

Karol CUPIAŁ*
Adam DUŻYŃSKI
Janusz GRZELKA

Uszkodzenie chłodnicy mieszanki palnej w doładowanym silniku biogazowym

W pracy opisano uszkodzenie dwustopniowej chłodnicy przeznaczonej do chłodzenia sprężonej mieszanki palnej w układzie dolotowym doładowanego silnika gazowego z zapłonem iskrowym.

Słowa kluczowe: silnik gazowy ZI, biogaz, mieszalnik gazowo-powietrzny, chłodnica

Damage of the air-fuel cooler in the biogas supercharged engine

The paper describes damage of the two-stage cooler designed for cooling of the compressed air-fuel mixture in the inlet system of the biogas supercharged spark ignition engine.

Key words: SI engine, biogas, air-fuel mixer, cooler

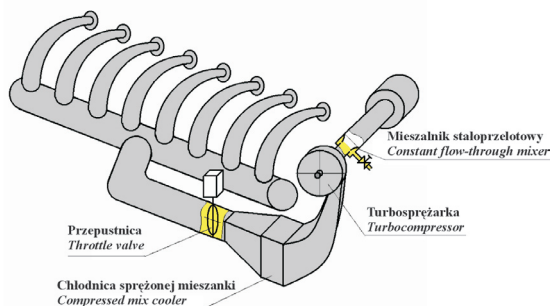
1. Układ dolotowy silnika biogazowego

W skład układu dolotowego silnika gazowego [1, 2] wchodzi filtr powietrza, mieszalnik paliwa gazowego z powietrzem wytwarzający homogeniczną mieszankę palną, turbosprężarka, dwustopniowa chłodnica sprężonej mieszanki, przepustnica, kolektor dolotowy i króćce dolotowe doprowadzające mieszankę palną z kolektora do poszczególnych cylindrów. Silnik jest zasilany ubogą, homogeniczną mieszanką paliwa gazowego z powietrzem wytwarzaną w stałoprzelotowym, niskociśnieniowym (rys. 1, 2), zeronadciśnieniowym mieszalniku umieszczonym na dolocie do nieregulowanej turbosprężarki sprężającej mieszankę do ok. 0,23 MPa i podgrzewającej ją do temperatury ok. 150°C.

Sprężona, gorąca mieszanka powietrza z biogazem jest schładzana do temp. ok. 40°C w dwustopniowej chłodnicy wodnej, z której jest doprowadzana do kolektora dolotowego i do cylindrów. Ilość mieszanki doprowadzanej do cylindrów silnika a więc i moc silnika jest regulowana przepustnicą dławiającą przepływ sprężonej mieszanki, znajdującą się między chłodnicą mieszanki a kolektorem dolotowym. Przepustnica jest sterowana elektronicznym regulatorem współpracującym z układem regulacji składu mieszanki palnej zawierającym sondę lambda i pozwalającym stabilizować zawartość tlenu w spalinach.

2. Opis uszkodzeń chłodnicy mieszanki palnej

Podczas rutynowej kontroli stanu technicznego silnika przeprowadzonej po przepracowaniu przez silnik ok. 8000 godzin zaobserwowano spadek jego mocy i sprężu turbosprężarki. W wyniku



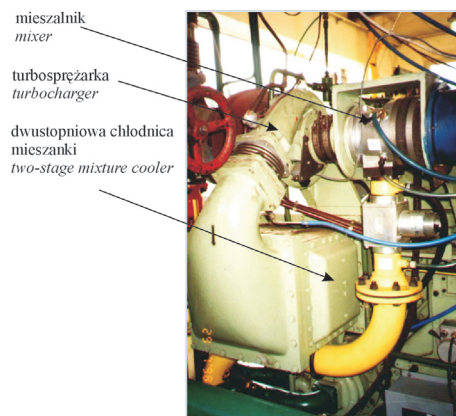
Rys. 1. Uproszczony schemat układu dolotowego silnika gazowego

Fig. 1. Simplified diagram of the gas engine inlet system

1. Biogas engine inlet system

The inlet system of a gas engine [1, 2] includes an air filter, gaseous fuel-air mixer producing a homogeneous air-fuel mixture, a turbocompressor, a two-stage compressed mixture cooler, a throttling valve, an inlet manifold and inlet connection pipes supplying the air-fuel mixture from the manifold to individual cylinders. The engine is supplied with a lean, homogeneous gaseous fuel-air mixture produced in a constant flow-through low-pressure zero-overpressure mixer (Figs. 1, 2) mixer positioned at the inlet to the non-adjustable turbocompressor compressing the mixture to a pressure of approx. 0.23 MPa and heating it up to a temperature of about 150°C.

The compressed hot air-biogas mixture is cooled down to a temperature of approx. 40°C in a two-stage water cooler, from which it is delivered to the inlet manifold and to the cylinders. The amount of mixture supplied to the engine cylinders, and thus the engine power, is regulated by a throttling valve choking the compressed mixture flow, which is situated between the mixture cooler and the inlet manifold. The throttling valve is controlled by an electronic



Rys. 2. Układ wytwarzania mieszanki gazowo-powietrznej silnika gazowego

Fig. 2. The gas-fuel mixture generation system of the gas engine

analizy wyników pomiarów tego silnika zarejestrowanych podczas eksploatacji ustalono, że zauważalne obniżenie tych parametrów silnika wystąpiło w okresie letnim w warunkach podwyższonej temperatury otoczenia po ok. 7000 godzin eksploatacji, a w ostatnim okresie eksploatacji silnika obniżenie osiągalnej mocy szybko powiększało się w sposób bardzo widoczny. Ustalono, że bezpośrednią przyczyną tego stanu jest nadmierny wzrost oporów przepływu w chłodnicy sprężonej mieszanki. W czasie ok. 8000 godzin pracy silnika spadek ciśnienia w tej chłodnicy powiększył się z 2 kPa do ok. 20 kPa.

Tablica 1. Porównanie wybranych parametrów silnika przed i podczas awarii chłodnicy mieszanki
Table 1. Comparison of selected engine parameters before and during the mixture cooler failure

Wielkość / <i>Quantity</i>	Jednostka / <i>Unit</i>	Silnik nowy / <i>New engine</i>	Silnik po 8000 h / <i>Engine after 8000 hrs</i>
Moc silnika / <i>Engine power</i>	kW	600	450
Nadciśnienie doładowania / <i>Supercharging overpressure</i>	MPa	0,115	0,067
Opory przepływu przez chłodnicę mieszanki / <i>Resistance to flow through the mixture cooler</i>	kPa	< 2	> 20
Zużycie cylindrów (maksymalne) / <i>Cylinder wear (maximum)</i>	mm	0,00	0,03

3. Chłodnica sprężonej mieszanki

Wodno-rurowa chłodnica sprężonej mieszanki zawiera łącznie ok. 300 gęsto rozmieszczonych rurek miedzianych (o średnicy ok. 10 mm), których końce rozwalcowane są w dwóch dnach sitowych. Na tych rurkach jest osadzony ciasno pakiet płaskich żeber wykonanych z blachy miedzianej o grubości ok. 0,12 mm zawierających otwory, tak wyprofilowanych (rys. 3), że po nasunięciu ich na rurki odległość między nimi wynosi ok. 1,2 mm. Chłodzona mieszanka przepływa przez szczeliny między żebrami i omywa zewnętrzne powierzchnie pakietu rurek a wewnątrz pakietu rurek przepływa schłodzona w wentylatorowej chłodnicy zewnętrznej ciecz chłodząca silnik.

Po zdemontowaniu chłodnicy z silnika stwierdzono obecność znacznej ilości zanieczyszczeń osadzonych po obydwu stronach chłodnicy oraz między żebrami. Ponadto na wylotowej powierzchni chłodnicy (od strony przepustnicy) stwierdzono powierzchniowe uszkodzenia mechaniczne i termiczne (rys. 4).

Chłodnicę poddano myciu najpierw preparatem stosowanym do usuwania zanieczyszczeń stałych i olejowych zalecanym przez firmę KÄRCHER, lecz nie uzyskano zadowalającego efektu. Stwierdzono, że przyczyną tego była znaczna ilość nie rozpuszczalnego stałego osadu zalegającego pomiędzy miedzianymi blaszkami tworzącymi żebra rdzenia chłodnicy; osad ten składał się głównie z pyłu kwarcowego i węgla.

Wygląd zniekształconego termicznie i mechanicznie fragmentu (wymytego częściowo) wkładu chłodnicy z zalegającymi nadal w jego wnętrzu zanieczyszczeniami stałymi pokazano na rysunku 5.

controller operating with an air-fuel mixture composition regulation system that contains a lambda probe and enables the stabilization of the oxygen content of exhaust gas.

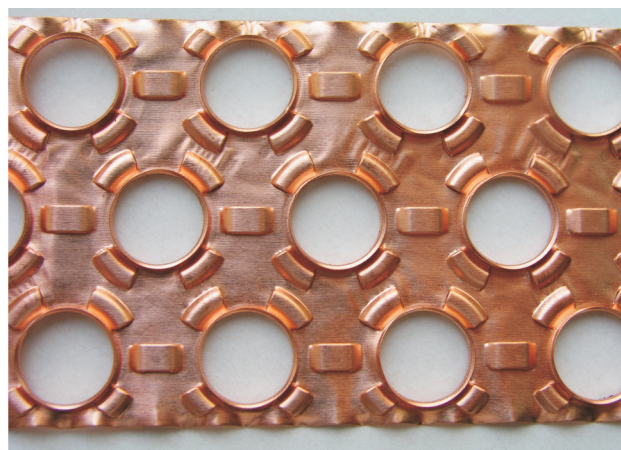
2. Description of the damage to the air-fuel mixture cooler

During the routine inspection of the engine's technical condition carried out after approx. 8000 hours of engine operation, a drop in engine power and compression ratio in turbocompressor was observed. It was determined from the analysis of results of engine measurements recorded during engine operation that a noticeable reduction in these parameters had occurred in the summer season in the conditions of an increased ambient temperature after approx. 7000 of operation, while the available power decrease was augmenting very distinctly in the last period of engine operation. It was established that the immediate cause of this condition was an excessive increase in resistance to flow within the compressed mixture cooler. Over an engine operation period of approx. 8000 hours the pressure drop across the cooler increased from 2 kPa to about 20 kPa.

3. Compressed air-fuel mixture cooler

Water tubular compressed air-fuel mixture cooler incorporates in total approx. 300 densely arranged copper tubes (approx. 10 mm in diameter), whose ends are expanded on two perforated bottoms. A package of flat ribs made of approx. 0.12 mm-gauge copper sheet with holes are fit-mounted on these tubes, with the ribs being so formed (Fig. 3) that after being put on the tubes they are spaced approx. 1.2 mm apart. The mixture being cooled flows through the gaps between the ribs and flushes the outer surfaces of the tube package, while the engine-cooling liquid cooled down in the outer ventilator radiator flows inside the tube package.

After removing the cooler from the engine, the presence of a considerable amount of fouling deposited on either side



Rys. 3. Widok jednego z żeber tworzących rdzeń chłodnicy mieszanki
Fig. 3. View of one of the ribs forming the core of the mixture cooler

Próba przepłukania wkładu chłodnicy 15% perhydrolem mającym zdolność intensywnego utleniania węgla również nie dała pozytywnego efektu i dlatego zdecydowano się wymienić chłodnicę na nową pokazaną na rysunku 6.

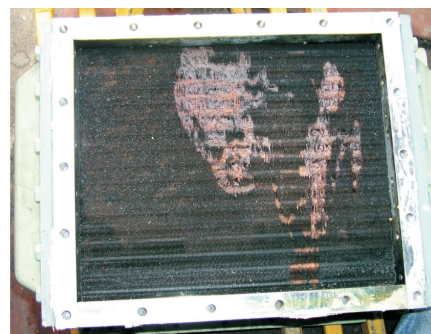
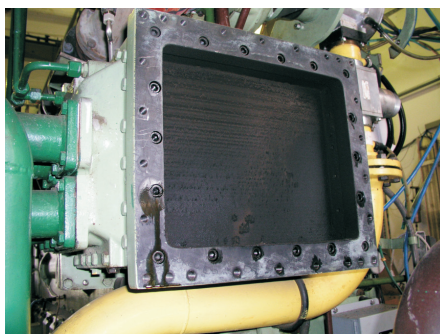
Najbardziej prawdopodobną przyczyną tak znacznego zanieczyszczenia chłodnicy pyłem kwarcowym było mało skuteczne działanie filtra powietrza zastosowanego w tym silniku gazowym (był to suchy filtr tkaninowy powszechnie stosowany w silnikach okrętowych), a znaczne ilości węgla zawartego w osadzie i wypełniającego przestrzeń między żebrami rdzenia chłodnicy mieszanki pochodzić mogły ze skoksowania niewielkich ilości oleju smarującego przenikającego z łożysk przez labiryntowe uszczelnienia wału turbosprężarki do wnętrza korpusu sprężarki. Tkaninowy wkład filtra biogazu znajdujący się w trakcie gazowym silnika nie nosił śladów zanieczyszczeń, a to dowodzi, że zanieczyszczenia zawarte w biogazie nie mogły być przyczyną zanieczyszczenia chłodnicy mieszanki. Obecność pyłu w zanieczyszczeniach zalegających w rdzeniu chłodnicy była znacząca, lecz pomimo to nie spowodowała ona znaczącego wzrostu zużycia cylindrów – maksymalne zużycie cylindrów po 8 tys. godzin pracy silnika nie przekraczało 0,03 mm i było bardzo niewielkie. Prawie na całej powierzchni gładzi cylindrów jeszcze widoczne były skośne ślady ich honowania.

Uszkodzenia wylotowej powierzchni chłodnicy zostały spowodowane falą ciśnienia wytworzoną w układzie dolotowym w następstwie przypadkowego zapłonu mieszanki palnej w kolektorze dolotowym. W silnikach gazowych zasilanych mieszanką homogeniczną wytwarzaną na początku układu dolotowego (przed turbosprężarką) zapłony takie sporadycznie zdarzają się i mogą doprowadzić do chwilowego wzrostu ciśnienia w układzie dolotowym silnika w granicach $0,64 \div 0,87$ MPa [3]. W następstwie takiego zapłonu może nastąpić cofnięcie i ustabilizowanie się płomienia na tych



Rys. 5. Fragment wkładu chłodnicy mieszanki z zalegającymi w nim zanieczyszczeniami

Fig. 5. A fragment of the mixture cooler element with contaminants deposited within it



Rys. 4. Zanieczyszczona powierzchnia wlotowa chłodnicy mieszanki (rysunek lewy) oraz ślady uszkodzeń termicznych i mechanicznych strony wylotowej chłodnicy mieszanki (rysunek prawy)

Fig. 4. The contaminated inlet surface of the mixture cooler (left-hand photo) and traces of thermal and mechanical damage to the outlet side of the mixture cooler (right-hand photo)

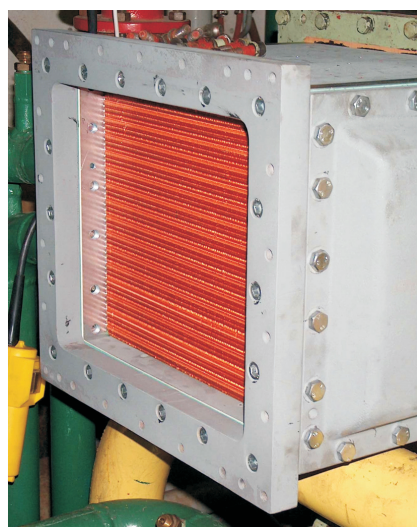
of the cooler and between ribs was found. In addition, mechanical and thermal surface damage was found on the outlet side of the cooler (on the throttle valve side) (Fig. 4).

The cooler was subjected to washing, first using a compound that is normally used for removing particulate and oil contamination, as recommended by KÄRCHER, but no satisfactory result was achieved. It was found that the cause was a considerable amount of an insoluble deposit lying between the copper fins forming the ribs of the cooler core; the deposit was composed chiefly of quartz and carbon dust.

The appearance of a thermally and mechanically distorted (partially washed) fragment of the cooler element with particulate contaminants still persisting in its interior is illustrated in Fig. 5.

An attempt to wash the cooler element with a 15% perhydrol solution having the capability of intensive oxidation of carbon also ended in failure, therefore a decision was made to replace the cooler with a new one, as shown in Fig. 6.

The most probable cause of so substantial contamination of the cooler with quartz dust was an inadequately efficient operation of the air filter used in this particular gas engine (that was a dry cloth filter commonly used in marine engines), whereas the considerable amount of carbon contained in the deposit and filling the space between the mixture cooler's core ribs might originate from the coking of a small amount of lubricating oil that had penetrated into the compressor body from the bearings through the labyrinth seals of the turbocompressor shaft. The cloth biogas filter element fitted in the engine's gas line showed no traces of contaminants, which indicates that the fouling of the mix cooler was not caused by any contaminants present in the biogas. The presence of dust in the fouling deposited in the cooler core was significant, though it did not result in any appreciable increase in cylinder wear – the maximum wear of the cylinders after 8 thousand hours of engine operation was negligible and did not exceed 0.03 mm. Almost on the entire cylinder bear-



Rys. 6. Nowa chłodnica mieszanki podczas montażu na silniku biogazowym

Fig. 6. A new mixture cooler as being mounted on the biogas engine

powierzchniach chłodnicy, na których prędkość przepływu mieszanki palnej paliwa gazowego z powietrzem jest zbyt mała. Stwierdzone uszkodzenia termiczne wewnętrznej powierzchni chłodnicy dowodzą, że w badanym silniku takie niepożądane zjawisko wystąpiło.

4. Podjęte środki zaradcze

W celu uniknięcia w przyszłości podobnych uszkodzeń chłodnicy sprężonej mieszanki przedsięwzięto następujące działania:

- wprowadzono bieżące monitorowanie oporów przepływu mieszanki przez chłodnicę sprężonej mieszanki w celu zapewnienia ciągłej kontroli stopnia zanieczyszczenia tej chłodnicy;
- zwiększono skuteczność działania filtra powietrza w celu zminimalizowania możliwości zasysania pyłu do układu dolotowego;
- zainstalowano quasilaminarny tłumik płomienia – przerywacz płomienia – w układzie dolotowym, po zimnej stronie chłodnicy mieszanki w celu ochrony chłodnicy przed falami ciśnienia i płomieniem występującym w czasie przypadkowego zapłonu mieszanki palnej w układzie dolotowym.

Radykalnym sposobem uniknięcia tego typu uszkodzeń w przyszłości byłoby zastosowanie wtrysku gazu do kanałów dolotowych silnika, bezpośrednio przed zaworami dolotowymi, ponieważ wtedy w turbosprężarce, w chłodnicy mieszanki i kolektorze dolotowym silnika znajdowałoby się czyste powietrze nie stwarzając tym samym zagrożenia eksplozyjnego i korozyjnego.

Artykuł recenzowany

ing surface, skew traces of cylinder honing were visible.

The damage to the outlet side of the cooler was caused by a pressure wave created in the inlet system as a result of an accidental air-fuel mixture ignition in the inlet manifold. In the gas engines supplied with a homogeneous mix generated at the beginning of the inlet system (upstream the turbocompressor) such ignitions do happen occasionally and may give rise to a momentary increase in pressure in the engine's inlet system in the range 0.64÷0.87 MPa [3]. As a consequence of such an ignition, a flash-back may occur, followed by the flame settling on the cooler surfaces, where the velocity of air-gas fuel mixture flow is too low. The identified thermal damage to the internal cooler surface indicates that such an undesirable phenomenon did happen in the engine tested.

4. Remedies undertaken

In order to avoid similar damage to the compressed mixture cooler in the future, the following remedies have been undertaken:

- on-line monitoring of resistance to mix flow through the compressed mix cooler was implemented to assure the control of the degree of cooler contamination to be maintained on an ongoing basis;
- the efficiency of air filter operation has been increased with the aim of minimizing the likelihood of dust being sucked into the inlet system; and
- a quasi-laminar flame damper – a flame arrestor – has been installed in the inlet system on the cold mix cooler side to protect the cooler against pressure waves and flame occurring during an accidental air-fuel mix ignition in the inlet system.

A radical method of avoiding this type of damage in the future would be to apply gas injection to the engine's inlet ducts immediately before the inlet valves, as pure air would be present in the turbocompressor, in the mix cooler and in the engine inlet manifold in that case, thereby not creating any explosion and corrosion hazards.

Literatura/Bibliography

- [1] Cupiał K., Dużyński A., Grzelka J.: Doświadczenia z eksploatacji biogazowego zespołu ciepło- i prądotwórczego. Instal Informacja. Teoria i praktyka w instalacjach, Nr 10. Centralny Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Techniki Instalacyjnej INSTAL. Ośrodek Informacji Technika instalacyjna w budownictwie. Warszawa 2002.
- [2] Cupiał K., Dużyński A., Grzelka J.: Techniczne i ekonomiczne aspekty eksploatacji biogazowego zespołu CHP w oczyszczalni ścieków w Częstochowie. Materiały konferencyjne VI Międzynarodowej Konferencji Naukowej SILNIKI GAZOWE 2003 – konstrukcja, badania, eksploatacja, paliwa odnawialne. Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej 155, Mechanika 25, Częstochowa 2003.
- [3] Grzelka J.: Analiza eksplozji w skrzyni korbowej i kolektorze dolotowym silnika gazowego. Praca doktorska, Politechnika Częstochowska. Częstochowa 1990.

* Prof. zw. dr hab. inż. Karol Cupiał – profesor na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Informatyki Politechniki Częstochowskiej.

Prof. Karol Cupiał, DSc. MEng. – professor at the Faculty of Mechanical Engineering and Information Technology of the Częstochowa University of Technology.



Dr inż. Adam Dużyński – adiunkt, zastępca dyrektora Instytutu Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania Politechniki Częstochowskiej.

Mr. Adam Dużyński, PhD. MEng. – Vice-director of the Institute of Internal Combustion Engines and Control Engineering at the Częstochowa University of Technology.



Dr inż. Janusz Grzelka – adiunkt, kierownik Zakładu Pomiarów i Sterowania w Instytucie Maszyn Tłokowych i Techniki Sterowania Politechniki Częstochowskiej.

Mr. Janusz Grzelka, PhD. MEng. – Head of Division of Machines Measurements and Control at the Częstochowa University of Technology.

