

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА
(национальный исследовательский университет)»

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК МЕТОДОВ
КОНТРОЛЯ УСИЛИЯ ЗАТЯЖКИ
РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

Электронное методическое пособие

САМАРА

2010

Составители: ШУЛЕПОВ Александр Павлович
ХАЙМОВИЧ Александр Исаакович

Рассматриваются вопросы формирования качества сборки изделий как на этапе проектирования технологического процесса сборки, так и при его реализации. Большое внимание уделено рассмотрению теоретических основ формирования качественных резьбовых соединений при сборке изделий. Показаны примеры разработки методики проведения лабораторного эксперимента по определению факторов, влияющих на качество выполнения сборочных операций.

Пособие предназначено для углубленного изучения курса технологии сборки ГТД студентами, обучающимися по технологической специализации. Оно может быть использовано инженерно-техническими работниками предприятий, проходящими обучение на ФПК и и магистерской программы «Энергетика, экология и двигательные установки ракетных и космических систем» по направлению 160700.68 «Двигатели летательных аппаратов».

Разработано на кафедре производства двигателей летательных аппаратов.

**© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2010**

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр
1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....	4
ЗАТЯЖКА С КОНТРОЛЕМ ВЕЛИЧИНЫ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА.....	4
ЗАТЯЖКА С КОНТРОЛЕМ УГЛА ПОВОРОТА ГАЙКИ.....	6
ЗАТЯЖКА С КОНТРОЛЕМ УДЛИНЕНИЯ БОЛТА.....	9
2. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА.....	10
3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА. КОНСТРУКЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОСНАСТКИ.....	11
4. ПРОВЕДЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА И ОБРАБОТ- КА ЕГО РЕЗУЛЬТАТОВ.....	14
5. СОСТАВЛЕНИЕ ОТЧЕТА.....	17
6. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ.....	17
7. ПЕРЕЧЕНЬ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОСНАСТКИ.....	17
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	18

1. Общие положения

Практика эксплуатации двигателей летательных аппаратов и других машин показывает, что одной из основных причин разрушения резьбовых соединений является значительное отклонение усилия затяжки болтов, винтов и шпилек от оптимального значения, обеспечивающего их нормальную работу. Это вызвано тем, что создание необходимого усилия затяжки резьбового соединения связано с трудностью контроля этого усилия при сборке. Поэтому возникает необходимость в оценке точностных и других технологических характеристик применяемых способов контроля усилия затяжки резьбовых соединений. Это позволит более обоснованно подходить к выбору того или иного способа контроля исходя из конструктивно-технологических факторов резьбового соединения.

В настоящее время в условиях производства получили наибольшее распространение три способа контроля усилия затяжки резьбового соединения: по величине крутящего момента, создаваемого ключом; по величине угла поворота гайки или винта; по величине удлинения болта или шпильки.

Все эти способы косвенные. Поэтому контролируемый при затяжке крутящий момент, угол поворота гайки или удлинение болта имеют функциональную связь с усилием затяжки.

Затяжка с контролем величины крутящего момента

Такой способ затяжки осуществляется с помощью предельных или динамометрических ключей, которые позволяют обеспечивать необходимый момент затяжки ($M_{зат}$). Этот момент может быть выражен в виде суммы трех составляющих:

$$M_{зат} = M_1 + M_2 + M_3, \quad (1)$$

где M_1 -момент, необходимый для создания растягивающих напряжений в болте;

M_2 - момент трения в резьбе;

M_3 - момент трения по торцу гайки (или головки болта).

Сумма моментов M_1+M_2 определяется по следующей зависимости::

$$M_1 + M_2 = Q_3 \frac{d_2}{2} \left(\frac{p}{\pi d_2} + f'_p \right), \quad (2)$$

где Q_3 – усилие затяжки резьбового соединения;

d_2 – средний диаметр резьбы;

p – шаг резьбы;

f'_p – приведенный коэффициент трения в резьбе. Он определяется из равенства

$$f'_p = \frac{f_p}{\cos \alpha / 2}, \quad (3)$$

где f_p – коэффициент трения для плоских трущихся поверхностей.

Для метрической резьбы угол профиля $\alpha = 60^\circ$, поэтому

$$f'_p = 1,15 f_p$$

Момент M_3 выражается зависимостью

$$M_3 = Q_3 f_T R_T, \quad (4)$$

где f_T – коэффициент трения по торцу гайки;

R_T – средний радиус трения торцевой поверхности гайки.

Принимая приближенно $R_T = 1/4 (D + d_0)$, получим

$$M_3 = 0,25 Q_3 f_T (D + d_0), \quad (5)$$

где D и d_0 – диаметры окружностей, ограничивающих площадь опорной поверхности гайки.

Таким образом, согласно (1) суммарный момент затяжки будет

$$M_{зам} = Q_3 \left[\frac{d_2}{2} \left(\frac{p}{\pi d_2} + 1,15 f'_p \right) + 0,25 f_T (D + d_0) \right]. \quad (6)$$

Формула (6) свидетельствует о наличии функциональной связи $M_{зам} = f_1(Q_3)$ или $Q_3 = f_2(M_{зам})$. Однако, как показывают исследования [5], зависимость $M_{зам} = f_1(Q_3)$ не является достаточно устойчивой, что приводит к погрешности усилия затяжки до 25%. Это объясняется главным образом большим рассеиванием значений коэффициентов трения f_p и f_T , которые в реальных резьбовых соединениях могут изменяться в пределах от 0,05 до 0,5. Наибольшее влияние на коэффициенты трения оказывают род материала сопрягаемых деталей, шероховатость поверхностей сопряжения, сорт смазки и вид антикоррозионного покрытия (оксидирование, цинкование, кадмирование, серебрение, омеднение и др.). Поэтому достоверность определения необходимого крутя-

шего момента (точность рассматриваемого способа контроля усилия затяжки) будет зависеть от того, насколько принятые для расчета коэффициенты трения соответствуют их действительным значениям. Повысить точность данного способа возможно за счет экспериментального определения коэффициентов трения с учетом всех конструктивно-технологических особенностей конкретного вида резьбового соединения и принятия мер к стабилизации коэффициентов трения в более узком диапазоне рассеивания.

К преимуществам рассматриваемого способа можно отнести: большую производительность, простоту выполнения и возможность механизации процесса затяжки с помощью пневмо- и электрогайковертов, имеющих устройства для контроля момента. К числу преимуществ этого способа следует отнести также независимость $M_{зат}$ от длины резьбового соединения (6).

Затяжка с контролем угла поворота гайки

Данный способ затяжки выполняется в следующем порядке: с помощью обычного ключа гайка затягивается (с целью обмятия микронеровностей на контактных поверхностях), после чего гайка отвертывается на 1-2 оборота и вновь наворачивается от руки до плотного соприкосновения с опорной поверхностью. Затем гайка затягивается ключом на заданный угол $\varphi_{зат}$. Для контроля угла поворота ключ снабжается указательной стрелкой, а на поверхность соединяемых деталей устанавливается шкала с делениями в угловых единицах (градусах).

Расчетный угол поворота гайки (или винта) для обеспечения заданного усилия Q_3 определяется по формуле

$$\varphi_p^o = 360 \frac{Q_3}{p} \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad (7)$$

где i – номер детали в соединении ($i = 1, 2, \dots, n$ для болта $i = 1$);

n – число деталей в соединении;

p – шаг резьбы;

$\sum_{i=1}^n \lambda_i$ – суммарная податливость болта и стягиваемых деталей.

Податливость болта и соединяемых деталей находится по формулам:

$$\lambda_{\sigma} = \frac{l_{\sigma}}{F_{\sigma} E_{\sigma}}, \quad (8)$$

$$\lambda_{\Delta} = \frac{l_{\Delta}}{F_{\Delta} E_{\Delta}}, \quad (9)$$

где l_{σ} , l_{Δ} – расчетные длины болта и соединяемых деталей соответственно. Приблизительно принимают, что $l_{\sigma} = l_{\Delta}$ (рис. 1);

E_{σ} ; E_{Δ} – модули упругости материала болта и соединяемых деталей;

F_{σ} ; F_{Δ} – площадь сечения болта и соединяемых деталей.

Площадь F_{σ} определяется достаточно просто по формуле

$$F_{\sigma} = \pi d^2 / 4.$$

Площадь F_{Δ} обычно определяется в предположении, что напряжения сжатия от усилия затяжки распределены в пределах конусов давления (рис. 1). Обычно принимают $tg \gamma = 0,5$. Если для упрощения расчета заменить рассматриваемый конус «эквивалентным цилиндром» с наружным диаметром D_{Σ} , то площадь сечения F_{Δ} определяется по формуле:

$$F_{\Delta} = \frac{\pi}{4} \left[(D + h \cdot tg \gamma)^2 - d_0^2 \right] \quad (10)$$

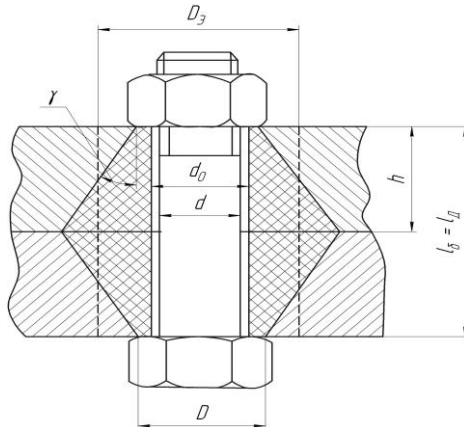


Рисунок 1. Схема резьбового соединения

Анализ формул (7), (8), (9) показывает, что функциональная связь $\varphi_p^0 = f(Q_3)$ не зависит от коэффициентов трения в резьбовой паре. Это одно из основных преимуществ способа контроля усилия затяжки по углу поворота. К другим преимуществам этого способа следует отнести простоту выполнения операции, не требующей сложных специальных ключей (как при предыдущем способе).

Однако точность рассматриваемого способа зависит от специфических причин, к числу которых относятся:

1. Погрешность субъективного характера, вызванная приближенным определением начального углового положения гайки (по субъективному ощущению момента плотного соприкосновения гайки с поверхностью закрепляемой детали).

2. Появление большой нелинейности на графике зависимости усилия затяжки от угла поворота гайки в начальный период затяжки. Если по экспериментальным данным построить график зависимости $Q_3 = f(\varphi_{зам}^0)$, то в начальный период затяжки (рис. 2) изменение усилия Q_3 проходит сначала по кривой до точки m , а далее сравнительно линейно. Заменив криволинейный участок графика прямой линией (на рис. 2 показана пунктиром), получим значение угла φ^0 , при котором поворот гайки как бы не вызывает усилия затяжки. Тогда необходимое значение угла поворота гайки

$$\varphi_{зат}^0 = \varphi_p^0 + \varphi_0^0 \quad (11)$$

Величина угла φ_0 может достигать 25...30% от $\varphi_{зат}$. Влияние этой погрешности значительно возрастает для относительно коротких болтов ($l/d=1...3$). На практике φ_0 определяется экспериментально для конкретного типа резьбового соединения. Основными причинами нелинейной зависимости Q_3 от $\varphi_{зат}$ на начальном участке являются упругие контактные деформации в стыках деталей, деформации деталей вследствие макронеровностей стыковых поверхностей сопрягаемых деталей, деформация отдельных элементов резьбы и др.

3. Погрешности, связанные с приближенными расчетами податливости соединяемых деталей (λ_d) и, прежде всего, с расчетом площади сечения F_d соединяемых деталей (отсутствуют точные данные по углу конуса γ , условная замена конуса давления «эквивалентным цилиндром» и т. д.). Повышение точности данного способа достигается за

счет повышения точности расчета податливости λ_d , экспериментального определения угла φ_0 и его стабилизации (технологическими средствами).

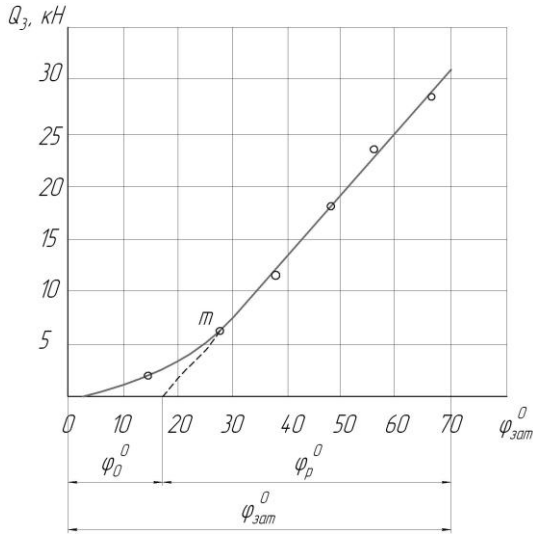


Рис. 2. График зависимости Q_3 от $\varphi_{зат}$

Затяжка с контролем удлинения болта

При этом способе в процессе затяжки измеряется удлинение болта или шпильки. Связь между удлинением болта Δl_b и усилием затяжки выражается зависимостью

$$\Delta l_b = Q_3 \lambda_b \tag{12}$$

Величина податливости болта (λ_b) - определяется по формуле (8).

Как следует из зависимости (12), на расчетную величину Δl_b совершенно не оказывают влияния ни коэффициенты трения, ни податливость соединяемых деталей. Благодаря наличию прямой связи между удлинением болта и усилием затяжки данный способ может считаться наиболее точным из всех рассмотренных. Однако, как показывают результаты исследований [5], высокая точность этого способа имеет место только при затяжке болтов значительной длины, у которых $l/d \geq 10$. При затяжке относительно коротких болтов, у которых $l/d = (1...3)$, погрешность способа значительно возрастает из-за малой величины измеряемого удлинения. Кроме того, увеличивается

влияние погрешности расчета податливости болта. Обычно при расчете λ_b величину l_σ принимают равной толщине стягиваемых деталей, а сечение болта постоянным на всей длине. Фактически сечение болта в гладкой и резьбовой части не одинаково. Кроме того, удлинение стержня происходит не только на участке, равном толщине стягиваемых деталей, но и на участке резьбы, занятом гайкой. Происходит также деформация (прогиб) головки болта. Поэтому с целью повышения точности расчета λ_b деформируемый участок болта, на котором происходит удлинение, необходимо определять по формуле

$$l_\sigma = l_{zл} + l_p + 3p, \quad (13)$$

где $l_{zл}$ – длина гладкой части стержня болта;

l_p – длина деформируемой резьбовой части стержня (расположенной в зоне соединяемых деталей);

$3p$ – длина деформируемой резьбовой части стержня, находящейся в зоне гайки (p – шаг резьбы).

Для коротких шпилек следует учитывать еще деформированный участок шпильки, находящейся в резьбовом отверстии корпуса.

К недостаткам способа следует отнести необходимость создания измерительных баз для болта (шлифование торцов с обеспечением их параллельности или изготовление центровых гнезд), зависимость точности способа от квалификации исполнителя, практическая неосуществимость способа контроля в случае расположения болтов в труднодоступных местах и другие.

В двигателях летательных аппаратов этот способ используется при затяжке наиболее ответственных резьбовых соединений (стяжные болты роторов компрессора и турбины, силовые шпильки и т. п.) при условии, что $l/d \geq 10$.

2. Цель и задачи лабораторного эксперимента

Целью лабораторного эксперимента является определение и сравнительная оценка точностных и других технологических характеристик наиболее распространенных способов контроля усилия затяжки резьбовых соединений.

В соответствии с поставленной целью в эксперименте решаются следующие задачи:

подтверждение основных теоретических зависимостей, характеризующих функциональную связь между усилием затяжки и контролируемым параметром;

оценка степени влияния отдельных технологических факторов на погрешность контроля усилия затяжки;

приобретение навыков проведения исследований в области технологии сборки и использования экспериментальной оснастки.

3. Методика проведения лабораторного эксперимента. Конструкция экспериментальной оснастки

Сущность сравнения рассматриваемых способов затяжки по их точности состоит в том, что затяжка одного и того же соединения осуществляется одновременно всеми тремя способами, т. е. при затяжке контролируется крутящий момент ($M_{зам}$), угол поворота гайки φ^0 и удлинение болта Δl_{σ} . По известным значениям $M_{зам}$, φ^0 и Δl рассчитывают осевое усилие затяжки Q_3 исходя из следующих формул:

$$Q_{z(M)} = M_{зам} \left[\frac{1}{\frac{d_2}{2} \left(\frac{p}{\pi d_2} + 1,15 f_p \right) + 0,25 f_T (D + d_0)} \right] = M_{зам} A_M, \quad (14)$$

$$Q_{z(\varphi)} = \varphi^0 \left[\frac{1}{\frac{360}{p} \sum \lambda_i} \right] = \varphi^0 A_{\varphi}, \quad (15)$$

$$Q_{z(\Delta l)} = \Delta l_{\sigma} \frac{1}{\lambda_{\sigma}} = \Delta l_{\sigma} A_{\Delta l}. \quad (16)$$

Если предположить, что рассматриваемые методы затяжки не имеют погрешностей, то должно соблюдаться равенство

$$Q_{z(M)} = Q_{z(\varphi)} = Q_{z(\Delta l)} = Q_{z(d)}, \quad (17)$$

где $Q_{z(d)}$ – действительное значение усилия затяжки, измеренное специальным прибором в ходе эксперимента (на основе данных тарировки).

Тарировка болта производится с помощью динамометра и тензометрической аппаратуры (рис. 3). Результаты тарировки выражаются в виде таблицы или графика зависимости усилия затяжки от числа условных единиц тензометрической аппаратуры.

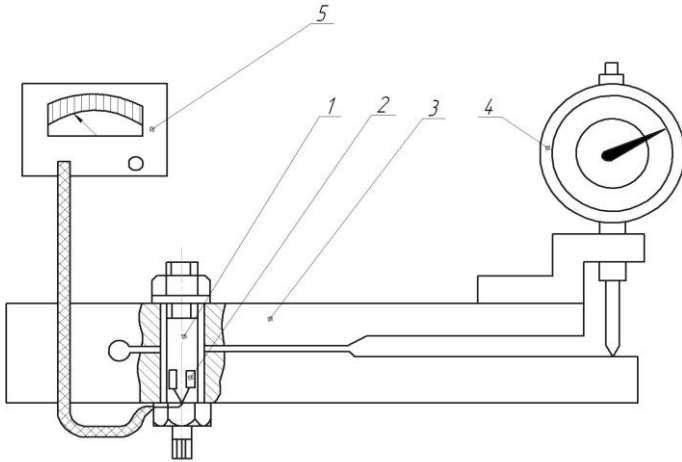


Рис. 3. Схема тарировки болта с помощью динамометра:
 1 – болт; 2 – тензорезисторы; 3 – динамометр; 4 – индикаторные часы;
 5 - регистрирующая тензоаппаратура

Если равенство (17) не выполняется, то относительная погрешность метода вычисляется по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_M &= \frac{Q_{3(M)} - Q_{3(D)}}{Q_{3(D)}} 100\%; \\ \varepsilon_\Phi &= \frac{Q_{3(\Phi)} - Q_{3(D)}}{Q_{3(D)}} 100\%; \\ \varepsilon_{\Delta l} &= \frac{Q_{3(\Delta l)} - Q_{3(D)}}{Q_{3(D)}} 100\%. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

При проведении экспериментальных работ используется приспособление (рис. 4), состоящее из втулки 1, жестко закрепленной на подставке. В отверстие втулки устанавливается испытуемый болт 3, препарированный тензорезисторами 2. Со стороны головки болт имеет

хвостовик с резьбой для крепления кронштейна 7 с индикаторными часами 6, измеряющими удлинение болта. На верхнем торце втулки с помощью винтов закреплен диск 5 с вращающейся шкалой 4 для измерения угла поворота гайки. Затяжка гайки производится динамометрическим ключом, позволяющим измерить момент затяжки в Н·м. Ключ предварительно тарируется и результаты тарировки заносятся в таблицу или график, прилагаемые к ключу. Для отсчета угла поворота гайки динамометрической ключ дополнительно снабжен указательной стрелкой.

При проведении лабораторного эксперимента используется болт с резьбой 12x1,5, $l_0=83$ мм, материал болта - сталь 30ХГСА.

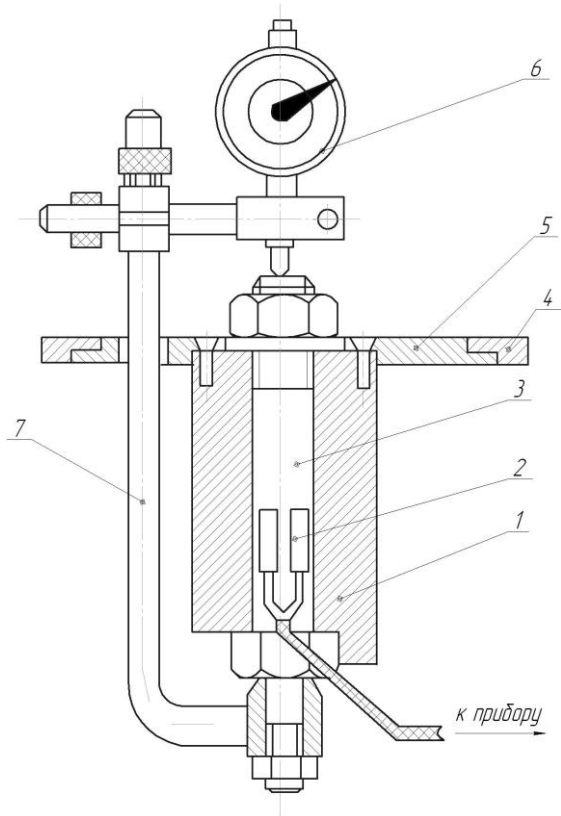


Рис. 4. Конструкция приспособления для проведения лабораторной работы

4. Проведение лабораторного эксперимента и обработка его результатов

Лабораторный эксперимент проводится в следующей последовательности:

1. Проверить правильность установки болта во втулку приспособления согласно рис. 4. Провода от тензорезисторов должны быть подключены к регистрирующей тензоаппаратуре.

2. С помощью простого ключа затянуть гайку с целью смятия микронеровностей на контактных поверхностях гайки, болта и втулки, после чего отвернуть гайку на 1–2 оборота и вновь навернуть ее от руки до плотного соприкосновения со втулкой.

3. Приподнимая ножку индикатора, осторожно установить на гайку динамометрический ключ (при этом гайку не поворачивать).

4. Поворачивая шкалу приспособления, совместить нуль шкалы с указательной стрелкой ключа.

5. Установить шкалу индикаторных часов приспособления и динамометрического ключа на нуль.

6. Проверить настройку регистрирующей тензоаппаратуры (правила работы с тензоаппаратурой указаны в инструкции, находящейся на рабочем месте).

7. Произвести затяжку гайки динамометрическим ключом через равные интервалы усилия 5, 10, 15, 20 кН. Для каждого значения усилия $Q_{з(0)}$, определяется момент затяжки $M_{зат}$, удлинение болта Δl_0 и угол затяжки $\varphi_{зат}$. При определении момента затяжки необходимо показания индикаторных часов ключа с помощью тарировочного графика или таблицы перевести в величину момента в Н·м. Все полученные данные заносятся в таблицу 1 отчета.

8. Отвернуть гайку на 1–2 оборота, снять ключ, после чего повторить эксперимент еще раз с занесением результатов замеров в таблицу 1 отчета.

9. Для каждого значения усилия затяжки найти среднеарифметическую величину $M_{зат}$, Δl_0 , $\varphi_{зат}^0$ и записать в таблицу отчета.

10. По полученным значениям величин $\varphi_{зат}^0$ и $Q_{з(0)}$, построить график зависимости $Q_{з(0)}=f(\varphi_{зат}^0)$, аналогичный изображенному на рис. 2, и определить величину начального угла φ_0 .

11. Для каждой экспериментальной точки вычислить величину расчетного угла затяжки по формуле

$$\varphi_p = \varphi_{зат} - \varphi_0. \quad (19)$$

Полученную величину φ_p занести в таблицу 1 отчета.

Таблица 1

Номер измераемой точки	Усилие затяжки $Q_{з(д)}$, кН	Момент затяжки				Удлинение болта Δl_{σ} , мм		Угол затяжки $\varphi_{зат}^0$		$\varphi_p = \varphi_{зат} - \varphi_0$
		показания индикаторных часов ключа		момент затяжки $M_{з}$, Нм						
1	5	1		1	среднее	1	среднее	1	среднее	
		2		2		2				
2	10	1		1	среднее	1	среднее	1	среднее	
		2		2		2				
3										

12. В соответствующие графы таблицы 2 отчета перенести из таблицы 1 величины усилия затяжки $Q_{з(д)}$ и соответствующие этим усилиям значения момента $M_{зат}$, удлинения болта Δl_{σ} и углов φ_p .

Таблица 2

Номер измераемой точки	$Q_{з(д)}$, кН	$M_{зат}$, Н·м	$Q_{зат}(M)$	Δl_{σ} , мм	$Q_{з(\Delta l)}$	φ_p^0	$Q_{з(\varphi)}$
1	5						
2	10						
3							

13. Для каждого значения $M_{зат}$, φ_p , Δl_{σ} вычислить расчетные значения усилия затяжки по формулам (14), (15), (16):

$$Q_{з(M)} = A_M M_{зат}$$

$$Q_{з(\Delta l)} = A_{\Delta l} \Delta l_{\sigma}$$

$$Q_{з(\varphi)} = A_{\varphi} \varphi_p$$

С целью сокращения времени вычислений рекомендуется использовать заранее рассчитанные значения коэффициентов A_M , $A_{\Delta l}$, A_{φ} или

графики зависимостей, имеющиеся на рабочем месте. Полученные данные заносятся в графы таблицы 2 отчета.

14. На основе полученных данных в отчете построить график зависимостей $Q_{3(\phi)}$, $Q_{3(M)}$, $Q_{3(\Delta l)}$, $Q_{3(\varphi)}$ от удлинения Δl_{ϕ} , аналогично рисунку 5.

15. На построенном графике провести ординату, которая пересекла бы все кривые зависимости (рис. 5), и для точек a, b, c, d определить значения усилия затяжки $Q_{3(\phi)}$, $Q_{3(M)}$, $Q_{3(\Delta l)}$, $Q_{3(\varphi)}$.

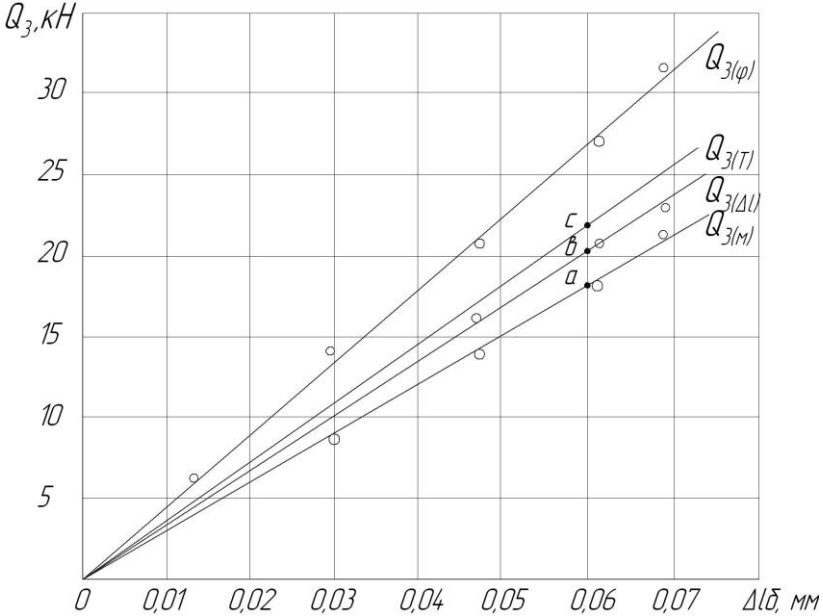


Рис. 5 - График зависимости $Q_{3(\phi)}$, $Q_{3(M)}$, $Q_{3(\Delta l)}$, $Q_{3(\varphi)}$ от удлинение болта Δl

16. Определить относительную погрешность величины усилия затяжки для каждого способа по формулам (18).

17. Определить относительную величину угла φ_0 от значения $\varphi_{зат}$ по формуле

$$\varepsilon = \frac{\varphi_0}{\varphi_{зат(макс)}} \cdot 100\% \quad (20)$$

5. Составление отчета

В отчете должны быть указаны результаты проведенного эксперимента по форме табл. 1 и 2, построены графики зависимостей по форме рис. 2 и рис. 5, определены погрешности измерения усилия затяжки при контроле $M_{\text{зат}}$, $\Delta l_{\text{б}}$, $\varphi_{\text{зат}}$ и сделаны выводы о точностных характеристиках всех рассматриваемых способов контроля усилия затяжки.

6. Вопросы для самоконтроля

1. Какие факторы оказывают наибольшее влияние на погрешность способов контроля (по величине момента $M_{\text{зат}}$, угла поворота $\varphi_{\text{зат}}$ и удлинения болта $\Delta l_{\text{б}}$)?
2. Какие факторы оказывают наибольшее влияние на коэффициент трения в резьбовой паре?
3. Какие преимущества и недостатки имеет каждый из рассматриваемых способов контроля усилия затяжки?
4. В чем сущность методики проведения эксперимента?
5. В чем сущность тарировки испытуемого болта?
6. Каков принцип работы динамометрического ключа?
7. Почему при измерении удлинения болта кронштейн с индикаторными часами закрепляется на головке болта? Сохранятся ли условия эксперимента, если кронштейн будет закреплен на втулке?
8. Каковы причины расхождения экспериментальных зависимостей с теоретическими?
9. Какие ваши предложения о возможности применения других способов контроля усилия затяжки или комбинации способов из числа рассмотренных?

7. Перечень экспериментальной оснастки

1. Приспособление для проведения эксперимента.
2. Динамометрический ключ.
3. Ключ плоский (S = 17x19).
4. Тензометрическая аппаратура.

Список использованных источников

1. *Никитин А.Н.* Технология сборки двигателей летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1982. 269 с.
2. *Иоселевич Г.Б., Строганов Г. Б., Шарловский Ю. В.* Затяжка и стопорение резьбовых соединений. М.: Машиностроение, 1985. 224 с.
3. *Новиков М.П.* Основы технологии сборки машин и механизмов. М.: Машиностроение, 1980. 592 с.
4. *Захаров В.А.* Суммирование погрешностей взаимного расположения цилиндрических поверхностей при сборке узлов авиадвигателей// Тр. КуАИ (Куйбышев, 1967). Вып. XXVII. С. 71—76.
5. *Старостин И.Г.* К оценке методов затяжки ответственных резьбовых соединений//Тр. КуАИ. Куйбышев, 1967. Вып. XXVII. С. 77—88.
6. *Шевелев А.С., Федорченко Г.П.* К определению точности центрирования деталей при сборке//Изв. вузов. — М.: Машиностроение. 1962. №12.