



МАЛЬКОВ
Олег Вячеславович
кандидат технических
наук, доцент



ГОЛОВКО
Игорь Михайлович
аспирант
кафедры
«Инструментальная
техника и технологии»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Статические испытания на растяжение наружных резьб, изготовленных резбифрезерованием

О.В. Мальков, И.М. Головко

Исследовано влияние параметров наружной резьбы, резбифрезы и кинематики резбифрезерования на профиль впадины обрабатываемой наружной резьбы. Экспериментальные исследования подтвердили теоретически рассчитанные форму и размеры впадины для резьбы М12.

Проведены сравнительные испытания на статическое растяжение наружных резьб М12, изготовленных точением и резбифрезерованием, которые показали, что форма впадины профиля наружной резьбы не оказывает влияния на ее статическую прочность.

Ключевые слова: резбифрезерование, наружная резьба, статические испытания на растяжение, профиль резьбы.

In this scientific work, influence of external thread data, thread mill data and threadmilling cinematics was investigated at the profile of the machined external thread. Experimental investigation confirmed theoretical calculated profile and sizes of thread hollow with external thread M12.

Also, threads M12 machined by turning and threadmilling were tested with static straining load. This test showed that profile hollow of external thread don't have influence at the static strength of thread.

Keyword: thread milling, external thread, static tests on tension, thread profile.

В настоящее время существует тенденция увеличения доли резбифрезерования среди других способов нарезания резьб. Однако литературный обзор показал [1, 2], что сведения об эксплуатационных характеристиках резьб, полученных резбифрезерованием, ограничены. Кроме этого, проведенные исследования свидетельствуют о различной геометрической форме впадины резьбы, обработанной резбовым резцом и резбовой фрезой из-за наличия ряда факторов, указанных ниже [3, 4]. Поэтому целью данной работы является изучение влияния формы и параметров впадины наружной резьбы на ее статическую прочность.

Для исследования влияния формы дна впадины резьбы на статические испытания на растяжение сравнивалась сила при разрыве образцов резьбы М12—6g, полученных точением и резбифрезерованием. Для проведения испытаний были изготовлены 20 образцов ($d_1 = 9,55$ мм, $P = 1,75$ мм) из стали 45 (ГОСТ 1050—88), на десяти из которых резьба получена фрезерованием, на остальных — точением. Основные геометрические и конструктивные параметры образцов представлены на рис. 1.

Опишем профиль впадины наружной резьбы, получаемый при обработке резбовой фрезой внешнего касания. Схема фрезерования на-

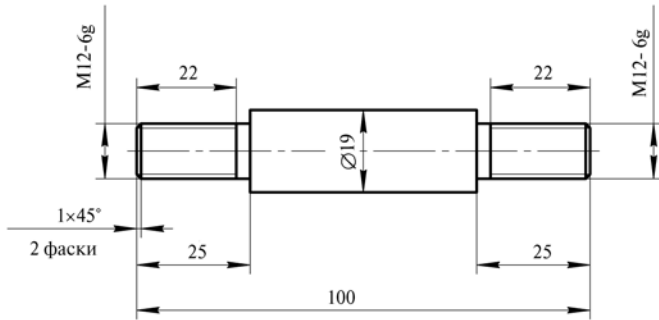


Рис. 1. Образец для проведения испытаний

ружной резьбы одним резьбовым кольцом ин-

струмента представлена на рис. 2. Профили резьбы и инструмента изображены в виде треугольника с теоретически острой вершиной и углом профиля $\beta = 60^\circ$.

Введем систему координат $X_p Y_p Z_p$ с центром в точки O_p на оси резьбы. В процессе работы инструмент диаметром $D_{фр}$ совершает главное движение резания D_r , планетарное вращение $D_{s\text{ окр}}$ вокруг точки O_p по окружности радиуса, равного e , и осевое перемещение $D_{s\text{ прод}}$, которое можно оценить на развертке резьбы, представленной на правой проекции.

Рассмотрим процесс формирования сечения $A-A$, в котором резьба сформирована полностью и которое образуется последовательными

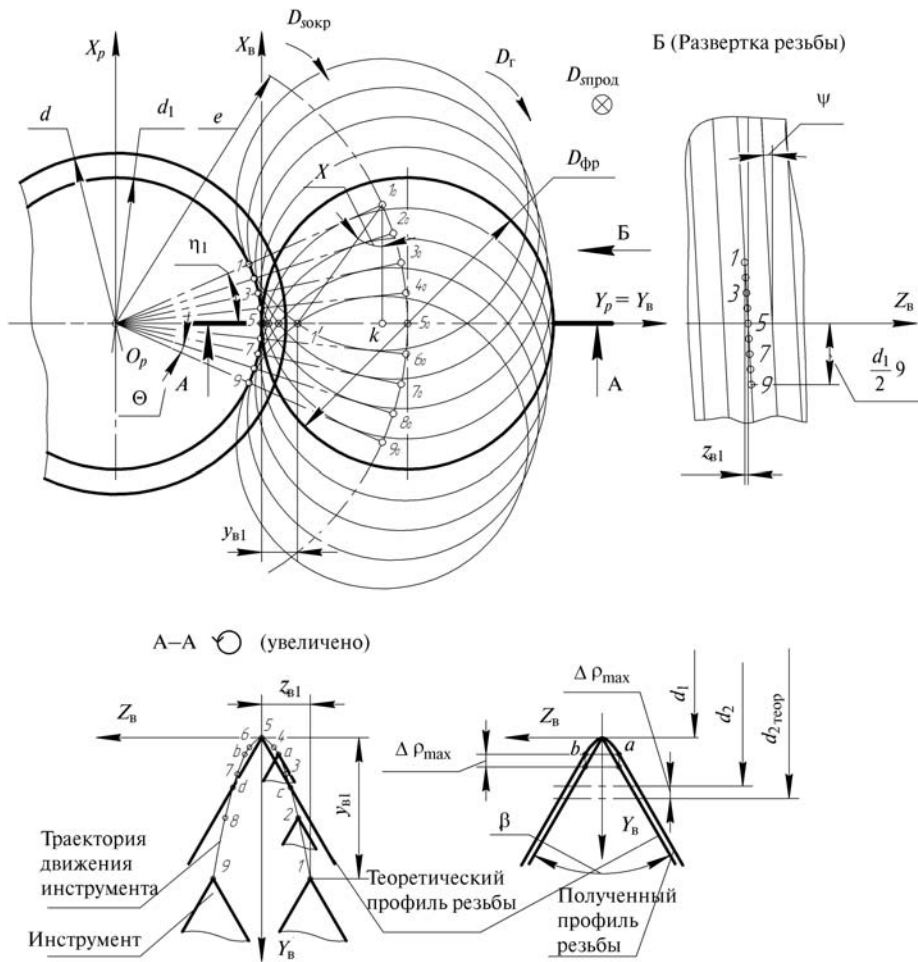


Рис. 2. Схема формирования профиля наружной резьбы резьбовой фрезой внешнего касания:

1–9 — точки, обозначающие положение инструмента, через которые проходят осевые сечения (сечения через оси резьбы и инструмента); $I_0 - I_9$ — точки, обозначающие положение центра вращения инструмента; Θ — угол между соседними положениями инструмента; η_i — угол между сечением $A-A$ и i -м положением инструмента ($\eta_i = m\Theta$, где m — целое число, определяющее количество положений инструмента от положения инструмента в сечении $A-A$), на рисунке представлен углом η_1 ; ψ — угол подъема резьбы

положениями инструмента 1–9 (см. рис. 2). Для этого введем систему координат $X_B Y_B Z_B$ с началом в вершине формируемого профиля резьбы, причем $Y_p = Y_B$. В положении 1 резбовая фреза еще не проходит через рассматриваемое сечение $A-A$. В положениях 2–8 инструмент формирует резбовой профиль, а в положении 9 инструмент уже вышел из него. Координаты y_{vi} и z_{vi} (на рисунке представлены координатами точки l) определяются на соответствующих проекциях и являются точками кривой движения вершины зуба инструмента во впадине резьбы относительно теоретического профиля резьбы. На рисунке видно, что изменение координаты Z_B линейно, поскольку она является функцией шага нарезаемой резьбы (движение подачи вдоль оси резьбы), а изменение координаты Y_B нелинейно, так как она описывает два движения (движения окружной и осевой подачи). Получается сложная, симметричная относительно оси Y_B , кривая, пересекающая теоретический профиль резьбы в некоторых точках c и d . Кривая также имеет две симметричные точки a и b , которые максимально удалены от теоретического профиля резьбы. Очевидно, что зуб формирует окончательный профиль именно тогда, когда его вершина находится в точках a и b . Таким образом, мы получили графически «разбитый» профиль резьбы с уменьшенным на величину $2\Delta\rho_{\max}$ средним диаметром.

Опишем полученную проекцию траектории движения вершины зуба инструмента (см. рис. 2). Каждая точка кривой в сечении $A-A$ определяется координатами y_{vi} и z_{vi} .

Рассмотрим геометрическое нахождение координаты y_{vi} .

Из $\Delta O_p l_0 k$:

$$\overline{l_0 k} = e \sin \eta_1,$$

где

$$e = (D_{\text{фр}} + d_1) / 2 = [D_{\text{фр}} + (d - 2h)] / 2, \text{ мм}; \quad (1)$$

$D_{\text{фр}}$ — диаметр резбовой фрезы по вершинам режущих зубьев, мм; d — номинальный диаметр резьбы, мм; $d_1 = d - 2h$ — внутренний диаметр резьбы, мм; $h = 0,866P$ — высота резбового профиля, мм; P — шаг резьбы, мм.

Из $\Delta l' l_0 k$:

$$\begin{aligned} \cos \chi &= \frac{\overline{l_0 k}}{D_{\text{фр}} / 2} = \frac{e \sin \eta_1}{D_{\text{фр}} / 2}, \\ \overline{k l'} &= \sin \left[\arccos \left(\frac{e \sin \eta_1}{D_{\text{фр}} / 2} \right) \right] \frac{D_{\text{фр}}}{2}; \\ \overline{5 l'} = y_{v1} &= (e \cos \eta_1 - d_1 / 2) - \overline{k l'} = \\ &= e \cos \eta_1 - d_1 / 2 - \\ &- \sin \left[\arccos \left(\frac{e \sin \eta_1}{D_{\text{фр}} / 2} \right) \right] \frac{D_{\text{фр}}}{2}; \\ y_{vi} &= e \cos |\eta_i| - d_1 / 2 - \\ &- \frac{D_{\text{фр}}}{2} \sin \left[\arccos \left(\frac{e \sin |\eta_i|}{D_{\text{фр}} / 2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

Проекция траектории движения вершины зуба инструмента с учетом выражений (1) и (2) описывается системой:

$$\begin{cases} y_{vi} = \left[\frac{D_{\text{фр}} + d - 1,732P}{2} \right] \cos |\eta_i| - \\ - \frac{d - 1,732P}{2} - \frac{D_{\text{фр}}}{2} \times \\ \times \sin \left[\arccos \left(\frac{(D_{\text{фр}} + d - 1,732P) \sin |\eta_i|}{D_{\text{фр}}} \right) \right]; \\ z_{vi} = \frac{\eta_i}{2\pi} P, \end{cases} \quad (3)$$

где η_i — параметр, описывающий угол между сечением $A-A$ и i -м положением инструмента (см. рис. 2).

Функция, описывающая теоретический профиль резьбы в координатах $Y_B Z_B$:

$$y_{pi} = \frac{\eta_i P}{2\pi \text{tg} \frac{\pi}{6}}. \quad (4)$$

Геометрическую погрешность профиля резьбы $\Delta\rho_i$ будем оценивать по формуле

$$\Delta\rho_i = y_{pi} - y_{vi}. \quad (5)$$

Для определения положения точки b необходимо найти значение параметра η_{\max} , при котором функция геометрической погрешности

профиля резьбы $\Delta\rho_i$ принимает максимальное положительное значение $\Delta\rho_{\max}$.

После подстановки значения параметра η_{\max} в систему (3) получим координаты точки b в системе координат $Y_B Z_B$, а также определим местоположение точки a , которое симметрично точке b относительно оси Y_B .

Построим профиль дна впадины резьбы (рис. 3) образцов (см. рис. 1), обработанных резьбовой фрезой с $D_{\text{фр}} = 17,7$ мм. Для принятых исходных данных в результате расчета получим: $\eta_{\max} = 3,724$ град, $\Delta\rho_{\max} = 0,016$ мм.

На рис. 3 показан профиль впадины резьбы (поз. 2), рассчитанный по формулам (3), (4), (5), в котором участок bOa — часть траектории (3) между точками a и b (см. рис. 2), а левая и правая стороны — параллельны боковым сторонам теоретического профиля резьбы (поз. 1), что является допущением в расчетах, поскольку боковые стороны резьбы получены в результате огибания инструментальным профилем, вращающимся вокруг оси, не совпадающей с осью резьбы. Для левой и правой сторон впадины выполнена аппроксимация полученной кривой двумя симметричными дугами окружностей.

Для принятой резьбы и резьбовой фрезы после аппроксимации получен радиус $R0,024$.

При изготовлении образцов (см. рис. 1) резьбофрезерованием использована сборная резьбовая фреза с твердосплавным корпусом 327—16B32EC-09 и однорезцовой монопластиной 327R09—18 250VM-ТН фирмы Sandvik Coromant. С учетом того, что профиль вершины зуба пластины резьбовой фрезы представляет собой плоскую площадку шириной 0,167 мм, профиль дна впадины с учетом расчетного значения радиуса округления $R0,024$ (рис. 3) должен выглядеть, как показано на рис. 4.

Для подтверждения построенного профиля дна впадины был изготовлен шлиф резьбы, обработанной фрезерованием, в осевой плоскости и сделаны фотографии впадин при помощи микроскопа ПМТ-3 (рис. 5).

Измерения по пяти профилям резьбы показали, что среднее значение плоской части впадины составляет 0,165 мм, а среднее значение

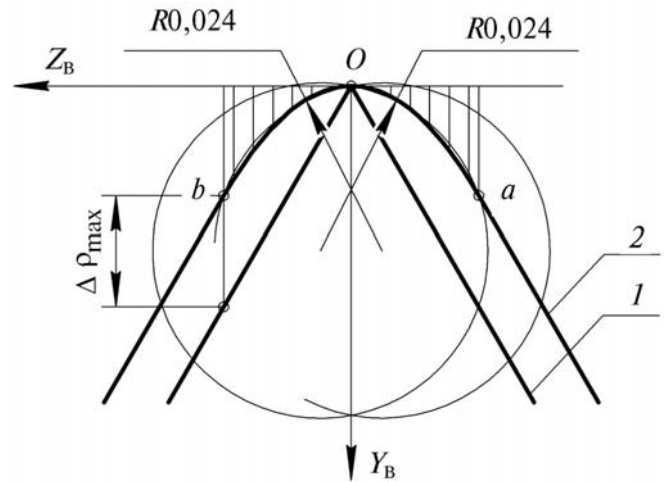


Рис. 3. Аналитически построенный профиль дна впадины наружной резьбы М12 ($d_1=9,55$ мм; $P=1,75$ мм), обработанной резьбовой фрезой с $D_{\text{фр}}=17,7$ мм при условии теоретически острой вершины зуба

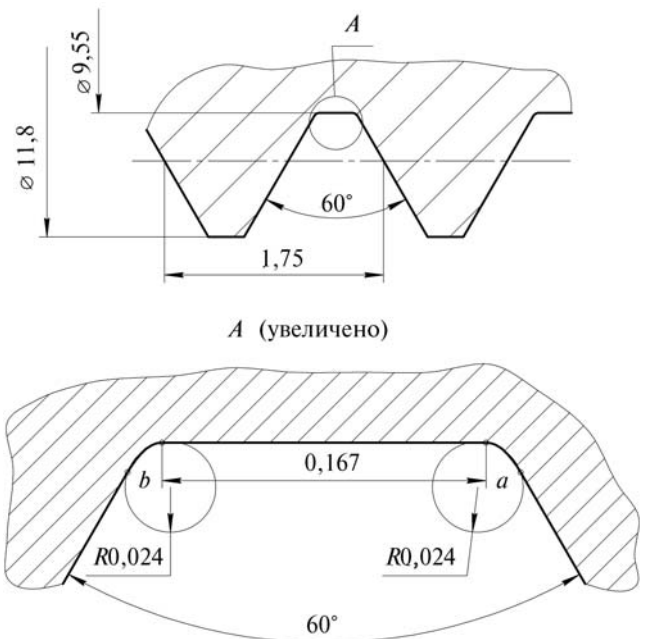


Рис. 4. Профиль дна впадины наружной резьбы М12 ($d_1=9,55$ мм; $P=1,75$ мм), обработанной резьбовой фрезой с $D_{\text{фр}}=17,7$ мм

аппроксимирующего радиуса — 0,028 мм, что подтверждает теоретические исследования.

Резьбофрезерование, также как и точение, выполнялось на токарно-фрезерном обрабатывающем центре с ЧПУ Mazak Integrex 200-IV со следующими параметрами режима обработки: скорость резания $V = 180$ м/мин; частота вращения резьбовой фрезы $n = 3\ 240$ об/мин; подача на зуб $S_z = 0,04$ мм/зуб; СОТС — 7%-ный

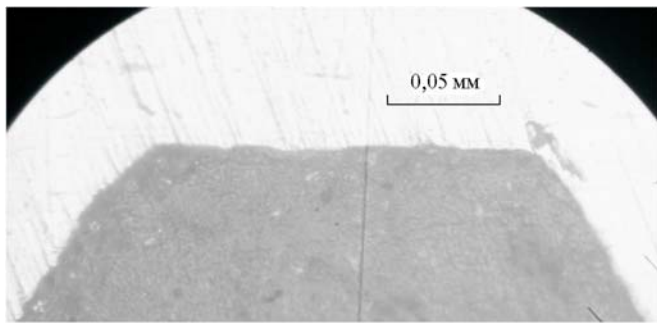


Рис. 5. Фотография профиля дна впадины наружной резьбы М12, обработанной резьбовой фрезой

раствор синтетической охлаждающей жидкости Cimtech 400MSL; фрезерование — попутное.

При обработке резьбы точением использовалась резьбовая пластина неполного профиля 266RG-16VM01A001M 1125 и корпус резца С4-266RFG-27050-16 фирмы Sandvik Coromant. Данная резьбовая пластина имеет при вершине радиус 0,13 мм, соответственно, полученный резьбовой профиль выглядит, как показано на рис. 6. Точение проводилось со следующими параметрами режима обработки: скорость резания $V = 180$ м/мин; число проходов — 12; СОТС — 7%-ный раствор синтетической охлаждающей жидкости Cimtech 400MSL.

Для резьбы, полученной точением, аналогично фрезерованной резьбе, был изготовлен шлиф в осевой плоскости, представленный на рис. 7. По пяти впадинам было определено среднее значение радиуса при вершине — 0,13 мм.

При изготовлении образцов необходимо было учесть, что опасным сечением при разрыве является сечение по внутреннему диаметру резьбы d_1 , поэтому была обеспечена принадлежность средних значений выборок, обработанных точением и фрезерованием, одной генеральной совокупности (по критерию Стьюдента): $t_{расч} = 1,788 < t_{табл} = 2,10$ (число степеней свободы $k = 18$, $P = 95\%$) [5].

Проверка калибром наружной резьбы показала ее соответствие принятой степени точности. Измерение значений диаметров d и d_1 проводилось на универсальном микроскопе УИМ-23.

В таблице представлен протокол проведения испытания. Буква «Т» в обозначении образца

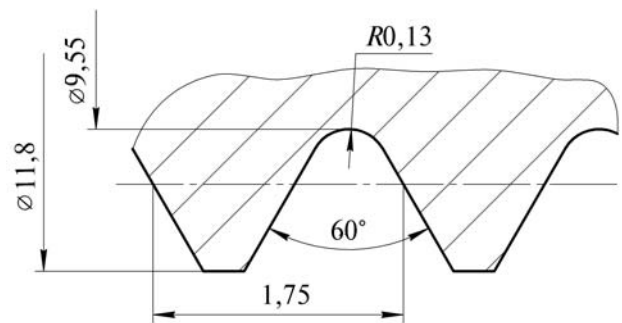


Рис. 6. Профиль резьбы М12, обработанный точением

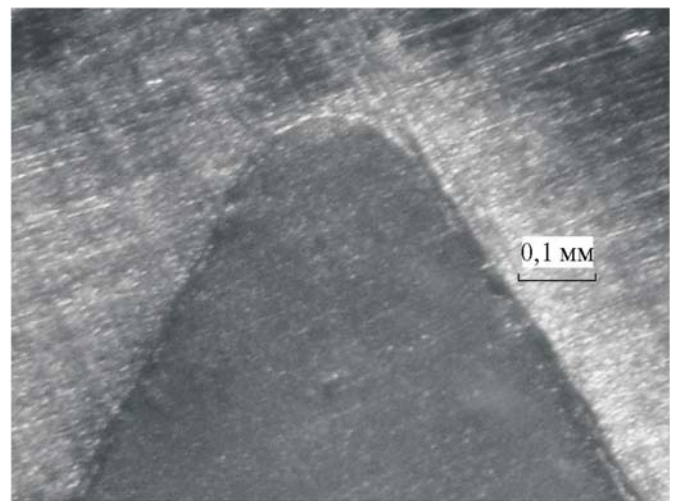


Рис. 7. Фотография профиля дна впадины наружной резьбы М12, обработанной точением

обозначает, что резьба на образце получена точением, буква «Ф» — фрезерованием.

Во время испытания фиксировалась сила F , при которой происходил разрыв образца при его растяжении.

Статические испытания на растяжение образцов проводились на разрывной машине Vebthuringer Industriewerk Rauenstein ZD90 со следующими техническими характеристиками:

- наибольшая предельная сила — 100 кН;
- диапазоны измерения силы: 0...2, 0...4, 0...10, 0...20, 0...40, 0...100 кН; измерение проводилось в диапазоне 0...100 кН с ценой деления 0,5 кН (учитывалась половина деления шкалы — 250 Н);
- максимальная высота рабочего пространства при испытании на растяжение — 1 000 мм.

Схема испытания представлена на рис. 8.

Анализ образцов после испытаний показал, что во всех случаях разрушение происходило со стороны неподвижной губки на последнем пол-

Протокол измерений и испытаний образцов

| Обозначение образца | d_1 , мм | d , мм | F , кН | Обозначение образца | d_1 , мм | d , мм | F , кН |
|---------------------|------------|----------|----------|---------------------|------------|----------|----------|
| 1Т | 9,552 | 11,81 | 67,50 | 1Ф | 9,555 | 11,81 | 67,25 |
| | 9,549 | 11,81 | | | 9,557 | 11,82 | |
| 2Т | 9,544 | 11,82 | 66,75 | 2Ф | 9,561 | 11,82 | 67,50 |
| | 9,544 | 11,81 | | | 9,569 | 11,82 | |
| 3Т | 9,546 | 11,81 | 66,25 | 3Ф | 9,541 | 11,81 | 65,00 |
| | 9,555 | 11,82 | | | 9,534 | 11,81 | |
| 4Т | 9,546 | 11,82 | 67,25 | 4Ф | 9,535 | 11,81 | 66,50 |
| | 9,546 | 11,83 | | | 9,537 | 11,82 | |
| 5Т | 9,546 | 11,81 | 68,25 | 5Ф | 9,555 | 11,82 | 66,25 |
| | 9,548 | 11,82 | | | 9,536 | 11,81 | |
| 6Т | 9,551 | 11,81 | 67,25 | 6Ф | 9,565 | 11,82 | 67,00 |
| | 9,544 | 11,81 | | | 9,552 | 11,83 | |
| 7Т | 9,543 | 11,81 | 66,75 | 7Ф | 9,535 | 11,82 | 66,25 |
| | 9,565 | 11,82 | | | 9,546 | 11,81 | |
| 8Т | 9,551 | 11,83 | 68,50 | 8Ф | 9,544 | 11,81 | 66,50 |
| | 9,567 | 11,82 | | | 9,561 | 11,82 | |
| 9Т | 9,552 | 11,81 | 67,75 | 9Ф | 9,562 | 11,82 | 66,50 |
| | 9,546 | 11,82 | | | 9,556 | 11,82 | |
| 10Т | 9,556 | 11,81 | 67,75 | 10Ф | 9,561 | 11,81 | 66,25 |
| | 9,551 | 11,81 | | | 9,562 | 11,81 | |

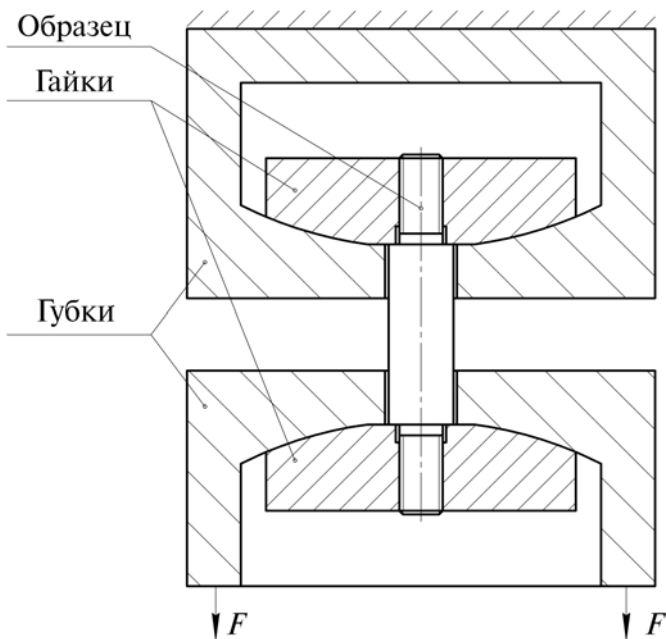


Рис. 8. Схема статического испытания образцов на растяжение

ноценном витке резьбы по наименьшему сечению (диаметр d_1) в плоскости, наклоненной на угол подъема резьбы к оси образца (рис. 9).

Две полученные выборки силы разрушения образцов (таблица, рис. 10) сравнивались по критерию Стьюдента и критерию Фишера. Результаты расчетов показали, что средние значения выборок силы принадлежат одной генеральной совокупности, а между дисперсиями нет различия ($t_{расч}=0,441 < t_{табл} = 2,10$ (число степеней свободы $k=18$, $P=95\%$) [5]; $F_{расч}=1,072 < F_{табл}=3,18$ (числа степеней свободы $k_1 = k_2 = 9$, $P = 95\%$) [5]).

Выводы

1. Проведенные теоретические исследования показали, что форма впадины наружной резьбы при резьбофрезеровании формируется



Рис. 9. Образцы после испытания

с учетом кинематики процесса, в результате чего образуется плоская впадина с двумя огибающими кривыми в местах перехода от плоской впадины к боковым сторонам профиля. Экспериментальные исследования подтвердили теоретически рассчитанные форму и размеры впадины для резьбы М12.

2. Статические испытания на растяжение наружных резьб М12, изготовленных точением и резбифрезерованием показали, что форма впадины профиля наружной резьбы не оказывает влияния на ее статическую прочность.



Рис. 10. Сила разрушения образцов при статических испытаниях на растяжение

Литература

1. Якушев А.И. Влияние технологии изготовления и основных параметров резьбы на прочность резьбовых соединений. М.: Оборонгиз, 1956. 192 с.
2. Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые и фланцевые соединения. М.: Машиностроение, 1990. 368 с.
3. Мальков О.В., Литвиненко А.В. Выбор наружного диаметра резьбовой части сверло-резбифрезы // Вестник МГТУ. Машиностроение. 1997. № 3. С. 78—84.
4. Мальков О.В., Головки И.М. Исследование точности резьбы при охватывающем резбифрезеровании // Наука и образование. Инженерное образование». 2009. № 5. <http://technomag.edu.ru/doc/125657.html>.
5. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высш. шк., 2003. 479 с.

Статья поступила в редакцию 02.11.2011