

METODA POMIARU ODKSZTAŁCEŃ CIEPLNYCH TŁOKA ANALIZA BŁĘDU POMIARU

GRZEGORZ MITUKIEWICZ, ZBIGNIEW PAWELSKI

Politechnika Łódzka, Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn

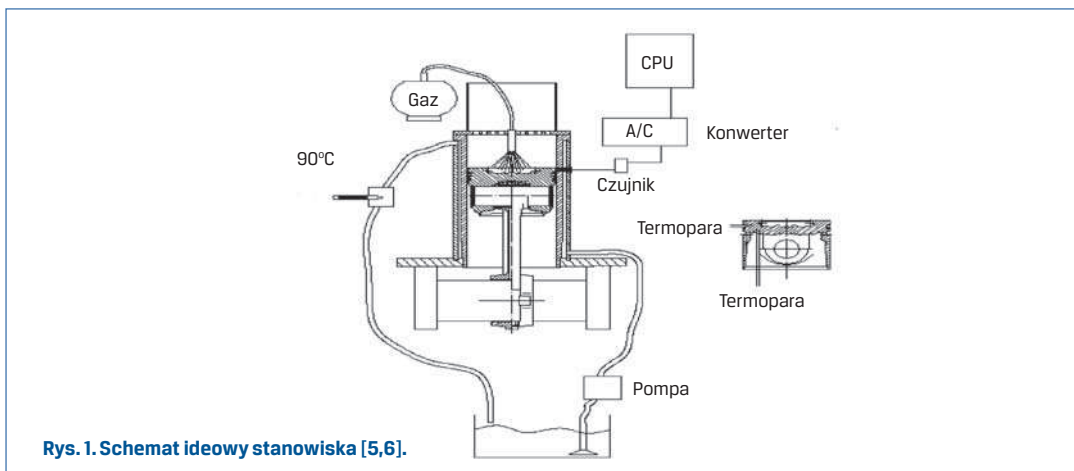
Streszczenie

W Katedrze Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn Politechniki Łódzkiej zbudowano stanowisko do pomiaru odkształceń cieplnych tłoka. W artykule przedstawiono sposób pomiaru odkształceń cieplnych tłoka na tym stanowisku. Do pomiaru wykorzystano czujniki laserowe do pomiaru odległości, które mierzą odległość czujnika od przedmiotu z rozdzielczością $4\mu\text{m}$. Tłok podczas nagrzewania rozszerza się w wyniku czego następuje zmniejszenie się odległości pomiędzy czujnikiem a tłokiem. Wykorzystując zależności geometryczne wyznaczano zmianę wymiarów geometrycznych tłoka. Temperatura tłoka była mierzona za pomocą 4 termopar umieszczonych w pobliżu denka tłoka. Pomiary odległości dokonywane były jednocześnie w dwóch osiach: prostopadle do osi sworznia tłokowego i w osi sworznia tłokowego. Opisano stanowisko badawcze wyposażone w palnik służący do podgrzewania tłoka oraz układ stabilizacji temperatury. Specjalnie w tym celu skonstruowany palnik zasilany był gazem propan-butan. Aby zapewnić właściwe warunki spalania gazu dodatkowo do mieszalnika doprowadzono sprężone powietrze. Regulując wydatek gazu i powietrza można było wpływać na temperaturę płomienia. Układ stabilizacji temperatury pozwalał na utrzymywanie stałej temperatury cieczy chłodzącej na poziomie 60°C . W drugiej części artykułu przedstawiono przeprowadzoną analizę, systematycznego błędu pomiaru oraz obróbkę statystyczną wyników wstępnych pomiarów na tym stanowisku.

Słowa kluczowe: silniki spalinowe, tłoki, obciążenie termiczne

1. Wstęp

Ocenę odkształceń cieplnych tłoka podejmowano wielokrotnie, o czym świadczy załączona literatura [1,2,3,4,5]. Uwzględniając zamieszczone w niej ograniczenia w Katedrze Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn Politechniki Łódzkiej zbudowano stanowisko do pomiaru odkształceń cieplnych tłoka. Jego schemat ideowy przedstawiono na rysunku 1.

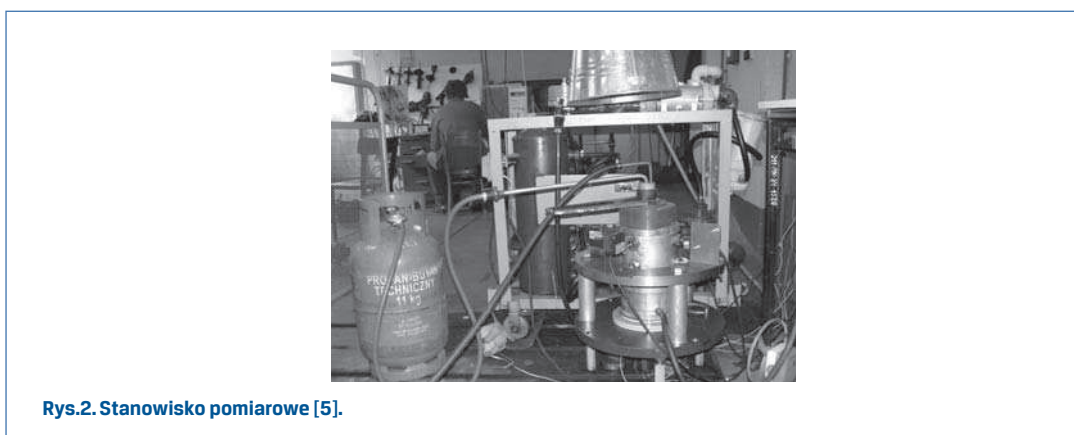


Badania polegają tu na bezpośrednim pomiarze odkształceń tłoka przy pomocy czujników laserowych, odbiciowych, a wielkością mierzoną bezpośrednio jest odległość tłoka od czujnika. Tłok podczas nagrzewania rozszerza się w wyniku czego następuje zmniejszenie się odległości pomiędzy czujnikiem a tłokiem. Temperatura tłoka jest mierzona za pomocą termopar [7,8], umieszczonych w pobliżu denka tłoka jak pokazano na rysunku 1.

Stanowisko przewidziano do pomiaru tłoków silnika SW680, których nominalna średnica wynosi ok. 127 mm. Po wykonaniu wstępnych obliczeń symulacyjnych okazało się, że zmiana wymiarów średnicy tłoka może wynosić ok. 700 μm , a maksymalne różnice przy zastosowaniu różnych komór spalania mogą sięgać 40 μm . Zdecydowano się więc na zastosowanie czujników laserowych o rozdzielczości 4 μm , aby zapewnić odpowiednią dokładność pomiaru.

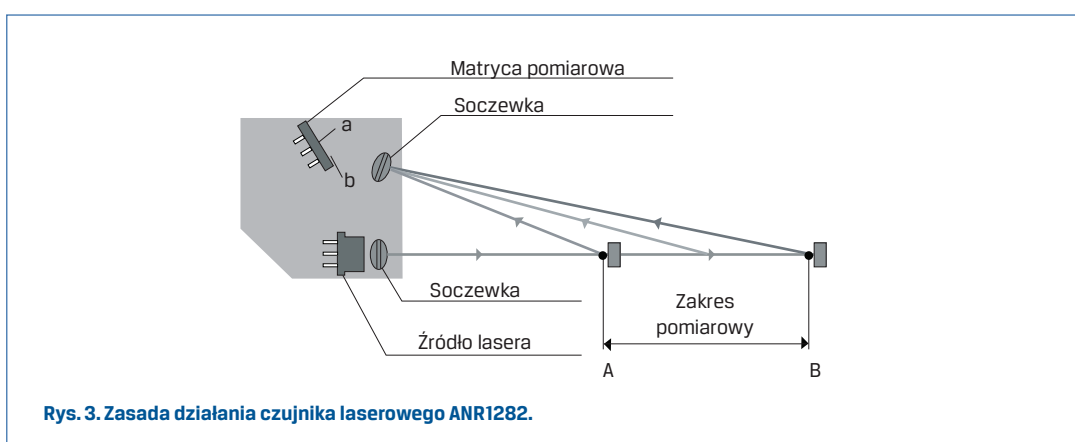
Na przedstawionym stanowisku badawczym (rys.2), mierzono odkształcenia cieplne tłoków:

- o jednakowej objętości komory spalania umieszczonej w osi tłoka różniące się jedynie kształtem komory spalania [6]
- z jednakową komorą spalania różnie umieszczonej w stosunku do osi tłoka [9].

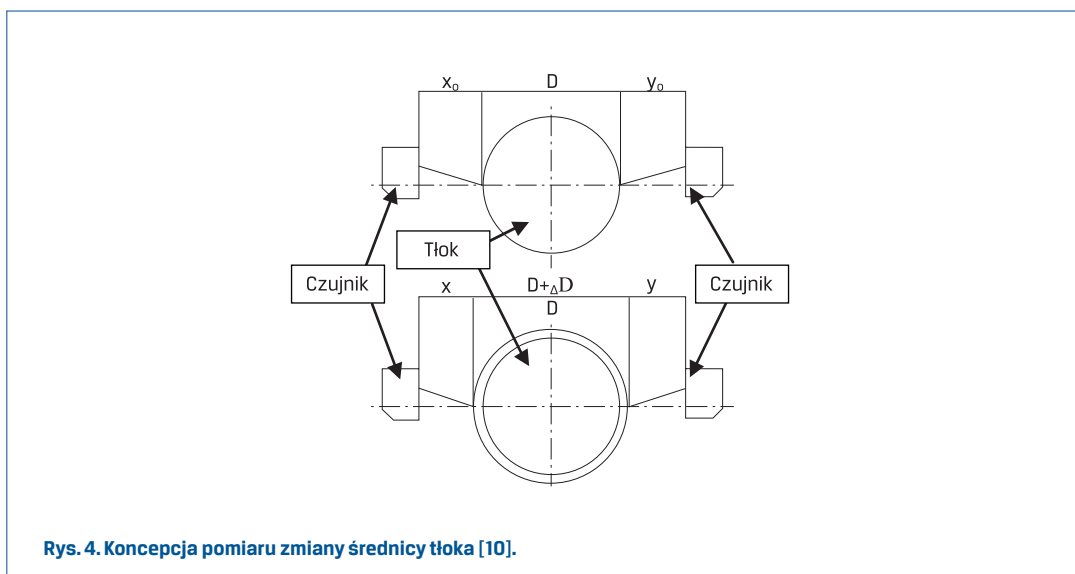


2. Koncepcja pomiaru zmiany średnicy tłoka

Rysunek 3 przedstawia czujnik laserowy, który wykorzystano do pomiaru zmiany wymiarów geometrycznych tłoka. Zasada pomiaru jest następująca. Jeżeli przedmiot znajduje się w punkcie „A”, to wiązka lasera odbita od niego pada na matrycę w punkcie „a” i jako wynik otrzymujemy pewną wartość napięcia. Jeżeli natomiast przedmiot znajdzie się w punkcie „B”, to wiązka lasera odbita od niego pada na matrycę w punkcie „b”, a w wyniku otrzymujemy większą wartość napięcia.



Na stanowisku zamontowano cztery takie czujniki laserowe w dwóch zestawach, tak aby dokonywały pomiaru w osi sworznia i prostopadle do osi sworznia. Na podstawie tych danych można określić zmianę wymiarów geometrycznych tłoka w mierzonej płaszczyźnie (rys.4).



Oznaczając odległość pomiędzy czujnikami jako „L” można zapisać:

$$L = X_0 + D + Y_0. \quad (1)$$

Po podgrzaniu odległość L można przedstawić w postaci:

$$L = X + D + \Delta D + Y. \quad (2)$$

Zakładając, że odległość między czujnikami nie ulega zmianie podczas pomiaru to:

$$X_0 + D + Y_0 = X + D + \Delta D + Y,$$

stąd zmiana średnicy tłoka:

$$\Delta D = (X_0 + Y_0) - (X + Y). \quad (3)$$

Warto zauważyć, że do wyznaczenia zmiany średnicy tłoka nie jest konieczna znajomość jego średnicy. Unika się w ten sposób błędu wstępnego pomiaru średnicy tłoka.

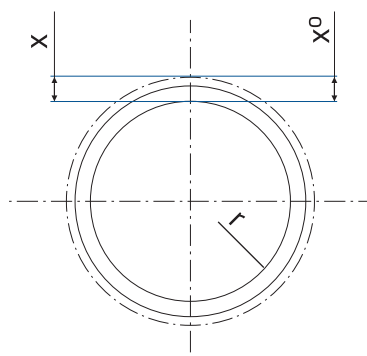
3. Analiza błęd pomiaru

Na błąd systematyczny pomiarów wykonywanych na przedstawionym wyżej stanowisku składają się dwa źródła błędów:

1. błędy wynikające z niewłaściwego określenia wartości wielkości fizycznych wchodzących w skład zjawiska rozszerzalności cieplnej (δ_1)
2. błędy wynikające z niedokładności geometrycznych
 - a. niewłaściwego ustawienie czujnika względem tłoka
 - mimoosiowość e (δ_2),
 - odchylenie kątowne α (δ_3),
 - odchylenie kątowne β (δ_4),
 - b. niewłaściwego położenie obiektu badań
 - pochylenie osi tłoka względem osi cylindra o kąt ψ (δ_5),
 - przesunięcie tłoka w (δ_6).

1. błędy wynikające z niewłaściwego określenia wartości wielkości fizycznych wchodzących w skład zjawiska rozszerzalności cieplnej

Do wielkości tych zaliczyć należy: współczynnik rozszerzalności cieplnej materiału tłoka (alfa), promień tłoka w temperaturze odniesienia (r) i przyrost temperatury (ΔT).



Rys. 5. Różnice w odkształceniu wynikające z błęd określenia współczynnika rozszerzalności cieplnej i temperatury.

Zgodnie z definicją możemy zapisać, że błąd pomiaru to różnica pomiędzy wielkością zmierzoną X° , a nieznaną wielkością rzeczywistą X , stąd

$$\delta_1 = X^{\circ} - X = \alpha^{\circ} \cdot 2 \cdot r^{\circ} \cdot \Delta T^{\circ} - \alpha \cdot 2 \cdot r \cdot \Delta T. \quad (4)$$

Wielkości bez indeksu „ \circ ” odnoszą się do wartości rzeczywistych.

W tabeli 1 przedstawiono zmierzone wartości szukanych wielkości fizycznych

Tabela 1. Wielkości fizyczne mające wpływ na błąd δ_1 .

Wielkość fizyczna	Symbol	Wartość	Niepewność
współczynnik rozszerzalności cieplnej	α°	$2,32 \cdot 10^{-5} \text{ m/K}$	$\pm 1 \cdot 10^{-7} \text{ m/K}$
promień tłoka	r°	0,0635 m	$\pm 0,0001 \text{ m}$
Zmiana temp.	ΔT°	450 K	$\pm 5 \text{ K}$

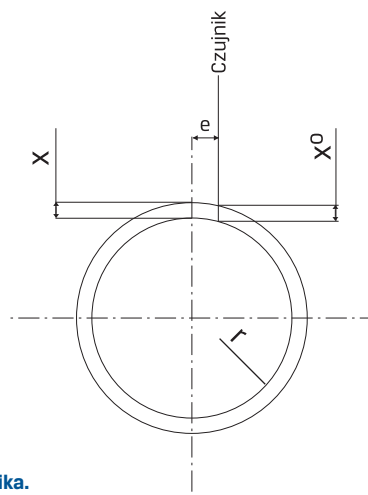
2. błędy wynikające z niedokładności geometrycznych

Na ten rodzaj błędów składają się geometryczne zależności pomiędzy usytuowaniem czujnika oraz tłoka. Za wzorcowe rozwiązanie przyjęto układ, w którym czujnik laserowy umieszczony jest tak, że światło lasera pada promieniowo na powierzchnię boczną tłoka, a tłok znajduje się dokładnie w osi tulei cylindrowej (nie jest przesunięty ani pochylony). Założono, walcowy kształt powierzchni bocznej tłoka.

Poniżej opisano możliwe przypadki odbiegające od przyjętego układu.

a. niewłaściwe ustawienie czujnika względem tłoka,

- mimoosiowość e,



Rys 6. Mimoosiowe ustawienie czujnika.

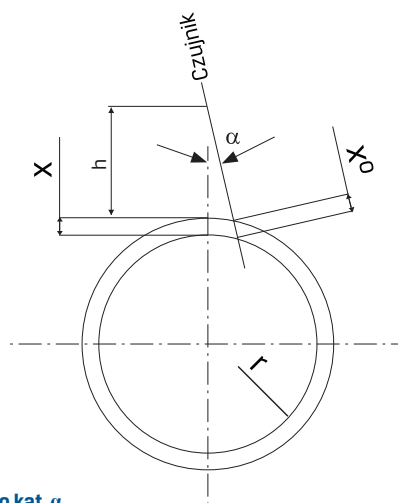
$$\delta_2 = X^0 - X = \alpha \cdot 2 \cdot r \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{e^2}{r^2}}} - \alpha \cdot 2 \cdot r \cdot \Delta T$$

(5)

Tabela 2. Wielkości fizyczne mające wpływ na błąd δ_2 .

Wielkość fizyczna	Symbol	Wartość	Niepewność
mimoosiowość	e	0 m	$\pm 0,003$ m

- odchylenie czujnika o kąt α w stosunku do osi sworznia,

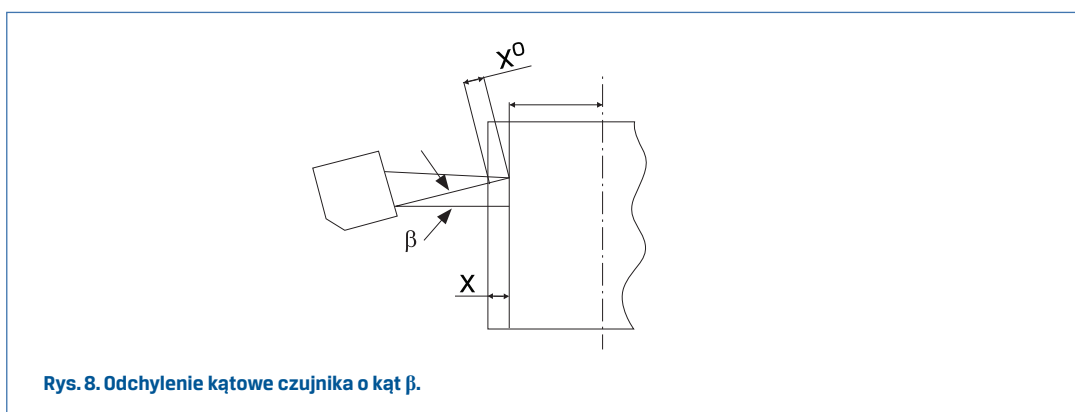
Rys 7. Odchylenie katowe czujnika o kąt α .

$$\delta_3 = X^\circ - X = \text{alfa} \cdot 2 \cdot r \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(h+r)^2}{r^2} \cdot \sin^2 \alpha}} - \text{alfa} \cdot 2 \cdot r \cdot \Delta T \quad (6)$$

Tabela 3. Wielkości fizyczne mające wpływ na błąd δ_3 .

Wielkość fizyczna	Symbol	Wartość	Niepewność
Odległość czujnika od tłoka	h	0,08 m	$\pm 0,004$ m
Kąt	α	0°	$\pm 1^\circ$

- odchylenie katowe czujnika o kąt β w stosunku do osi sworznia,

Rys. 8. Odchylenie katowe czujnika o kąt β .

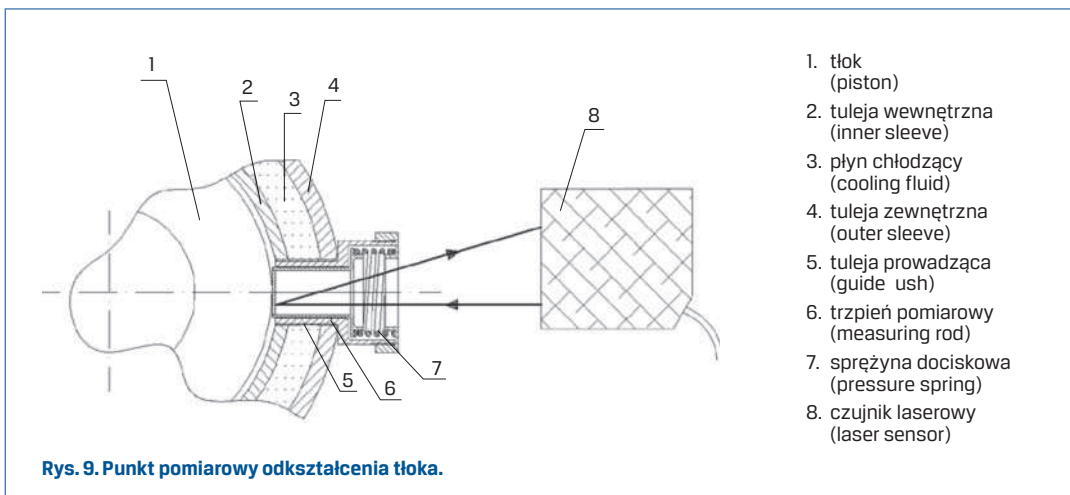
$$\delta_4 = X^\circ - X = \text{alfa} \cdot 2 \cdot r \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{\cos \beta} - \text{alfa} \cdot 2 \cdot r \cdot \Delta T \quad (7)$$

Tabela 4. Wielkości fizyczne mające wpływ na błąd δ_4 .

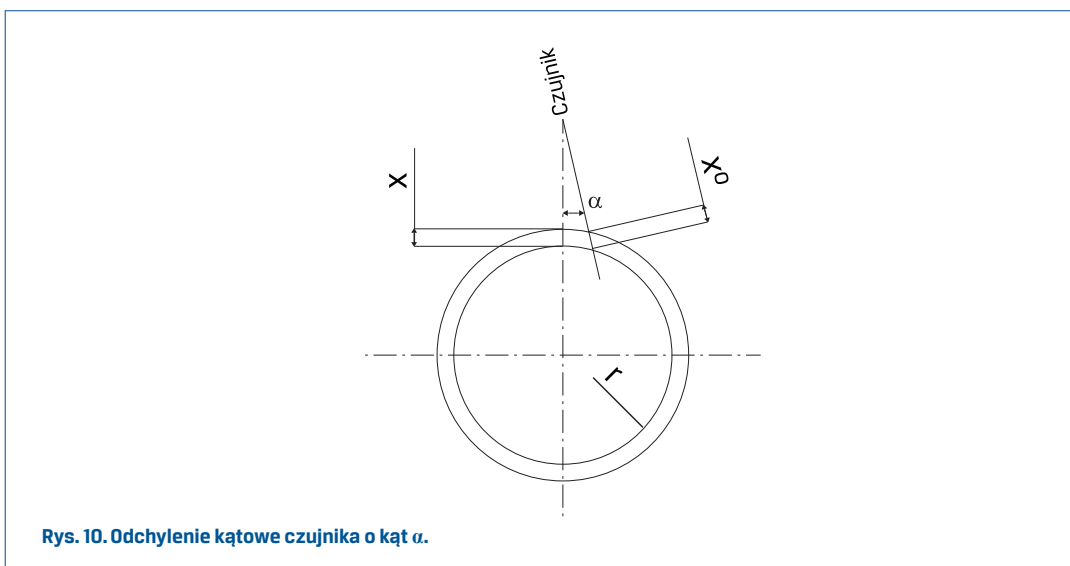
Wielkość fizyczna	Symbol	Wartość	Niepewność
Kąt	β	0°	$\pm 3^\circ$

W celu zmniejszenia (wyeliminowania) składników błędu wynikającego z niewłaściwego ustawienia czujnika względem tłoka zmieniono sposób pomiaru wprowadzając specjalne trzpienie pomiarowe.

Przedstawiony na rysunku 9 sposób pomiaru odległości pomiędzy czujnikiem a tłokiem wykorzystuje trzpienie pomiarowe mające za zadanie nie tylko ochronić sygnał pomiarowy przed działaniem czynników zewnętrznych (ogień – promieniowanie podczerwone, para wodna) ale również dać pewność, że niezależnie od usytuowania tłoka pomiar odległości jest dokonywany na średnicy tłoka.



Nie można już mówić o błędzie spowodowanym mimoosiowym ustawieniem czujnika ($\delta_2 = 0$). Poza tym znacząco zmniejsza się błąd spowodowany odchyleniem kątowym α , gdyż nie składa się na niego błąd określenia odległości czujnika od tłoka (rys.10).



$$\delta_3 = X^0 - X = \alpha \cdot 2 \cdot r \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{\cos \alpha} - \alpha \cdot 2 \cdot r \cdot \Delta T \quad (8)$$

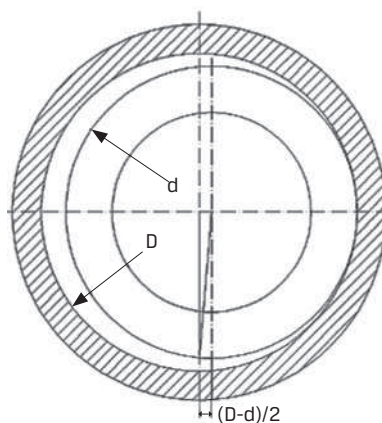
Tabela 5. Wielkości fizyczne mające wpływ na błąd δ_3 .

Wielkość fizyczna	Symbol	Wartość	Niepewność
Kąt	α	0°	$\pm 1^\circ$

Sposób określenia błędu δ_d spowodowanego odchyleniem kątowym β nie ulega zmianie.

Zanim przystąpiono do określenia błędu pomiaru wynikającego z niewłaściwego usytuowania tłoka, wyliczono maksymalne przesunięcie tłoka jak również maksymalny możliwy kąt pochylenia osi tłoka względem osi cylindra.

Luz między tłokiem a cylindrem możemy wyznaczyć na podstawie rysunku 11.

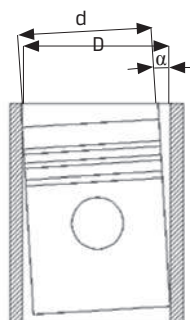


Rys. 11. Położenie tłoka w tulei cylindrowej.

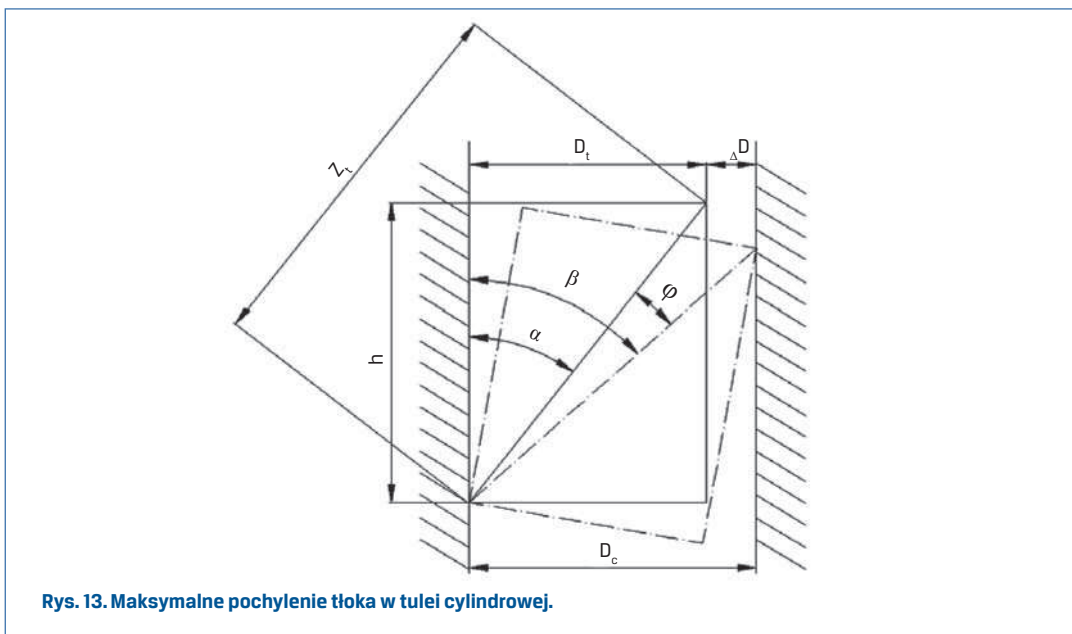
Przyjmując jako znane: średnicę tłoka $D = 127$ mm, i średnicę tulei $D_c = 128$ mm, maksymalne przesunięcie tłoka w tulei możemy wyznaczyć z zależności:

$$w = \frac{D_c - D}{2} = \frac{128 - 127}{2} = 0,5 \text{ mm}$$

Następnie określono maksymalne pochylenie osi tłoka względem osi cylindra (rys.12).



Rys. 12. Pochylenie osi tłoka względem osi cylindra.



Wykorzystując zależności trygonometryczne z rysunku 13:

$$Z_t = \sqrt{h^2 + D_t^2} = \sqrt{173^2 + 127^2} = 214,61 \text{ mm}$$

$$\sin \alpha = \frac{D_t}{Z_t} = 0,5918 \quad \alpha = 36,2848^\circ$$

$$\sin \beta = \frac{D_c}{Z_t} = 0,5964 \quad \beta = 36,6125^\circ$$

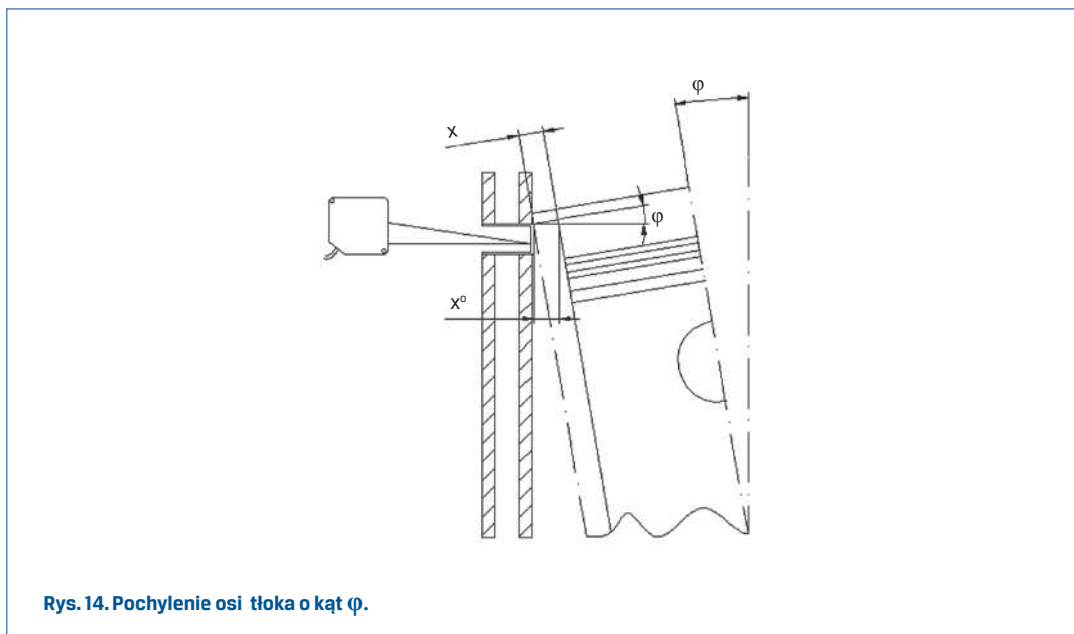
stąd,

$$\psi = \beta - \alpha = 0,3277^\circ$$

Wiedząc, że maksymalne liniowe przesunięcie tłoka w tulei cylindrowej wynosi 0,5 mm, a największe możliwe pochylenie osi tłoka względem osi cylindra $0,33^\circ$ przystąpiono do analizy wpływu tych wielkości na wynik pomiaru.

b. błąd wynikający z niewłaściwego położenia obiektu badań (tłoka).

- pochylenie osi tłoka względem osi cylindra o kąt φ



$$\delta_5 = X^\circ - X = \alpha \cdot 2 \cdot r \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{\cos \varphi} - \alpha \cdot 2 \cdot r \cdot \Delta T . \quad (9)$$

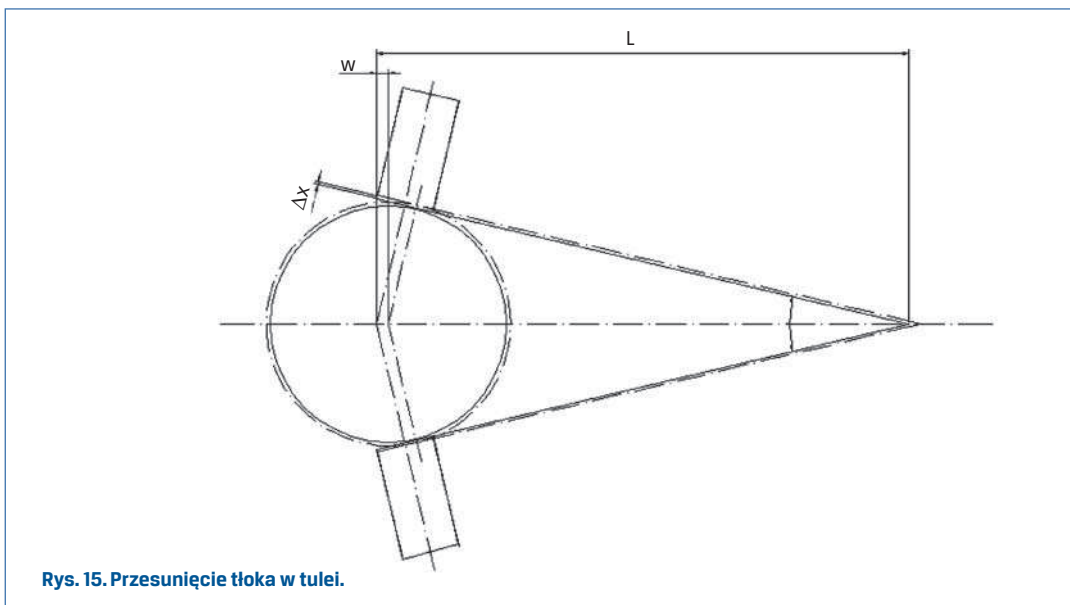
Tabela 6. Wielkości fizyczne mające wpływ na błąd δ_5 .

Wielkość fizyczna	Symbol	Wartość	Niepewność
Kąt	φ	0°	$\pm 0,33^\circ$

- przesunięcie tłoka w,

W przypadku pełnej prostopadłości osi trzpieni pomiarowych do kierunku przesunięcia tłoka błąd wynikający z tego przesunięcia wynosi 0. Problem pojawia się dopiero w przypadku niedokładnego wykonania otworów prowadzących trzpienie (rys 15). Zakładając, że położenie tłoka podczas pomiaru nie ulega zmianie, okazuje się, że nawet niewłaściwe usytuowanie trzpieni pomiarowych nie wpływa na wynik pomiaru.

$$\delta_6 = X^\circ - X = 0 \quad (10)$$



Rys. 15. Przesunięcie tłoka w tulei.

Po zestawieniu poszczególne składniki systematycznego błędu pomiaru wynoszą:

- błąd wynikający z niewłaściwego określenia wielkości fizycznych wchodzących w skład zjawiska rozszerzalności cieplnej:

$$\delta_1 = X^\circ - X = \text{alfa}^\circ \cdot 2 \cdot r^\circ \cdot \Delta T^\circ - \text{alfa} \cdot 2 \cdot r \cdot \Delta T$$

- błędy wynikające z niedokładności geometrycznych:

$$\delta_2 = X^\circ - X = 0$$

$$\delta_3 = X^\circ - X = \text{alfa} \cdot 2 \cdot r \cdot \Delta T \cdot \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1 \right)$$

$$\delta_4 = X^\circ - X = \text{alfa} \cdot 2 \cdot r \cdot \Delta T \cdot \left(\frac{1}{\cos \beta} - 1 \right)$$

$$\delta_5 = X^\circ - X = \text{alfa} \cdot 2 \cdot r \cdot \Delta T \cdot \left(\frac{1}{\cos \varphi} - 1 \right)$$

$$\delta_6 = X^\circ - X = 0.$$

Błąd systematyczny wyznaczenia ΔX° można wyznaczyć z zależności::

$$\Delta = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta \delta_1}{\partial \text{alfa}} \cdot \Delta \text{alfa} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta \delta_1}{\partial r} \cdot \Delta r \right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta \delta_1}{\partial \Delta T} \cdot \Delta \Delta T \right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta \delta_3}{\partial \alpha} \cdot \Delta \alpha \right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta \delta_4}{\partial \beta} \cdot \Delta \beta \right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta \delta_5}{\partial \varphi} \cdot \Delta \varphi \right)^2}$$

(11)

Pochodne cząstkowe przedstawiają się następująco:

- pochodna względem współczynnika rozszerzalności cieplnej α :

$$\frac{\partial \Delta \delta_1}{\partial \alpha} = 2 \cdot r \cdot \Delta T$$

- pochodna względem promienia tłoka r :

$$\frac{\partial \Delta \delta_1}{\partial r} = \alpha \cdot 2 \cdot \Delta T$$

- pochodna względem zmiany temperatury ΔT :

$$\frac{\partial \Delta \delta_1}{\partial \Delta T} = \alpha \cdot 2 \cdot r$$

- pochodna względem kąta pochylenia α :

$$\frac{\partial \Delta \delta_3}{\partial \alpha} = \alpha \cdot 2 \cdot r \cdot \Delta T \cdot \left(-\frac{\sin \alpha}{\cos^2 \alpha}\right)$$

- pochodna względem kąta pochylenia β :

$$\frac{\partial \Delta \delta_4}{\partial \beta} = \alpha \cdot 2 \cdot r \cdot \Delta T \cdot \left(\frac{\sin \beta}{\cos^2 \beta}\right)$$

- pochodna względem kąta pochylenia φ :

$$\frac{\partial \Delta \delta_5}{\partial \varphi} = \alpha \cdot 2 \cdot r \cdot \Delta T \cdot \left(\frac{\sin \varphi}{\cos^2 \varphi}\right)$$

Wpływ poszczególnych wielkości na wynik pomiaru odkształcenia cieplnego tłoka przedstawiono w tabeli nr 7.

Tabela 7. Wpływ poszczególnych wielkości fizycznych na wynik pomiaru.

Wielkość fizyczna	Symbol	Wartość	Niepewność	Sposób określenia	Błąd
współczynnik rozszerzalności cieplnej alfa	alfa	$2,32 \cdot 10^{-5}$ m/K	$\pm 1 \cdot 10^{-7}$ m/K	$\frac{\partial \Delta X^\circ}{\partial \text{alfa}} \cdot \Delta \text{alfa}$	5,72 μm
promień tłoka	r	0,0635 m	$\pm 0,0001$ m	$\frac{\partial \Delta X^\circ}{\partial r} \cdot \Delta r$	2,09 μm
zmiana temperatury	ΔT	450 K	± 5 K	$\frac{\partial \Delta X^\circ}{\partial \Delta T} \cdot \Delta \Delta T$	14,73 μm
pochylenie czujnika	α	0°	$\pm 1^\circ$	$\frac{\partial \Delta X^\circ}{\partial \alpha} \cdot \Delta \alpha$	0,40 μm
pochylenie czujnika	β	0°	$\pm 3^\circ$	$\frac{\partial \Delta X^\circ}{\partial \beta} \cdot \Delta \beta$	3,65 μm
pochylenie osi tłoka	φ	0°	$\pm 0,33^\circ$	$\frac{\partial \Delta X^\circ}{\partial \varphi} \cdot \Delta \varphi$	0,04 μm
Błąd systematyczny	Δ			Δ	19,61 μm

Największy wpływ na dokładność pomiaru ma dokładność określenia zmiany temperatury. Biorąc pod uwagę fakt, że w wyniku wstępnych pomiarów wykonanych na opisanym stanowisku zmiana wymiarów geometrycznych tłoka wynosi ok. 700 m to systematyczny błąd pomiaru sięga 3%.

4. Pomiary

4.1 Warunki badań

Zmianę warunków badań można uzyskać przez zmianę:

- ustawień regulatora temperatury cieczy chłodzącej,
- położenia zaworu regulacyjnego ciśnienia cieczy chłodzącej,
- składu mieszanki gazu propan-butan z powietrzem za pomocą zaworów regulacyjnych.

Dla prowadzonych badań przyjęto następujące nastawy:

- temperatura poniżej której załącza się grzałka $T = 60^\circ\text{C}$,
- temperatura powyżej której wyłącza się grzałka $T = 62^\circ\text{C}$,
- temperatura powyżej której otwiera się elektrozawór doprowadzający zimną wodę do chłodnicy $T = 63^\circ\text{C}$,
- zawór ciśnienia cieczy chłodzącej $p = 0,2\text{bar}$
- ciśnienie gazu propan-butan $p = 36\text{ mbar}$
- ciśnienie powietrza $p = 2\text{ atm}$

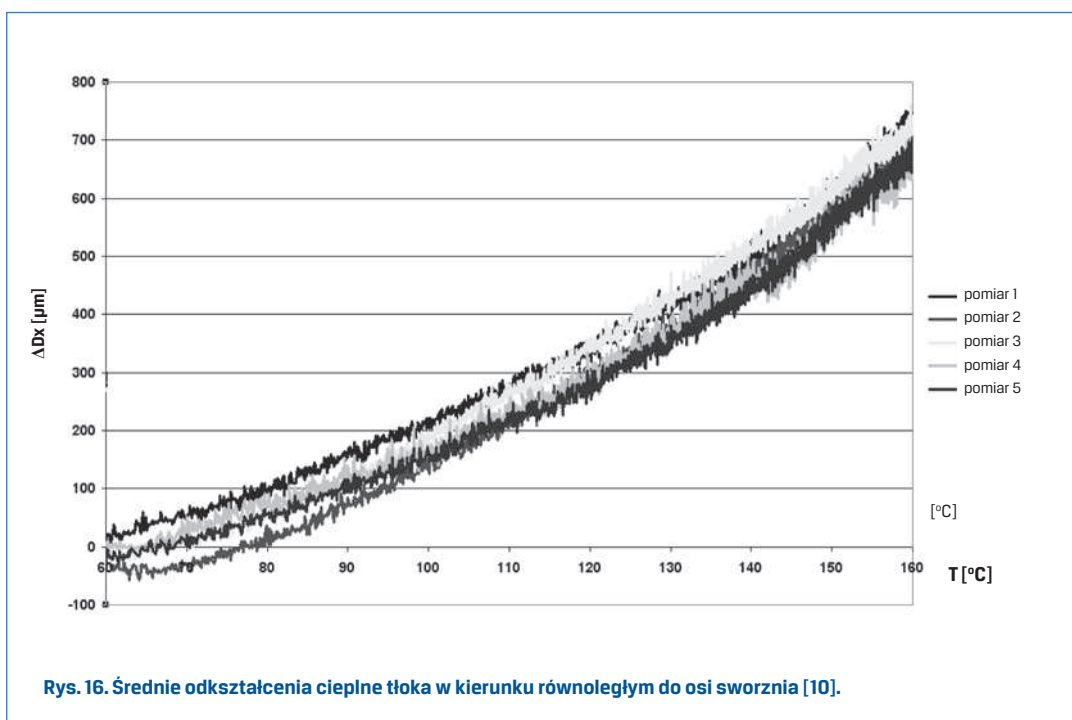
4.2 Przebieg badań

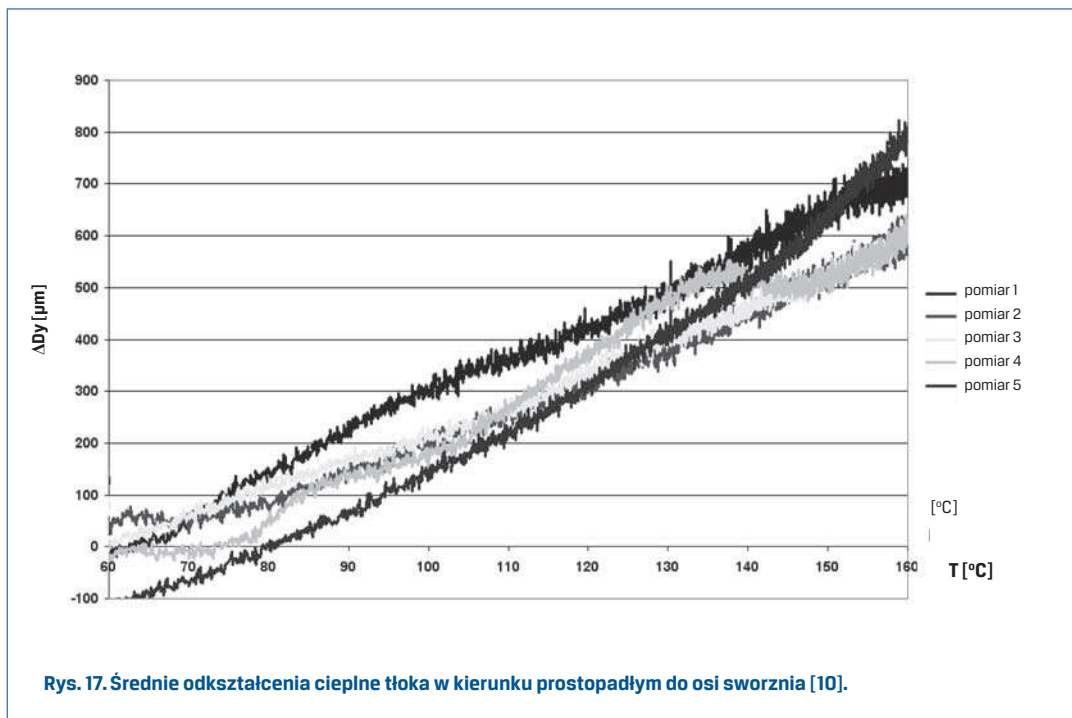
Metodyka badań polegała na:

- nagraniu stanowiska do temperatury 60°C,
- uruchomieniu palnika i rozpoczęciu podgrzewania z jednoczesną archiwizacją wyników pomiarów czterech czujników laserowych i czterech czujników temperatury,
- po 30 minutach grzania wyłączano palnik i pozostawiano stanowisko do osiągnięcia temperatury wejściowej,
- Pomiar powtarzano kilkakrotnie dla każdego tłoka.

4.3 Wyniki pomiarów i ich analiza

Na rysunkach 16 i 17 przedstawiono odkształcenia cieplne tłoka w kierunku równoległym i prostym do osi sworznia uzyskane podczas 5 pomiarów [10].





Rys. 17. Średnie odkształcenia cieplne włoka w kierunku prostopadłym do osi sworznia [10].

Ze względu na ilość powtórzeń (5 razy) obróbkę statystyczną wyników przeprowadzono zgodnie z rozkładem t-Studenta, dla którego:

- estymatorem wartości oczekiwanej jest średnia arytmetyczna:

$$\bar{x} = \frac{1}{n_p} \cdot \sum_{i=1}^n x_i, \quad (12)$$

- estymatorem odchylenia standardowego jest odchylenie standardowe dla małej próby:

$$S_n = t_n \cdot \sqrt{\frac{1}{(n_p - 1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (13)$$

- odchylenie standardowe średniej arytmetycznej:

$$S_n = t_n \cdot \sqrt{\frac{1}{n_p \cdot (n_p - 1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (14)$$

gdzie:

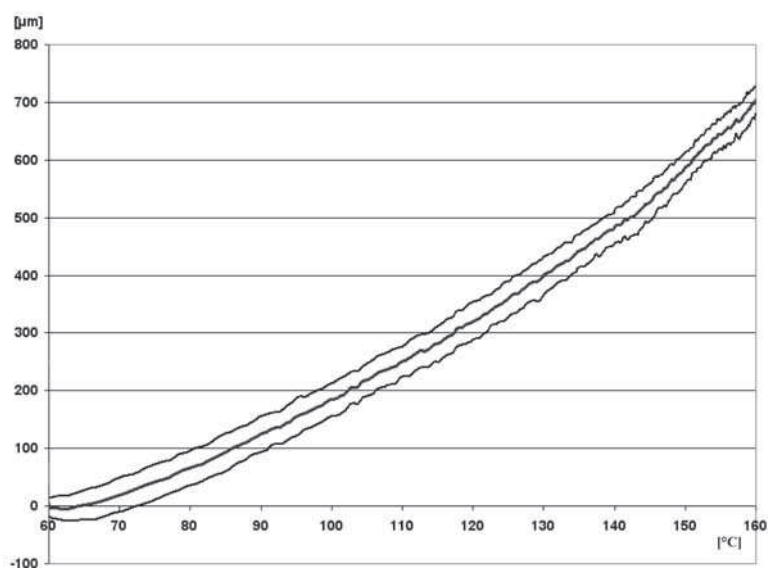
n_p – liczba pomiarów,

x_i – wynik pojedynczego pomiaru,

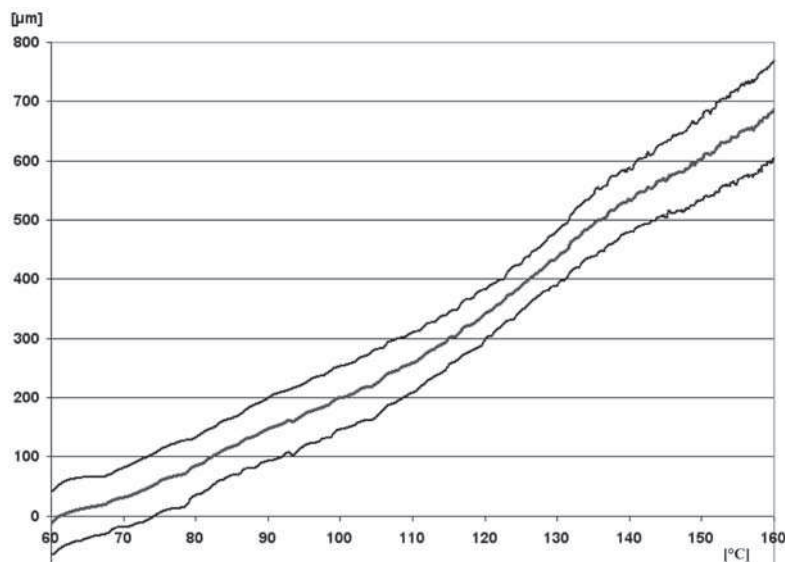
t_n – współczynnik liczbowy, zależny od liczby pomiarów i przyjętego poziomu ufności.

Wartość poziomu ufności przyjęto na poziomie 95%.

Na rysunkach 18 i 19 przedstawiono wyniki pomiarów po przeprowadzeniu analizy statystycznej. Krzywa środkowa ilustruje średnią zmianę wymiarów geometrycznych tłoka, a krzywe zewnętrzne to granice przedziału ufności.



Rys. 18. Odkształcenia cieplne tłoka w kierunku równoległym do osi sworznia [10].



Rys. 19. Odkształcenia cieplne tłoka w kierunku prostopadłym do osi sworznia [10].

Po przeprowadzeniu analizy statystycznej wyników pomiarów okazało się, że maksymalne odkształcenia cieplne wynoszą:

- wzdłuż osi sworznia 711 ± 28
- prostopadle do osi sworznia 692 ± 78

i są to wartości zgodne z wynikami symulacji [8,9]. Warto zauważyć, że błąd systematyczny wyników uzyskiwanych na tym stanowisku ($19,61\mu\text{m}$) jest mniejszy od błędu przypadkowego ($28\mu\text{m}$).

5. Wnioski

Wykonana analiza błędu pomiaru na przedstawionym stanowisku pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

1. różnicowa metoda pomiaru wykorzystana podczas pomiarów stanowiskowych znacznie zwiększa dokładność prowadzonych badań. Można dzięki temu uniknąć błędu pomiaru średnicy oraz pomiaru usytuowania czujników laserowych. Mierzoną wielkością jest bezpośrednio zmiana wymiarów geometrycznych tłoka.
2. metoda pomiarowa jest zadowalająca, gdyż systematyczny błąd pomiaru jest znacznie mniejszy od błędu przypadkowego (statystycznego).

Literatura

- [1] ZABŁOCKI, M.: *Badania rozwojowe tłokowych silników spalinowych*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków – Janowice 1979.
- [2] JASKÓLSKI J., BUDZIK, G.: *Stacjonarny przepływ ciepła w tłoku silnika spalinowego*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2003.
- [3] JASKÓLSKI, J.: *Stanowiska do badań obciążeń cieplnych i mechanicznych tłoków silników spalinowych*. Silniki spalinowe nr 1/1979.
- [4] JASKÓLSKI, J. AND ARMATYS, J.: *Stanowisko do pomiaru odkształceń liniowych tłoków silników spalinowych*. Materiały konferencyjne Politechniki Krakowskiej. Konmot 76.
- [5] MITUKIEWICZ, G. AND PAWELSKI, Z.: *Stanowisko do pomiaru odkształceń cieplnych tłoka*. Kontom 2008, Zeszyt 11, ss. 239-250.
- [6] MITUKIEWICZ, G. AND SYGNIWICZ, J., *Odkształcenia cieplne tłoka silnika SW680 w zależności od kształtu zastosowanej komory spalania*. KONES 2007.
- [7] MITUKIEWICZ, G. AND SYGNIWICZ, J.: *O możliwości pomiaru temperatur tłoka*. Archiwum Motoryzacji, PTNM 4/2007, ss. 331-349.
- [8] GARDYŃSKI, L. AND WEROŃSKI, A., *Stanowisko do pomiarów chwilowych temperatur denka tłoka*. Materiały konferencyjne KONES '97.
- [9] MITUKIEWICZ, G. AND PAWELSKI Z.: *Odkształcenia cieplne tłoka silnika SW680 w zależności od położenia zastosowanej komory spalania*. Kones 2008, tom 4, ss. 359-367.
- [10] MITUKIEWICZ, G.: *Ocena wpływu kształtu komory spalania i miejsca jej usytuowania na odkształcenia cieplne tłoka*. Praca doktorska 2009.