

УДК 621.822.082

В.М. Липка, магистр*Севастопольский национальный технический университет**Ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053**lipusick10@mail.ru***ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
ДИАМЕТРА ОТВЕРСТИЙ НА КАЧЕСТВО РЕЗЬБЫ, ПОЛУЧАЕМОЙ
РАСКАТЫВАНИЕМ И НАДЕЖНОСТЬ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

Исследуется влияние диаметра отверстия под раскатывание резьбы на качество резьбовых деталей с внутренней резьбой и надежность резьбовых соединений. Экспериментально проверяется точность теоретических формул для расчета диаметров отверстий. Предлагаются рекомендации по выбору геометрических размеров инструментов для обработки отверстий под раскатывание резьбы.

Ключевые слова: резьба, раскатывание резьбы, резьбовое соединение, автоматизированная сборка, посадка.

Надежность изделий машиностроения, в том числе двигателей и агрегатов трансмиссий автомобилей, в значительной мере зависит от качества деталей с наружной и внутренней резьбой, образующих резьбовые соединения (РС). Факторы, влияющие на качество наружных резьб, получаемых в крупносерийном и массовом производстве накатыванием, рассмотрены, в частности, в [1,2] и других работах. В [2] отмечен ряд преимуществ получения внутренних резьб М6...М16 раскатыванием, особенно в корпусных деталях из чугуна и алюминиевых сплавов, в частности, в блоках цилиндров двигателей, головках блока цилиндров, корпусах коробок передач. Экспериментальные исследования надежности РС и прочности деталей с резьбой, выполненные в г. Мелитополе на хозяйственном предприятии «Мелитопольский моторный завод», показали, что детали с внутренними резьбами, полученными раскатыванием, при прочих равных условиях допускают приложение на 15-25 % больших осевых усилий, чем изготовленные нарезанием метчиками. В 2011-2012 гг. в Севастопольском национальном техническом университете Харченко А.О. с соавторами, для получения резьб М3...М6 в алюминиевых сплавах предложили и испытали высокоэффективные режущие-деформирующие метчики новой конструкции, устраняющей наростообразование в процессе резбонарезания. Вместе с тем получение высококачественных внутренних резьб М6...М16 в корпусных деталях, особенно в условиях крупносерийного и массового производства, остается актуальной проблемой. Среди факторов, определяющих качество внутренних резьб как при нарезании, так и при раскатывании, одним из важнейших является диаметр отверстия, от которого зависит точность по среднему и внутреннему диаметрам, прочность получаемой резьбы, характер процесса формирования профиля резьбового витка. Следует отметить, что существенное влияние на качество внутренней резьбы и собираемость РС, а затем и на его надежность оказывают также отклонения размеров и формы отверстия, в том числе непрямолинейность его оси, влияние которой резко возрастает по мере увеличения длины свинчивания.

Экспериментальная проверка результатов, полученных по известным эмпирическим формулам для расчета диаметра отверстий под раскатывание, показала, что они во многих практических ситуациях не дают достоверных значений. Для недопущения изготовления бракованных резьб и тем более поломок раскатников, следует рассчитанное значение диаметра отверстия под раскатывание проверять экспериментально, как правило, с учетом действительных геометрических размеров используемого инструмента. Поэтому для более точного определения диаметра отверстий под раскатывание была выведена аналитическая зависимость точности диаметра отверстия под раскатывание от аналогичного параметра раскатываемой резьбы и размеров раскатника [2]. Рассмотрим подробнее её вывод и проверим экспериментально достоверность получаемых значений. При построении аналитической зависимости были сделаны следующие допущения:

1. При раскатывании резьбы происходит пластическая деформация металла, до и после которой его объем с достаточной точностью можно считать постоянным.

2. Выпучиванием, возникающим из-за продольного вытеснения металла на выходе и входе отверстия при раскатывании, пренебрегаем ввиду его малой величины.

3. Объем витка резьбы с достаточной точностью считаем равным объему кольца, сечение которого соответствует по форме и размерам профилю резьбы.

На рисунке 1 показан элемент объема витка резьбы $ABCD$, ограниченный двумя осевыми сечениями AO и BO , развернутыми относительно оси O на угол $d\beta$, где $d\beta \rightarrow 0$. Фигура $abcd$ —

бесконечно тонкая элементарная полость сечения $ABCD$, толщина которой равна $d\rho$, где ρ — текущий радиус, изменяющийся от $d_1/2$ до $d_0/2$.

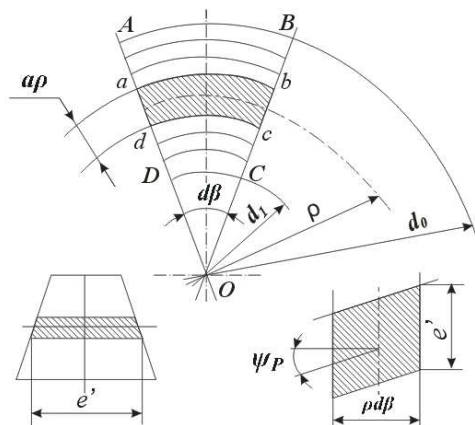


Рисунок 1 – Элемент объема витка резьбы

В основании полоска $abcd$ имеет параллелограмм длиной e' и высотой $\rho d\beta$, где e' — функция от ρ . Вторая сторона параллелограмма наклонена к высоте под углом наклона винтовой линии ψ_ρ . Объем полоски $abcd$ равен произведению площади основания на высоту: $dV = e' \rho d\beta d\rho$, а объем элемента $ABCD$ [2]:

$$\int_{\frac{d_1}{2}}^{\frac{d_0}{2}} dV_n = \int_{\frac{d_1}{2}}^{\frac{d_0}{2}} e' \rho d\beta d\rho = d\beta \int_{\frac{d_1}{2}}^{\frac{d_0}{2}} e' \rho d\rho. \quad (1)$$

Полный объем V_1 одного витка резьбы

$$V_1 = \int_0^{2\pi} \left[\int_{\frac{d_1}{2}}^{\frac{d_0}{2}} e' \rho \beta \rho d\rho \right] d\beta, \quad (2)$$

где $\int_{\frac{d_1}{2}}^{\frac{d_0}{2}} e' \rho \beta \rho d\rho$ — сумма произведений элементарных площадок $e' d\rho$ на их расстояние ρ до оси.

Согласно правилам механики эта сумма равна произведению всей площади на расстояние от ее центра тяжести до оси:

$$\int_{\frac{d_1}{2}}^{\frac{d_0}{2}} e' \rho \beta \rho d\rho = F_c r_c, \quad (3)$$

где F_c — площадь сечения профиля резьбы; r_c — расстояние от оси до центра тяжести сечения профиля.

Тогда

$$V_1 = \int_0^{2\pi} F_c r_c d\beta = 2\pi F_c r_c. \quad (4)$$

В рассматриваемом случае $2\pi F_c r_c$ — объем тела, образованного вращением профиля резьбы вокруг оси [2]. Следовательно, объем витка винтовой линии равен объему кольца, имеющего сечение, равное профилю резьбы и введенное ранее допущение правомерно.

При раскатывании резьбы металл, вытесняемый витками раскатника из участков $abcd$ и $a'b'c'd'$, заполняет участок $defd$, как показано на рисунке 2.

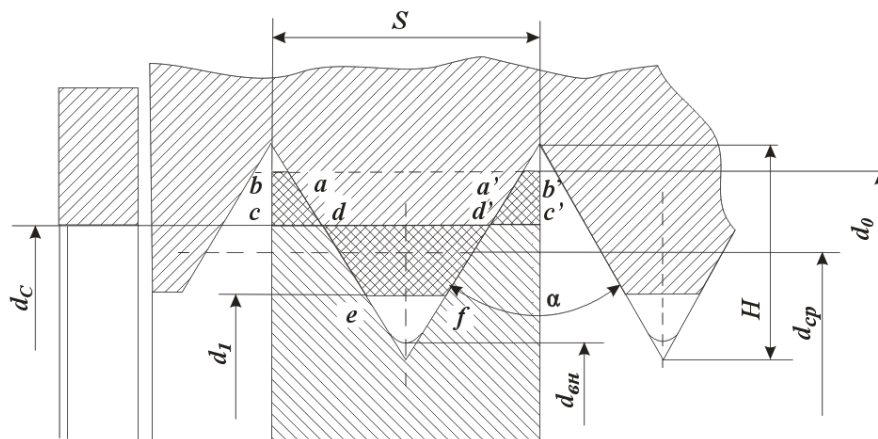


Рисунок 2 – Схема для расчета диаметра отверстия под резьбу

Из условия сохранения постоянства объемов при пластических деформациях объем кольца диаметром d_c и толщиной S равен объему диаметром d_0 и толщиной S за вычетом объема тела V_Δ , образованного вращением трапеции $aa'ef$, то есть

$$V_{d_c} = V_{d_0} - V_\Delta, \text{ где } V_{d_c} = \frac{\pi d_c^2}{4} S; \quad V_{d_0} = \frac{\pi d_0^2}{4} S. \quad (5)$$

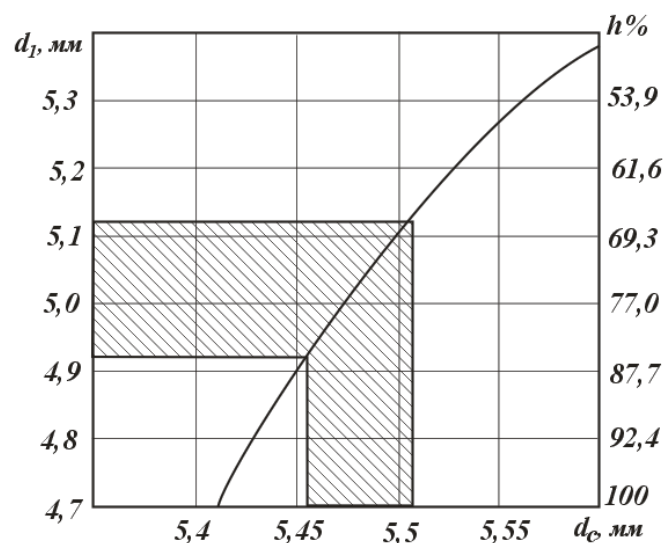
Если развернуть фигуру, образованную вращением трапеции $aa'ef$, то она представляет собой геометрическую фигуру, называемую «обелиск». Сторонами большого основания обелиска является aa' и πd_0 , меньшего — ef и $\pi d'$. Для определения объема обелиска V_Δ получена следующая формула:

$$V_\Delta = \frac{\pi d_0^2 S}{8} + \frac{\pi d_0^3}{6 \tan \alpha} - \frac{\pi d_0^2 d_{cp}}{4 \tan \alpha} - \frac{\pi d_1^2 S}{8} + \frac{\pi d_1^2 d_{cp}}{4 \tan \alpha} - \frac{\pi d_1^3}{6 \tan \alpha}. \quad (6)$$

Подставляя значения V_{d_c} , V_{d_0} и V_Δ в формуле (5) и произведя преобразования, получим выражение для расчета диаметра отверстия под метрическую резьбу с углом профиля 60° :

$$d_c = \sqrt{d_0^2 \left(0,5 - \frac{0,3849 d_0}{S} + \frac{0,57735 d_{cp}}{S} \right) + d_1^2 \left(0,5 + \frac{0,3849 d_1}{S} - \frac{0,57735 d_{cp}}{S} \right)}. \quad (7)$$

Учитывая, что допуски на параметры раскатника, входящие в уравнение (7), имеют малую величину, диаметр отверстия под резьбу главным образом зависит от допуска на внутренний диаметр резьбы. На рисунке 3 представлена зависимость диаметра отверстий под резьбу от внутреннего диаметра резьбы $M6$, рассчитанная по формуле (7) для $d_{cp} = 5,41 \text{ мм}$ и $d_0 = 6,1 \text{ мм}$.


 Рисунок 3 – Расчетная зависимость высоты профиля резьбы h от диаметра отверстия под резьбу d_c

Согласно графику, для получения внутреннего диаметра $d_1 = 4,918 \div 5,118 \text{ мм}$ для М6 по ГОСТ 9150—81 отверстие под накатывание резьбы следует выполнять в пределах 5,46—5,51 мм (на графике заштриховано). Разница между предельными значениями диаметра d_c равна 0,06 мм, что составляет примерно $\frac{1}{4}$ допуска на внутренний диаметр резьбы по ГОСТ 16093—81, то есть $e/4$. В этом случае высота витка резьбы гайки находится в пределах 83,3—68% от теоретической, что соответствует требованиям ГОСТ 16093—81. Надежность РС, как показали эксперименты, непосредственно зависит от высоты витка резьбы как гайки, так и болта и при знакопеременных осевых и радиальных нагрузках вероятность раскрытия стыка существенно возрастает, если резьбовые детали изготовлены с неполным профилем.

Экспериментальная проверка значений, полученных по формуле (7), в том числе приведенных в [2], проводилась путем измерения фактического внутреннего диаметра в диапазоне диаметров от М6 до М16, шагов от 0,5 до 1,5 для 1...3 классов точности резьбы в деталях из различных материалов.

В ходе эксперимента установлено, что раскатывание резьбы в образцах из стали 30, стали 20 и других менее пластичных материалов возможно только до диаметра $d_c = 5,45 \text{ мм}$; дальнейшее уменьшение диаметра приводило к поломке раскатников. Раскатывать резьбы в деталях из указанных сталей можно только по принципу открытого контура, то есть когда внутренний диаметр раскатника не участвует в формировании внутреннего диаметра раскатываемой резьбы. В этом случае неизбежно наличие складки на внутреннем диаметре раскатываемой резьбы в пределах допуска. Образование складки связано с более интенсивным течением металла в зоне контакта раскатываемого металла с боковыми сторонами витков раскатника. Форма складки изменяется с изменением диаметра отверстия под раскатывание. При больших диаметрах она вытянута в плоскости продольной оси резьбы, при меньших – в поперечной.

Анализ результатов экспериментов показал, что допуск по диаметру отверстия под раскатывание при получении резьбы в деталях из сталей 30, 20 и других менее пластичных материалов рекомендуется определить по следующей зависимости:

$$\delta_{c.o} = \frac{1}{4} e. \quad (8)$$

При получении резьбы раскатником с внутренним диаметром, меньшим внутреннего диаметра резьбы, наблюдалось течение металла ниже наименьшего внутреннего диаметра гайки, что не обеспечивало 100%-ное свинчивание сопрягаемых деталей. В условиях крупносерийного и массового производства, невозможность свинчивания приводит к необходимости остановки процесса автоматизированной сборки, неизбежному браку и материальным потерям. Для обеспечения 100%-ного свинчивания внутренний диаметр раскатника следует выполнять равным минимальному внутреннему диаметру гайки по ГОСТ 9150—81.

В таблице 1 приведены результаты для диапазона внутренних диаметров от 5,35 до 5,6 мм при накатывании резьбы М6 в деталях из различных материалов с $d_c = 5,6 \div 5,3 \text{ мм}$ раскатником с фактическими $d_0 = 6,1 \text{ мм}$ и $d_{cp} = 5,41 \text{ мм}$ и с $d_{вн} = 5,075 \text{ мм}$, находящимися, вблизи середины стандартного допуска на внутренний диаметр резьбы.

Таблица 1 — Результаты изменения внутренних диаметров

Материал	Диаметр отверстия под раскатывание в мм											
	5,6		5,55		5,5		5,45		5,4		5,35	
	d_1	d'_1	d_1	d'_1	d_1	d'_1	d_1	d'_1	d_1	d'_1	d_1	d'_1
Сталь 30	5,29	5,381	5,123	5,28	5,076	5,1	Поломка раскатника					
Сталь 20	5,25	5,417	5,115	5,27	5,074	5,1	Поломка раскатника					
Сталь 10	5,22	5,42	5,110	5,22	5,074	5,09	5,077	5,077	5,077	5,075	5,075	5,075
Сталь 08кп	5,25	5,39	5,115	5,22	5,074	5,1	5,075	5,075	5,075	5,075	5,075	5,075
Алюминиевый сплав АЛ9	5,26	5,39	5,115	5,23	5,075	5,1	5,079	5,079	5,075	5,075	5,075	5,075
Алюминиевый сплав Д1	5,26	5,39	5,115	5,22	5,075	5,1	5,077	5,077	5,075	5,075	5,075	5,075
Медь МЗ	5,23	5,412	5,115	5,23	5,074	5,085	5,074	5,074	5,075	5,075	5,075	5,075
Латунь ЛС 59–1	5,26	5,42	5,115	5,24	5,074	5,09	5,075	5,075	5,075	5,075	5,075	5,075

При раскатывании резьбы М6 в образцах из стали 08кп и 10, алюминиевых сплавов АЛ9 и Д1, меди МЗ, латуни ЛС59–1 уменьшение диаметра под раскатывание было доведено до $d_c = 5,35$ мм. Дальнейшее уменьшение диаметра d_c приводит к поломке раскатников.

При изменении отверстия под резьбу от расчетного значения, вычисленного по (7) и равного для принятых условий 5,46 мм, до наименьшего, допустимого прочностью раскатника – 5,35 мм, резьбоформирование происходило по замкнутому контуру. Профиль резьбы гайки соответствовал профилю впадины резьбы раскатника и имел четко выраженную вершину, а уплотнение избыточного металла происходило за счет его пластичности и распределялось на весь объем витка резьбы. Из приведенных выше результатов для принятого диаметра резьбы видно, что величина допустимого уменьшения отверстия составляет 0,11 мм, что соответствует 0,1 шага. Экспериментальная проверка подтверждала правильность приведенного вывода для исследуемого диапазона диаметров и шага.

При повышенных требованиях к резьбе (когда не допускается складка на вершине витка) в указанных материалах резьбу следует производить по принципу замкнутого контура. Допуск на диаметр отверстия под резьбу $\delta_{c,z} \approx 0,1S$. Минимальный диаметр отверстия под резьбу в этом случае:

$$d_{c \min} = d_c - 0,1S, \quad (9)$$

где d_c — расчетный диаметр отверстия под резьбу, полученный по формуле (7) при номинальном значении d_1 .

Если допускается складка по вершине витка, то суммарный допуск может быть расширен и определен по следующей зависимости:

$$\delta_c = \delta_{c.o.} + \delta_{c.z.} = \frac{1}{4}e + 0,1S. \quad (10)$$

Максимальный диаметр отверстия под резьбу

$$d_{c, \max} = d_c + \frac{1}{4}e. \quad (11)$$

Точность расчетов по (9..11) существенно влияет на качество раскатываемых резьб. Результаты исследований сведены в таблицу 2, где приведены теоретически обоснованные и экспериментально проверенные значения диаметров отверстий под накатывание резьбы для открытых и замкнутых контуров в диапазоне М5...М10 и рекомендуемые размеры раскатников для их получения.

Таблица 2— Диаметр отверстий под резьбу и рекомендуемый размер инструмента

Диаметр резьбы	Шаг	Класс точности	Расчетный диаметр отверстия	Открытый контур			Замкнутый контур							
				Диаметр отверстия	Допуск	Диаметр развертки	Диаметр отверстия	Допуск	Диаметр сверла					
M5	0,8	4H5H 6H 7H	4,561 4,576 4,604	4,56 4,50 4,60	+0,050	4,56 4,58 4,60	4,48 4,50 4,52	+0,08	4,50					
M6	1,0	4H5H 6H 7H	5,449 5,466 5,497	5,45 5,47 5,50	+0,050	5,45 5,47 5,50	5,35	+0,10	5,35					
							5,40		5,40					
M8	1,0	4H5H 6H 7H	7,444 7,461 7,492	7,44 7,46 7,49	+0,050	7,45	7,33	+0,12	7,35					
						7,50	7,38		7,40					
						7,32	7,20		7,20					
	1,25	4H5H 6H 7H	7,306 7,325 7,360	7,31 7,32 7,36	+0,052	7,35	7,24		7,25					
						1,0	4H5H 6H 7H		9,444 9,462 9,497	9,44 9,46 9,50	+0,050	9,45 9,50	9,32 9,34 9,38	9,35
												1,25	4H5H 6H 7H	9,302 9,320 9,355
9,35	9,23													
1,5	4H5H 6H 7H	9,163 9,185 9,222	9,16 9,18 9,22	+0,062	9,16 9,18 9,22	8,98 9,00 9,04	+0,18	9,0						

Направление дальнейших исследований связано с созданием средств и методов повышения надежности РС технологическими методами, за счет улучшения качества изготовления резьбовых деталей и совершенствования технологии автоматизированной сборки изделий машиностроения.

Библиографический список использованной литературы

1. Иосилевич Г.Б. Затяжка и стопорение резьбовых соединений: справочник / Г.Б. Иосилевич, Ю.В. Шарловский. — 2-е изд. — М.: Машиностроение, 1985. — 224 с.
2. Раскатывание резьб / Э.В. Рыжов [и др.]. — М.: Машиностроение, 1974. — 122 с.
3. Рапацкий Ю.Л. Исследование влияния параметров резьбовых крепежных деталей на качество сборки изделий машиностроения / Ю.Л. Рапацкий, В.М. Липка // Сборка в машиностроении, приборостроении. — 2010. — № 2. — С. 20–27.

Поступила в редакцию 03.04.2012 г.

Липка В.М. Теоретичне та експериментальне дослідження впливу діаметра отворів на якість різьби, одержуваної розкочуванням та надійність різьбових з'єднань

Досліджується вплив діаметра отвору під розкочування різьби на якість різьбових деталей з внутрішню різьбою і надійність різьбових з'єднань. Експериментально перевіряється точність теоретичних формул для розрахунку діаметрів отворів. Пропонуються рекомендації з вибору геометричних розмірів інструментів для обробки отворів під розкочування різьби

Ключові слова: різьба, розкочування різьби, різьбове з'єднання, автоматизована зборка, посадка.

Lipka V.M. Theoretical and experimental research of the effect on the quality of hole diameter thread and reliability of rolling threaded connections

The influence of the diameter of the holes for thread rolling on the quality of the threaded parts with internal threaded connections and reliability is researched. The accuracy of theoretical formulas for calculating the diameters of the holes is experimentally verified. Offered are the suggestions on choosing the geometrical dimensions of tools to handle holes for thread rolling.

Keywords: thread, thread rolling, fitting, automated assembly, landing.