

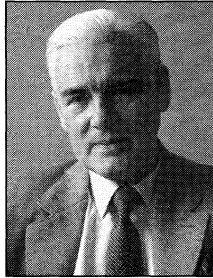
Jan MALINOWSKI, Wojciech PŁOWUCHA

POLITECHNIKA ŁÓDZKA FILIA W BIELSKU-BIAŁEJ

Poprawki w pomiarach średnicy podziałowej sprawdzianów gwintowych pierścieniowych

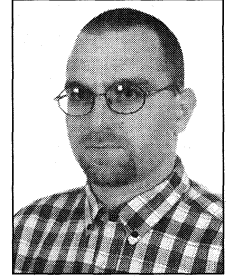
Dr n.hum. mgr inż. Jan MALINOWSKI

– studia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Śląskiej, doktorat na Uniwersytecie Poznańskim. W latach 1952-72 pracował w przemyśle maszynowym. Od 1972 r. starszy wykładowca Filii Politechniki Łódzkiej w Bielsku-Białej. Opublikował m.in. ponad 50 prac naukowych z zakresu metrologii wielkości geometrycznych. Jest też autorem i współautorem 7 książek i podręczników z tej dziedziny. Uczestniczy w pracach normalizacyjnych PKN w Komisji Podstaw Budowy Maszyn.



Mgr inż. Wojciech PŁOWUCHA

– studia na Wydziale Budowy Maszyn Politechniki Łódzkiej Filii w Bielsku-Białej ukończył w 1995 r. Od lipca 1995 r. pracuje jako asystent w Zespole Metrologii i Systemów Zapewnienia Jakości. Jest współautorem programu komputerowego do zbioru zadań z zakresu sprawdzania dokładności w budowie maszyn (podręcznik WSiP). Opublikował kilkanaście referatów z dziedziny metrologii wielkości geometrycznych.



Streszczenie

Stosunkowo małe tolerancje średnic podziałowych sprawdzianów gwintowych pierścieniowych zmuszają do pomiarów D_2 z odpowiednio mniejszymi niepewnościami. Wymaga to w pomiarze korekcy wszystkich znaczących błędów systematycznych. W opracowaniu zestawiono i przeanalizowano przydatność wzorów do obliczania poprawek w pomiarach D_2 długościomierzami firm Zeiss i Mahr.

Abstract

Narrow tolerances of ring-thread-gauges pitch diameter requires measurements of D_2 with smaller uncertainty. Hence, it is necessary to correct all significant systematic deviations in measurement. Suitability of formulas for calculating corrections in measurements of D_2 by means of Zeiss and Mahr length measuring units were analysed and compiled.

Wstęp

Przy wysokich wymaganiach dokładnościowych średnicę podziałową gwintu wewnętrznego mierzy się metodą pośrednią z użyciem dwóch kulistych końcówek pomiarowych. W szczególności tym sposobem można mierzyć sprawdziany gwintowe pierścieniowe. Norma PN-ISO 1502:1998 [1] ustala, że „Sprawdzanie sprawdzianów pierścieniowych przeciw sprawdzianami jest uprzywilejowane w stosunku do innych sposobów kontroli” (p. 7.1.1), jednakże w innym miejscu stwierdza, że „Zamawiający i wytwórca powinni uzgodnić, czy sprawdziany gwintowe pierścieniowe będą mierzone, czy sprawdzane przeciw sprawdzianami gwintowymi” (p. 8). Nie wyklucza się zatem mierzenia sprawdzianów, nawet w pewnych przypadkach zaleca: „Średnica podziałowa elementarna sprawdzianu gwintowego pierścieniowego powinna być raczej mierzona bezpośrednio, niż sprawdzana przeciw sprawdzianami gwintowymi” (p. 8). Według [1] w przedziale (M6, M300) tolerancje średnicy podziałowej sprawdzianów gwintowych pierścieniowych wynoszą $8\div 38 \mu\text{m}$. W celu uzyskania odpowiedniej dokładności pomiaru należy więc wprowadzić do wyniku wszystkie znaczące poprawki.

Pomiary średnicy podziałowej sposobem dwukulkowym

W praktyce laboratoryjnej stosuje się obecnie dwa zasadniczo różne sposoby pomiaru z użyciem dwóch kulistych końcówek pomiarowych [2, 3]. Pierwszy z nich polega na mierzeniu wymiaru m , prostopadłe do osi gwintu (Mahr), drugi zaś - na mierzeniu wymiaru w , nieprostopadłe do osi gwintu (Zeiss). Wymiary te mierzy się długościomierzem uniwersalnym, metodą różnicową z użyciem wzorca pierścieniowego (tabl. 1). Wzorcowanie długościomierza wkładkami przyzmatycznymi i stosem płytek wzorcowych [4, 5] jest

mniej dokładne i nie będzie tu rozpatrywane. Średnicę podziałową D_2 oblicza się według wzoru

$$D_2 = m + \frac{d_k}{\sin(\alpha/2)} - \frac{P}{2} \text{ctg}(\alpha/2) + p_1 + p_2 + p_{20} + p_3 \quad (1)$$

gdzie: m – odległość środków kulistych końcówek pomiarowych określona prostopadłe do osi gwintu, d_k – średnica kulek, P – podziałka, α – kąt gwintu, p_1, p_2, p_{20}, p_3 – poprawki natury geometrycznej oraz wywołane naciskiem pomiarowym.

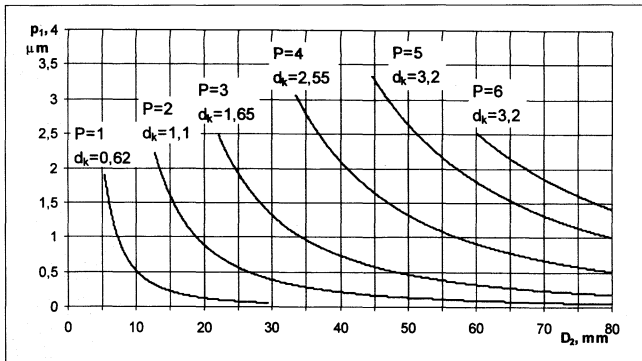
Tabl. 1. Pomiary średnicy podziałowej gwintu wewnętrznego długościomierzem uniwersalnym z wzorcowaniem położenia kulistych końcówek pomiarowych za pomocą wzorca pierścieniowego [2, 3].

POMIAR DŁUGOŚCIOMIERZEM ODLEGŁOŚCI MIĘDZY ŚRODKAMI KULISTYCH KOŃCÓWEK UMIESZCZONYCH W BRUZZACH GWINTU	
MAHR	ZEISS
POPRAWKI	
p_1, p_2, p_{20}	p_1, p_2, p_{20}, p_3
<p>p_1 — poprawka (dodatnia) na użycie w pomiarze kulek zamiast krążków</p> <p>p_2 — poprawka na spłaszczenie sprężyste układu „kuliste końcówki — boki gwintu” wywołane naciskiem pomiarowym</p> <p>p_{20} — poprawka na spłaszczenie sprężyste układu „kuliste końcówki — wewnętrzna powierzchnia wzorca pierścieniowego” wywołane naciskiem pomiarowym</p> <p>p_3 — poprawka (ujemna) na punkt zwrotny odległości środków kulek leżących w bruzdach po przeciwnych stronach osi gwintu</p>	

Poprawka p_1 na użycie w pomiarze kulek

Wzór (1) został wyprowadzony przy założeniu, że w bruzdach gwintu w płaszczyźnie osiowej znajdują się nieskończenie cienkie krążki o średnicy d_k . W rzeczywistości w bruzdy gwintu wkłada się

kulki o średnicy d_k , których środki są położone bliżej osi gwintu niż środki krążków. Punkty styku kulki z bokami gwintu nie leżą w płaszczyźnie osiowej gwintu przechodzącej przez środek kulki. Użycie w pomiarze kulistych końcówek zamiast krążków wymaga wprowadzenia do wyniku dodatniej poprawki p_1 (rys. 1).



Rys. 1. Wykresy poprawki p_1 na użycie w pomiarze kulek dla różnych podziałek P (mm) oraz średnic d_k (mm) kulistych końcówek pomiarowych

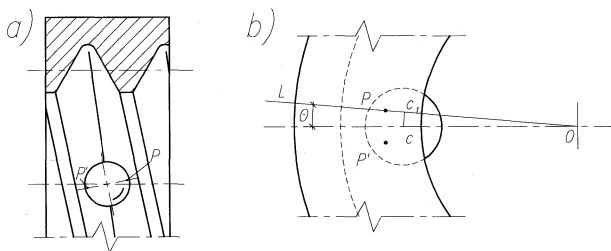
Dokładny wzór na poprawkę p_1 wyprowadził Tomlinson [6]. Dla gwintów symetrycznych poprawka (2) jest m.in. funkcją obliczanego iteracyjnie kąta pomocniczego θ [6,7] (rys. 2).

$$p_{1(0)} = m(\cos\theta - 1) - \frac{d_k}{\sin(\alpha/2)} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{m^2}{d_k^2} \sin^2\theta} \right] + \frac{nP\theta}{\pi} \operatorname{ctg}(\alpha/2)$$

$$\theta = \arcsin \left\{ \frac{nPd_k \cos(\alpha/2) \sqrt{1 - \frac{m^2}{d_k^2} \sin^2\theta}}{\pi m^2 \left[\cos\theta + \sin(\alpha/2) \frac{d_k}{m} \sqrt{1 - \frac{m^2}{d_k^2} \sin^2\theta} \right]} \right\} \quad (2)$$

$$\theta_1 = \frac{nPd_k \cos(\alpha/2)}{\pi m^2 \left(1 + \frac{d_k}{m} \sin(\alpha/2) \right)}$$

gdzie: m – odległość między środkami kulek, n – krotność gwintu.



Rys. 2. Interpretacja kąta pomocniczego θ obliczanego iteracyjnie (2): a) rzut z góry na kulkę umieszczoną w bruzdzie gwintu wewnętrznego; P, P' – punkty styku kulki z bokami gwintu b) widok od czola gwintu, L – prosta leżąca w płaszczyźnie prostopadłej do osi gwintu i przechodząca przez punkt P styku kulki z bokiem gwintu

W okresie poprzedzającym epokę nowoczesnych środków obliczeniowych rozwinięto we wzorze (2) w szeregu funkcje trygonometryczne kąta pomocniczego θ , co ułatwiało obliczanie poprawki [6, 8, 9]. Uproszczone postaci wzorów podał Berndt i uszeregował je w kolejności rosnącej dokładności [8, 9]:

$$p_{1(1)} = \frac{1}{2} \frac{(nP)^2 d_k \cos \frac{\alpha}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}}{\pi^2 D_2^2} \quad (3)$$

$$p_{1(2)} = \frac{1}{2} \frac{(nP)^2 d_k \cos \frac{\alpha}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}}{\pi^2 m^2} \quad (4)$$

$$p_{1(3)} = \frac{1}{2} \frac{(nP)^2 d_k \cos \frac{\alpha}{2} \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}}{\pi^2 m^2 \left(1 + \frac{d_k \sin \frac{\alpha}{2}}{m} \right)} \quad (5)$$

W pomiarach sprawdzianów do gwintów Berndt przyjął wartość wyrażenia P^3/m^2 jako kryterium stosowalności wzorów uproszczonych [9] (tabl. 2).

Tabl. 2. Warunki stosowania wzorów uproszczonych (3÷5) w pomiarach sprawdzianów gwintowych (metrycznych) pierścieniowych według Berndta [7]

Średnica kulek d_k	Wartość wyrażenia P^3/m^2	Nr wzoru na poprawkę p_1
$d_k \approx d_{ko}^{1)}$	$\leq \approx 0,05$	3
dowolna	$\leq \approx 1$	4
dowolna	$\leq \approx 3$	5

¹⁾ d_{ko} – średnica optymalna kulistych końcówek $d_{ko} = \frac{P}{2 \cos(\alpha/2)}$ pomiarowych;

Przy obecnych możliwościach wykonywania obliczeń lepszym kryterium jest wartość różnicy poprawek otrzymana według wzoru uproszczonego (3÷5) i dokładnego (2) [10]. Można umownie przyjąć, że moduł tej różnicy nie powinien być większy niż 0,1 μm , dzięki czemu ograniczy się wpływ błędu wyznaczenia poprawki na zaokrągloną do całkowitych mikrometrów wartość D_2 . Jeżeli średnica D_2 jest na granicy wymiaru górnego lub dolnego, zmniejszy się w ten sposób ryzyko podjęcia błędnej decyzji o przyjęciu lub odrzuceniu sprawdzianu. Po obliczeniu poprawek według wzorów (2÷5) dla nominalnych wartości P i D_2 wszystkich znormalizowanych gwintów metrycznych [11] okazało się, że w kilkunastu przypadkach moduły różnic poprawek $|p_{1(1)} - p_{1(0)}|$ i $|p_{1(2)} - p_{1(0)}|$ są większe od 0,1 μm . Na przykład dla M36 ($P = 4$ mm, $D_2 = 33,402$ mm, $d_k = 2,550$ mm) różnice te odpowiednio wynoszą 0,17 μm i 0,12 μm . Stosunek $P^3/m^2 = 0,063$, a więc według kryterium Berndta (tabl. 2) można korzystać ze wzoru (4), co daje jednak moduł różnicy większy od 0,1 μm . Natomiast dla najbardziej dokładnego z uproszczonych wzorów (5) różnica $|p_{1(3)} - p_{1(0)}| = 0,00078$ μm . Po przeprowadzeniu pełnej analizy wyników obliczeń okazało się, że w pomiarach dokładnych gwintów metrycznych wewnętrznych do obliczania poprawki p_1 powinno się stosować wzór (5). W pomiarach gwintów trapezowych i trapezowych wielokrotnych należy korzystać wyłącznie ze wzoru (2).

W celu zbadania wpływu dokładności d_k, P, m i α na poprawkę p_1 , obliczono dla wszystkich znormalizowanych gwintów wartości pochodnych cząstkowych funkcji (4). Pochodne te, często nazywane współczynnikami wrażliwości, pozwalają ocenić wpływ rzeczywistych odchyłek wymiarów na wartość poprawki. W przypadku gwintów metrycznych do obliczania poprawki p_1 można korzystać z nominalnych wartości D_2, d_k, P, m i α . Natomiast w gwintach trapezowych i trapezowych wielokrotnych powinno się wstawiać do wzoru wartości zaobserwowane.

Poprawka p_2 na spłaszczenie sprężyste kulistych końcówek i boków gwintu pod wpływem nacisku pomiarowego

Pod wpływem nacisku pomiarowego Q następuje spłaszczenie sprężyste układu „kuliste końcówki - boki gwintu”. Podczas pomia-

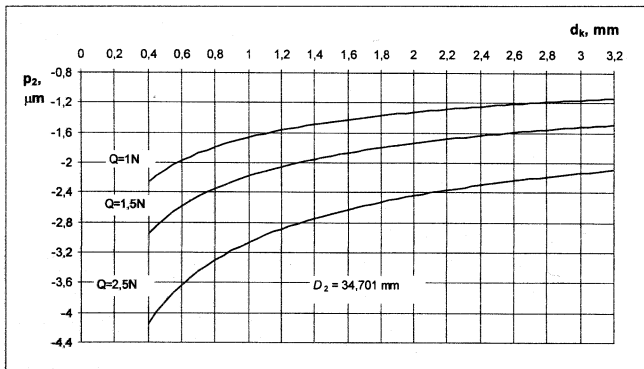
ru ugięcia kabłąków (Zeiss) oraz trzpienia pomiarowego (Mahr) kompensują się, ponieważ takie same ugięcia występują przy wzorcowaniu długościomierza (tabl. 1).

Poprawkę p_2 dla gwintów metrycznych można obliczyć według wzoru Hartmanna [12] lub Lechowskiego [13, 14]. Oba wzory zostały wyprowadzone dla styku stali ze stalą i sprawdzone doświadczalnie w ramach prac doktorskich [12, 13].

Wzór Hartmanna ma postać (rys. 3)

$$p_2 = -1,4795 \sqrt[3]{Q^2} \sqrt{\frac{2}{d_k} \sqrt[3]{\frac{d_k}{4} \left(1 + \frac{d_k}{2D_2}\right)}} \mu\text{m} \quad (6)$$

gdzie: Q - nacisk pomiarowy w N , d_k - średnica kulistych końcówek pomiarowych w mm , D_2 - średnica podziałowa w mm .



Rys. 3. Wykresy poprawki p_2 (6) na spłaszczenie sprężyste kulistych końcówek (d_k) i boków gwintu dla różnych nacisków pomiarowych Q oraz średnicy podziałowej gwintu $D_2 = 34,701$ mm (M36x2)

Wzór Lechowskiego:

$$p_2 = -1,6 \sqrt[3]{\frac{Q^2}{d_k}} \mu\text{m} \quad (7)$$

Autorzy prac [12, 13] podają, że poprawkę p_2 obliczaną według wzoru (6) wyznacza się z niepewnością $\pm 11\%$ wartości poprawki [12], według zaś wzoru (7) - z niepewnością $\pm 10\%$ wartości poprawki [13].

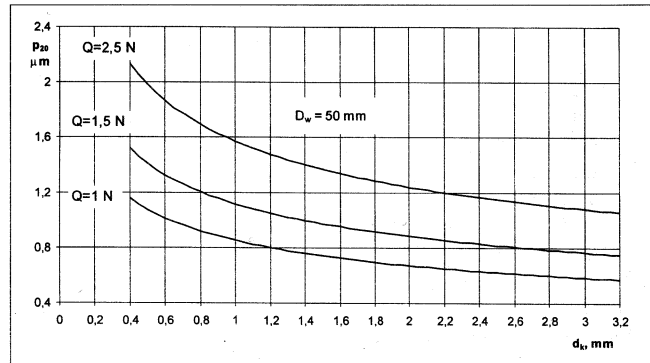
Poprawka p_{20} na spłaszczenie sprężyste kulistych końcówek pomiarowych i wzorca pierścieniowego pod wpływem nacisku pomiarowego

Przy wzorcowaniu długościomierza wzorcem pierścieniowym powstaje pod wpływem nacisku pomiarowego Q spłaszczenie sprężyste układu „kuliste końcówki - wewnętrzna powierzchnia wzorca”.

Poprawkę p_{20} na spłaszczenie sprężyste układu ze stali „kuliste końcówki - wewnętrzna powierzchnia walca” oblicza się według wzoru [15] (rys. 4)

$$p_{20} = 0,960 \sqrt[3]{Q^2} \frac{4 \left(\frac{1}{d_k} - \frac{1}{D_w} \right) \frac{1}{d_k}}{\sqrt[6]{\frac{2}{d_k} - \frac{1}{D_w}}} \mu\text{m} \quad (8)$$

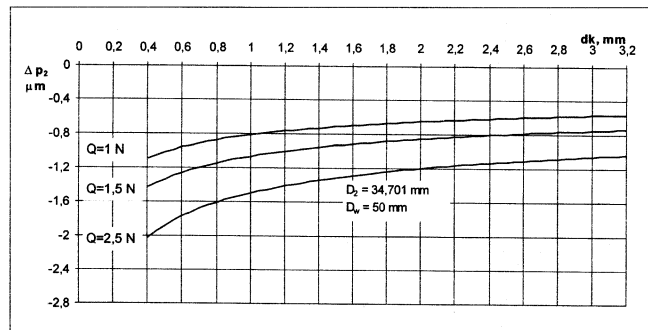
gdzie: Q - nacisk pomiarowy w N , d_k - średnica kulistych końcówek pomiarowych w mm , D_w - średnica wzorca pierścieniowego w mm .



Rys. 4. Wykresy poprawki p_{20} (8) na spłaszczenie sprężyste kulistych końcówek (d_k) i wewnętrznej powierzchni wzorca pierścieniowego o średnicy $D_w = 50$ mm dla różnych nacisków pomiarowych Q

Suma poprawek ($p_2 + p_{20}$) na spłaszczenie sprężyste

Poprawki p_2 i p_{20} (6÷8) mają przeciwne znaki algebraiczne i ich suma Δp_2 stanowi wartość wypadkową spłaszczeń występujących w procedurze pomiarowej D_2 (rys. 5).



Rys. 5. Wykresy sumy Δp_2 poprawek p_2 (6) i p_{20} (8) na spłaszczenie sprężyste kulistych końcówek (d_k) przy styku z gwintem ($D_2 = 34,701$ mm) i wzorcem pierścieniowym ($D_w = 50$ mm) dla różnych nacisków pomiarowych Q

Firma C. Zeiss podała w instrukcji użytkowania długościomierza uniwersalnego [3] wzór na sumę poprawek Δp_{2z} wyprowadzony przy upraszczającym założeniu, że kuliste końcówki zarówno w gwincie jak i w wzorcu pierścieniowym stykają się z płaszczyznami:

$$\Delta p_{2z} = -0,835 \left(\sqrt[3]{\frac{1}{4 \sin^5 \frac{\alpha}{2}} - 1} \right) \sqrt[3]{\frac{Q^2}{d_k}} \mu\text{m} \quad (9)$$

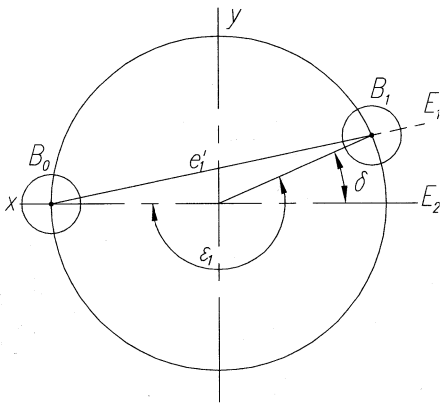
Dla gwintów metrycznych ($\alpha/2 = 30^\circ$) wzór przyjmuje postać

$$\Delta p_{2z} = -0,835 \sqrt[3]{\frac{Q^2}{d_k}} \mu\text{m} \quad (10)$$

Współczynnik 0,835 we wzorach (9, 10) obowiązuje dla styku przedmiotu stalowego ze stalowymi kulistymi końcówkami. Według informacji uzyskanych przez autorów artykułu w firmie OKM Jena (C. Zeiss), dla materiałów „stal-rubin” i „stal-węglaki spiekane” współczynniki odpowiednio wynoszą 0,707 i 0,654. Brak jest jednak dla sumy poprawek Δp_{2z} danych o niepewności jej wyznaczenia, potrzebnych przy obliczaniu niepewności rozszerzonej pomiaru D_2 [16].

Poprawka p_3 na punkt zwrotny odległości środków kulek

Najdłuższy odcinek łączący środki dwóch kulek przylegających - po przeciwnych stronach osi gwintu - do przestrzennie zakrzywionych powierzchni śrubowych nie leży w płaszczyźnie osiowej (rys. 6). W punkcie zwrotnym odległość dwóch leżących naprzeciw siebie punktów linii śrubowej jest większa niż w płaszczyźnie osiowej i dlatego wynik obliczenia D_2 wymaga skorygowania odpowiednią poprawką. Poprawka p_3 (ujemna) występuje tylko w pomiarze dwoma kablakami, tzn. długościomierzem firmy Zeiss (tabl. 1) i jest mało znana. Po raz pierwszy wzór na poprawkę podał w pracy doktorskiej Heimberger, rozwiązując problem ekstremum odległości dwóch punktów linii śrubowej leżących naprzeciw siebie [17]. Poprawką p_3 zajmował się również Berndt [8, 9]. Hartmann - także w pracy doktorskiej - wyprowadził wzór na p_3 określając rachunkiem wektorowym odległość e_1 wspólnej normalnej w obu punktach linii śrubowej [12, 18].



Rys. 6. Widok w kierunku równoległym do osi gwintu położenia kulek w bruzdach gwintu: B_1 - punkt zwrotny odległości środków kulek, E_1 - płaszczyzna pomiarowa, E_2 - płaszczyzna osiowa, e_1 - rzut odległości e_1 między środkami kulek w płaszczyźnie E_1 , δ - kąt odchylenia, $\epsilon_1 = 180^\circ + \delta$

Wbrew przyjmowanemu w praktyce pogładowi płaszczyzna pomiarowa E_1 nie pokrywa się z płaszczyzną osiową E_2 . Kąt odchylenia (rys. 6)

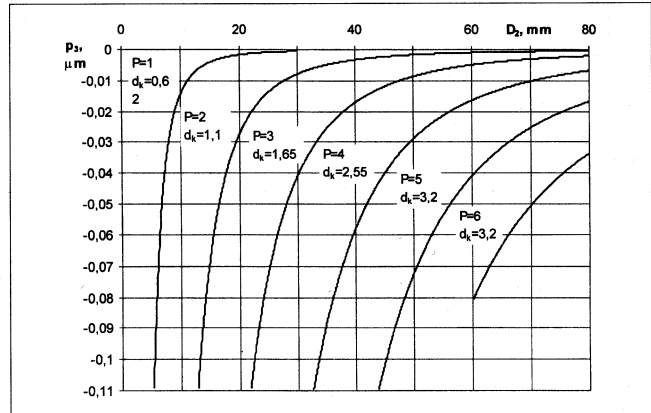
$$\delta = \pi \left(\frac{P}{\pi \cdot m} \right)^2 \left(i - \frac{z_0}{P/2} \right) \quad (11)$$

gdzie: $i = \pm 1, \pm 3, \dots$ występuje w wyrażeniu na kąt położenia kulek w bruzdzie gwintu $\epsilon_1 = i\pi + \delta$. Obie płaszczyzny (E_1, E_2) pokrywają się tylko dla $z_0 = i \cdot P/2$, tzn. gdy odcinek łączący oba środki kulek przecina prostopadłe oś gwintu. Praktycznie jest to możliwe dla 2, 4, 6, ... krotnych gwintów oraz w pomiarze sposobem trójkulkowym (gwinty wewnętrzne) i trójwałeczkowym (gwinty zewnętrzne). Dla gwintów jednokrotnych zawsze $z_0 = 0$, ponadto przyjmuje się $i = 1$, tzn. kulki są położone w bruzdzie gwintu tego samego zwoju, po przeciwnych stronach osi gwintu ($\epsilon_1 = \pi + \delta$). Poprawkę p_3 oblicza się według wzoru (rys. 7)

$$p_3 = -\frac{P^4}{8\pi^2 m^3} \cdot 10^3 \mu\text{m} \quad (12)$$

gdzie P i m podaje się w mm.

Na przykład dla M14 ($P = 2$ mm, $D_2 = 12,701$ mm, $d_k = 1,100$ μm , $m = 12,233$) poprawka $p_3 = -0,11$ μm , natomiast kąt odchylenia $\delta = 29,25' \approx 0,5^\circ$. Z uwagi na zaokrąglanie wyników obliczeń D_2 do całkowitych mikrometrów należy tę poprawkę w pomiarach uwzględnić [19]. Poprawka p_3 przyjmuje większe wartości dla gwintów trapezowych. Na przykład dla gwintu Tr22x8 ($P = 8$ mm, $D_2 = 18$ mm, $d_k = 4,141$ mm) poprawka $p_3 = -10,69$ μm oraz kąt $\delta = 4,2^\circ$ [18].



Rys. 7. Wykresy poprawki p_3 (12) na punkt zwrotny odległości środków kulek

Literatura

- [1] PN-ISO 1502:1998 Gwinty metryczne ISO ogólnego przeznaczenia. Sprawdziany i sprawdzanie.
- [2] MAHR, GÖTTINGEN: Katalog „Fertigungsmesstechnik”
- [3] C. ZEISS, JENA: Universallängenmesser ULM 01-600 C1, Bedienungsanleitung. Druckschriften Nr. 24-G293-1
- [4] G. BERNDT, E. BOCK: Ein neues Verfahren zur Messung von Innengewinden. Zeitschrift für Instrumentenkunde 1930, Heft 6, 7, s. 375-384, 407-416
- [5] J. MALINOWSKI, W. JAKUBIEC: Pomiarzy średnicy podziałowej gwintu walcowego wewnętrznego. Mechanik 1988, nr 5, s. 221-226, 238
- [6] TOMLINSON G.A.: Correction for rake in screw-thread measurement. Proceedings 1927, vol. II, s. 1031-1036
- [7] M. KOCHSIEK: Zur Ermittlung des Flankendurchmessers und der Teilflankenwinkel an Gewinden (dysertacja). TU, Hannover 1972
- [8] G. BERNDT: Die Anlagenkorrekturen bei der Bestimmung des Flankendurchmessers von symmetrischen und unsymmetrischen Aussen- und Innengewinden nach der Dreidrahtmethode oder mittels zweier Kugeln. Zeitschrift für Instrumentenkunde (60) 1940
- [9] G. BERNDT: Anlagekorrekturen bei der Bestimmung des Flankendurchmessers von Gewindelehren mittels dreier Drähte oder zweier Kugeln. Werkstatttechnik und Werksleiter 1940, Heft 17, s. 277-282
- [10] J. MALINOWSKI, W. PŁOWUCHA: Wybór poprawki na skrócenie wałeczków w bruzdach gwintu w pomiarze średnicy podziałowej sposobem trójwałeczkowym. Materiały Krajowego Kongresu Metrologii KKM'98, Politechnika Gdańska 15-18.09.1998, t. 4, str. 91-96
- [11] PN-ISO 724:1995 Gwinty metryczne ISO ogólnego przeznaczenia. Wymiary nominalne.
- [12] M. HARTMANN: Die Aplattungskorrektur bei der Bestimmung des Flankendurchmessers von symmetrischen und unsymmetrischen Aussen- und Innengewinden nach der Drei-drahtverfahren oder mittels zweier Kugeln (dysertacja). TU Dresden 1966
- [13] T. LECHOWSKI: Błędy pomiaru średnicy podziałowej gwintów wywołane naciskiem mierniczym (praca doktorska). Pol. Częst., Częstochowa 1962
- [14] T. LECHOWSKI, L. BUBEL: Wyznaczanie poprawek na odkształcenie sprężyste przy mierzeniu średnicy podziałowej gwintu wałeczkami. Mechanik 1969 nr 2
- [15] W. JAKUBIEC, J. MALINOWSKI: Metrologia wielkości geometrycznych. WNT, W-wa 1999
- [16] J. MALINOWSKI, W. PŁOWUCHA: Niepewność pomiaru średnicy podziałowej sprawdzianów gwintowych pierścieniowych. Materiały III Ogólnokrajowej Konferencji Naukowo-Technicznej „Postępy w technice wytwarzania maszyn”, Politechnika Krakowska 14-15.09.1999, str. 161-170
- [17] R. HEIMBERGER: Die Anlagekorrekturen des Gewindes (dysertacja). TH Dresden 1939
- [18] LOTZE W., HARTMANN M.: Die vollständige Anlagekorrektur für das Zweikugel-Gewindemessverfahren. Feingerätetechnik 1968, Heft 10, s. 435-438
- [19] J. MALINOWSKI, W. PŁOWUCHA: Analiza wybranych błędów w pomiarze średnicy podziałowej D_2 dokładnych gwintów wewnętrznych długościomierzem uniwersalnym. Materiały VIII Konferencji Naukowo-Technicznej „Metrologia w technikach wytwarzania maszyn”, Pol. Szczecińska 13-15.09.1999, t. II, str. 349-353