

OSŁONA TERMOPARY CHŁODZONA WODĄ JAKO NARZĘDZIE ZAPOBIEGAJĄCE ZAKŁÓCENIOM ZEWNĘTRZNYM PODCZAS POMIARÓW TEMPERATUR SZYBKOZMIENNYCH SPALIN W KANALE WYLOTOWYM SILNIKA OKRĘTOWEGO

Rudnicki Jacek
Puzdrowska Patrycja
Marszałkowski Konrad

*Politechnika Gdańska
Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa
Katedra Siłowni Morskich i Lądowych
ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
e-mail: jacekrud@pg.edu.pl, konmarsz@pg.edu.pl, patpuzdr@pg.edu.pl*

Streszczenie

W niniejszym artykule przedstawiono problematykę wpływu zakłóceń ze stanowiska badawczego na wyniki pomiarów temperatur szybkozmiennych gazów wylotowych maszyn tłokowych. Pokazano wykonaną przez autorów niniejszego artykułu osłonę termopary chłodzoną wodą, mającą na celu minimalizację jednego z wymienionych zakłóceń, jakim jest nagrzewanie się obudowy termopary od kanału wylotu spalin, w którym jest zamontowana. Przedstawiono wyniki pilotażowych badań laboratoryjnych przeprowadzonych na silniku wysokoprężnym Farymann typu D10, podczas których zarejestrowano dwa przebiegi temperatur szybkozmiennych spalin w kanale wylotowym: mierzone za pomocą termopary ze spoiną odkrytą w osłonie ceramicznej oraz przy użyciu termopary zgrzewanej do płaszcza dodatkowo chłodzonej wodą. Pokazano także wyniki parametrów dodatkowych, takich jak: ciśnienie spalin w komorze spalania, ciśnienie spalin w kolektorze wylotowym, sygnał GMP oraz obraz z kamery termowizyjnej zarejestrowany podczas badań. Przeprowadzona analiza wyników badań pozwoliła na określenie wniosków istotnych dla dalszych badań diagnostycznych opartych na parametrze, jakim jest temperatura szybkozmienna.

Słowa kluczowe: temperatura szybkozmienna, parametry diagnostyczne, pomiar temperatury gazów

1. Wstęp

Podczas dotychczasowych prac badawczych prowadzonych przez autorów niniejszego opracowania związanych z pomiarem szybkozmiennych temperatur i ciśnień gazów wylotowych maszyn tłokowych w celu diagnozowania elementów konstrukcyjnych

otaczających przestrzenie robocze napotkano istotny problem metrologiczny, jakim jest wpływ czynników zewnętrznych na wyniki pomiarów. Po wyeliminowaniu większości zakłóceń pochodzących ze stanowiska laboratoryjnego i jego otoczenia do rozwiązania pozostał problem nagrzewania się płaszcza termopary od kanału, w którym jest wkręcona. W związku z tym zbudowano stanowisko pomiarowe do rejestrowania temperatury szybkozmiennej za pomocą termoelementu z płaszczem chłodzonym wodą.

2. Wpływ czynników zewnętrznych na pomiar temperatury szybkozmiennej gazów

Przeprowadzenie analizy wyników badań eksperymentalnych przeprowadzanych dotychczas na silnikach i sprężarkach tłokowych [Korczewski i Zacharewicz 2007, Olczyk 2007; Brown i in. 2008], podczas których rejestrowano szybkozmiennie ciśnienia i temperatury gazów wylotowych pozwala na zauważenie kilku istotnych problemów metrologicznych. Ma to szczególne znaczenie zarówno podczas badań laboratoryjnych, jak i w czasie diagnozowania obiektów rzeczywistych. Najważniejsze z nich to inercyjność termoelementów oraz wpływ czynników zewnętrznych (ze stanowiska laboratoryjnego i z otoczenia) na otrzymywany wynik pomiarów. Dąży się, zatem do zminimalizowania tego wpływu na wynik rejestrowanych temperatur szybkozmiennych przez dobór odpowiednich metod pomiarowych oraz aparatury badawczej. Bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na dokładność rejestrowanych temperatur szybkozmiennych jest nagrzewanie się płaszcza termopary od materiału kanału wylotowego, w którym jest zamontowana. Jediną metodą pozwalającą na zmniejszenie tego zakłócenia jest izolacja termiczna czujnika.

Większość producentów proponuje trzy wersje wykonania termopary płaszczowej, które różnicuje czas opóźnienia odpowiedzi na zadawane wymuszenie temperatury gazu: ze spoiną izolowaną od płaszcza, ze spoiną zgrzewaną do płaszcza i ze spoiną odkrytą. Podczas badań laboratoryjnych prowadzonych przez autorów niniejszego opracowania [Puzdrowska 2014; Marszałkowski i Puzdrowska 2015] stosowano początkowo termoparę zgrzewaną do płaszcza wykonanego z inconellu, w przypadku której wpływ nagrzewania był największy. Następnym krokiem było zastosowanie termoelementu z płaszczem ceramicznym, jednak materiał ten także nie pozwolił na zminimalizowanie tego wpływu w stopniu zadowalającym. Uznano, zatem, że najlepszym izolatorem będzie płaszcz wodny chłodzący końcowy odcinek termopary. Zastosowanie termopary chłodzonej wodą jest rozwiązaniem rzadko stosowanym, niemającym szerokiego zastosowania w przemyśle oraz nauce.

3. Płaszcz wodny termopary typu K – eksperyment pilotażowy

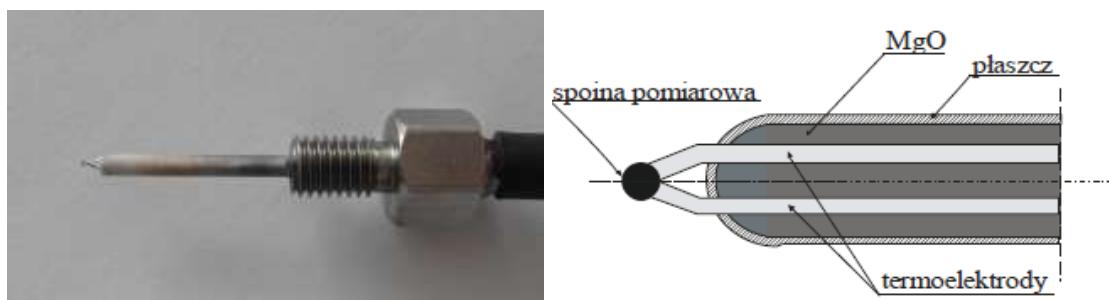
Badania pilotażowe mające na celu stwierdzenie przydatności metody eliminacji wpływu nagrzewania się złącza pomiarowego termopary przy pomocy chłodzenia z użyciem płaszcza wodnego zostały przeprowadzone na stanowisku laboratoryjnym jednocylindrowego silnika o zapłonie samoczynnym Farymann typu D10. Silnik został sprzężony za pomocą przekładnię pasowej z prądnicą prądu stałego o mocy maksymalnej 3,5 kW. Regulując prąd wzbudzenia prądnicy i tym samym jej obciążenie zapewniano różne stany obciążenia silnika badawczego. W trakcie badań rejestrowano następujące wskaźniki pracy silnika:

- temperatura szybkozmienna spalin rejestrowana termoparą typu K w osłonie ceramicznej,
- temperatura szybkozmienna spalin rejestrowana termoparą typu K chłodzona dodatkowo płaszczem wodnym,
- ciśnienie wewnątrz cylindrowe,
- ciśnienie spalin w kolektorze wylotowym,
- sygnał górnego martwego położenia tłoka,

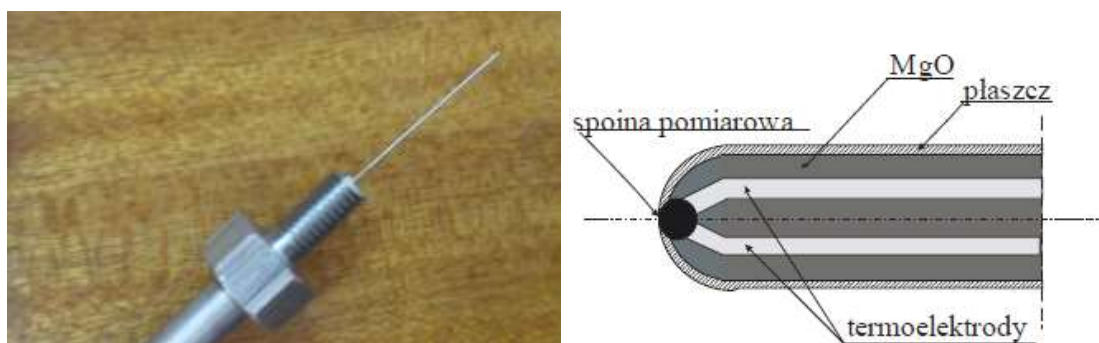


- prąd i napięcie twornika prądniczy,
- temperaturę powierzchni silnika, kolektora wylotowego oraz elementów pomiarowych podczas badania za pomocą kamery termowizyjnej.

Przeprowadzono badania porównawcze dla dwóch rozwiązań konstrukcyjnych termopary typu K. W badaniach użyto termopar ze spoiną odkrytą w osłonie ceramicznej (rys. 1) oraz termoparę ze spoiną zgrzewaną do płaszcza w osłonie z inconellu chłodzonej wodą (rys. 2) umieszczoną w płaszczu wodnym (rys. 3).



Rys. 1. Widok i przekrój wzdłużny końcowego odcinka termopary płaszczonej ze spoiną odkrytą w płaszczu ceramicznym



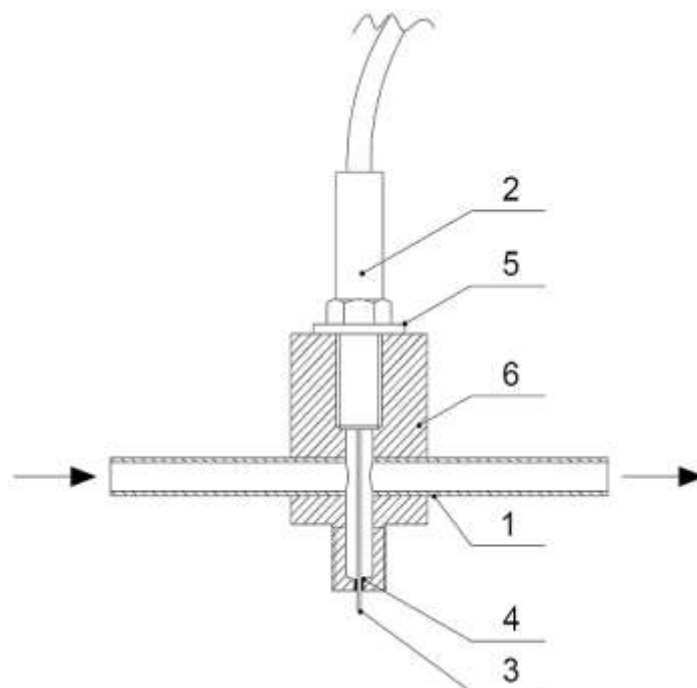
Rys. 2. Widok i przekrój wzdłużny końcowego odcinka termopary płaszczonej ze spoiną zgrzewaną do płaszcza wykonanego z inconellu



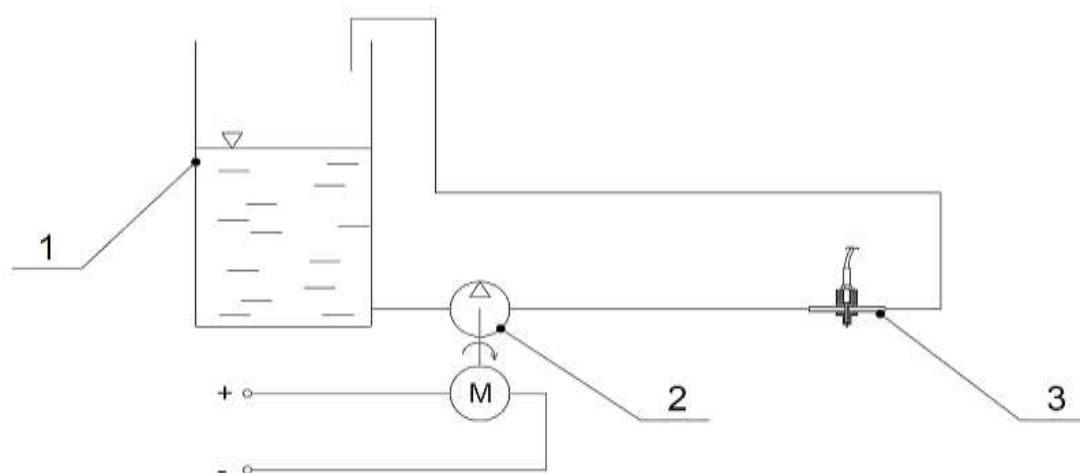
Rys. 3. Widok ogólny termopary płaszczonej umieszczonej w osłonie z płaszczem wodnym

W celu jak najefektywniejszego odizolowania końcowego odcinka termopary o długości 20 mm od ogrzewającego ją strumienia spalin, zamknięto ją w szczelnej osłonie zostawiając

tylko niewielki fragment spiny pomiarowej w świetle kanału wylotowego silnika. Długość wystającego z płaszcza wodnego odcinka wraz ze spiną wynosi 2 mm, natomiast pozostała, zamknięta w osłonie część termopary omywana jest strumieniem wody – płaszczem wodnym. Szczegóły rozwiązania konstrukcyjnego przedstawiono na rys. 4, natomiast schemat ideowy układu chłodzenia przedstawiono na rys. 5.

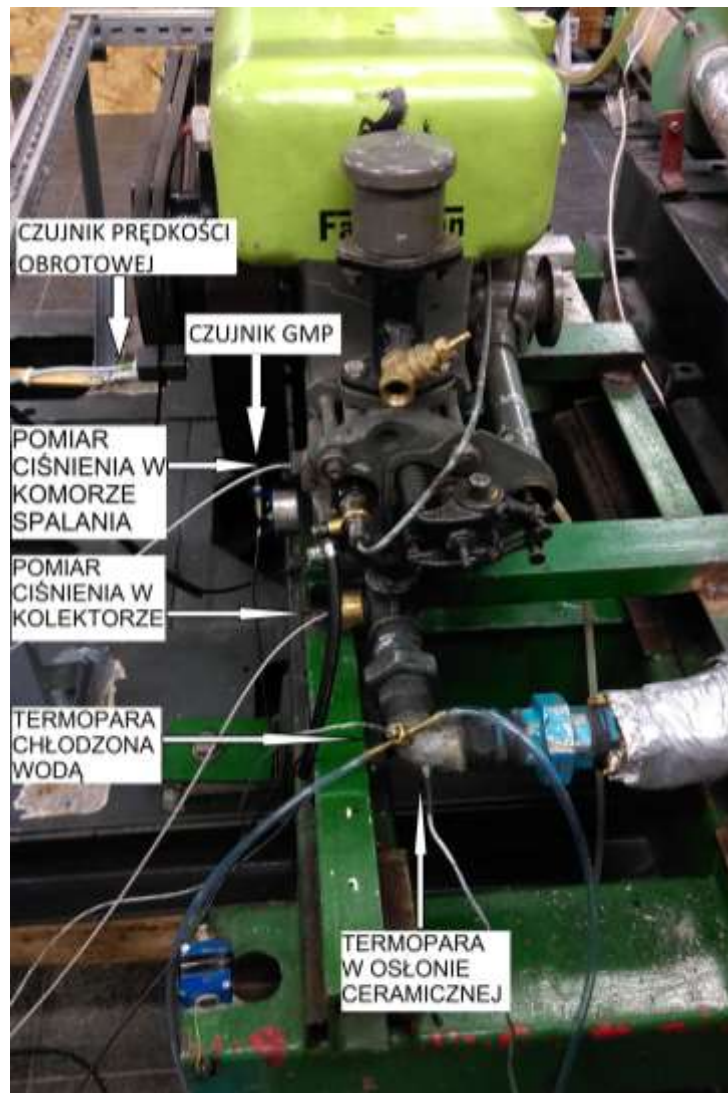


Rys. 4. Przekrój poprzeczny termopary typu K umieszczonej w płaszczu wodnym:
 1 – króćce zasilające i odprowadzające wodę chłodzącą, 2 – chłodzona termopara ze spiną zgrzewaną do płaszcza, 3 – spina pomiarowa, 4 – izolacja termiczna płaszcza termopary, 5 – uszczelka, 6 – osłona termopary



Rys. 5 Schemat ideowy układu chłodzenia termopary:
 1 – zbiornik wody chłodzącej, 2 – elektryczna pompa obiegowa, 3 – chłodzona termopara

Aby zapewnić możliwość regulacji natężenia relatywnie niewielkiego przepływu wody chłodzącej przez osłonę termopary należało zastosować pompę wody o regulowanym wydatku. Do tego celu zastosowano elektryczną pompę wirnikową o maksymalnym wydatku $120 \text{ dm}^3/\text{h}$ i ciśnieniu $0,15 \text{ MPa}$. Poprzez regulację napięcia zasilania silnika pompy ustalono stały przepływ wody przez osłonę termopary wynoszący $90 \text{ dm}^3/\text{h}$.

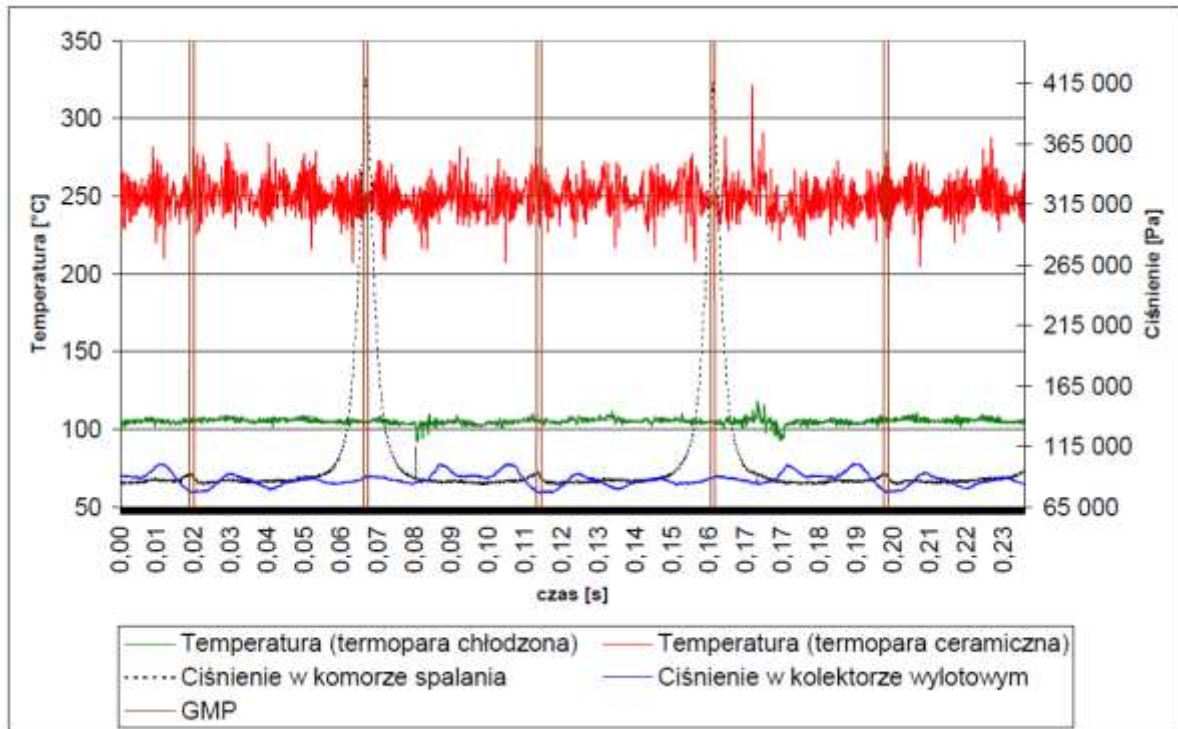


Rys. 6 Widok stanowiska laboratoryjnego z zaznaczonymi czujnikami parametrów rejestrowanych podczas pomiarów.

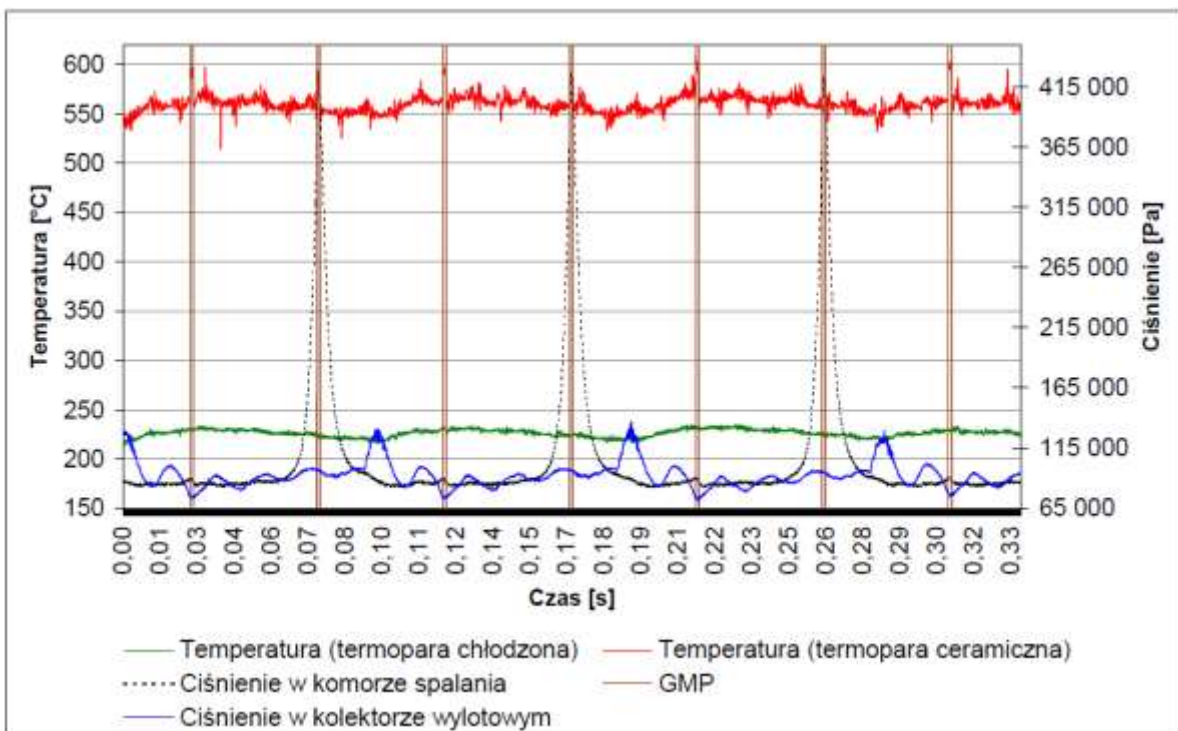
Do pomiaru temperatury szybkozmiennej gazów wylotowych w kolektorze użyto dwóch termopar typu K (NiCr). Pierwsza z nich to termopara ze spoiną odkrytą o średnicy spoiny 0,2 mm, z płaszczem ceramicznym (rys. 1). Drugi z zastosowanych termoelementów posiada spoinę zgrzewaną do płaszcza o średnicy zewnętrznej 0,5 mm, wykonanego z inconellu (rys. 2). Oba czujniki zostały wykonane na specjalne zamówienie przez firmę Termo – Precyzja. Płaszcz wodny użyty dla drugiej z termopar został wykonany przez autorów niniejszego opracowania (rys. 3). Ciśnienia w komorze spalania i w kolektorze wylotowym zostały zarejestrowane za pomocą czujników firmy Oprand. W przypadku komory spalania zastosowano czujnik D32294-Q o zakresie pomiarowym 0 – 3000 psi i czułości pomiarowej 1,35 mV/psi, natomiast pomiaru ciśnienia w kolektorze wylotowym dokonano za pomocą czujnika C12296 o zakresie pomiarowym 0-100 psi i czułości 41,43 mV/psi. Do rejestracji pomiarów temperatur i ciśnień szybkozmiennych, a także sygnału górnego martwego położenia tłoka użyto wielofunkcyjnego modułu pomiarowo - rejestrującego DT – 9805 firmy Data Translation oraz do zapisu rejestrowanych wartości oprogramowania Matlab. Pomiaru rozkładu pól temperatur dokonano za pomocą kamery termowizyjnej NEC Thermo Gear typu G30 wyposażonej w detektor obrazu wykonany w technologii CMOS i zakresie pomiarowym od -20°C do 350°C, z 2% niepewnością pomiarową.

4. Porównanie wyników pomiarów temperatur szybkozmiennych przeprowadzonych za pomocą termopary o tradycyjnej konstrukcji oraz termopary chłodzonej wodą

Poniżej przedstawiono przebiegi rejestrowanych parametrów dla dwóch warunków pomiarów: przebieg bez obciążenia i z obciążeniem (pojedyncze cykle pracy). Podczas obu badań częstotliwość próbkowania wynosiła 8333,33 Hz, a prędkość obrotowa silnika wynosiła 1260 min⁻¹.



Rys. 7 Przebieg rejestrowanych parametrów podczas badania bez obciążenia



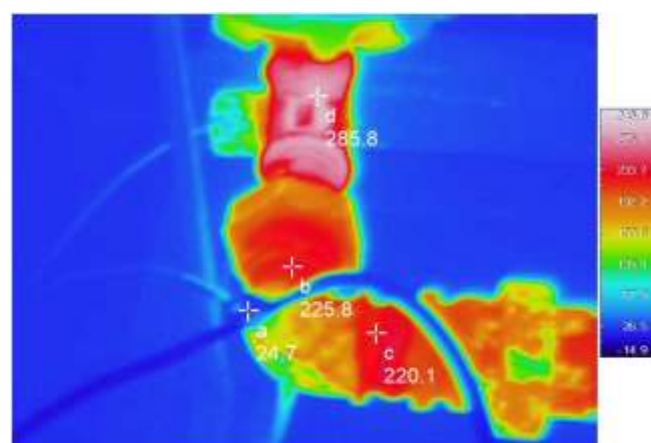
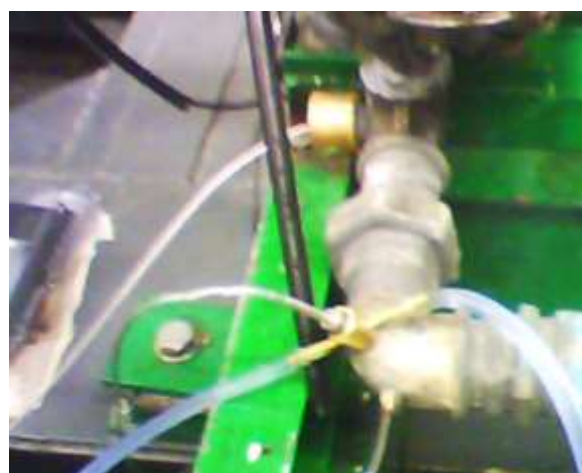
Rys. 8 Przebieg rejestrowanych parametrów podczas badania z obciążeniem

Analiza uzyskanych wyników pomiarów uwidacznia istotną różnicę wskazań termopar w płaszczu ceramicznym i chłodzonej wodą (rzędu kilkudziesięciu K). Zauważalna jest także jakościowa poprawa relacji pomiędzy zakłóceniami a uzyskanym sygnałem zmian temperatury. Podczas początkowej pracy silnika (na biegu jałowym) różnica temperatur wskazywanych przez obie termopary jest mniejsza, niż podczas późniejszej pracy (z obciążeniem), zatem wzrost średniej temperatury spalin powoduje wzrost owej różnicy. Widoczne jest także przesunięcie fazowe sygnału temperatury szybkozmiennej względem sygnału ciśnienia rejestrowanego w kolektorze wylotu spalin [Puzdrowska, 2016], co świadczy o pewnej inercyjności termoelementu. Problemem wymagającym eliminacji w późniejszych badaniach są zakłócenia przebiegu temperatury mierzone obiema termoparami, wynikające z zakłóceń emitowanych przez indukcyjny czujnik sygnału GMP.

Interesującym faktem wymagającym rozwinięcia w dalszych badaniach jest obserwacja złącz pomiarowych obu termoelementów, które zostały wyjęte z kanału wylotowego tuż po badaniach pilotażowych – termopara chłodzona wodą pokrywa się relatywnie grubszą warstwą sadzy, niż termoelement niechłodzony.

5. Badania termowizyjne

Dodatkowo, w celu wstępnej oceny skuteczności działania układu chłodzenia termopary, jednocześnie, wraz z pozostałymi wskaźnikami pracy silnika rejestrowano termogramy powierzchni roboczych silnika oraz kanału wylotu gazów wylotowych. Na rys. 9 przedstawiono termogram powierzchni kolektora otaczających obie termopary zamontowane w kolektorze wydechowym.



Rys. 9. Fotografia oraz termogram kolektora wydechowego z zamontowanymi termoparami

Przeprowadzona analiza uzyskanych termogramów oraz zarejestrowanych temperatur z obu termopar pozwala stwierdzić, że zastosowana metoda chłodzenia końcowego odcinka termopary wodą pozwala na skuteczne obniżenie temperatury obudowy termopary oraz jej płaszcz.

6. Wnioski i podsumowanie

Szybkoszmienna temperatura spalin pozwala na uzyskanie informacji diagnostycznych dotyczących stanu technicznego elementów konstrukcyjnych otaczających przestrzeni roboczych silnika spalinowego. Chcąc opracować metodę diagnozowania opartą na tym parametrze należy pogodzić takie wymagania, jak: wysoka dokładność pomiarów, ekonomiczność oraz technologiczność. Należy pamiętać także o minimalizowaniu wpływu czynników zewnętrznych na dokładność pomiarów. Słuszne wydaje się zatem zastosowanie metody pomiarów temperatur szybkozmiennych za pomocą termopary chłodzonej wodą.

Wstępne wyniki badań laboratoryjnych wskazują na przydatność diagnostyczną tej metody, konieczne jest jednak wykonanie na stanowisku laboratoryjnym silnika Farymann kolektora wylotu spalin w postaci odcinka prostego rurociągu tak, aby pomiar temperatur z obu termopar oraz ciśnienia odbywał się w tej samej odległości od zaworów wydechowych silnika. Pozwoli to również na ograniczenie wpływu zakłóceń spowodowanych kształtem rurociągu na rejestrowane parametry gazu.

Literatura:

- [1] Brown C., Kee R.J., Irwin G.W., McLoone S.F., Hung P.C. (2008). Identification Applied to Dual Sensor Transient Temperature Measurement”. Manchester. UKACC Int Control Conference.
- [2] Korczewski Z. (2017). Diagnostyka eksploatacyjna okrętowych silników spalinowych – tłokowych i turbinowych. Wybrane zagadnienia. Gdańsk. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
- [3] Korczewski Z., Puzdrowska P. (2015). Analytical method of determining dynamic properties of thermocouples used in measurements of quick – changing temperatures of exhaust gases in marine diesel engines. Poznań. Combustion Engines, nr 162 (3) (2015), s. 300-306.
- [4] Korczewski Z., Zacharewicz M. (2007). Diagnostyka symulacyjna układu turbodoładowania okrętowego tłokowego silnika spalinowego. Gdynia. Zeszyty naukowe Akademii Marynarki Wojennej nr 2 (169) 2007.
- [5] Marszałkowski K., Puzdrowska P. (2015). A laboratory stand for the analysis of dynamic properties of thermocouples. Gdańsk. Journal of Polish CIMEEAC – vol. 10, nr 1 (2015), s. 111 – 120.
- [6] Olczyk A. (2007). Koncepcja pomiaru szybkozmienną temperatury gazu z uwzględnieniem dynamicznej składowej temperatury. PAK 2007 nr 9 bis, s. 576-579.
- [7] Puzdrowska P. (2014). Laboratory stand for investigations of the quick – changing temperature of gas flowing in the piston compressor outlet channel. Gdańsk. Journal of Polish CIMEEAC – vol. 9, nr 1, s. 111 – 119.
- [8] Puzdrowska P. (2016). Determining the time constant using two methods and defining the thermocouple response to sine excitation of gas temperature. Gdańsk. Journal of Polish CIMEEAC – vol. 11, nr 1, s. 157 – 167;
- [9] Wiśniewski S. (1983). Pomiary temperatury w badaniach silników i urządzeń cieplnych. Warszawa. Wydawnictwo Naukowo –Techniczne.
- [10] www.termo-precyzja.com.pl

