

Błąd temperaturowy w pomiarach geometrycznych

Temperature error in geometrical measurements

WŁADYSŁAW JAKUBIEC
WOJCIECH PŁOWUCHA
PAWEŁ ROSNER *

DOI: 10.17814/mechanik.2016.11.505

W artykule omówiono problematykę błędu temperaturowego w aspekcie współczesnego podejścia do szacowania niepewności pomiarów. Wykonano analizy składowych niepewności pomiaru pochodzących od wpływu temperatury dla przypadków stosowania i niestosowania korekcji. Podano informacje ważne do podejmowania decyzji o celowości korekcji błędu temperaturowego.

SŁOWA KLUCZOWE: niepewność pomiaru, błąd temperaturowy, korekcja błędu temperaturowego, budżet niepewności

The paper presents issues connected with temperature error in the context of up-to-day approach to uncertainty evaluation. Evaluation of uncertainty components arising from temperature influences are presented for the case of applying correction and without correction. The information provided should be sufficient to decide whether the temperature error correction is purposive.

KEYWORDS: measurement uncertainty, temperature error, temperature error correction, uncertainty budget

Błąd temperaturowy w pomiarach wielkości geometrycznych jest bardzo istotną składową niepewności pomiaru pochodzącą od warunków środowiskowych. W niniejszym artykule przedstawiono analizę literatury oraz wyniki analiz i badań dotyczących praktyki w traktowaniu tego błędu. Analizy te są w pełni zgodne ze współczesnym podejściem do szacowania niepewności [1] i stanowią uzupełnienie do wcześniejszych publikacji autorów [2, 3].

Pochodzenie błędu temperaturowego wiąże się ze zjawiskiem rozszerzalności cieplnej. Z tym faktem jest związana umowa, że w budowie maszyn postać geometryczną części maszyn definiuje się dla temperatury 20°C, zwanej temperaturą odniesienia. W odniesieniu do weryfikacji geometrii wyrobów oznacza to, że w czasie pomiaru zarówno temperatura przyrządu, jak i przedmiotu, w całej ich objętości, powinny być równe 20°C.

Zachowanie jednakowej temperatury w całej objętości jest trudne do uzyskania – wymaga długiego czasu pobytu w pomieszczeniu o stabilnych warunkach temperaturowych. Niespełnienie tego warunku, szczególnie dla przedmiotów o złożonej postaci geometrycznej, skutkuje trudnymi do oceny zmianami kształtu. W odniesieniu do złożonych systemów pomiarowych (np. współrzędnościowych maszyn pomiarowych) wyrównanie temperatury w całej objętości nie jest możliwe ze względu na istnienie wewnętrznych źródeł ciepła. W warunkach pomiarów przemysłowych zarówno mierzone przedmioty, jak i przyrządy pomiarowe narażone są ponadto na wpływy zewnętrzne (grzejniki, światło słoneczne, przeciągi).

W literaturze dotyczącej niepewności pomiaru błędy pomiaru są najczęściej oznaczane za pomocą litery δ (delta) z indeksem związanym z jego źródłem. Termin „błąd”

oznacza tutaj, zgodnie ze słownikiem metrologii, konkretną, aczkolwiek nieznaną (albo znaną w przybliżeniu), wartość ze znakiem algebraicznym.

W przypadku szacowania niepewności pomiaru metodą typu B za pomocą litery a oznacza się największą (w rozumieniu bezwzględnej wartości) wartość, jaką dany błąd może osiągnąć, a wartość odpowiedniej składowej niepewności standardowej u oblicza się na podstawie wartości a i przyjętego rozkładu prawdopodobieństwa danego błędu [2, 3].

Błąd temperaturowy

Najwygodniejsza do dalszych analiz postać wzoru na błąd temperaturowy δ_t jest następująca:

$$\delta_t = \delta_{tA} + \delta_{tD} \quad (1)$$

w którym:

$$\delta_{tA} = L[(\alpha - \alpha_s)(\theta_s - 20^\circ\text{C})] \quad (2)$$

$$\delta_{tD} = L[\alpha(\theta - \theta_s)] \quad (3)$$

gdzie: L – mierzona długość (formalnie powinno być L_s – długość wzorca [4, 5]), α – współczynnik rozszerzalności cieplnej przedmiotu, α_s – współczynnik rozszerzalności cieplnej przyrządu, θ – temperatura przedmiotu, θ_s – temperatura przyrządu (wzorca).

Z tej postaci widać, że błąd temperaturowy jest sumą dwóch składowych. Pierwsza, δ_{tA} , zależy od różnicy współczynników rozszerzalności cieplnej przyrządu i przedmiotu oraz od odstępstwa temperatury przyrządu od temperatury odniesienia. Jeżeli współczynniki rozszerzalności przedmiotu i przyrządu są takie same lub przyrząd ma temperaturę odniesienia, to wartość tej składowej jest równa zeru.

Druga, δ_{tD} , zależy od różnicy temperatur przedmiotu i przyrządu. Jeżeli temperatury przedmiotu i przyrządu są takie same to wartość tej składowej jest równa zeru.

Korekcja błędu temperaturowego

Do obliczenia błędu lub poprawki temperaturowej potrzebna jest znajomość współczynników rozszerzalności materiału przedmiotu i przyrządu (wzorca). Okazuje się, że wartości tych współczynników, dla tego samego rodzaju materiału, są znane z małą dokładnością i nawet dla tego samego rodzaju materiału mogą się znacznie różnić. Na przykład uważa się, że dla stali, w zależności od składu i rodzaju obróbki cieplnej, współczynnik ten przyjmuje wartości z przedziału $(11,5 \pm 2) \cdot 10^{-6} \text{ } 1^\circ\text{C}$ (prawie $\pm 20\%$ wartości nominalnej), a w przypadku stali, z której wykonywane są płytki wzorcowe, z przedziału $(11,5 \pm 1) \cdot 10^{-6} \text{ } 1^\circ\text{C}$ (prawie $\pm 10\%$ wartości nominalnej). W niektórych dokumentach [6] spotyka się informacje o węższych przedziałach (np. $\pm 2\%$ dla próbek pobranych z dużego kawałka stali po wyżarzeniu, $\pm 3\%$ w przypadku próbek o nominalnie takim samym

* Dr hab inż. Władysław Jakubiec prof. ATH (wjakubiec@ath.bielsko.pl), dr inż. Wojciech Płowucha (wpłowucha@ath.bielsko.pl), mgr inż. Paweł Rosner (prosner@ath.bielsko.pl) – Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej

składzie chemicznym i różnych obróbkach cieplnych czy $\pm 10\%$ w przypadku stali po różnych obróbkach cieplnych).

Do obliczenia błędu temperaturowego potrzebna jest znajomość temperatury przedmiotu i przyrządu. Tutaj istotny problem polega na tym, że temperatury te zmieniają się w czasie, a ponadto trudno ocenić, jaki jest rozkład temperatury w całej objętości przyrządu czy przedmiotu. O ile współczesne przyrządy do pomiaru temperatury pozwalają na pomiar z niepewnością (rozszerzoną) rzędu $\pm 0,1^\circ\text{C}$, to wyniki pomiaru dotyczą jedynie małego fragmentu powierzchni mierzonego obiektu i maksymalną wartość, jaką w warunkach przemysłowych może osiągnąć błąd pomiaru temperatury szacuje najczęściej jako $\pm 1^\circ\text{C}$.

Niepewność standardową wyznaczenia poprawki oblicza się według wzoru na niepewność pomiaru pośredniego:

$$u_t = L \sqrt{(\theta - 20^\circ\text{C})^2 u_\alpha^2 + \alpha^2 u_\theta^2 + (\theta_s - 20^\circ\text{C})^2 u_{\alpha s}^2 + \alpha_s^2 u_{\theta s}^2} \quad (4)$$

gdzie $u_{\theta s}$, u_θ , $u_{\alpha s}$ i u_α to odpowiednie standardowe niepewności pomiaru.

Na przykład, w przypadku przedmiotu stalowego, mierzonego stalowym przyrządem pomiarowym, jeżeli temperatura przyrządu wynosi 21°C a temperatura przedmiotu 23°C to błąd temperaturowy $\delta_t = 23 \mu\text{m/m}$ (całość stanowi składowa δ_{tD}), a niepewność standardowa jego wyznaczenia $u_t = 10 \mu\text{m/m}$. Tak więc niepewność rozszerzona jest praktycznie równa poprawce, co pozwala na uznanie, że stosowanie korekcji, szczególnie przy pomiarach wymiarów rzędu kilkudziesięciu milimetrów, nie ma sensu.

Wartość poprawki wynika ze wzoru (1): składowa δ_{tA} , jest równa zero, ponieważ współczynniki rozszerzalności przedmiotu i przyrządu są sobie równe, składowa δ_{tD} wynosi $23 \mu\text{m/m}$ przy $\alpha = 11,5 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ oraz $\theta - \theta_s = 2^\circ\text{C}$.

Wartość niepewności wynika ze wzoru (4); przyjęto mianowicie, że:

- wartości współczynników rozszerzalności α i α_s mogą się różnić maksymalnie o następujące wartości: $a_\alpha = 2 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ i $a_{\alpha s} = 1 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, czyli przy założeniu rozkładu jednostajnego odpowiednie niepewności standardowe wynoszą $u_\alpha = 1,16 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ i $a_{\alpha s} = 0,58 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$,
- bezwzględne wartości błędów pomiaru temperatury, $a_\theta = a_{\theta s}$, nie przekraczają 1°C , czyli przy założeniu rozkładu jednostajnego odpowiednie niepewności standardowe wynoszą $u_\theta = u_{\theta s} = 0,58^\circ\text{C}$.

Podobnie, przy założeniu, że przedmiot jest wykonany z aluminium o współczynniku rozszerzalności $\alpha = (24 \pm 2) \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, otrzymuje się wartość błędu temperaturowego $\delta_t = 61 \mu\text{m/m}$ przy niepewności standardowej jego wyznaczenia wynoszącej $u_t = 16 \mu\text{m/m}$. W tym przypadku składowa $\delta_{tA} = 13 \mu\text{m/m}$, a składowa $\delta_{tD} = 48 \mu\text{m/m}$.

Wyniki obliczeń dla powyższych, przykładowych danych, zestawiono w tablicy. W tablicy umieszczono również analogiczne wyniki dla przypadku, kiedy przyrząd (wzorzec) wykonany jest z zeroduru, dla którego współczynnik rozszerzalności wynosi $\alpha_s = (0 \pm 0,1) \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$.

Warto zwrócić uwagę, że wartość δ_{tD} nie zależy od materiału przyrządu (wzorca) – zależy tylko od materiału przedmiotu. Widać również, że niepewność wyznaczenia błędu temperaturowego jest najniższa w przypadku przyrządu (wzorca) z zeroduru. Z tego powodu wzorce dokładnych

Tablica. Zestawienie wyników obliczeń dotyczących błędu temperaturowego

przedmiot	stal				aluminium			
	δ_{tA}	δ_{tD}	δ_t	u_t	δ_{tA}	δ_{tD}	δ_t	u_t
przyrząd	$\mu\text{m/m}$							
stal	0	23	23	10	13	48	61	16
zerodur	12	23	35	7,5	24	48	72	14

maszyn pomiarowych, a także wzorce kreskowe służące do wzorcowania przyrządów optycznych wykonuje się ostatnio z tego materiału.

Pomiary bez korekcji – szacowanie niepewności

Jeżeli nie stosuje się korekcji to wartości skrajne dwóch wcześniej wymienionych składowych błędów temperaturowego można oszacować według wzorów [7]:

$$a_{tD} = L \cdot \bar{\alpha} \cdot \Delta t \quad (5)$$

$$a_{tA} = L \cdot \Delta \alpha \cdot \Delta t_{20} \quad (6)$$

w których: a_{tA} – oszacowanie największej wartości składowej błędu temperaturowego wynikającej z różnicy współczynników rozszerzalności oraz odstępstwa temperatury przyrządu od temperatury odniesienia, a_{tD} – oszacowanie największej wartości składowej błędu temperaturowego wynikającej z różnicy temperatur przedmiotu i przyrządu, $\bar{\alpha} = (\alpha + \alpha_s)/2$ – jest średnią wartością współczynników rozszerzalności cieplnej przyrządu i przedmiotu, Δt – oszacowaniem największej różnicy temperatur przyrządu i przedmiotu, $\Delta \alpha$ – jest oszacowaniem największej różnicy współczynników rozszerzalności przyrządu i przedmiotu, Δt_{20} – jest oszacowaniem największego odstępstwa temperatury przyrządu od temperatury odniesienia.

Przyjmując dla obu składowych błędów rozkład prawdopodobieństwa V, otrzymuje się następujące wzory na niepewności standardowe: $u_{tD} = 0,71 a_{tD}$, $u_{tA} = 0,71 a_{tA}$.

Zakładając, że pomiary wykonywane są w dobrych warunkach temperaturowych można przyjąć, że maksymalne odstępstwo od temperatury odniesienia wynosi $\Delta t_{20} = 3^\circ\text{C}$, a maksymalna różnica temperatur przyrządu i przedmiotu $\Delta t = 1^\circ\text{C}$. Dla takich danych $u_t = 10 \mu\text{m/m}$.

Podsumowanie

Ze względu na liniowy charakter błędu temperaturowego przy pomiarach małych wymiarów rzadko stosuje się jego korekcję. W przypadku dokładnych pomiarów dużych wymiarów oprócz korygowania błędu temperaturowego warto wykonywać działania w celu zmniejszenia składowej niepewności pochodzącej od odstępstwa od temperatury odniesienia. Z tego powodu dla długich płytek wzorcowych (dłuższych niż 100 mm) warto wyznaczać współczynnik rozszerzalności, który może być wyznaczony z niepewnością rzędu $\pm 0,02 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ [8].

W przypadku użycia wzorców z zeroduru korekcja błędu temperaturowego jest konieczna, bowiem wartość błędu temperaturowego jest większa.

LITERATURA

1. JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections) Evaluation of measurement data. Guide to the expression of uncertainty in measurement.
2. Jakubiec W., Płowucha W., Rosner P. „Szacowanie niepewności pomiaru w budowie maszyn. Budżet niepewności”. *Mechanik*. 2016
3. Jakubiec W., Płowucha W., Rosner P. „Szacowanie niepewności pomiaru w budowie maszyn. Dyskusja budżetu niepewności”. *Mechanik*. 2016.
4. PN-EN ISO 14253-2:2011 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Kontrola wyrobów i wyposażenia pomiarowego za pomocą pomiarów. Część 2: Wytyczne szacowania niepewności pomiarów w GPS, przy wzorcowaniu wyposażenia pomiarowego i sprawdzaniu wyrobów.
5. Jakubiec W., Malinowski J. „Metrologia wielkości geometrycznych”. WNT. 2004.
6. PN-ISO/TR 16015 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Błędy systematyczne i składowe niepewności pomiarów przy pomiarach długości spowodowane oddziaływaniami cieplnymi.
7. EA-4/02 Wyrażanie niepewności pomiaru przy wzorcowaniu. European cooperation for Accreditation. 1999.
8. EUROMET.L-K2. EUROMET Project No. 602. Calibration of long gauge blocks. Final report. NPL. 2006.