

НЕРАЗРУШАЮЩИЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ОТКЛОНЕНИЙ ПОЛОВИНЫ УГЛА ПРОФИЛЯ ВНУТРЕННИХ РЕЗЬБ МАЛОГО ДИАМЕТРА

Белорусский национальный технический университет
г. Минск, республика Беларусь

Отклонения шага и половины угла профиля резьбы резьбовых сопряжений понижают их прочность, износостойкость, надежность выбранных посадок и точность превращения вращательного движения в поступательное. Непосредственное измерение половины угла профиля и шага внутренних резьб малого диаметра невозможно. Нет методов непосредственного контроля без разрушения образцов. Даже после разрушения, разрезки образца по осевой плоскости, измерения невозможны из-за наличия заусенцев, натянутых на профиль резьбы во время разрезания. Удалить заусенцы без искажения профиля резьбы в плоскости измерения также невозможно. Непосредственное измерение можно осуществить только на половинах образцов, разрезанных до нарезания резьбы. Такой контроль трудоемкий и применяется только при исследованиях точности различных методов резьбообработки. Необходимо искать косвенные методы оценки ошибок шага и половины угла профиля по результатам измерения других параметров резьбы.

Решить эту задачу оказывается возможным по измерениям собственно среднего диаметра последовательно на каждом витке резьбы с учетом схемы формообразования профиля резьбы в конкретных условиях резьбообработки. Методика оценки ошибок шага резьбы изложена в работе [1], а отклонений половины угла профиля рассматривается ниже.

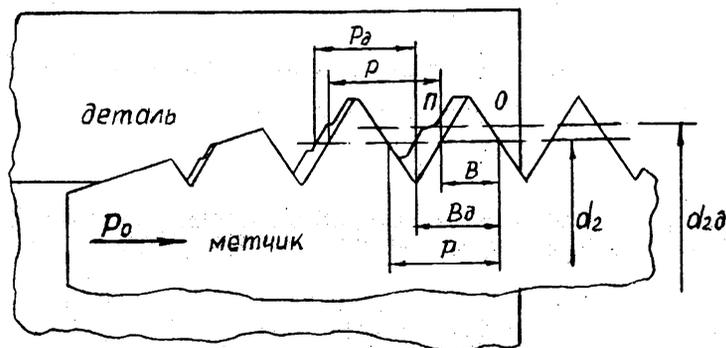
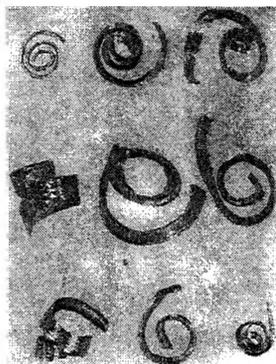


Рисунок 1. Положение метчика в отверстии при нарезании резьбы методом самозатягивания

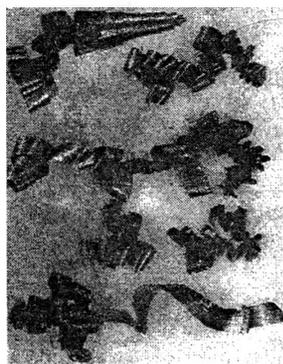
В процессе резьбообработки на метчик воздействуют осевая сила резания и внешняя осевая сила перемещения шпинделя станка при нарезании резьбы методом самозатягивания. На рисунке 1 - сила P_0 . Она выталкивает метчик из нарезаемого отверстия. Метчик сопротивляется, опираясь своими боковыми кромками O на уже образованные поверхности резьбы (Рисунок 1). Эти силы достаточно большие и опорные кромки метчика O внедряются в тело уже образованных витков резьбы и снимают с них дополнительную стружку (Рисунок 2). Противоположные опорные кромки Π метчика отрываются от уже сформированных ими участков профиля, образуя на них ступеньки (Рисунок 1). Впадина нарезаемой резьбы расширяется ($B_d > B$), средний диаметр резьбы увеличивается ($d_{2d} > d_2$), искажается шаг ($P_d < P$) и половина угла профиля по неопорным сторонам.



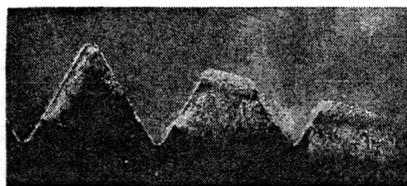
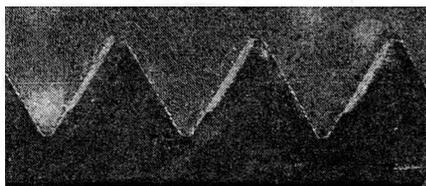
а



б



в



г

Рисунок 2. а. Корни стружек от резания опорными кромками метчика;
 б. Стружка, снимаемая главными режущими кромками метчика;
 в. Стружка, снимаемая боковыми опорными кромками калибрующих зубьев метчика;
 г. Следы схода стружки по передней поверхности метчика

Наступает так называемое разбивание резьбы. По опорным сторонам шаг и половина угла профиля резьбы соответствуют параметрам метчика по опорным кромкам.

По мере продвижения метчика в отверстие удельная осевая сила (сила, отнесенная к единице длины опирающихся кромок метчика) уменьшается. В результате уменьшается подрезание опорных сторон нарезаемой резьбы и разбивание ее размеров. Следует ожидать конусной формы среднего цилиндра резьбы с большим основанием со стороны захода метчика. Однако эксперименты выявляют иную форму среднего цилиндра, корсетную (Рисунок 3).

Метчики типа А затылованы по профилю резьбы на всей ширине пера, а метчики типа Б --- только на $\frac{2}{3}$ ширины пера. Поэтому метчики типа Б опираются на витки резьбы, нарезаемой самозатягиванием, не боковыми режущими кромками, как метчики типа А, а незатылованными площадками небольшого размера. В результате подрезание резьбы под действием осевых сил ограничено. В глубине отверстия (витки 5...11) подрезание под действием осевых сил прекращается и средний цилиндр действительно цилиндр (кривая 2, Рисунок 3).

Отмеченное явление еще более выражено при нарезании резьбы с принудительной осевой подачей по резьбовому копиру, воспринимающему осевую силу на себя и исключаящему разбивание резьбы под действием этой силы. Здесь точная форма среднего цилиндра на длине от 3-го по 10-ый виток. На заходе метчика (витки 1, 2) и на выходе (виток 12) средний диаметр резьбы больше, чем в глубине отверстия (Рисунок 3). Такую форму среднего цилиндра нельзя объяснить воздействием только осевых сил. Анализ причин этой формы позволяет утверждать, что на заходе и выходе метчика увеличение среднего диаметра нарезаемой резьбы вызвано радиальным биением метчика под действием радиальных сил.

Главные режущие кромки на заборном конусе метчика не сплошные, как, например, у свертки, а прерываются канавками, но не кольцевыми, а винтовыми с шагом резьбы. Активная длина главных режущих кромок на разных перьях метчика разная. Поэтому разные радиальные и тангенциальные силы резания. Кроме того, разные силы на разных перьях формируются радиальным биением режущих кромок от заточки метчика, радиальным биением шпинделя станка. Вектор суммы этих сил смещает метчик с оси нарезаемого отверстия. Это смещение на входе и выходе из работы режущей части метчика разное по величине и направлению, так как меняется соотношение длин участвующих в резании режущих кромок на перьях метчика. Метчик совершает радиальные колебания, разбивая резьбу. На выходе радиальные колебания метчика ограничены его зацеплением в отверстии, а на входе ничем не ограничены. Поэтому на входе метчика разбивание нарезаемой резьбы больше (Рисунок 3).

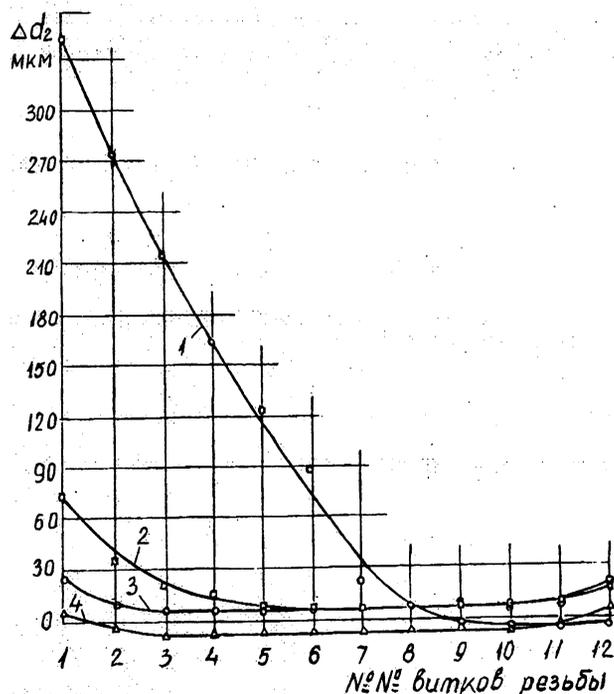


Рисунок 3. Разбивание Δd_2 среднего диаметра d_2 резьбы, нарезанной методом самозатягивания (1,2) и с принудительной осевой подачей по резьбовому копиру (3,4) метчиками типа А (1,3) и типа Б (2,4)

Главные режущие кромки на заборном конусе метчика не сплошные, как, например, у свертки, а прерываются канавками, но не кольцевыми, а винтовыми с шагом резьбы. Активная длина главных режущих кромок на разных перьях метчика разная. Поэтому разные радиальные и тангенциальные силы резания. Кроме того, разные силы на разных перьях формируются радиальным биением режущих кромок от заточки метчика, радиальным биением шпинделя станка. Вектор суммы этих сил смещает метчик с оси нарезаемого отверстия. Это

смещение на входе и выходе из работы режущей части метчика разное по величине и направлению, так как меняется соотношение длин участвующих в резании режущих кромок на перьях метчика. Метчик совершает радиальные колебания, разбивая резьбу. На выходе радиальные колебания метчика ограничены его зацеплением в отверстии, а на входе ничем не ограничены. Поэтому на входе метчика разбивание нарезаемой резьбы больше (Рисунок 3).

Учитывая изложенное, можно построить реальную схему резания конкретным метчиком в конкретных условиях работы и перейти к разработке метода оценки значений отклонений угла профиля нарезанной резьбы.

В условиях выполненных экспериментов использовали четырехперые метчики с активной длиной режущей части, равной трем шагам резьбы. Резьбу нарезали двумя методами: самозатягиванием метчика с постоянным усилием врезания и по резьбовому копиру, обеспечивающему точную осевую подачу метчику: на один шаг за один оборот метчика.

При нарезании резьбы методом самозатягивания осевые силы постоянно поджимали метчик к опорным сторонам O резьбы (см. Рисунок 1) и он свои размеры зеркально отражал на этих сторонах, а от сформированных участков профиля противоположных сторон Π метчик постоянно отходил, образуя на этих сторонах ступеньки. Это значит, что за оборот метчик перемещался в осевом направлении меньше, чем на шаг. Такое отставание, как указывалось ранее, по мере продвижения метчика в отверстие постоянно уменьшалось. Попробуем последовательно, за каждый оборот метчика оценить на какую величину уширится каждая впадина нарезаемой резьбы или, что равнозначно, уменьшится перемещение метчика по шагу. Для наглядности результаты оценки сведем в таблицу.

За первый оборот метчик переместится на шаг и его первый, в обход по винтовой линии, режущий зуб подойдет к левой стороне первой впадины резьбы, но профилировать ее еще не будет.

За второй оборот последующие четыре режущих зуба сформируют левую сторону резьбы первой впадины на половине высоты от внутреннего диаметра d_1 , оставив на этом участке четыре ступеньки и отстав по шагу от теоретического положения на величину x (Рисунок 4). Первый режущий зуб метчика за это время подойдет к левой стороне второй впадины.

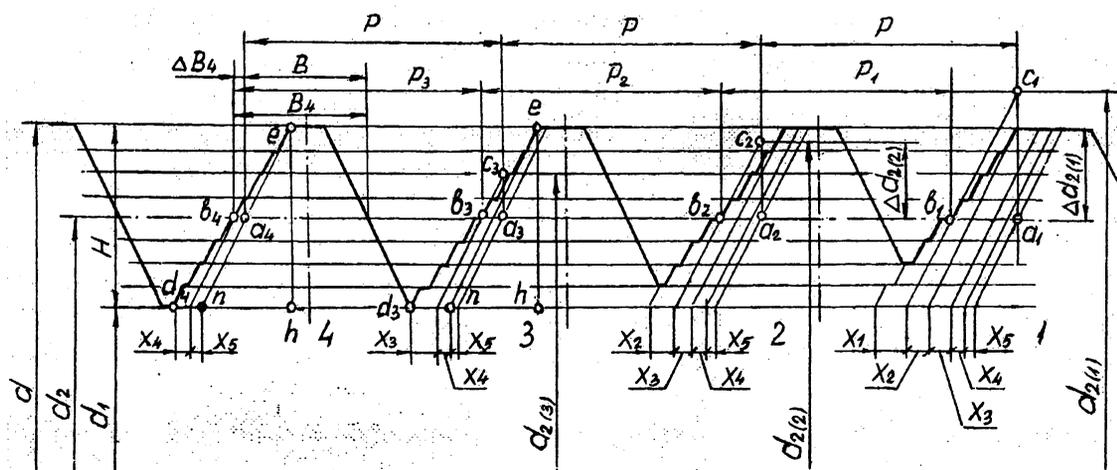


Рисунок 4. Схема образования профиля резьбы под действием осевых сил

За третий оборот левая сторона второй впадины сформируется на 0,5 высоты. Метчик отстанет по шагу на величину x_2 . Первая впадина за это время будет уже полностью сформирована, т.е. будет сформирована вторая по высоте половина левой стороны первой впадины. Ширина первой впадины дополнительно станет больше на x_2 . Первый режущий зуб метчика подойдет к левой стороне 3-ей впадины резьбы.

За четвертый оборот левая сторона 3-ей впадины сформируется на половине высоты. Метчик отстанет по шагу от заданного законом винтового движения на величину x_3 . Вторая впадина будет полностью сформирована, и дополнительно уширится на x_3 . На эту же величину дополнительно уширится и первая впадина резьбы и т.д. Последовательное уширение впадин за полный цикл формирования резьбы на всей длине (12 витков) приведен в таблице.

Первых два значения x в каждой впадине позволяют оценить отклонение левой половины угла профиля соответствующей впадины нарезанной резьбы (см. Рисунок 4). Их легко вычислить, зная уширения ΔB каждой впадины на уровне среднего диаметра резьбы d_2 . Сопоставляя Рисунок 4 и таблицу видно, что это уширение равно сумме всех x – ов впадины, за исключением первого. В таблице они записаны на сером фоне.

Учитывая изложенное и пользуясь таблицей, можно вычислить сумму двух первых x в каждой впадине резьбы.

$$\begin{aligned} x_2 + x_3 &= \Delta B_1 - \Delta B_3, & x_3 + x_4 &= \Delta B_2 - \Delta B_4, \\ x_4 + x_5 &= \Delta B_3 - \Delta B_5, & x_5 + x_6 &= \Delta B_4 - \Delta B_6 \quad \text{и т.д.} \end{aligned}$$

В общем виде: $x_n + x_{n+1} = \Delta B_{n-1} - \Delta B_{n+1},$ (1)

где n - порядковый номер впадины резьбы со стороны захода метчика;

ΔB -уширение впадины резьбы на уровне средней линии профиля резьбы метчика, которое легко вычислить по результатам измерения специальным прибором [2] среднего диаметра $d_{2(n)}$ на каждом витке резьбы.

Так, например, на первой резьбовой впадине:

$$\begin{aligned} d_{2(1)} &= d_2 + a_1 c_1 = d_2 + \Delta d_{2(1)}, \\ \Delta B_1 &= a_1 b_1 = a_1 c_1 \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \Delta d_{2(1)} \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}. \end{aligned}$$

Нарастание уширения впадин нарезаемой резьбы на уровне внутреннего диаметра по мере продвижения метчика

Обороты метчика	№№ впадин нарезаемой резьбы											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1												
2	x_1											
3	x_2	x_2										
4	x_3	x_3	x_3									
5	x_4	x_4	x_4	x_4								
6	x_5	x_5	x_5	x_5	x_5							

Продолжение таблицы

Обороты метчика	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
7	x_6	x_6	x_6	x_6	x_6	x_6						
8	x_7											
9	x_8											
10	x_9											
11	x_{10}											
12	x_{11}											
13	x_{12}											
14	x_{13}											

Примечание: Уширение впадин на уровне среднего диаметра d_2 метчика составляет сумму x , записанных на сером фоне, по каждой впадине.

На второй резьбовой впадине:

$$d_{2(2)} = d_2 + a_2 c_2 = d_2 + \Delta d_{2(2)},$$

$$\Delta B_2 = a_2 b_2 = a_2 c_2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \Delta d_{2(2)} \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}.$$

На третьей резьбовой впадине:

$$d_{2(3)} = d_2 + a_3 c_3 = d_2 + \Delta d_{2(3)},$$

$$\Delta B_3 = a_3 b_3 = a_3 c_3 \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} = \Delta d_{2(3)} \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}.$$

В общем виде:
$$\Delta B_n = \Delta d_{2(n)} \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}, \quad (2)$$

где $\Delta d_{2(n)}$ - измеренное прибором увеличение среднего диаметра нарезанной резьбы $d_{2(n)}$ по сравнению со средним диаметром резьбы метчика d_2 ;

$\frac{\beta}{2}$ - номинальное значение половины угла профиля резьбы.

Вычислим отклонения (погрешности) левой половины угла профиля $\Delta\beta$ каждой впадины резьбы.

На четвертой впадине резьбы (Рисунок 4).

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2} + \Delta\beta_4\right) = \frac{d_4 h}{eh} = \frac{d_4 n + nh}{eh} = \frac{x_4 + x_5 + nh}{eh}; \quad nh = eh \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}.$$

$$\text{Тогда } \operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2} + \Delta\beta_4\right) = \frac{x_4 + x_5 + eh \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}}{eh} = \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} + \frac{x_4 + x_5}{H}.$$

На третьей впадине резьбы (Рисунок 4):

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2} + \Delta\beta_3\right) = \frac{d_3 h}{eh} = \frac{x_3 + x_4 + nh}{eh} = \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} + \frac{x_3 + x_4}{H}.$$

$$\text{В общем виде:} \quad \operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2} + \Delta\beta_n\right) = \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} + \frac{x_n + x_{n+1}}{H}.$$

Используя уравнения 1 и 2 получим:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2} + \Delta\beta_n\right) = \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} + \frac{\Delta B_{n-1} - \Delta B_{n+1}}{H} = \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} + \frac{(\Delta d_{2(n-1)} - \Delta d_{2(n+1)}) \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}}{H}.$$

$$\text{Окончательно } \operatorname{tg}\left(\frac{\beta}{2} + \Delta\beta_n\right) = \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \left(1 + \frac{\Delta d_{2(n-1)} - \Delta d_{2(n+1)}}{H}\right), \quad (3)$$

где $\Delta\beta$ - погрешность половины угла профиля резьбы;

n - порядковый номер резьбовой впадины со стороны захода метчика;

H - высота номинального профиля резьбы.

Левая половина угла профиля резьбовой впадины:

$$\frac{\beta}{2} + \Delta\beta_n = \arctg\left[\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \left(1 + \frac{\Delta d_{2(n-1)} - \Delta d_{2(n+1)}}{H}\right)\right].$$

Погрешность половины угла профиля нарезанной резьбы:

$$\Delta\beta_n = \arctg\left[\operatorname{tg} \frac{\beta}{2} \left(1 + \frac{\Delta d_{2(n-1)} - \Delta d_{2(n+1)}}{H}\right)\right] - \frac{\beta}{2}. \quad (4)$$

При разработке методики оценки погрешностей половины угла профиля резьбы предлагалось, что разбивание резьбы происходит под действием осевых сил. Как указывалось выше, на основе анализа рисунка, 3 это имело место на всех витках резьбы, кроме двух первых и последнего, в формировании которых участвовали радиальные силы, изменяющие принятые в расчет представления. Поэтому, формула (4) пригодна для расчета отклонений половины угла профиля на всех витках резьбы кроме двух первых и последнего. Однако для целей практики предлагаемая методика приемлема, так как отклонения параметров резьбы на двух первых и двух последних витках стандартами не нормируются.

ЛИТЕРАТУРА

- Шагун, В.И. Кудрявцева, Л.Т. Неразрушающий способ контроля отклонений шага внутренних резьб//Сб.: Машиностроение.--- Мн.: Выш. шк., 1985.--- Вып.10.--- с. 99-101.
- Шагун, В.И., Фельдштейн, Э.И. Прибор для измерения внутренних резьб// Измерительная техника, №3, 1963. с. 7-10.