

УДК 621.1(075.8)

ПРОЧНОСТНАЯ МОДЕЛЬ БОЛТОВОГО СОЕДИНЕНИЯ

студент гр.10107114 Довженко П.А.

Научный руководитель – доц. Реут Л.Е.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Для решения многих инженерных задач большое практическое применение имеют резьбовые соединения «болт–втулка». Эти соединения практичны и просты в использовании, но имеют особенности и требуют соответствующих расчетов.

Основной функцией этой пары является жесткое соединение деталей между собой, однако условия их эксплуатации могут быть различными. Они могут работать как без воздействия, так и под воздействием внешней растягивающей нагрузки. Различные условия работы болтового соединения требуют соответствующих расчетов, которые необходимо выполнять уже на стадии проектирования конструкции. На основании этого рассматриваются два типа задач:

- соединение «болт–втулка» работает только как соединительный узел без воздействия внешней нагрузки;
- соединение «болт–втулка» работает под воздействием растягивающей силы F ;

Рассмотрим первую задачу, в которой главной целью является расчет болтового соединения на прочность в зависимости от силы затяжки болта (рис.1).

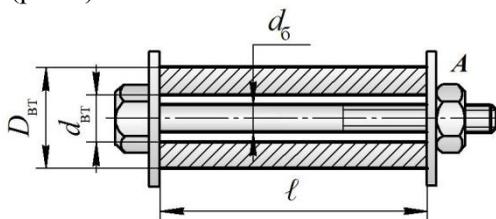


Рис. 1

Эта задача является статически неопределимой и требует раскрытия статической неопределимости. Используем для решения метод деформаций:

а) Статическая сторона (рис.2):

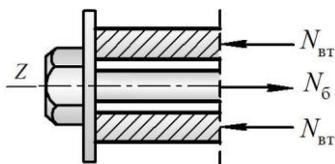


Рис. 2

$$\sum Z = 0: N_{\text{б}} - N_{\text{вт}} = 0 \rightarrow$$

$$N_{\text{б}} = N_{\text{вт}} = F_0, \quad (1)$$

где F_0 – сила затяжки болта.

б) Геометрическая сторона.

Уравнением перемещения является равенство между полным перемещением гайки A влево и укорочением медной втулки:

$$\Delta l_A^{\text{влево}} = \Delta l_{\text{вт}}. \quad (2)$$

Суммарное перемещение гайки A влево ($\Delta l_A^{\text{влево}}$) определяется как результат двух ее перемещений: влево – при повороте гайки на $1/4$ оборота и оно равно $\Delta l_A = (1/4)h$ и вправо – вследствие растяжения болта на $\Delta l_{\text{б}}$ при затягивании гайки. Тогда уравнение перемещений (2) примет вид:

$$(1/4)h - \Delta l_{\text{б}} = \Delta l_{\text{вт}}. \quad (3)$$

в) Физическая сторона:

$$\Delta l_{\text{б}} = \frac{N_{\text{б}} l_{\text{б}}}{E_{\text{б}} A_{\text{б}}} = \frac{F_0 l_{\text{б}}}{E_{\text{б}} A_{\text{б}}}; \quad \Delta l_{\text{вт}} = \frac{N_{\text{вт}} l_{\text{вт}}}{E_{\text{вт}} A_{\text{вт}}} = \frac{F_0 l_{\text{вт}}}{E_{\text{вт}} A_{\text{вт}}}, \quad (4)$$

где площади сечений болта и втулки соответственно равны:

$$A_{\text{б}} = \pi d_{\text{б}}^4 / 4; \quad A_{\text{вт}} = \pi (D_{\text{вт}}^2 - d_{\text{вт}}^2) / 4.$$

Подставляем (4) в (3) и получаем величину силы затяжки болта:

$$F_0 = \frac{h E_{\text{б}} A_{\text{б}}}{4l \left(1 + \frac{E_{\text{б}} A_{\text{б}}}{E_{\text{вт}} A_{\text{вт}}} \right)}. \quad (5)$$

Тогда соответственно напряжения в элементах будут равны:

$$\sigma_{\text{б}} = F_0 / A_{\text{б}}; \quad \sigma_{\text{вт}} = F_0 / A_{\text{вт}}. \quad (6)$$

Расчет данного соединения, работающего без внешней нагрузки, сводится к определению максимально допустимой затяжки, не приводящей к потере прочности болта и втулки. Так как крепежные элементы изготавливаются из высоко пластичных материалов, то наибольшей опасностью здесь является возникновение текучести в болте и втулке. Силу затяжки болтового соединения рассчитывают на основании условий прочности его элементов:

$$\sigma_{\text{б}} = \frac{F_0}{A_{\text{б}}} = \frac{h E_{\text{б}}}{4l \left(1 + \frac{E_{\text{б}} A_{\text{б}}}{E_{\text{вт}} A_{\text{вт}}} \right)} \leq [\sigma]_{\text{б}}; \quad (7)$$

$$\sigma_{\text{вт}} = \frac{F_0}{A_{\text{вт}}} = \frac{h E_{\text{вт}}}{4l \left(1 + \frac{E_{\text{вт}} A_{\text{вт}}}{E_{\text{б}} A_{\text{б}}} \right)} \leq [\sigma]_{\text{вт}}. \quad (8)$$

Формулы (7) и (8) показывают, каким образом напряжения зависят от жесткости элементов и как следует изменить соотношение жесткостей, чтобы достичь необходимого распределения напряжений в паре «болт–втулка».

Однако на практике чаще встречается ситуация, когда болтовое соединение работает под действием растягивающей нагрузки. Рассмотрим эту схему (рис.3), для которой возможны два варианта условий работы – без раскрытия стыка и с раскрытием стыка.

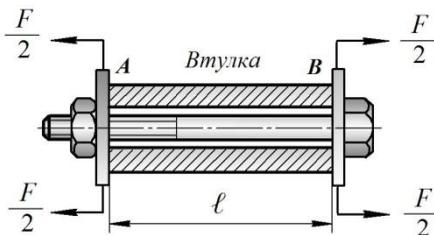


Рис. 3

Вариант 1.

Под действием силы F стыки A и B не раскрываются.

Определим продольные силы во втулке и болте, вызванные действием силы F :

а) Статическая сторона (рис.4):

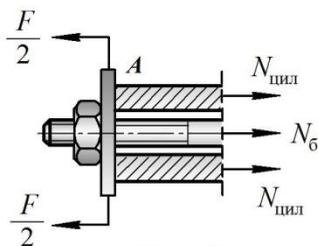


Рис. 4

$$\sum Z = 0: N_{\text{б}} + N_{\text{вт}} = F. \quad (9)$$

б) Геометрическая сторона.

$$\Delta l_{\text{б}} = \Delta l_{\text{вт}}. \quad (10)$$

в) Физическая сторона:

$$\Delta l_{\text{б}} = \frac{N_{\text{б}} l}{E_{\text{б}} A_{\text{б}}}; \quad \Delta l_{\text{вт}} = \frac{N_{\text{вт}} l}{E_{\text{вт}} A_{\text{вт}}}. \quad (11)$$

Подставляем (11) в (10) и совместно с (9) получаем:

$$\frac{N_{\text{б}} l}{E_{\text{б}} A_{\text{б}}} = \frac{N_{\text{вт}} l}{E_{\text{вт}} A_{\text{вт}}} \rightarrow N_{\text{вт}} = k N_{\text{б}}, \quad \text{где } k = \frac{E_{\text{вт}} A_{\text{вт}}}{E_{\text{б}} A_{\text{б}}}.$$

Отсюда:
$$N_{\text{б}} = \frac{F}{1+k}; \quad N_{\text{вт}} = \frac{kF}{1+k}. \quad (12)$$

Полные продольные усилия во втулке и болте с учетом затяжки болта F_0 , вызывающей его растяжения и сжатие втулки, равны:

$$N_{\text{б (полн)}} = N_{\text{б}} + F_0 = \frac{F}{1+k} + F_0; \quad (13)$$

$$N_{\text{вт (полн)}} = N_{\text{вт}} - F_0 = \frac{kF}{1+k} - F_0. \quad (14)$$

Напряжения на элементах соответственно равны:

$$\sigma_{\text{б}} = \frac{N_{\text{б (полн)}}}{A_{\text{б}}}; \quad \sigma_{\text{вт}} = \frac{N_{\text{вт (полн)}}}{A_{\text{вт}}}. \quad (15)$$

Вариант 2.

Стыки А и В раскрываются.

Определим внешнюю силу F^* , которая приводит к раскрытию стыков. Условием раскрытия стыка является $N_{\text{вт (полн)}} = 0$, так как в этом случае нагрузка с втулки сбрасывается и она не испытывает больше сжатия, создаваемого силой затяжки болта при закрытых стыках. Тогда на основании выражений (14) имеем:

$$N_{\text{вт (полн)}} = N_{\text{вт}} - F_0 = \frac{kF^*}{1+k} - F_0 = 0 \rightarrow$$

$$F^* = \frac{F_0(1+k)}{k}. \quad (16)$$

С момента раскрытия стыков внешняя нагрузка полностью передается на болт и продольная сила в нем на основании (13) и (16) будет определена как:

$$N_{\text{б (полн)}} = N_{\text{б}} + F_0 = \frac{F^*}{1+k} + F_0 = \frac{F_0(1+k)}{k(1+k)} = F^*, \quad (17)$$

т.е. она становится равной внешней растягивающей силе .

Напряжения в болте при раскрытии стыков равны:

$$\sigma_{\text{б}} = \frac{N_{\text{б (полн)}}}{A_{\text{б}}} = \frac{F^*}{A_{\text{б}}}. \quad (18)$$

Проанализируем полученные результаты.

Предположим, болтовое соединение работает на растяжение и подвергается действию основной внешней силы F . Пока стыки соединения не раскрываются, болт испытывает внутренне растягивающее усилие, равное на основании (13):

$$N_{\text{б (полн)}} = N_{\text{б}} + F_0 = mF + F_0,$$

где $m = 1/1+k$ – коэффициент основной нагрузки, зависящий от соотношения жесткостей промежуточных втулок и стержня болта. Так как $m < 1$, следовательно, предварительная затяжка в болтовых соединениях позволяет снизить воздействие дополнительной внешней нагрузки на болт, поскольку болт в этом случае воспринимает только часть этой силы – mF , а не всю силу целиком. При этом, чем более высокой жесткостью обладает втулка, тем меньше будет коэффициент m и тем меньшая доля внешней нагрузки придется на болт. Поэтому, чтобы усилие при приложении внешней (основной) нагрузки возрастало незначительно, т.е. для уменьшения коэффициента m , надо делать «**жесткие фланцы – податливые болты**». Это основное правило конструирования болтовых соединений. Для случая абсолютно жесткой втулки коэффициент $m = 0$ и усилие в

болте всегда будет равно силе затяжки болта F_0 (до раскрытия стыков) при любой внешней растягивающей силе F .

Как только стыки раскрываются, продольная сила во втулке становится равной нулю, откуда можно определить F^* – силу, приводящую к раскрытию стыков. С этого момента вся нагрузка полностью ложится на болт $N_6 = F \geq F^*$.

Таким образом, пока внешняя сила F не достигла F^* , она воспринимается болтом не полной своей величиной, а частично – $N_6 = mF + F_0$. После раскрытия стыка внешняя сила $F \geq F^*$ полностью передается на болт. Это очень важно знать для болтовых соединений, особенно, работающих в условиях переменных нагрузок. Поэтому принимаются специальные меры для предотвращения отворота гаек (контргайки, шайбы и т.п.).

Литература

1. Биргер, И.А. Сопротивление материалов / И.А. Биргер, Р.Р. Мавлютов. – М.: Наука, 1986. – 560 с.
2. Тимошенко, С.П. Сопротивление материалов. Т.1 / С.П. Тимошенко. – М.: Наука, 1965. – 359 с.