

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Казанский государственный аграрный университет»

Институт механизации и технического сервиса

Кафедра общинженерных дисциплин

ИСПЫТАНИЕ БОЛТОВОГО СОЕДИНЕНИЯ

Практикум для выполнения лабораторных и самостоятельных работ
по дисциплине «Детали машин и основы конструирования»
для студентов очной и заочной формы обучения

по направлениям подготовки:

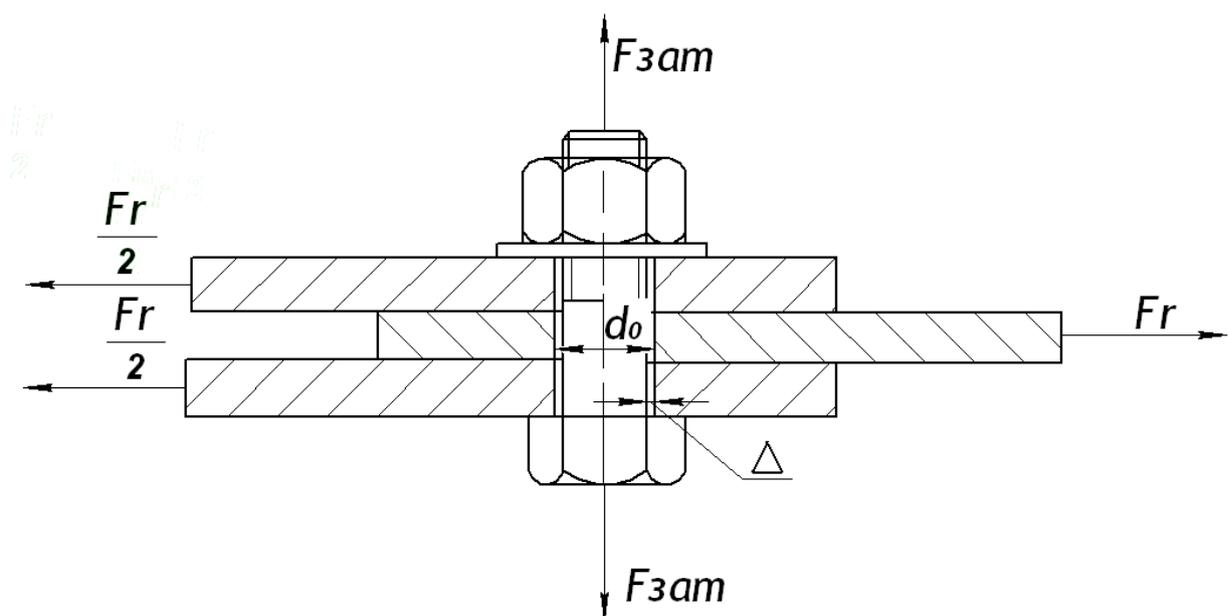
35.03.06 - «Агроинженерия»,

23.03.03 - «Эксплуатация транспортно -
технологических машин и комплексов»,

20.03.01- «Техносферная безопасность»,

23.05.01 – «Наземные транспортно-технологические средства»,

44.03.04 - «Профессиональное обучение»



Казань, 2019

УДК 621.822

ББК 34.445

Составители: Яхин С.М., Пикмуллин Г.В., Марданов Р.Х., Мустафин А.А.

Рецензенты:

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Тракторы, автомобили и энергетические установки» Казанского ГАУ Сеницкий С.А.

Доктор технических наук, профессор кафедры «Оборудование пищевых производств» КНИТУ Николаев А.Н.

Практикум для выполнения лабораторных и самостоятельных работ по дисциплине «Детали машин и основы конструирования» обсужден и рекомендован к печати на заседании кафедры общепрофессиональных дисциплин Казанского ГАУ (протокол № 6 от 14.01.2019г.) и заседании методической комиссии Института механизации и технического сервиса Казанского ГАУ (протокол № 5 от 15.01.2019г.).

Яхин С.М. Испытание болтового соединения: Практикум для выполнения лаб. и самост. работ / С.М. Яхин, Г.В. Пикмуллин, Р.Х. Марданов, А.А. Мустафин – Казань: Изд-во Казанского ГАУ, 2019. – 16с.

Практикум предназначен для выполнения лабораторных и самостоятельных работ по дисциплине «Детали машин и основы конструирования» и способствуют формированию общепрофессиональных компетенций для направлений подготовки: 35.03.06 «Агроинженерия», 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», 20.03.01- «Техносферная безопасность», 44.03.04 - «Профессиональное обучение» и 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства».

УДК 621.822

ББК 34.445

©Казанский государственный аграрный университет, 2019 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ИСПЫТАНИЕ БОЛТОВОГО СОЕДИНЕНИЯ, КОТОРОЕ РАБОТАЕТ НА СДВИГ

Цель работы: определение теоретических и экспериментальных зависимостей сдвигающей силы (F_c) от момента закручивания (F_3) болта в напряженном болтовом соединении; сопоставление теоретических и экспериментальных зависимостей $F_c = f(T_3)$.

Оборудование, приборы и инструменты: ручной пресс, динамометрический ключ со сменными головками, штангенциркуль, болты с соответствующими шайбами и гайками, сменные вставки различной шероховатости.

Подготовка к выполнению лабораторной работы: ознакомиться с резьбовыми соединениями [1, 2, 3].

Общие сведения

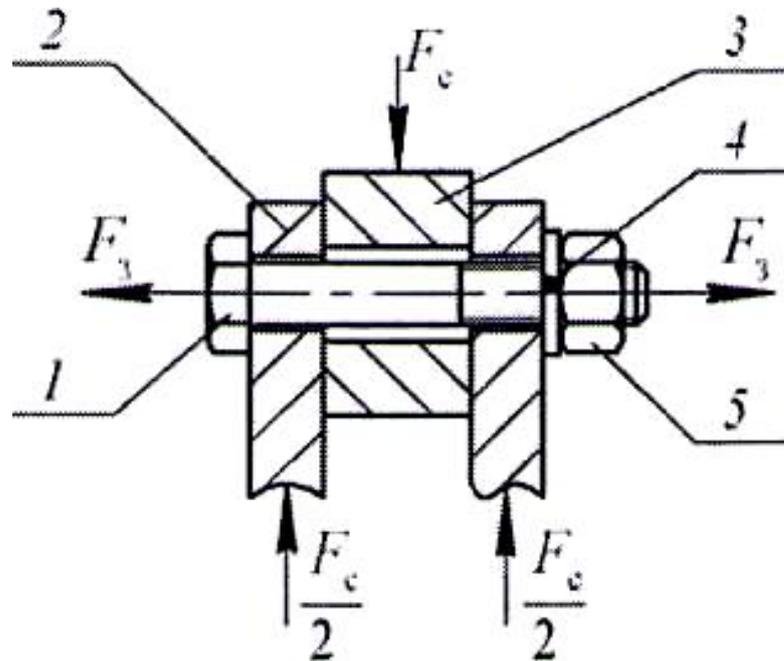
В зависимости от назначения и условий сборки резьбовые соединения бывают *ненапряженными* (незатянутыми в процессе сборки), и *напряженными* (загруженными осевым усилием от затяжки до приложения внешней нагрузки).

При приложении к пластинам сдвигающей силы F_c (рисунок 1) последние могут удерживаться от сдвига, сохраняя зазоры между стержнем болта и отверстием в пластине за счет сил трения ($F_{тр}$), которые возникают на поверхности стыка:

$$F_c = F_{тр} i, \quad (1)$$

где i - количество стыков (в нашем случае $i = 2$).

Болт в данном случае работает на растяжение от силы затяжки (F_3).



1 - болт; 2 - боковая пластина; 3 - колодка верхняя; 4 - шайба; 5 - гайка

Рисунок 1 - Схема нагружения соединения

Сила сдвига (F_c), при которой пластины сдвигаются, является максимальной для данной затяжки (F_3). В свою очередь, сила трения рассчитывается по формуле

$$F_f = F_n f_c \quad (2)$$

где F_n - нормальная сила в стыке; F_c - коэффициент трения в стыке. Поскольку нормальная сила F_n , вызвана силой затяжки F_3 и направлена в одну и ту же сторону, можно сделать заключение, что $F_n = F_3$. Изменив силу F_n на F_3 , из выражений (1) и (2) получим зависимость для определения силы сдвига от силы затяжки:

$$F_c = F_3 f_c i. \quad (3)$$

Известно, что сила затяжки F_3 связана с моментом закручивания (T_3) следующей зависимостью:

$$T_3 = T_p + T_T = 0,5 F_3 d_2 \operatorname{tg}(\gamma + \rho') + 0,25 F_3 f_T (D_0 + d_0), \quad (4)$$

где T_p - момент сил трения в резьбе, Нмм;

T_T - момент сил трения на опорном торце гайки, Нмм;

d_2 - средний диаметр резьбы, мм;

γ - угол подъема по среднему диаметру, определяемый по уравнению:

$$\operatorname{tg} \gamma = p / \pi d_2 \quad (5)$$

где p - шаг резьбы;

ρ' - приведенный угол трения, рассчитываемый по формуле

$$\rho' = \arctg f', \quad (6)$$

где f' - приведенный коэффициент трения в резьбе, равный

$$f' = f_p / \cos \alpha/2$$

где f_p - коэффициент трения в резьбе;

α - угол профиля резьбы, для метрической $\alpha = 60^\circ$;

f_T - коэффициент трения на торце гайки;

D_0 - внешний диаметр опорной поверхности гайки;

d_0 - внутренний диаметр опорной поверхности гайки.

Подставив в уравнение (3) значение F_3 , найденное из зависимости (4), получим:

$$F_c = T_3 f_c i / [0,5d_2 \operatorname{tg} (\gamma + \rho') + 0,25 f_T (D_0 + d_0)] \quad (7)$$

или

$$F_c = K T_3,$$

где $K = f_c i / [0,5d_2 \operatorname{tg} (\gamma + \rho') + 0,25 f_T (D_0 + d_0)]$ - постоянная величина для данных условий эксперимента.

Таким образом, зависимость $F_c = f(T_3)$ является линейной. Поскольку при эксперименте F_c и T_3 определяются по индикаторам динамометрического ключа и динамометрической пружины достаточно точно, то положение теоретической кривой зависимости $F_c = f(T_3)$ на графике во многом будет зависеть от правильного выбора коэффициента трения в резьбе f_p , на торце гайки f_T и поверхности стыка f_c . Поэтому теоретическое значение T_3 не всегда соответствует его действительной величине, определяемой экспериментальным путем.

Для предупреждения остаточных деформаций болта, которые могут возникать в стержне болта при чрезмерном закручивании гайки, необходимо определить допускаемую силу затяжки $[F_3]$, которая из условия прочности болта на растяжение находится по уравнению:

$$[F_3] = \frac{\pi d_1^2 [\sigma_p]}{4 \cdot 1,3} \quad (8)$$

где d_1 - внутренний диаметр резьбы;

$[\sigma_p]$ - допускаемое напряжение на растяжение для материала болта.

В нашем случае болт выполнен из стали Ст3, имея $\sigma_T = 220$ МПа. Принимаем коэффициент безопасности $n = 2,0$, тогда допускаемое напряжение равно:

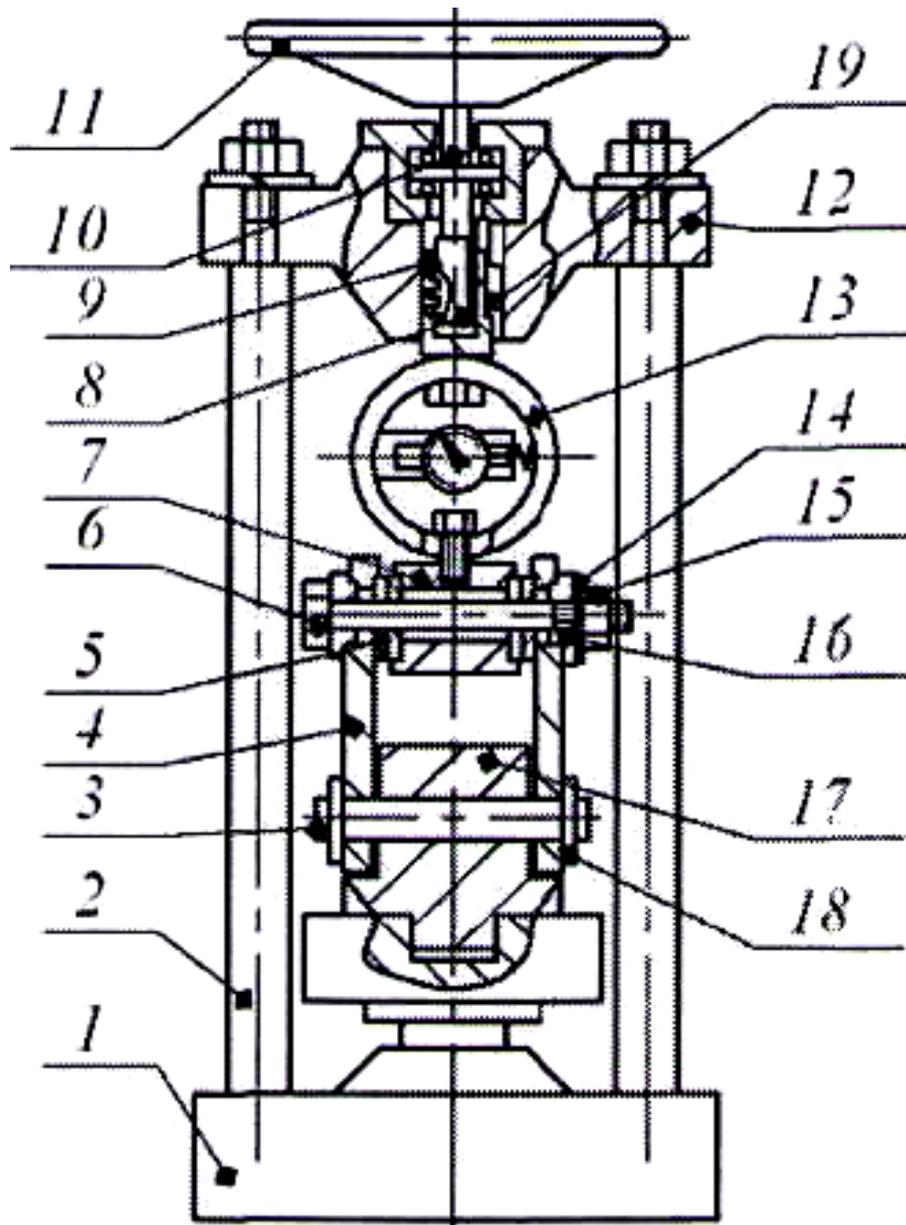
$$[\sigma_p] = \sigma_T / n = 110 \text{ МПа.}$$

Если найденное $[F_3]$ из зависимости (8) подставим в формулу (4), то получим соответствующий допускаемый момент закручивания $[T_3]$, который не должен быть превышен при закручивании гайки, чтобы избежать возникновения остаточных деформаций в стержне болта.

Описание установки

Устройство и работа ручного винтового прессы Винтовой пресс (рисунок 2) имеет две стойки 2, неподвижно закрепленные в основании 1 и траверсе 12. Винт 8 жестко соединен с маховиком 11 и зафиксирован от осевого перемещения в траверсе упорным подшипником 10. При вращении маховика 11 винт 8 вкручивается или выкручивается в ползун 9, который удерживается от вращения шпонкой и тем самым перемещается в траверсе 12.

Ползун 9 через кольцевую динамометрическую пружину 13 соединен с верхней колодкой 7 исследуемого болтового' соединения. Пластины 4, прижатые к верхней колодке 7 болтом 6 с гайкой 15, шайбой 14 и втулкой 16, закреплены на оси 3, которая неподвижно установлена в нижней колодке 17. Пластины 4 на оси от перемещения в осевом направлении удерживаются пружинным упорным кольцом 18. Верхняя колодка 7 выполняет функции средней пластины на рисунке 1.



1- основание; 2 - стойка; 3 - ось; 4 - пластина боковая; 5 - вкладка; 6 - болт; 7 - колодка верхняя; 8 - винт; 9 - ползун; 10- подшипник упорный; 11 - маховик; 12 - траверса; 13 - пружина динамометрическая; 14 - шайба; 15 - гайка; 16- втулка; 17 - колодка нижняя; 18 — кольцо упорное пружинное; 19 - шпонка

Рисунок 2 - Ручной винтовой пресс

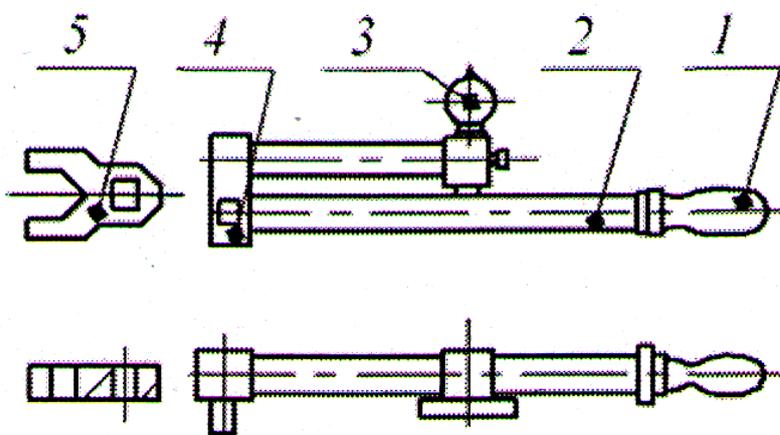
Перемещение верхней колодки 7 относительно пластин 4 осуществляется вращением маховика 11.

Для контроля положения верхней колодки 7 относительно пластин 4 на них нанесены метки. Расстояние между крайними метками на пластине 4 соответствует максимальному зазору между стержнем болта 6 и краем отверстия в верхней колодке 7.

В начальном положении колодка 7 при помощи маховика 11 укрепляется так, чтобы ее метка совмещалась с верхней меткой на пластине 4. Снижение колодки 7 за нижнюю метку на пластине недопустимо, так как при этом выбирается зазор, и стержень болта станет работать на срез.

Устройство и принцип работы динамометрического ключа

Динамометрический ключ предназначен для контроля момента затяжки. Он представляет собой упругий стержень 2 (рисунок 3) с рукояткой 1 и индикатором 3, закрепленным в колодке 4, на квадратный выступ которой надевается головка ключа 5 для соответствующей гайки. При закручивании гайки к рукоятке 1 прикладывается сила, которая изгибает упругий стержень 2 (как консольную балку). Величина деформации стержня, которая фиксируется индикатором 3, пропорциональна моменту закручивания, находится через тарировочный коэффициент.



1-рукоятка; 2 - стержень; 3 - индикатор; 4 - колодка; 5 - головка ключа

Рисунок 3 - Устройство динамометрического ключа

Для получения достоверных результатов сила должна прикладываться только к ручке 1 динамометрического ключа.

В результате тарировки динамометрического ключа и динамометрической пружины 13 (рисунок 2) получены следующие тарировочные коэффициенты: $\mu_1 = 3900$ Нмм (одно деление индикатора для

динамометрического ключа); $\mu_2 = 305$ Н (одно деление индикатора для динамометрической пружины).

Порядок выполнения работы

Подготовка установки к работе

Выбрать болт с соответствующей шайбой и гайкой (по согласованию с преподавателем), динамометрический ключ с соответствующей головкой под гайку.

Определение теоретического значения силы сдвига F_c

1. Измерить штангенциркулем наружный диаметр резьбы болта d и шаг резьбы p (см. рис. В таблице 4). Шаг необходимо вычислить по формуле:

$$P = S / n, \quad (9)$$

где S - длина нарезной части болта;

n - количество витков резьбы на нарезной части.

Результаты измерений согласовать со стандартными значениями (ГОСТ 9150-81, таблица 1), выбрать остальные необходимые параметры из стандарта, записать их в таблице 2.

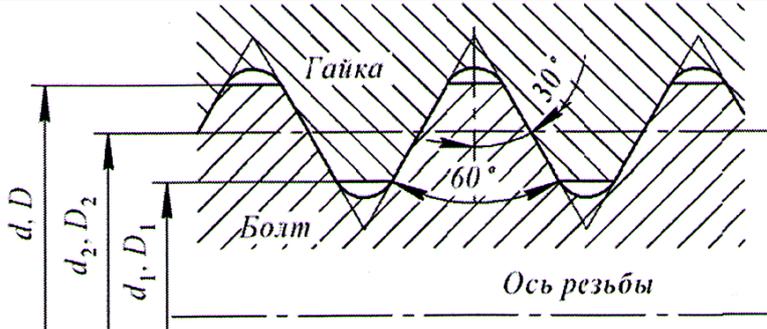
2. Измерить внешний D_0 и внутренний d_0 диаметры опорной поверхности торца гайки.

3. Определить: угол подъема винтовой линии резьбы u по среднему диаметру d_2 по формуле (5); допускаемое напряжение на растяжение материала болта $[\sigma_p]$; приведенный угол трения ρ' по формуле (6); допускаемую силу затяжки $[F_3]$ по формуле (8).

4. Все найденные значения занести в табл. 4.

5. Определить по формуле (4) допускаемое значение момента закручивания $[T_3]$, которое соответствует допускаемой силе затяжки $[F_3]$, а также значения $[T_3]$, которые соответствуют $0,75[F_3]$; $0,5[F_3]$; $0,25[F_3]$, приняв значения коэффициентов трения в резьбе f_p , и на торце гайки f_t по таблице 3 (по согласованию с преподавателем).

Таблица 1- Геометрические параметры метрической резьбы

				
Шаг резьбы P	Диаметр резьбы			Высота профиля H_1
	наружный $d = D$	средний $d_2 = D_2$	внутренний $d_1 = D_1$	
С крупным шагом				
2	(14)	12,701	11,835	1,082
2	16	14,701	13,835	1,082
2,5	(18)	16,376	15,294	1,353
2,5	20	18,376	17,294	1,353
С мелким шагом				
0,5	(14)	13,675	13,459	0,270
	16	15,675	15,459	
	(18)	17,675	17,459	
	20	19,675	19,459	
0,75	(14)	13,513	13,188	0,406
	16	15,513	15,188	
	(18)	17,513	17,188	
	20	19,513	19,188	
1,0	(14)	13,350	12,918	0,541
	16	15,350	14,918	
	(18)	17,350	16,918	
	20	19,350	18,918	
1,25	(14)	13,188	12,647	0,676
1,5	(14)	13,026	12,376	0,812
	16	15,026	14,376	
	(18)	17,026	16,376	
	20	19,026	18,376	
2,0	(18)	16,701	15,835	1,082

Для полученных значений моментов рассчитать соответствующее им количество делений индикатора по формуле:

$$n_1 = [T_3] / \mu_1, \quad (10)$$

где μ_1 - тарировочный коэффициент для динамометрического ключа.

Результаты расчетов занести в таблицу 4.

Таблица 2 - Результаты измерений

Параметры		Условные обозначения	Значения
Наружный диаметр резьбы, мм		d	
Шаг резьбы, мм		p	
Внутренний диаметр резьбы, мм		d_1	
Средний диаметр резьбы, мм		d_2	
Угол подъема винтовой линии резьбы, град.		γ	
Угол профиля резьбы, град.		α	
Материал болта		Сталь Ст3	
Допускаемое напряжение растяжения материала болта, МПа		$[\sigma_p]$	
Допускаемая сила затяжки, Н		$[F_3]$	
Диаметры опорной поверхности гайки, мм:	- внешний	D_0	
	- внутренний	d_0	
Коэффициент трения:	- в резьбе	f_p	
	- в стыке	f_c	
	- на торце гайки	f_T	
Приведенный угол трения для резьбы, град.		ρ'	
Шероховатость боковых поверхностей колодки и пластин		R_a	
Состояние поверхностей стыка соединения (со смазкой, без смазки)		-	

6. По формуле (3) вычислить значения силы сдвига F_c при $0,25[F_3]$; $0,5[F_3]$; $0,75[F_3]$; $[F_3]$, взяв соответствующее значение коэффициента трения в стыке f_c в таблицу 3 (по согласованию с преподавателем). Результаты занести в таблицу 4.

Таблица 3 - Значение коэффициента трения

Шероховатость поверхностей R_a	Коэффициент трения f		Шероховатость поверхностей R_a	Коэффициент трения f	
	без смазки	со смазкой		без смазки	со смазкой
5,0x5,0	0,32	0,14	1,25x0,63	0,18	0,03
5,0x2,5	0,30	0,13	0,63x0,63	0,13	0,02
2,5x2,5	0,26	0,08	0,63x0,32	0,12	0,02
2,5x1,25	0,25	0,06	0,32x0,32	0,11	0,01
1,25x1,25	0,19	0,04			

Таблица 4 - Результаты опытов

Параметры	0,25 [T_3]	0,5 [T_3]	0,75 [T_3]	[T_3]
Допускаемая сила затяжки [F_3] рассчитанная по формуле (8), Н				
Допускаемое теоретическое значение момента закручивания [T_3], найденное по формуле (4), Нмм				
Теоретическая сила сдвига F_c , рассчитанная по формуле (3), Н				
Показания индикатора динамометрического ключа n_1				
Показания индикатора динамометрической пружины n_2				
Значения силы сдвига F_c , найденные экспериментальным путем, Н				

7. Построить график зависимости теоретических значений силы сдвига F_c от момента закручивания T_3 .

Определение экспериментальных значений силы сдвига F_c

1. Надеть пластины 4 на ось 3; совместить отверстия в пластинах 4 и верхней колодке 7 вращением маховика 11 и вставить болт 6, установить шайбу 14 и закрутить рукой гайку 15 на 1,5—2 оборота. Прижать фиксирующую от поворота болта планку к грани головки болта и закрепить ее шурупами.

2. Вращая маховик 11, добиться крайнего верхнего положения колодки 7 относительно боковых пластин 4. Для этого совместить метку на колодке 7 с верхней меткой на боковой пластине 4. При этом отсутствует зазор между стержнем болта 6 и нижней частью отверстия в колодке 7.

3. Взять динамометрический ключ с нужной головкой под гайку и установить индикатор 3 (рисунок 3) на ноль. Затянуть гайку болта 6 динамометрическим ключом до момента, который соответствует $0,25[T_3]$ (см. таблицу 4). Момент фиксируется по шкале индикатора ключа. Ключ плавно вращать только за ручку до требуемого показания стрелки индикатора ключа n_1 .

4. Установить на ноль индикатор на динамометрической пружине 13. Вращать маховик 11 так, чтобы ползун 19 опускался до остановки стрелки индикатора 13 и быстрого перемещения ее на 2-3 деления в обратном направлении. В этот момент сила сдвига F_c и сила трения в стыке F_f уравниваются и соединение не воспринимает нагрузку большую, чем сила трения покоя стыка (смещается вниз относительно боковых пластин). Наибольшее показание индикатора динамометрической пружины n_2 занести в таблицу 4.

5. Без снятия затяжки повторить действия по п. 3 и 4, но при T_3 , равным $0,5[T_3]$; $0,75[T_3]$; $[T_3]$. Все эксперименты необходимо сделать за одно перемещение метки на колодке 7 от верхней до нижней метки на пластине 4. Только в этом случае между верхней частью отверстия в колодке 7 и стержнем болта 6 сохраняется зазор.

6. Вычислить значение экспериментальной силы сдвига по формуле:

$$F_c = \mu_2 n_2, \quad (11)$$

где μ_2 — тарировочный коэффициент динамометрической пружины;
 n_2 - показания индикатора динамометрической пружины. Результаты занести в таблицу 4.

7. На теоретическом графике построить экспериментальную кривую аналогичных зависимостей.

Сравнить полученные экспериментальные и теоретические зависимости F_c от T_3 и сделать выводы.

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- название и цель работы;
- схему исследуемого резьбового соединения (рисунок 1);
- устройство и принцип работы динамометрического ключа (рисунок 3);
- таблицы 2 и 4;
- график зависимости F_c от T_3 ;
- выводы.

Контрольные вопросы

1. Устройство и принцип работы ручного винтового пресса.
2. Устройство и принцип работы динамометрического ключа.
3. Как увеличить силу сдвига при одинаковой силе затяжки?
4. Как влияет шероховатость и состояние поверхностей стыка на силу сдвига?
5. Какая существует зависимость изменения силы сдвига при изменении момента закручивания?
6. Чем объяснить возможное несоответствие теоретического и практического значений силы сдвига?
7. Зачем необходимо находить $[F_3]$?
8. Как влияют коэффициенты трения в стыке f_c , на торце гайки f_t и в резьбе f_p на величину силы сдвига F_c ?

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Обоснуйте цель проведения лабораторной работы.
2. Расскажите порядок проведения эксперимента.
3. Расскажите принцип действия лабораторной установки.
4. Как в испытуемом соединении установлен болт и как нагружено соединение?
5. Какие напряжения возникают в стержне болта? Запишите условие прочности болта.
6. Как определяется расчетная сила сдвига?
7. Определите допустимый момент закручивания?
8. Дайте определение понятий: «ненапряженное резьбовое соединение», «напряженное резьбовое соединение».
9. Какие стандартные резьбы применяют в отечественном машиностроении?
10. Запишите условие самоторможения в резьбе.
11. Какое значение условие самоторможения имеет для крепежных резьб?

12. Укажите какие напряжения возникают в стержне затянутого болта, поставленного в отверстие с зазором.
13. Как затянуть болт до нужного значения момента закручивания?
14. Как определить экспериментальную величину силы сдвига?
15. Как влияет шероховатость поверхности на силу сдвига?
16. Укажите различия в расчетах напряженного резьбового соединения от ненапряженного.
17. Назовите основные геометрические параметры метрической резьбы.
18. Обоснуйте влияние коэффициента трения в стыке f_0 , на величину сдвигающей силы.
19. Обоснуйте влияние коэффициента трения на торце гайки f_T на величину сдвигающей силы.
20. Обоснуйте влияние коэффициента трения в резьбе f_R на величину сдвигающей силы.
21. От чего зависит коэффициент трения в резьбе f_R ?
22. От чего зависит коэффициент трения на торце гайки f_T ?
23. Объясните как в лабораторной работе определяли экспериментальное значение сдвигающей силы F' .
24. Пользуясь графиками, определите значение сил F' и F при моментах затяжки $T_3 = 70 \text{ Нм}$; $T_3 = 90 \text{ Нм}$; $T_3 = 110 \text{ Нм}$. Сравните данные.
25. Почему для крепежных изделий (болтов, винтов) применяются резьбы с треугольным профилем?
26. Как производится расчет болтов, нагруженных силой затяжки и крутящим моментом затяжки?
27. Как выражается условие нераскрытия стыка соединения, нагруженного поперечными силами (болты поставлены с зазором)?
28. Какова зависимость между осевой силой на винте и силой, момент которой скручивает винт?
29. Каково условие самоторможения винтовых пар?
30. Чем можно объяснить возможное несоответствие расчетной силы с определенной экспериментально?
31. За счет чего можно при одной и той же затяжке болта увеличить силу сдвига?
32. Как влияют коэффициенты трения f_0 , f_R , f_T на величину расчетной силы сдвига?
33. Какова зависимость силы на ключе и момента закручивания?
34. Как определить допускаемое напряжение для болта?
35. Определите момент трения в резьбе.
36. Какие факторы влияют на величину момента закручивания?
37. Почему даже в идеальном случае экспериментальная зависимость силы сдвига от момента закручивания отличалась бы от расчетной?
38. Какие конструктивные и технологические решения можете предложить, чтобы при одной и той же силе затяжки увеличить силу сдвига?

Список литературы

1. Жуков, К.П. Проектирование деталей и узлов машин: Учебник для ВУЗов / К.П. Жуков. - М.: Машиностроение, 2014. - 648 с.
2. Курмаз Л.В., Скойбеда А.Т. Детали машин. Проектирование: Справочное учебно-методическое пособие. - М.: Высшая школа, 2015.-309 с.
3. Шелюфаст В.В. Основы проектирования машин. – М.: Изд-во АПМ, 2015.-472 с.
4. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. – М.: Машиностроение, в 3 т., 2011.
5. Гурин, В.В. Детали машин и курсовое проектирование. Часть 1: Учебник для бакалавриата и магистратуры / В.В. Гурин, В.М. Замятин, А.М. Попов. - Люберцы: Юрайт, 2016. - 366 с.
6. Решетов Д.И. Детали машин. Учебник для студентов машиностроительных и механических специальностей вузов – 9-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2009. – 496 стр..
7. Куклин Н. Г. Детали машин: Учебник / Н. Г. Куклин, Г. С. Куклина, В. К. Житков, 9-е изд., перераб. и доп - М.: КУРС, НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 512 с.
8. Хруничева Т.В. Детали машин: типовые расчеты на прочность: Учебное пособие / Т.В. Хруничева. - М.: ИД ФОРУМ: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 224 с.: ил.
9. Олофинская В.П. Детали машин. Основы теории, расчета и конструирования: Учебное пособие / В.П. Олофинская. - М.: Форум: НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 72 с.
10. Зубарев, Ю.М. Расчет и проектирование приспособлений в машиностроении: Учебник / Ю.М. Зубарев. - СПб.: Лань, 2015. - 320 с.