

УДК 538.446

Ф.Н. Канареев, канд. техн. наук, доцент, Н.П. Белокопская, магистрант

Севастопольский национальный технический университет,

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: root@sevgtu.sebastopol.ua

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАБОЧЕЙ ЧАСТИ МЕТЧИКОВ (М2-М6)

Описывается номинальная внутренняя резьбовая поверхность детали и модель реальной резьбовой поверхности метчика, определены погрешности профиля и выработаны рекомендации по их уменьшению.

Форма профиля и размеры резьбы являются отображением формы и размеров профиля зубьев рабочей части метчиков[1].

Цель исследований – разработка моделей номинальной и реальной поверхностей внутренних резьб, для определения условий при которых обеспечивается их максимальное приближение.

Теоретическая резьбовая поверхность отверстия представляет обыкновенную архимедову винтовую поверхность, образующими которой являются прямые линии L_0 , расположенные под углом профиля резьбы α относительно друг друга (рисунок 1).

Если систему координат $OXYZ$ выбрать таким образом, чтобы ось отверстия совпадала с осью OZ , а ось OX была направлена через середину впадины резьбы (точка M), то общее уравнение винтовой поверхности в параметрическом виде запишется следующим образом

$$\begin{cases} x = X \cos v - Y \sin v, \\ y = X \sin v + Y \cos v, \\ z = \rho_p \cdot v + Z, \end{cases} \quad (1)$$

где v – текущая координата; ρ_p – винтовой параметр, $\rho_p = r_p \cdot \operatorname{tg} \gamma_p$; r_p – радиус профиля; γ_p – угол подъема винтовой линии на цилиндре данного радиуса.

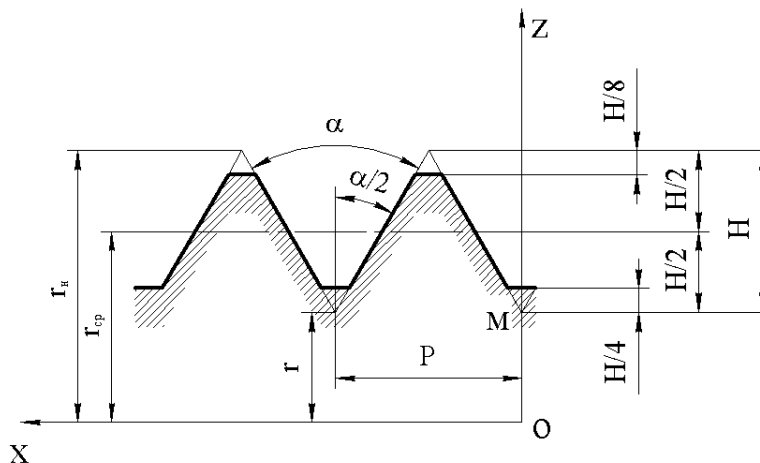


Рисунок 1 – Сечение номинальной резьбовой поверхности

В цилиндрической системе координат, где ρ – текущий радиус, а $\operatorname{ctg} \alpha = m_\alpha$ уравнение винтовой поверхности резьбы имеет вид

$$\begin{cases} x = \rho' \cdot \cos v, \\ y = \rho' \cdot \sin v, \\ z = \rho_p \cdot v \pm (\rho' - r_p) \cdot m_\alpha. \end{cases} \quad (2)$$

Знак (+) для правой стороны профиля, знак (-) – для левой.

Подставляя в уравнение $\rho_p = r_p \cdot \operatorname{tg} \gamma_p$, получаем

$$\begin{cases} x = \rho' \cdot \cos v, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} y = \rho' \cdot \sin v, \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} z = v \cdot r_p \cdot \operatorname{tg} \gamma_p \pm (\rho' - r_p) \cdot m_\alpha. \end{cases} \quad (5)$$

Значение ϑ для правой резьбы принимается положительным, а для левой – отрицательным.

Исключим параметр ϑ из уравнения (5):

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = (\rho')^2, \\ \frac{y}{x} = \operatorname{tg} \vartheta, \vartheta = \arctg \frac{y}{x}. \end{cases}$$

После преобразований получим:

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = (\rho')^2, \\ z = r_p \cdot \operatorname{tg} \gamma_p \cdot \arctg \frac{y}{x} \pm (\rho' - r_p) \cdot m_\alpha. \end{cases} \quad (6)$$

Из уравнения (6) можно получить осевое сечение (образующую) винтовой поверхности сечением плоскостью $y = 0$:

$$\begin{cases} x = \rho', \\ z = \pm (\rho' - r_p) \cdot m_\alpha. \end{cases} \quad (7)$$

Система уравнений (3) – (5) описывает номинальную внутреннюю резьбовую поверхность детали, а соответственно, и требуемую резьбовую поверхность метчика.

Реальная резьбовая поверхность метчика отличается от номинальной и обусловлена существующей технологией её изготовления.

Для сопоставления номинального и реального профиля резьбовой поверхности метчика, определение характера и величины их отклонений рассмотрим модель реальной поверхности метчика.

Окончательное формирование резьбовых поверхностей метчиков М2–М6 производят на операции чистового шлифования. Эта операция выполняется на резьбошлифовальных станках с применением алмазных кругов типа А2П350×203×60°×10АМС 60/40МІ100 % за 2...6 ходов в зависимости от размера метчика.

Боковые поверхности профиля круга заправляют так, чтобы в осевом сечении круга угол между боковой режущей кромкой и следом радиальной плоскости, проходящей через вершину угла, был равен $d_2 = 30^\circ$, т.е. угол профиля $\alpha = 60^\circ$. Шлифовальный круг устанавливают на угол подъема резьбы $\gamma_{\text{ср}}$ определяемый по среднему диаметру резьбы метчика d_2 (рисунок 2).

Образование винтовой поверхности происходит вследствие того, что деталь за каждый оборот вместе со столом станка перемещается по отношению к шлифовальному кругу на строго определенную величину, равную шагу резьбы P . Это достигается при помощи ходовой пары «винт-гайка», которая связана со шпинделем передней бабки сменными зубчатыми колесами.

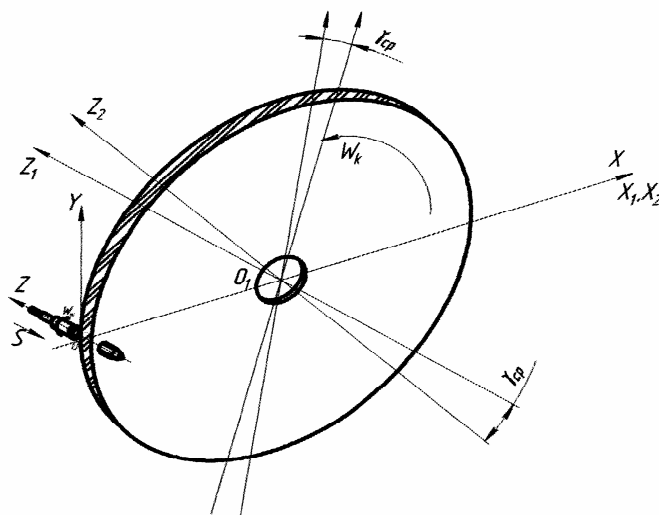


Рисунок 2 – Схема образования резьбы на метчиках

Зубья метчиков размерами М2–М6 выполняют следующим образом: незатылованными, затылованными по профилю на 2/3 ширины пера и затылованными по профилю доостра.

Рассмотрим получение поверхностей незатылованных зубьев на основе теории винтовых поверхностей.

Подвижную систему координат $OXYZ$ располагаем таким образом, чтобы ось OZ совпадала с осью винта, а ось OX проходила через середину впадины резьбы и ось круга.

Систему координат $O_1OX_2Y_2Z_2$ расположим таким образом, чтобы ось O_1Z_2 была направлена по оси шлифовального круга (конуса). Угол между осями O_1Z_1 и O_1Z_2 и осями O_1Y_1 и O_1Y_2 равен γ_{cp} – углу подъема резьбы метчика по среднему диаметру. Расстояние между центрами осей OO_1 равно расстоянию между осью метчика и шлифовального круга

$$OO_1 = \alpha_0 = R_{ш} + r',$$

где $R_{ш} = MO_1$ – радиус круга; $r' = r_{cp} + \frac{P}{2} \cdot \cos \alpha$ – внутренний радиус резьбы полного профиля; r_{cp} – средний радиус резьбы.

Обозначим ρ , Θ – полярные координаты. Параметрические уравнения образующего конуса в системе $OX_2Y_2Z_2$ запишутся в виде

$$\begin{cases} x_2 = \rho \times \cos \Theta, \\ y_2 = \rho \times \sin \Theta, \\ z_2 = (R_{ш} - \rho) \cdot m_\alpha, \end{cases} \quad (8)$$

а в системе $OXYZ$ как:

$$\begin{cases} x = \rho \times \cos \Theta + \alpha_0, \\ y = \rho \times \sin \Theta \cos \gamma_{cp} - (R_{ш} - \rho) \cdot m_\alpha \sin \gamma_{cp}, \\ z = \rho \times \sin \Theta \sin \gamma_{cp} + (R_{ш} - \rho) \cdot m_\alpha \cos \gamma_{cp}. \end{cases} \quad (9)$$

Образующий конус совершает винтовое движение. Тогда параметрическое уравнение семейства конусов S_v в их винтовом движении имеет вид:

$$\begin{cases} x = (\rho \times \cos \Theta + \alpha_0) \cos \vartheta - [\rho \times \sin \Theta \cos \gamma_{cp} - (R_{ш} - \rho) \cdot m_\alpha \sin \gamma_{cp}] \sin \vartheta, \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} y = (\rho \times \cos \Theta + \alpha_0) \sin \vartheta - [\rho \times \sin \Theta \cos \gamma_{cp} - (R_{ш} - \rho) \cdot m_\alpha \sin \gamma_{cp}] \cos \vartheta, \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} z = \rho \times \sin \Theta \cos \gamma_{cp} + (R_{ш} - \rho) \cdot m_\alpha \cos \gamma_{cp} + P \times \vartheta. \end{cases} \quad (12)$$

Для получения поверхности огибающей семейства конусов S_v которая является реальной резьбовой поверхностью необходимо определить уравнения приравнять нулю, т.е.

$$f(\rho, \Theta, \vartheta) = \begin{vmatrix} x_\rho & y_\rho & z_\rho \\ x_\Theta & y_\Theta & z_\Theta \\ x_\vartheta & y_\vartheta & z_\vartheta \end{vmatrix} = 0. \quad (13)$$

После преобразования получим

$$[m_\alpha^2(R_{ш} - \rho) - p] \cos \Theta + m_\alpha(a_0 \operatorname{ctg} \gamma_{cp} + \rho) \sin \Theta = a_0 - \rho \cdot \operatorname{ctg} \gamma_{cp}. \quad (14)$$

Из уравнений (10) – (12) можно, исключив переменные, получить уравнение огибающей поверхности в общем виде

$$F(x, y, z) = 0, \quad (15)$$

а затем – сечение поверхности (13) плоскостью $y=0$, т.е. осевое сечение реальной резьбовой поверхности.

Для упрощения преобразований исключим параметр S , возведя в квадрат уравнения (10) и (11) и сложив их:

$$(\rho \cdot \cos \Theta + a_0)^2 + [\rho \cdot \sin \Theta \cos \gamma_{cp} - (R_{ш} - \rho) \cdot m_\alpha \sin \gamma_{cp}]^2 = x^2 + y^2. \quad (16)$$

Используем далее формулы дополнительного угла

$$a \times \sin \vartheta + b \times \cos \vartheta = A \times \sin(\vartheta + \varphi);$$

$$a \times \cos \vartheta + b \times \sin \vartheta = A \times \cos(\vartheta + \varphi);$$

$$A = \sqrt{a^2 + b^2}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{b}{a}.$$

Преобразуем уравнения (10), (11) следующим образом

$$\begin{cases} x = A \times \cos(\vartheta + \varphi), \\ y = A \times \sin(\vartheta + \varphi), \end{cases}$$

здесь
$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\rho \times \sin \Theta \times \cos \gamma_{cp} - (R_{uu} - \rho) \cdot m_{\alpha} \sin \gamma_{cp}}{\rho \times \cos \Theta + a_0}.$$

В результате получим

$$\operatorname{tg}(\varphi + \vartheta) = \frac{y}{x} \quad \text{и} \quad \varphi + \vartheta = \operatorname{arctg} \frac{y}{x}, \quad (17)$$

следовательно

$$\vartheta = \operatorname{arctg} \frac{y}{x} - \varphi = \operatorname{arctg} \frac{y}{x} - \operatorname{arctg} \frac{\rho \times \sin \Theta \times \cos \gamma_{cp} - (R_{uu} - \rho) \cdot m_{\alpha} \sin \gamma_{cp}}{\rho \cdot \cos \Theta + a_0}. \quad (18)$$

Уравнение (12) примет вид

$$z = \rho \times \sin \Theta \times \cos \gamma_{cp} - (R_{uu} - \rho) \cdot m_{\alpha} \cos \gamma_{cp} + P_p \times \operatorname{arctg} \frac{y}{x} - \operatorname{arctg} \frac{\rho \times \sin \Theta \times \cos \gamma_{cp} - (R_{uu} - \rho) \cdot m_{\alpha} \sin \gamma_{cp}}{\rho \times \cos \Theta + a_0}. \quad (19)$$

Осевое сечение огибающей поверхности при $y = 0$ запишется в виде системы уравнений:

1) для правой стороны профиля

$$x = \sqrt{(\rho \times \cos \Theta + a_0)^2 + [\rho \times \sin \Theta \times \cos \gamma_{cp} - (R_{uu} - \rho) \cdot m_{\alpha} \sin \gamma_{cp}]^2}, \quad (20)$$

$$z = \rho \times \sin \Theta \times \cos \gamma_{cp} + (R_{uu} - \rho) \cdot m_{\alpha} \cos \gamma_{cp} + \rho \times \operatorname{arctg} \frac{\rho \times \sin \Theta \times \cos \gamma_{cp} - (R_{uu} - \rho) \cdot m_{\alpha} \sin \gamma_{cp}}{\rho \times \cos \Theta + a_0}, \quad (21)$$

$$\rho = \frac{1}{m_a^2 + 1} [m_a^2 R_{uu} + m_a (a_0 \operatorname{ctg} \gamma_{cp} + P_p) \operatorname{tg} \Theta - (a_0 - P_p \operatorname{ctg} \gamma_{cp}) \frac{1}{\cos \Theta}]; \quad (22)$$

2) для левой стороны профиля

$$x = \sqrt{(\rho \times \cos \Theta + a_0)^2 + [\rho \times \sin \Theta \times \cos \gamma_{cp} + (R_{uu} - \rho) \cdot m_{\alpha} \sin \gamma_{cp}]^2}, \quad (23)$$

$$z = \rho \times \sin \Theta \times \cos \gamma_{cp} - (R_{uu} - \rho) \cdot m_{\alpha} \cos \gamma_{cp} + \rho \times \operatorname{arctg} \frac{\rho \times \sin \Theta \times \cos \gamma_{cp} + (R_{uu} - \rho) \cdot m_{\alpha} \sin \gamma_{cp}}{\rho \times \cos \Theta + a_0}, \quad (24)$$

$$\rho = \frac{1}{m_a^2 + 1} [m_a^2 R_{uu} - m_a (a_0 \operatorname{ctg} \gamma_{cp} + P_p) \operatorname{tg} \Theta + \frac{P_p \operatorname{ctg} \gamma_{cp} - a_0}{\cos \Theta}]. \quad (25)$$

Анализ отклонений профиля зубьев выполнен для метчиков с незатылованными зубьями.

Расчеты проведены по зависимостям (20) – (22) на ЭВМ. На рисунке 3 показан реальный профиль резьбы метчика, построенный по результатам расчетов. Для определения погрешности профиля в уравнения (7) подставим значения ρ' , полученные из уравнений (22), (25) и определим соответствующие им значения теоретического профиля

$$\Delta Z = Z_g - Z_T, \quad (26)$$

где

$$Z_T = (x - r') \operatorname{tg} 30^\circ. \quad (27)$$

Максимальное отклонение реального профиля от номинального для метчика М4 приведено в таблице 1.

Величины отклонений определены при принятых выше допущениях, что угол профиля шлифовального круга соответствует требуемому, технологическая система является абсолютно жесткой и температурные деформации ее отсутствуют. Профиль резьбы реальных метчиков будет больше отклонения из-за погрешностей статической и динамической настройки, возникающих в процессе шлифования.

Расчеты показывают, что отклонения профиля метчика по среднему диаметру для степени точности составляет: Н1, Н2, Н3 – 12 %, а для Н4 – 24 % от поля допуска.

Из анализа полученных зависимостей (20) – (22) видно следующее: погрешность профиля определяется диаметрами резьбы метчика и шлифовального круга, а, соответственно, протяженностью зоны и угла их контакта.

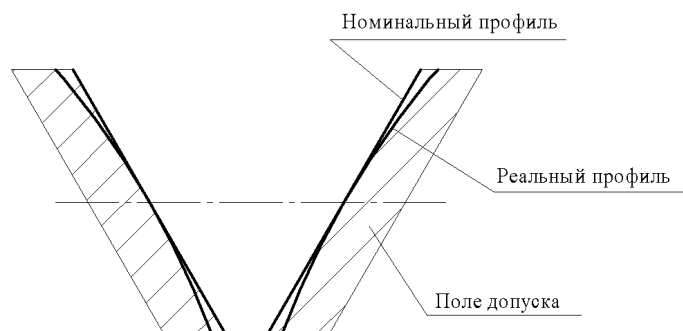


Рисунок 3 – Профиль резьбы метчика, построенный по результатам расчетов

Таблица 1 – Отклонения координат точек реального профиля метчика от номинального

X-r, мм	Z, мм	ΔZ , мм
0,22724	$\pm 0,131479$	$\pm 0,00028$
0,33668	$\pm 0,193801$	$\pm 0,00058$
0,44620	$\pm 0,25621$	$\pm 0,00140$
0,55578	$\pm 0,31869$	$\pm 0,00219$
0,66540	$\pm 0,38123$	$\pm 0,00294$
0,77507	$\pm 0,44382$	$\pm 0,00369$

При изготовлении зубьев режущих метчиков затылованными по профилю и зубьев деформирующих метчиков имеет место постоянное изменение протяженности зоны контакта метчика с кругом. В этом случае погрешности профиля зубьев увеличиваются. Для оценки величины погрешностей опишем процесс образования образующих профиля резьбы.

Резьбовая поверхность затылованных по профилю зубьев рабочей части метчиков получается сложением двух движений шлифовального круга: винтового движения с параметром P_p и затылюющего движения – радиального перемещения в сторону к оси метчика на величину затылования с параметром S_ϑ .

Параметрические уравнения семейства конусов $S_{a\vartheta}$ в их винтовом и радиальном движениях запишутся в виде:

$$\begin{cases} x = [\rho \times \cos \Theta + a_\vartheta] \cos \vartheta - [\rho \times \sin \Theta \times \cos \gamma_{cp} - (R_u - \rho) \cdot m_\alpha \sin \gamma_{cp}] \sin \vartheta, \\ y = [\rho \times \cos \Theta + a_\vartheta] \sin \vartheta + [\rho \times \sin \Theta \times \cos \gamma_{cp} - (R_u - \rho) \cdot m_\alpha \sin \gamma_{cp}] \cos \vartheta, \\ z = \rho \times \sin \Theta \times \sin \gamma_{cp} + (R_u - \rho) \cdot m_\alpha \cos \gamma_{cp} + P_p \vartheta. \end{cases} \quad (28)$$

$$\quad (29)$$

$$\quad (30)$$

здесь $a_\vartheta = a_0 + C_\vartheta \cdot \vartheta$ – уравнение, описывающее радиальное движение шлифовального круга при затыловании профиля резьбы метчика; $C_\vartheta = \frac{a_{\min} - a_{\max}}{\Psi_\vartheta}$ – параметр затылования; $a_{\min}$ – минимальное расстояние между осью метчика и шлифовального круга; $a_{\max} = a_0$ – максимальное расстояние между осями; Ψ_ϑ – угол, на котором осуществляется затылование.

После преобразования получим

$$(\rho \cos \Theta + Q\rho + B) \operatorname{tg}(S\rho + D) + \rho(m_\alpha \sin \gamma_{cp} - \sin \Theta \cos \gamma_{cp}) - R_u m_\alpha \sin \gamma_{cp} = 0, \quad (31)$$

где

$$Q = -\frac{(m_\alpha^2 + 1) \sin \Theta \cos \gamma_{cp}}{\sin \gamma_{cp} - m_\alpha \sin \Theta \cos \gamma_{cp}};$$

$$B = \frac{m_\alpha^2 R_u \cos \Theta \sin \gamma_{cp} + m_\alpha C_\vartheta \cos \Theta + P_p (\cos \gamma_{cp} - m_\alpha \sin \Theta \sin \gamma_{cp})}{\sin \gamma_{cp} - m_\alpha \sin \Theta \cos \gamma_{cp}};$$

$$S = -\frac{(m_\alpha^2 + 1) \sin \Theta \cos \gamma_{cp}}{C_\vartheta (\sin \gamma_{cp} - m_\alpha \sin \Theta \cos \gamma_{cp})};$$

$$D = \frac{m_\alpha^2 R_u \cos \Theta \sin \gamma_{cp} + m_\alpha C_\vartheta \cos \Theta + P_p (\cos \gamma_{cp} - m_\alpha \sin \Theta \sin \gamma_{cp})}{C_\vartheta (\sin \gamma_{cp} - m_\alpha \sin \Theta \cos \gamma_{cp})}.$$

При фиксированном Θ уравнение (31) можно решить относительно ρ методом итераций с помощью рекуррентной формулы

$$\rho_{k+1} = \rho_k - \frac{F(\rho_k)}{F'(\rho_k)},$$

где $F(\rho_k)$ – левая часть уравнения (31).

Для вычисления ρ_k , соответствующего выбранному Θ , берём в качестве нулевого приближения ρ , вычисленное по уравнению (25), тогда получаем

$$\rho_1 = \rho - \frac{F(\rho)}{F'(\rho)} \text{ – первое приближение,}$$

$$\rho_1 = \rho - \frac{F(\rho)}{F'(\rho)} \text{ – второе приближение и т.д.}$$

Итерационную процедуру необходимо повторять до тех пор, пока отклонение нет меньше допустимой погрешности. После этого определяется a_a и по уравнениям (35), (36) реальный профиль зубьев рабочей части, затылованных по профилю доостра. Результаты расчета приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Отклонение координат точек реального профиля затылованных зубьев метчика от номинального

X , мм	Y , мм	ΔZ , мм
1,69715	0,13148	0,00028
1,78272	0,19479	0,01418
1,868362	0,25816	0,02811
1,954085	0,32159	0,04205
2,03984	0,38507	0,05602

Расчеты показывают, что отклонения профиля по среднему диаметру затылованного метчика составляет: для степеней Н1, Н2, Н3 – 180 %, а для Н4 – 90 % от поля допуска.

Таким образом, применяемая в настоящее время технология изготовления рабочей части метчиков (М2 – М6) – резбошлифование не может обеспечить требуемую номинальную резбовую поверхность в детали. Максимальное приближение номинальной резбовой поверхности рабочей части метчика к номинальной резбовой поверхности метчика может быть при уменьшении диаметра производящего инструмента. Уменьшение диаметра производящего инструмента возможно при переходе от процесса шлифования к процессу пластического деформирования – накатывание резьбы на рабочей части метчиков. Однако использование известных конструкций резбонакатных головок невозможно, так как профиль резбонакатных роликов их определен из условий накатывания наружных резьб и отличается по номинальным размерам и высоте от номинального профиля резьбы метчика. Поэтому направлением дальнейших исследований является разработка конструкций резбонакатных головок и методика расчета геометрических параметров резбонакатных роликов.

Библиографический список

1. Лашнев С.И. Расчет и конструирование металлорежущих инструментов с применением ЭВМ / С.И. Лашнев, М.И. Юликов. — М.: Машиностроение, 1975. — 392 с.

Поступила в редакцию 30.05.2008 г.