

APARATURA

BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Właściwości struktury oraz analiza porównawcza mikrotwardości przylgni zaworu wydechowego wzmacnianej stellite oraz fazą międzymetaliczną Fe₃Al

KRZYSZTOF GARBALA¹, PIOTR CYBULKO²

¹AC S.A. BIAŁYSTOK, ²POLITECHNIKA ŚLĄSKA

Słowa kluczowe: mikrotwardość, zawór wydechowy, stellite, faza międzymetaliczna

STRESZCZENIE:

W silnikach, w których stosuje się zasilanie sprężonym gazem ziemnym, LPG oraz innymi paliwami gazowymi, obserwuje się konieczność częstszej wymiany zaworów wydechowych. Zawory te w silnikach spalinowych mogą być eksploatowane przez krótszy czas niż ich odpowiedniki w silnikach zasilanych benzyną i olejem napędowym. Najbardziej narażona na degradację jest przylgna zaworu wydechowego. Wynika to z temperatury spalania gazu ziemnego w komorze spalania oraz temperatury spalin mających kontakt z zaworem. W pracy przedstawiono porównawczy rozkład mikrotwardości w zaworach wydechowych napawanych fazą międzymetaliczną Fe₃Al oraz stellite.

Properties of the structure and comparative analysis of microhardness of the exhaust valve face strengthened with stellite and Fe₃Al intermetallic phase

Keywords: microhardness, exhaust valve, stellite, intermetallic phase

ABSTRACT:

In engines, fuelled with concentrated natural gas, LPG, and other gaseous fuels, the necessity for more frequent replacement of exhaust valves is observed. These valves in combustion engines may be operated for a shorter period than their equivalents in engines fuelled with petrol and diesel oil. The exhaust valve face is most exposed to degradation. This results from the combustion temperature of natural gas in the combustion chamber and the temperature of exhaust gas in contact with the valve. The paper presents a comparative distribution of microhardness in exhaust valves pad welded with Fe₃Al intermetallic phase and stellite.

1. WPROWADZENIE

Zgodnie ze scenariuszem Międzynarodowej Agencji Energetyki, produkcja gazu ziemnego wzrośnie w 2035 r. o 50%. w porównaniu z poziomem produkcji w 2010 r. [1] W ostatnich dziesięcioleciach w branży transportowej obserwuje się coraz istotniejszy wzrost liczby pojazdów zasilanych gazem ziemnym [2, 3]. Ścieżka poszukiwawcza nowych źródeł zasilania pojazdów, zdolnych zająć istotne miejsce w koszyku energetycznym paliw, jest często wspólna z dążeniami do zmniejszania emisji związków szkodliwych do atmosfery. Opracowanie nowych strategii uniezależniania się transportu od konwencjonalnych paliw ciekłych prowadzi do coraz powszechniejszego wykorzystania gazu ziemnego w tym sektorze.

Zastosowanie sprężonego gazu ziemnego (CNG) jak i ciekłego gazu ziemnego (LNG) w silnikach o spalaniu wewnętrznym jest powszechnie znane w przypadku pojazdów osobowych lub ciężarowych seryjnie wyposażonych (OEM) w instalacje zasilania CNG. Rosnące zapotrzebowanie na gaz ziemny transportowany drogą morską stymuluje wzrost produkcji gazowców LNG. Wykorzystanie tego paliwa w środkach żeglugi morskiej i śródlądowej daje mierzalne i ekonomiczne korzyści wynikające ze zmniejszenia zużycia paliwa i spełnienia wyższych norm emisji spalin. Rentowność inwestycji jest szczególnie doceniona i przebadania w literaturze w przypadku zarówno środków transportu lądowego, jak i morskiego. Zasadność ekonomiczna przejścia na zasilanie środków transportu gazem ziemnym jest tym wyższa, im dalsze dystanse pokonują środki żeglugi; jest to szczególnie istotne w kontekście ilości zużywanego paliwa przez jednostki pływające i emisji związków siarki. Przy rozpatrywaniu zasilania silnika gazem ziemnym, należy wziąć pod uwagę następujące cechy gazu ziemnego jako paliwa [4-6]:

- Metan posiada wyższą liczbę oktanową,
- Charakteryzuje się wyższą temperaturę zapłonu - 650°C, w porównaniu do benzyny 350°C i oleju napędowego 250°C),
- Posiada niższą liczbę cetanową,
- Jako gaz zajmuje więcej miejsca w objętości komory spalania silnika niż jego ekwiwalent paliwa w postaci ciekłej.

Porównanie właściwości fizykochemicznych gazu ziemnego i innych paliw konwencjonalnych przedstawiono w Tabeli 1.

Gaz ziemny charakteryzuje się bardzo korzystnym, najwyższym spośród wszystkich konwencjonalnych paliw płynnych, stosunkiem energii wytworzonej ze spalania określonej ilości gazu ziemnego w odniesieniu do zawartości węgla. Napotkane w literaturze badania porównawcze, określające emisję związków szkodliwych do atmosfery wybranych pojazdów ciężarowych z silnikami zasilanymi gazem ziemnym w odniesieniu do pojazdów z silnikami zasilanymi olejem napędowym, wskazują jednoznacznie na korzyści wykorzystywania gazu ziemnego jako paliwa w środkach transportu. Pojazdy zasilane gazem naturalnym emitują 76% mniej węglowodorów w porównaniu do tych samych pojazdów zasilanych olejem napędowym, 90% mniej tlenków azotu NO_x , 99% mniej pyłów PM oraz 23% mniej CO_2 . [7] Jednak w przypadku spalania gazu ziemnego w silniku istnieje ryzyko wystąpienia spalania niecałkowitego metanu i przedostania się niespalonego gazu ziemnego do układu wydechowego (poślizg metanu). Istotny jest tu problem szczelności komory spalania w całym cyklu eksploatacyjnym pojazdu. Czynnikiem, który ma znaczny wpływ na zachowanie wymaganej szczelności komory spalania jest wytrzymałość przylgni zaworowej zaworu wydechowego. Zawór wydechowy odpowiada za usunięcie produktów spalania z komory spalania. Szczególnie w kontekście dłuższej eksploatacji przylgni zawo-

Tabela 1 Porównanie właściwości fizykochemicznych gazu ziemnego i innych paliw konwencjonalnych [6]

Wybrane parametry	Paliwo			
	Benzyna	Olej napędowy	Naturalny gaz ziemny	CNG (20 MPa)
Temp. samozapłonu [°C]	260	210	580	
Gęstość energetyczna [MJ/L]	34	39	0,039	9,54
Ekwiwalent energetyczny 1 litra benzyny [l]	1l	0,87	0,8	3,56
Wartość opałowa [MJ/kg]	45,7	47	53	53
Liczba oktanowa	92-98	-	-	130
Liczba cetanowa	5-20	40-55	0	0

rowa w wyniku wyższej temperatury spalania gazu naturalnego w komorze spalania narażona jest na przyspieszone zużycie. Skutkiem tego jest zwiększeniem ryzyka wystąpienia zjawiska poślizgu metanu do układu wydechowego. Jest to jednak problem wynikający z konstrukcji silników spalinowych, a nie z charakterystyki czy właściwości gazu ziemnego.

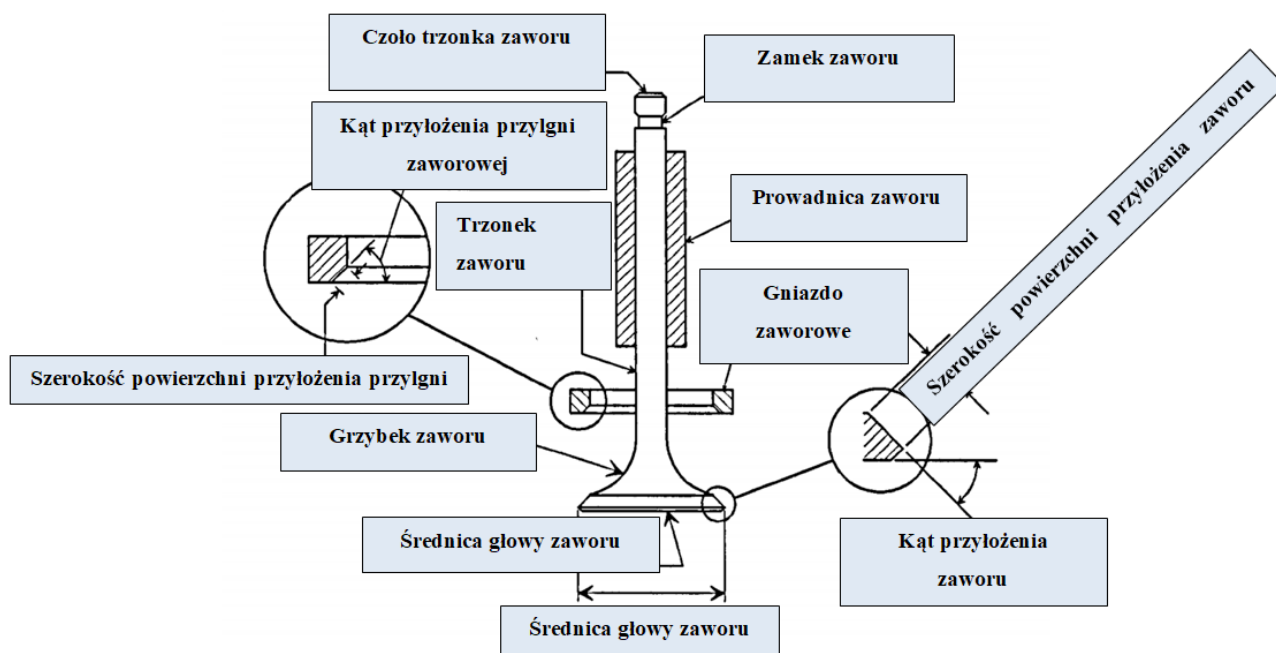
Schemat budowy pary ciernej przyłgni zaworowa – gniazdo zaworu przedstawiono na Rysunku 1. Wpływ liczby cykli pracy, ciśnienia spalania i temperatury na zużycie zaworu badał Y. Wang. Jego zespół w 1996 r. dowiódł, że zużycie ścierne zaworu wzrasta wraz ze wzrostem ciśnienia w komorze spalania. Zaobserwowano jednak zmniejszenie zużycia zaworu wraz ze wzrostem temperatury. Efekt ten przypisuje się powierzchniowej warstwie tlenków metali powstających w wyniku kontaktu zaworów wydechowych ze spalinami o wysokiej temperaturze [9, 10].

2. BADANIA WŁASNE

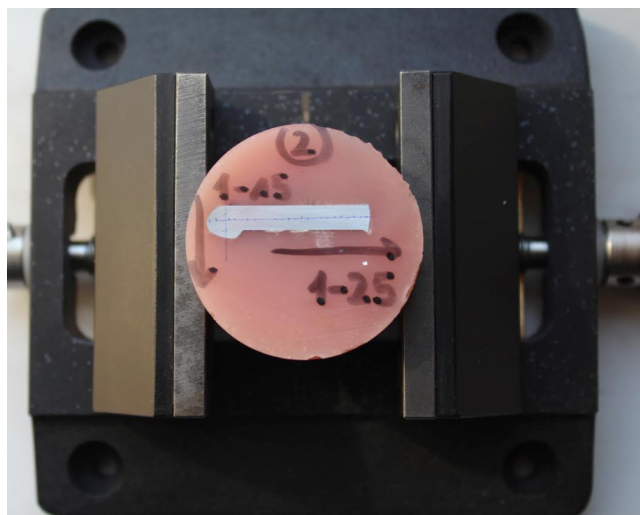
Stopy stellite są obecnie najpowszechniejszą metodą umocnienia wierzchniej warstwy przyłgni zaworu wydechowego. Stellite są stopami na bazie kobaltu z chromem i zawierają ok. 30% Cr, 4-17% W oraz 1,0-3,2% C. Stosowane są głównie jako powłoki zwiększające odporność na zużycie ścierne par tribologicznych pracujących bez czynnika smarnego, również w wysokich temperatu-

rach. Z tego powodu znalazły swoje zastosowanie jako umocniona wierzchnia warstwa przyłgni zaworowych produkowanych obecnie zaworów wydechowych. Typowym zastosowaniem powłoki o osnowie kobaltu są powłoki Stellite 6 oraz Stellite 12. Stellite 6 i 12 są stopami utwardzanymi na bazie kobaltu, które posiadają wysoką odporność na korozję i pracę w wysokiej temperaturze. Znajdują swoje zastosowanie w parach trących m.in. jako wierzchnia warstwa przyłgni zaworowych silników spalinowych, w turbinach gazowych, turbinach lotniczych, w przemyśle petrochemicznym i w sektorze energetycznym [11, 12].

W zaworach wydechowych silników spalinowych zasilanych gazem ziemnym obserwuje się konieczność częstszej wymiany tego elementu w silniku w porównaniu z zaworem silnika benzynowego. Porównano mikrotwardość mierzoną równoległe i prostopadle do zaworu z przyłgnią napawaną fazą międzymetaliczną Fe_3Al oraz przyłgnią stelliteową. W tym celu przygotowano przekrój głowy zaworu wydechowego i zainkludowano. Następnie próbki poddano badaniom na twardościomierzu Zwick/Roell ZHV-30S zgodnie z normą PN-EN ISO 6507-01:2018-05. Wykonano 25 pomiarów w kierunku prostopadłym do osi zaworu oraz 15 pomiarów w kierunku równoległym do osi zaworu. Na Rysunku 2 przedstawiono przygotowaną do badań próbkę z napoiną fazy międzymetalicznej Fe_3Al .



Rysunek 1 Schemat budowy zaworu, w tym pary ciernej przyłgni zaworowa – gniazdo zaworu [8]



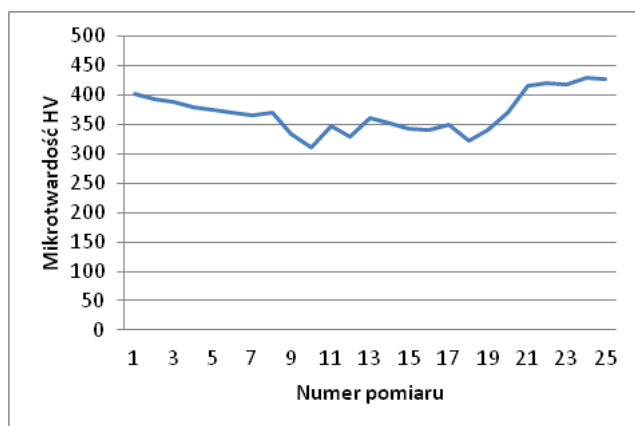
Rysunek 2 Próbką zaworu napawanego Fe_3Al przygotowana do badań mikrotwardości

Wartość mikrotwardości dla badanych zaworów z przyłgnią stelitową wynosiła od $310 HV_{0,2}$ do $430 HV_{0,2}$ dla badania w kierunku prostopadłym do osi zaworu. Wartość mikrotwardości mierzona w kierunku równoległym mieściła się w zakresie $225 HV_{0,2} - 285 HV_{0,2}$. Wartość mikrotwardości dla badanych zaworów z przyłgnią wzmacnianą fazą międzymetaliczną Fe_3Al wynosiła od $330 HV_{0,2}$ do $453 HV_{0,2}$ dla badania w kierunku prostopadłym do osi zaworu. Wartość mikrotwardości mierzona w kierunku równoległym mieściła się w zakresie $292 HV_{0,2} - 424 HV_{0,2}$. Najwyższe wartości $HV_{0,2}$ uzyskano przy powierzchni przyłgni zaworowej. Wartość mikrotwardości malała wraz ze zbliżaniem się do osi zaworu. Wyniki pomiarów zaworów z przyłgnią wzmacnianą stelitem oraz fazą międzymetaliczną Fe_3Al przedstawiono w Tabeli 2.

Tabela 2 Wyniki pomiarów zaworów stelitowych w silniku zasilanym benzyną oraz CNG

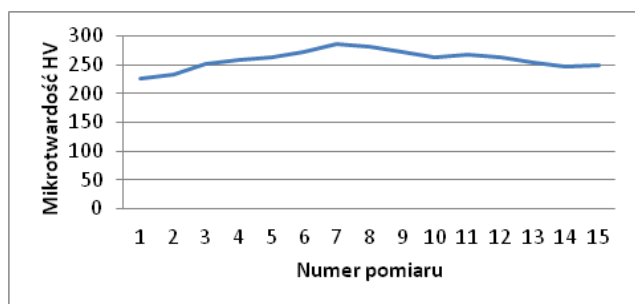
Numer pomiaru	Mikrotwardość w kierunku prostopadłym		Mikrotwardość w kierunku równoległym	
	Zawór z przyłgnią wzmacnioną stelitem	Zawór z przyłgnią wzmacnioną fazą międzymetaliczną Fe_3Al	Zawór z przyłgnią wzmacnioną stelitem	Zawór z przyłgnią wzmacnioną fazą międzymetaliczną Fe_3Al
1.	401	453	225	293
2.	392	442	234	302
3.	388	428	252	314
4.	380	422	258	308
5.	374	418	264	292
6.	369	412	272	312
7.	366	415	285	318
8.	370	404	281	327
9.	334	372	272	336
10.	310	384	262	342
11.	347	372	267	356
12.	330	362	262	373
13.	362	372	254	382
14.	353	367	248	412
15.	342	334	249	424
16.	340	352		
17.	349	330		
18.	323	333		
19.	340	362		
20.	370	385		
21.	415	402		
22.	420	415		
23.	417	407		
24.	430	435		
25.	428	422		

Powyższe wyniki zobrazowano graficznie. Na Rysunku 3 przedstawiono mikrotwardość w kierunku prostopadłym do osi zaworu z przyłgnią wzmocnioną stellem.



Rysunek 3 Rozkład mikrotwardości w kierunku prostopadłym do osi zaworu z przyłgnią wzmocnioną stellem

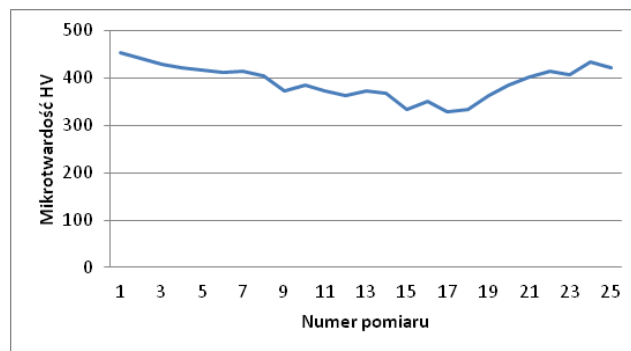
W badaniu prowadzonym w kierunku prostopadłym do osi zaworu, w którym przyłgnia była wzmocniona stellem, mikrotwardość osiąga najwyższe wartości w obszarze przyłgni zaworowej. Spowodowane jest to obecnością warstwy stellitu, którym wzmocniana jest przyłgnia. Mikrotwardość osiąga maksymalnie ok. 400 HV_{0,2} i spada wraz z oddaleniem się od warstwy stellitowej w kierunku rdzenia zaworu. Zwiększoną twardość obserwuje się w obszarze bliskim rdzeniu zaworu. Na Rysunku 4 przedstawiono rozkład mikrotwardości w kierunku równoległym do osi zaworu z przyłgnią wzmocnioną stellem.



Rysunek 4 Rozkład mikrotwardości w kierunku równoległym do osi zaworu z przyłgnią wzmocnioną stellem

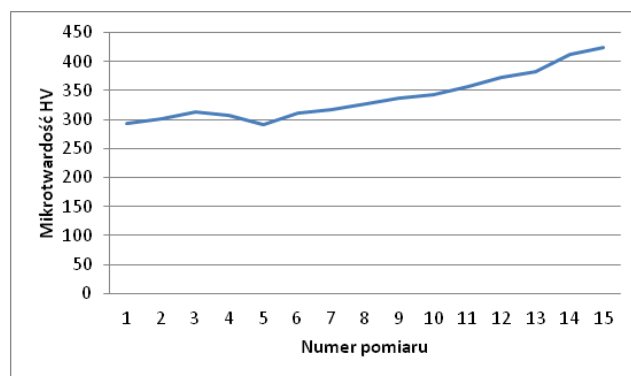
W badaniu prowadzonym w kierunku równoległym do osi zaworu, w którym przyłgnia była wzmocniona stellem mikrotwardość osiąga najwyższe wartości w obszarze stożkowej powierzchni kontaktu przyłgni z gniazdem zaworu. Spowodowane jest to obecnością warstwy stellitu, którym wzmocniana jest przyłgnia. Mikrotwardość osiąga najmniejszą wartość w początkowym

punkcie badania części dolnej talerzyka zaworu, gdzie stellitu jest najmniej i wynosi ok. 230 HV_{0,2}. Maksymalną wartość mikrotwardości zaobserwowano w punktach przy powierzchni przyłgni zaworu i wynosi ona ok. 280 HV_{0,2}. Związane jest to z obecnością największej ilości stellitu. Na Rysunku 5 przedstawiono rozkład mikrotwardości w kierunku prostopadłym do osi zaworu z przyłgnią napawaną Fe₃Al.



Rysunek 5 Rozkład mikrotwardości w kierunku prostopadłym do osi zaworu z przyłgnią napawaną fazą międzymetaliczną Fe₃Al

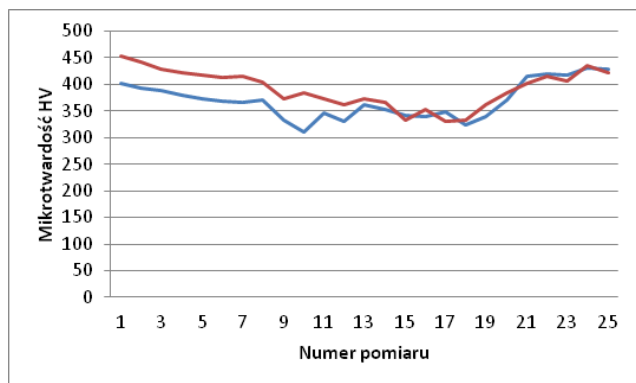
W badaniu mikrotwardości prowadzonym równoległe do osi zaworu napawanego fazą międzymetaliczną Fe₃Al, największe wartości mikrotwardości osiąga w obszarze napoiny i wynosi ok 450 HV_{0,2}. Mikrotwardość maleje wraz z obszarem granicznym pomiędzy napoiną i materiałem rodzimym. Spowodowane jest to zmniejszeniem udziału napoiny w podłożu, a wzrostem udziału materiału rodzimego. Rysunek 6 przedstawia rozkład mikrotwardości w kierunku równoległym do osi zaworu z przyłgnią napawaną fazą międzymetaliczną Fe₃Al.



Rysunek 6 Rozkład mikrotwardości w kierunku równoległym do osi zaworu napawaną fazą międzymetaliczną Fe₃Al

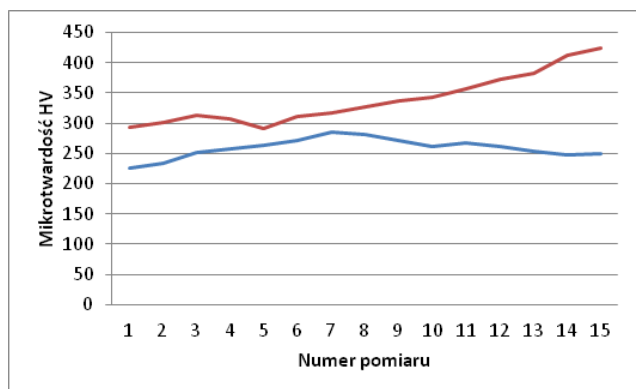
Mikrotwardość osiąga najmniejsze wartości w obszarze części dolnej talerzyka zaworu, gdzie umocnienie powierzchni nie występuje i wynosi ok. 298 HV_{0,2}. Wraz ze wzrostem udziału napoiny

w strukturze przyłgni zaworu mikrotwardość rośnie, osiągając ok. 420 HV_{0,2} w obszarze, gdzie napoina ma największy udział w obszarze badanym. Na Rysunku 7 przedstawiono porównanie mikrotwardości w kierunku prostopadłym do osi zaworów z przyłgnią wzmacnianą stellite oraz fazą międzymetaliczną Fe₃Al.



Rysunek 7 Porównanie rozkładu mikrotwardości w kierunku prostopadłym do osi zaworu z przyłgnią wzmacnianą fazą międzymetaliczną Fe₃Al oraz stellite

Rozkład mikrotwardości wskazuje na wzrost mikrotwardości w obszarze przyłgni zaworu napawanego fazą międzymetaliczną Fe₃Al w porównaniu do przyłgni wzmacnianej stellite. Rozkład mikrotwardości w kolejnych punktach badania jest zbliżony ze względu na brak w tych miejscach umocnień powierzchni zaworu. Rysunek 8 przedstawia porównanie rozkładu mikrotwardości przy pomiarze w kierunku równoległym do osi zaworu z przyłgnią wzmacnioną stellite oraz fazą międzymetaliczną Fe₃Al.



Rysunek 8 Rozkład mikrotwardości w kierunku równoległym do osi zaworu z przyłgnią wzmacnianą fazą międzymetaliczną Fe₃Al oraz stellite

Podczas pomiaru w kierunku równoległym do osi zaworu zauważalna jest różnica w rozkładzie mikrotwardości we wszystkich punktach poddanym badaniu. Prawdopodobnie związane jest to z widocznym udziałem fazy międzymetalicznej w ob-

szarze przyłgni. Zaobserwowano istotną różnicę w mikrotwardości w końcowych punktach badania ze względu na obecność w obszarze badanym większego udziału fazy międzymetalicznej Fe₃Al.

3. WNIOSKI

Przyspieszone zużycie zaworów silnikowych przez wiele lat było problemem dla konstruktorów i producentów silników spalinowych. Ciągłe prace badawcze z zakresu zużycia zaworów skutkują opracowywaniem coraz nowszych materiałów, z których wykonane są zawory oraz udoskonalaniem technologii ich wytwarzania. Postępy te są jednak niwelowane przez wymagania dotyczące zwiększania osiągnięć silnika. W badaniu prowadzonym w kierunku prostopadłym do osi zaworu, w którym przyłgnią była wzmacniona stellite, mikrotwardość osiąga najwyższe wartości w obszarze przyłgni zaworowej. Spowodowane jest to obecnością warstwy stellite, którym wzmacniana jest przyłgni. Z tego samego powodu w badaniu prowadzonym w kierunku równoległym do osi zaworu, w którym przyłgnią była wzmacniona stellite, mikrotwardość osiąga najwyższe wartości w obszarze stożkowej powierzchni kontaktu przyłgni z gniazdem zaworu. W badaniu mikrotwardości prowadzonym równoległe do osi zaworu napawanego fazą międzymetaliczną Fe₃Al, największe wartości mikrotwardości osiąga w obszarze napoiny i wynosi ok 450 HV_{0,2}. W analogicznym badaniu zaworu wzmacnionego stellite mikrotwardość punktowa jest mniejsza w najwyższym punkcie o ok. 50%. Rozkład mikrotwardości wskazuje na wzrost mikrotwardości w obszarze przyłgni zaworu napawanego fazą międzymetaliczną Fe₃Al w porównaniu do przyłgni wzmacnianej stellite. Udział fazy międzymetalicznej prowadzi do lokalnego zwiększenia twardości obszarów napawanych, co może przełożyć się na zmniejszenia zużycia w trakcie eksploatacji w jednostce napędowej.

LITERATURA

- [1] International Energy Agency. "Are We Entering the Golden Age of Gas?". World Energy Outlook. France, 2011.
- [2] International Association for Natural Gas Vehicles (IANGV). Latest International NGV Statistics. 2016; Available from: <http://www.iangv.org/>. [dostęp 02.11.2019 r.]
- [3] NGV Global. Natural Gas Vehicles by country, 2016, Available from: http://www.iangv.org/stats/NGV_Global_Stats1.htm. [dostęp 22.09.2018 r.]
- [4] Tabak J., Natural Gas and Hydrogen. New York: Facts on File, 2009. ISBN-13: 978-0816070848.
- [5] Ogden J. M., Steinbugler M. M., Kreutz T. G., 1999. A comparison of hydrogen, methanol and gasoline as fuels for fuel cell vehicles: implications for vehicle design and infrastructure development. J Power Sources, 79, 143-168.
- [6] <https://afdc.energy.gov/fuels/properties> [dostęp 06.04.2019 r.]
- [7] Technical Evaluation and Assessment of CNG/LPG Bifuel and Flex-Fuel Vehicle Viability, May 1994 NRELffP-425-6544.
- [8] WEAR OF DIESEL ENGINE INLET VALVES AND SEATS Roger Lewis, Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy Department of Mechanical Engineering University of Sheffield, July 2000.
- [9] Wang Y., Narasimhan S., Larson J., Larson J. und Barber G., „The effect of the operating conditions on heavy duty engine valve seat wear“, Bd. 201, Nr. 1-2, pp. 15-25, 1996.
- [10] Zhao R., Barber G. C., Wang Y. S. und Larson J. E., „Wear mechanism analysis of engine exhaust valve seats with a laboratory simulator“, Tribology Transactions, Bd. 40, pp. 209-218, 1997.
- [11] Renz A., Kürten D., Lehmann O., „Wear of hardfaced valve spindles in highly loaded stationary lean-burn large bore gas engines“, Wear, Bde. %1 von %2376-377, pp. 1652-1661, 2017.
- [12] Wu A. P., Ren J. L., Pang Z. S., Murakawa H., Yudea Y., Numerical simulation for the residual stresses of Stellite hard-facing on carbon steel, Journal of Materials Processing Technology 101 (2000).