

**Лабораторная работа № 9**  
**ИСПЫТАНИЕ ЗАТЯНУТОГО БОЛТОВОГО СОЕДИНЕНИЯ,**  
**НАГРУЖЕННОГО ВНЕШНЕЙ СИЛОЙ, КОТОРАЯ**  
**РАСКРЫВАЕТ СТЫК ДЕТАЛЕЙ**

**Цель работы:** экспериментально определить силу, которую воспринимает болт после затяжки и приложения внешней нагрузки к соединению.

**Оборудование:** лабораторная установка, штангенциркуль.

**Подготовка к выполнению лабораторной работы:** ознакомиться с теоретическим материалом по резьбовым соединениям [1, с. 83–85; 2, с. 31–35; 3, с. 170–173].

**1. Общие сведения**

Болты, которыми крепят кронштейны (рис. 9.1), крышки емкостей (рис. 9.2), соединяют фланцы муфт (рис. 9.3), сначала закручиваются с силой затяжки  $F_3$ . При этом затяжка должна обеспечить как нераскрытие стыка под нагрузкой, так и герметичность соединения. Затем прикладывают внешнюю нагрузку  $F_{вн}$ , которая дополнительно нагружает болты.

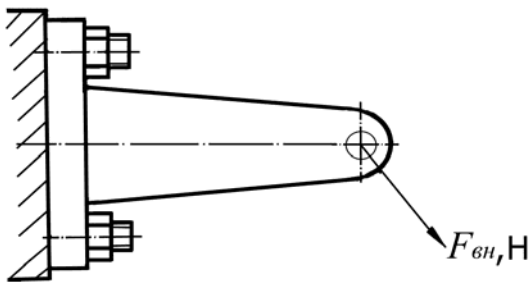


Рис. 9.1. Крепление кронштейна к основанию

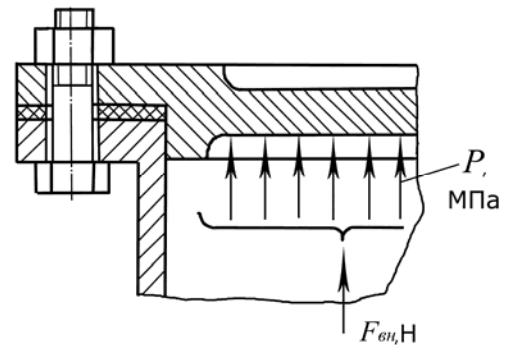


Рис. 9.2. Крепление крышки емкости

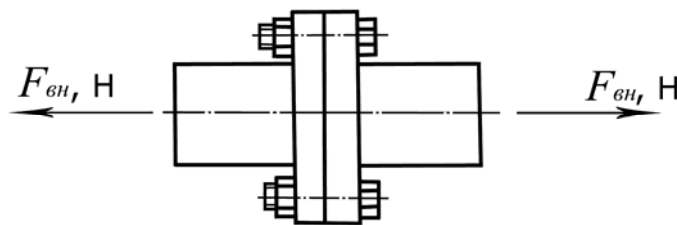


Рис. 9.3. Соединение полумуфт

Необходимо определить, какие силы разрывают болт. Так как задача распределения  $F_{вн}$  между болтом и стыком статически не определена, то она решается с учетом деформации болта и соединяемых деталей. С этой целью выделим элемент болтового соединения и рассмотрим его работу под воздействием приложенных сил (рис. 9.4)

В исходном состоянии при отсутствии нагрузок деформации болта и деталей стыка равны нулю (рис. 9.4, а).

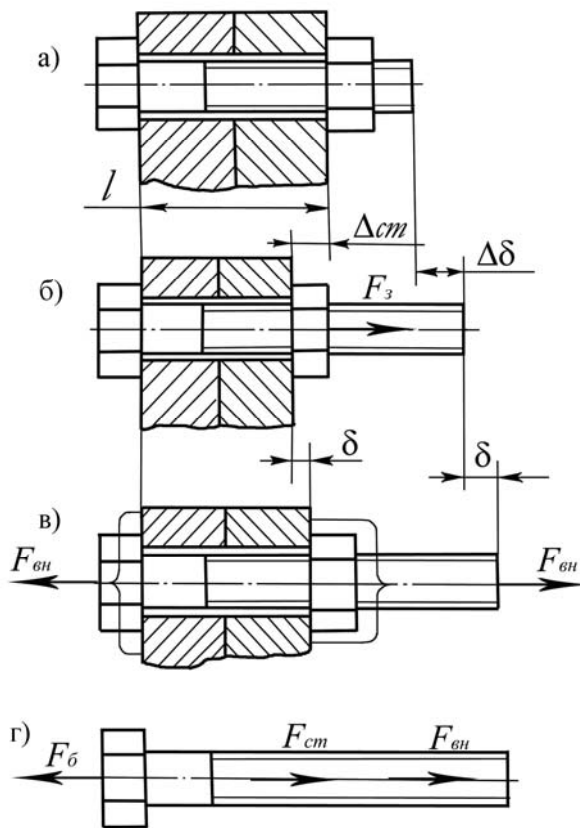


Рис. 9.4. Схема деформаций и сил в болтовом соединении

После приложения силы затяжки  $F_3$  детали стыка сжались на величину  $\Delta_{ст}$ , а болт растянулся на величину  $\Delta_{б}$ , мм (рис. 9.4, б).

По закону Гука

$$\Delta_{ст} = \frac{F_3}{C_{ст}}; \quad (9.1)$$

$$\Delta_{б} = \frac{F_3}{C_{б}},$$

где  $C_{ст}$  и  $C_{б}$  – жесткость деталей стыка и болта, Н/мм.

Таким образом, после затяжки величина растягивающей силы, действующей на болт от детали стыка, будет определяться величиной их деформаций  $\Delta_{ст}$ . После приложения внешней нагрузки  $F_{вн}$  на соединение болт дополнительно удлинится на величину  $\delta$ , а деформация деталей стыка уменьшится на ту же величину  $\delta$  (рис. 9.4, в) и тем самым уменьшится растягивающая сила от стыка на болт. Болт получит удлинение  $\delta_{б} = \Delta_{б} + \delta$ , а стык уменьшит сжатие  $\delta_{ст} = \Delta_{ст} - \delta$ . Таким образом, по закону Гука нагрузка на болт будет

$$F_{б} = (\Delta_{б} + \delta)C_{б}, \quad (9.2)$$

а нагрузка в стыке (так называемая остаточная реакция стыка, или остаточная сила предварительной затяжки) станет

$$F_{cm} = (\Delta_{cm} - \delta)C_{cm}. \quad (9.3)$$

Подставим значения  $\Delta_{\delta}$  и  $\Delta_{cm}$  из выражения (9.1) соответственно в уравнения (9.2) и (9.3). Получим

$$F_{\delta} = F_3 + \delta C_{\delta}; \quad (9.4)$$

$$F_{cm} = F_3 - \delta C_{cm}. \quad (9.5)$$

Из условия равновесия болта (рис. 9.4, г) получим

$$F_{\delta} = F_{вн} + F_{cm}. \quad (9.6)$$

Таким образом, можно сказать, что суммарная нагрузка на болт равна сумме внешней нагрузки и остаточной силе затяжки стыка.

Так как определение остаточной силы затяжки ( $F_{cm}$ ) является сложной задачей, можно решить совместно уравнения (9.1–9.6) и определить силу, действующую на болт с учетом деформаций болта и деталей стыка:

$$F_{\delta} = F_3 + \frac{C_{\delta}}{C_{\delta} + C_{cm}} F_{вн}. \quad (9.7)$$

Обозначив коэффициент внешней нагрузки

$$\chi = \frac{C_{\delta}}{(C_{\delta} + C_{cm})}, \quad (9.8)$$

получим растягивающую силу, действующую на болт после приложения внешней силы  $F_{вн}$ , обеспечивающую прочность соединения:

$$F_{\delta} = F_3 + \chi F_{вн}. \quad (9.9)$$

Коэффициент внешней нагрузки  $\chi$  показывает, какая часть ее действует на болт. Тогда  $(1-\chi)$  – часть внешней нагрузки, действующей на детали стыка. Остаточная сила затяжки стыка будет

$$F_{cm} = F_3 - (1-\chi)F_{вн}. \quad (9.10)$$

Формулы (9.9) и (9.10) действительны, пока остаточная сила предварительной затяжки не уменьшится до нуля, таким образом, условие нераскрытия стыка будет при  $F_{cm} > 0$  и  $F_3 > (1-\chi)F_{вн}$ . Иначе (при  $F_{cm} = 0$ ) начнется раскрытие стыка и плотность соединения нарушится.

Таким образом, для расчета резьбового соединения условие нераскрытия стыка можно записать

$$F_{cm} = k(1-\chi)F_{вн}, \quad (9.11)$$

где  $k$  – коэффициент запаса предварительной затяжки, который зависит от вида нагрузки приложенной на соединение.

Если выражение (9.11) подставить в формулу (9.9) и учесть действие скручивающего момента при затяжке, получим расчетную силу, действующую на болт:



нагрузку, а стык только силу затяжки.

Детали стыка абсолютно жесткие  $C_{ст}=\infty$ , а болт податливый. Тогда  $\chi=0$ ,  $F_0=F_3$ ,  $F_{ст}=F_3-F_{вн}$ . Таким образом, болт не воспринимает внешней нагрузки.

Поэтому одной из возможностей уменьшения воздействия внешней нагрузки на болт является увеличение его податливости (уменьшение жесткости). Конструктивно податливые болты можно изготовить, как показано на рис. 9.6. Прочность болта обусловлена величиной внутреннего диаметра резьбы и существованием в ней концентраторов напряжений. Учитывая отсутствие концентраторов напряжений в гладкой части болта, диаметр стержня можно взять меньше  $d_1$  или просверлить в нем отверстие. При этом болт будет равнопрочным, а его податливость увеличится.

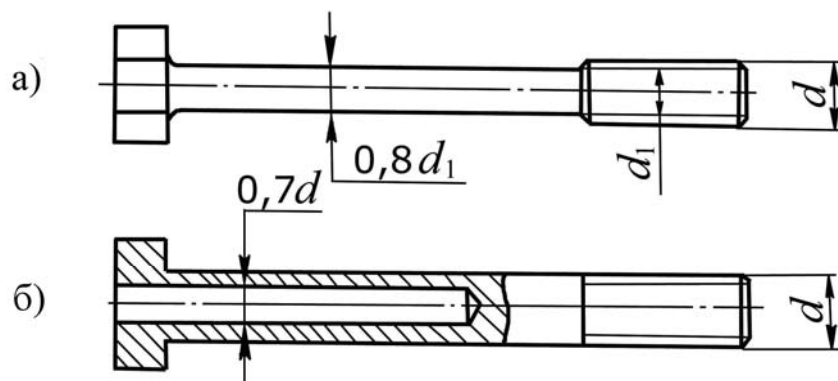


Рис. 9.6. Упругие болты

## 2. Описание лабораторной установки

Установка (рис. 9.7) моделирует работу болтового соединения. Жесткости болта и деталей стыка условно заменяются жесткостями соответствующих пружин 1 и 2 как более удобными при определении деформаций. Поскольку внешняя нагрузка на болт передается от соединяемых деталей через гайку, то ее можно приложить непосредственно к болту, что и используется в установке с помощью пружины 3. Изменение усилий пружин осуществляется с помощью гаек: 4 – для пружины стыка 2 и 5 – для пружины внешней нагрузки 3. Величина деформации определяется на линейках: 6 – для болта, 7 – для стыка, 8 – для внешней нагрузки. Контроль наличия усилий в стыке осуществляется с помощью флажка 9, который имеет два положения: горизонтальное – наличие затяжки, вертикальное – отсутствие затяжки (стык раскрыт).

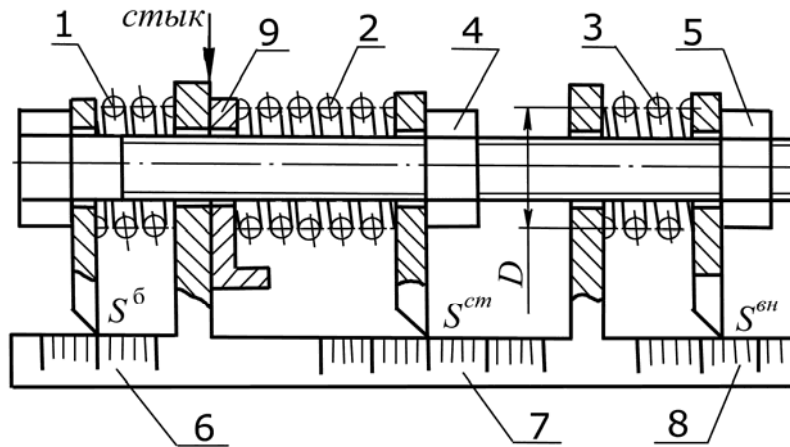


Рис. 9.7. Лабораторная установка

### 3. Порядок выполнения работы

а) Ознакомиться с устройством лабораторной установки и определить жесткость  $C$ , Н/мм, пружин 1, 2, 3 (рис. 9.7) по формуле

$$C = \frac{G d^4}{8 D^3 i},$$

где  $G$  – модуль сдвига, в нашем случае равен  $7,7 \cdot 10^4$  М/мм<sup>2</sup>;  $d$  – диаметр проволоки пружины, мм;  $D$  – средний диаметр пружины, мм:  $D = D_{вн} - d$  ( $D_{вн}$  – внешний диаметр пружины, рис. 9.7);  $l$  – расчетное количество витков;  $l = i_0 - 1,5$  ( $i_0$  – полное количество витков пружины). Данные занести в табл. 9.1.

Таблица 9.1.

Пружины	$d$ , мм	$D_{вн}$ , мм	$D$ , мм	$i_0$	$i$	$\frac{C,}{Н}$ мм
болта						
стыка						
внешней нагрузки						

б) Установить пружины в исходное положение, при котором нагрузки равны нулю, деформации всех пружин и зазоров между пружинами и гайками отсутствуют.

Занести в табл. 9.2 значения точек начала отсчета  $S_0$  на линейках болта, стыка и внешней нагрузки.

в) Затянуть гайку 4 с расчетной силой  $F_з$ , которая соответствует

деформации пружины стыка 2, равной  $\Delta_{cm}=8-12$  мм (по согласованию с преподавателем). Таким образом,  $F_3=\Delta_{cm}C_{cm}$  (Н). При этом флажок 9 установить в горизонтальное положение (стык затянут). Занести в табл. 9.2 точки отсчета  $S_1$  с линеек стыка 7 и болта 6. Найти величину деформации болта и стыка, как абсолютную разницу показаний  $|S_1 - S_0| = \Delta$  (рис. 9.8).

г) Нагрузить зацепление внешней нагрузкой на величину  $F_{вн} \approx 0,8F_3$ , для этого пружину 3 сжать гайкой 5 до того, пока на линейке стыка 7 указатель не переместится вправо на 5–9 мм (по согласованию с преподавателем).

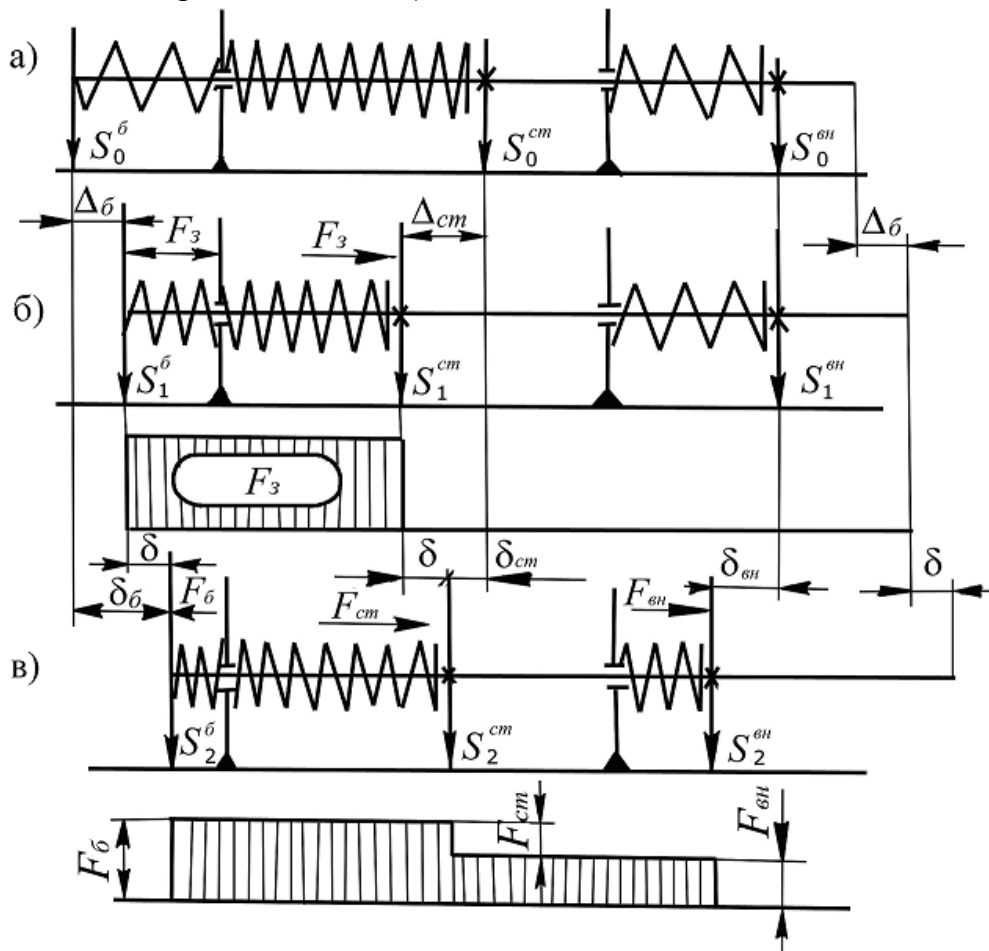


Рис. 9.8. Схема сил и деформаций

Занести в табл. 9.2 точки  $S_2$  на всех линейках и найти деформации пружины болта, стыка и внешней нагрузки:

$$\delta_{\delta} = |S_2^б - S_0^б|; \delta_{cm} = |S_2^{cm} - S_0^{cm}|; \delta_{вн} = |S_2^{вн} - S_0^{вн}|, \text{ мм}$$

д) Найти нагрузки на болт, стык и значение внешней силы:

$$F_{\delta} = \delta_{\delta} C_{\delta}; F_{cm} = \delta_{cm} C_{cm}; F_{вн} = \delta_{вн} C_{вн}, \text{ Н.}$$

е) Найти коэффициент внешней нагрузки по экспериментальным данным:

$$\chi_{\delta} = \frac{F_{\delta} - F_{\delta}}{F_{вн}}.$$

Таблица 9.2.

Силовые и геометрические условия эксперимента	Точки отсчета	Единица измерения	Величина деформаций и сил, действующих в соединении		
			Болт	Стык	Внешняя нагрузка
$F_{\delta}=0$	$S_0$	мм			
$F_{\delta} > 0$	$S_1$	мм			
$\Delta$	$S_1 - S_0$	мм			
$F_{вн} = 0,8 F_{\delta}$	$S_2$	мм			
$\delta$	$S_2 - S_0$	мм			
$F$		Н			
$F_{вн}$ – стык раскрыт	$S_3$	мм			
$\delta^{\max}$	$S_3 - S_0$	мм			
$F^{\max}$		Н			

ж) Вычислить теоретический коэффициент внешней нагрузки:

$$\chi_T = \frac{C_{\delta}}{C_{\delta} + C_{cm}}.$$

з) Найти погрешность эксперимента по формуле

$$\Delta_{\delta} = \left| \frac{\chi_T - \chi_{\delta}}{\chi_T} \right| 100 \%$$

и) Вычислить максимальную внешнюю нагрузку, при которой напряжение в стыке отсутствует ( $F_{cm}=0$ ) и стык раскроется. Для этого необходимо увеличить внешнюю нагрузку (закручивая гайку 5) до тех пор, пока не упадет флажок 9 (напряжение в стыке отсутствует).

Занести в табл. 9.2 точки отсчета  $S_3$  на всех линейках и вычислить деформации пружин болта и внешней нагрузки. При этом значе-



ние  $S_3^{cm}$  для пружины стыка 7 должно равняться значению  $S_0^{cm}$ .

Вычислить максимальные нагрузки:

$$F_{вн}^{\max} = \delta_{вн}^{\max} C_{вн}; F_{б}^{\max} = \delta_{б}^{\max} C_{б}, \text{ Н.}$$

Результаты занести в табл. 9.2.

к) Разгрузить все пружины и привести установку в исходное положение.

#### 4. Отчет о работе

Отчет должен включать: название и цель работы; рис. 9.4, 9.5, 9.6, 9.7; заполненные табл. 9.1, 9.2; выводы.

#### 5. Контрольные вопросы

1. Какое напряжение испытывают болт и детали стыка только после приложения  $F_3$ ? 2. Как изменяется напряжение в стыке после приложения внешней нагрузки? 3. Чему равна суммарная нагрузка на болт после приложения внешней нагрузки: а) когда болт абсолютно жесткий, а детали стыка упругие; б) когда детали стыка абсолютно жесткие, а болт упругий; в) в реальных условиях? 4. В чем заключается физический смысл коэффициента внешней нагрузки и от чего он зависит? 5. При каких условиях нарушится герметичность соединения? 6. Какое выражение справедливо: а) суммарная нагрузка на болт равна сумме силы предварительной затяжки и части внешней нагрузки; б) болт воспринимает всю внешнюю нагрузку и остаточную затяжку стыка? 7. Какую нагрузку воспринимает болт, если стык раскрылся? 8. Раскроет ли внешняя нагрузка стык деталей, если болт абсолютно жесткий?