	-68	-113,58	-160,12	-645,21	-83934	47,92	-275,21	83577,73
39,3	-565,56	-298,27	-253,99	-320,43	-41,84	-91	-32,46	-76,9	-205,99	-252,48	-852,3	-84038,3	-58,18	-436,2	83577,73
39,3	-566,39	-300,67	-254,51	-321,06	-41,84	-93,12	-32,46	-77,47	-207,33	-251,1	-853,52	-84040,4	-57,82	-436,39	83577,73
39,3	-567,64	-300,44	-256,6	-321,46	-41,84	-93,16	-32,46	-77,58	-207,42	-250,31	-853,81	-84040	-60,56	-436,7	83577,73
46,8	-674,8	-354,83	-316,35	-403,62	-41,84	-102,91	-32,46	-78,78	-259,54	-300,86	-961,18	-84095,2	-120,64	-519,02	83577,73
46,8	-676,17	-356,18	-316,73	-406,34	-41,84	-104,83	-32,46	-79,97	-261,27	-302,81	-962,55	-84096,7	-120,65	-521,85	83577,73
52,4	-834,24	-433,61	-404,51	-530,95	-41,84	-108,86	-32,46	-77,77	-336,5	-369,48	-1119,84	-84174	-208,61	-646,58	83577,73
52,4	-833,65	-433,29	-404,75	-531,58	-41,84	-109,41	-32,46	-79,38	-339,18	-367,55	-1119,84	-84173,6	-208,8	-647,39	83577,73

Сравнение экспериментальных и расчетных значений напряжений

Экспериментально определенные напряжения следует сравнить со значениями, полученными расчетно-аналитическими и численными методами.

А. Напряжения в поршневой головке

а) Напряжения в поршневой головке от растягивающей шатун силы инерции поршневого комплекта Р (при положении поршня в ВМТ в конце выпуска для четырехтактных двигателей) можно определить по методике Р.С. Кинасошвили по уравнениям изгиба кривого бруса [2]. Принимают, что брус защемлен в местах перехода головки в стержень (сечение С-С на рис. 14). Угол заделки (в рад) сечения С-С вычисляют по формуле:

$$\gamma = \frac{\pi}{2} + \arccos \frac{\frac{H}{2} + \rho}{r_2 + \rho}; \quad (9)$$

где H – ширина стержня шатуна в месте сопряжения, м;

ρ – радиус сопряжения головки со стержнем шатуна, м;

r_2 – наружный радиус поршневой головки шатуна, м.

Если принять, что поршневая головка имеет прямоугольное поперечное сечение, то максимальные напряжения обычно возникают на наружной поверхности головки и их можно вычислить по формуле:

$$\sigma_n = \frac{1}{a h} \left[2M \frac{6r + h}{h(2r + h)} + k N \right]; \quad (10)$$

где a – длина образующей головки, м;

h – толщина стенки головки, м;

r – средний радиус головки, м;

M – изгибающий момент в рассчитываемом сечении, МНм;

N – нормальная сила в рассчитываемом сечении головки, МН;

k – коэффициент, учитывающий влияние жесткости втулки, запрессованной в головку шатуна (для автотракторных двигателей $k = 0,8 - 0,85$).

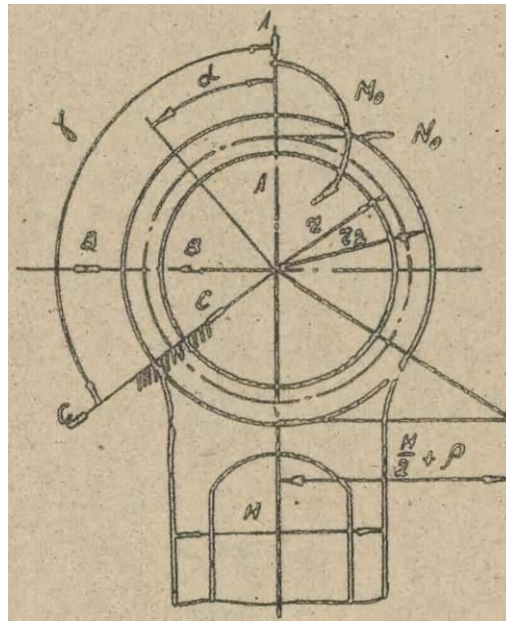


Рис. 14. Изгибающий момент в расчетном сечении, расположенном под углом α .

$$M = \begin{cases} M_0 + N_0 r (1 - \cos \alpha) - 0,5 P r (1 - \cos \alpha) & \text{для } 0 < \alpha \leq \pi/2 \\ M_0 + N_0 r (1 - \cos \alpha) - 0,5 P r (\sin \alpha - \cos \alpha) & \text{для } \pi/2 < \alpha \leq \gamma \end{cases} \quad (11)$$

Нормальную силу в том же сечении вычисляют по формуле:

$$N = \begin{cases} N_0 \cos \alpha + 0,5 P (1 - \cos \alpha) & \text{при } 0 < \alpha \leq \pi/2 \\ N_0 \cos \alpha + 0,5 P (\sin \alpha - \cos \alpha) & \text{при } \pi/2 < \alpha \leq \gamma \end{cases} \quad (12)$$

Значения изгибающего момента M_0 и нормальной силы N_0 в сечении головки А-А ($\alpha = 0$) вычисляют по приближенным формулам:

$$\begin{aligned} M_0 &= P_r (0,01891 \gamma - 0,0297), \\ N_0 &= P (0,57 r - 0,04584) \end{aligned} \quad (13)$$

где γ - угол заделки, рад;
 r - средний радиус головки, м.

б) Напряжения в поршневой головке от сжимающей шатун силы P , которая имеет максимальные значения в момент наибольшего давления газов в цилиндре, определяют по формуле (10). Изгибающий момент M и нормальная сила N в расчетном сечении в предположении косинусоидального распределения давления на нижнюю часть головки (рис.15) равны:

$$M = \begin{cases} M_0 + N_0 r (1 - \cos \alpha) & \text{при } 0 < \alpha \leq \pi/2 \\ M_0 + N_0 r (1 - \cos \alpha) - P_0 r / \pi \left(\frac{\pi}{2} \sin \alpha - \alpha \sin \alpha - \cos \alpha \right) & \text{при } \pi/2 < \alpha \leq \gamma \end{cases}$$

$$N = \begin{cases} N_0 \cos \alpha & \text{при } 0 < \alpha \leq \pi/2 \\ N_0 \cos \alpha + P / \pi \left(\frac{\pi}{2} \sin \alpha - \alpha \sin \alpha - \cos \alpha \right) & \text{при } \pi/2 < \alpha \leq \gamma \end{cases} \quad (14)$$

Изгибающий момент M_0 и нормальную силу N_0 в сечении А-А ($\alpha=0$) определяют по графику на рис. 15.

в). Напряжения в крышке кривошипной головки шатуна. Принимая сечение крышки постоянным, радиус кривизны головки, равным половине расстояния между осями болтов, и допуская, что сила, нагружающая головку, распределяется по косинусоидальному закону, а крышка представляет систему, заделанную в месте перехода головки в стержень (сечение С-С на рис. 16), напряжения изгиба в среднем сечении крышки:

$$\sigma = \frac{M}{W} + \frac{N}{F}, \quad (15)$$

где W - момент сопротивления изгибу сечения В-В;
 F - площадь поперечного сечения крышки, м.

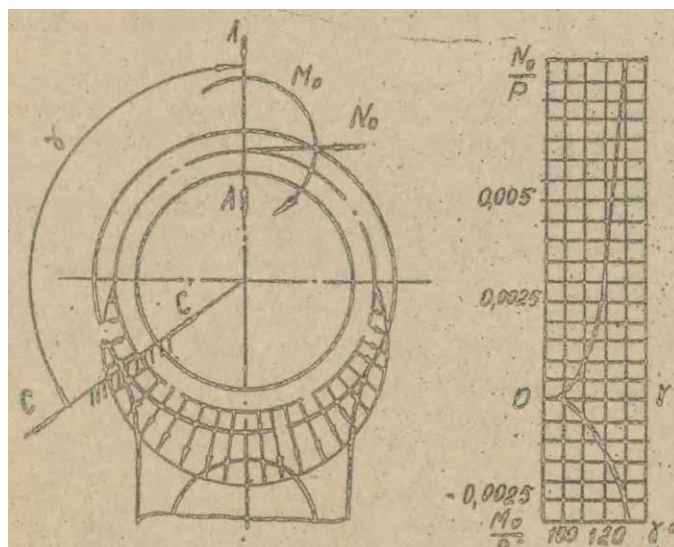


Рис. 15. Поршневая головка шатуна

При наличии вкладышей изгибающий момент M и нормальная сила N , действующие в расчетном сечении (соответственно в меганьютонах на метр и меганьютонах):

$$M = \frac{Pl(0,0127 + 0,0458\gamma)}{2\left(1 + \frac{I_s}{J}\right)},$$

$$N = \frac{P(0,522 - 0,1719\gamma)}{1 + \frac{F_s}{F}} \quad (16)$$

где I_s , F – момент инерции и площадь поперечного сечения вкладыша;
 γ – угол заделки, рад;
 l – расстояние между болтами, м.

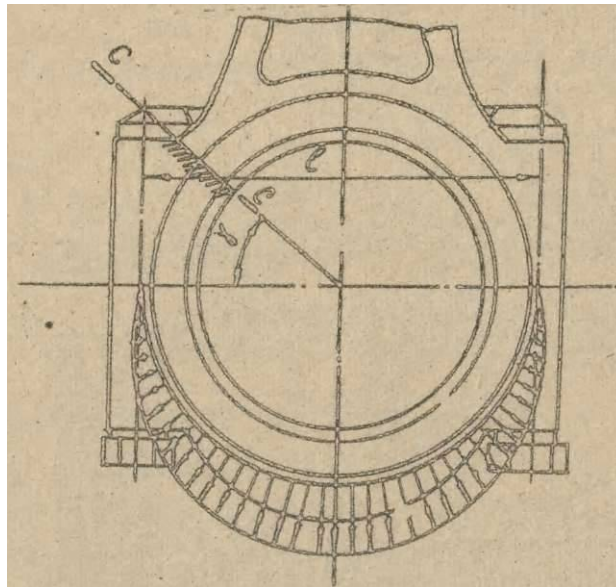


Рис. 16. Кривошипная головка шатуна

Момент сопротивления изгибу:

$$W = \frac{bh^2}{6}$$

где b – ширина крышки, м;
 h – толщина крышки, м.

Напряжения вычисляют в точках, расположенных в сечениях, составляющих углы 0 , $\pi/4$, $\pi/2$ и γ с осью шатуна. Результаты сравнения расчета и эксперимента представляют в табл. 4.

Таблица 4

Угол α , рад	М, МН*М	N, МН	Напряжения, МПа	
			Эксперимент	Расчет
0	1			
$\pi/4$				
$\pi/2$				
γ				

8. Задачи и порядок выполнения работы

Задачей работы является ознакомление с методикой экспериментального определения деформаций и напряжений в элементах шатуна с помощью тензометрирования натурной детали с применением малогазовых тензодатчиков в условиях статического нагружения на безмоторном стенде. Полученные значения напряжений (эксперимент) сравниваются с расчетными напряжениями, рассчитанными по приведенным зависимостям. Дается оценка точности расчетных значений напряжений по сравнению с результатами эксперимента. Целесообразно также провести расчет исследуемого шатуна методом конечных элементов в 2-хмерной постановке (плоское напряженно-деформированное состояние) [2] и дать окончательную оценку полученным результатам.

Литература

1. Расчет на прочность деталей машин: Справочник/И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич.—М: Машиностроение,1993.-640с.
2. Конструирование и расчет поршневых двигателей: учебник для вузов/ Н.Д. Чайнов, А.Н. Краснокутский, Л.Л. Мягков; под ред. Чайнова Н.Д.- М: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018.- 536с.