



Politechnika
Śląska

DYSCYPLINA NAUKOWA
INŻYNIERIA LĄDOWA I TRANSPORT

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Piotr Cybulko

**Zmniejszenie zużycia zaworów wydechowych w silnikach
spalinowych zasilanych paliwami CNG/LNG
z wykorzystaniem faz międzymetalicznych Fe – Al**

Reduction of exhaust valve wear in combustion engines powered by CNG / LNG
fuels with the use of Fe - Al intermetallic phases

Promotor.
dr hab. inż. Bożena Szczucka-Lasota, prof. PŚ.

Promotor pomocniczy
dr inż. Krzysztof Garbala

Gliwice 2021

*Serdeczne podziękowania,
za okazaną pomoc i wsparcie w pisaniu pracy
oraz cenne wskazówki
składam Pani Promotor,
dr hab. inż. Bożenie Szczuckiej-Lasocie, prof.P.Ś.;
dziękuję także Panu dr. Krzysztofowi Garbali*

SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE	6
2. GAZ ZIEMNY JAKO ALTERNATYWNE PALIWO	10
2.1. Wykorzystanie gazu ziemnego w transporcie – analiza danych	10
2.2. Wykorzystanie gazu ziemnego w transporcie – podsumowanie	16
3. WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI GAZU ZIEMNEGO	18
3.1. Wybrane właściwości gazu ziemnego jako paliwa używanego w transporcie	18
3.2. Właściwości gazu ziemnego jako paliwa używanego w transporcie – podsumowanie	22
4. POJAZDY ZASILANE GAZEM ZIEMNYM	25
4.1. Klasyfikacja pojazdów zasilanych gazem ziemnym	25
4.2. Modyfikacje przystosowujące silnik spalinowy zasilany olejem napędowym do zasilania gazem ziemnym	28
5. PRZYLGNIĘ ZAWOROWE	32
5.1. Przyłgnię zaworowe – procesy zużycia	34
5.2. Uszkodzenia przyłgni zaworów wydechowych zasilanych olejem napędowym i gazem ziemnym	35
5.3. Modyfikacje i możliwości nanoszenia warstw zabezpieczających powierzchnie przyłgni zaworowych	45
6. FAZY MIĘDZYMETALICZNE	52
6.1. Faza międzymetaliczna Fe_3Al	53
7. PODSUMOWANIE LITERATURY	55

8. CEL, ZAŁOŻENIA I KONCEPCJA PRACY	59
9. BADANIA WSTĘPNE	62
9.1. Materiał do badań wstępnych	62
9.2. Napawanie fazą międzymetaliczną.....	65
9.3. Wyniki badań wizualnych i ich analiza	66
9.4. Wyniki badań rentgenograficznych i ich analiza.....	72
10. TEZA I CEL BADAŃ ZASADNICZYCH.....	79
10.1. Teza.....	79
10.2. Badania zasadnicze – cel i metodyka.....	82
A) Badania tribologiczne	82
B) Badania metalograficzne.....	87
C) Badania mikrotwardości	89
D) Badania walidacyjne na hamowni silnikowej	90
11. WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH I ICH ANALIZA.....	92
11.1 Badania tribologiczne	92
11.2. Badania metalograficzne	97
A) Wyniki badań makroskopowych	98
B) Wyniki badań mikrostruktury (LM, SEM) i składu chemicznego	100
C) Badania mikrotwardości	108
11.3. Podsumowanie badań laboratoryjnych	112
12. BADANIA WALIDACYJNE	114
12.1. Materiał do badań	114
12.1. Stanowisko badawcze i metodyka badań na hamowni silnikowej	120

12.2. Wyniki badań laboratoryjnych testowych	127
12.3. Podsumowanie badań walidacyjnych i uznanie technologii	140
13. PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	143
Spis tablic.....	148
Spis rysunków	149
Załącznik 1	164
Załącznik 2	170
Streszczenie pracy	173
Summary	175

1. Wprowadzenie

W ciągłym dążeniu do gospodarki niskoemisyjnej i systemu energetycznego wspomaganego przez odnawialne źródła energii, polityka klimatyczna może wymagać odejścia od ropy naftowej, która zapewnia prawie wszystkie potrzeby energetyczne transportu. W Polsce, jak i w całej Europie, aby zmniejszyć emisje związków szkodliwych generowanych w sektorze transportu, wysiłki koncentrują się nad rozwojem technologii wykorzystujących niskoemisyjne źródła energii. Zadania realizowane w kierunku elektryfikacji transportu dotyczą w zasadniczej części pojazdów osobowych. Adaptacja tego kierunku technologicznego dla środków transportu dalekosiężnego może trwać dłużej i nie w każdym przypadku będzie możliwa oraz uzasadniona. W obecnie wykorzystywanej puli paliw stale zauważalna jest rola gazu ziemnego jako dodatkowego paliwa zdolnego w szybkim tempie zmniejszyć udział obecnie eksploatowanych pojazdów zasilanych olejem napędowym i benzyną.

Gaz ziemny ze względu na swoje parametry spalania, działa w znacznie bardziej degradującym stopniu na przyłgnię zaworów wydechowych niż konwencjonalne paliwa płynne. Przyspieszone zużycie przyłgni zaworów prowadzi do spadku stopnia sprężania w cylindrach oraz wymaga częstszej wymiany zaworów w silniku zasilanym gazem ziemnym. Brak szczelności w parze przyłgni zaworowa – gniazdo zaworowe prowadzi do zwiększonej emisji metanu z komory spalania do układu wydechowego. Wpływa to negatywnie na wzrost poziomu emisji tego gazu do atmosfery. W części teoretycznej omówione zostały dane statystyczne i tendencje dotyczące wykorzystania gazu ziemnego w zasilaniu środków transportu na przestrzeni ostatnich 20 lat. Zwrócono uwagę na szybki rozwój technologii i infrastruktury związanej z zasilaniem pojazdów gazem ziemnym. Tendencja rozwoju tego sektora motoryzacji wskazuje jednoznacznie na potrzebę dostosowania pojazdów do zasilania tym paliwem. Stwierdzono, że oprócz produkcji nowych pojazdów samochodowych zasilanych CNG

(compressed natural gas) oraz LNG (liquefied natural gas) istnieje potrzeba modyfikacji pojazdów już eksploatowanych pod kątem przystosowania ich do nowych warunków pracy, determinowanych użyciem nowego paliwa. Opisano wymagane modyfikacje w celu przystosowania silnika ZS do zasilania gazem ziemnym. Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury oraz identyfikacji problemów związanych z eksploatacją zaworów w silnikach zasilanych gazem ziemnym, ustalono, że dotychczasowe rozwiązania techniczno – technologiczne dostępne na rynku nie przynoszą pożądanych rezultatów w zakresie ograniczenia przyspieszonego zużycia przylgni zaworów wydechowych pojazdów zasilanych gazem ziemnym. Zarówno przylgni napawane Stellitem, jak również materiałami z grupy Inconel w seryjnych silnikach spalinowych zasilanych gazem ziemnym, oraz silnikach ZS przystosowanych do zasilania gazem ziemnym wykazują niezadawalającą odporność na zużycie ścierne w warunkach użytkowania.

W rozdziale piątym pracy przeanalizowano również możliwe rozwiązania technologiczne i materiałowe, stosowane na części maszyn i urządzeń pracujących w zbliżonych warunkach do przylgni zaworowych. Wyniki badań prezentowanych przez różnych autorów (rozdział 5 oraz 6), w tym również opracowania patentowe wskazywały na możliwość zastosowania materiałów z faz międzymetalicznych jako materiałów powłokowych na powierzchnie wymagające podwyższonej odporności na ścieranie przy jednoczesnym działaniu temperatury wysokiej. Zauważono, że nierozwiązanym problemem jest opracowanie skutecznej metody nanoszenia warstwy wierzchniej z odpowiedniego materiału, gwarantującego pożądane właściwości użytkowe na stosunkowo małe powierzchnie, charakteryzujące się określoną krzywizną. Udowodniono, że prezentowane metody i dostępne komercyjnie rozwiązania, są często nieekonomiczne w przypadku regeneracji lub modyfikacji konstrukcji przylgni zaworowych lub nie umożliwiają właściwego pokrycia elementu zabezpieczanego i nadanie mu odpowiednich właściwości użytkowych. Potwierdzono, że proponowane technologie, nie są odpowiednie dla wybranych grup materiałowych, charakteryzujących

się podwyższoną odpornością na zużycie ścierne. Analiza danych literaturowych krajowych i zagranicznych pozwoliła zatem jednoznacznie zidentyfikować lukę badawczą, związaną z rozwiązaniem problemu przyspieszonego zużycia ściernego przylgni zaworowej zaworu wydechowego w pojazdach zasilanych CNG oraz ze znalezieniem skutecznego sposobu na przedłużenie trwałości eksploatacyjnej przylgni. Na tej podstawie określono cel pracy (rozdział 8), zgodnie z którym, dla ograniczenia przyspieszonego zużycia przylgni zaworów wydechowych w silnikach ZS opracowano koncepcję materiałowo – technologiczną zwiększenia trwałości eksploatacyjnej przylgni zaworu wydechowego w silniku zasilanym gazem ziemnym.

Koncepcja materiałowo – technologiczna obejmowała:

- dobór gatunku/ rodzaju materiału zabezpieczającego na przylgni zaworowe,
- wybór technologii nanoszenia tego materiału,
- dobór parametrów w tym dobór geometrii materiału spoiwa i sposobu jego obróbki.

Po określeniu koncepcji materiałowo – technologicznej wykonano napoiny na stalowe powierzchnie przylgni zaworowych. Rezultaty wstępnych badań, zaprezentowano w rozdziale 9. Do wykonania napoin zastosowano odmienne parametry prądowo – napięciowe procesu, prędkość napawania oraz zróżnicowaną geometrię spoiwa. Otrzymane w ten sposób powłoki przebadano makroskopowo oraz wykonano badania rentgenograficzne (RT). Wyniki badań i wstępnych analiz umożliwiły dokonać wyboru najwłaściwszych parametrów procesu technologicznego wytwarzania warstwy zabezpieczającej w warunkach laboratoryjnych. Rezultaty badań umożliwiły także określenie sposobu wytwarzania spoiwa z wybranej fazy międzymetalicznej oraz dobór jego najwłaściwszej geometrii dla procesu napawania TIG (tungsten inert gases). Wyniki potwierdziły możliwość uzyskania warstwy zabezpieczającej bez wad spawalniczych.

Na podstawie badań wstępnych oraz przeglądu literatury postawiono w rozdziale 10.1. tezę, zgodnie z którą *napawanie fazą międzymetaliczną Fe_3Al przylgni zaworów*

wydechowych zmniejszy częstotliwość regulacji luzu zaworowego w trakcie eksploatacji przylgni zaworowych w silnikach zasilanych gazem ziemnym oraz silnikach ZS przystosowanych do zasilania tym paliwem.

Rozdziały 10.2. – 12 obejmują badania zasadnicze. Przedstawiono w nich metodykę badań a także wybrane najistotniejsze wyniki badań makro i mikrostruktury, badań tribologicznych, pomiarów mikrotwardości i badań eksploatacyjnych. Prezentowane rezultaty badań umożliwiły udowodnić tezę. W toku eksperymentów i prowadzonych testów dostosowano parametry wytwarzania warstwy wierzchniej do warunków przemysłowych. Wyniki realizowanych prac pozwoliły na aplikację opracowanej metody wytwarzania warstwy wierzchniej do zabezpieczenia przylgni zaworów wydechowych w jednostce napędowej Hino H series 165 HP B53 No: UFH408218 (rozdział 12). Badania eksploatacyjne potwierdziły, że metoda umożliwia zwiększenie trwałości użytkowej przylgni zaworowej w rzeczywistych warunkach pracy. W badaniach tych porównano proces degradacji zaworów wydechowych stosowanych komercyjnie, zabezpieczonych Stellite z zaworami zabezpieczonymi warstwą napawaną ze spoiwa fazy międzymetalicznej Fe_3Al . Dokonano pomiaru wartości luzu zaworowego pomiędzy okresami serwisowymi w trakcie eksploatacji silnika na hamowni podwoziowej.

Wymiernym efektem przeprowadzonych badań i ich analiz jest opracowanie technologii zabezpieczenia powierzchni przylgni zaworu wydechowego w silnikach ZS adaptowanych do zasilania gazem ziemnym warstwą intermetaliczną Fe_3Al . Badania wstępne oraz zasadnicze stanowiły podstawę do zgłoszenia wniosku patentowego nr P.434745 [WIPO ST/10C PL434745] „Sposób podwyższenia odporności ściernej powierzchni elementów konstrukcyjnych”.

2. Gaz ziemny jako alternatywne paliwo

Stale rosnące zainteresowanie alternatywą dla konwencjonalnych paliw płynnych dało początek nowym strategiom odchodzenia od silników zasilanych benzyną i olejem napędowym. Jednym z widocznych efektów strategii odejścia od konwencjonalnych paliw płynnych jest coraz szersze wykorzystanie gazu ziemnego w sektorze transportu. Zgodnie ze scenariuszem amerykańskiej Energy Information Administration (EIA), konsumpcja gazu ziemnego wzrośnie o ok. 32% w 2050 r. w porównaniu z poziomem konsumpcji z 2020 r. [1]. Natomiast Międzynarodowa Agencja Energetyki (IMO), przewiduje wzrost zapotrzebowania na gaz ziemny o 1,4% rok do roku w latach 2021 – 2040 r. W tym czasie udział gazu ziemnego w globalnym mikście energetycznym wzrośnie z 23% do 25%. Oczekuje się również, że do tego czasu gaz ziemny wyprzedzi węgiel i stanie się drugim co do wielkości wykorzystywanym źródłem energii. Prognozuje się, że wzrost popytu w 48% będzie spowodowany zapotrzebowaniem w krajach Azji, głównie Chin [2].

2.1. Wykorzystanie gazu ziemnego w transporcie – analiza danych

Rozwój sektora energetycznego związanego z wykorzystaniem gazu ziemnego zawdzięcza się włoskim inżynierom, którzy poczynili znaczne postępy w pracach rozwojowych w tej dziedzinie, już w latach 30. XX wieku. W wyniku ich działań Włochy są aktualnie liderem w Europie w ilości pojazdów zasilanych gazem ziemnym (1046 stacji tankowania tego paliwa). Udział pojazdów zasilanych gazem ziemnym jest tam najwyższy w Unii Europejskiej i wynosi 1,72% rynku europejskiego [3].

W Europie ilość pojazdów zasilanych gazem naturalnym stale rośnie. Największa ilość pojazdów samochodowych zasilanych tym paliwem zarejestrowana jest kolejno: w Szwecji (53122), Bułgarii (61265), Niemczech (98127), Włoszech (845300). Włoski rząd kontynuuje strategię rozwoju gazu ziemnego jako jednego z paliw zdolnych znacznie szybciej zwiększyć swój udział w rynku, niż ma to miejsce w przypadku pojazdów elektrycznych. Analiza danych literaturowych wskazuje, że [4, 5]:

- we Włoszech już w 2013 r. udział środków transportu napędzanych gazem ziemnym i odnawialnym gazem ziemnym, osiągnął poziom 5% wszystkich sprzedanych samochodów osobowych i stale wzrasta,
- w ciągu dekady zauważalny jest dwukrotny wzrost ilości sprzedanych pojazdów dostawczych.

W Polsce ilość pojazdów zasilanych gazem ziemnym wzrosła w 2019 roku o 40 pojazdów w porównaniu z ilością z 2018 r. i osiągnęła poziom 5379 szt. pojazdów zasilanych tym paliwem i zarejestrowanych w kraju. Należy odnotować istotny ok. 105% wzrost liczby pojazdów ciężarowych zasilanych CNG o ładowności 1500 kg i większej oraz 950% wzrost liczby ciągników siodłowych zasilanych gazem ziemnym [6].

Przytoczone dane świadczą o rozwoju infrastruktury zasilania pojazdów gazem ziemnym do poziomu, który zauważalnie wpływa na zwiększenie udziału pojazdów zasilanych paliwem gazowym w transporcie drogowym. Rozwój sektora logistycznego związanego z dystrybucją gazu ziemnego następuje w parze z rozwojem i przystosowaniem środków transportu do zasilania omawianym paliwem. Stąd szacunkowe dane dla Polski świadczące o ponad 7 – krotnym wzroście ilości pojazdów pomiędzy 2019 r., a 2025 r. [7].

Na świecie jest ponad 28,5 miliona pojazdów zasilanych gazem ziemnym. Zgodnie z danymi literaturowymi, 15 mln pojazdów samochodowych zasilanych gazem ziemnym porusza się po drogach w Azji. Stanowi to prawie 66% pojazdów zasilanych gazem ziemnym na świecie. Większość z nich znajduje się głównie w Chinach, Indiach, Iranie i Pakistanie. Kolejne 24% jest zarejestrowanych w Ameryce Południowej (głównie

w Brazylii i Argentynie), a 8,6% w Europie (głównie we wspomnianych wcześniej Włoszech) oraz 1,4% w Afryce i Ameryce Północnej [8]. Liczbę stacji tankowania gazem ziemnym lub odnawialnym gazem ziemnym (RNG) na świecie w 2019 r. szacowało się na 28375, średnio jedna stacja na 811 pojazdów zasilanych gazem ziemnym (NGV's) [9].

Analiza danych pozwala przypuszczać, że rozwój infrastruktury związanej z dystrybucją gazu ziemnego i jego wykorzystania jako paliwa w transporcie będzie nadal się utrzymywał. Liderem w tym zakresie powinna zostać Azja. W ostatniej dekadzie nastąpił wzrost rynku pojazdów zasilanych gazem naturalnym krajach Azji i wyspach terytorialnych w stopniu niemalże wykładniczym. Po drogach tego kontynentu obecnie (2019 r.) porusza się 20,5 mln pojazdów zasilanych gazem ziemnym, a transport obsługuje 20,5 tys. stacji tankowania tego paliwa [10].

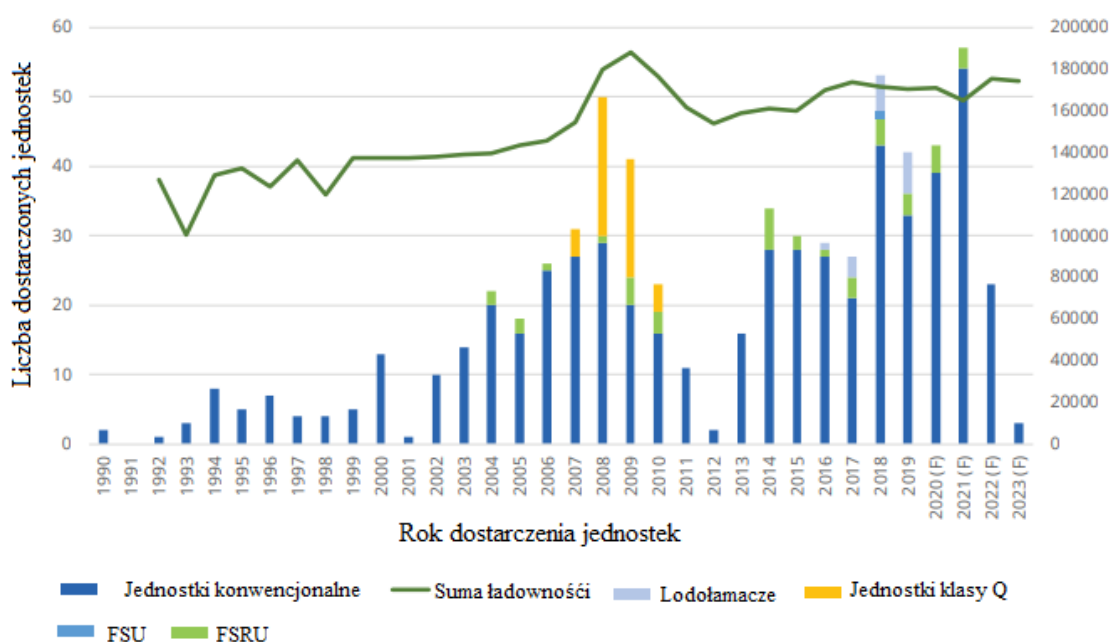


Rys. 2.1. Liczba pojazdów zasilanych gazem ziemnym na świecie i ich tendencja ilościowa na przestrzeni 10 lat (1996 r. – 2016 r.) [7]

Tendencja ilościowa liczby pojazdów zasilanych gazem ziemnym na świecie przedstawiona została na rys. 2.1. Wzrost ilości pojazdów zasilanych gazem ziemnym

osiąga się nie tylko poprzez wprowadzanie na rynek nowych jednostek transportowych ale również poprzez modyfikacje silników ZS, przystosowujące je do zasilania tym paliwem.

Analogiczne trendy wzrostowe i zapotrzebowanie na jednostki zasilane gazem ziemnym obserwuje się w międzynarodowej żegludze morskiej i śródlądowej. Technologia wykorzystania skroplonego gazu ziemnego czyni to paliwo szczególnie interesującym w przypadku silników okrętowych. Znaczący wzrost zainteresowania LNG, jako paliwa wykorzystywanego w marynistyce i środkach żeglugi śródlądowej i morskiej rozpoczął się na początku lat 90. XX wieku. Bezpośrednim bodźcem oddziaływującym na adaptacje sposobu zasilania gazem ziemnym w żegludze, są ciągle ograniczenie zawartości węgla, tlenków azotu i siarki w paliwie okrętowym. Obowiązujące od 2020 r. rozporządzenie wprowadzające restrykcyjne limity obejmuje swoim działaniem strefy kontroli Międzynarodowej Organizacji Morskiej (IMO) i obniża limit zawartości siarki w paliwach płynnych 3,5% do 0,5%. W obszarach kontroli emisji (Morze Bałtyckie, Morze Północne, Morze Karaibskie) poziom ten nie powinien być wyższy niż 0,1% [11]. Globalna flota tankowców powyżej 30 000 cm³ zasilanych LNG na koniec 2019 r. składała się z 5412 statków zasilanych tych paliwem, w tym 34 jednostki regazyfikujące (FSRU) i 4 jednostki magazynowe (FSU). Ilość jednostek wykorzystujących LNG wzrósł o 8,4% w porównaniu do 2018r. Ilość jednostek pływających zasilanych gazem ziemnym przedstawiono na rys. 2.2. [12].



Rys. 2.2. Ilość dostarczonych jednostek, które wykorzystują LNG w latach 1990 – 2023 [12]

Istotnym czynnikiem wpływającym na ilość zamawianych tankowców zasilanych LNG miał kryzys ekonomiczny w 2008 r. Od tego czasu znacząco spadła również ilość zamawianych i dostarczonych tankowców klasy Q. Globalny portfel zamówień na statki LNG liczył 126 przewoźników na koniec 2019 r., co stanowi 23,3% całej floty pływającej [12]. Flota jednostek obsługujących LNG jest stosunkowo młoda. Ponad 90% jednostek we flotach to statki poniżej 20 roku. W bunkrowaniu statków transportujących LNG i zasilanych CNG, obserwuje się przejściowy problem z dostępnością infrastruktury przeznaczonej do bunkrowania (tankowania) statków zasilanych LNG. Można zauważyć, że budowana wciąż infrastruktura jest jedną z ostatnich przełamywanych barier, która ogranicza rozwój tego sektora przed jeszcze szerszym wykorzystaniem gazu ziemnego zarówno w transporcie wodnym jak i lądowym. Możliwość odbioru LNG z tankowców jest jednym z głównych czynników oddziałujących na wzrost wykorzystania tego paliwa w celach transportowych,

energetycznych i przemysłowych. Aktualność tych danych potwierdzają dane literaturowe, które wskazują na [13, 14, 15]:

- Japonia, Korea Południowa i Chiny są największymi na świecie krajami importującymi LNG. Tylko gospodarka chińska jest odpowiedzialna za wzrost popytu netto o 50% na LNG w 2018 r.,
- Unia Europejska jest natomiast największym importerem na świecie biorąc pod uwagę wszystkie gospodarki krajów członkowskich,
- według U.S. Energy Information Agency (EIA) w 2017 r. na Unię Europejską przypadało 13% światowego importu LNG.

W celu zwiększenia możliwości importu LNG drogą wodną obserwuje się wzrost liczby terminali przeznaczonych do bunkrowania tankowców z tym paliwem zarówno w Europie i na świecie. Rys. 2.3. przedstawia aktualną mapę terminali LNG w Europie.



Rys. 2.3. Rozmieszczenie wybranych istniejących oraz planowanych terminali LNG w Europie [16]

W Polsce w koncepcję rozwoju LNG jako paliwa zasilającego okręty wpisuje się budowa i użytkowanie polskiego terminalu LNG w Świnoujściu. W marcu 2019 r. grupy LOTOS i PGNiG zakończyły dwie pierwsze operacje komercyjnego bunkrowania skroplonym gazem ziemnym prowadzone w portach Gdańska i Gdyni. W pierwszej operacji do jednostki pływającej szwedzkiego armatora Fure Valo, zostało przepompowane 54 Mg LNG. Kolejna operacja bunkrowania została przeprowadzona w drugiej połowie marca. Polegała na przepompowaniu 18 Mg LNG do zbiorników jednostki pływającej „Ireland” [17].

2.2. Wykorzystanie gazu ziemnego w transporcie – podsumowanie

Reasumując, należy stwierdzić, że w ostatnim latach nastąpił intensywny rozwój infrastruktury koniecznej do wykorzystywania gazu ziemnego zarówno w środkach transportu lądowego jak i w środkach żeglugi. Rozwój logistyczny transportu przyczynia się do rozbudowy zarówno infrastruktury punktowej (stacje, punkty poboru) jak i infrastruktury liniowej (sieci przesyłowej gazu ziemnego) w celu dostarczenia paliwa w jak najkrótszym czasie, we właściwe miejsce potencjalnym nabywcom. Coraz częściej pojazdy zasilane gazem należą do spółek komunikacji miejskiej zarówno w sektorze publicznym jak i prywatnym.

Analiza literatury z zakresu wykorzystania gazu ziemnego wskazuje na:

- stały i stosunkowo szybki rozwój sektora gazu ziemnego w ostatniej dekadzie,
- intensywny rozwój infrastruktury punktowej oraz liniowej przesyłu gazu ziemnego,
- znaczny przyrost liczby pojazdów zasilanych gazem ziemnym zarówno w transporcie samochodowym jak i morskim.

Można zatem wnioskować, że kierunek związany z prowadzeniem gazu ziemnego jako alternatywnego paliwa dla benzyny i oleju napędowego jest perspektywiczny, a ilość pojazdów zasilanych gazem ziemnym będzie stale wzrastać.

Taki rozwój wymusza stały rozwój jednostek napędowych pojazdów zasilanych gazem ziemnym, a to oznacza, że kierunek badań związany z udoskonalaniem jednostek napędowych i ich modyfikacją jest potrzebny i aktualny.

Oprócz nowych pojazdów konsumenci decydują się stosunkowo często na dostosowanie używanych pojazdów samochodowych zasilanych olejem lub benzyną do wymagań stawianych jednostkom zasilanym gazem ziemnym. Zatem wzrost ilości pojazdów zasilanych gazem ziemnym osiąga się również poprzez modyfikacje silników ZS, przystosowujące je do zasilania tym paliwem. Zmiany w jednostkach napędowych muszą uwzględniać właściwości nowego paliwa. Paliwo, a dokładniej procesy chemiczne spalania decydują o własnościach środowiska (temperaturze, ciśnieniu itp.), w którym omawiane elementy pracują. W ten sposób wpływają na stan elementów konstrukcyjnych determinując ich trwałość podczas eksploatacji oraz czas ich bezpiecznego użytkowania. Dlatego uznano za istotne rozpoznanie właściwości gazu ziemnego pod kątem jego wpływu na własności użytkowe przylgni zaworów wydechowych jako wybranych elementów jednostki napędowej. Wyniki analizy przedstawiono w kolejnym rozdziale.

3. Wybrane właściwości gazu ziemnego

Ze względu na swoje właściwości fizykochemiczne i reakcyjne metan i biometan może być odpowiedzią na rosnące zapotrzebowanie energetyczne w sektorze transportu na świecie. Rozszerzenie zakresu wydobycia oraz wykorzystania energetycznego gazu ziemnego może wpłynąć na redukcję obecnie emitowanego i już obecnego w atmosferze metanu poprzez ograniczenie spalania konwencjonalnych paliw płynnych.

3.1. Wybrane właściwości gazu ziemnego jako paliwa używanego w transporcie

Przy rozpatrywaniu zasilania silnika gazem ziemnym, należy wziąć pod uwagę następujące cechy gazu ziemnego jako paliwa [18, 19, 20]:

- metan charakteryzuje się wyższą odpornością na spalanie detonacyjne, niż konwencjonalne paliwa płynne (tablica 1). Zatem stosowanie metanu obniża poziom szacowanego ryzyka związanego z niekontrolowanym, bardzo niebezpiecznym zapłonem mieszanki paliwowej,
- metan ma wyższą temperaturę spalania w porównaniu do benzyny i oleju napędowego. Temperatura samozapłonu metanu wynosi ok. 750° C, podczas gdy benzyny ok. 250° C i oleju napędowego ok. 350° C. Należy zauważyć, że wysoka temperatura spalania prowadzi do większych obciążeń termicznych przylgni zaworu wydechowego,
- w warunkach standardowego ciśnienia i temperatury, gaz ziemny występuje w gazowym stanie skupienia i ma niższą gęstość energetyczną w porównaniu do oleju napędowego i benzyny. Niższa gęstość energetyczna będzie

przekładała się na ilość paliwa, jakie powinno zostać dostarczone do wtryskiwaczy,

- konwencjonalne paliwa płynne podawane są do komory spalania w postaci ciekłej, co obniża temperaturę przylgni zaworu jak i samego cylindra. W przypadku paliwa gazowego taka zależność nie występuje. Można zatem przypuszczać, że temperatura pracy elementów przylgni zaworowych będzie wyższa.

W celu podwyższenia gęstości energetycznej tego surowca oraz zwiększenia zasięgu dystansu, jaki mogą pokonać pojazdy zasilane gazem ziemnym, spręża się go do 20 MPa i przechowuje w zbiornikach wysokociśnieniowych. Możliwość sprężania i rozprężania gazu ułatwia logistykę transportu gazu od producenta do konsumenta. Skroplenie i transport w stanie ciekłym (LNG) zmniejsza objętość transportowanego gazu ok. 600 – krotnie, umożliwiając transport większej ilości energii w mniejszej jednostce objętości, w porównaniu do transportu gazu ziemnego w formie lotnej. Po dostarczeniu, na miejscu dystrybucji LNG ulega rozprężeniu do CNG i w takiej postaci może być magazynowany lub dystrybuowany. Ponadto istnieje możliwość przechowywania go w ciśnieniu atmosferycznym w zbiornikach kriogenicznych, wymaga to jednak wykorzystania temperatury -162°C [21].

LNG posiada dwukrotnie wyższą gęstość energetyczną niż CNG, jednak ze względu na wyższe koszty adaptacji pojazdu do zasilania tego typu, znacznie częściej jest wykorzystywany w transporcie średniego i dalekiego zasięgu niż w transporcie bliskiego zasięgu. Porównanie wybranych właściwości fizykochemicznych gazu ziemnego i innych paliw konwencjonalnych przedstawiono w tablicy 1 [19].

Analiza danych tablicowych pozwala stwierdzić, że gaz ziemny może być z powodzeniem stosowany w silnikach o wysokim stopniu sprężania. Charakteryzuje się wyższą odpornością na spalanie detonacyjne niż benzyna.

Tablica 1. Porównanie wybranych właściwości fizykochemicznych gazu ziemnego i innych paliw konwencjonalnych [19]

Wybrane parametry	Paliwo				
	Benzyna	Olej napędowy	Naturalny gaz ziemny	CNG (20 MPa)	LNG (-162° C)
Gęstość w 15° C	750	830	0,74	180	466
Temp. samozapłonu [° C]	260	210		580	
Gęstość energetyczna [MJ/l]	34	39	0,039	9,54	24,7
Ekwiwalent energetyczny 1 litra benzyny [l]	1	0,87	0,8	3,56	1,38
Wartość opałowa [MJ/kg]	45,7	47	53	53	33
Liczba oktanowa	92-98	-	-	130	130
Liczba cetanowa	5-20	40-55	0	0	0

Dodatkowo, dane literaturowe wskazują, że gaz ziemny zachowuje swoje parametry spalania nawet przy stopniu sprężania ok. 1:18 [22].

Paliwa o wysokiej liczbie oktanowej przeznaczone są również do wysokowydajnych silników benzynowych, które wymagają nieco wyższego stopnia sprężania. Liczba oktanowa paliwa typu LNG i CNG wynosi 130 (tablica 1) [19].

Na podstawie powyższych danych można wnioskować, że niższą gęstość energetyczną mieszanki stechiometrycznej CNG w komorze spalania w stosunku do mieszanki paliwowo – powietrznej, kompensuje liczba oktanowa. Zatem ostateczna różnica bilansu energetycznego netto będzie porównywalna.

Gaz ziemny posiada bardzo korzystny, najwyższy spośród wszystkich konwencjonalnych paliw płynnych, stosunek energii wytworzonej ze spalania określonej ilości gazu ziemnego w odniesieniu do zawartości węgla, co przekłada się na poziom emisji związków szkodliwych w spalinach. Badania porównawcze poziomów emisji spalin ciężarowych środków transportu zasilanych gazem ziemnym i olejem napędowym wskazują na pozytywny aspekt wykorzystywania gazu ziemnego, jako paliwa w środkach

transportu w kontekście zmniejszenia zanieczyszczenia powietrza w transporcie dalekosiężnym i dużych aglomeracjach miejskich. Według danych literaturowych [23] pojazdy zasilane gazem ziemnym w porównaniu do oleju napędowego emitują 34% mniej tlenku węgla (CO), 24% mniej tlenków azotu (NO_x), 79% mniej pyłów PM w oraz 23% mniej CO₂.

Analiza właściwości gazu ziemnego pozwala stwierdzić, że istnieje możliwość wystąpienia tzw. niecałkowitego spalania metanu. Determinuje to ryzyko przedostania się niespalonego gazu ziemnego do układu wydechowego pojazdu. Można wnioskować, że istotnym czynnikiem będzie zapewnienie w pojazdach zasilanych gazem ziemnym odpowiedniej szczelności komory spalania w całym cyklu eksploatacyjnym pojazdu. Kontrolowanie zjawiska emisji metanu (poślizgu metanu) z komory spalania do układu wydechowego i atmosfery będzie wiązało się również z koniecznością montażu dodatkowych układów oczyszczania spalin lub spalania z wykorzystaniem paliwa konwencjonalnego (podanie do komory spalania niewielkiej, inicjującej dawki ON, umożliwi samozapłon mieszanki w komorze spalania i całkowite spalenie metanu). Właściwym kierunkiem badań jest poszukiwanie nowych rozwiązań mających na celu ograniczenie zjawiska poślizgu metanu poprzez zmiany konstrukcyjne w silniku i stosowanie alternatywnych materiałów o wyższej odporności na zużycie na elementach odpowiedzialnych za utrzymanie szczelności komory spalania. Jest to trend badawczy aktualny i konieczny, gdyż dla zachowania właściwych parametrów pracy pojazdów zasilanych gazem ziemnym, w tym odpowiedniej sprawności silnika niezbędnym jest zachowanie wymaganej szczelności komory spalania. Należy wskazać, że właściwości metanu związane z wyższą temperaturą spalania oraz występowaniem zjawiska niekontrolowanego poślizgu, wymagają zastosowania w pojazdach typu CNG i odpowiednich materiałów konstrukcyjnych albo zabezpieczających także na przylgnie zaworów wydechowych. Materiały te powinny charakteryzować się zatem właściwościami: odpornością na zużycie ścierne, adhezyjne i korozyjne.

3.2. Właściwości gazu ziemnego jako paliwa używanego w transporcie – podsumowanie

Jak wykazano w poprzednim rozdziale, gaz ziemny do zasilania pojazdów posiada szereg właściwości, które decydują o jego stosowaniu w motoryzacji. Niewątpliwie, właściwości gazu ziemnego potwierdzają, że zastosowanie gazu jako paliwa w przemyśle transportowym przyczynia się do ograniczenia emisji spalin, w szczególności emisji CO₂ oraz wyeliminowanie emisji sadzy (cząstek stałych). Wykorzystywany w postaci sprężonej (CNG) lub skroplonej (LNG) jest w stanie wygenerować oszczędności w wydatkach na paliwo.

W przypadku paliwa LNG właściwości jego zdecydowanie ułatwiają logistykę transportu związaną z jego dystrybucją i magazynowaniem. W tym zakresie należy wyróżnić:

- zminimalizowanie ilości miejsca na składowanie paliwa,
- łatwość transportu LNG cysternami drogowymi, co powoduje, że zaopatrzenie stacji tankowania praktycznie nie różni się zaopatrzenia klasycznych stacji w paliwa silnikowe.

Analizując jego właściwości pod kątem trwałości instalacji należy stwierdzić, że:

1. Paliwo gazowe ma większe wymagania niż benzyna i z tego powodu stan układu zapłonowego (świece, przewody zapłonowe), elementów układu ssącego (filtr powietrza), głowicy silnika oraz zaworów musi być odpowiednio kontrolowany. Zaniechanie tych układów może stać się główną przyczyną niewłaściwego działania pojazdów samochodowych przystosowanych do zasilania CNG. Można zatem wnioskować, że wprowadzenie instalacji gazowej wymusi częstsze serwisowanie pojazdu, regulację parametrów ich pracy czy nawet wcześniejszą wymianę niektórych elementów wymienionych instalacji.

2. Analiza danych przedstawionych w rozdziale 3 wskazuje, że gaz ziemny ma wyższą temperaturę spalania niż benzyna. Może to niekorzystnie wpłynąć na żywotność elementów układu oczyszczania spalin. Ponadto gaz ziemny nie ma

właściwości smarnych, jakie posiada benzyna. Zatem można wnioskować, że w przypadku dostosowywania pojazdów zasilanych benzyną do zasilania CNG **będzie można zaobserwować szybsze zużywanie się tulei cylindrów, tłoków, pierścieni, zaworów i gniazd zaworowych.**

Analiza danych omówionych w poprzednim podrozdziale wskazuje również, że szczególnie w kontekście dłuższej eksploatacji przylgnia zaworowa w wyniku wyższej temperatury spalania gazu naturalnego w komorze spalania, a także obserwowanego niekorzystnego zjawiska poślizgu metanu narażona jest na przyspieszone zużycie ściernie, adhezyjne i korozyjne. Zniwelowanie lub znaczne ograniczenie omawianego zjawiska stanowi zatem aktualne wyzwanie dla konstruktorów silników spalinowych i przylgni zaworowych.

3. Właściwości mieszanki gazowej gaz ziemny – powietrze wskazują jednoznacznie, że w przypadku zwiększenia ilości gazu ziemnego w stosunku do powietrza podwyższa się temperatura spalania. W wyniku spalania niestechiometrycznej mieszanki w komorze spalania, przy dłuższej eksploatacji nastąpi nadmierne zużycie elementów układów pojazdu, pracujących w kontakcie ze zbyt wysoką temperaturą. Podczas jazdy prawdopodobnie można będzie zaobserwować przez to spadek mocy silnika. Zatem należy wnioskować, że **dobrze wyregulowana instalacja CNG powinna spalać co najmniej 15% – 30% więcej gazu niż oleju lub benzyny.**

4. Gaz CNG jest mniej kaloryczny od benzyny, potwierdza to poprzedni wniosek, że aby utrzymać odpowiednie parametry spalania **potrzeba go dostarczyć do układu w nieco większej ilości w porównaniu do ilości ON.** Spostrzeżenie to potwierdzają również dane literaturowe, które wskazują, że pojazdy samochodowe (do 3,5t DMC) zużywają ok. 10 kg – 15 kg tego paliwa na 100 km, a ciągniki siodłowe w korzystnych warunkach ok. 23 – 27 kg [24]. Uwzględniając koszty produkcji i zakupu paliwa gazowego, można stwierdzić, że stanowi to ekonomiczne przedsięwzięcie.

Jak wykazała analiza właściwości metanu (gazu ziemnego) jego znaczną zaletą jest wysoka wartość liczby oktanowej (powyżej 100). **Właściwość ta predysponuje to paliwo**

do stosowania w silnikach o zapłonie iskrowym i wpływa bardzo korzystnie na właściwości przeciwstukowe. Wniosek popierają badania, dotyczące autobusów komunikacji miejskiej zasilanych paliwem gazowym. Stwierdzono w nich, że stosowanie gazowego paliwa redukuje poziom hałasu pochodzącego od silnika o ok. 8% [25].

W kolejnym rozdziale postanowiono przeanalizować pojazdy samochodowe zasilane gazem ziemnym. W szczególności, zwrócono uwagę na stosowane modyfikacje w pojeździe przystosowujące silnik spalinowy zasilany olejem napędowym do zasilania gazem ziemnym. Sprawdzone czy przeanalizowane w rozdziale 3 właściwości gazu ziemnego, wpływające na trwałość jednostki napędowej zostały uwzględnione w konstrukcji pojazdów w stopniu wystarczającym.

4. Pojazdy zasilane gazem ziemnym

Środki transportu zasilane gazem ziemnym można sklasyfikować na kilku płaszczyznach. Trzeba wziąć pod uwagę obowiązujące akty prawne krajów i wspólnot zrzeszających te kraje, a także zwrócić uwagę na sposób wykorzystania tego paliwa w silniku spalinowym, sposób magazynowania tego paliwa w pojeździe i poza nim.

Część pojazdów samochodowych zasilanych LNG lub CNG stanowią pojazdy fabrycznie przystosowane do zasilania omawianym paliwem. Kolejną partię stanowią pojazdy, których układy paliwowe i współpracujące zostały zmodyfikowane pod kątem zasilania gazem ziemnym. W niniejszym rozdziale postanowiono przeanalizować wszystkie dostępne środki transportu drogowego samochodowego zasilane CNG i LNG ze szczególnym uwzględnieniem głównych modyfikacji stosowanych w pojazdach zasilanych olejem napędowym w celu dostosowania ich do zasilania gazem.

4.1. Klasyfikacja pojazdów zasilanych gazem ziemnym

Niektóre środki transportu CNG/LNG eksploatowane są w technologii dwupaliwowej, w której możliwy jest awaryjny tryb pracy podczas zasilania silnika paliwem podstawowym. Inne nie mają awaryjnego trybu pracy silnika. Pojazdy lekkie pracują w systemie jednopaliwowym lub dwupaliwowym (pojazdy dostawcze), podczas gdy pojazdy ciężkie są zasilane równocześnie w sposób jedno, jak i dwupaliwowy. Zgodnie z dyrektywą 2007/46/WE dotyczącą homologacji typu pojazdów, w których wszystkie pojazdy napędzane benzyną/gazem mające zbiornik paliwa nieprzekraczający 15 litrów należy zaklasyfikować jako „jedenpaliwowy”, a powyżej tej wartości pojazd będzie „dwupaliwowy” [26]. Rozporządzenie WE nr 443/2009

Parlamentu Europejskiego i Rady Europejskiej określa, że w przypadku pojazdów dwupaliwowych (benzyna/gaz) certyfikat zgodności zawiera konkretne wartości wielkości emisji CO₂ dla obu rodzajów paliw, jednak państwa członkowskie „wykorzystują tylko tę liczbę, która jest mierzona dla gazu” [27]. Również rozporządzenie Komisji (UE) nr 1014/2010 z dnia 10 listopada 2010 r. w sprawie „monitorowania i zgłaszania danych dotyczących rejestracji nowych samochodów osobowych” zgodnie z rozporządzeniem (WE) nr 443/2009 zobowiązuje państwa członkowskie do prowadzenia takiej klasyfikacji [28].

Klasyfikacja systemów zasilania gazem ziemnym może być przeprowadzona na kilku płaszczyznach, jednak najczęściej przeprowadza się ją w odniesieniu do miejsca instalacji, sposobu magazynowania gazu ziemnego oraz sposobu jego dawkowania:

- środki transportu jednopaliwowe – dedykowane przez producenta i przeznaczone do zasilania wyłącznie gazem ziemnym/biometanem. Silniki te zaprojektowane są do stuprocentowego pokrycia zapotrzebowania energetycznego gazem ziemnym i wymagają zapłonu iskrowego. W związku z tym, silniki te są najczęściej stosowane w pojazdach zasilanych gazem ziemnym produkowanych przez koncerny motoryzacyjne,
- środki transportu dwupaliwowe – zasilane sprężonym gazem ziemnym/biometanem oraz drugim rodzajem paliwa czyli benzyną lub olejem napędowym. W tym przypadku gaz ziemny jest magazynowany w wysokociśnieniowych zbiornikach paliwa. Pojazdy dwupaliwowe wymagają dwóch osobnych układów paliwowych, ale dają możliwość zwiększenia zasięgu ze względu na dwa zbiorniki paliwa (podstawowy i CNG). W tej sytuacji eliminuje się ryzyko związane z problemami w dostępności do infrastruktury gazu ziemnego przy jednoczesnej możliwości korzystania z parametrów silnika ZS. W przypadku pojawienia się w zasięgu infrastruktury przystosowanej do tankowania gazu ziemnego, te środki transportu pozwalają przejść ponownie na ten rodzaj zasilania,

- środki transportu dwupaliwowe zasilane olejem napędowym oraz wyposażone w instalację LNG. Łączą zalety zwiększonego zasięgu jazdy na pełnych zbiornikach paliwa oraz dają możliwość przejścia na zasilanie awaryjne w przypadku braku paliwa i infrastruktury przystosowanej do tankowania LNG. Zakup jednopaliwowych pojazdów wyposażonych w fabryczną instalację CNG wydają się być szczególnie uzasadniony w przypadku spółek komunikacji miejskiej i gospodarek komunalnych, zlokalizowanych w pobliżu infrastruktury zasilania pojazdów CNG/LNG. Jednak w branży spedycyjnej, gdzie bardzo istotna jest elastyczność w wyborze tras, coraz częściej firmy decydują się na doposażenie pojazdów we flocie w instalację CNG,
- środki transportu obecnie zasilane olejem napędowym, które po przeprowadzeniu modyfikacji ich konstrukcji, zdolne są do zasilania gazem ziemnym przy jednoczesnym udziale paliwa podstawowego.

Silniki o zapłonie samoczynnym charakteryzują się wyższą sprawnością niż silniki benzynowe, ponieważ wykorzystują samozapłon mieszanki paliwowo – powietrznej. Inaczej niż ma się to w przypadku pracy silnika w cyklu Otto. Pojazdy dwupaliwowe z tej grupy podając niewielką ilość oleju napędowego jako dawkę „pilotażową” w celu zainicjowania spalania, zastępują resztę potrzebnego oleju napędowego gazem ziemnym. Poziom gazu ziemnego stosowanego w silnikach dwupaliwowych różni się w zależności od obciążenia silnika. Taki wariant zasilania wymaga przeprowadzenia modyfikacji jednostki napędowej.

4.2. Modyfikacje przystosowujące silnik spalinowy zasilany olejem napędowym do zasilania gazem ziemnym

Poprawa efektywności pracy silnika i zmniejszenie ich poziomów emisji spalin stały się najważniejszymi kierunkami rozwoju konstrukcji silników. Silnik ZS charakteryzuje się wyższą sprawnością cieplną w porównaniu z silnikiem ZI [20, 30]. Cechuje je jednak wyższy poziom emisji spalin w porównaniu do silnika ZI oraz silnika zasilanego gazem ziemnym. Okres eksploatacji pojazdu zasilanego olejem napędowym wprowadzonego do ruchu często wynosi kilkadziesiąt lat. W celu spełnienia norm emisji spalin w pojazdach obecnie eksploatowanych silniki zasilane olejem napędowym mogą być poddane modyfikacjom przystosowującym je do zasilania gazem ziemnym [31, 32, 33]. Modyfikacje te obejmują zmniejszenie stopnia sprężania komory spalania.

Zmniejszenie stopnia sprężania może być zrealizowane na kilka sposobów, poprzez zmianę geometrii powierzchni tłoka; skrócenie długości ramienia w korbowodzie; wymiana uszczelki pod głowicą; montaż szyny zasilającej jednostkę napędową w CNG; modyfikację kąta pomiędzy płaszczyzną głowicy a osią prowadzącą zaworu itp. Najważniejsze z nich omówiono poniżej.

1. Zmiana geometrii powierzchni tłoka.

Realizacja tej modyfikacji polega na frezowaniu denka tłoka w celu wykonania wgłębienia w tłoku, co skutkuje większą objętością komory spalania podczas zapłonu mieszanki paliwowo – powietrznej.

Innym sposobem na zmniejszenie stopnia sprężania jest skrócenie długości ramienia w korbowodzie.

2. Skrócenie długości ramienia w korbowodzie.

Metoda ta jest kosztowna i wymaga istotnej ingerencji w konstrukcję silnika. Niewłaściwy sposób modyfikacji tego typu może prowadzić do powstawania wibracji w całej jednostce napędowej oraz koncentracji obciążeń termicznych w tłoku. Przekłada

się to na obniżenie wytrzymałości zmęczeniowej tłoka. Dodatkowo zmniejszając długość ramion w korbowodzie rezygnuje się z części charakterystyki wyższego momentu obrotowego występującego przy niskich obrotach silnika, co jest istotne w pojazdach dostawczych, ciężarowych czy autobusach.

Najprostszy sposób zmniejszenia stopnia sprężania uzyskuje się poprzez wymianę uszczelki znajdującej się pomiędzy głowicą a blokiem silnika.

3. Wymiana uszczelki pod głowicą.

Jest to stosunkowo prosta modyfikacja obejmująca zastąpienie oryginalnej uszczelki pod głowicą na uszczelkę o większej grubości. Powiększa się w ten sposób objętość nad tłokiem podczas suwu sprężania, co zmniejsza stopień sprężania w komorze spalania.

4. Montaż szyny zasilającej jednostkę napędową w CNG.

Szyna zasilająca ma za zadanie dostarczyć CNG do wtryskiwaczy gazu ziemnego. Jest ona wyposażona jest w czujniki ciśnienia CNG. Szyna zasilająca wykonana jest najczęściej ze stali nierdzewnej.

5. Montaż wtryskiwaczy CNG.

Wtryskiwacz CNG zasilany jest z szyny paliwowej, a czas otwarcia wtryskiwacza jest obliczany na podstawie informacji z czujników jednostki sterującej (ECU). Żywotność wtryskiwacza CNG jest porównywalna z żywotnością wtryskiwacza konwencjonalnego paliwa płynnego.

6. Modyfikacja kąta pomiędzy płaszczyzną głowicy a osią prowadzącą zaworu.

W silnikach ZS należy zapewnić ruch wirowy w komorze spalania. Ruch ten ułatwia zwiększenie homogeniczności mieszanki paliwowo – powietrznej. W prostszych jednostkach napędowych wymagana jest w tym celu obróbka mechaniczna gniazda zaworu. Nowsze jednostki silnikowe projektowane są w sposób, który zapewnia styczny kąt pomiędzy płaszczyzną głowicy a osią prowadnicy zaworu. Różnice w kącie dostarczania powietrza i późniejszej rotacji wewnątrz komory spalania przedstawiona jest na rys. 4.1.



Rys. 4.1. Cyrkulacja powietrza w komorze spalania [33]

7. Montaż czujnika spalania stukowego.

Czujnik spalania stukowego monitoruje proces spalania detonacyjnego w silniku spalinowym. W przypadku wykrycia spalania stukowego w komorze spalania, czujnik za pośrednictwem jednostki sterującej, opóźnia kąt wyprzedzenia zapłonu o wartość odpowiadającą ustąpieniu spalania detonacyjnego w komorze spalania.

8. Montaż przepustnicy.

W celu zapewnienia stechiometrycznego poziomu mieszanki powietrza i gazu ziemnego, dawka gazu ziemnego podawana przez wtryskiwacz musi zostać precyzyjnie określona w stosunku do ilości powietrza w cylindrze. Przepustnica reaguje na położenie elektronicznego pedału przyspieszenia i steruje ilością powietrza podawaną do komory spalania. Na podstawie informacji o ilości dostarczanego powietrza, jednostka sterująca silnika dobiera odpowiednią dawkę gazu ziemnego.

Reasumując, analiza danych w tym rozdziale pozwala jednoznacznie stwierdzić, że modyfikacje przystosowujące silnik ZS do zasilania gazem ziemnym obejmują swoim działaniem głównie układ zasilania oraz zmiany konstrukcyjne w układzie korbowo – tłokowym. Zatem, należy jednoznacznie podkreślić, że w dotychczasowych modyfikacjach pojazdów nie uwzględniono pełnego negatywnego oddziaływania nowej mieszanki paliwowej (wprowadzanej do analizowanych pojazdów), na trwałość eksploatacyjną wybranych elementów konstrukcji, w tym przyłgni zaworowych.

Negatywne skutki oddziaływania paliwa gazowego na wybrane elementy konstrukcji pojazdów wynikają bezpośrednio z właściwości fizyczno – chemicznych mieszanki. Właściwości te są istotne, gdyż wpływają znacząco na zmiany środowiska pracy omawianych elementów konstrukcyjnych. Zmiana agresywności środowiska jest z kolei przyczyną zwiększonego zużycia przyłgni zaworowych. Zatem brak jakichkolwiek modyfikacji, w tym zakresie będzie objawiał się przyspieszonym zużyciem przyłgni zaworowych. *Bez istotnej ingerencji w powierzchnię przyłgni zaworu w silniku modyfikowanym, nastąpi przyspieszona degradacja tego komponentu.* Należy zauważyć, że w jednostce napędowej, w której uszkodzeniu ulega przyłgnia zaworu wydechowego, występuje brak szczelności komory spalania i niekontrolowana emisja metanu do układu wydechowego. Zatem problem jest istotny, ponieważ skutki uszkodzeń, to nie tylko osiągi pojazdu, ale także bezpieczeństwo środowiska.

W kolejnym rozdziale postanowiono przyjrzeć się bliżej konstrukcji zaworu wydechowego, warunkom jego pracy i rozwiązaniom dostępnym na rynku, wpływającym na zwiększenie trwałości eksploatacyjnej przyłgni zaworowej.

5. Przyłganie zaworowe

Zużycie zaworów silnikowych, przez wiele lat było problemem dla konstruktorów i producentów silników spalinowych. Obecnie w Polsce zawory dolotowe wykonuje się ze stali zaworowych, szczególnie H9S2M, H10S2M, natomiast bardziej obciążone cieplnie zawory wydechowe najczęściej ze stali 4H14N14W2M oraz 50H21G9N4 wg. PN – 72/H – 86022. [34, 35, 36]. Skład chemiczny wybranych stali stosowanych na zawory przedstawiono w tablicy 2.

Tablica 2. Skład chemiczny stali stosowanych na zawory [35-36]

Oznaczenie stali	Średnia zawartość pierwiastków [%]							Żaroodporne w powietrzu [° C]	Temperatura [° C]		Struktura stali po obróbce cieplnej
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	inne		(H) (P)	(O) (S)	
H9S2M	0,40	≤0,7	2,5	9	≤0,6	-	-	850	(H) 1040 ÷ 1060	(O) 700 ÷ 790	Martenzyt wysoko- odpuszczony
4H14N14W2M	0,4 5	≤0,7	≤0,8	14	14	0,3	W: 2,4	900	(P) 1050 ÷ 1100	-	Austenit
50H21G9N4	0,5 2	9,5	≤0,5	21	4	-	N: 0,44	900	(P) 1150 ÷ 1170	(S) 700 ÷ 750	Austenit i węgiel

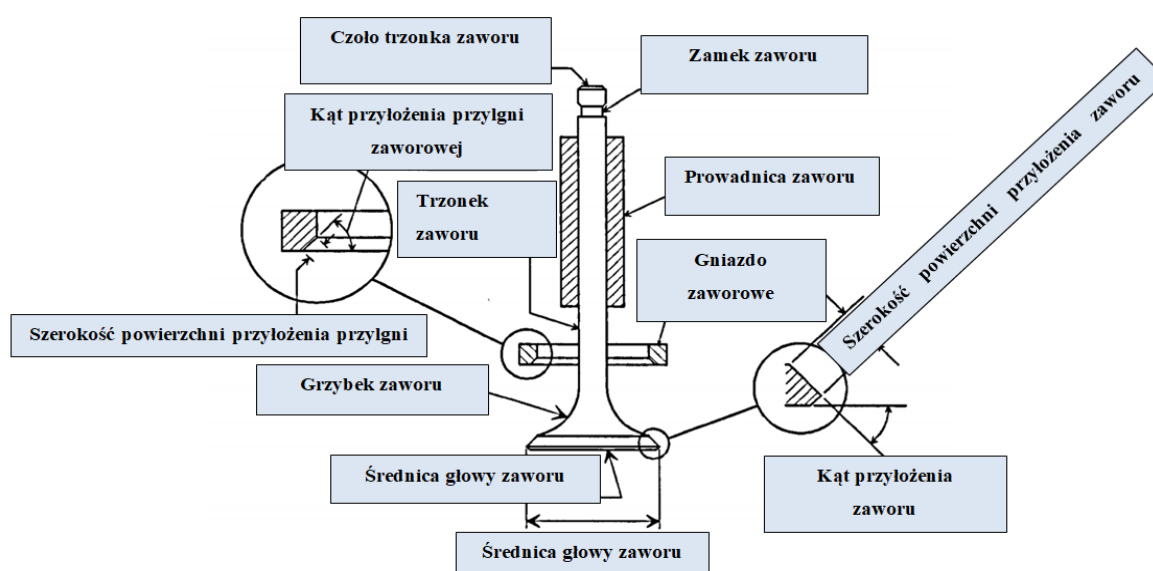
P≤0,030÷0,035%; S≤0,030%; Cu≤0,3%; Ti≤0,2%; (H) - hartowanie; (P) - przesycanie;
(O) - odpuszczanie; (S) - starzenie

W zaworach wydechowych ze względu na wyższą temperaturę ich pracy, w porównaniu do zaworów dolotowych, często wykorzystuje się również przerobiony plastycznie utwardzany wydzieleniowo, stop niklowo – chromowy z dodatkiem tytanu i aluminium np. Nimonic 80A. Dobierając materiały konstrukcyjne przeznaczone na zawory, należy wziąć pod uwagę warunki, w których mają być one eksploatowane.

Zawory w silnikach spalinowych, a zwłaszcza zawory wydechowe powinny spełniać szereg wymagań, z których najważniejsze to [35, 38, 39, 40]:

- wysoka odporność na środowisko korozyjne, w niskich oraz wysokich temperaturach,
- wysoki współczynnik przewodnictwa cieplnego, ze względu na łatwość rozpraszania ciepła przejmowanego od spalin,
- niski współczynnik rozszerzalności cieplnej, ze względu na obniżenie koncentrujących się naprężeń termicznych,
- wysoka odporność na obciążenia uderowe, co jest szczególnie ważne w silnikach ZI ponieważ przy wysokiej prędkości obrotowej (ponad 5000 min^{-1}) grozi to urwaniem się grzybka zaworu wydechowego,
- wysoka odporność na zużycie ścierne,
- niska skłonność do samohartowania się,
- stałość struktury materiału zwłaszcza w wysokich temperaturach.

Schemat budowy pary ciernej przylgna zaworowa – gniazdo zaworu przedstawiono na rys. 5.1.



Rys. 5.1. Schemat budowy zaworu, w tym pary ciernej przylgna zaworowa – gniazdo zaworu [41]

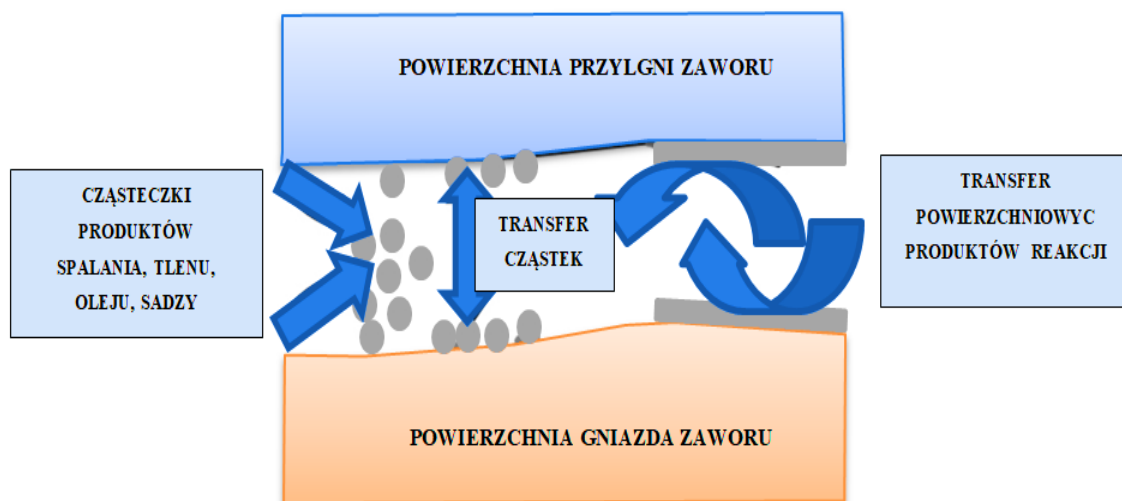
5.1. Przylganie zaworowe – procesy zużycia

Zawory narażone są na zmienne warunki pracy. W analizowanej literaturze [41 – 47] proces degradacji przylgni zaworowej jest definiowany jako suma składowych mechanizmów zużycia: uderowego, zużycie ściernego, korozyjnego i adhezyjnego.

Według Wang [42, 43] zużycie uderowe definiuje się jako zużycie dwóch powierzchni zderzających się prostopadle do ich kontaktowych powierzchni styku. Wpływ liczby cykli pracy, ciśnienia spalania i temperatury na zużycie zaworu. Jego zespół w 1996 r. wykazał, że zużycie ściernie zaworu wzrasta wraz ze wzrostem ciśnienia w komorze spalania. W przeprowadzonych i opublikowanych w 1997 r. przez Zhao badaniach porównawczych eksploatacji zaworów przy zastosowaniu różnych materiałów, zaobserwowane zużycie połączono w głównej mierze z brakiem osiowości gniazda zaworowego i zaworu, a także występującym tam zużyciem ściernym [48]. Na podstawie badań autorzy doszli do wniosku, że zużycie zaworu jest złożoną kombinacją zjawisk adhezji, utleniania i zużycia ściernego. Jednym z istotniejszych parametrów decydujących o długości cyklu eksploatacyjnego, pary ciernej przylgania zaworowa – gniazdo zaworowe jest tworzenie się ochronnej warstwy tlenków na powierzchniach kontaktowych tej pary [43, 48]. W toku analizy dostępnej literatury zwrócono uwagę na badania, które wiążą wpływ składu atmosfery i pary wodnej omywającej zawór, na skład powierzchniowej warstwy tlenków wytwarzającej się na przylgni zaworowej [49].

Na podstawie analizy literatury można stwierdzić, że proces zużycia uderowego będącego skutkiem realizacji wysokiej ilości cykli otwarcia i zamknięcia, wskazywany jest jako czynnik mający dominujący wpływ na proces zużycia zaworu. Inne procesy tribologiczne, takie jak przyspieszone zużycie ściernie, są konsekwencją ciśnienia występującego w komorze spalania. Badania wpływu temperatury na proces zużycia przylgni zaworowej wskazują na znaczne obniżenie zużycia powyżej temperatury 400° C. Jest to skutek powstających na powierzchniach stykowych pary

ciernej warstw tlenków metali z materiału rodzimego pary tribologicznej [47, 50, 51]. Na rys. 5.2. zilustrowano uproszczony model transferu cząstek w parze tribologicznej przylgnia zaworowa – gniazdo zaworowe.



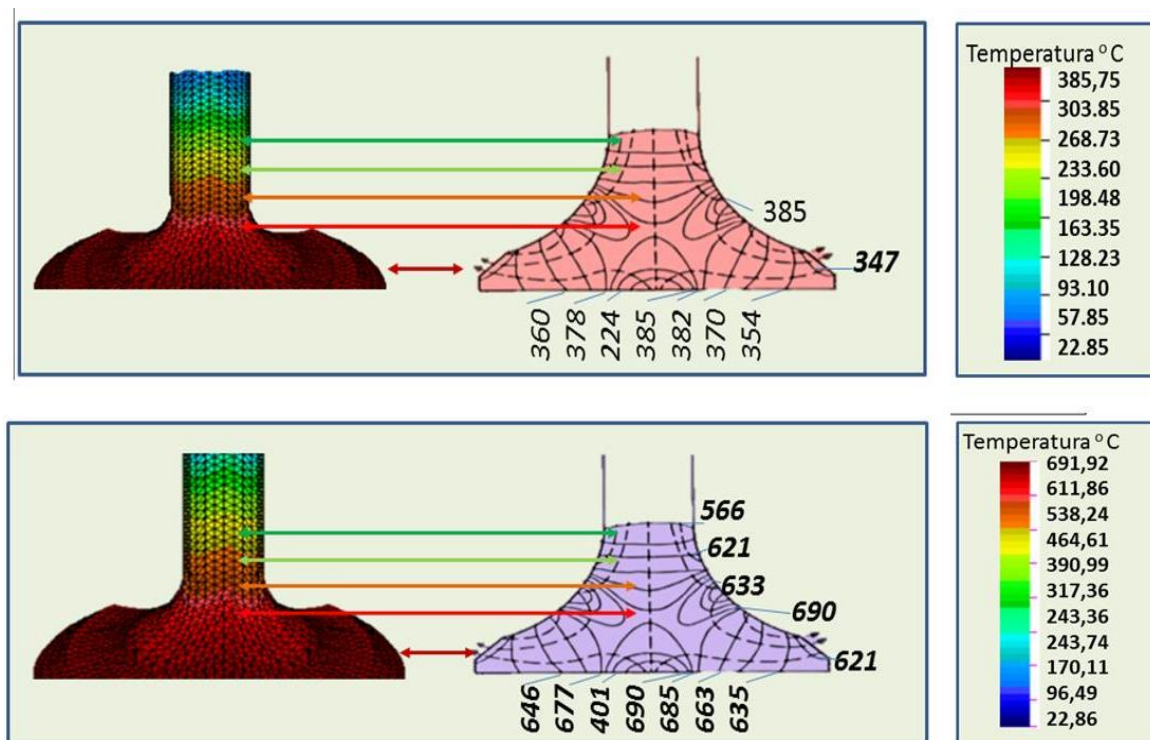
Rys. 5.2. Transfer cząstek w parze ciernej przylgnia zaworowa – gniazdo zaworowe [53]

Według zaprezentowanego schematu, na proces degradacji przylgni zaworowej składają się mechanizmy zużycia ściernego, korozyjnego i adhezyjnego.

5.2. Uszkodzenia przylgni zaworów wydechowych zasilanych olejem napędowym i gazem ziemnym

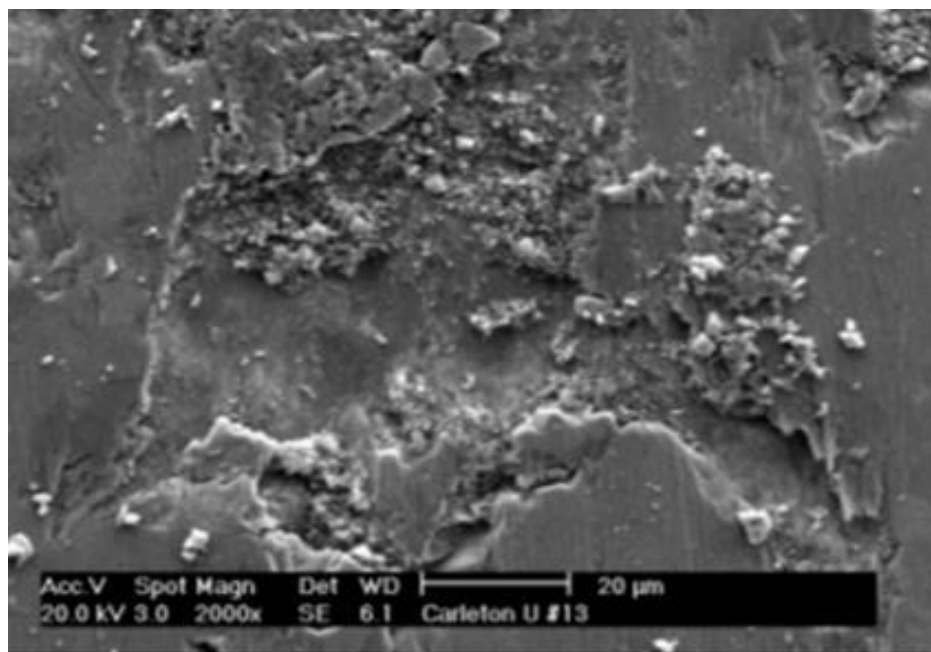
Wpływ temperatury panującej w komorze spalania jest jednym z najbardziej degradujących czynników, który oddziałuje na zawór. Przylgnia zaworu wydechowego, która znajduje się na drodze gazów wydechowych opuszczających wnętrze cylindra jest najbardziej narażona na degradujący wpływ temperatury powstającej w wyniku spalania

gazu ziemnego w komorze spalania. Przyspieszona degradacja przylgni zaworu wydechowego silnika zasilanego gazem ziemnym wynika z wyższej temperatury zaworu dla silników zasilanych tym paliwem, wynoszącej 750°C , w porównaniu do temperatury spalin w silniku zasilanym olejem napędowym ok. (600°C) i benzyną (ok. 700°C) [54, 55]. Rozkład temperatur w talerzyku zaworu przedstawiono na rys. 5.3.



Rys. 5.3. Przykładowy symulowany rozkład temperatury i rozkład izoterm w przekroju grzybka zaworu wylotowego a) silnika ZS zasilanego olejem napędowym b) silnika ZI zasilanego benzyną, (opracowanie własne na podstawie [54])

W wyniku oddziaływania wysokiej temperatury, przylgni zaworu traci swoje właściwości mechaniczne, w tym twardość. Obciążenie termiczne zaworów wydechowych w 76% jest generowane podczas jego zamknięcia i kontaktu z gniazdem zaworu. Pozostałe 24% ciepła odprowadzane jest przez trzpień zaworu [56, 57]. Prowadzi to do wniosku, że materiał z którego wykonana jest przylgna w głównej mierze odpowiada za odprowadzenie ciepła w tym elemencie.



Rys. 5.4. Przykładowa struktura powłoki Stellitowej z uwidocznionym obszarem świadczącym o rozpoczynającym się procesie degradacji [58]

W wyniku koncentracji naprężeń cieplnych powstają miejscowe osłabienia struktury, które stanowią źródło rozpoczynającego się procesu degradacji przyłgni zaworu skutkującego jego późniejszą awarią. Na rys. 5.4. przedstawiono obszar rozpoczynającego się procesu degradacji powłoki Stellitowej.

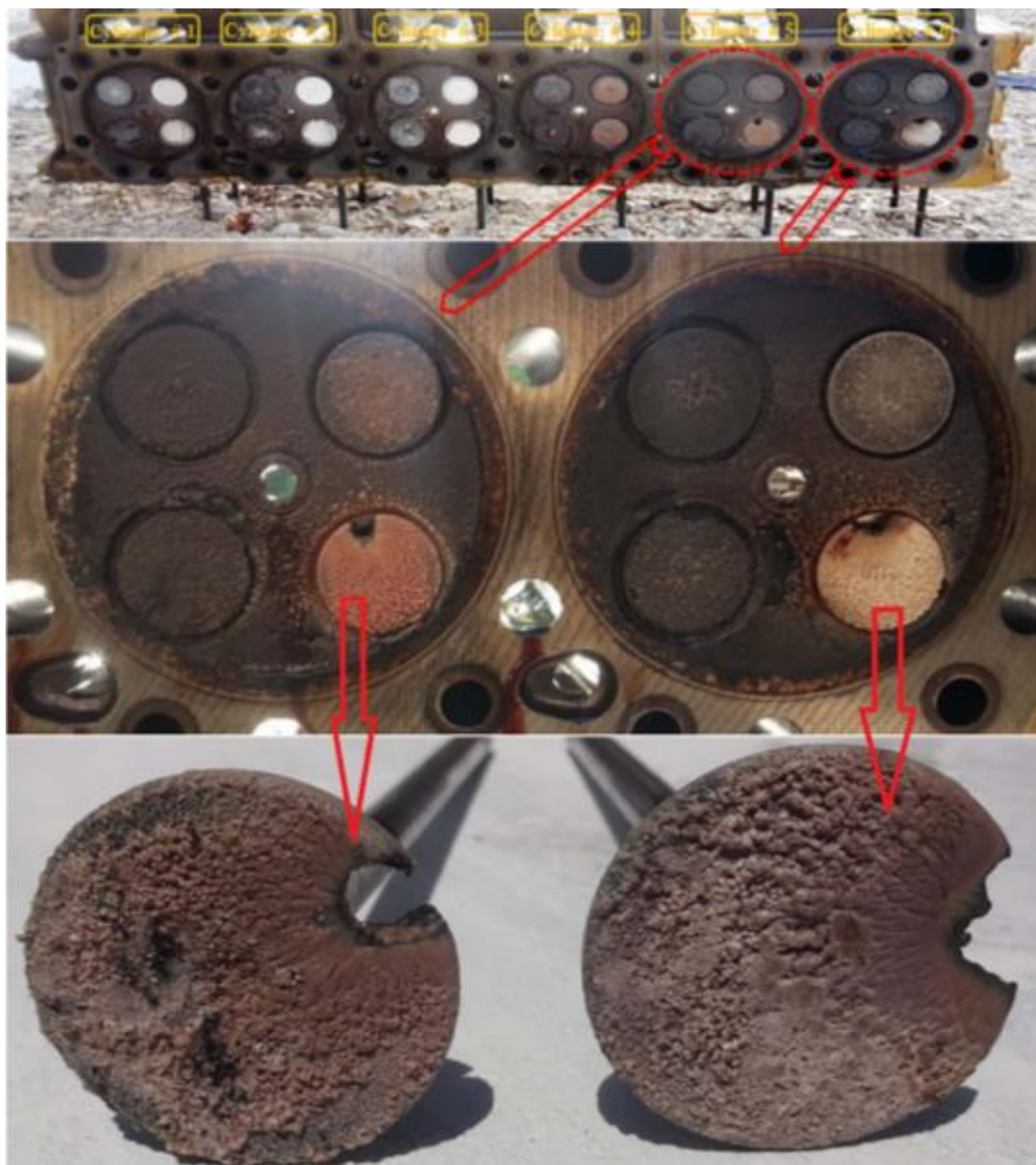
Na rys. 5.5. przedstawiono uszkodzenia przyłgni zaworu wydechowego napawanego Stelitem w silniku ZS zasilanym samym olejem napędowym. Pokazane na rys. 5.5. uszkodzenia zaworów zlokalizowane są na stożkowej powierzchni uszczelniającej zaworu. Widoczne są wyraźne ubytki materiału, wżery w strukturze przyłgni zaworu. Obserwowane zmiany spowodowane są miejscowym przegrzaniem materiału przyłgni, w wyniku którego następują zmiany strukturalne skutkujące obniżeniem twardości i wzmożonym utlenianiem powierzchni przyłgni zaworu [59].



Rys. 5.5. Uszkodzenie powierzchni przylgni zaworu wydechowego w silniku ZS zasilanym olejem napędowym [59]

Podczas kontaktu przylgni zaworu z gniazdem zaworu następuje powiększenie ubytków w powierzchni przylgni zaworowej. Rozwijające się pęknięcie prowadzi do utraty szczelności w komorze spalania i tworzenia się kanału przez który przemieszczające się spaliny dodatkowo działają erozyjnie na wewnętrzne ściany kanału. Skutkiem powstania nieszczelności jest spadek stopnia kompresji w cylindrze i podwyższenie emisji spalin do układu wydechowego. W celu zapewnienia szczelności komory spalania przewidziany jest konstrukcyjnie luz zaworowy w postaci minimalnego odstępu między określonymi elementami w mechanizmie rozrządu. Luz zaworowy w trakcie eksploatacji silnika zmienia swoje wartości w miarę wzrostu temperatury pracy jednostki napędowej. Zbyt mała wartość luzu zaworowego prowadzi do niedomknięcia zaworów, a zbyt duży luz skutkuje zwiększeniem hałasu silnika i przyspieszonym zużyciem układu rozrządu [60]. Bardzo podobny mechanizm niszczenia stożkowej powierzchni uszczelniającej występuje w zaworach z przylgnią zabezpieczoną inconelem. Zawory te wykorzystywane są w pojazdach przystosowanych przez producenta do zasilania gazem ziemnym.

Na rys. 5.6. przedstawiono widok głowicy silnika zasilanego gazem ziemnym wraz uszkodzonymi zaworami, w których powierzchnia przylgni zaworu została napawana inconelem.



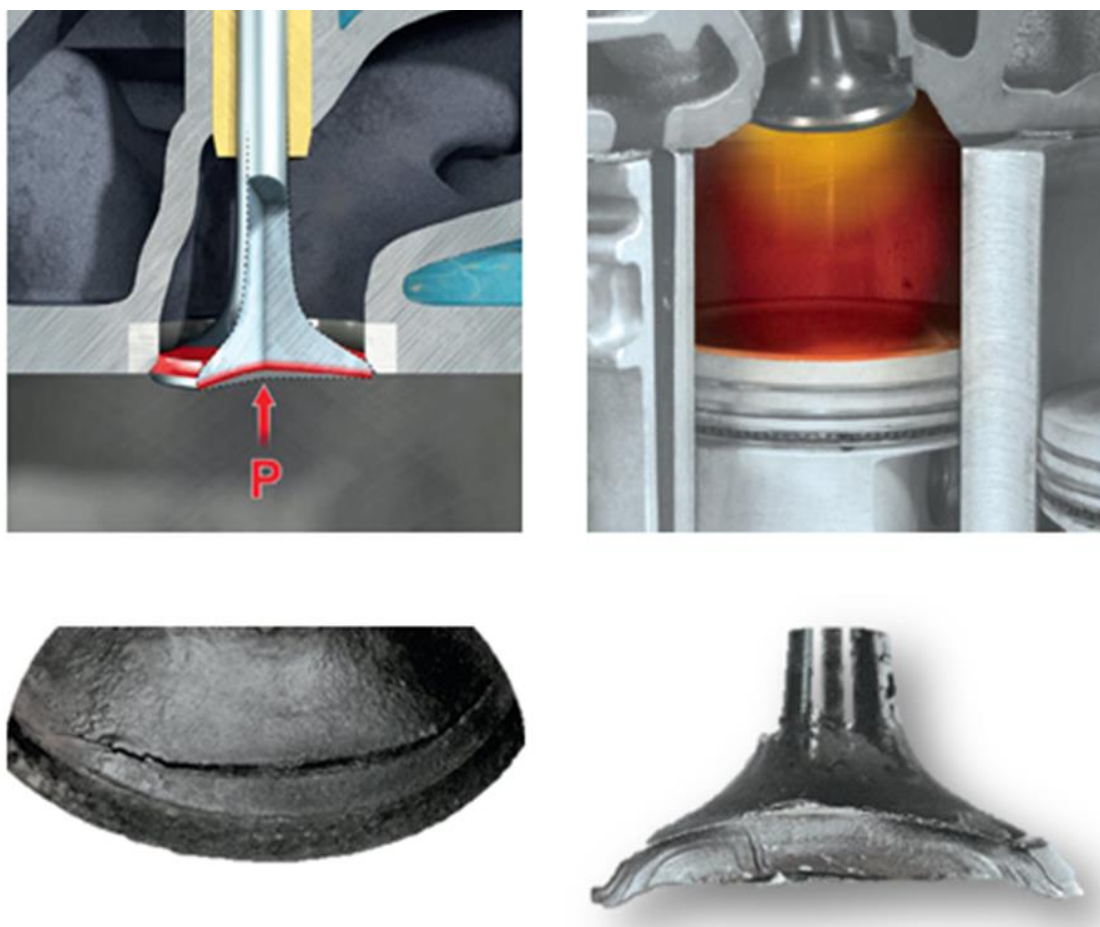
Rys. 5.6. Uszkodzone zawory wydechowe silnika zasilanego gazem ziemnym [59]

W głowicy zamontowanych jest 12 zaworów wydechowych. W 6 zaworach wydechowych widoczne są istotne ubytki materiału w przylgni zaworowej. Proces degradacji przylgni zaworu wydechowego w silniku zasilanym gazem ziemnym

jest bardzo zbliżony do mechanizmu niszczenia stożkowej powierzchni uszczelniającej zaworu silnika zasilanego olejem napędowym.

Widoczne (rys.5.6.) wżery powstają w wyniku oddziaływania temperatury spalania gazu ziemnego na powierzchnię przylgni zaworowej. Powstające podczas kontaktu z gniazdem zaworu ubytki powiększają się prowadząc do tworzenia kanałów łączących komorę spalania z kanałem wylotowym przy pełnym zamknięciu zaworu. Skutkiem tego jest utrata szczelności komory spalania oraz spadek kompresji i podwyższona emisja metanu z komory spalania do układu wydechowego. Pełne zrozumienie mechanizmu niszczenia przylgni zaworu i całego zaworu komplikują często niejednorodne procesy spalania.

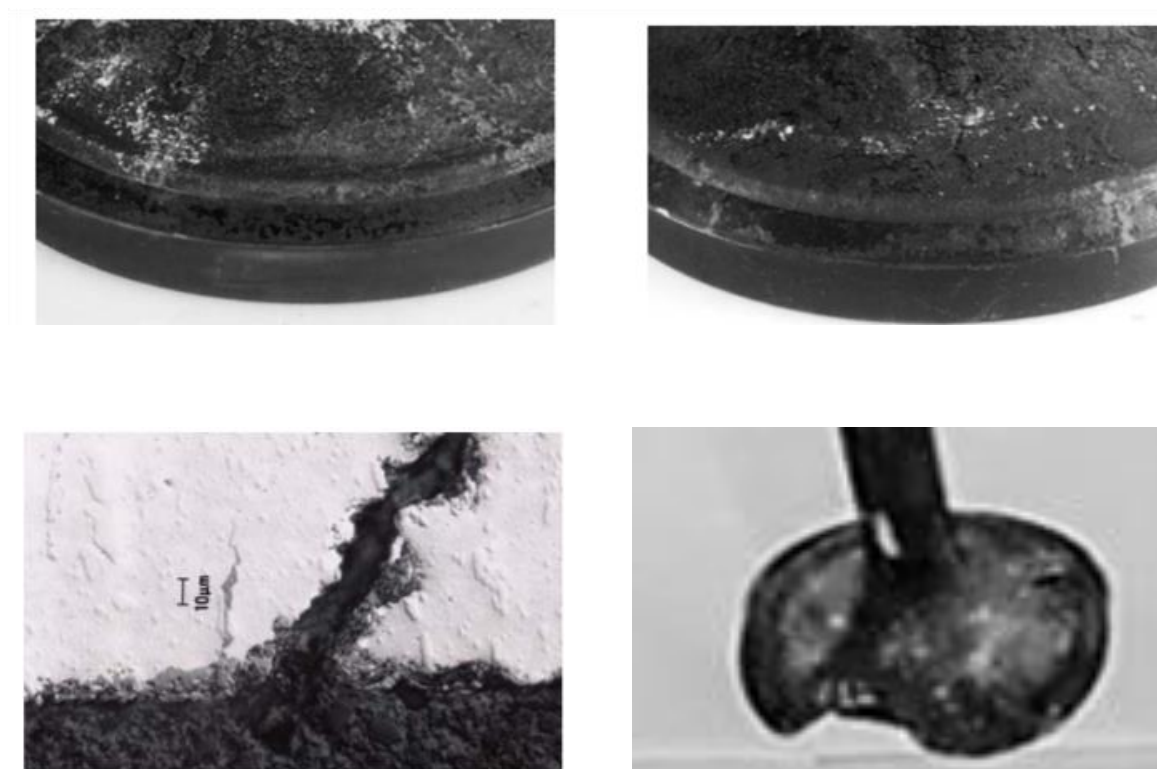
Badania przeprowadzone m. in. przez D. Morehouse, J. Porter [61] wskazują, że jeżeli w komorze spalania dochodzi do znacznego wzrostu obciążeń ciśnieniowych i temperaturowych to grzybek zaworu pod wpływem wysokich obciążeń termo – mechanicznych wygina się do wewnątrz. Powoduje to tak zwane zjawisko tworzenia się „tulipanów” a w następstwie pęknięcia w okolicy grzybka zaworu i jego destrukcję (rys. 5.7.).



Rys. 5.7. Przykład rejestrowanych zmian talerzyków zaworowych pod wpływem wysokich obciążeń termodynamicznych [62]

Na rysunku 5.7. przedstawiono schematycznie mechanizm wzrostu ciśnienia i temperatury prowadzący do destrukcji grzybka zaworu. Dochodzi wtedy do sytuacji, w których zniszczeniu ulegają zawory pracujące w kilku cylindrach silnika spalinowego.

Wykorzystanie stopów z grupy inconel, w celu zabezpieczenia powierzchni grzybków zaworowych, nie rozwiązuje całkowicie problemu niszczenia przylgni zaworów wydechowych w silnikach zasilanych gazem ziemnym. W przypadku przystosowywania silników ZS do zasilania gazem ziemnym seryjne zawory zabezpieczone warstwą Inconelu lub Stellitu nie są w stanie wytrzymać wyższych obciążeń cieplnych wynikających z charakterystyki paliwa zasilającego.



Rys. 5.8. Przykładowe uszkodzenia przylgni zaworowej (a-b) prowadzące do mikropęknięć (c) i utraty materiału głowicy d) [61]

Czynnikiem, który w największym stopniu determinuje charakter uszkodzeń przylgni zaworu zabezpieczonej Stelitem lub Inconelem jest temperatura spalin powstających w wyniku spalania gazu ziemnego. Jest ona wyższa o ok. 150°C – 350°C w porównaniu do temperatury spalin powstałych ze spalania oleju napędowego.

Jak wykazali J. Hiltz , M. Brauss i in. [61] temperatura spalin wpływa na obniżenie właściwości mechanicznych powierzchni przylgni zaworu wydechowego, a także na jej utlenianie i późniejszą erozję, która prowadzi do powstawania mikropęknięć i znacznych ubytków w materiale przylgni zaworowej (rys. 5.8.).

Na rys. 5.8. można zauważyć, że prezentowane zawory charakteryzuje znaczna ilość osadu spalania na talerzykach zaworu ze stali austenitycznej, przylgniach zaworów (rys. 5.8. a – b). Rejestrowane zmiany doprowadziły do pęknięć (rys.5.8. c) i ubytku znacznego obszaru talerzyka zaworu (rys. 5.8. d).

Jak wskazują badania prowadzone przez firmę General Motors zbyt wysoka temperatura może być przyczyną obserwowanych uszkodzeń prowadzących do zmian na powierzchniach badanych przez nich elementów przyłgni zaworowych. Na rys. 5.9. przedstawiono przykładowe zmiany na powierzchni przyłgni zaworowej.



Rys. 5.9. Przykłady zmian na powierzchni przyłgni zaworu [61]

Na rys. 5.9. widoczne są twarde, zeszkłone czarne osady i pojedyncze wżery na przyłgni zaworu. Jak wykazują autorzy badań, górne trzpienie analizowanych zaworów (obszary prowadnic zaworów) były stosunkowo czyste, co wskazuje na brak innego czynnika nadmiernego zużycia analizowanych elementów. Autorzy opracowania [61] stwierdzili, że:

- obszary, w których osady nadal przylegają lub zostały oderwane, są potencjalnymi kanałami dla przepływu spalin,
- osady mogą uniemożliwić prawidłowe osadzenie zaworu i doprowadzić do odkształcenia powierzchni gniazda.

Jak wykazano w badaniach [61] napływ gorących gazów spalinowych może powodować również znaczne osadzanie się węgla w obszarze prowadnicy trzpienia. Zawór sztywnieje i nie zamyka się prawidłowo, w wyniku czego następuje przegrzanie gniazda.

Na rys. 5.10. przedstawiono osady na powierzchni przylgni zaworowej i całym talerzyku zaworu.



Rys. 5.10. Powstawanie osadów na powierzchni przylgni w wyniku napływu gorących gazów spalinowych[61]

W odróżnieniu do konwencjonalnych paliw płynnych, które podawane są do komory spalania w postaci ciekłej, gaz ziemny wtryskiwany jest w postaci gazowej. Obecność w komorze spalania ciekłej frakcji w mieszance paliwowo – powietrznej prowadzi do obniżenia temperatury przylgni zaworu wydechowego i tulei cylindra. Brak jest tego efektu przy zasilaniu jednostki napędowej gazem ziemnym, co dodatkowo wzmacnia wpływ temperatury na przylgnię zaworu wydechowego. W toku analizy literaturowej nie napotkano na próby wykorzystania faz międzymetalicznych do umocnienia wierzchniej warstwy przylgni zaworu wydechowego.

5.3. Modyfikacje i możliwości nanoszenia warstw zabezpieczających powierzchnie przylgni zaworowych

Jak wykazano w poprzednich rozdziałach, przylgnie zaworowe ulegają znacznym procesom degradacji. Dlatego zabezpieczenie powierzchni przylgni zaworu w celu ograniczenia jej przyspieszonego zużycia jest jednym z ostatnich etapów produkcji zaworu. (rys. 5.11).

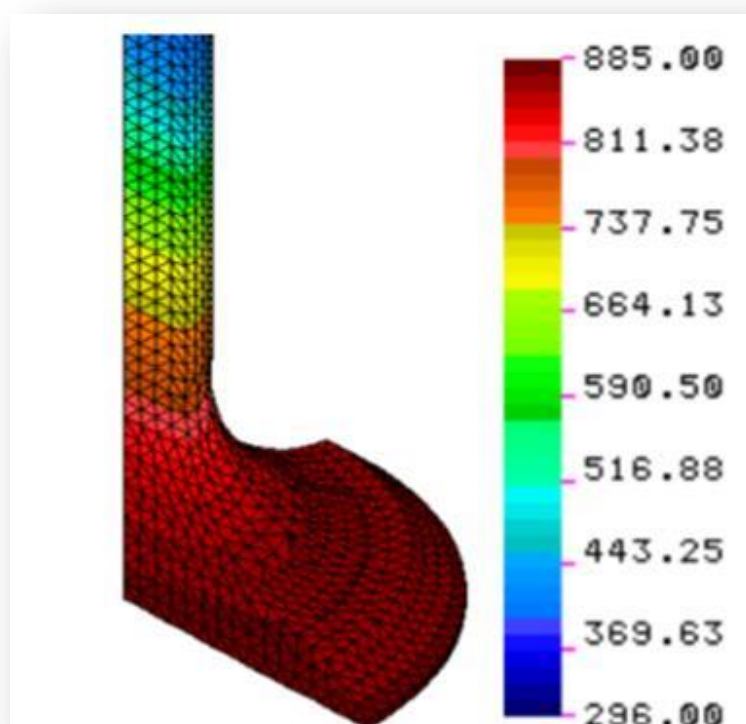


Rys. 5.11. Proces produkcyjny zaworu silnikowego [63]

Wg danych literaturowych, w procesie produkcyjnym zaworu silnika spalinowego powszechnym jest zabezpieczanie powierzchni przylgni zaworowych powłokami napawanymi (rys. 5.11.). Nadają one powierzchniom napawanym właściwości napawanego spoiwa, z możliwością wykonania pozostałej części elementu z materiałów tańszych w produkcji [64].

W produkcji przemysłowej zaworów silnikowych wykorzystywane jest napawanie metodą TIG z wykorzystaniem podajnika pręta w postaci zautomatyzowanej.

Z uwagi na środowisko pracy, temperaturę (rys. 5.12.) i charakter obciążenia przylgni zaworowych najbardziej rozpowszechnione są spoiwa stellite [65].



Rys. 5.12. Rozkład temperatury pracy na powierzchni zaworu wylotowego w pojeździe samochodowym zasilanym konwencjonalnym paliwem płynnym [35]

Przylgnia zaworowa zabezpieczona Stelitem stosowana jest w silnikach zasilanych konwencjonalnymi paliwami płynnymi takimi jak: benzyna i olej napędowy. Zawory, których przylgnie zostały napawane tym stopem osiągają wymagany czas eksploatacji w silnikach spalinowych zasilanych paliwem podstawowym takim jak: benzyna lub olej napędowy. Przy wykorzystaniu zaworów stellitowych w silnikach zasilanych gazem ziemnym, zawory te nie uzyskują wymaganego okresu eksploatacji i przyspieszone zużycie przylgni zaworowej prowadzi do istotnych usterek w jednostce napędowej. W tym przypadku, należy podkreślić, że podczas spalania gazu ziemnego jako paliwa, temperatura w komorze spalania jest wyższa, niż w przypadku spalania paliw konwencjonalnych, zatem przylgnie zaworowe, nawet pokryte warstwą Stellitu, w wyniku wyższej temperatury pracy, ulegają przyspieszonej degradacji (co opisano w rozdziale 5.2. niniejszej pracy).

Z kolei stosowanie na powierzchni przylgni zaworów materiałów takich jak Inconel 781 obejmuje zawory w silnikach przystosowanych przez producenta do zasilania gazem ziemnym, jednak zawory te nie są dostępne do większości jednostek napędowych. Oznacza to, że w jednostkach napędowych wyposażonych przez producenta w system zasilania CNG stosuje się zawory z przylgnią pokrytą stopami Inconelu. Jednak i ten materiał wykazuje zużycie po krótszym czasie eksploatacji, niż czas pracy oczekiwany dla zaworu [59]. Zużycie zaworów silnikowych, przez wiele lat było problemem dla konstruktorów i producentów silników spalinowych. Ciągłe prace badawcze z zakresu zużycia zaworów skutkują opracowywaniem nowych materiałów, z których wykonane są zawory oraz udoskonalaniem technologii ich wytwarzania.

Znane jest również z literatury precyzyjne kształtowanie warstwy przylgni zaworu poprzez napawanie laserowe stopami ceramicznymi na bazie kobaltu, które zapewnia dobre właściwości użytkowe zaworu przez 3000 h. Zastosowanie technologii napawania laserowego umożliwia uzyskanie warstwy o dobrych właściwościach, lecz technologia ta jest realizowana przy zastosowaniu bardzo kosztownego proszku na bazie kobaltu. Teoretycznie technologia może być praktycznie stosowana zarówno w celu wydłużenia

czasu eksploatacji nowych zaworów, jak i dla potrzeb ich regeneracji, niemniej ze względu na wysokie koszty jej rozpowszechnienie, szczególnie w drugim przypadku jest znacznie ograniczone. Badania realizowane m. in. w pracy naukowo – badawczej pt.: „Opracowanie warunków technologicznych napawania laserowego i plazmowego proszkami na osnowie kobaltu, przyłgni grzybków zaworów ze stali X40CrSiMo10 – 2 oraz wykonanie partii próbnej zaworów” wskazują na wysoką żaroodporność i żarowytrzymałość wytwarzanych powłok ceramicznych, dla układów spalania paliw tradycyjnych [66]. W przypadku spalania paliw alternatywnych, np. spalania gazu ziemnego temperatura pracy w komorze spalania znacznie przewyższa tę, która występuje przy spalaniu paliw tradycyjnych, co ogranicza stosowanie wyżej wymienionych powłok jedynie do układów konwencjonalnych zasilanych paliwem ciekłym. W literaturze, znane jest także rozwiązanie polegające na regeneracji przyłgni zaworowych odbywające się przez nakładanie ceramicznych warstw PVD, co wykazali m. in. Kawana, H. Ichimura, i inni [67]. Badania wytwarzanych tą metodą powłok metalicznych i metaliczno – ceramicznych, wskazują na znaczną adhezję materiału do podłoża w omawianych warunkach, spalania paliw tradycyjnych. Zatem metoda może być używana do regeneracji układów pary cieplej przyłgni zaworowa – gniazdo zaworu tylko w pojazdach zasilanych paliwem konwencjonalnym. Znane są z patentów [68, 69, 70] rozwiązania materiałowe zapewniające wytworzenie odpornych na korozję powłok na niepowlekanych składnikach żelaznych. Rozwiązania obejmują powlekanie mechaniczne, przy użyciu jako środka powlekającego proszków zawierających metal cynkowy i co najmniej jeden inny metal, aby utworzyć mocno przylegającą powłokę środka powlekającego na odsłoniętych powierzchniach elementów. Rozwiązanie wymaga, złożonej technologii, ogrzewania i chłodzenia elementów z mocno przylegającą powłoką, aby wytworzyć dzięki procesom dyfuzyjnym warstwę międzymetaliczną z układu równowagowego Fe – Sn [68]. Patent ten nie gwarantuje wytworzenia powłok o odpowiednich właściwościach tribologicznych oraz na elementach mających zasadniczo stożkowy

obszar powierzchni, czyli takich, które charakteryzują przylgnię zaworu. Przylgnia zaworu jest nachylona do płaszczyzny talerzyka pod kątem $\psi = 45^\circ$ lub $\psi = 30^\circ$, ponieważ dzięki temu możliwe jest ograniczenie do minimum średnicy zewnętrznej talerzyka, rozwiązanie zapewnia ułatwione prowadzenie zaworu w gnieździe a także zmniejsza wrażliwość na wysoką temperaturę, co jest szczególnie ważne w przypadku zaworów wylotowych [35].

Również znany patent: US 8536244, „Friction lining mixture for a friction material, in particular for brake and clutch linings.” opracowanego materiału ciernego, ze względu na to, że jest bardzo kosztowny w produkcji oraz występuje problem jego nałożenia na powierzchnię o stożkowatym kształcie, nie nadaje się na przylgnie zaworów [69].

Znane jest z literatury rozwiązanie wytwarzania całego zaworu z cienką powłoką. Przy czym, opisana cienka powłoka stanowi tzw. pierwszą powłokę docierającą umieszczoną na korpusie zaworu, a kolejna powłoka, zwana w rozwiązaniu drugą powłoką jest nakładana na gniazdo zaworu. Rozwiązanie wymaga aby powłoki te zawierały co najmniej jedną warstwę złożoną z azotku metalu i diamentową powłokę węglową albo zarówno pierwsza powłoka i druga powłoka zawierały azotek chromu VI. Rozwiązanie przedstawione w patencie US 20090078906 A1 wykorzystuje składniki rakotwórcze i wymaga wytworzenia co najmniej dwóch powłok na oba elementy gniazda zaworu [70]. W praktyce, w celu ochrony środowiska i uniknięcia możliwego uszczerbku na zdrowiu ludzkim coraz częściej różne krajowe i międzynarodowe przepisy wymagają stosowania materiałów ciernych, które są nie tylko wolne od azbestu i metali ciężkich, ale także o zmniejszonej lub zerowej zawartości miedzi i chromu VI, stąd konieczność poszukiwania nowych rozwiązań. Ponadto rozwiązania wytwarzania całego zaworu z powłoką nadają się tylko do produkcji nowych zaworów, a nie regeneracji używanych. Wśród materiałów odpornych na ścieranie i działanie wysokich temperatur znane są fazy międzymetaliczne z układów równowagowych Ti – Al, Ni – Al i Fe – Al. Ze względu na charakterystykę tych materiałów najlepsze własności odporności na zużycie ścierne mają fazy o wzorze M_3Al (gdzie M – oznacza dany pierwiastek metaliczny). Niestety fazy te

ze względu niską plastyczność mają ograniczone zastosowanie, w celu ich uplastycznienia dodaje się pierwiastki lub mikrododatki stopowe, zmieniające ich właściwości [71-74]. Metody rozpowszechnione w przetwarzaniu tych faz to przeważnie metody należące do metalurgii proszków jak odlewanie, które nie nadaje się do regeneracji wałów oraz natryskiwanie cieplne, które ze względu na specyfikę procesu stosowane jest na duże powierzchnie, np. ściany kotłów energetycznych, łopatki turbin i w przypadku regeneracji powierzchni pojedynczych zaworków byłoby ekonomicznie nieuzasadnione. Istnieją również próby połączenia technologii napawania i wytwarzania warstwy faz międzymetalicznych [71]. W tym celu na materiał wykonany ze stopu aluminium napawa się spoiwo metaliczne. Pod wpływem ciepła procesu oba materiały (materiał rodzimy i spoiwo) ulegają stopieniu i wymieszaniu, tworząc warstwę zbudowaną ze wzajemnie przemieszanych faz międzymetalicznych. Warstwa ta jest odporna na zużycie ścierne, niemniej powoduje zmiany w materiale rodzimym, co przekłada się na zmianę jego właściwości. Warstwy charakteryzują się makrosegregacją w swojej objętości, która wpływa na ich odmienne właściwości w poszczególnych obszarach. Jak wskazują autorzy [71], opracowana przez nich technologia wytwarzania warstwy międzymetalicznej jest proponowana jako alternatywa otrzymywania warstw odpornych na ścieranie, prezentowane badania są wynikami prób laboratoryjnych. W tym zakresie nie opublikowano wdrożenia technologii ani potwierdzenia powtarzalności uzyskiwanych wyników. Analiza opublikowanych wyników otrzymywanych nawet przez tych samych autorów wskazuje, że otrzymywane warstwy wierzchnie nie wykazują różnic w składzie chemicznym, ale różnią się składem fazowym, co oznacza że tworzą się różne fazy i spinele, a powłoki są niejednorodne w objętości.

Reasumując należy stwierdzić, że problemem technicznym do rozwiązania jest dostarczenie odpowiedniego materiału, który jest w stanie zmniejszyć zużycie elementów ciernych pracujących w wysokich temperaturach wraz z technologią jego nanoszenia na powierzchnie stożkowe, charakteryzujące przylganie zaworów.

Analiza literatury nie wskazuje rozwiązania wyżej wymienionego problemu badawczego. Spośród wymienionych materiałów, większość nie spełnia wymagań stawianych przylgni zaworowej pracującej w warunkach środowiskowych odpowiadających spalaniu gazu ziemnego. Spośród wszystkich wymienionych materiałów w rozdziale 5 na uwagę zasługują fazy międzymetaliczne, których korzystny zespół właściwości czyni je perspektywicznym materiałem do wytworzenia powłoki zabezpieczającej przylgnię zaworową. Dotychczas, oprócz metod oferujących wytworzenie warstwy międzymetalicznej kosztem znacznej zmiany strukturalnej materiału rodzimego, w literaturze krajowej i zagranicznej nie przedstawiono sposobu, ani nawet prób wykorzystania tych faz do wytworzenia warstwy wierzchniej na przylgni zaworu wydechowego. Badania przeprowadzone w innych obszarach wskazują jednak, że powłoki z faz międzymetalicznych charakteryzuje szereg korzystnych właściwości, w tym właściwości pożądane dla pracy w złożonych warunkach zużycia korozyjno – erozyjnego [72]. Z kolei szeroko rozwinięte metody metalurgii proszku, w tym natrysk cieplny, typu HVOF, HVAF nie umożliwiają ekonomicznego wytworzenia powłok na stosunkowo małych powierzchniach, dla nieseryjnej produkcji. Jak zauważono, w wielu dziedzinach produkcji maszyn i urządzeń przewagę daje dłuższa kontrola nad procesem eksploatacji i zużycia. Również, ma to miejsce w przypadku przylgni zaworowych. Rozwój strategicznych gałęzi przemysłu transportowego uwarunkowany jest poszukiwaniem zastosowań nowoczesnych i doskonalszych tworzyw konstrukcyjnych dostosowanych do pracy z nowymi paliwami. Przeanalizowane dane literaturowe wskazują na możliwość podwyższenia trwałości elementów przylgni zaworowych za pomocą wytwarzania odpornych na zużycie powłok metodami spawalniczymi. Metody typu TIG są szeroko stosowane do zabezpieczenia powierzchni przylgni zaworowej. Zatem próba połączenia procesu TIG i wytworzenia spoiwa z fazy międzymetalicznej powinna umożliwić opracowanie nowej technologii zabezpieczenia powierzchni przylgni zaworowej. Aby dobrze zaplanować proces wytwarzania spoiwa należy przeanalizować główne właściwości wybranych faz międzymetalicznych.

6. Fazy międzymetaliczne

W ostatnich latach w różnych gałęziach przemysłu zauważalne jest dążenie do niezawodności pracy elementów konstrukcyjnych. W związku z tym poszukuje się nowych rozwiązań materiałowo – technologicznych umożliwiających wytworzenie konstrukcji o pożądanych właściwościach użytkowych. Coraz szersze wykorzystanie stopów na osnowie faz międzymetalicznych z układu równowagowego Fe – Al związane jest z [73, 74, 75]:

- zespołem charakterystycznych i pożądanych właściwości użytkowych tych faz (podwyższona i wysoka temperatura pracy, odporność korozyjna i erozyjna),
- stosunkowo niską ceną w porównaniu do stopów o porównywalnych właściwościach korozyjno – erozyjnych (np. w porównaniu do stopów na bazie chromu i kobaltu, czy innych faz międzymetalicznych z układu Ni – Al czy Ti – Al),
- częściowym rozwiązaniem problemów technologicznych związanych z ich przetwarzaniem (szeroki rozwój metod metalurgii proszków, metody odlewnicze),
- zidentyfikowaniem metod modyfikacji faz poprzez mikrodomieszkowanie, ułatwiających przeróbkę plastyczną omawianych materiałów przy zachowaniu głównych, pożądanych właściwości, takich jak odporności na synergiczne działanie środowiska korozyjnego i erozyjnego oraz temperatury, (np. mikro – domieszkowanie borem, cyrkonem).

Dodatkową cechą czyniąca materiały te perspektywnymi do zastosowań w przemyśle motoryzacyjnym jest ich stosunkowo niewielka gęstość.

6.1. Faza międzymetaliczna Fe₃Al

Spośród faz międzymetalicznych z układu Fe – Al zwrócono uwagę na fazę Fe₃Al, jako materiał do potencjalnego zastosowania na powłokę przyłgni zaworowej.

Faza międzymetaliczna Fe₃Al charakteryzuje się znacznie niższym ciężarem właściwym (ok. 5,49÷6,68 g/cm³) w porównaniu do Stellitu (ok. 8,9 g/cm³) wykorzystywanego obecnie do napawania przyłgni zaworowej. Różnica w ciężarze właściwym pomiędzy Stelitem a fazą międzymetaliczną wynika z dużej procentowej zawartości aluminium w fazie Fe₃Al [76, 77].

Badania nad właściwościami fazy Fe₃Al wykazały jej wysoką odporność korozyjną w różnych środowiskach, w tym środowisku utleniającym. Stąd znalazła zastosowanie m. in. jako materiał dla obudowy ogniw paliwowych na tlenki stałe (Solid Oxide Fuel Cell). Obudowy tego typu wykonuje firma Siemens [78]. Wysoka odporność na działanie czynników korozyjnych jest również znacząca, przy eksploatacji przyłgni zaworów wydechowych. Podczas użytkowania zaworów, przyłgnia zaworowa narażona jest nie tylko na produkty spalania paliwa, ale także na oddziaływanie substancji smarnych. Substancje te zawierają w swoim składzie związki siarki i wapnia, które pod wpływem temperatury oddziałują degradująco na przyłgnie zaworu wydechowego. W połączeniu z temperaturą tworzą agresywne środowisko pracy przyłgni zaworowych. Wzrost procentowej zawartości glinu w składzie fazy intermetalicznej Fe₃Al jest często wystarczający do wytworzenia silnie przylegającej warstwy tlenku aluminium, na powierzchni pokrywanego elementu konstrukcyjnego, podczas jego eksploatacji w warunkach działania podwyższonej temperatury [79].

W przypadku fazy międzymetalicznej Fe₃Al wartość modułu Younga jest wyższa (E=240÷260 GPa), niż w przypadku Stellitu (E=230 GPa), co świadczy o tym, że intermetale w osnowie Fe₃Al charakteryzują się mniejszą podatnością na odkształcenia [77, 80]. Dodatek innych pierwiastków stopowych, np. mikro – domieszkowanie borem lub cyrkonem, podwyższa temperaturę przemiany fazowej podczas podgrzewania,

a także wpływa na uplastycznienie fazy. Jednorodna struktura, duże naprężenia ściskające w materiale i wysoka twardość wpływa również na odporność stopu na bazie Fe_3Al na kawitację [80, 81].

Reasumując należy stwierdzić, że fazy intermetaliczne z grupy Fe – Al łączą w sobie szereg bardzo pożądanых cech dla różnych zastosowań z zakresu budowy i eksploatacji maszyn. Do najważniejszych zaliczyć należy podwyższoną odporność na zużycie ścierne, zdolność do tłumienia drgań, czy odporność na uszkodzenia zmęczeniowe. Charakteryzują się stabilnością swoich właściwości oraz wzrostem wytrzymałości w wysokim zakresie temperaturowym. Łączą w sobie zatem ważne zalety, jak odporność na zużycie ścierne z równoczesną znaczną odpornością na działanie korozyjnych środowisk utleniających.

Analiza danych literaturowych przedstawiona w rozdziale wskazuje, że faza Fe_3Al może stanowić perspektywiczny materiał do zastosowania dla zabezpieczenia przylgni zaworowej. Dane jednoznacznie potwierdzają, że faza ta charakteryzuje się wysoką odpornością na zużycie ścierne oraz odpornością korozyjną w podwyższonej temperaturze. Ponadto, w porównaniu do innych materiałów jej zaletami są niska gęstość i stosunkowo niskie koszty stosowania, związane z brakiem drogich pierwiastków stopowych. Można zatem przypuszczać, że omawiana faza będzie spełniała wymagania stawiane materiałom przeznaczonym do warunków pracy zaworów silnikowych. Dotychczas jednak nie rozwiązano problemów technologicznych związanych z odpowiednim uplastycznieniem fazy podczas procesu nakładania i zastosowaniem jej jako spoiwa dla napawania na powierzchni stożkowe.

7. Podsumowanie literatury

Analiza danych literaturowych z zakresy wykorzystania gazu ziemnego wskazuje na szybki rozwój sektora wykorzystania gazu ziemnego w transporcie drogowym jak i morskim. Można wnioskować, że ilość środków transportu wykorzystującego ten rodzaj paliwa będzie stale wzrastać. Producenci oferują coraz szerszą gamę pojazdów wyposażonych w instalację zasilania gazem ziemnym. Modyfikacje obecnie eksploatowanych silników ZS przystosowujące je do zasilania gazem ziemnym dają możliwość wykorzystania tego paliwa w pojazdach fabrycznie do tego nieprzystosowanych. Jak wykazano w rozdziale 5.2. wprowadzenie instalacji gazowej, bez dodatkowej modyfikacji zabezpieczającej powierzchni elementów, które będą pracować w nowym środowisku wymusi częstsze serwisowanie pojazdu, regulację parametrów ich pracy, czy nawet wcześniejszą wymianę wymienionych elementów instalacji. Zatem jednym z wciąż nierozwiązanych problemów eksploatacyjnych silników zasilanych gazem ziemnym jest przyspieszone zużycie przylgni zaworów wydechowych w środkach transportu oraz w silnikach o wytężonej eksploatacji cieplnej.

Wynika ono z właściwości gazu ziemnego. Jako najistotniejszą cechę gazu ziemnego, wpływająca na eksploatację przylgni zaworowych uznano jego wyższą temperaturę spalania w porównaniu z konwencjonalnymi paliwami płynnymi. Obecnie w większości silników spalinowych, zasilanych gazem ziemnym wykorzystywane są zawory pokryte głównie warstwą stellitową oraz rzadziej nadstopami z grupy Inconel. Jak wykazano w rozdziale 5.2. zabezpieczenie przylgni zaworu Stelitem, jak i Inconelem nie rozwiązuje problemu przyspieszonego zużycia przylgni zaworów wydechowych. Przegląd literatury nie wskazuje również właściwych rozwiązań, przy zastosowaniu innych materiałów. Głównym problemem jest niemożliwość nałożenia lub utrudniona i zbyt kosztowna technologia wytwarzania warstwy wierzchniej na stosunkowo małe, stożkowe powierzchnie charakteryzujące przylgni zaworowe.

Spośród dostępnych materiałów na rynku zwrócono uwagę na fazy międzymetaliczne i ich zalety (odporność korozyjna w środowisku utleniającym, znaczna odporność erozyjna oraz stosunkowo niska gęstość), czyniące materiały te perspektywicznymi do zastosowań w warunkach pracy przylgni zaworu wydechowego (rozdział 3). Właściwości te sugerują, że materiały te mogą stanowić lepsze rozwiązanie jako materiał powłokowy nanoszony na przylganie zaworowe niż obecnie wytwarzane powłoki ze Stellitu (porównanie własności przedstawiono w rozdziale 6.1.). Na podstawie danych zawartych w rozdziale 6 stwierdzono, że zawartość frakcji aluminium bezpośrednio wpływa na właściwości mechaniczne fazy międzymetalicznej Fe_3Al . Pozwala to na potencjalne zastosowanie fazy Fe_3Al do napawania warstw odpornych na ścieranie, kawitację lub korozję, czy też napawania innych elementów konstrukcyjnych, od których wymaga się eksploatacji w złożonych warunkach. Dotychczas jednak nie rozwiązano problemu wykonywania spoiwa Fe_3Al do napawania, a fazy międzymetaliczne uzyskiwano jedynie na drodze wykorzystania zjawiska dyfuzji (wymieszanie materiału rodzimego ze stopiwem).

Jak potwierdzają dane literaturowe do tej pory próby nanoszenia warstwy intermetalicznej na powierzchnie stożkowe, nie przyniosły pożądanego efektu. Zidentyfikowanym problemem jest brak właściwej technologii wytwarzania warstwy z intermetali na powierzchnię przylgni zaworowej. Jedynie nanoszenie stopów aluminium na podłoże metaliczne przy zachowaniu określonych warunków termodynamicznych i parametrów spawania umożliwiało wytwarzanie cienkiej warstwy międzymetalicznej na granicy rozdziału faz. W ten sposób uzyskiwano powłokę warstwową o znacznie różnych właściwościach mechanicznych warstwy wierzchniej i wewnętrznej. Jak wykazano sposób ten nie nadaje się do zastosowania na przylganie zaworowe, jednak wskazuje, że obrany kierunek badawczy jest aktualny i poprawny.

Przeanalizowane dane literaturowe potwierdzają, że powłoki z fazy międzymetalicznej można otrzymywać metodami natrysku cieplnego. Powłoki takie

charakteryzują się zespołem korzystnych właściwości, w tym odporności korozyjno – erozyjnej. Technologie przeznaczone są do zabezpieczenia powierzchni o znacznym obszarze, np. ścian kotłów energetycznych, łopatek turbin parowych itp. Ze względów ekonomicznych, nie zaleca się ich do wytwarzania warstw wierzchnich na małych, pojedynczych elementach konstrukcyjnych, w tym na powierzchniach zaworów przeznaczonych do regeneracji lub modyfikacji [81].

Zatem spośród wszystkich przeanalizowanych procesów wytwarzania warstw wierzchnich na powierzchni przylgni zaworowych, stwierdzono, że obecnie najlepszym dostępnym rozwiązaniem są metody napawania. Dostępne dane literaturowe wskazują, że metody napawania umożliwiają otrzymanie powłok zarówno na małych elementach jak i powierzchniach stożkowych. Dodatkową zaletą procesów napawania jest możliwość automatyzacji całego procesu, co umożliwia stosowanie metod typu TIG nie tylko dla pojedynczych elementów ale i dla procesów produkcji masowej.

Dotychczas nie opublikowano zarówno w literaturze fachowej, jak i danych branżowych producentów w Polsce i na świecie, informacji na temat możliwości naniesienia warstwy wierzchniej z fazy międzymetalicznej typu Fe_3Al metodą napawania na powierzchnię charakteryzującą przylgni zaworowe. Można wnioskować, że jest to związane z własnościami technologicznymi fazy Fe_3Al i utrudnionymi procesami przetwórczymi. Publikacje jedynie sugerują, że zastosowanie metod spawalniczych dla łączenia intermetali (na przykładzie Fe_3Al) jest możliwe [71]. Nierozwiązanym problemem w tym zakresie stanowi sposób wytworzenia spoiwa z fazy Fe_3Al dla procesu napawania.

Reasumując należy stwierdzić, że próba zwiększenia trwałości eksploatacyjnej przylgni zaworowej poprzez wytworzenie na jej powierzchni warstwy zabezpieczającej z fazy Fe_3Al w procesie napawania TIG jest aktualnym i dotychczas nierozwiązanym problemem. Jest to problem istotny, ze względu na wzrastającą liczbę pojazdów zasilanych gazem ziemnym oraz ze względów bezpieczeństwa zarówno biernego pojazdu, jak i środowiska. Jak wykazano, w jednostce napędowej, w której uszkodzeniu

ulega przylgnia zaworu wydechowego, występuje brak szczelności komory spalania, co skutkuje obniżeniem osiązków pojazdu oraz wzmożoną emisją metanu do układu spalania, a następnie atmosfery.

8. Cel, założenia i koncepcja pracy

Analiza literatury jednoznacznie wskazuje na problem przyspieszonego zużycia przylgni zaworów wydechowych, w pojazdach samochodowych zasilanych gazem ziemnym. Problemem ten, w silnikach spalinowych zasilanych gazem ziemnym, prowadzi do wysokich kosztów serwisu oraz może stać się przyczyną przestojów związanych z unieruchomieniem silnika. Przedstawione rozwiązania patentowe, a także wyniki badań eksploatacyjnych zaworów, wskazują na możliwość poprawy własności warstwy wierzchniej przylgni zaworowych. Jednak, jak wykazano dotychczasowe rozwiązania nie spełniają szeregu warunków stawianych przylgni zaworowej pracującej w pojeździe, w którym przystosowano silnik spalinowy zasilany olejem napędowym do zasilania gazem ziemnym. Analiza literatury wskazywała na możliwości zastosowania procesu napawania TIG do zabezpieczenia powierzchni przylgni zaworowej. Spośród materiałów wybrano fazę międzymetaliczną Fe_3Al .

Wobec tego **za cel pracy przyjęto opracowanie metody zabezpieczenia przylgni zaworu wydechowego w silniku ZS adaptowanym do zasilania gazem ziemnym.**

Dla osiągnięcia zamierzonego celu pracy i rozwiązania problemu badawczego określono założenia wstępne i opracowano koncepcję materiałowo – technologiczną wytworzenia warstwy wierzchniej.

Na podstawie przeprowadzonej analizy danych literaturowych, wyników wybranych prac naukowo – badawczych oraz patentów dotyczących zabezpieczenia powierzchni przylgni zaworów wydechowych, założono że opracowana metoda zabezpieczenia powinna umożliwić wytworzenie [59, 61, 66, 67, 68, 69, 70]:

- jednorodnej w objętości warstwy zabezpieczającej na małych stożkowych powierzchniach dla pojedynczych elementów z możliwością ewentualnej adaptacji technologii dla produkcji przemysłowej,

- warstwy wolnej od niezgodności spawalniczych, co powinno wpłynąć na jej trwałość eksploatacyjną,
- powłoki zabezpieczającej wykazującej wyższą odporność na zużycie ściernie niż dotychczasowo stosowane warstwy stellitu,
- warstwy charakteryzującej się porównywalną twardością do warstwy ze Stellitu, co powinno zapewnić prawidłowe działanie w parze ciernej przylgna zaworowa – gniazdo zaworowe.

Ponadto opracowana metoda musi:

- zapewniać uzyskiwanie powtarzalnych wyników w procesie nakładania warstwy wierzchniej,
- być dostępna i stosunkowo niedroga, gdyż docelowo ma być wykorzystywana również przez pojedynczych odbiorców.

Przy uwzględnieniu założeń (rozdział 8) opracowano koncepcję materiałowo – technologiczną, która zakładała wykorzystanie fazy Fe_3Al jako spoiwa o pożądanej charakterystyce materiałowej do zastosowania w złożonych, agresywnych warunkach korozyjno – erozyjnych. Jako efektywną metodę nakładania warstwy wierzchniej na powierzchnię stożkową zaworu wydechowego, zgodnie z danymi literaturowymi przyjęto metodę TIG. Przyjęta koncepcja wymagała przeprowadzenia szeregu badań weryfikacyjnych. Wyniki badań wstępnych miały na celu dostarczenie obiektywnego dowodu, że opracowana koncepcja pozwala na wytwarzanie warstwy zabezpieczającej z fazy Fe_3Al na powierzchni przylgni zaworowej.

Weryfikacja polegała na sprawdzeniu, czy opracowana koncepcja wytwarzania spoiwa do procesu napawania TIG oraz dobrane parametry procesu są poprawne i zapewniają wytworzenie równomiernej warstwy napawanej, wolnej od wad spawalniczych.

W tym celu:

- opracowano parametry wytwarzania spoiwa do napawania z fazy Fe_3Al ,
- dobrano parametry prądowo – napięciowe oraz prędkość procesu napawania,

- przygotowano próbki do badań wstępnych,
- wykonano badania wstępne (rozdział 9), wizualne makroskopowe i rentgenowskie, które stanowiły podstawę do wnioskowania na temat możliwości wytworzenia prawidłowych warstw napawanych i wyboru najlepszych parametrów procesu.

Analiza uzyskanych wyników badań wstępnych oraz przegląd literatury stanowiły podstawę do sformułowania tezy (rozdział 10.1.), dla udowodnienia której wykonano badania zasadnicze (plan badań przedstawiono w rozdziale 10.1.). Podczas badań zasadniczych opracowana metoda przeszła walidację, podczas której sprawdzono poprawność i powtarzalność uzyskiwanych wyników, a przeprowadzone testy dostarczyły obiektywnego dowodu, że opracowana metoda zabezpieczenia warstwy wierzchniej spełnia potrzeby i wymagania jej użytkownika.

9. Badania wstępne

Przyjęta koncepcja materiałowo – technologiczna zakłada wytworzenie warstwy zabezpieczającej z fazy międzymetalicznej Fe_3Al metoda TIG na powierzchni stożkowej przylgni zaworowej. Aby wytworzyć powłokę należało opracować formę nowego spoiwa. Dane literaturowe wskazują, że faza Fe_3Al jest trudnoobrabialna, zatem aby charakteryzowała ją lepsza plastyczność i skrawalność należy ją mikrodomieszkować np. cyrkonem. Ponadto przyjęto, że wykonane spoiwo powinno się topić pod wpływem temperatury pochodzącej z energii procesu, co zapewni możliwość wytworzenia jeziorka spawalniczego. Aby to zapewnić należało dobrać odpowiednio parametry geometryczne spoiwa oraz parametry procesu TIG.

9.1. Materiał do badań wstępnych

W procesie odlewniczym przygotowano sztabkę stopu na osnowie fazy międzymetalicznej Fe_3Al o wymiarach (podanych w mm) $315 \times 308 \times 12$. Ze sztabki wykonano spoiwo, które zostało wykorzystane w procesie napawania TIG powierzchni przylgni zaworu wydechowego. Na rys. 9.1. przedstawiona została sztaba odlanego intermetal. Ze względu na trudnoobrabialny charakter fazy międzymetalicznej Fe_3Al , do wykonania spoiwa wykorzystano technologię cięcia wysokociśnieniową strugą wodno – ścierną. Technologia ta polega na rozdzielaniu materiału z wykorzystaniem strumienia wody zawierającego ścierniwo oraz pod wysokim ciśnieniem. Obróbka ta charakteryzuje się brakiem wpływu ciepła przy krawędziach linii cięcia, który jest wysoce niepożądany w przypadku kształtowania elementów, w których wpływ ciepła może powodować zmiany we właściwościach materiału obrabianego [82].



Rys. 9.1. Uzyskana sztaba intermetalalu Fe_3Al (opracowanie własne)

Podczas cięcia materiałów trudnoobrabialnych, tak jak w przypadku omawianego materiału na osnowie fazy Fe_3Al , wymagana była wyższa energia kinetyczna strumienia wody, dlatego dodano do niego ścierniwo, które zwiększyło erozję materiału, będącego podstawą rozdzielania [82, 83]. Proces cięcia wykonano na obrabiarce Kimla Streamcut 3030 z wykorzystaniem garnetu jako ścierniwa. Parametry pracy obrabiarki przedstawiono w tablicy 3.

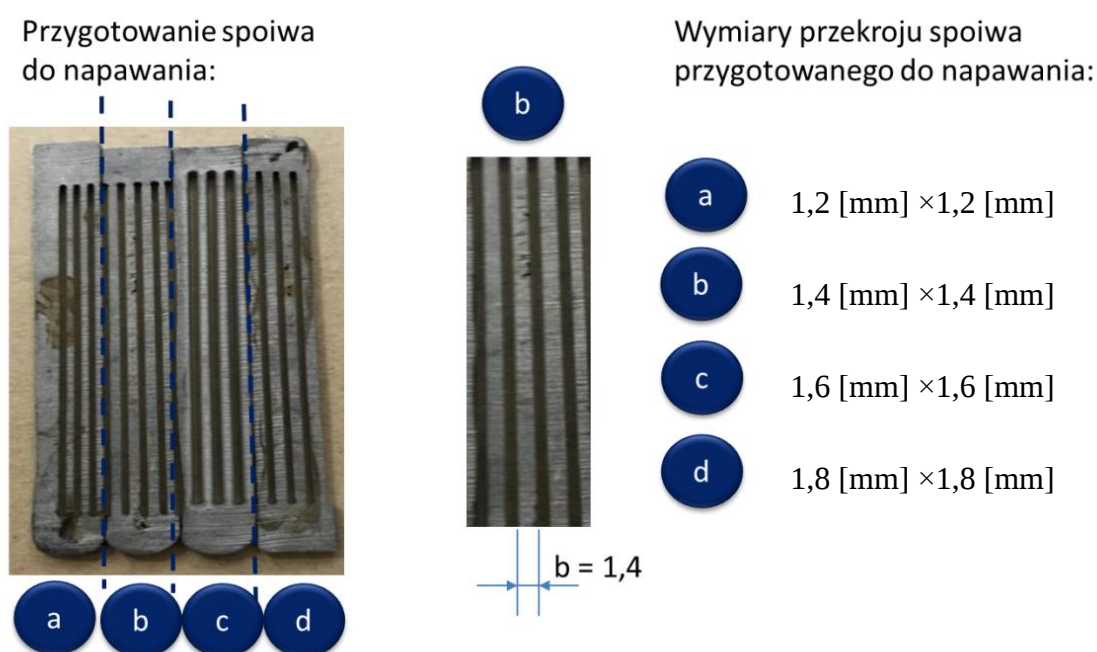
Tablica 3. Parametry procesu cięcia strugą wodno – ścierną

Parametr	Wartość	Jednostka
Ciśnienie wody	350	1 MPa
Wymiar cząstek ścierniwa	0,30 – 0,35	mm
Prędkość posuwu głowicy	30	mm/min
Średnica strumienia wody	1,1	mm

Tak dobrane parametry zapewniły wycięcie plastrów materiału, z których w kolejnych krokach było wycinane spoiwo. Pałeczki spoiwa, w kształcie włókien, charakteryzowały się znacznie mniejszym przekrojem poprzecznym w porównaniu do klasycznych spoiw (drutów) używanych w procesie TIG. Zmniejszenie przekroju miało na celu zapewnienie właściwego nadtopienia spoiwa w procesie spawalniczym.

Po wykonaniu procesu cięcia wysokociśnieniową strugą wodno – ścierną otrzymano spoiwa o różnych przekrojach $1,2 \times 1,2$ [mm²], $1,4 \times 1,4$ [mm²], $1,6 \times 1,6$ [mm²], $1,8 \times 1,8$ [mm²].

Spoiwo miało długość 150 mm. Wykonane spoiwa przedstawiono na rys. 9.2.



Rys. 9.2. Przygotowanie spoiwa do napawania, o następujących wymiarach przekrojów:
a) $1,2 \times 1,2$ [mm²], b) $1,4 \times 1,4$ [mm²], c) $1,6 \times 1,6$ [mm²], d) $1,8 \times 1,8$ [mm²]

Sprawdzenie możliwości napawania spoiwami o różnej grubości miało na celu uzyskanie odpowiedzi na następujące problemy badawcze:

- czy możliwe jest napawanie przylgni zaworowej materiałem spoiwa z fazy Fe_3Al przy zastosowaniu przekroju spoiwa mniejszego niż 2 [mm²] ?
- czy możliwe jest napawanie powłoki z materiału fazy Fe_3Al bez wad spawalniczych ?

9.2. Napawanie fazą międzymetaliczną

Spoiwa o przekrojach 1,2 × 1,2 [mm²]; 1,4 × 1,4 [mm²]; 1,6 × 1,6 [mm²]; 1,8 × 1,8 [mm²] poddano procesowi napawania na przylgnię zaworu wydechowego w celu określenia możliwości wykorzystania technologii napawania TIG do zabezpieczenia warstwy przylgni zaworowej w silniku zasilanym gazem ziemnym. Podczas prób napawania wyszczególniono następujące parametry procesu:

- wykorzystano natężenie prądu spawania w zakresie 60 – 70 A i napięcie łuku 19 V,
- jako gaz osłonowy zastosowano argon,
- prędkość napawania wynosiła 70 – 80 mm/min,
- natężenie przepływu gazu osłonowego wynosiło 8 l/min.

W celu zwiększenia równomierności wypływu gazu osłonowego zastosowano łuskę spawalniczą w rozmiarze 6. Przed przystąpieniem do napawania powierzchnię przylgni oczyszczono chemicznie z wykorzystaniem acetonu. Następnie rozpoczęto jednowarstwowe napawanie z wykorzystaniem elektrody wolframowej (2,4 mm) w konfiguracji ze spoiwem w postaci cienkiego drutu Fe_3Al o wyżej wymienionych przekrojach. Spoiwo na przylgnię zaworową w trakcie procesu napawania podawano ręcznie. Na rys. 9.3. przedstawiono proces napawania przylgni

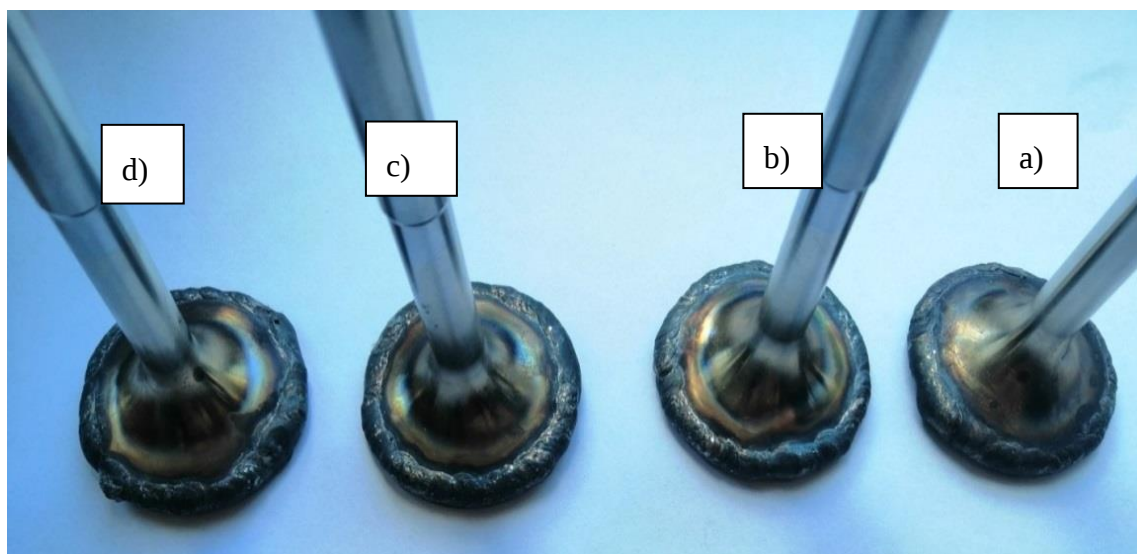
zaworu wydechowego fazą międzymetaliczną Fe_3Al przy pomocy spoiwa z tego materiału.



Rys. 9.3. Proces napawania przylgni zaworu wydechowego spoiwem z fazy międzymetalicznej Fe_3Al (opracowanie własne)

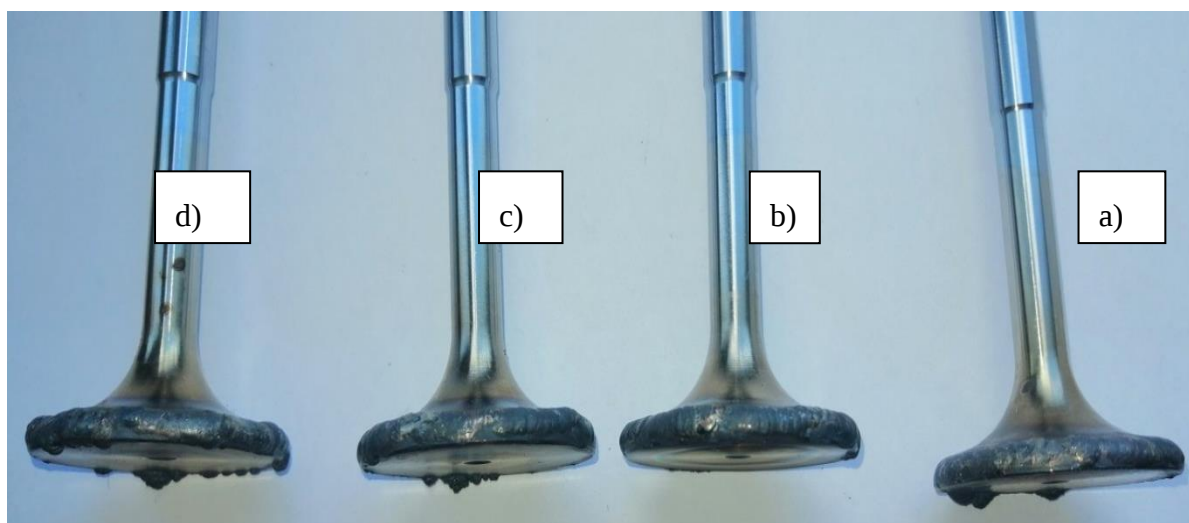
9.3. Wyniki badań wizualnych i ich analiza

Proces napawania TIG fazą międzymetaliczną wykonano dla wymiarów spoiwa $1,2 \times 1,2$ [mm²]; $1,4 \times 1,4$ [mm²]; $1,6 \times 1,6$ [mm²]; $1,8 \times 1,8$ [mm²]. Po procesie napawania dokonano ocenę wizualną otrzymanych zabezpieczonych przylgni zaworowych. W tym celu wykonano dokumentację fotograficzną napawanych zaworów. Zdjęcie napawanych przylgni zaworów dla powyższych wymiarów spoiwa (rzut z góry) przedstawiono na rys. 9.4, z kolei rys. 9.5. przedstawia przylganie zaworów napawanych spoiwami o wybranych wymiarach przekroju w rzucie pionowym.



Rys. 9.4. Przyłgnie zaworów napawane wybranymi przekrojami spoiwa Fe_3Al : a) $1,2 \times 1,2$ [mm^2], b) $1,4 \times 1,4$ [mm^2], c) $1,6 \times 1,6$ [mm^2], d) $1,8 \times 1,8$ [mm^2] (opracowanie własne)

Podczas oceny organoleptycznej przyjęto, że nakładanie na powierzchnie stożkową spoiwo, powinno charakteryzować się odpowiednią jakością powierzchni zabezpieczanej, tzn. nie powinno się obserwować, nierównomierności pokrycia, złuszczeń powłoki, rozwarstwień czy pęknięć powierzchni. Uznano również, że powstawanie nadmiernych naddatków w formie materiału „spływającego” z powierzchni podczas procesu nakładania jest zjawiskiem niekorzystnym, ze względu na znaczne zmniejszenie wymiarów nominalnych przyłgni zaworowej, co może się wiązać z dość pracołonną obróbką materiału, dostosowująca przyłgnię do wymiarów znormalizowanych. Wstępna analiza wyników badań (rys. 9.4.) pozwala stwierdzić, że powłoka napawana oznaczona na rysunku symbolami b i c charakteryzuje się największą równomiernością nałożenia. Ponadto, co jest bardzo dobrym wynikiem, w żadnym przypadku nie stwierdzono odwarstwienia, braku przetopu, miejsc niepokrytych powłoką. Można zatem wnioskować, że proces TIG nadaje się do wytworzenia powłoki ochronnej na przyłgni zaworu wydechowego.



Rys. 9.5. Przyłgnie zaworów napawane wybranymi przekrojami spoiwa Fe_3Al (rzut pionowy), a) $1,2 \times 1,2$ [mm^2], b) $1,4 \times 1,4$ [mm^2], c) $1,6 \times 1,6$ [mm^2], d) $1,8 \times 1,8$ [mm^2] (opracowanie własne)

W zaworze z przyłgnią napawaną spoiwem $1,2 \times 1,2$ [mm^2] (rys. 9.5. a) zaobserwowano, że napoina nie wiązała się prawidłowo z podłożem, materiał „spływał” z powierzchni i powstawały naddatki. Uznano, że jest to zjawisko niekorzystne. Prawdopodobnie jest związane z szybszym nagrzewaniem się spoiwa w porównaniu do materiału rodzimego. W zaworze z przyłgnią napawaną spoiwem o przekroju $1,4 \times 1,4$ [mm^2] nie zaobserwowano niezgodności w postaci nadtopień, zbyt dużych naddatków, co świadczy o tym, że parametry napawania zostały dobrane w sposób właściwy. W analizowanej próbce, badaniem wizualnym, nie stwierdzono również innych zmian, które mogłyby decydować o obniżeniu właściwości ochronnych powłoki. Do zmian takich zaliczono nierównomierność nałożenia (tzw. prześwity), pęknięcia, rozwarstwienia i złuszczenie. Próbka była wolna od wymienionych wad.

W zaworach z przyłgnią napawaną spoiwem $1,6 \times 1,6$ [mm^2] oraz $1,8 \times 1,8$ [mm^2] zaobserwowano niezgodności w postaci „spływania” materiału z powierzchni przyłgni zaworu. Zjawisko to występuje na dużej części obwodu talerzyka zaworu i wynika

prawdopodobnie z niewłaściwie dobranych parametrów procesu napawania. W celu uzyskania jeziora spawalniczego należało podczas procesu zapewnić wyższą energię spawania. W tym celu podwyższono natężenie prądu do 66 A w przypadku napawania przy użyciu spoiwa $1,6 \times 1,6$ [mm²] oraz do 70 A w przypadku napawania przy użyciu spoiwa $1,8 \times 1,8$ [mm²]. W obu przypadkach zaobserwowano zbyt szybkie topienie się spoiwa oraz problemy z utrzymaniem stabilności łuku elektrycznego podczas procesu napawania. Obserwacje procesu napawania i rejestrowane trudności wytworzenia powłoki udokumentowano w postaci opisowej (tablica 4).

Tablica 4. Charakterystyka procesu napawania przy zastosowania fazy międzymetalicznej Fe₃Al jako spoiwa

Zastosowane stałe parametry procesu:		Gaz osłonowy: argon Elektroda: wolframowa 2,4 mm Ilość gazu: 8 l/min Łuska spawalnicza: nr 6
Charakterystyka procesu napawania:		
Zastosowane zmienne parametry procesu:	Opis spostrzeżeń i wnioski	
Natężenie prądu: 60 A Wymiary przekroju poprzecznego spoiwa: $1,2 \times 1,2$ [mm ²]	Zaobserwowano intensywne topienie się spoiwa oraz problemy z utworzeniem jeziora spawalniczego. Zauważono niedostateczne wiązanie się spoiwa z materiałem rodzimym. Powstały znaczne naddatki. Wystąpiły problemy z równomierną aplikacją spoiwa do jeziora spawalniczego.	
	Wniosek: Zbyt niskie natężenie prądu napawania jest przyczyną wystąpienia problemów z równomierną aplikacją spoiwa do jeziora spawalniczego.	

c.d. Tablica 4. Charakterystyka procesu napawania przy zastosowania fazy międzymetalicznej Fe₃Al jako spoiwa

Natężenie prądu: 62 A Wymiary przekroju poprzecznego spoiwa: 1,4 × 1,4 [mm²]	Wystąpiło intensywne topienie się spoiwa. zaobserwowano prawidłowe tworzenie się jeziora spawalniczego. Nie odnotowano problemów z kontrolą kształtu oraz prowadzenia jeziora spawalniczego. Przy początkowej fazie napawania zauważalne niewielkie lokalne płynięcie materiału napawanego związane z procesem tworzenia się jeziora spawalniczego. Nie powstały nadmierne naddatki. Powstająca powłoka była równomierna. Aplikacja fazy międzymetalicznej była w pełni kontrolowana. Wniosek: Parametry procesu i zastosowanego spoiwa pozwalają na wytworzenie właściwej powłoki i pełną kontrolę procesu jej wytwarzania.
Natężenie prądu: 66 A Wymiary przekroju poprzecznego spoiwa: 1,6 × 1,6 [mm²]	Spoiwo topiło się zbyt szybko. Zaobserwowano trudności z utrzymaniem kontroli jeziora spawalniczego prowadzącego do nadtopień materiału rodzimego i spoiwa. Obserwowano zbyt duże naddatki. Wniosek: Zbyt wysoka energia doprowadzona do procesu uniemożliwia pełną kontrolę procesu i wytworzenie równomiernej powłoki.
Natężenie prądu: 70 A Wymiary przekroju poprzecznego spoiwa: 1,8 × 1,8 [mm²]	Zaobserwowano niestabilność łuku elektrycznego, zbyt duże natężenie prądu prowadziło do braku kontroli nad jeziorkiem spawalniczym. Zaobserwowano „spływanie” materiału napoiny z powierzchni zaworu i tworzenie się znacznych naddatków. Otrzymana powłoka charakteryzowała się zmienną grubością na obwodzie. Wniosek: Zbyt wysoka energia doprowadzona do procesu uniemożliwia pełną kontrolę procesu i wytworzenie równomiernej powłoki.

Reasumując, na podstawie wyników badań makroskopowych wizualnych oraz dokumentacji przebiegu procesu napawania stwierdzono, że:

- zastosowanie spoiwa w postaci włókien o przekroju poprzecznym mniejszym niż $2 \text{ [mm}^2\text{]}$ pozwala uzyskać powłoki na przyłgni zaworowej w procesie TIG,
- zastosowanie spoiwa z fazy międzymetalicznej Fe_3Al o wymiarach przekroju $1,4 \times 1,4 \text{ [mm}^2\text{]}$ przy utrzymaniu natężenia prądu o wartości 62 A pozwala na uzyskanie odpowiedniego związania spoiwa z podłożem i wytworzenia równomiernej warstwy napawanej,
- zastosowanie zbyt niskiej lub zbyt wysokiej energii spawania jest najczęstszą przyczyną utraty kontroli nad procesem i skutkuje wytworzeniem powłok charakteryzujących się licznymi naddatkami,
- zastosowanie spoiwa o przekroju kwadratowym dla boku $a = 1,6 \text{ mm}$ i większym wymaga zastosowania wyższej energii procesu spawania, co w konsekwencji prowadzi do zmniejszenia równomierności nałożenia warstwy wierzchniej.

Na podstawie otrzymanych wyników badań należy wnioskować, że opracowana koncepcja materiałowo technologiczna pozwala na uzyskanie powłok zabezpieczających przyłgni zaworowe. Jako najlepsze parametry procesu napawania należy przyjąć zastosowanie:

- natężenia prądu $I = 62 \text{ A}$,
- napięcie $U = 19 \text{ V}$ i prędkość spawania $V = 70 \text{ mm / min}$,
- nowoopracowanego spoiwa z materiału fazy międzymetalicznej Fe_3Al o wymiarach 150 mm – długość pojedynczego spoiwa i przekroju w kształcie kwadratu o boku $a = 1,4 \text{ mm}$.

Przy zachowaniu pozostałych przyjętych parametrów procesu, w tym:

- gazu osłonowego w postaci argonu i prędkości wypływu 8 l/ min ,

- elektrody wolframowej 2,4 mm,
- łuski spawalniczej: nr 6.

W celu określenia czy wytworzone powłoki charakteryzują się prawidłową strukturą, bez niezgodności spawalniczych wewnętrznych wykonane napoiny poddano badaniom radiografii przemysłowej (RT).

9.4. Wyniki badań rentgenograficznych i ich analiza

Badania rentgenograficzne przeprowadzono w celu wykrycia wewnętrznych, podpowierzchniowych oraz powierzchniowych nieciągłości badanych obiektów. W celu przeprowadzenia badań RT naświetlono obiekty badań promieniowaniem rentgenowskim lub promieniowaniem gamma (γ), otrzymywanym ze sztucznych źródeł izotopowych. Obraz prześwietlanego obiektu został zarejestrowany na kliszy radiograficznej. Metodę tę najczęściej stosuje się m. in. w celu kontroli złączy spawanych, zgrzewanych [85]. Badanie i ocenę napoin wykonano zgodnie z normami PN – EN ISO 17635 dla badań nieniszczących spoin [85], przy zasadach ogólnych dotyczących metali wg. normy PN – EN ISO 17636 – 2 [86] w badaniach nieniszczących spoin. Badanie radiograficzne z wykorzystaniem promieniowania rentgenowskiego i gamma z detektorami cyfrowymi przeprowadzono wg. normy PN – EN ISO 6520 – 1 Spawanie i procesy pokrewne [88]. Klasyfikację geometrycznych niezgodności spawalniczych w metalach określono z wykorzystaniem normy PN – EN ISO 5817 Spawanie, złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów [88]. Warunki badania przedstawiono w tablicy 5.

Tablica 5. Parametry otoczenia w trakcie badania RT

Parametr w trakcie badania	Wartość
Temperatura otoczenia	23,4° C
Temperatura obiektu	23° C
Wilgotność powietrza	51%
Natężenie oświetlenia	572 lx

W skład oprzyrządowania do badań RT wchodziło wyposażenie o parametrach przedstawionych w tablicy 6.

Tablica 6. Parametry wyposażenia wykorzystanego w badaniu

Zastosowane wyposażenie i jego parametry pracy
system rentgenowski z lampą 1500 kV HP, 1500 W
amorficzny krzemowy detektor obrazu (a-Si) model XRD 0822 – płaski panel
procesor obrazu – model BHT Plus
suwmiarka MAUb 150, termometr XP200, przymiar stalowy 300 mm
technika radiograficzna – radiografia cyfrowa (DR) z wykorzystaniem promieniowania gamma
technika radiograficzna – radiografia cyfrowa (DR) z wykorzystaniem promieniowania gamma
klasa badania – SA
klasa systemu – SC2
kierunek wiązki – prostopadle do badanego obiektu,
filtry i kolimatory – nie stosowano
dane techniczne przetwarzania obrazu – nie stosowano
format danych – *.jpg

Parametry ekspozycji w trakcie badania przedstawiono w tablicy 7.

Tablica 7. Parametry ekspozycji w trakcie badania

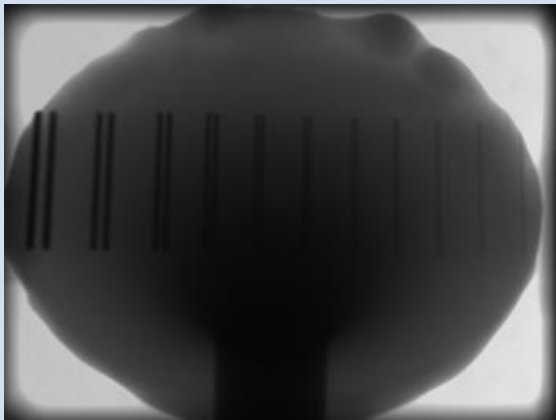
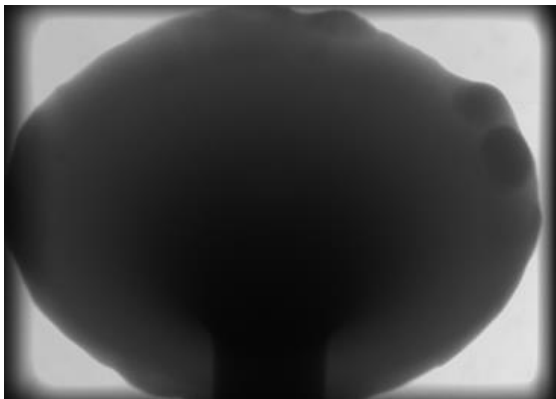
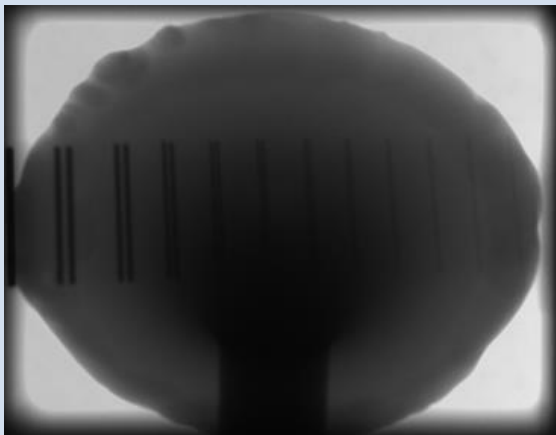
Parametr	Wartość
odległość do źródła	520 mm
grubość nominalna	zmienna
napięcie i prąd lampy	225 kV; 6,4 mA
poziom integracji	6
zastosowano powiększenie	2×
lokalizacja wskaźników jakości	strona źródła,
typ IQI	podwójny wzór DUPLEX
wymagana jakość obrazu 7D	uzyskana 7D

Po określeniu parametrów badania wykonano analizę RT zaworów z napoinami wykonanymi przy poszczególnych parametrach procesu. Wyniki badań zostały udokumentowane w postaci zdjęć rentgenograficznych (RT). Analiza wyników badań zaworów napawanych fazą międzymetaliczną Fe_3Al wraz z dokumentacją została przedstawiona w tablicy 8.

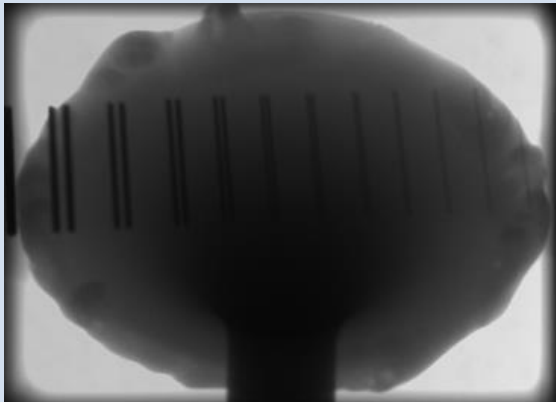
Tablica 8. Analiza zdjęć RT zaworów napawanych fazą międzymetaliczną Fe_3Al

Opis próbki	Zdjęcie RT	Opis zdjęcia radiologicznego
Zawór nienapawany Fe_3Al		Nie stwierdzono niezgodności wewnętrznych

c.d. Tablica 8. Analiza zdjęć RT zaworów napawanych fazą międzymetaliczną Fe₃Al

Opis próbki	Zdjęcie RT	Opis zdjęcia radiologicznego
Zawór napawany; Symbol: 1,2 × 1,2		Zauważono wyraźnie sfalowaną linię brzegową próbki. Badaniem RT nie stwierdzono niezgodności spawalniczych wewnętrznych w całym analizowanym obszarze próbki.
Zawór napawany; Symbol: 1,4 × 1,4		Powłoka charakteryzuje się równomiernymi brzegami. Przy pomocy badań RT nie stwierdzono niezgodności spawalniczych wewnętrznych w analizowanej powłoce.
Zawór napawany; Symbol: 1,6 × 1,6		Brzegi próbki lekko sfalowane (wynik obserwowanych wcześniej naddatków). Przy pomocy badań RT nie stwierdzono niezgodności spawalniczych wewnętrznych w analizowanej powłoce.

c.d. Tablica 8. Analiza zdjęć RT zaworów napawanych fazą międzymetaliczną Fe₃Al

Opis próbki	Zdjęcie RT	Opis zdjęcia radiologicznego
Zawór napawany; Symbol: 1,8 × 1,8		Brzegi próbki sfalowane (wynik obserwowanych wcześniej naddatków). Przy pomocy badań RT Stwierdzono niezgodności w postaci pęcherzy gazowych (5 pęcherzy położonych na obwodzie przylgni zaworu o średnicy do 0,5 mm).

Napoiny wykonane z wykorzystaniem spoiwa fazy międzymetalicznej Fe₃Al o wymiarach 1,2 × 1,2 [mm²]; 1,4 × 1,4 [mm²] oraz 1,6 × 1,6 [mm²] nie wykazały w badaniu niezgodności wewnętrznych. Oznacza to, że wszystkie te powłoki zostały wykonane prawidłowo. Różnice w wynikach pomiędzy próbkami wynikają jedynie z zarejestrowanej równomierności linii brzegowej. Próbki, w których obserwowano naddatki (badania przedstawione w rozdziale 9.3.) linię brzegową miały bardziej sfalowaną. W napoinie wykonanej spoiwem z wykorzystaniem fazy międzymetaliczną Fe₃Al 1,8 × 1,8 [mm²] stwierdzono wystąpienie pęcherzy gazowych. Dla poziomu jakości B wg. PN – EN ISO 5817 [88] maksymalny dopuszczalny wymiar pojedynczego pęcherza gazowego wynosi:

$$d \leq 0,2 \times a, \quad (9.1.)$$

jednak nie więcej niż 3 mm. Dla przyjętych założeń dopuszczalny wymiar pęcherzy dla badanego obiektu wynosi 1 mm. Stwierdzone niezgodności posiadają wymiary mniejsze

niż 1mm. Na tej podstawie można stwierdzić, że napoina została wykonana w poziomie jakości B. Zatem wszystkie próbki należy uznać za wykonane prawidłowo.

Reasumując, badania oceny rentgenograficznej napawanych zaworów pozwala jednoznacznie stwierdzić, że:

- można wykonać napoiny metodą TIG stosując spoiwo intermetaliczne Fe₃Al bez wewnętrznych wad i niezgodności spawalniczych,
- napoiny wykonane spoiwem o przekroju $1,2 \times 1,2$ [mm²]; $1,4 \times 1,4$ [mm²] i $1,6 \times 1,6$ [mm²] nie wykazują wad i niezgodności spawalniczych w badaniach RT,
- spoiwa o mniejszym przekroju nie umożliwiają prawidłowego przeprowadzenia procesu napawania, objawiającego się zbyt intensywnym topieniem spoiwa i brakiem jego właściwego wiązania z podłożem,
- napawanie przylgni zaworowej spoiwami o przekroju $1,6 \times 1,6$ [mm²] oraz $1,8 \times 1,8$ [mm²] charakteryzuje się powstawaniem wad geometrycznych napoiny w postaci naddatków, które na zdjęciach RTG ujawniają się w postaci sfalowanej linii brzegowej,
- badania RT wykazały niezgodności w postaci pęcherzy. Pęcherze charakteryzował wymiar długości dopuszczalny dla poziomu jakości B wg. PN – EN ISO 5817 [88].

Ze względu na występowanie niezgodności w próbce napawanej fazą międzymetaliczną Fe₃Al o wymiarach $1,8 \times 1,8$ [mm²] oraz trudności w przeprowadzeniu napawania z wykorzystaniem spoiwa o wymiarach $1,2 \times 1,2$ [mm²] oraz $1,6 \times 1,6$ [mm²] przyjęto założenie, że możliwy do wykorzystania w badaniach eksploatacyjnych zawór powinien być napawany spoiwem o przekroju poprzecznym $1,4 \times 1,4$ [mm²].

Wyniki badań pozwalają wnioskować, że:

1. Zaprojektowana metoda przy wykorzystaniu nowo opracowanych spoiw z fazy międzymetalicznej Fe_3Al nadaje się do wytworzenia warstwy wierzchni napawanej na stożkowe powierzchnie przylgni zaworowej.
2. Prawidłowy dobór najważniejszych parametrów napawania TIG (natężenie prądu, przekrój spoiwa) umożliwia wykonanie napoin bez wad i niezgodności spawalniczych.
3. Dotychczasowe badania wstępne napoin ze spoiwem z fazy międzymetalicznej Fe_3Al pozwalają przypuszczać, że proces może być wykorzystany do zabezpieczenia przylgni zaworów wydechowych w pojazdach samochodowych przystosowywanych do zasilania gazem ziemnym.

10. Teza i cel badań zasadniczych

Na podstawie analizy literatury naukowej oraz branżowej stwierdzono występujący problem eksploatacyjny w postaci przyspieszonego zużycia przylgni zaworów wydechowych w silnikach środków transportu zasilanych gazem ziemnym. Dane literaturowe wskazują, że ze względu na panujące w komorze spalania warunki zapłonu paliwa, przyspieszone zużycie obserwuje się w przylgniach zaworowych, których powierzchnia zabezpieczana jest Stellite. W badaniach wstępnych udowodniono, że możliwe jest wykonanie równomiernej powłoki zabezpieczającej z fazy Fe_3Al metodą TIG.

10.1. Teza

Na podstawie przeprowadzonej analizy danych literaturowych, wyników wybranych prac naukowo – badawczych oraz wstępnych badań własnych, założono, że:

- warstwy powierzchniowe na osnowie fazy Fe_3Al wytwarzane w procesie napawania będą charakteryzowały się wysoką odpornością na zużycie ścierne w temperaturze podwyższonej, w warunkach pracy zaworów przylgni zaworowej pojazdów samochodowych zasilanych paliwem CNG/LNG,
- niezbędne spoiwa do napawania powłok o wysokiej zawartości fazy międzymetalicznych, można otrzymywać metodą cięcia wodnego z trudnoobrabialnego materiału litego,
- powłoki charakteryzujące się jednorodną strukturą w swojej objętości, bez wyraźnych porowatości, odpowiedniej twardości i właściwej przyczepności do stożkowego podłoża dla produkcji jednostkowej lub małoseryjnej najkorzystniej otrzymywać procesem napawania TIG,

- poprzez odpowiedni dobór parametrów: geometrycznych spoiwa i procesu technologicznego, można otrzymywać powłoki z fazy międzymetalicznej Fe_3Al , charakteryzującej się żądanymi właściwościami tribologicznymi, w tym wysoką odpornością na zużycie ścierne w warunkach pracy przylgni zaworowej pojazdów samochodowych adaptowanych do zasilania paliwem CNG/LNG.

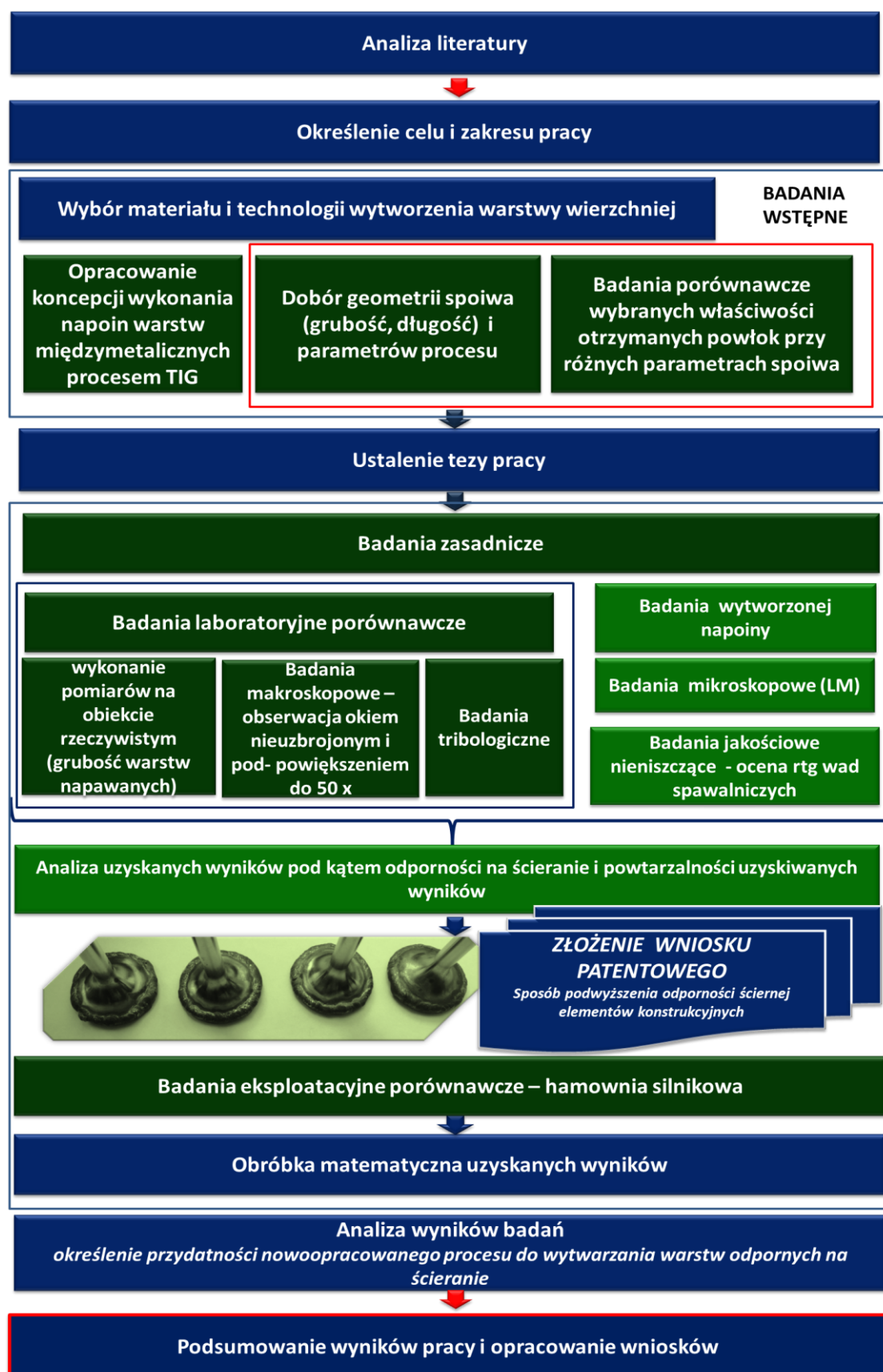
Na podstawie założeń, w ramach pracy, sformułowano tezę:

zastosowanie fazy międzymetalicznej Fe_3Al do napawania powierzchni przylgni zaworowych silników w środkach transportu, adaptowanych do zasilania paliwem CNG/LNG, wpłynie na zwiększenie trwałości jednostki napędowej w warunkach eksploatacji i pozwoli na zmniejszenie częstotliwości regulacji luzu zaworowego.

W celu udowodnienia tezy, zgodnie z przyjętą koncepcją materiałowo – technologiczną opracowane spoiwo z materiału intermetalicznego Fe_3Al napawano na powierzchnię stożkową przylgni zaworowej. Wymiary spoiwa oraz parametry metody TIG zostały ustalone, zgodnie z wynikami badań wstępnych, przedstawionymi w podsumowaniu rozdziału 9 niniejszej rozprawy. Tak przygotowane, zabezpieczone przylganie zaworowe zostały przetestowane, zgodnie z ustalonym planem badań.

Przebieg pracy przedstawiono schematycznie na rys. 10.1. Zgodnie ze schematem badania zasadnicze obejmowały:

- badania laboratoryjne, takie jak:
 - analizę tribologiczną wykorzystanego do napawania stopu Fe_3Al oraz Stellitu,
 - określenie makrostruktury i mikrotwardości otrzymanej powłoki przy różnych parametrach spoiwa użytego w procesie,
 - określenie struktury i składu chemicznego testowanych powłok,
- badania eksploatacyjne, porównawcze:



Rys. 10.1. Przebieg pracy

- testy walidacyjne na hamowni oraz pomiar luzów zaworowych,
- złożenie wniosku do jednostki notyfikującej o uznanie technologii spawania WPQR Welding Procedure Qualification Record zgodne z wymaganiami normy EN-ISO 15613,
- podsumowanie wyników pracy i opracowanie wniosków.

Przyjęto, że zaproponowany plan badań umożliwi zrealizowanie celu i udowodnienie tezy pracy.

10.2. Badania zasadnicze – cel i metodyka

Przed przystąpieniem do badań wszystkie próbki zostały ocenione badaniem wizualnym. Badania wizualne (VT) wykonanych powłok napawanych wykonano okiem uzbrojonym w lupę przy 3 – krotnym powiększeniu – badania wykonano zgodnie z wymaganiami normy PN – EN ISO 17638 [89], kryteria oceny wg. EN ISO 5817 [90]. Uzyskane wyniki badań w tym zakresie były tożsame z wynikami badań wstępnych dla użytego spoiwa o przekroju $1,4 \times 1,4$ [mm²]. Wyniki potwierdziły równomierność nałożenia powłoki, bez wad typu pęknięcia, złuszczenia, odwarstwienia itp. Zatem uznano, że można przystąpić do badań zasadniczych. Badania zasadnicze miały na celu udowodnienie tezy. W tym celu wykonano badania laboratoryjne oraz eksploatacyjne.

Poniżej przedstawiono szczegółowy cel poszczególnych badań i ich metodykę badawczą.

A) Badania tribologiczne

Zgodnie z przyjętym planem (rozdział 10) przeprowadzono badania porównawcze odporności na zużycie ściernie fazy międzymetalicznej Fe₃Al, która została wykorzystana do napawania przyłgni zaworów wydechowych oraz dotychczas najczęściej stosowanego

materiału zabezpieczającego przylgnię zaworu wydechowego – Stellitu 6. Celem przeprowadzonych testów było wyznaczenie charakterystyk tribologicznych badanych materiałów oraz porównanie ich intensywności zużycia ściernego.

Uznano, że większe zużycie ściernie wykazane w warunkach laboratoryjnych przełoży się na obniżenie trwałości badanego elementu w warunkach rzeczywistych jego pracy.

Próbki do badań tribologicznych przygotowano przy wykorzystaniu obróbki elektroerozyjnej (EDM). Obróbka EDM polega na usunięciu nadmiaru materiału z przedmiotu obrabianego przy wykorzystaniu wyładowań elektrycznych zachodzących pomiędzy materiałem obrabianym, a elektrodą roboczą zanurzoną w cieczy dielektrycznej. Metoda ta jest wykorzystywana do obróbki materiałów trudnoobrabialnych oraz o złożonej geometrii. Po przyłożeniu do elektrody napięcia granicznego przy dostatecznym natężeniu prądu, następuje emisja elektronów z katody. Wyładowanie prowadzi do powstania zjonizowanego kanału plazmowego przez, który przepływa prąd w kierunku materiału obrabianego – anody. W wyniku bombardowania anody elektrodami dochodzi do lokalnych wzrostów temperatur ($8\,000^{\circ}\text{C}$ – $12\,000^{\circ}\text{C}$), czego skutkiem jest odparowanie materiału obrabianego [91, 92, 93]. Przygotowanie próbek do badań tribologicznych przeprowadzono przy wykorzystaniu obrabiarki Robofil 190 z wykorzystaniem elektrody roboczej w postaci drutu mosiężnego o średnicy 0,25 mm. Jako dielektryk wykorzystano wodę demineralizowaną. Wykorzystane parametry pracy przedstawionych w tablicy 9.

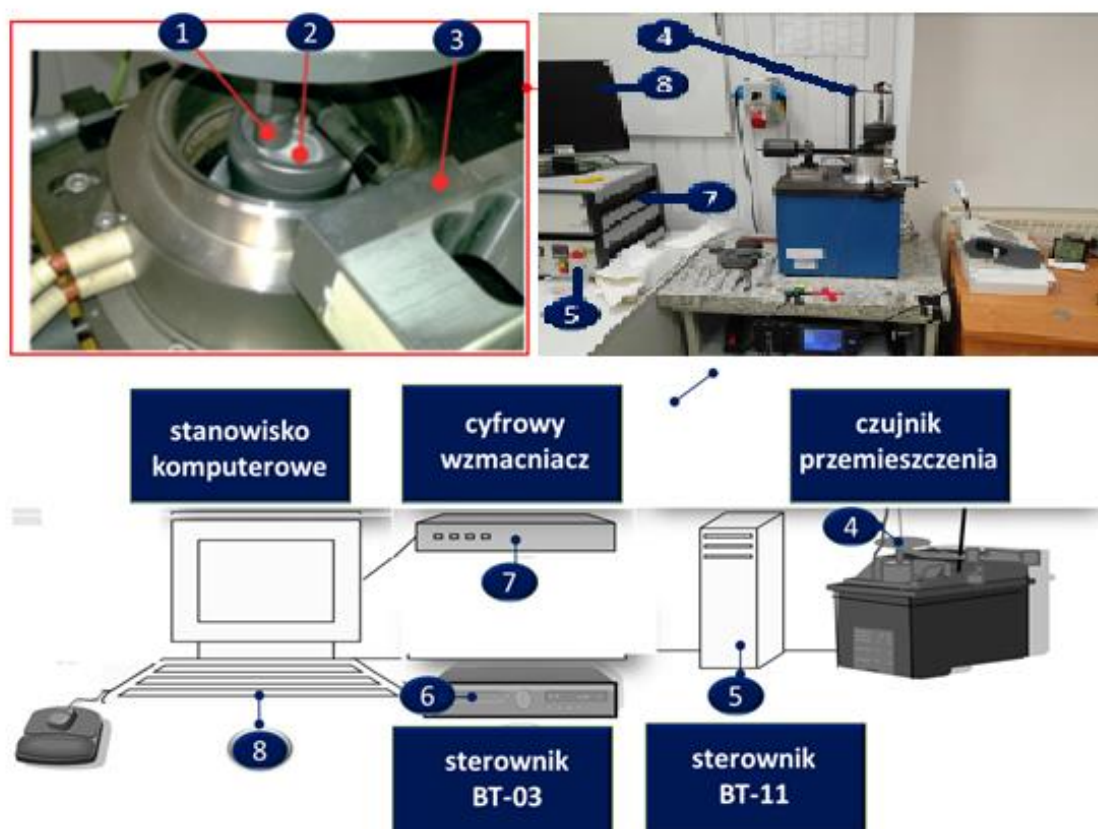
Tablica 9. Parametry pracy obrabiarki w procesie obróbki EDM

Parametr	Wielkość	Jednostka
Wysokość cięcia	12	mm
Prędkość przewijania drutu	10	m/min
Siła naciągu drutu	1,2	daN
Napięcie	80	V
Czas trwania impulsu	1	μs

W celu wyznaczenia charakterystyk tribologicznych badanych materiałów (Stellit 6 i intermetal Fe_3Al) przeprowadzono serię badań eksperymentalnych z wykorzystaniem testera typu trzpień – tarcza T – 11 wyprodukowanym w Instytucie Technologii Eksploatacji w Radomiu. Stanowisko znajduje się na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej. W przypadku przeprowadzonych badań, urządzenie T – 11 pozwoliło na wyznaczenie:

- średniej wartości siły tarcia,
- średniej wartości współczynnika tarcia,
- intensywności zużycia materiałów poddanych różnym obróbkom cieplnochemicznym.

Stanowisko wraz z wszystkimi elementami składowymi przedstawiono na rys. 10.2.



Rys. 10.2. Stanowisko do badań tribologicznych typu trzpień – tarcza T – 11

Próbki użyte do badań miały postać walca o średnicy 6 mm. Przeciwpóbkę stanowiła tarcza wykonana ze stali S235JR. Testy obu materiałów wykonano na przeciwpóbkce tego samego materiału, aby uzyskać dane porównawcze. Nacisk jednostkowy w obu przypadkach wynosił 1 MPa. Przyjęto prędkość poślizgu $V_p = 0,5$ m/s. Oba parametry ustalono bazując na danych technicznych dotyczących budowy silników spalinowych. Uwzględniając przyjęte parametry wyznaczono prędkość obrotową przeciwpóbkki $n = 240$ obr/min. Czas testu ustalono na 30 minut. Badania przeprowadzono w temperaturze pokojowej wynoszącej 24° C.

Podczas eksperymentu rejestrowano siłę tarcia T , co pozwoliło na wyznaczenie współczynnika tarcia μ :

$$\mu = \frac{T}{P} \quad (10.1)$$

gdzie: T – siła tarcia, P – obciążenie próbki prostopadłe do powierzchni tarczy.

Nacisk jednostkowy p_t obliczono na podstawie zależności:

$$p_t = \frac{4P}{\pi d^2} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (10.2)$$

gdzie: P – siła obciążająca próbkę, d – średnica próbki

Pomiar masy próbki przed i po badaniu pozwolił określić intensywność zużycia według zależności:

$$I = \frac{M_1 - M_2}{SF} \left[\frac{mg}{m^3} \right] \quad (10.3)$$

gdzie:

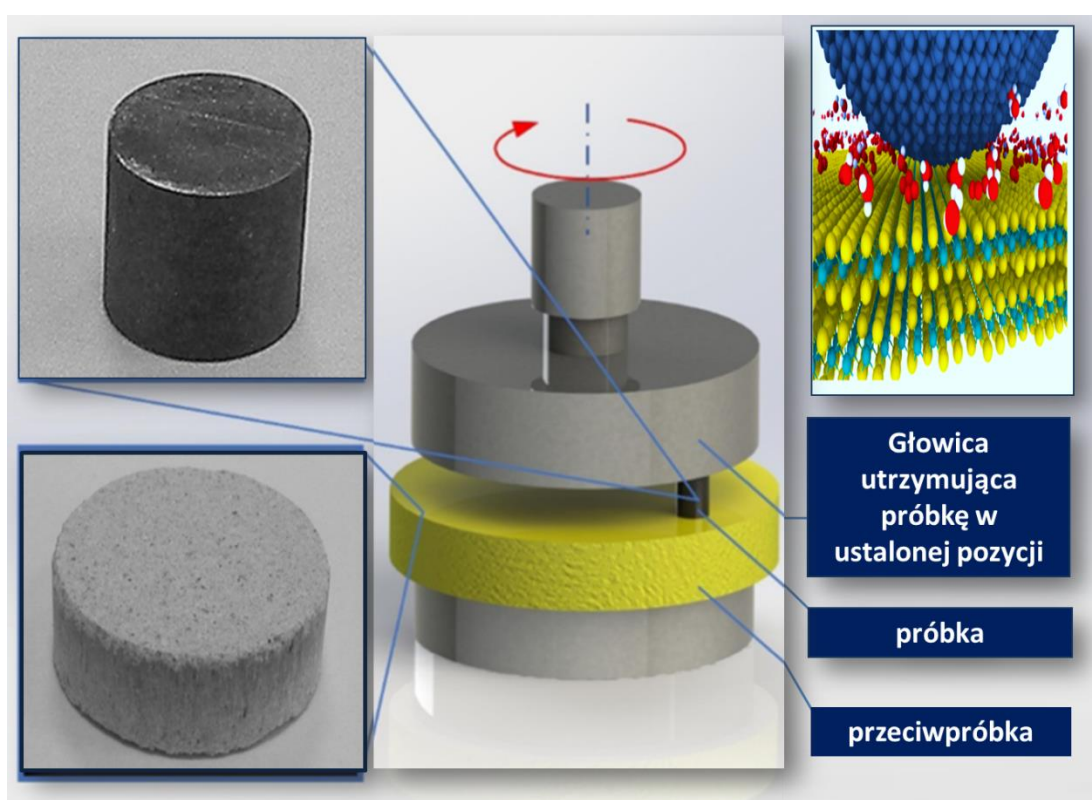
M_1 i M_2 – masa próbki przed i po próbie tarcia [mg],

S – droga tarcia [m],

F – powierzchnia przekroju próbki [m²].

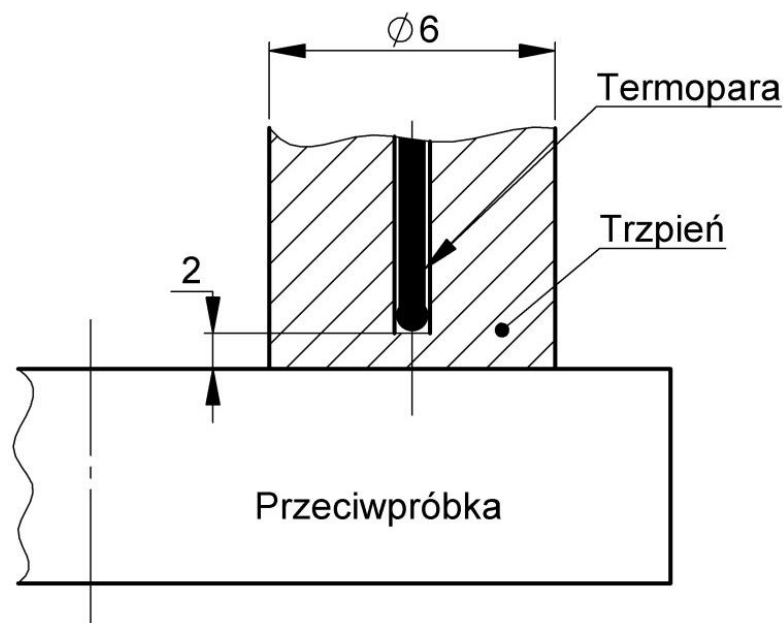
Sposób mocowania próbki w uchwycie testera przedstawiono na rys. 10.3. Otrzymane wyniki mają charakter porównawczy i pozwalają w sposób jednoznaczny określić intensywność zużycia badanych materiałów.

Temperaturę w styku ślizgowym rejestrowano z częstotliwością 1 Hz rejestratorem Graftec GL7000. Pomiar temperatury przeprowadzono z użyciem termopary typu K, której główka pomiarowa miała średnicę 0,25 mm.



Rys. 10.3. Schemat zamocowania próbki w uchwycie testera T – 11 – rysunek poglądowy

Umieszczono ją w otworze o średnicy 0,8 mm wywierconym w próbce (średnica otworu została dobrana tak, aby można było wprowadzić główkę pomiarową z zaizolowanymi przewodami). Otwór kończył się w odległości 2 mm od powierzchni tarcia (rys. 10.4.).



Rys. 10.4. Schemat umieszczenia termopary do pomiaru temperatury

Wyniki badań tribologicznych i ich analizę zaprezentowano w rozdziale 11.1. oraz w załączniku 1 do pracy.

B) Badania metalograficzne

Badania metalograficzne makro i mikro – zglądów miały na celu sprawdzenie, czy napawana spoina została wykonana prawidłowo, czy uzyskiwana struktura jest jednorodna w całej objętości oraz czy nastąpiło wymieszanie materiału rodzimego ze stopiwem.

Uznano, że niejednorodność objętościowa napoiny może przełożyć się na uzyskanie zdecydowanie różnych, anizotropowych własności badanego materiału, co z kolei będzie skutkowało obniżeniem lub podważeniem własności użytkowych napoiny w poszczególnych jej obszarach. Z kolei wymieszanie się materiału rodzimego z materiałem stopiwa może doprowadzić do niekorzystnych zmian właściwości zarówno napawanej przyłgni zaworu wydechowego jak również nowoutworzonej powłoki.

Powłoka powinna zatem charakteryzować się porównywalną strukturą, jaką posiada stop odlewniczy Fe_3Al , co zapewni jej pożądane właściwości charakteryzujące materiał wyjściowy.

Ponadto wyniki badań metalograficznych służyły potwierdzeniu możliwości uzyskiwania pożądanych warstw powierzchniowych z nowoopracowanego spoiwa z fazy Fe_3Al za pomocą procesu TIG, a przede wszystkim możliwości uzyskiwana powtarzalnych wyników. Poniżej przedstawiono metodykę badawczą.

- **B.1. Badania metalograficzne makroskopowe**

Badania wykonano okiem nieuzbrojonym oraz okiem uzbrojonym w lupę przy powiększeniu od $3\times$ do $50\times$. Badania wizualne makrozgładów – wykonano wg normy PN – EN ISO 17638 [89]. Trawienie zgładów wykonano chemicznie używając odczynnika Nital. Podczas badania zapewniono oświetlenie na poziomie 520 Lx (pomiaru dokonano luksomierzem światła białego). Analiza uzyskanych wyników badań została zaprezentowana w rozdziale 11.2. rozprawy.

- **B.2. Badania metalograficzne mikroskopowe (LM)**

Badanie mikrostruktury próbek wytrawionych odczynnikiem Nital przy użyciu mikroskopii świetlnej (LM) wykonano na zgładach poprzecznych. Przygotowanie zgładów obejmowało wycięcie próbek, ich polerowanie na papierze ściernym o gradacji od 50 do 1000. Przy przejściu na kolejny papier zmieniano kąt polerowania o 90° . Próbki trawiono chemicznie w odczynniku Nital. Tak przygotowane zgłady obserwowano na mikroskopie świetlnym (LM – light microscopy) – Olympus. Dokonano oceny jakościowej wykonanych napoin. Wyniki badań przedstawiono w rozdziale 11.2. rozprawy.

- **B.3. Badania mikroskopowe (SEM)**

Badania wykonano na skaningowym mikroskopie elektronowym PHILIPS XL. Na przekroju poprzecznym napoiny (zgłady wykonano analogicznie jak do badań na mikroskopie świetlnym), wykonano badanie wzdłuż linii środkowej napoiny a także w wybranych punktach. Zgłady wytrawiono metodą barwną, wykorzystując odczynnik Beraha. Celem badania było potwierdzenie, czy otrzymywana struktura napoiny charakteryzuje się jednorodnością w całej swojej objętości, jest wolna od wad i niezgodności spawalniczych oraz czy i gdzie powstają segregacje pierwiastków. Wyniki badań omówiono w rozdziale 11.2. niniejszej pracy.

- **Mikroanaliza rentgenowska**

Badania wykonano na skaningowym mikroskopie elektronowym PHILIPS XL wyposażonego w przystawkę (EDS) do mikroanalizy rentgenowskiej składu chemicznego. Analiza umożliwiła określenie jakie pierwiastki dominują w strukturze oraz jakie ulegają segregacji. Wyniki badań oraz ich analizę zamieszczono w rozdziale 11.2. rozprawy.

C) Badania mikrotwardości

Próbkę zaworu napawanego fazą międzymetaliczną Fe_3Al spoiwem o przekroju poprzecznym $1,4 \times 1,4 [\text{mm}^2]$ oraz próbkę zaworu z przyłgnią zabezpieczoną Stellitem 6 poddano badaniom mikrotwardości. Celem pomiarów badanych próbek materiałów było określenie czy oba materiały różnią się znacznie twardością. Uznano, że znaczna różnica w twardości badanych powłok napawanych jest niekorzystna, zbyt wysoka twardość powłoki wykonanej z materiału intermetalicznego w porównaniu do powłoki ze Stellitu może zmienić charakter współpracy pary cieńej przyłgnią zaworowa

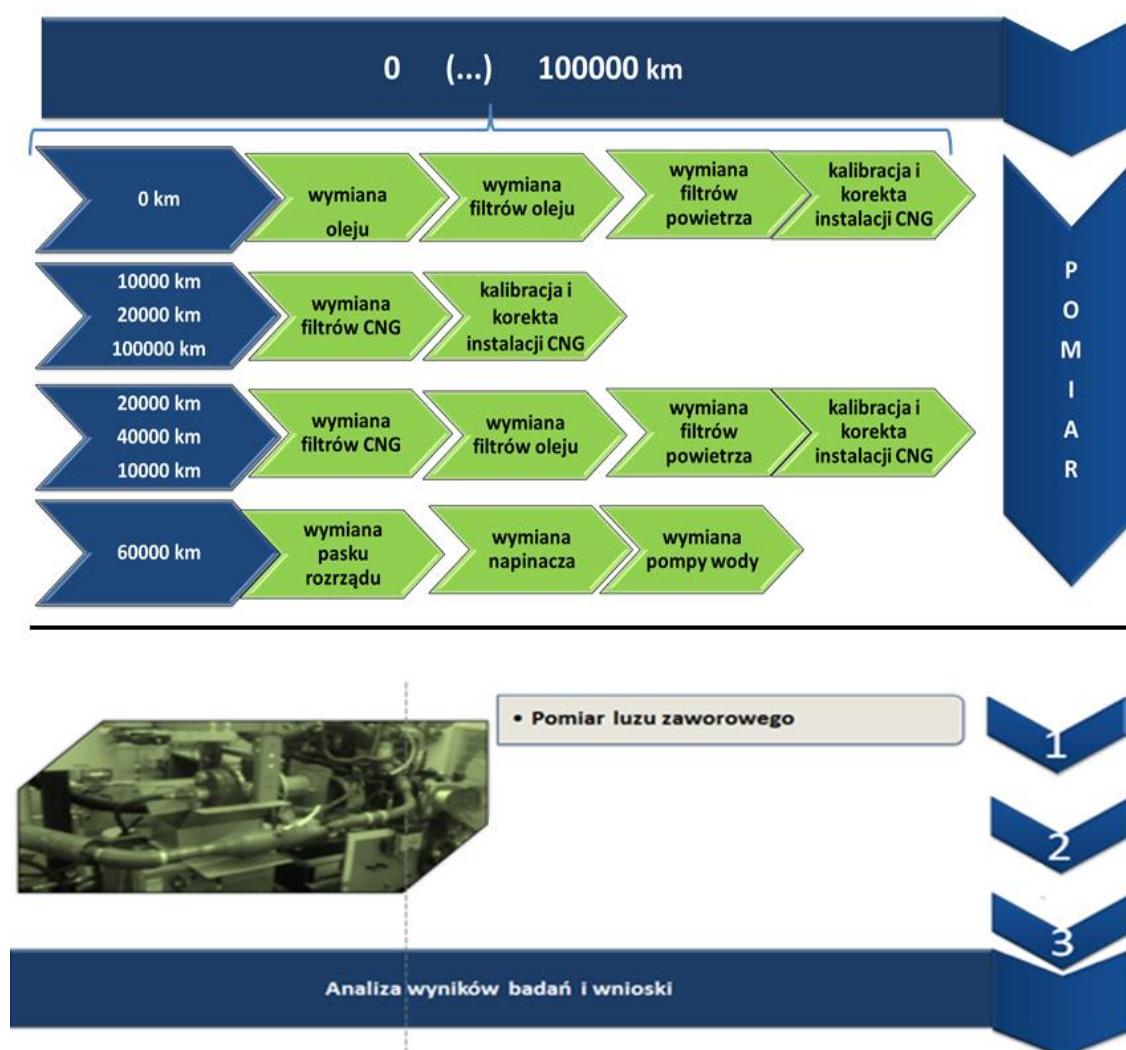
– zawór i doprowadzić do nadmiernego zużycia ściernego zaworu, co w konsekwencji wpłynęło negatywnie na trwałość eksploatacyjną jednostki napędowej. Badaniem potwierdzono, czy przyjęte założenie (rozdział 8) zostało spełnione.

Próbkę przygotowano do badań mikrotwardości metodą Vickersa. Badania przeprowadzono zgodnie z PN – EN ISO 6507 – 01:2018 – 05 [94] na twardościomierzu Zwick/Roell ZHV – 30S. Porównano mierzoną równoległe i prostopadle mikrotwardość zaworu z przyłgnią zabezpieczoną Stelitem z przyłgnią napawaną fazą międzymetaliczną Fe_3Al . W tym celu przygotowano przekrój głowy zaworu wydechowego. Próbki zainkludowano. Następnie próbki poddano badaniom na twardościomierzu Zwick/Roell ZHV – 30S zgodnie z normą PN – EN ISO 6507 – 01:2018 – 05.. Wyniki badań przedstawiono w rozdziale 11.1. rozprawy.

D) Badania walidacyjne na hamowni silnikowej

Przed przystąpieniem do badań walidacyjnych należało dostosować opracowaną technologię laboratoryjną wytwarzania warstwy zabezpieczającej do warunków produkcyjnych i eksploatacyjnych pojazdów.

Zatem technologia wytwarzania warstwy wierzchniej wymagała wprowadzenia dodatkowych zabiegów w postaci obróbki skrawającej, w celu nadania przyłgniom zaworów wydechowych odpowiedniej geometrii [95-99]. Z tego też względu zarówno sposób wykonania zaworów dla celów eksploatacyjnych jak i sam przebieg badań walidacyjnych (laboratoryjnych testowych na hamowni silnikowej) szczegółowo opisano w odpowiednich podrozdziałach rozdziału 12 pracy.



Rys. 10.5. Schemat badań eksploatacyjnych

Testy porównawcze eksploatacyjne miały na celu potwierdzenie tezy w zakresie, że zastosowanie nowych powłok zmniejszy częstotliwość regulacji luzu zaworowego.

W badaniach porównawczych eksploatacyjnych (rys. 10.5.) dokonano m. in. pomiarów luzów zaworowych w silniku zasilanym gazem ziemnym. W tym celu w głowicy silnika zainstalowano zarówno zawory z przyłgnią zabezpieczoną Stellitem jak również zawory z napawaną fazą międzymetaliczną Fe_3Al . Jednostkę napędową Hino H series 165 HP B53 No: UFH408218 umieszczono na hamowni silnikowej i poddano badaniom. Wyniki badań i ich analizę przedstawiono w rozdziale 12 rozprawy.

11. Wyniki badań laboratoryjnych i ich analiza

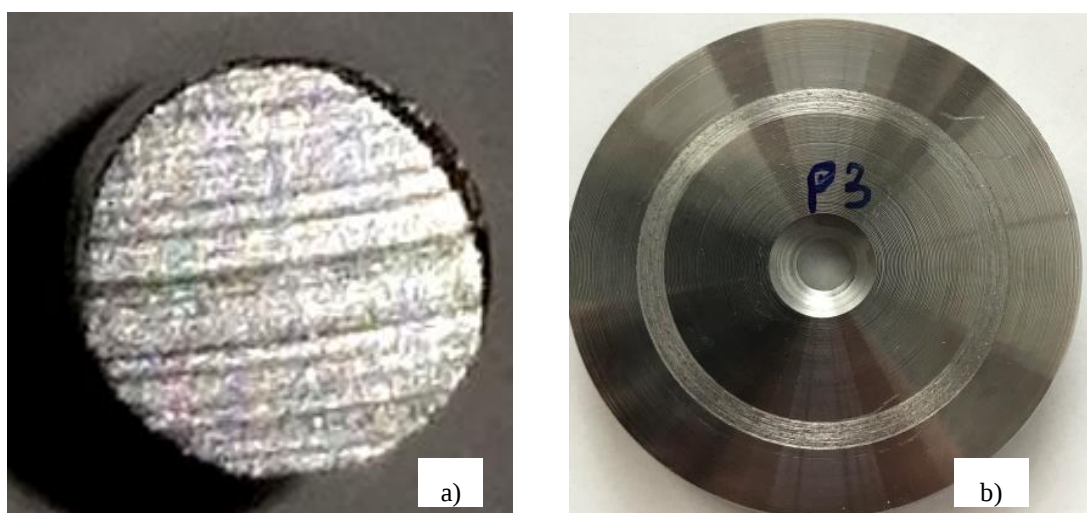
Uzyskane wyniki badań laboratoryjnych zostały udokumentowane oraz poddane szczegółowej analizie. Stanowiły podstawę do wnioskowania na temat: czy opracowana technologia spełnia założenia, przedstawione w rozdziale 8 niniejszej pracy oraz czy otrzymane warstwy spełniają założenia przedstawione w rozdziale 10.1. rozprawy. Uzyskane wybrane wyniki badań przedstawiono poniżej.

11.1. Badania tribologiczne

Materiały poddane badaniom stanowiły: Stellite 6 (materiał stosowany obecnie dla zabezpieczenia przylgni zaworowej) oraz intermetal Fe_3Al (materiał proponowany jako trwalszy zamiennik). Badanie przeprowadzono zgodnie z metodyką przedstawioną w rozdziale 10.1.A, na stanowisku badawczym znajdującym się na Wydziale Mechanicznym Politechniki Białostockiej. Materiały przetestowano stosując identyczny nacisk wynoszący 1 MPa i identyczną prędkość poślizgu wynoszącą 0,5 m/s. Każdą próbę powtórzono trzykrotnie.

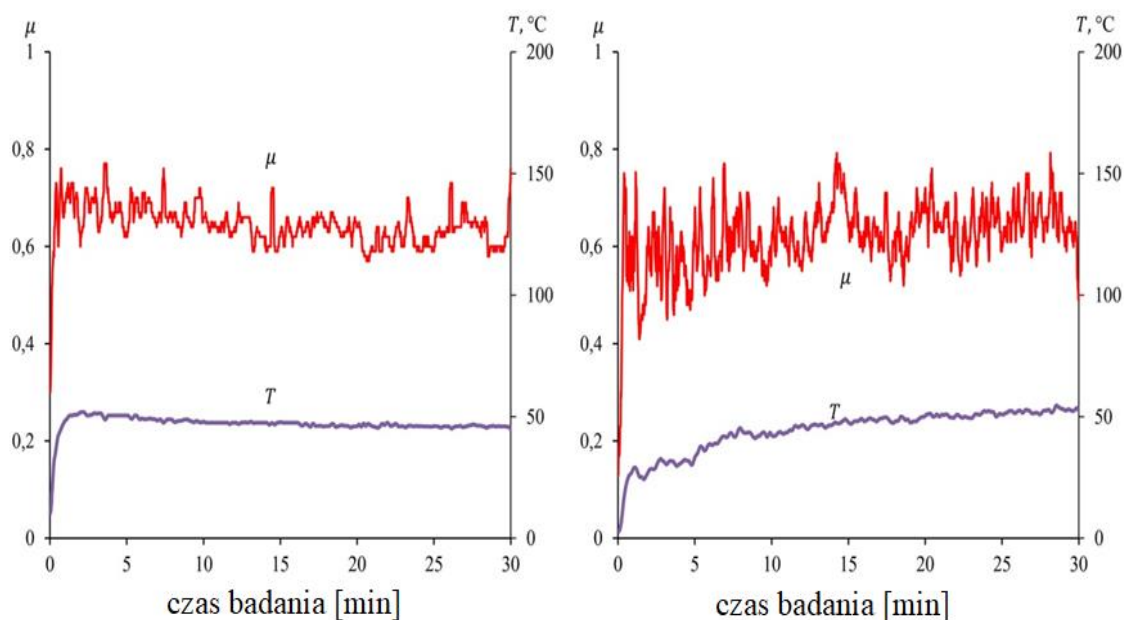
Przykładowe uzyskane wyniki badań Stellite 6 oraz tarczy (stal S235JR) zaprezentowano na rys. 11.1. a i b. Analiza wyników pozwala stwierdzić, że na trzpieniu oraz dysku zaobserwowano ślady zużycia powstałe na skutek zużycia ściernego.

Na rys. 11.2. a i b przedstawiono przykładowe przebiegi współczynnika tarcia i temperatury badanych materiałów. Porównując uzyskane wyniki badań własnych do danych literaturowych dotyczących badania zużycia przylgni zaworowych niezabezpieczonych warstwą powłokową [100-101] należy stwierdzić, że rejestrowane współczynniki tarcia i temperatury przylgni zaworowych są wyższe w drugim przypadku.



Rys. 11.1. Widok pary ciernej po teście: a) trzpień wykonany ze Stellitu 6, b) tarcza wykonana ze stali S235JR

Oznacza to, że zabezpieczenie przylgni warstwą powłokową wpływa korzystnie na zmniejszenie zużycia ściernego współpracujących elementów.

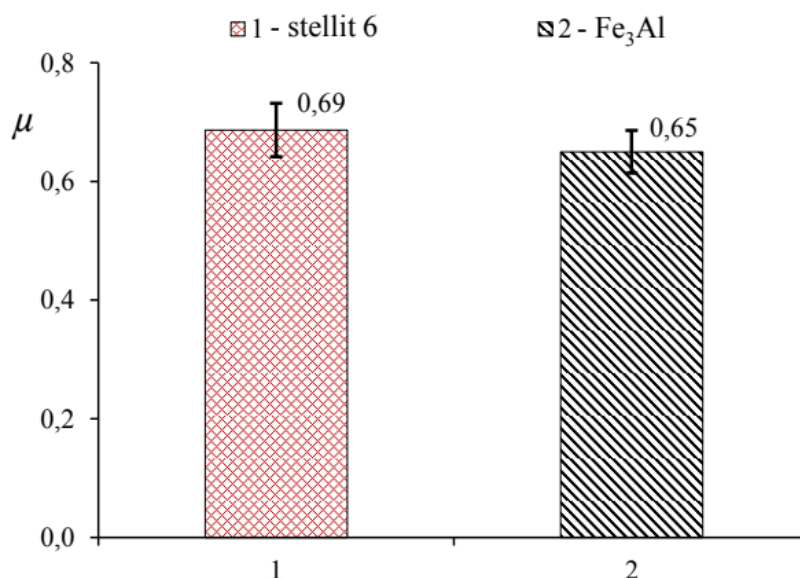


Rys. 11.2. Wykresy współczynnika tarcia i temperatury: a) Stellit 6 , b) intermetal Fe_3Al

Ponadto, analiza wykresów pozwala zaobserwować, że w przypadku pary ciernej Stellit 6 – stal S235JR temperatura szybko rośnie i osiąga swoją maksymalną wartość po około 2

minutach tarcia. W przypadku intermetal Fe_3Al temperatura rośnie łagodniej i swoją maksymalną wartość osiąga po 30 minutach tarcia. Na podstawie przeprowadzonych testów wyznaczono średnie wartości współczynnika tarcia oraz średnią temperaturę, jaka została wygenerowana w trakcie testu dla każdego z badanych materiałów. Stellite 6 charakteryzował się średnią wartością współczynnika tarcia wynoszącą 0,69, a intermetal Fe_3Al 0,64. Średnie wartości temperatury w styku wyniosły: Stellite 6 – 48 °C, intermetal Fe_3Al – 44,5 °C.

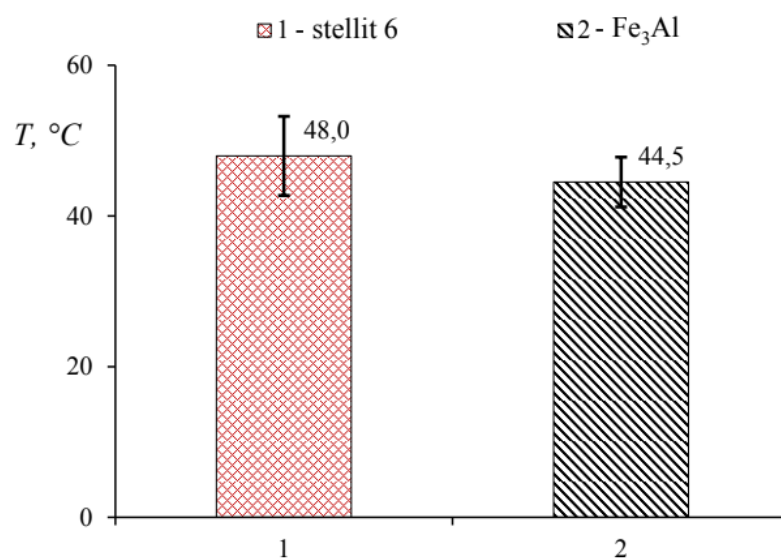
Średnie wartości współczynników tarcia badanych materiałów wyliczone na podstawie danych z trzech prób wraz z odchyleniem standardowym pokazano na rys. 11.3.



Rys. 11.3. Wykresy współczynnika tarcia: 1 – Stellite 6, 2 – Fe_3Al

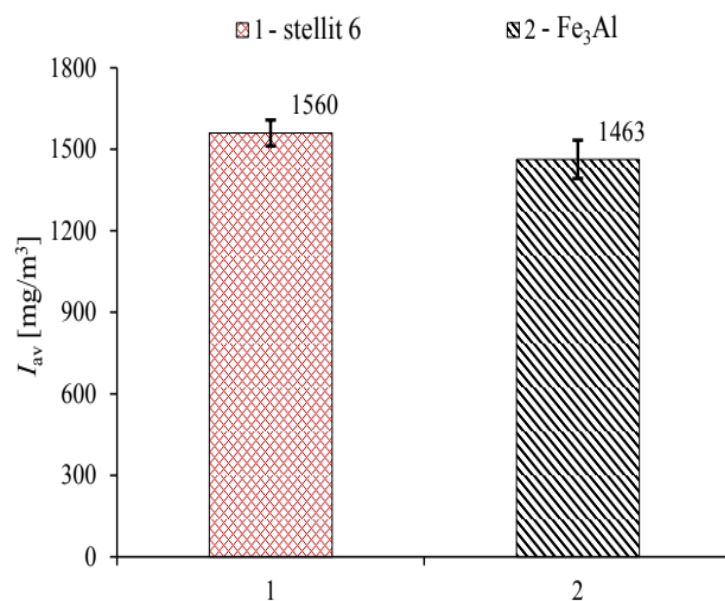
Średnie wartości temperatur badanych materiałów mierzone w trzpieniu w odległości około 2 mm od powierzchni styku przedstawiono na rys. 11.4.

Na podstawie ubytku masy trzpienia, drogi tarcia i powierzchni poprzecznej trzpienia wyznaczono średnie wartości intensywności zużycia badanych materiałów.



Rys. 11.4. Wykresy średnich temperatur: 1 – Stellite 6, 2 – Fe₃Al

Stellite 6 charakteryzował się średnią intensywnością zużycia równą 1560 mg/m³, a intermetal Fe₃Al 1463 mg/m³. Zestawienie uzyskanych wartości wraz z odchyleniem standardowym przedstawiono na rys. 11.5.



Rys. 11.5. Wykresy intensywności zużycia: 1 – Stellite 6, 2 – Fe₃Al

Analizując uzyskane wyniki można stwierdzić, że średnie wartości z trzech prób: współczynnik tarcia, temperatury i intensywności zużycia wskazują, iż intermetal Fe_3Al charakteryzuje się lepszymi właściwościami tribologicznymi od Stellitu 6. Pozostałe wyniki pomiarów dla kolejnych 10 próbek (załącznik 1) potwierdzają obserwacje.

Przeprowadzone badania pozwoliły na ocenę tribologiczną Stellitu 6 i intermetal Fe_3Al . Wszystkie rejestrowane parametry wykazały lepsze właściwości tribologiczne intermetal Fe_3Al . Analizując uzyskane wyniki możemy stwierdzić:

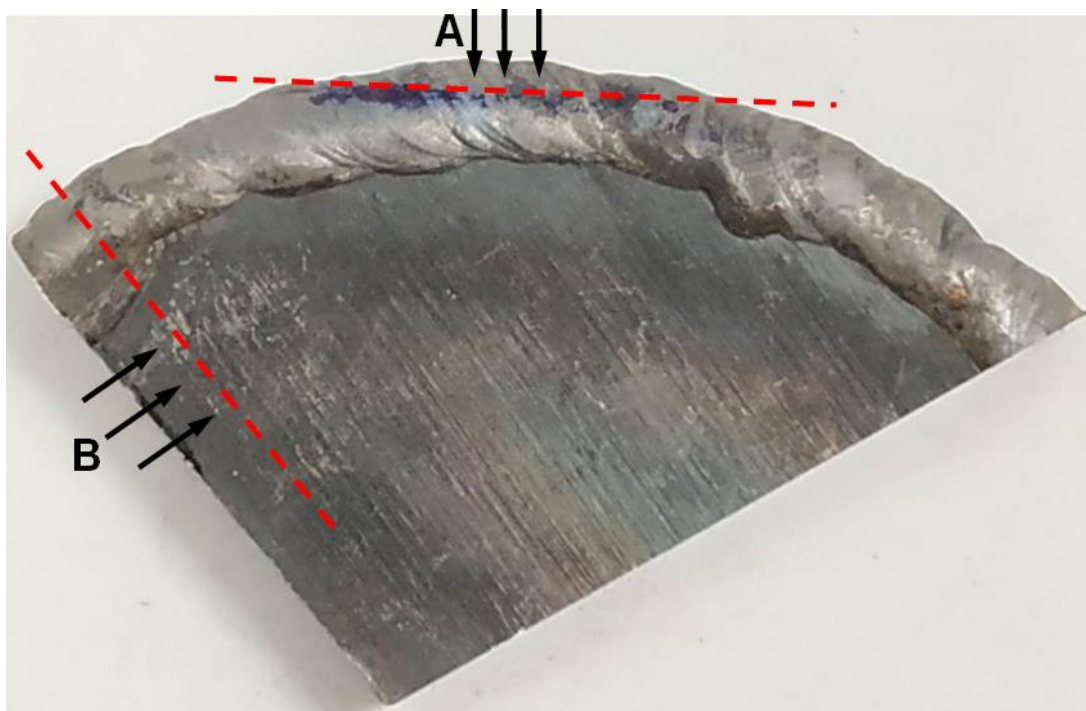
- intermetal Fe_3Al w zastosowanych warunkach badania charakteryzuje się niższym o około 7% współczynnikiem tarcia w porównaniu ze Stelitem 6,
- intermetal Fe_3Al w zastosowanych warunkach badania charakteryzuje się niższą o około 6% intensywnością zużycia w porównaniu ze Stelitem 6,
- temperatura generowana w styku ślizgowym w przypadku pary ciekiej Stellit 6 – stal S235JR osiąga swoją maksymalną wartość wynoszącą wartość po około 2 min i pozostaje na stałym poziomie w trakcie całego testu,
- temperatura generowana w styku ślizgowym w przypadku pary ciekiej intermetal Fe_3Al – stal S235JR rośnie w czasie trwania testu i osiąga swoją maksymalną wartość po 30 minutach (na koniec testu).

Reasumując, należy stwierdzić, że para cierna intermetal – stal wykazywała niższy współczynnik tarcia niż para cierna Stellit – stal. Zatem zastosowanie intermetal powinien być korzystniejsze dla współdziałania pary ciekiej: przylgnia zaworowa z powłoką intermetalową – gniazdo zaworu, w porównaniu do pary ciekiej: przylgnia zaworowa z powłoką Stellitową – gniazdo zaworu.

Można zatem wnioskować, że zastosowanie intermetallu na powierzchnię przylgni zaworowej wpłynie na zwiększenie trwałości jednostki napędowej w warunkach eksploatacji w środowisku erozyjnym. Świadczą także o tym korzystne wyniki testu, wskazujące na wolniejszy przyrost temperatury i niższe zużycie ściernie fazy Fe_3Al w porównaniu do Stellitu 6. Wniosek potwierdza w omawianym zakresie tezę.

11.2. Badania metalograficzne

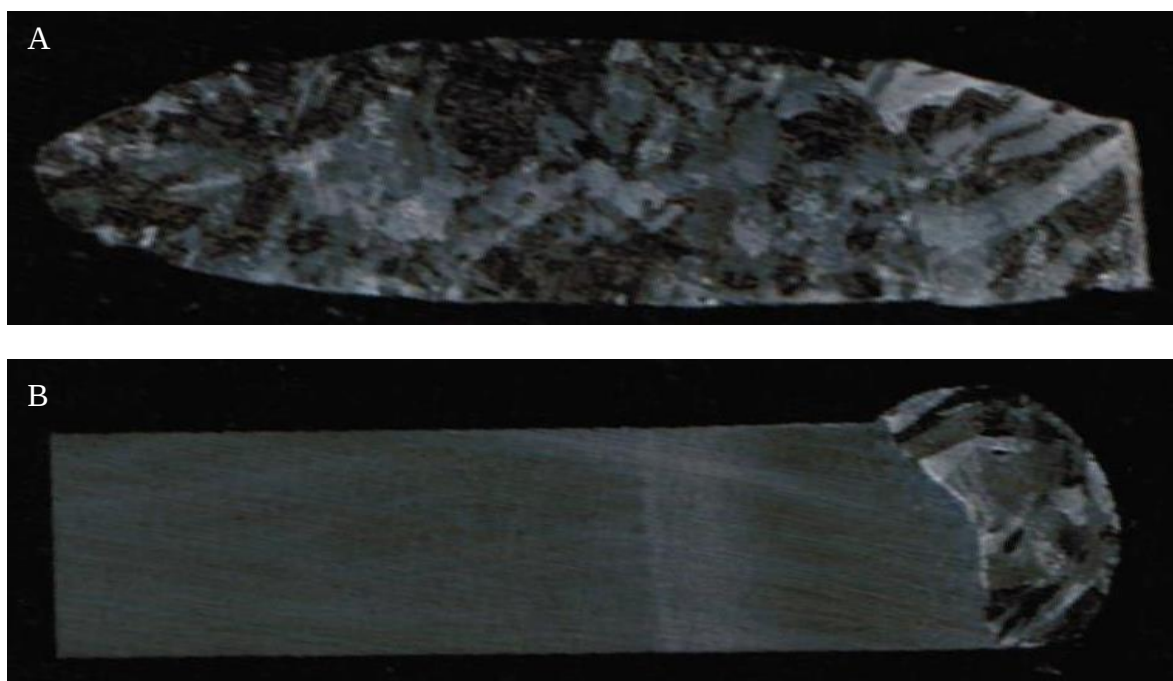
Przyłgnię zaworową ze stali zaworowej napawano procesem TIG spoiwem w kształcie włókna o wymiarach $h = 150$ [mm] i przekroju poprzecznym $1,4 \times 1,4$ [mm²]. Natężenie prądu spawania wynosiło 62 A, napięcie łuku 19 V. Gazem osłonowym był argon, natężenie przepływu gazu wynosiło 8 l/min. Na rys. 11.6. przedstawiono powierzchnię zaworu napawaną z użyciem spoiwa na osnowie fazy intermetalicznej Fe₃Al. Szerokość napoiny wynosiła 7 mm. Strzałkami zaznaczono płaszczyzny cięcia próbki do wykonania zgładów metalograficznych (zgład A i zgład B). Cięcie próbek wykonano z wykorzystaniem zastosowanej również do przygotowania spoiwa technologii cięcia strugą wodno – ścierną. Próbki dodatkowo były oszlifowane na gruboziarnistym papierze ściernym i wytrawione Nitałem.



Rys. 11.6. Sposób przygotowania zgładów metalograficznych napawanej przyłgni zaworowej

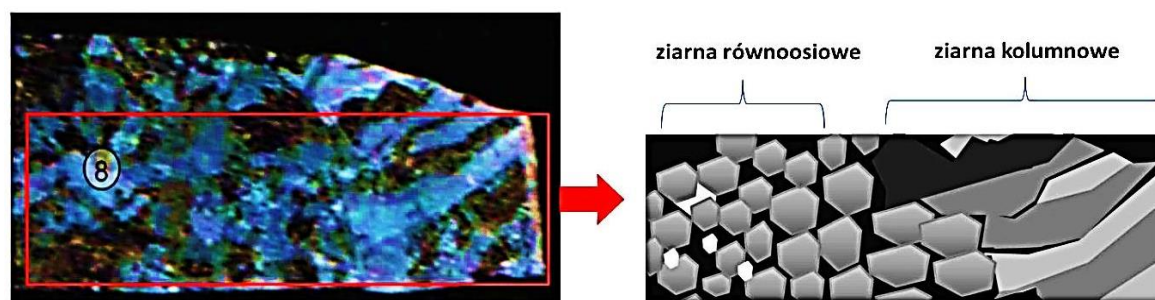
A) Wyniki badań makroskopowych

Analizę makroskopową wykonano okiem nieuzbrojonym przy powiększeniu od $3\times$ do $50\times$ i oświetleniu 500 lx. Wybrane wyniki przedstawiono na rys. 11.7. Analiza makroskopowa powierzchni zglądów pozwala stwierdzić, że napawanie zostało wykonane prawidłowo. Powierzchnia napoiny jest ciągła. Badanie powierzchni próbek nie wykazało zmian strukturalnych w postaci pęknięć, pęcherzy lub innych wad spawalniczych.



Rys. 11.7. Makrostruktury napawanego zaworu przy powiększeniu dziesięciokrotnym. Punkty 1 – 4 to materiał rodzimy, 5 – strefa wpływu ciepła, 6 – linia wtopienia, 7, 8 napina intermetaliczna, traw. Nital

Obserwacja makrozglądu A pozwoliła określić strukturę napoiny jako komórkową. W napoinie zidentyfikowano ziarna kolumnowe i równoosiowe. Schemat rozmieszczenia ziaren zaprezentowano na rysunku 11.8.



Rys. 11.8. Poglądowy schemat rozkładu ziaren w próbce A

Ziarna równoosiowe ułożone są wewnątrz napoiny. Struktura jest jednorodna w tym obszarze, wolna od pęknięć i porowatości. Kierunek ułożenia ziaren kolumnowych związany jest z kierunkiem odprowadzania ciepła z próbki. Analizowana struktura jest jednorodna w objętości, typowa dla faz z układu Fe – Al. Obserwuje się naprzemianległe obszary o różnym stopniu szarości. Zgodnie z danymi literaturowymi [97] jest to związane z mikrosegregacją pierwiastków i różnicami w zawartości procentowej aluminium w danym obszarze.

Analiza zglądu B pozwala określić strukturę przekroju zaworu napawanego intermetalem Fe_3Al oraz zaobserwować połączenie pomiędzy podłożem a warstwą napawaną. Również w tym obszarze nie zidentyfikowano pęknięć czy porowatości charakteryzujących warstwy natryskiwane. Można zatem wnioskować, że wytworzona warstwa napawana charakteryzuje się wysokim poziomem szczelności.

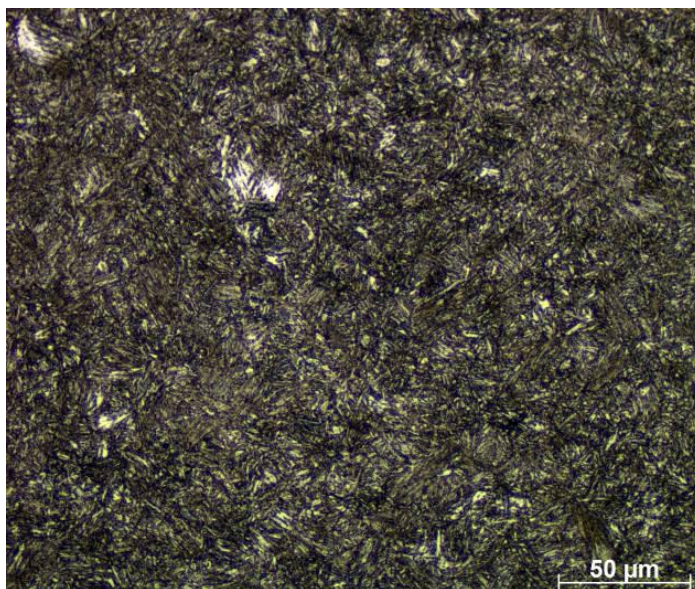
Ponadto, na rysunku 11.7. b. przedstawiającym makrostrukturę napawanego zaworu można zauważyć wyraźną linię wtopienia pomiędzy stalą zaworową, a stopiwem intermetalicznym.

B) Wyniki badań mikrostruktury (LM, SEM) **i składu chemicznego**

W celu określenia dokładnej struktury materiału wykonano badania mikroskopowe. W tym celu pobrane próbki polerowano na papierze ściernym o gradacji od 50 do 1000 i wytrawiono w Nitalu. Tak przygotowane zgłady obserwowano na mikroskopie świetlnym (LM) – Olympus.

Analiza mikrostruktury

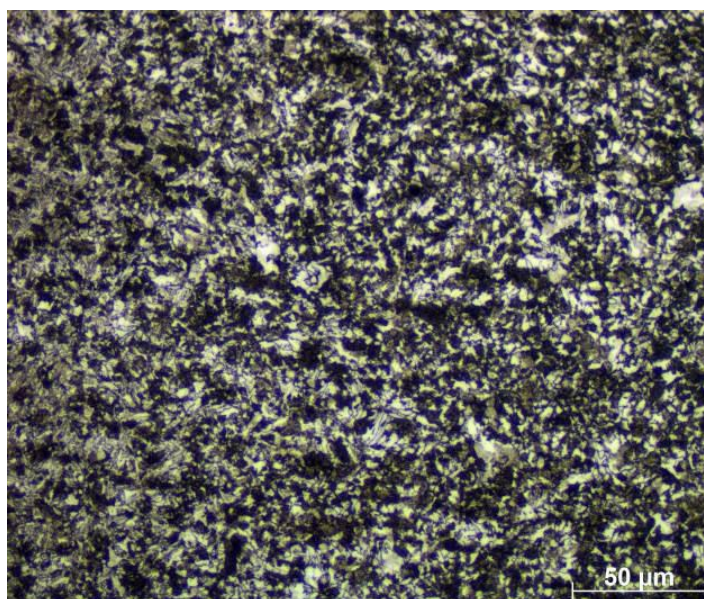
Analiza materiału rodzimego (punkty 1 – 4 na rys. 11.7.), pozwala stwierdzić, że stal zaworowa charakteryzuje się drobnoziarnistą strukturą martenzytyczną. Na rys. 11.9. przedstawiono przykładowe zdjęcie mikrostruktury materiału rodzimego zaworu wykonane w punkcie 4 z zglądu B z rys. 11.7.



Rys. 11.9. Materiał rodzimy (punkt 4 ze zdjęcia 7.2), odczynnik trawiący: Nital,

Dominująca struktura martenzytyczna jest jednorodna w całej objętości i typowa dla analizowanej stali zaworowej. Podobną strukturę zaobserwowano w strefie wpływu ciepła. Analiza wykonanej dokumentacji fotograficznej (rys. 11.10.) mikrostruktury

materiału rodzimego zaworu wykonana w punkcie 5 zglądu B pozwala stwierdzić, że martenzyt w tej strefie uległ częściowemu odpuszczeniu. Stąd dominująca struktura martenzytyczno – sorbityczna (obszary ciemnoszare – martenzyt i nieco jaśniejsze – sorbit, czyli martenzyt dodatkowo odpuszczony ciepłem procesu napawania). Na zglądzie widoczne są też rzadko występujące jasne obszary drobnoziarnistego ferrytu.

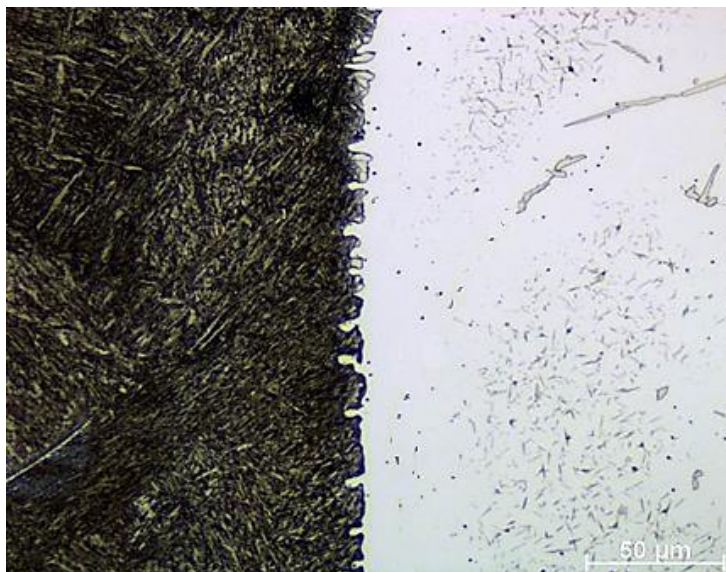


Rys. 11.10. Strefa wpływu ciepła (punkt 5), traw. Nital

Uzyskane wyniki badań pozwalają stwierdzić, że analizowany obszar charakteryzuje się jednorodnością objętościową. W strefie wpływu ciepła obserwuje się jedynie nieznaczny rozrost ziarna.

Na kolejnym etapie przeanalizowano obszar łączenia pomiędzy intermetaliczną powłoką napawaną a materiałem rodzimym. Na rys. 11.11. przedstawiono zdjęcie mikrostruktury z linii wtopienia wykonane w punkcie 6 zglądu B. Wynik wskazuje na wyraźnie ukształtowaną linię wtopienia. W wyniku obserwacji mikroskopowej nie stwierdzono oznak wymieszania się obu łączonych materiałów (materiał rodzimy – spoiwo). Analiza danych literaturowych w tym zakresie [71] pozwala stwierdzić,

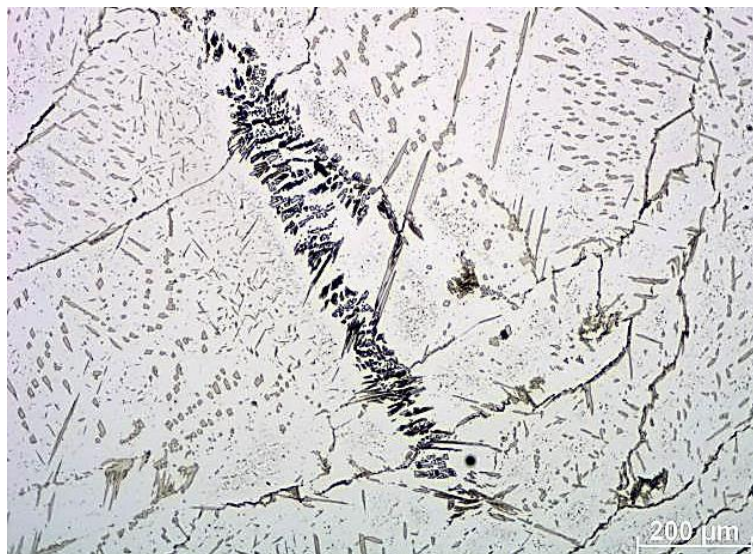
że podobny efekt strukturalny uzyskano podczas spawania zasadową stalową elektrodą otuloną EB 1.46 intermetal Fe₃Al, gdzie także uzyskano wyraźną linię wtopienia bez oznak wymieszania się obu materiałów (materiał rodzimy – spoiwo). W analizowanym przypadku literaturowym materiał rodzimy stanowił intermetal z kolei spoiwo było stalowe.



Rys. 11.11. Linia wtopienia (punkt 6), odczynnik traw. Nital

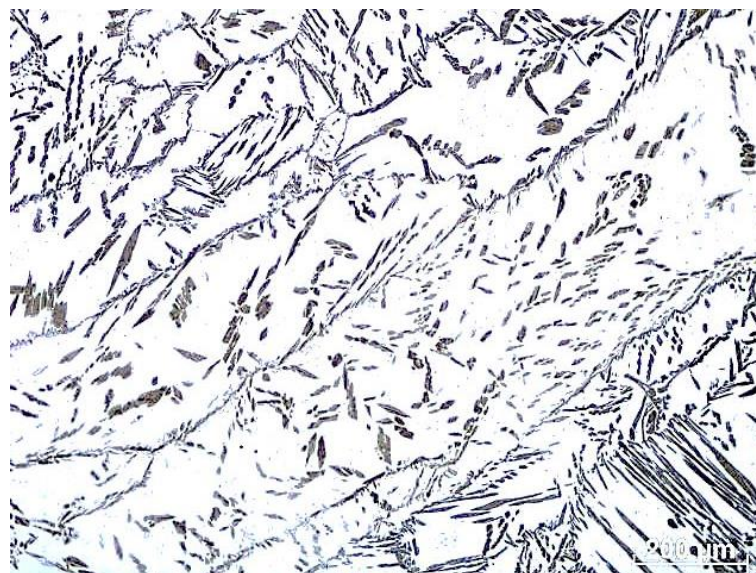
Dalsza analiza uzyskanego obrazu mikroskopowego (rys. 11.11) pozwala stwierdzić, że w wyniku napawania nastąpiło prawidłowe nadtopienie materiału rodzimego. Zaobserwowano obszary, gdzie częściowo nadtopiony materiał rodzimy wniknął w roztopiony materiał napawany. W kolejnym etapie badań przeanalizowano mikrostrukturę napoiny. Na rys. 11.12. przedstawiono wynik badań przeprowadzony w punkcie 7 zglądu B.

Analiza wskazuje, że struktura dominująca jest typowa i charakterystyczna dla fazy Fe₃Al o sieci krystalicznej DO₃ (obszary jasne). W obszarach ciemniejszych mogło dojść do segregacji pierwiastków. Przypuszcza się, że równomierne rozproszenie w objętości obszaru napoiny cząstek innych faz może wpłynąć pozytywnie na wyniki badań tribologicznych.



Rys. 11.12. Mikrostruktura intermetalicznej napoiny (punkt 7), odczynnik trawiący: Nital (LM)

Na rysunku 11.13. przedstawiono mikrostrukturę napoiny intermetalicznej wykonanej na próbce zastosowanej w badaniach tribologicznych.



Rys. 11.13. Mikrostruktura próbki intermetalicznej stosowanej w badaniach tribologicznych, odczynnik trawiący: Nital (LM)

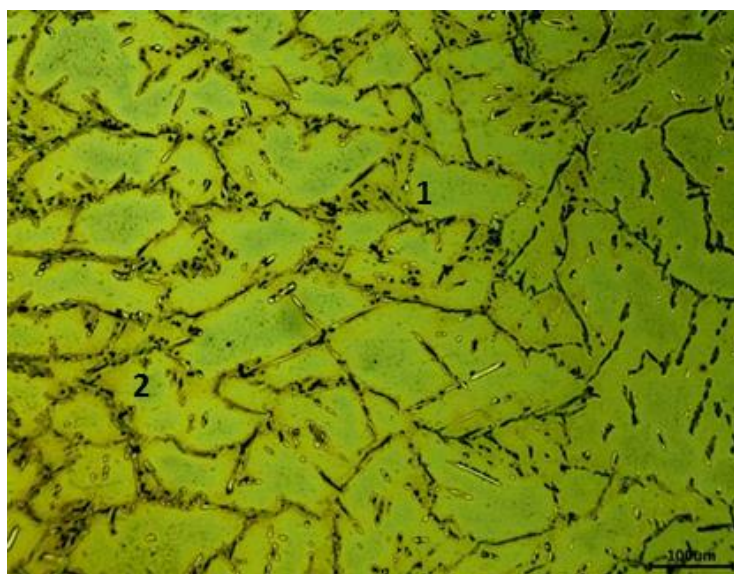
Analiza struktury próbki pozwala stwierdzić, że struktura ta jest niejednorodna w mikroobszarach i jednorodna w całej objętości. Obserwowana struktura jest analogiczna, do przedstawionej na rysunku 11.12. i typowa dla faz z układu Fe – Al.

Również w tej strukturze dominuje faza Fe_3Al .

Podobna struktura obu porównywanych próbek świadczy o:

- powtarzalności uzyskiwanych wyników,
- każdorazowym braku wymieszania materiałów podczas napawania (materiał rodzimy – spoiwo).

Brak wymieszania materiału napawanego (rodzimego) i napawanego intermetalalu prowadzi do wniosku, że materiał napoiny ma zbliżone właściwości do intermetalalu w stanie dostarczenia. W konsekwencji może świadczyć o podobnych właściwościach mechanicznych intermetalalu w stanie dostarczenia i napoiny intermetalicznej przylgni zaworowej. Potwierdza to sens i prawidłowość przeprowadzonych wcześniej badań tribologicznych. Dodatkowo postanowiono sprawdzić strukturę napoiny w punkcie 8 (ze zglądu A, rys. 11.7.).

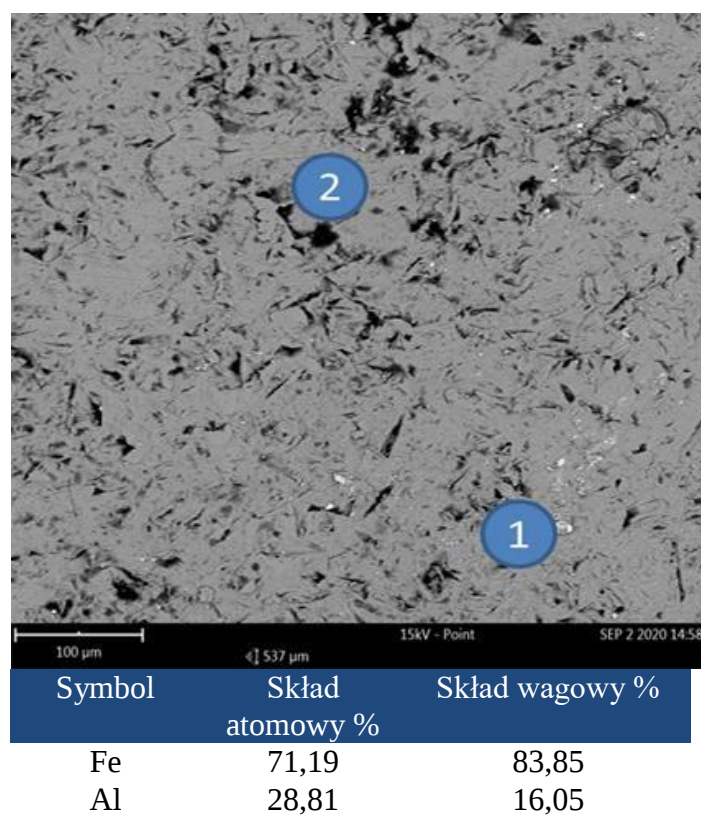


Rys. 11.14. Mikrostruktura napoiny w punkcie 8 (zgląd A), wytrawiona metodą barwną, wykorzystano odczynnik Beraha

W celu określenia struktury napoiny i stopnia segregacji pierwiastków stopowych w napoinie postanowiono zastosować trawienie zglądu metodą barwną. Wykorzystanym odczynnikiem trawiącym był odczynnik Beraha (rys.11.14.).

Na rysunku wyraźnie widać dominujący charakter jednofazowy intermetal Fe₃Al o sieci krystalicznej DO3. Brak zmiany zabarwienia w obrębie jednej fazy świadczy o braku segregacji pierwiastków wewnątrz ziaren tej fazy. Na granicy ziaren uwidaczniają się ciemniejsze obszary (rys. 11.15. – 11.16.).

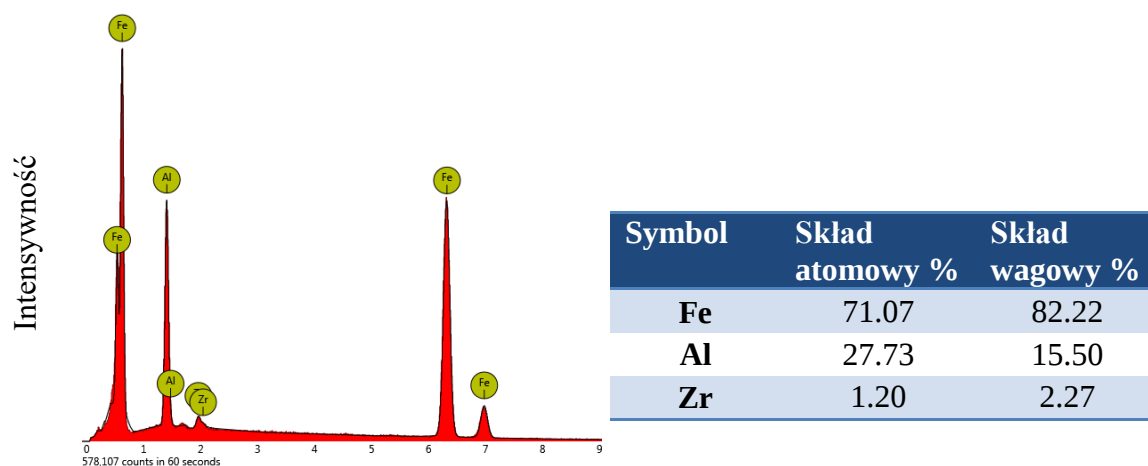
Analiza składu chemicznego pozwala stwierdzić, że dominującymi pierwiastkami w strukturze są Fe i Al (rys. 11.15.).



Rys. 11.15. Mikrostruktura napoiny (SEM) oraz skład chemiczny z punktu 1

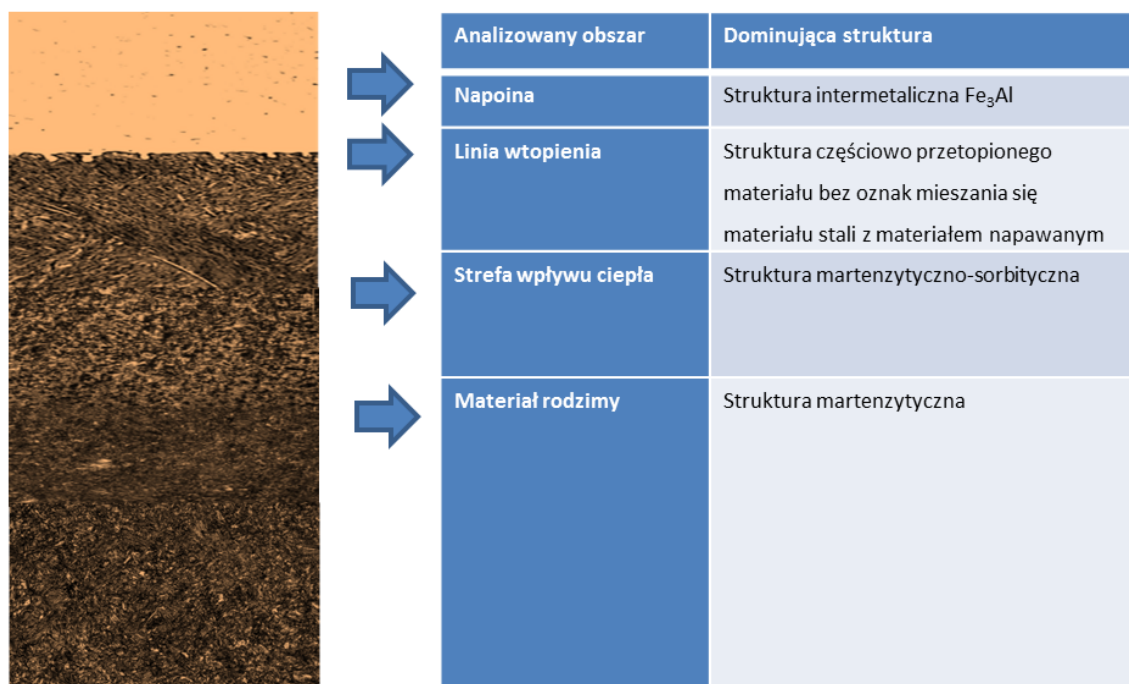
W obszarach ciemnych występuje segregacja pierwiastków, wynikająca z mikrodomieszkowania stopu cyrkonem (punkt 2 rys. 7.18. oraz 7.19.).

Lokalnemu wzrostowi zawartości tych pierwiastków towarzyszy spadek udziału aluminium. (rys. 7.19.). W strukturze nie stwierdzono wad spawalniczych.



Rys. 11.16. Wyniki mikroanalizy roentgenowskiej – skład chemiczny napoiny (zgląd A) punkt 2 z rysunku 11.7.

Na podstawie przeprowadzonych badań można przedstawić schematycznie budowę otrzymanego złącza napawanego (rys. 11.17.).



Rys. 11.17. Schematyczna budowa strukturalna analizowanego złącza napawanego

Reasumując, analiza badań pozwala jednoznacznie stwierdzić, że:

- wykonane złącze charakteryzowało się prawidłową strukturą, bez wad i niezgodności spawalniczych,
- wykonywanym badaniem nie stwierdzono karbów o charakterze geometrycznym, koncentrujących naprężenia, pęknięć czy porowatości charakterystycznych dla powłok stellitowych oraz natryskiwanych cieplnie,
- w obszarze połączenia (linia wtopienia) nie stwierdzono ubytków, rozwarstwień mogących świadczyć o nieprawidłowym związaniu materiałów,
- analiza mikrostruktury materiału (LM i SEM) oraz badania składu chemicznego wykazały występowanie fazy Fe_3Al domieszkowanej cyrkonem, jako jaśniejszych i ciemniejszych obszarów. Struktura jest jednakowa w całej objętości i charakterystyczna dla fazy Fe_3Al .

Można zatem wnioskować, że:

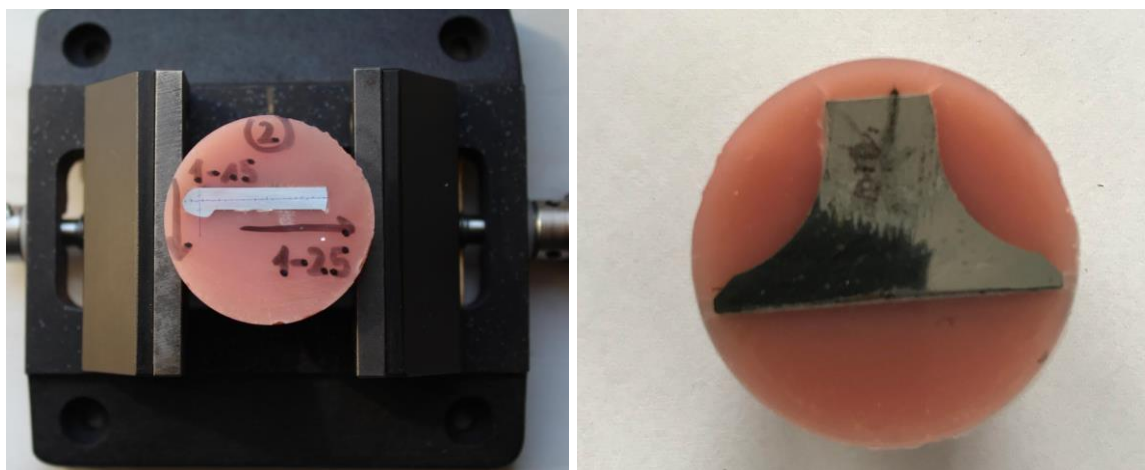
- opracowana technologia nadaje się do wytworzenia materiału powłokowego z intermetalów na powierzchnię skośną zaworów i zapewnia wytworzenie materiału o właściwej strukturze, typowej dla fazy Fe_3Al ,
- wytworzona warstwa powinna charakteryzować się zespołem korzystnych właściwości przypisywanych fazie intermetalicznej Fe_3Al , co potwierdzają wyniki badań strukturalnych. Badaniami, nie zarejestrowano wymieszania materiału rodzimego przylgni zaworowej oraz materiału napawanego, stwierdzono przy tym, że otrzymana struktura jest typowa dla fazy Fe_3Al ,
- prawidłowa budowa strukturalna warstwy napawanej, bez wad i niezgodności spawalniczych, powinna wpłynąć na jej trwałość eksploatacyjną.

Należy stwierdzić, że wnioski potwierdzają postawioną tezę.

Jednorodność objętościowa struktury, pozwala stwierdzić, że własności badanego materiału są jednakowe dla całej napoiny, a opracowana technologia w tym zakresie spełnia założenia (rozdział 8 pracy).

C) Badania mikrotwardości

Próbki zaworu napawanego przy użyciu spoiwa wykonanego z fazy międzymetalicznej Fe_3Al o wymiarach przekroju poprzecznego $1,4 \times 1,4 \text{ [mm}^2\text{]}$ oraz próbkę zaworu z przyłgnią zabezpieczoną Stelitem 6 poddano badaniom mikrotwardości, na twardościomierzu Zwick/Roell ZHV – 30S. Na rys. 11.18. przedstawiono przykładową przygotowaną do badań próbkę zaworu z napoiną fazy międzymetalicznej Fe_3Al oraz próbkę zaworu z przyłgnią zaworową zabezpieczoną Stelitem.



Rys. 11.18. a) próbka zaworu napawanego ze spoiwem Fe_3Al oraz b) próbka zaworu z przyłgnią zabezpieczoną Stelitem

Na próbkach wykonano pomiary twardości warstwy napawanej spoiwem Fe_3Al oraz warstwy stellitowej. Wszystkie pomiary wykonano zgodnie z normą PN – EN ISO 6507 –01:2018 – 05 [94] i z metodyką przedstawioną w rozdziale 10.2.

pracy. Pomiary w każdej serii (A – E) powtórzono zatem 5 razy. Wyniki pomiarów dla warstwy Stellitu przedstawiono w tablicy 10.

Tablica 10. Pomiary twardości dla warstwy Stellitu

Pomiary twardości HV _{0,2} – warstwy Stellitu zabezpieczającego przyłgnię zaworu					
Seria pomiaru: Nr pomiaru:	A	B	C	D	E
1.	415	438	430	421	422
2.	427	432	429	417	423
3.	423	420	430	420	424
4.	423	423	431	412	422
5.	425	425	427	423	422

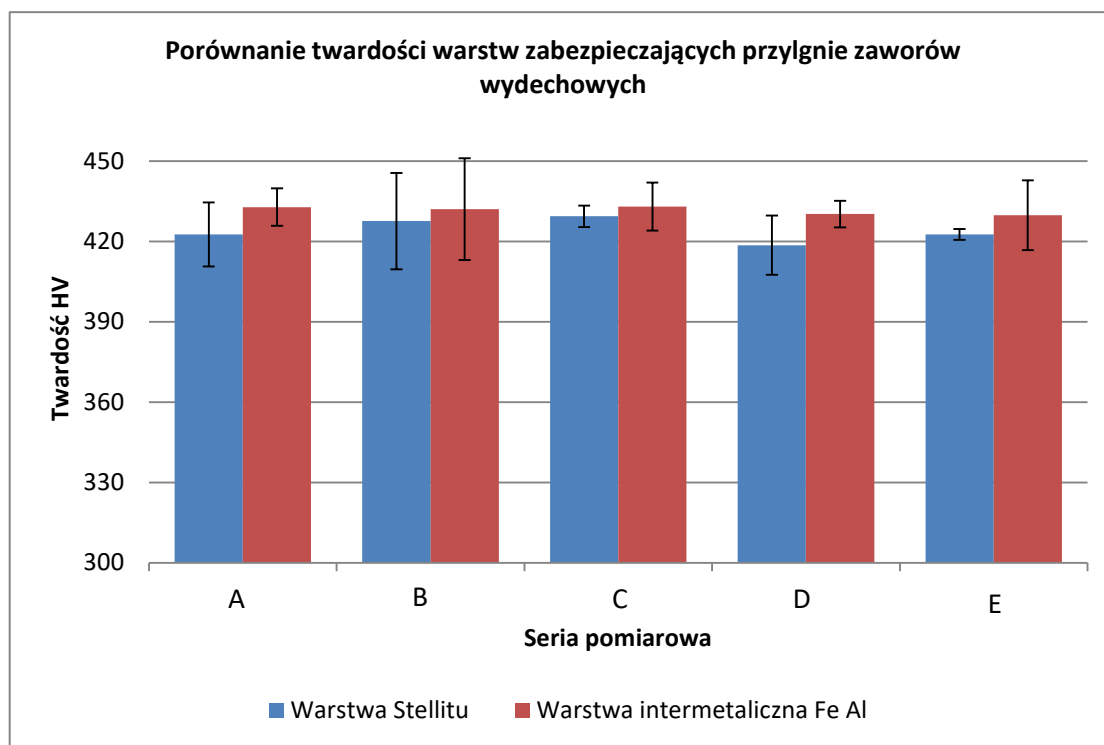
Analogicznie zestawiono wyniki pomiarów dla warstwy intermetalicznej przedstawiono w tablicy 11.

Tablica 11. Pomiary twardości dla warstwy intermetalicznej Fe₃Al

Pomiary twardości HV _{0,2} – warstwy napawanej z fazą międzymetalicznej Fe ₃ Al na przyłgni zaworu					
Seria pomiaru: Nr pomiaru:	A	B	C	D	E
1.	431	440	432	433	422
2.	430	437	438	428	433
3.	432	437	432	428	435
4.	434	425	434	433	429
5.	437	421	429	429	430

Na podstawie wyników pomiarów zaprezentowanych w obu tablicach można stwierdzić, że mniejszym rozrzutem zmierzonych wartości twardości HV charakteryzuje się warstwa intermetaliczna. W celu łatwiejszej interpretacji uzyskanych wyników wykonano wykresy porównawcze wartości średnich z każdej serii pomiaru (rys. 11.19.).

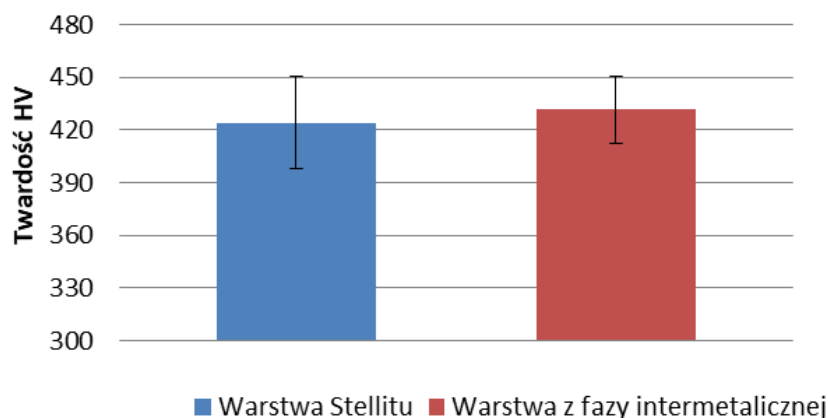
Można zauważyć, że zarejestrowane różnice twardości pomiędzy warstwą Stellitu i warstwą intermetaliczną są stosunkowo niewielkie i mieszczą się w granicy błędu pomiarowego.



Rys. 11.19. Porównanie twardości HV dla próbki z warstwą Fe_3Al i warstwą Stellitu 6

Można również zauważyć, że uzyskane wyniki są powtarzalne dla każdej serii wykonanych pomiarów. Wyliczono zatem średnią ze wszystkich pomiarów dla próbek napawanych z użyciem spoiwa z fazą intermetaliczną oraz analogiczne obliczenia wykonano dla próbek zabezpieczonych warstwą Stellitu. Stwierdzono, że nieco wyższą twardość wykazuje próbka z warstwą intermetaliczną. Potwierdzono także, że wszystkie wyniki mieszczą się w granicy błędu pomiarowego (rys. 11.20.).

Porównanie twardości średniej ze wszystkich pomiarów warstw zabezpieczających przyłgnie zaworów wydechowych



Rys. 11.20. Porównanie średniej twardości ze wszystkich pomiarów dla próbek zabezpieczonych warstwą Stellitu i warstwą intermetaliczną

Reasumując należy zauważyć, że:

- zmierzone wartości mikrotwardości wynosiły odpowiednio 421 – 440 HV dla fazy Fe_3Al oraz 412 – 438 HV dla napoiny wykonanej ze Stellitu, zatem mniejszym rozrzutem wyników pomiaru mikrotwardości charakteryzował się materiał z fazy Fe_3Al . Można zatem wnioskować, że napoina wykonana z fazy międzymetalicznej, będzie miała odpowiednie i porównywalne własności tribologiczne na całej długości napoiny. Wynik można powiązać z rezultatami badań strukturalnych (rozdział 11.2.B), gdzie uzyskane napawane powłoki wykazywały się jednorodnością w całej objętości,
- wszystkie analizowane powłoki charakteryzowały się porównywalną mikrotwardością na przekroju w każdej serii pomiarowej. Porównywalne wartości świadczą, że nie wystąpi zjawisko zwiększonego zużycia podczas współpracy pomiędzy elementami w parze ciernej przyłgnia

zaworowa napawaną spoiwem intermetalicznym, a gniazdem zaworowym. Zatem wykazana wyższa odporność na ścieranie powłok z fazą intermetaliczną (rozdział 11.1), przy porównywalnej twardości tych powłok z warstwami stellitowymi pozwala wnioskować, że powłoki z fazy intermetalicznej nadają się jako materiał zabezpieczający i zwiększający trwałość przylgni zaworowej.

11.3. Podsumowanie badań laboratoryjnych

Technologia wykorzystuje dostępne na rynku materiały i urządzenia, przez co jest relatywnie tania, nie wymaga specjalistycznego drogiego sprzętu. Technologię można zastosować do zabezpieczenia pojedynczych elementów. Opracowana i zastosowana koncepcja materiałowo – technologiczna umożliwia wytworzenie warstwy wolnej od wad i niezgodności spawalniczych.

Reasumując, uzyskane wyniki badań laboratoryjnych i ich analiza pozwoliły stwierdzić, że opracowana technologia pozwala na uzyskanie jednorodnych w objętości warstw zabezpieczających na małych stożkowych powierzchniach przylgni zaworowych. Ponadto opracowana metoda nanoszenia warstwy wierzchniej intermetalicznej przy użyciu nowoopracowanej geometrii spoiwa jest w pełni powtarzalna i umożliwia wykonanie prawidłowych napoin, wolnych od wad i niezgodności spawalniczych.

Wyniki badań zaprezentowanych w rozdziale 11 pozwoliły potwierdzić, że zastosowanie odpowiednich parametrów napawania umożliwia uzyskanie powłok o wysokiej odporności na ścieranie. Napoiny charakteryzują się założoną odpornością na zużycie ścierne w warunkach pracy przylgni zaworowych. Ponadto powłoki zabezpieczające z fazy Fe_3Al wykazują wyższą odporność na zużycie ścierne niż dotychczasowo stosowane warstwy Stellitu oraz porównywalną do nich twardość, co powinno zapewnić

prawidłowe działanie w parze ciernej przyłgna zaworowa – gniazdo zaworowe. Zatem można stwierdzić, że wszystkie założenia postawione w pracy zostały spełnione.

Pozytywne wyniki prac wstępnych i zasadniczych, obejmujące zarówno badania z zakresu makro i mikrostruktury (LM, SEM), badania RT oraz mikroanalizy RT w połączeniu z wynikami badań tribologicznych stanowiły podstawę do opracowania i złożenia wniosku patentowego pt.

„Sposób podwyższenia odporności ściernej elementów konstrukcyjnych”
o nr P.434745 [WIPO ST/10C PL434745].

Aby dodatkowo uzyskać walidację i wdrożenie technologii, należało:

- przeprowadzić badania eksploatacyjne przyłgni zaworowych (testy laboratoryjne na hamowni silnikowej), co zaprezentowano w rozdziale 12 rozprawy;
- oraz wystąpić z wnioskiem do jednostki notyfikującej o uznanie technologii spawania WPQR Welding Procedure Qualification Record zgodne z wymaganiami normy EN-ISO 15613 (rozdział 12.3. pracy).

12. Badania walidacyjne

Badania walidacyjne miały na celu określenie:

- czy opracowane rozwiązanie nadaje się do instalacji i użytku w jednostce napędowej ZS dostosowanej do zasilania gazem ziemnym?
- czy zastosowanie opracowanego rozwiązania wpływa na wolniejsze (w stosunku do rozwiązania komercyjnego) rozregulowywanie się układu przyłgania zaworowa – gniazdo zaworu i będzie wymagało przez to mniejszej liczby regulacji?

W celu walidacji przeprowadzono badania laboratoryjne testowe, podczas których do jednostki napędowej zainstalowano zawory z przyłgami pokrytymi powłoką intermetaliczną (nowo-opracowane rozwiązanie) oraz zawory komercyjnie dostępne zabezpieczone warstwą Stellitu 6. Materiał do badań został zaprezentowany w rozdziale 12.1. pracy. Jednostkę napędową zainstalowano na hamowni silnikowej. Opis stanowiska, jednostki i metodyka badawcza zostały przedstawione w rozdziałach 12.2. –12.3. rozprawy.

12.1. Materiał do badań

W celu przeprowadzenia badań walidacyjnych przygotowano w warunkach pracy warsztatu samochodowego 6 przyłgni zaworowych, w tym 3 szt. napawane fazą międzymetaliczną Fe_3Al , zgodnie z procedurą przedstawioną poniżej i przy parametrach procesu przedstawionych w rozdziale 9.2. pracy oraz 3 sztuki zaworów dostępnych komercyjnie, zabezpieczonych warstwą Stellitu 6.

A) Przygotowanie przyłgni napawanych warstwą intermetaliczną

Przed przystąpieniem do badań walidacyjnych dostosowano opracowaną technologię laboratoryjną wytwarzania warstwy zabezpieczającej do warunków produkcyjnych.

Przebieg technologii wytwarzania zamieszczono schematycznie na rys. 12.1.



Rys. 12.1. Etapy przygotowania do przeprowadzenia badań eksploatacyjnych

Zgodnie ze schematem (rys. 12.1.) przygotowano spoiwo o wymiarach przekroju $1,4 \times 1,4 \text{ mm}^2$. Powierzchnie przyłgni zaworów oczyszczono chemicznie z wykorzystaniem acetonu. Napawanie odbywało się analogicznie jak wykonanie próbek do badań laboratoryjnych, przy tych samych parametrach prądowo-napięciowych i prędkości napawania, zgodnie z metodyką przyjętą w rozdziale 9.2. Zanim, tak zabezpieczone, przyłgni zastosowano w jednostce napędowej, poddano je obróbce skrawaniu w celu nadania im geometrii zgodnej z rys. 12.5. Poszczególne etapy obróbki zaworów stanowiły dodatkowe fazy przygotowania przyłgni zaworowej do

eksploatacji w warunkach rzeczywistych jej pracy. Etapy poszczególnych operacji technologicznych przedstawiono na rysunkach (rys. 12.2. – 12.3.).



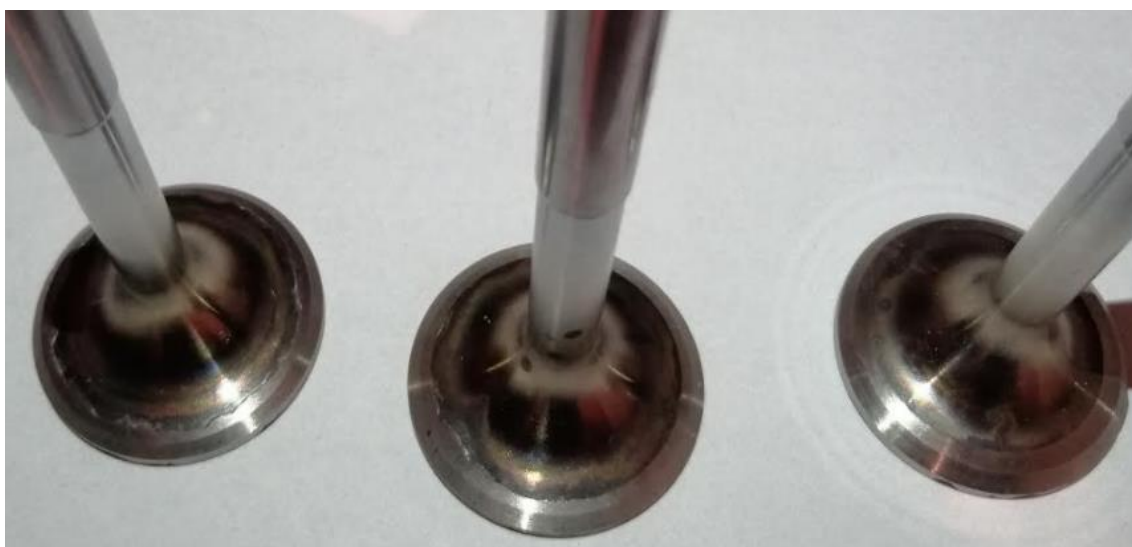
Rys. 12.2. Obróbka toczna talerzyka zaworu

Na proces obróbki przylgni zaworu składała się obróbka toczna (rys. 12.2.) polegająca na kształtowaniu powierzchni czołowej oraz na nadaniu nominalnej średnicy talerzyka z nadatkiem na obróbkę ścierną na późniejszym etapie. Wrzeczono tokarki z trójszczekowym uchwytem samocentrującym, w którym zamontowany był zawór, w trakcie obróbki obracało się z prędkością 512 obr./min. Po zakończonym procesie obróbki tocznej, talerzyk zaworu wraz z przylgnią zaworu poddano obróbce ścierniej na ściernicy, nadając w ten sposób ostateczną geometrię przylgni. Prędkość obrotowa tarczy ścierniej wynosiła 8 000 obr./min. Na rys. 12.3. przedstawiono obróbkę ścierną talerzyka zaworu.

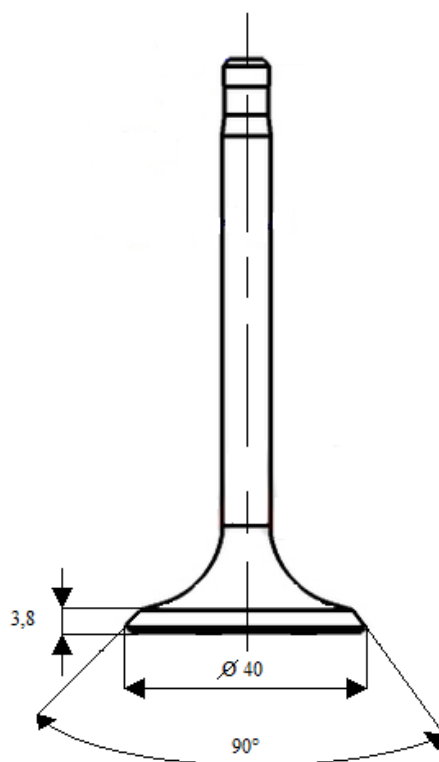


Rys. 12.3. Obróbka ścierna talerzyka zaworu

Po wykonaniu obróbki dokonano oceny wizualnej (rys. 12.4.) przygotowanych przyłgni do zamontowania w jednostce napędowej.



Rys. 12.4. Napawane fazą międzymetaliczną zawory w kolejnych etapach do obróbki przygotowującej do montażu w badanej jednostce napędowej



Rys. 12.5. Wymiary przygotowanego zaworu

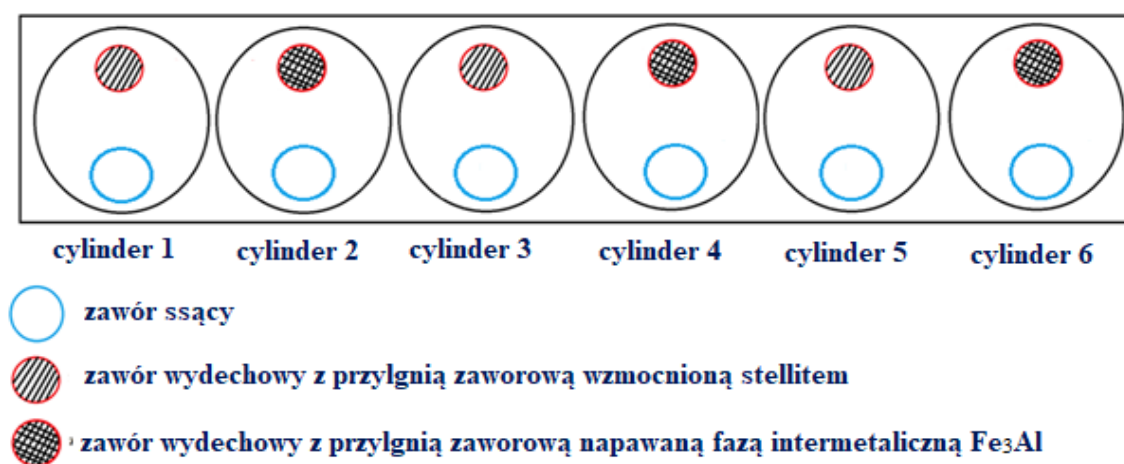
B) Instalacja zaworów z przyłgniemi w jednostce

Badania polegały na zamontowaniu w głowicy silnika ZS przystosowanego do zasilania gazem ziemnym zaworów współpracujących z zabezpieczonymi odpowiednio przyłgniemi zaworowymi. W celu adaptacji przystosowującej powyższy silnik do zasilania gazem ziemnym wykonano następujące modyfikacje:

- montaż przepustnicy,
- montaż czujnika spalania stukowego,
- montaż wtryskiwaczy CNG,
- implementacja jednostki sterującej przystosowującej silnik do zasilania gazem ziemnym.

Do tak przygotowanej jednostki napędowej zamontowano zawory w głowicy (rys. 12.6.) i przystąpiono do laboratoryjnych badań testowych.

Badania walidacyjne (przeprowadzane w ramach laboratoryjnych badań testowych) zostały przeprowadzone w zasilanej olejem napędowym ziemnym 6-cylindrowej jednostce napędowej Hino H series 165 HP B53 No: UFH408218, która została przystosowana do zasilania gazem ziemnym w systemie dwupaliwowym. Opis jednostki i stanowiska badawczego przedstawiono w podrozdziale 12.1. pracy.



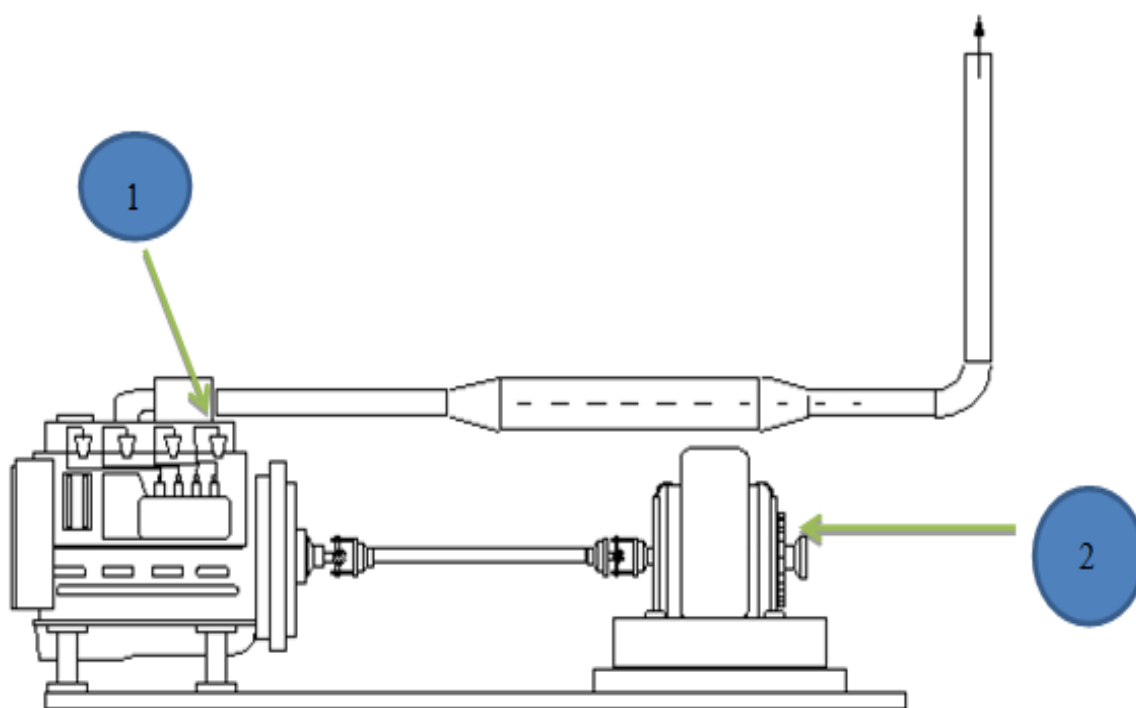
Rys. 12.6. Schemat montażu zaworów w głowicy testowanego silnika spalinowego

Zgodnie z danymi literaturowymi [100-101] środowisko pracy zaworów każdej jednostki napędowej jest nieco inne, w związku z tym uznano, że najbardziej obiektywne wyniki uzyska się montując zawory w tej samej jednostce napędowej, stosując naprzemianległe ułożenie przylgni, co przedstawiono schematycznie na rys. 12.6.

Przygotowana jednostka napędowa została poddana laboratoryjnym badaniom testowym na hamowni silnikowej.

12.1. Stanowisko badawcze i metodyka badań na hamowni silnikowej

Hamownia silnikowa jest narzędziem do wyznaczania charakterystyk prędkościowych jednostki napędowej. Składa się ona z silnika umieszczonego na stanowisku laboratoryjnym, wyposażonego w hamulec oraz urządzenia sterującego pracą silnika i dokonującego pomiaru parametrów jego pracy. Hamulec wytwarza określony moment obrotowy, stanowiący obciążenie dla wału korbowego jednostki napędowej. Badania własne zostały przeprowadzone na hamowni silnikowej. Schemat stanowiska laboratoryjnego, wykorzystanego do symulowania przebytego dystansu przedstawiono na rys. 12.7.



Rys. 12.7. Schemat stanowiska badawczego (1 – jednostka napędowa, 2 – hamulec elektrowirowy) [102]

Na stanowisku badawczym laboratoryjnym można mierzyć m.in. zależności między prędkością obrotową wału korbowego, momentem obrotowym, mocą silnika spalinowego a zużyciem paliwa oraz dokonać pomiaru dodatkowych parametrów, takich

jak np.: temperatura pracy silnika, stężenia składników spalin, zadymienie spalin (w wypadku silników o zapłonie samoczynnym) itd.

Omawiane stanowisko badawcze zostało wykorzystane w procesie walidacji przylgni zaworowych. Wyniki badań stanowiły obiektywny dowód na to, że przylgni zaworowa zabezpieczona (zgodnie z koncepcją materiałowo-technologiczną prezentowaną w pracy) powłoką intermetaliczną, nadaje się do zastosowania w warunkach eksploatacyjnych badanej jednostki napędowej.

Sposób wyznaczania mocy maksymalnej (charakterystyki zewnętrznej) na stanowisku badawczym został przeprowadzony zgodnie z Polską Normą PN-88/S-02005 Silniki samochodowe.

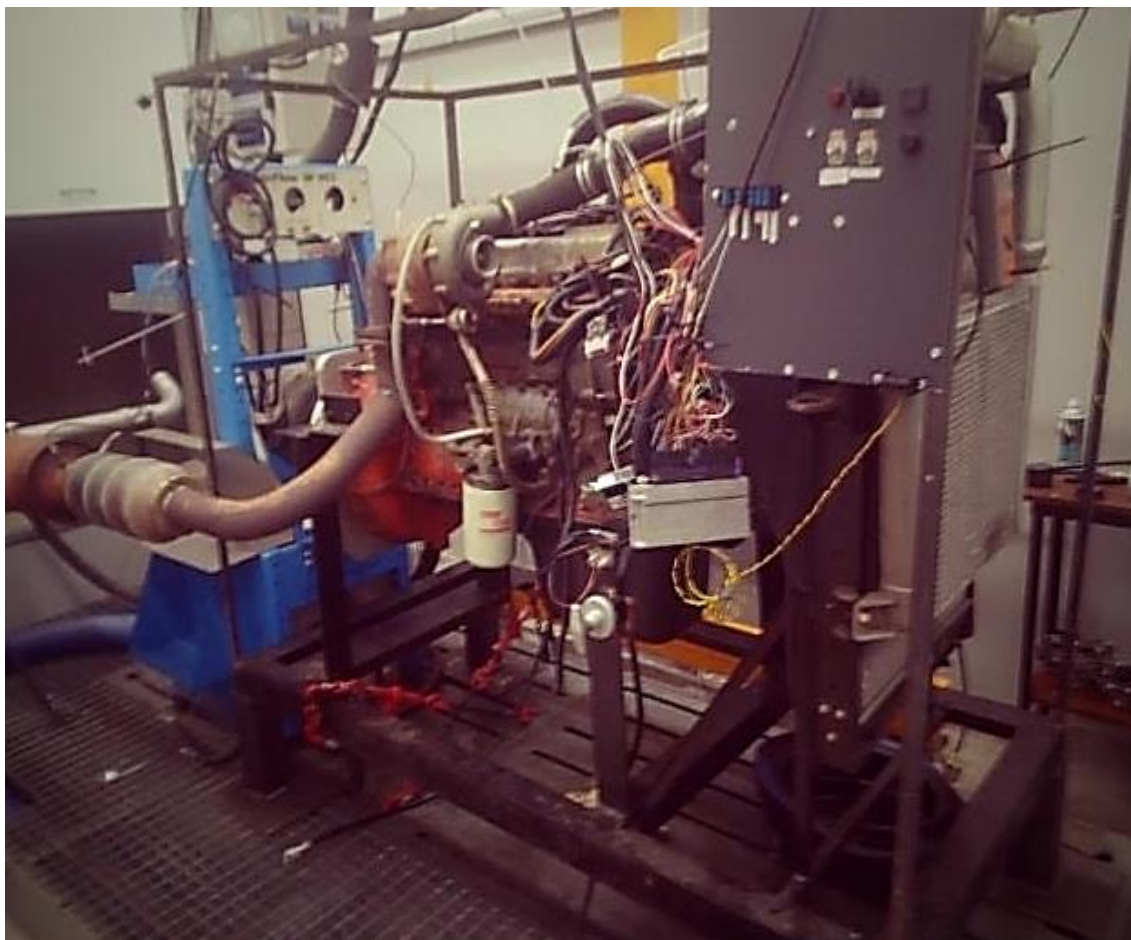
W skład stanowiska badawczego wchodziły następujące elementy:

- 6-cylindrowy silnik o zapłonie samoczynnym Hino H series 165 HP B53 No: UFH408218, który został przystosowany do zasilania gazem ziemnym, pracujący w systemie dwupaliwowym,
- hamulec elektrowirowy (EMX-200/6000) chłodzony wodą.

Badana jednostka napędowa została określona przez producenta następującymi parametrami (*dane techniczne badanej jednostki napędowej określone przez producenta*):

- układ cylindrów – rzędowy,
- liczba cylindrów – 6,
- pojemność skokowa silnika – $6,890 \text{ cm}^3$,
- moc maksymalna – 133,2 kW (180 KM) przy prędkości obrotowej 2800 obr./min,
- maksymalny moment obrotowy – 670 Nm przy prędkości obrotowej 1600 obr./min,
- zasilanie ON – bezpośredni wtrysk,
- rodzaj rozrządu – OHV.

Badana jednostka napędowa w hamowni silnikowej została przedstawiona na rys. 12.8.



Rys. 12.8. Widok hamowni silnikowej z zamontowaną badaną jednostką napędową

Hamulec elektrowirowy Automex EMX-200/6000 chłodzony wodą charakteryzuje się następującymi parametrami:

- maksymalna przenoszona moc – 200 kW,
- maksymalna prędkość obrotowa – 8000 obr./min,
- maksymalny moment obrotowy – 700 Nm.

Gaz ziemny był wtryskiwany do powietrza wlotowego, aby zapewnić większą homogeniczność mieszanki paliwowo-powietrznej. Kontrola stosunku gazu ziemnego do powietrza w mieszance była regulowana za pomocą przepustnicy, sterowanej elektronicznie za pomocą układu ECM. Przepustnicę (regulator mieszanki

paliwo gazowe-powietrze) zamontowaną na badanej jednostce napędowej przedstawiono na rys. 12.9.



Rys. 12.9. Widok przepustnicy zamontowanej w badanej jednostce napędowej

Metodyka badań

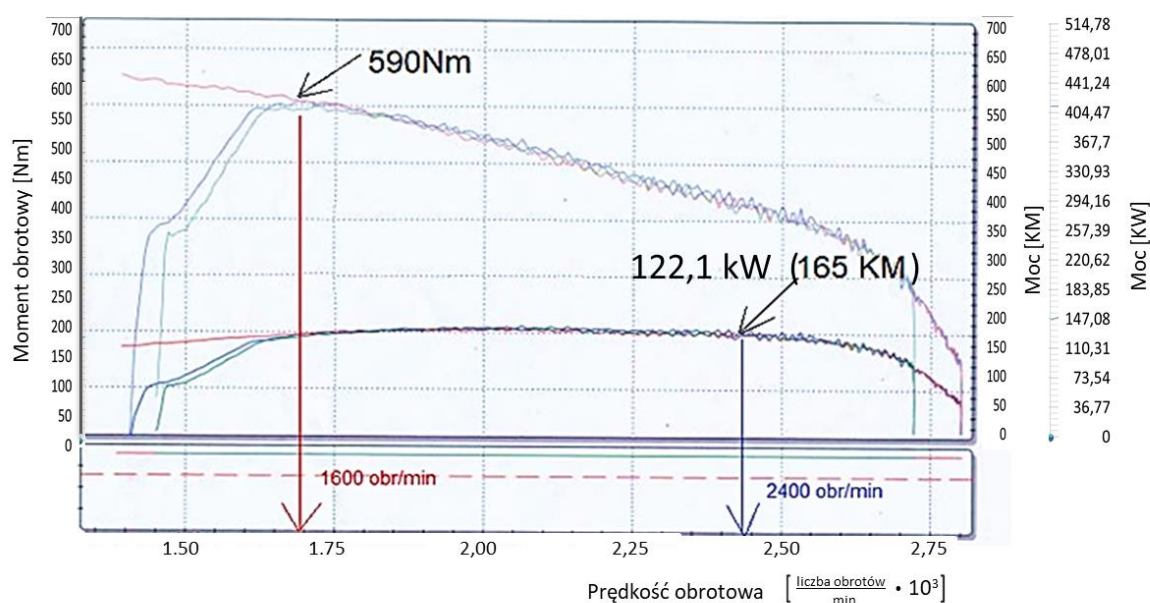
W trakcie badań eksploatacyjnych hamulcem elektrowirowym symulowano moc silnika badanej jednostki oddające rzeczywiste warunki pracy jednostki napędowej. Obciążenia symulowano na podstawie danych zebranych z jednostki testowej poruszającej się po drogach publicznych. Dane były zbierane za pomocą urządzeń pomiarowych m.in. przez diagnostyczny system pokładowy – OBD II (On Board Diagnostic) [102].

Przyjęta metodyka badawcza jest zgodna z metodyką prezentowaną w pracach J. Merkisa [102-103] oraz w pracach doktorskich realizowanych na Politechnice

Warszawskiej [104-105]. W opracowaniu [105] stwierdzono istotną zgodność pomiędzy badaniami drogowymi i syntetycznymi badaniami laboratoryjnymi.

Podczas badań laboratoryjnych wykorzystano podstawowe sposoby odwzorowania warunków drogowych, poprzez symulowanie rzeczywistego przebiegu chwilowych parametrów pracy: prędkości obrotowej wału korbowego silnika oraz momentu obrotowego silnika [102]. Pozycję wału korbowego monitorowano w sposób ciągły. Takie rozwiązanie umożliwiło stosunkowo dokładne odtworzenie warunków drogowych. Analiza literatury pozwala wnioskować, że przyjęta metodyka badań walidacyjnych jest właściwa.

W związku z tym, że badana jednostka napędowa była już eksploatowana i następnie dostosowywana do zasilania gazem ziemnym, podczas badań laboratoryjnych wyznaczono jej charakterystykę, która może odbiegać od deklarowanych wartości podanych przez producenta. Charakterystykę pełnej mocy silnika przedstawiono na rys. 12.10.



Rys. 12.10. Charakterystyka pełnej mocy badanego silnika

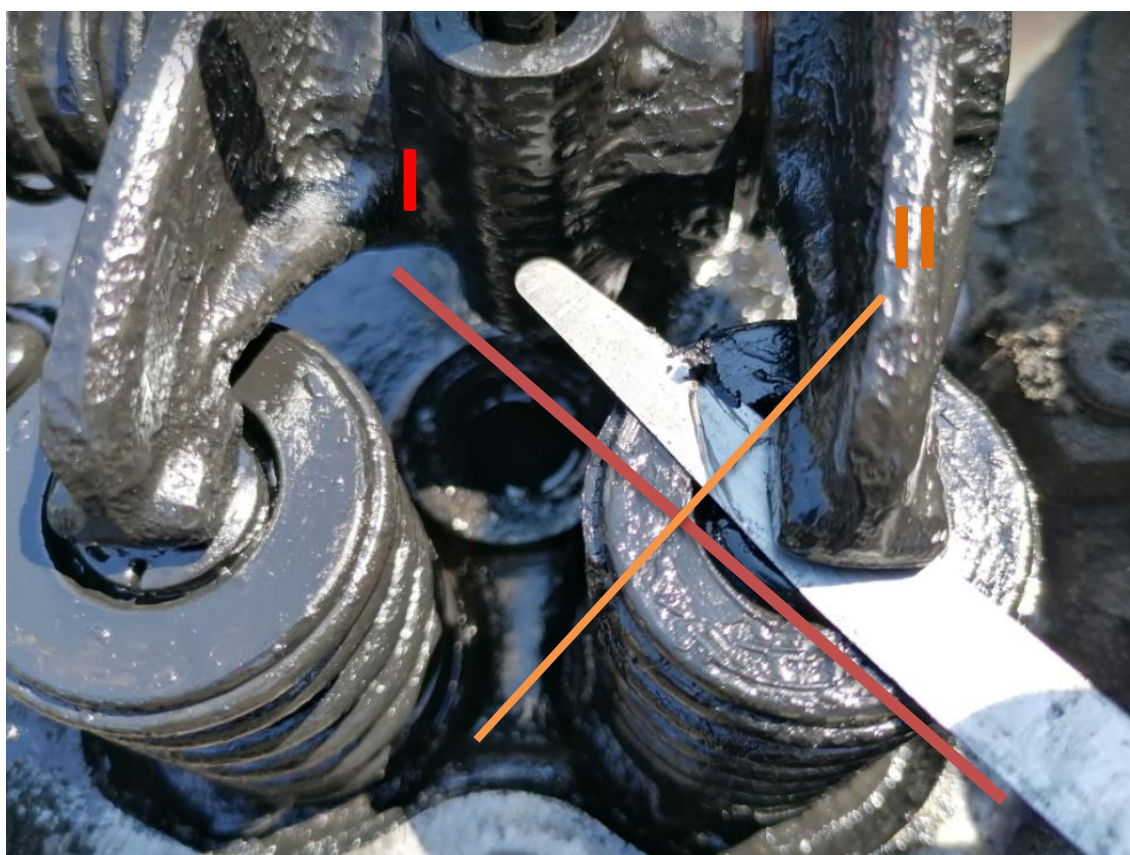
Można zauważyć, że wraz ze wzrostem prędkości obrotowej silnika wzrasta moc silnika. Maksymalną moc 122,1 kW (165 KM) uzyskano przy prędkości obrotowej jednostki napędowej wynoszącej 2400 obr./min (na osi x wartość $2,4 \times 10^3$). Z charakterystyki wynika, że maksymalny moment obrotowy wynosił 590 Nm przy 1600 obr./min silnika.

Zebrane z jednostki testowej dane posłużyły do implementacji w oprogramowaniu ACx, i określeniu przybliżonego dystansu, zakładanego do pokonania przez jednostkę w badaniach laboratoryjnych testowych. Oprogramowanie ACx wykorzystuje metodę syntezy testów jezdnych polegającą na odwzorowaniu przez program testu laboratoryjnego w zakresie odczytywanych prędkości obrotowych wału korbowego, rzeczywistych odcinków jazdy. Program umożliwia realizację testów w pętli zamkniętej i losowe dobieranie wybranych odcinków jazdy. Dodatkowe zmienne wykorzystane do określenia przybliżonego pokonanego dystansu jak i sam algorytm podlega ochronie własności intelektualnej. Takie postępowanie symuluje losowy charakter warunków istniejących w ruchu rzeczywistym.

Po zasymulowaniu dystansu ok. 10 tys. km dokonano wymianę płynów eksploatacyjnych oraz filtrów, przeprowadzono kalibrację i korektę instalacji CNG, a także wykonano pomiar i regulację luzu zaworowego. Ogólny schemat badań eksploatacyjnych przedstawiono w rozdziale 10.2. podpunkt D. Zgodnie ze schematem podczas badań eksploatacyjnych dokonywano pomiaru luzu zaworowego. Należy podkreślić, że częstotliwość pomiarów jest zgodna z zaleceniami producenta.

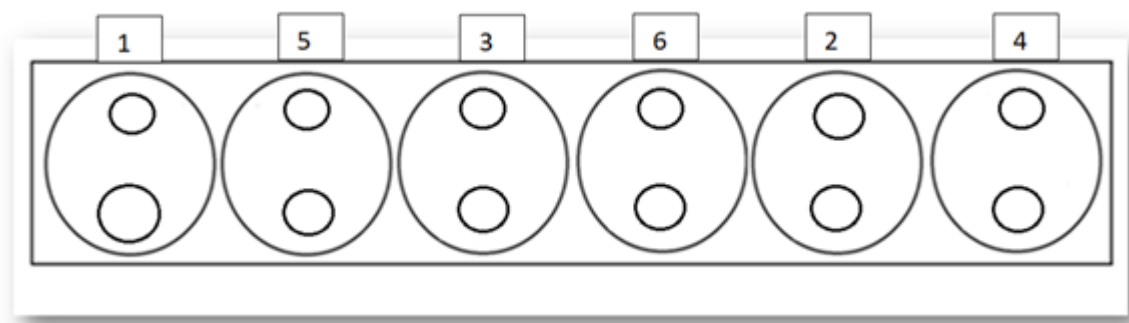
Pomiar luzu zaworowego

Pomiar luzu zaworowego odbywał się na silniku, którego temperatura zrównała się z temperaturą otoczenia. Sposób pomiaru luzu zaworowego został przedstawiony na rys. 12.11.



Rys.12.11. Pomiar luzu zaworowego z zaznaczonymi kierunkami wykorzystania szczelinomierza

Do oceny odległości pomiędzy dźwignią zaworu, a trzonkiem zaworu wykorzystano legalizowany szczelinomierz listkowy precyzyjny o zakresie pomiarowym 0,03 – 0,10 mm (tolerancja wg. DIN 2275) oraz legalizowany szczelinomierz listkowy precyzyjny o zakresie pomiarowym 0,05 – 1,00 mm (tolerancja wg. DIN 2275). Pomiar luzu zaworowego odbywał się w sposób pośredni i polegał na zsumowaniu grubości właściwych płytek obu szczelinomierzy wykorzystanych do pomiaru. Ze względu na konstrukcję głowicy pomiar wykonywano w dwóch kierunkach, prostopadłych do osi zaworu (rys.12.11.). Pomiaru dokonywano w kolejności zapłonu w cylindrach w dwóch kierunkach na każdym zaworze ze względu na konstrukcję głowicy silnika (rys. 12.12.). Po pomiarze, jeśli luzy zaworowe miały inną wartość niż luz zaworowy dopuszczalny (patrz rozdział 12.2.) przez producenta, należało dokonać ich regulacji do wartości nominalnej.



Rys.12.12. Kolejność dokonywania pomiaru luzu zaworowego

Pomiar luzu zaworowego dokonywano przy całkowicie zamkniętym zaworze wydechowym. Uzyskane wyniki w trakcie pomiaru przedstawiono w rozdziale 12.2. rozprawy. Wartości poszczególnych luzów zaworowych przedstawiono w milimetrach.

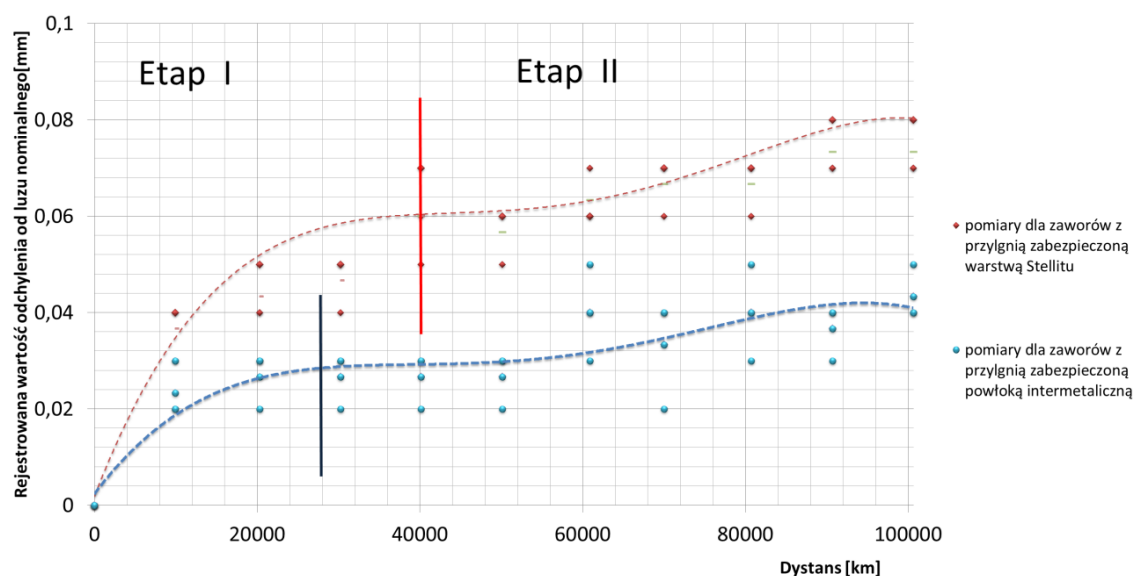
12.2. Wyniki badań laboratoryjnych testowych

Wyniki pomiarów luzu zaworowego, po kolejnych odcinkach odpowiadających oszacowanej długości drogi przebytej przez pojazd zaprezentowano w tablicy 12. Można zauważyć, że wartości wyników pomiarów w początkowym okresie badań eksploatacyjnych, zmieniają się w zakresie od 0,21 do 0,18 mm dla zaworów z przyłgnią zabezpieczoną warstwą Stellite oraz od 0,23 do 0,22 mm dla zaworu zabezpieczonego powłoką intermetaliczną. Zatem rejestrowane zmiany wartości luzu różnią się od wartości nominalnej wynoszącej 0,25 mm zalecanej przez producenta i świadczą o rozregulowaniu w badanym okresie eksploatacji. Rozregulowanie układu szacuje się na poziomie od 16 do 28% dla zaworów z przyłgnią zabezpieczoną warstwą Stellite oraz od 8 do 12% dla zaworów z przyłgnią zabezpieczoną powłoką intermetaliczną.

Tablica 12. Wyniki pomiaru luzu zaworowego

rodzaj przyłgni	cylinder	Pomiar luzu [mm]										
		dla dystansu [km]										
		0	9936	20313	30232	40164	50118	60902	69992	80695	90718	100654
zabezpieczona Stellitem	1	0,25	0,21	0,21	0,20	0,19	0,19	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
	3	0,25	0,21	0,20	0,20	0,18	0,19	0,19	0,18	0,18	0,17	0,17
	5	0,25	0,22	0,21	0,21	0,20	0,20	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18
zabezpieczona fazą Fe ₃ Al	2	0,25	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,22	0,23	0,21	0,21	0,21
	4	0,25	0,23	0,23	0,22	0,22	0,22	0,20	0,21	0,22	0,21	0,20
	6	0,25	0,23	0,22	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21	0,20	0,22	0,21

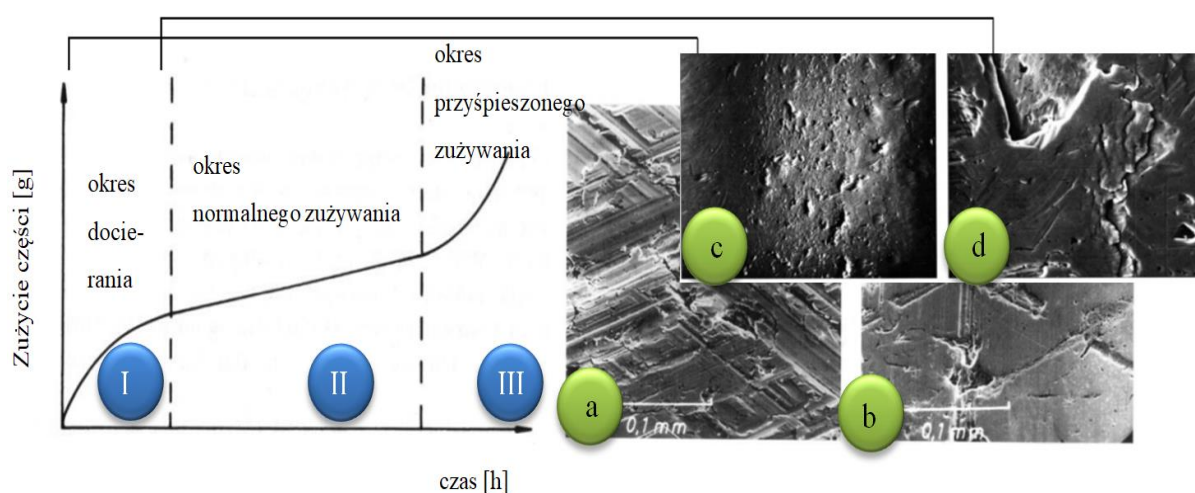
W celu łatwiejszej interpretacji danych sporządzono wykres (rys.12.13.).



Rys. 12.13. Pomiary wartości odchylenia od luzu nominalnego w funkcji przebytej drogi wraz z zaznaczeniem szacowanych zakresów występowania kolejnych etapów zużycia

Wyniki pomiarów (rys.12.13.) uzyskane w początkowym etapie (okres I eksploatacji) układają się wzdłuż osi odciętych inaczej niż wyniki uzyskane w późniejszym etapie eksploatacji w warunkach testu. Naniesione krzywe poglądowe,

wyraźnie ukazują zmienny charakter funkcji. Początkowo nachylenie funkcji jest bardziej stromo rosnące, następnie pod koniec prognozowanego etapu I osiąga pewną wartość, po której zmienia się jej charakter na bardziej płaski (etap II), łagodnie rosnący. Obserwowane zmiany wynikają z procesu docierania się elementów współpracujących w parze ciernej. Zgodnie z danymi literaturowymi, elementy konstrukcji maszyn i urządzeń w procesie wstępnego docierania zużywają się szybko, jednak jest to proces nieszkodliwy, gdyż po dotarciu następuje długi stabilny proces pracy zwany okresem normalnego zużywania się [105-109]. Okres I, zwany docieraniem jest stosunkowo krótki (biorąc pod uwagę czas zakładanej eksploatacji elementów konstrukcyjnych). Jego długość zależy od rodzaju materiałów i sposobu ich współpracy. Jest to okres bardzo ważny dla prawidłowego działania urządzenia. Następuje wówczas dogłębne i dopasowywanie się współpracujących powierzchni. Zgodnie z danymi literaturowymi w początkowej fazie ubytki materiału są dość intensywne (rys.12.14.). Okres I zwany również okresem inkubacji lub okresem docierania występuje we wczesnych fazach eksploatacji.



Rys.12.14. Wykres poglądowy etapów niszczenia powierzchni: bieżni cylindra GGL a) etap I b) etap 2 oraz powierzchni przylgni zaworowych c) etap I d) etap II wg M. Zimmermann [107]

Pod koniec analizowanego okresu I rzeczywista powierzchnia styku obu części powiększa się, maleje intensywność zużywania oraz stabilizuje się stan naprężeń i odkształceń w warstwie wierzchniej, co potwierdzili m.in. Y. Wang, S. Narasimhan, J. M. Larsen [110]. W przypadku analizowanych danych dla zaworów z przylgnią zabezpieczoną Stelitem 6 okres docierania można oszacować na ok. 40 000 godzin. Nieco trudniej jest określić czas docierania dla gniazd zaworowych współpracujących z przylgnią zabezpieczoną fazą międzymetaliczną, gdyż etap I nie przebiega aż tak intensywnie, a znaczące różnice w pomiarach luzu przy pokonanym dystansie 20 000 do 40 000 km nie są rejestrowane. Z przebiegu krzywej można oszacować, że przebieg procesów w tym czasie stabilizuje się.

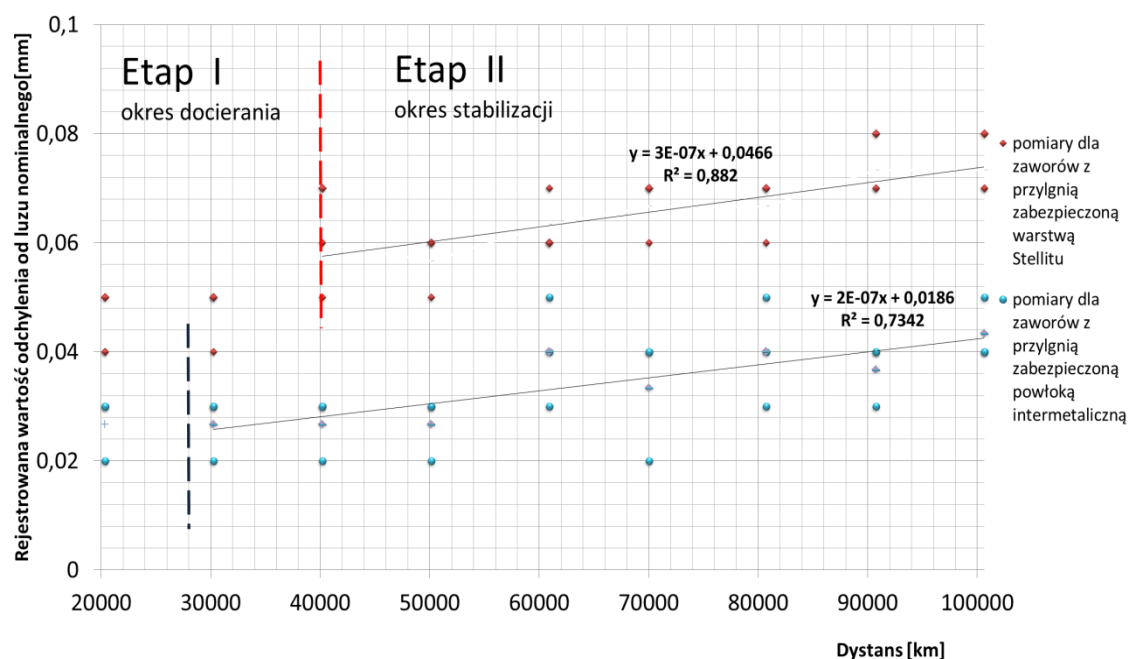
Okres II to okres normalnej pracy elementów pary ciernej przylgnia zaworowa – gniazdo zaworu. Analiza literatury w tym zakresie wskazuje, że okres ten charakteryzuje się powolnym przebiegiem zachodzących zjawisk oraz zmniejszoną i prawie stałą, intensywnością zużywania. Podobny przebieg krzywej przedstawiono na wykresie (rys.12.14). Trwałość części maszyn i urządzeń określa się na podstawie tego okresu. Dlatego w dalszych rozważaniach przeanalizowano szczegółowo ten okres. Zgodnie z danymi literaturowymi kolejny okres (etap III) zaczyna się w chwili, gdy następuje przekroczenie dopuszczalnego luzu danej pary trącej. Dlatego pomiary luzu można traktować jako wytyczną dotyczącą prognozowania zużycia elementów pary ciernej.

Wyniki pomiarów uzyskane dla okresu II zaprezentowano na rys. 12.13. Na wykresie przedstawiono zależność odchylenia luzu od nominalnej wartości (mm) w funkcji dystansu, pokonanego przez pojazd. Można stwierdzić, że procesy zużycia występujące w parze ciernej przekładają się na wyniki pomiarów luzu zaworowego. Zgodnie z danymi literaturowymi [108] w okresie normalnej pracy elementów pary ciernej mierzony luz odbiega od wartości nominalnej, ale nie przekracza tzw. luzu dopuszczalnego. W przypadku przekroczenia wartości dopuszczalnej występuje zakłócenie normalnej współpracy części, co objawia się skutkami: nadmiernym

nagrzewaniem się, obniżeniem sprawności mechanicznej, wzrostem zużycia środka smarnego, obniżeniem dokładności oraz sztywności połączenia. Obserwacje potwierdzili również K.J. Chun i J.H. Lim i wykazali, że dalsza eksploatacja w tych warunkach powoduje zniszczenie lub awarię pary trącej [111].

W związku z tym, że podczas badań laboratoryjnych eksploatacyjnych nie odnotowano przypadków przekroczenia zmierzonej wartości luzu od wartości nominalnej powyżej 30 punktów procentowych uznano, że wszystkie wyniki pomiarów są reprezentatywne dla okresu II eksploatacji.

Uzyskane wyniki dla okresu stabilizacji przebiegu procesów zużycia zaworów przedstawiono na rysunku 12.15. Wyniki aproksymowano funkcjami liniowymi.

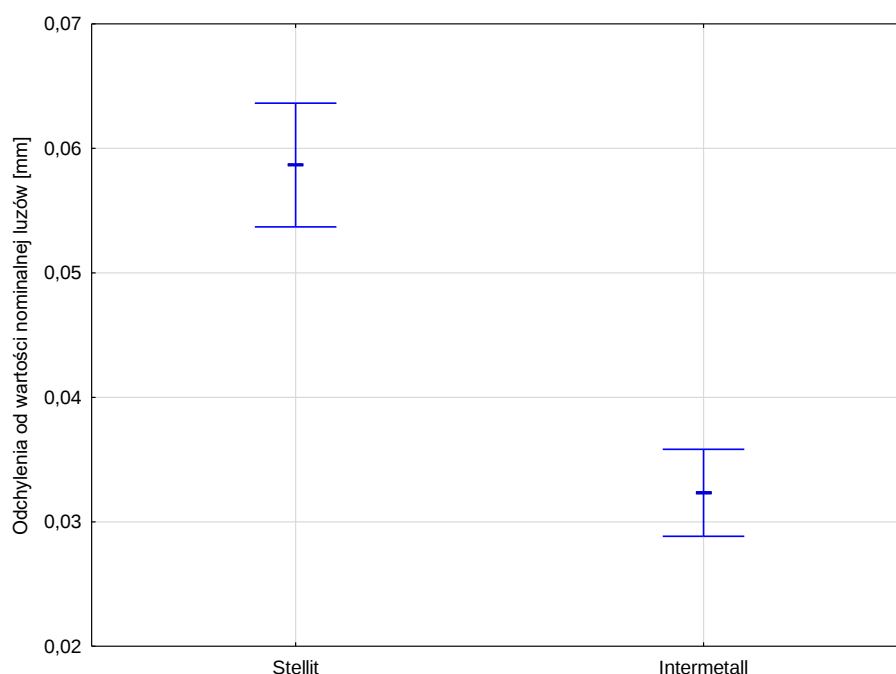


Rys.12.15. Wyniki badań uzyskane dla okresu stabilizacji z wyznaczonymi zależnościami pomiędzy rejestrowanymi wartościami odchylenia pomiaru od luzu nominalnego, a szacowanym dystansem pokonanym przez badany pojazd

Zaznacza się różnica w rejestrowanych średnich odchyleniach luzów od wartości nominalnej dla poszczególnych rodzajów zaworów współpracujących z badanymi

przylgniami zaworowymi. Rejestrowane wartości różnicy są odpowiednio większe dla dłuższego dystansu eksploatacji pojazdu. Oznacza to, że w miarę zwiększającego się czasu eksploatacji postępuje zużycie elementów zaworów przejawiające się ich coraz większym rozregulowaniem, podczas pokonywania analogicznych odcinków dystansu przez pojazd. Zbadano statystyczną istotność zaobserwowanych różnic. W testach statystycznych uwzględniono wszystkie uzyskane wyniki pomiarów (60 pomiarów).

Celem sprawdzenia założenia o równości wariancji dla rozważanych dwóch grup (30 pomiarów w każdej) przeprowadzono test Lavene'a. Wartość statystyki ($F=4,381$) pozwala stwierdzić, że wariancje nie różnią się statystycznie istotnie na poziomie $\alpha=0,05$ (wartość p-value z testu jest równa 0,041). Na podstawie jednoczynnikowej analizy wariancji Anova dla grup opisujących rodzaj powierzchni przylgni zaworowej można stwierdzić, że wartości luzów różnią się od siebie istotnie statystycznie na poziomie $\alpha=0,05$.



Rys. 12.16. Średnie arytmetyczne odchylenia od wartości nominalnej luzów zaworowych z podziałem na rodzaj powierzchni przylgni z 95% przedziałami ufności

Na rys. 12.16. widoczne są rozłączne przedziały ufności dla średnich odchyłeń luzów od wartości nominalnej. Tezę tę potwierdzają również testy: rozsądnej istotnej różnicy (RIR) Tukeya ($p=0,00011$) oraz Scheffe ($p=0,00000$) na poziomie istotności $\alpha=0,05$.

Uzyskane wyniki dla okresu stabilizacji pozwalają stwierdzić, że postępujące podczas eksploatacji zmiany luzu zaworowego względem wymiaru nominalnego, dla zaworów współpracujących z przyłgnią zabezpieczoną warstwą Stellitową można opisać równaniem funkcji $f_1(x)$:

$$f_1(x) = 3 \cdot 10^{-7} x + 0,0466 \quad (12.1)$$

Współczynnik x decyduje o prędkości zużycia przyłgni przejawiającej się rejestrowanym luzem zaworowym.

Analogicznie wyznaczono równanie funkcji określające zmiany luzu zaworowego względem wymiaru nominalnego dla zaworów współpracujących z przyłgnią zabezpieczoną warstwą napawaną ze spoiwa fazy intermetalicznej. Równanie funkcji przyjmuje postać:

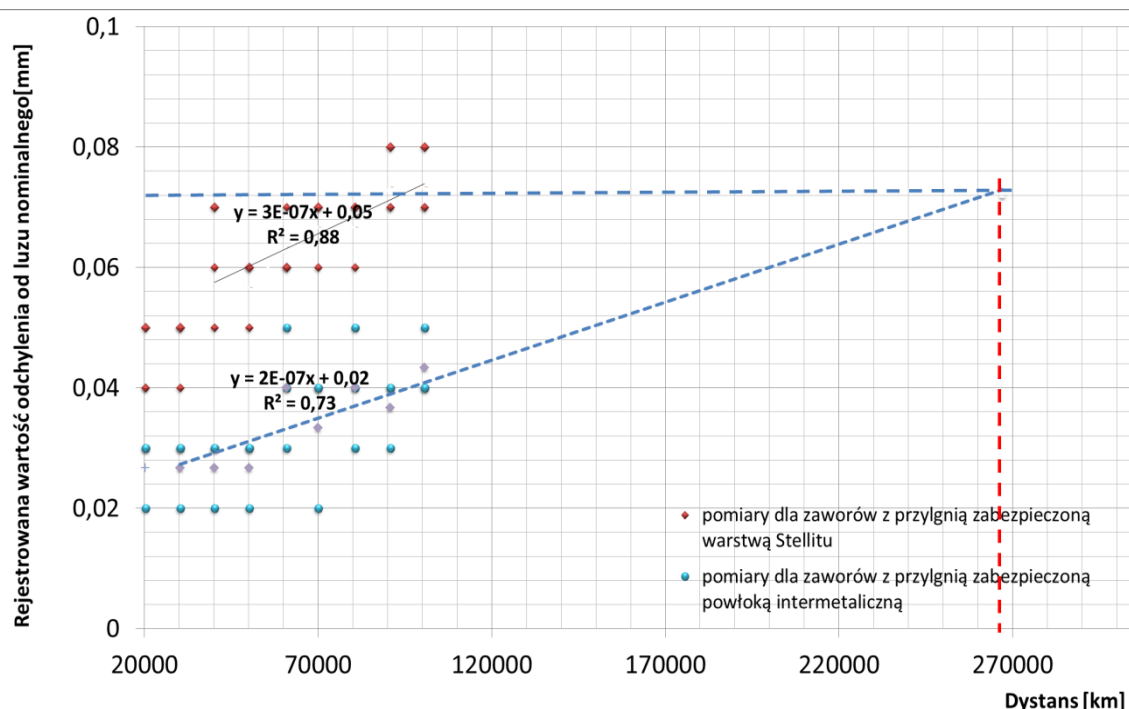
$$f_2(x) = 2 \cdot 10^{-7} x + 0,0206 \quad (12.2)$$

Kolejnym krokiem było przeanalizowanie tangensa kąta nachylenia wyznaczonych funkcji. Uzyskane wyniki świadczą o tym, że rozregulowanie luzu zaworowego, a tym samym zużycie przyłgni następuje szybciej w przypadku przyłgni zabezpieczonej Stelitem 6 niż w przypadku przyłgni pokrytej powłoką intermetaliczną. Tangens kąta nachylenia prostej w przypadku funkcji $f_2(x)$ jest mniejszy. Wynik potwierdza, że następuje znacznie wolniejsze zużycie przyłgni zaworowej zabezpieczonej fazą międzymetaliczną. Gniazdo zaworowe z przyłgnią zabezpieczoną warstwą napawaną ze spoiwa Fe_3Al będzie zatem mogło być eksploatowane dłużej, bez konieczności tak częstej regulacji luzu, jak w przypadku gniazd zaworowych z przyłgnią zabezpieczoną warstwą Stellitu 6.

Obserwując zmiany funkcji dla okresu stabilizacji należy podkreślić ich liniowy charakter. Porównując wyniki z danymi literaturowymi należy przypuszczać, że na proces zużycia pary ciernej dominujący wpływ ma tylko jeden z materiałów. Przykładowo, autorzy X. Liang, G. Strong, i in. badali m.in. odkształcenie materiału gniazda i materiału zaworu występujące w normalnych warunkach działania silnika [112]. Rejestrowane przez nich zużycie miało charakter nieliniowy, co świadczyło o zużywaniu się w wyniku tarcia zarówno gniazda zaworu jak i powierzchni przylgni zaworowej. W tej samej publikacji, autorzy wykazali, że jeśli proces zużycia jest zdominowany przez jeden lub drugi materiał w parze ciernej przylgni zaworowa - gniazdo zaworowe, np. jak wtedy gdy twarde gniazda są używane z zaworami o niższej twardości, model zużycia można uprościć sprowadzając go do analizy zużycia jednego materiału. Również analiza zjawisk zużycia zaworów prowadzone przez J.A. Petera [108] świadczy o tzw. „non-steady-state” charakterze procesu zużywania się pary ciernej w układzie gniazdo zaworu - przylgni zaworowa. Liczni autorzy sugerują również, że zwykle większość zużycia typu ściernego powodującego recesję występuje raczej na powierzchni zabezpieczającej zaworu niż na powierzchni współpracującej - materiału gniazda. Wpływ zużycia ściernego na przylgni zaworowe oraz tolerancji montażowych i braku współosiowości zaworów wylotowych pojazdów samochodowych, jako przyczyna niszczenia gniazd zaworowych został przedstawiony przez G. Roth [113]. Z kolei autorzy M. J. Malatesta oraz G. C. Barber potwierdzili, że niewspółosiowość wkładki zaworu jest postrzegana jako główny czynnik przyczyniający się do zużycia gniazda zaworu [114], a nie zużycie ściernie typu ślizgowego. Dominujący charakter zużycia tribologicznego, podczas właściwego montażu elementów obserwowany jest z reguły na materiale przylgni zaworowej. W takich warunkach wykres zużycia elementów w czasie ma charakter liniowy. Biorąc to pod uwagę i analizując przebieg wykresu, należy stwierdzić, że główne zużycie następuje na powierzchni przylgni zaworowej.

Ponadto rysując równoległą do osi x (dystansu km) przez punkt o wartości 0,072 mm na osi y (punkt odpowiadający maksymalnej średniej rejestrowanej wartości odchylenia luzu od wartości nominalnej) oraz nanosząc na wykres linię trendu $f_2(x)$ dla uzyskanych wartości pomiaru można uzyskać punkt przecięcia, odpowiadający prawdopodobnemu zużyciu przylgni zaworowej zabezpieczonej warstwą napawaną ze stopiwa Fe_3Al na poziomie odpowiadającym zużyciu przylgni zaworowej zabezpieczonej warstwą Stellite 6 po czasie przebycia przez pojazd drogi ok. 100 000 km. Rzutując punkt przecięcia tych linii (niebieskie przerywane linie na wykresie) można odczytać przewidywany dystans po jakim to zużycie nastąpi (rys. 12.17.).

Dane wskazują, że średni dystans można szacować na ponad 260 000 km eksploatacji pojazdu (wartość odczytana z wykresu wynosi 267 000 km). Zatem szacowana różnica w długości odcinka eksploatacji pojazdu z przylgnią zaworową zabezpieczoną warstwą Stellite 6 oraz z przylgnią zaworową zabezpieczoną warstwą intermetaliczną, prowadząca do zużycia przylgni w analizowanych pojazdach na tym samym poziomie wynosi ponad 160 000 km. Uzyskany wynik ma charakter poglądowy, wskazuje na korzyść zastosowania w badanych warunkach eksploatacyjnych przylgni napawanej spoiwem Fe_3Al .



Rys.12.17. Prognozowane dalsze odchylenie luzu zaworowego od wartości nominalnej w zależności od dystansu pokonanego przez pojazd

W rzeczywistości różnice pomiędzy przebiegiem funkcji aproksymujących wyniki uzyskane dla przyłgni zaworowej zabezpieczonej warstwą Stellitu 6 oraz przyłgni zaworowej zabezpieczonej warstwą intermetaliczną wynikają z nakładających się czynników zużycia korozyjno-erozyjnego. Porównanie wyników pomiarów tribologicznych, prezentowanych w rozdziale 11 pracy z wynikami badań laboratoryjnych eksploatacyjnych pozwalają zauważyć, że w warunkach podwyższonej temperatury, procesy zużycia przebiegają znacznie intensywniej dla przyłgni zabezpieczonych warstwą Stellitu niż dla przyłgni zabezpieczonej powłoką intermetaliczną. W prezentowanych wcześniej badaniach tribologicznych rejestrowane różnice zużycia ściernego, wskazywały na lepsze własności powłok intermetalicznych, ale rejestrowane różnice nie były aż tak istotne.

Podczas wykonanych badań walidacyjnych pojawiły się komplikacje, ponieważ czynniki tribochemiczne (utlenianie i ekspozycja na gazy korozyjne), cykle

temperaturowe zmieniają warunki zużycia w okresie eksploatacji elementów. Podobne obserwacje poczynili m.in. Y. S. Wang, S. K. Schaefer [115]. Wykazali, że:

- procesy związane ze zużyciem elementów przylgni zaworowych zależą od zmniejszenia współczynnika tarcia stosowanych materiałów, który przekłada się na zużycie ściernie,
- w przypadku podwyższonej temperatury odnotowali, że na zużycie ściernie wpływają znacząco procesy korozyjne, a wynik badań jest uzależniony zarówno od współczynnika tarcia jak i odporności korozyjnej stopu.

Liczne publikacje z zakresu zużycia występującego w parze ciernej przylgna zaworowa-gniazdo zaworu, potwierdzają, że warunki eksploatacyjne wpływają bezpośrednio na powierzchnię styku par ciernych [116-117]. Ponieważ profil zużycia może się różnić w poszczególnych lokalizacjach na obwodzie talerzyka przylgni, nawet na tym samym zaworze, modelowanie ogólnego profilu zużycia jest uznane za niepraktyczne, w szczególności dla materiałów wielofazowych (takich jak analizowane warstwy stellite). Warstwy wielofazowe wykazują zróżnicowane właściwości odporności wysokotemperaturowej, co w złożonych warunkach oddziaływania korozyjno-erozyjnego może przyczynić się do ich przyśpieszonej degradacji, w szczególności w obrębie jednej z faz. Takie obserwacje potwierdzają również wyniki badań naukowych z zakresu transformacji do niekorzystnej dla procesów korozyjno-erozyjnych fazy sigma (σ), prowadzonymi przez K. M. Adhe i V. Kain [118]. Zgodnie z prezentowanymi przez nich danymi wygrzewanie w zakresie temperatury 540-925° C (*a więc temperatury pracy przylgni zaworów wydechowych*) może powodować wydzielenia twardej i kruchej fazy sigma (σ) negatywnie wpływającej na odporność korozyjną i plastyczność stopów.

W przypadku analizowanych warstw stelliteowych faza σ występuje w strukturze materiału. Jej przemiana podczas nagrzewania w korzystniejszą fazę Cr (BCC) następuje przy wygrzewaniu w wyższych temperaturach, niemniej należy podkreślić, że charakter

obciążeń silnika oraz temperatura podczas eksploatacji i rozruchów są zmienne, co uniemożliwia transformację analizowanej fazy σ . Tłumaczy to przyspieszoną degradację przylgni zaworowej zabezpieczonej Stelitem 6 w warunkach eksploatacji w temperaturze podwyższonej i złożonym środowisku korozyjno-erozyjnym. Jest to tematyka ważna dla realizowanego procesu badań i wymaga ciągłego zgłębiania. W niniejszej rozprawie, szczegółowym mechanizmem zużycia warstw stelitowych nie zajmowano się, gdyż wykracza poza ramy opracowania.

Z kolei wolniejsze zużycie warstwy intermetalicznej w warunkach badań laboratoryjnych testowych na hamowni silnikowej można powiązać z analizowaną jednorodną w całej objętości strukturą powłoki, prezentowaną w rozdziale 11.2. Struktura typowa dla fazy Fe_3Al jest strukturą stabilną zarówno w szerokim zakresie temperaturowym jak i składu chemicznego. Na granicach ziarn obserwowano cyrkonowe wtrącenia niemetaliczne. W ten sposób najprawdopodobniej powstaje skuteczna bariera, przeciwdziałająca procesom dyfuzyjnym po granicach ziarn, spowalniająca procesy korozyjne. Przypuszczenie jest zgodne z danymi literaturowymi i prezentowanym przez autorów R. Cuffe i H. Buscail [119] oraz B.A. Pint [120] mechanizmem spowalniania procesów dyfuzji w wyniku domieszkowania faz intermetalicznych, np. cyrkonem lub itrem. Wyniki prac związanych z wpływem cyrkonu na procesy korozyjno-erozyjne zostały przedstawione m.in. w [121-122]. Zaproponowana hipoteza tłumaczy obserwowane niższe zużycie przylgni zabezpieczonych fazą międzymetaliczną w warunkach laboratoryjnego testu eksploatacyjnego, przejawiające się rejestrowanym niższym rozregulowaniem układu przylgni zaworowa - gniazdo zaworu. Jest również zgodna z prezentowanym w [110, 116] poglądami, dotyczącymi roli procesu korozji i rozkładu temperatur na zużycie ściernie przylgni zaworowych.

W literaturze przedmiotu przedstawiono również kilka scenariuszy modelowania procesów, wyjaśniających zależność profilu zużycia przylgni zaworowych w zależności od warunków ich eksploatacji [108, 123-125]. Najbardziej pasujący model literaturowy,

dla analizowanego, zarejestrowanego w rozprawie przypadku zużycia przylgni zaworowych zaprezentowano w [108]. Autor modelu uwzględnił:

- tzw. początkowy okres zużycia, w którym dominujące procesy zużycia ewoluowały do ich szybkości w stanie ustalonym we wczesnych fazach eksploatacji,
- utwardzanie materiału i wzrost nominalnej powierzchni styku (co zmniejsza obciążenie na jednostkę powierzchni) i spowolnienie procesu w kolejnym etapie badań eksploatacyjnych,
- niekorzystne procesy wpływające na prędkość ścierania wraz z upływem czasu lub liczbą cykli, wynikające z gromadzenia się tlenków i tribo-warstw między powierzchniami stykowymi,
- konkurencję pomiędzy wyżej wymienionymi czynnikami skutkującą złożonym, nieliniowym zachowaniem się funkcji określającej zależność zużycia materiału we wszystkich okresach cyklu.

Jak wspominają autorzy, model wyjaśnia przebieg zmian zużycia tribologicznego przylgni zaworowej (kształt przebiegu krzywej), ale prędkość tych zmian jest uzależniona dodatkowo od struktury materiału, geometrii talerzyka zaworu, długości okresu i intensywności eksploatacji podczas procesu inkubacji, mechanizmu opóźnionego rozpoczęcia procesu ścierania i zmniejszenia wielkości odkształcenia na cykl uderzenia w miarę twardnienia powierzchni stykowych podczas użytkowania przylgni zaworowych itd.

Reasumując należy stwierdzić, że przylgni napawane spoiwem z fazy międzymetalicznej nadają się do zastosowania w badanej jednostce napędowej. Prawidłowo współpracują w parze ciernej z gniazdem zaworu. Zatem można stwierdzić, że pozytywnie przeszły testy walidacyjne.

Analizowane przyłgnie zaworowe z powłoką intermetaliczną wykazują niższe zużycie, przejawiające się mniejszymi rejestrowanymi wartościami odchylenia luzu zaworowego od wartości nominalnej w trakcie całego procesu eksploatacji, w porównaniu do luzu zaworowego mierzonego dla gniazd zaworowych współpracujących z przyłgniami zabezpieczonymi warstwą Stellitu 6. Zastosowanie nowoopracowanych przyłgni ogranicza zatem liczbę regulacji luzu zaworowego.

12.3. Podsumowanie badań walidacyjnych i uznanie technologii

Na podstawie przeprowadzonych badań walidacyjnych na hamowni silnikowej i ich analizy można stwierdzić, że opracowane napawane warstwy powierzchniowe ze stopiwa fazy Fe_3Al charakteryzowały wysokie własności użytkowe w warunkach eksploatacji badanej (podczas badań laboratoryjnych testowych) jednostki napędowej, przejawiające się uzyskaniem mniejszych odchyłeń rejestrowanej wartości luzu zaworowego od wartości nominalnej, ustalonej przez producenta. Największe odchylenie wartości luzu zaworowego zarejestrowano dla zaworu nr 2 z przyłgnią zaworową zabezpieczoną Stelitem 6. Odchylenie wynosiło 0,08 mm. Najwyższe odchylenie wartości zmierzonego luzu zaworowego, zarejestrowane dla zaworu nr 2 z przyłgnią zaworową zabezpieczoną napawaną warstwą intermetaliczną, było o 37,5 pkt % niższe. Oznacza to, że badany zawór z przyłgnią zaworową zabezpieczoną fazą Fe_3Al nie wymaga tak częstej regulacji jak zawór z przyłgnią zaworową zabezpieczoną warstwą Stellitu 6.

W wyniku prognozowania dalszego zużycia przyłgni zaworowych w warunkach testu, oszacowano, że porównywalny poziom zużycia przyłgni uzyska się w przypadku, gdy pojazd z zamontowanymi w jednostce napędowej przyłgniami zabezpieczonymi fazą

Fe₃Al pokona drogę ponad 160000 km dłuższą w porównaniu do pojazdu z zamontowanymi przyłgniami zabezpieczonymi warstwą Stellitu 6.

Można wnioskować, że zastosowanie przyłgni zaworowej zabezpieczonej warstwą intermetaliczną **wpływa na zwiększenie trwałości jednostki napędowej w warunkach eksploatacji i pozwala na znaczne zmniejszenie częstotliwości regulacji luzu zaworowego**, co potwierdza tezę pracy.

Po zakończonych badaniach eksploatacyjnych oględziny zewnętrzne przyłgni zaworowych zabezpieczonych warstwą intermetaliczną nie wykazały złuszczeń, czy wykruszania się powłoki (rys. 12.18).



Rys. 12.18. Widok zaworów po eksploatacji w badanej jednostce napędowej dostosowanej do zasilania gazem ziemnym: a) z przyłgnią wzmocnioną Fe₃Al, b) z przyłgnią wzmocnioną Stelitem 6

Spostrzeżenie, w połączeniu z uzyskanymi wynikami pomiarowymi luzu zaworowego uprawnia do wnioskowania, że poprzez odpowiedni dobór parametrów: geometrycznych spoiwa i procesu technologicznego, otrzymano powłoki z fazy międzymetalicznej Fe_3Al charakteryzujące się żądanymi właściwościami, w warunkach pracy przylgni zaworowej pojazdów samochodowych adaptowanych do zasilania paliwem gazowym. Przeprowadzone badania eksploatacyjne i zarejestrowane wyniki stanowią zatem obiektywny dowód, że opracowana technologia nadaje się do zastosowania w omawianych warunkach pracy. Należy jednoznacznie stwierdzić, że opracowana technologia przeszła walidację pozytywnie.

Ze względu na zastosowanie innowacyjnego rozwiązania zabezpieczania przylgni zaworowych powłoką intermetaliczną, przed aplikacją wyników do zasadniczej produkcji wystąpiono z wnioskiem do jednostki notyfikującej o uznanie technologii napawania WPQR Welding Procedure Qualification Record zgodne z wymaganiami normy EN ISO 15614-7: 2020.

Na podstawie pozytywnych rezultatów związanych z wytworzeniem prototypu przylgni zaworowych [rozdział 12 pracy) oraz przeprowadzonych badań walidacyjnych otrzymanych konstrukcji napawanych jednostka notyfikowana uznała technologię napawania TIG przylgni zaworowych przy użyciu nowo opracowanej geometrii spoiwa z fazy Fe_3Al . Uzyskano certyfikat uznania technologii spawania WPQR Welding Procedure Qualification Record o numerze PL06/208269/21 (załącznik 2).

13. Podsumowanie i wnioski

W związku z tym, że kierunek związany z wprowadzeniem gazu ziemnego jako alternatywnego paliwa dla benzyny i oleju napędowego jest perspektywiczny a w ostatnich latach znacząco wzrosło zapotrzebowanie na pojazdy zasilane gazem ziemnych producenci pojazdów zmuszeni są do odpowiedniego udoskonalania jednostek napędowych bądź ich modyfikacji, pod kątem zasilania omawianym paliwem. Obecnie wprowadzenie instalacji gazowej, wymusza częstsze serwisowanie pojazdu, regulację parametrów ich pracy, czy nawet wcześniejszą wymianę elementów takich jak tłumiki, katalizatory. W literaturze odnotowano szybsze zużywanie się tulei cylindrów, tłoków, pierścieni, zaworów i gniazd zaworowych. Przyczyną ich przyspieszonego zużycia jest właśnie zmiana paliwa, a przy tym agresywności środowiska pracy tych elementów, w pojazdach dostosowywanych do zasilania gazem ziemnym. Analiza literatury wykazała, że istotnym, aktualnym i dotychczas nierozwiązanym problemem jest przyspieszona degradacja przyłgni zaworowych w wyżej wymienionych warunkach pracy. Jej uszkodzenia w jednostce napędowej, stanowią przyczynę obniżenia poziomu bezpieczeństwa biernego pojazdu oraz zanieczyszczenia środowiska, gdyż mogą doprowadzić m.in. do braku szczelności komory spalania i niekontrolowanej emisji metanu do układu wydechowego czy zablokowania silnika. Dotychczasowe ingerencje w powierzchnię przyłgni zaworu w silniku modyfikowanym, nie przyczyniły się do uzyskania zadawalającej wysokiej odporności na zużycie ściernie tego komponentu. Najczęściej stosowane modyfikacje warstwy powierzchniowej przyłgni zaworu wydechowego, poprzez nałożenie na jej powierzchnię warstw inconelu lub Stellitu uznano za niewystarczające.

Podjęmując się rozwiązania aktualnego problemu badawczego w ramach pracy opracowano, a następnie wdrożono koncepcję materiałowo-technologiczną zabezpieczenia przyłgni zaworu wydechowego w silniku ZS adaptowanym do zasilania

gazem ziemnym. Przeprowadzając analizę literatury oraz wstępne badania własne zaprojektowano geometrię spoiwa z fazy międzymetalicznej, tak aby można było zastosować ją do wytworzenia napawanej powłoki na przyłgnię zaworu wydechowego. Przeprowadzając próby napawania i testując otrzymane powłoki stwierdzono, że najlepszymi parametrami procesu otrzymywania warstw zabezpieczających są: natężenia prądu $I = 66 \text{ A}$; napięcie $U = 19 \text{ V}$; prędkość procesu 70 mm/min ; zastosowanie nowoopracowanego spoiwa z materiału fazy międzymetalicznej Fe_3Al o wymiarach 150 mm długość pojedynczego spoiwa i przekroju w kształcie kwadratu o boku $a = 1,4[\text{mm}]$; użycie gazu osłonowego w postaci argonu i prędkości wypływu 8 l/min ; elektrody wolframowej $2,4 \text{ mm}$ i łuski spawalniczej nr 6.

Na podstawie wyników badań wstępnych uznano, że zaprojektowana metoda przy wykorzystaniu nowo opracowanych spoiw z fazy międzymetalicznej Fe_3Al nadaje się do wytworzenia warstwy wierzchni napawanej na stożkowe powierzchnie przyłgni zaworowej i umożliwia wykonanie napoin bez wad i niezgodności spawalniczych, które można wykryć metodą rentgenograficzną. Analiza literatury, wstępne wyniki badań własnych umożliwiły postawienie tezy, która zakładała, że **zastosowanie fazy międzymetalicznej Fe_3Al do napawania powierzchni przyłgni zaworowych silników w środkach transportu, adaptowanych do zasilania paliwem CNG/LNG, wpłynie na zwiększenie trwałości jednostki napędowej w warunkach eksploatacji i pozwoli na zmniejszenie częstotliwości regulacji luzu zaworowego.**

W celu jej udowodnienia przeprowadzono badania i testy zasadnicze. Szczegółowe wyniki badań i wnioski zostały sformułowane w podsumowaniu każdego rozdziału pracy. Do najważniejszych z nich należy zaliczyć:

- opracowana metoda daje powtarzalne i oczekiwane wyniki badań, zatem mogłaby stanowić metodę alternatywną dla obecnie stosowanych i być wdrożona do przemysłu, wnioski potwierdzają pozytywne rezultaty badań strukturalnych i eksploatacyjnych;

- pomiary mikrotwardości na przekroju napoiny, potwierdziły, że otrzymany materiał charakteryzuje się stosunkowo małym rozrzutem wartości twardości oraz porównywalną twardością do stosowanych komercyjnie powłok zabezpieczających przylgnie zaworowe. Wyniki uprawniają do wnioskowania, że nie wystąpi zjawisko zwiększonego zużycia podczas współpracy pomiędzy elementami w parze ciernej przylgnia zaworowa napawaną spoiwem intermetalicznym, a gniazdem zaworowym. Wniosek znalazł również odzwierciedlenie w wynikach badań testowych prowadzonych na hamowni silnikowej;
- zarówno badania nieniszczące RT napoin jak i badania strukturalne wykazały brak wad spawalniczych w przylgniach napawanych fazą międzymetaliczną Fe_3Al , co świadczy o poprawności doboru technologii wytworzenia warstwy wierzchniej na przylgni zaworu wydechowego. Dodatkowo wszystkie powłoki z fazy międzymetalicznej charakteryzowała strukturalna jednorodność objętościowa, co potwierdza, że wszystkie przebadane własności powłoki są zachowane na całej jej długości;
- w badaniach walidacyjnych wykazano możliwość wykorzystania zaworów z przylgnią napawaną fazą międzymetaliczną w warunkach eksploatacji jednostki napędowej Hino H series 165 HP B53. Po badaniu nie stwierdzono niezgodności powłok w postaci złuszczeń, makropęknięć czy innych zmian, świadczących o wykruszaniu lub odpadaniu powłoki od materiału rodzimego; stwierdzono prawidłową współpracę pomiędzy napawaną przylgnią a gniazdem zaworu.
- wyniki pomiaru luzu zaworowego, wskazują na mniejsze odchylenie rejestrowanych wartości od wartości nominalnej dla zaworów z przylgnią zaworową zabezpieczoną powłoką Fe_3Al , oznacza to, że badany zawór z przylgnią zaworową zabezpieczoną omawianą fazą nie wymaga tak częstej regulacji jak zawór z przylgnią zaworową zabezpieczoną warstwą Stellite 6.
- wykazano związek przyczynowo-skutkowy pomiędzy rejestrowanym luzem zaworowym, a trwałością materiału przylgni zaworowej, wskazujący na wyższą trwałość

materiału intermetalicznego w porównaniu do Stellitu 6 w temperaturze podwyższonej, przejawiającą się szybszym rozregulowaniem układu przyłgni zaworowa – gniazdo zaworowe w przypadku zastosowania przyłgni zabezpieczonych warstwą Stellitu 6.

Prezentowany związek przyczynowo-skutkowy został potwierdzony badaniami statystycznymi oraz wyjaśniony za pomocą mechanizmów prezentowanych w literaturze, wskazujących na brak wystarczającej odporności korozyjno-tribologicznej materiałów z fazą σ w omawianych warunkach pracy (składowa Stellitu), a także blokowaniem dróg dyfuzji po granicach ziaren wynikających z domieszkowania faz cyrkonem (w przypadku fazy Fe_3Al), wpływającym na podwyższenie odporności fazy intermetalicznej w warunkach testu.

- badania testowe prowadzone na hamowni silnikowej dały podstawy do prognozowania dalszego zużycia przyłgni zaworowych w tzw. okresie stabilizacji, które wskazuje, że aby uzyskać porównywalną wartość luzu gniazda zaworowego z przyłgnią zabezpieczoną napawaną warstwą ze spoiwa Fe_3Al do gniazda zaworowego z przyłgnią zabezpieczoną warstwą Stellitu 6 pojazd musiałby pokonać prawie 60 % dłuższy dystans. Zatem, reasumując należy wnioskować, że zastosowanie przyłgni zaworowej zabezpieczonej intermetalem wpływa na zwiększenie trwałości jednostki napędowej w warunkach eksploatacji i pozwala na zmniejszenie częstotliwości regulacji luzu zaworowego, co potwierdza tezę pracy.

Opracowana innowacyjna metoda zabezpieczenia przyłgni zaworowej intermetaliczną powłoką napawaną metoda TIG uzyskała certyfikat uznania TÜF.

Analiza stanu stale rozwijającego się rynku, wskazuje, że podobne problemy występują również w innych środkach transportu zasilanych gazem ziemnym. Można zatem nakreślić kierunki badań przyszłościowych:

- przeprowadzić badania w rzeczywistych warunkach eksploatacji pracy pojazdów,

- zaadaptować opracowaną technologię do zabezpieczenia przyłgni zaworowych, np. w transporcie morskim i przeprowadzić badania opracowanej przyłgni w silnikach spalinowych stosowanych w okrętach morskich,
- przeprowadzić dalsze prace w aspekcie zautomatyzowania pełnego procesu technologicznego nakładania warstwy wierzchniej na przyłgni zaworową w celu dostosowania procesu do zabezpieczania elementów w produkcji seryjnej.

Spis tablic

Tablica 1.	Porównanie wybranych właściwości fizykochemicznych gazu ziemnego i innych paliw konwencjonalnych.....	20
Tablica 2.	Skład chemiczny stali stosowanych na zawory	32
Tablica 3.	Parametry procesu cięcia strugą wodno – ścieralną.....	63
Tablica 4.	Charakterystyka procesu napawania przy zastosowania fazy międzymetalicznej Fe_3Al jako spoiwa.....	69
Tablica 5.	Parametry otoczenia w trakcie badania RT.....	73
Tablica 6.	Parametry wyposażenia wykorzystanego w badaniu.....	73
Tablica 7.	Parametry ekspozycji w trakcie badania.....	74
Tablica 8.	Analiza zdjęć RT zaworów napawanych fazą międzymetaliczną Fe_3Al	74
Tablica 9.	Parametry pracy obrabiarki w procesie obróbki EDM.....	83
Tablica 10.	Pomiary twardości dla warstwy Stellite.....	109
Tablica 11.	Pomiary twardości dla warstwy intermetalicznej Fe_3Al	109
Tablica 12.	Wyniki pomiaru luzu zaworowego [mm].....	128

Spis rysunków

Rys. 2.1.	Liczba pojazdów zasilanych gazem ziemnym na świecie i ich tendencja ilościowa na przestrzeni 10 lat (1996 – 2016 r.).....	12
Rys. 2.2.	Ilość dostarczonych jednostek, które wykorzystują LNG w latach 1990 – 2023.....	14
Rys. 2.3.	Rozmieszczenie wybranych istniejących oraz planowanych terminali LNG w Europie.....	15
Rys. 4.1.	Cyrkulacja powietrza w komorze spalania.....	30
Rys. 5.1.	Schemat budowy zaworu, w tym pary ciernej przylgna zaworowa – gniazdo zaworu.....	33
Rys. 5.2.	Transfer cząstek w parze ciernej przylgna zaworowa – gniazdo zaworowe.....	35
Rys. 5.3.	Przykładowy symulowany rozkład temperatury i rozkład izoterm w przekroju grzybka zaworu wylotowego a) silnika ZS zasilanego olejem napędowym b) silnika ZI zasilanego benzyną.....	36
Rys. 5.4.	Przykładowa struktura powłoki Stellite'owej z uwidocznionym obszarem świadczącym o rozpoczynającym się procesie degradacji.....	37
Rys. 5.5.	Uszkodzenie powierzchni przylgni zaworu wydechowego w silniku ZS zasilanym olejem napędowym.....	38
Rys. 5.6.	Uszkodzone zawory wydechowe silnika zasilanego gazem ziemnym.....	39
Rys. 5.7.	Przykład rejestrowanych zmian grzybków zaworowych pod wpływem wysokich obciążeń termodynamicznych.....	41
Rys. 5.8.	Przykładowe uszkodzenia przylgni zaworowej (a – b) prowadzące do mikropęknięć (c) i utraty materiału głowicy d).....	42
Rys. 5.9.	Przykłady zmian na powierzchni przylgni zaworu.....	43
Rys. 5.10.	Powstawanie osadów na powierzchni przylgni w wyniku napływu gorących gazów.....	44
Rys. 5.11.	Proces produkcyjny zaworu silnikowego.....	45
Rys. 5.12.	Rozkład temperatury pracy na powierzchni zaworu wylotowego w pojeździe samochodowym zasilanym konwencjonalnym paliwem płynnym.....	46

Rys. 9.1.	Uzyskana sztaba intermetal Fe ₃ Al (opracowanie własne).....	63
Rys. 9.2.	Przygotowanie spoiwa do napawania, o następujących wymiarach przekrojów: a) 1,2 × 1,2 [mm ²], b) 1,4 × 1,4 [mm ²], c) 1,6 × 1,6 [mm ²], d) 1,8 × 1,8 [mm ²].....	64
Rys. 9.3.	Proces napawania przylgni zaworu wydechowego spoiwem z fazy międzymetalicznej Fe ₃ Al (opracowanie własne).....	66
Rys. 9.4.	Przylgni zaworów napawane wybranymi przekrojami spoiwa Fe ₃ Al, a) 1,2 × 1,2 [mm ²], b) 1,4 × 1,4 [mm ²], c) 1,6 × 1,6 [mm ²], d) 1,8 × 1,8 [mm ²] (opracowanie własne).....	67
Rys. 9.5.	Przylgni zaworów napawane wybranymi przekrojami spoiwa Fe ₃ Al (rzut pionowy), : a) 1,2 × 1,2 [mm ²], b) 1,4 × 1,4 [mm ²], c) 1,6 × 1,6 [mm ²], d) 1,8 × 1,8 [mm ²] (opracowanie własne).....	68
Rys. 10.1.	Przebieg pracy.....	81
Rys. 10.2.	Stanowisko do badań tribologicznych typu trzpień – tarcza T – 11.....	84
Rys. 10.3.	Schemat zamocowania próbki w uchwycie testera T – 11 – rysunek poglądowy.....	86
Rys. 10.4.	Schemat umieszczenia termopary do pomiaru temperatury.....	87
Rys. 10.5.	Schemat badań eksploatacyjnych.....	91
Rys. 11.1.	Widok pary ciernej po teście: a) trzpień wykonany ze Stellitu 6, b) tarcza wykonana ze stali S235JR.....	93
Rys. 11.2.	Wykresy współczynnika tarcia i temperatury: a) Stellit 6, b) intermetal Fe ₃ Al.....	93
Rys. 11.3.	Wykresy współczynnika tarcia: 1 – Stellit 6, 2 – Fe ₃ Al.....	94
Rys. 11.4.	Wykresy średnich temperatur: 1 – Stellit 6, 2 – Fe ₃ Al.....	95
Rys. 11.5.	Wykresy intensywności zużycia: 1 – Stellit 6, 2 – Fe ₃ Al.....	95
Rys. 11.6.	Sposób przygotowania zglądów metalograficznych napawanej przylgni zaworowej.....	97
Rys. 11.7.	Makrostruktury napawanego zaworu przy powiększeniu dziesięciokrotnym. Punkty 1-4 to materiał rodzimy, 5- strefa wpływu ciepła, 6 – linia wtopienia, 7, 8 napoina intermetaliczna, traw Nital.....	98
Rys. 11.8.	Poglądowy schemat rozkładu ziaren w próbce A.....	99
Rys. 11.9.	Materiał rodzimy (punkt 4 ze zdjęcia 7.2), odczynnik trawiący: Nital... 100	

Rys. 11.10.	Strefa wpływu ciepła (punkt 5), traw. Nital.....	101
Rys. 11.11.	Linia wtopienia (punkt 6), odczynnik traw. Nital.....	102
Rys. 11.12.	Mikrostruktura intermetalicznej napoiny (punkt 7), odczynnik trawiący: Nital (LM).....	103
Rys. 11.13.	Mikrostruktura próbki intermetalicznej stosowanej w badaniach tribologicznych (LM).....	103
Rys. 11.14.	Mikrostruktura napoiny w punkcie 8 (zgląd A), wytrawiona metodą barwną, wykorzystano odczynnik Beraha.....	104
Rys. 11.15.	Mikrostruktura napoiny (SEM) oraz skład chemiczny z punktu 1.....	105
Rys. 11.16.	Wyniki mikroanalizy roentgenowskiej – skład chemiczny napoiny (zgląd A) punkt 2 z rysunku 11.7.....	106
Rys. 11.17.	Schematyczna budowa strukturalna analizowanego złącza napawanego.....	106
Rys. 11.18.	a) próbka zaworu napawanego ze spoiwem Fe ₃ Al oraz b) próbka zaworu z przyłgnią zabezpieczoną Stellitem.....	108
Rys. 11.19.	Porównanie twardości HV dla próbki z warstwą Fe ₃ Al i warstwą Stellitu 6.....	110
Rys. 11.20.	Porównanie średniej twardości ze wszystkich pomiarów dla próbek zabezpieczonych warstwą Stellitu i warstwą intermetaliczną.....	111
Rys. 12.1.	Etapy przygotowania do przeprowadzenia badań eksploatacyjnych.....	115
Rys. 12.2.	Obróbka toczna talerzyka zaworu.....	116
Rys. 12.3.	Obróbka ścierna talerzyka zaworu.....	117
Rys. 12.4.	Napawane fazą międzymetaliczną zawory w kolejnych etapach do obróbki przygotowującej do montażu w badanej jednostce napędowej.....	117
Rys. 12.5.	Wymiary przygotowanego zaworu.....	118
Rys. 12.6.	Schemat montażu zaworów w głowicy testowanego silnika spalinowego.....	119
Rys. 12.7.	Schemat stanowiska badawczego (1 – jednostka napędowa, 2 – hamulec hydrokinetyczny)	120

Rys. 12.8	Widok hamowni silnikowej z zamontowaną badaną jednostką napędową	122
Rys. 12.9.	Widok przepustnicy zamontowanej w badanej jednostce napędowej.....	123
Rys.12.10.	Charakterystyka pełnej mocy silnika.....	124
Rys.12.11.	Pomiar luzu zaworowego z zaznaczonymi kierunkami wykorzystania szczelinomierza.....	126
Rys.12.12.	Kolejność dokonywania pomiaru luzu zaworowego.....	127
Rys.12.13.	Pomiary wartości odchylenia od luzu nominalnego w funkcji przebytej drogi wraz z zaznaczeniem szacowanych zakresów występowania kolejnych etapów zużycia.....	128
Rys.12.14.	Wykres poglądowy etapów niszczenia powierzchni: bieżnej cylindra GGL a) etap I b) etap 2 oraz powierzchni przylgni zaworowych c) etap I d) etap II wg M. Zimmermann.....	129
Rys.12.15.	Wyniki badań uzyskane dla okresu stabilizacji z wyznaczonymi zależnościami pomiędzy rejestrowanymi wartościami odchylenia pomiaru od luzu nominalnego, a szacowanym dystansem pokonanym przez badany pojazd.....	131
Rys. 12.16.	Średnie arytmetyczne odchylen od wartości nominalnej luzów zaworowych z podziałem na rodzaj powierzchni przylgni z 95% przedziałami ufności.....	132
Rys.12.17.	Prognozowane dalsze odchylenie luzu zaworowego od wartości nominalnej w zależności od dystansu pokonanego przez pojazd.....	136
Rys.12.18.	Widok zaworów po eksploatacji w badanej jednostce napędowej dostosowanej do zasilania gazem ziemnym: a) z przylgnią wzmocnioną Fe ₃ Al, b) z przylgnią wzmocnioną Stellite 6.....	141

Spis literatury

- [1]. Raport: Effects of Changes in Natural Gas Prices and Renewable Capital Costs on the Electric Sector in Asia, *Independent Statistics & Analysis*, U.S. Department of Energy, Washington, DC 20585, 2020.
- [2]. J. Moore, S. Henbest, Transport, New Energy Outlook 2020, *Executive Summary*, Detroit, 2020.
- [3]. Raport: Asia became the main export destination for growing U.S. LNG exports in 2020, *Today in Energy - U.S. Energy Information Administration (EIA)*, USA: Costa Mesa CA, 2021.
- [4]. Raport: A review of prospects for natural gas as a fuel in road transport, *The Oxford Institute for Energy Studies*, Oxford, 2019.
- [5]. S. Yeh, An empirical analysis on the adoption of alternative fuel vehicles, The case of natural gas vehicles. *Energy Policy*, Vol. 35, No. 11, 2007, p. 5865 -5875.
- [6]. Główny Urząd Statystyczny, Transport – activity results in 2019, *Informacje statystyczne*, 2020.
- [7]. Raport: Krajowe ramy polityki rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych, Ministerstwo Energii, Warszawa, 2017.
- [8]. Opracowanie ilościowe dot. pojazdów zasilanych CNG, International Association for Natural Gas Vehicles, <https://www.iangv.org/current-ngv-stats/> (dostęp: 08.01.2020 r.).
- [9]. Opracowanie ilościowe stacji tankowania gazem ziemnym, International Association for Natural Gas Vehicles, http://www.iangv.org/stats/NGV_Global_Stats1.htm (dostęp: 02.07.2019 r.).
- [10]. Raport: Statistical Review of World Energy, Statistical Review of World Energy analyses data on world energy market, *BP Company*, 2020.
- [11]. Obowiązujący akt prawny: Rezolucja MEPC. 320 (74) 2019, Wytyczne dotyczące wdrażania limitu 0,5% zawartości siarki zgodnie z załącznikiem VI Konwencji MARPOL, 2020.
- [12]. Raport: Cleaner energy solutions in a changing environment, *World LNG Report International Gas Union*, 2020.

- [13]. S. Xupeng, H. Malamakkavu, Gas and LNG trading hubs, hub indexation and destination flexibility on East Asia, *Energy Policy*, Vol. 96, 2016.
- [14]. Raport: Emerging Asia LNG demand, *The Oxford Institute for energy studies*, Oxford, 2020.
- [15]. Raport: The LNG industry GIIGNL annual report 2019, *GIIGNL*, 2020.
- [16]. M. Gucma, E. Chłopińska, The impact of a liquefied natural gas terminal on the gas distribution and bunkering network in Poland, *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, Vol. 53, No. 125, 2018.
- [17]. Materiały prasowe grupy Lotos: https://www.lotos.pl/322/p,174,n4887/grupa_kapitalowa/centrum_prasowe/aktualnosci/lotos_i_pgnig_pierwsze_komercyjne_bunkrowanie_statkow_w_polskich_portach_morskich_skroplonym_gazem_ziemiym_lng, (dostęp: 17.11.2019 r.).
- [18]. M. I. Khan, T. Yasmin, A. Shakoar, Technical overview of compressed natural gas as a transportation fuel, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 51, 2015.
- [19]. <https://afdc.energy.gov/fuels/properties>, (dostęp: 18.07.2020r.).
- [20]. Raport: A guide to the lessons learned from the clean cities community electric vehicle readiness projects, *Clean City Report*, U.S. Department of Energy, Washington, 2014.
- [21]. D. A. Wood, S. Mokhtab, J. Y. Mark, J. Valappil, Handbook of Liquefied Natural Gas, *Elsevier*, 2014.
- [22]. M. Sremec, M. Bozica, A. Vucetic, D. Kozarac, Influence of high compression ratio and excess air ratio on performance and emission of natural gas fuelled spark ignition engine, *Thermal Science*, Vol. 22, 2018.
- [23]. Raport: The contribution of natural gas vehicles to sustainable transport, *International Energy Agency*, Paris, 2010.
- [24]. <https://www.iveco.com/poland/collections/catalogues/Documents/Katalog%20EkoGama%20Iveco.pdf>, (dostęp: 12.01.2021 r.).
- [25]. S. Milojević, J. Lukić, R. Pešić, CNG Propulsion system for reducing noise of existing city buses, *Applied Engineering Letters*, Vol. 1, No. 1, 2016.
- [26]. Dyrektywa 2007/46/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 5 września 2007 r. ustanawiająca ramy dla pojazdów silnikowych i ich przyczep oraz

- układów, części i oddzielnych zespołów technicznych przeznaczonych do tych pojazdów, 2007.
- [27]. Rozporządzenie WE nr 443/2009 Parlamentu Europejskiego i Rady Europejskiej określające normy emisji dla nowych samochodów osobowych w ramach zintegrowanego podejścia Wspólnoty na rzecz zmniejszenia emisji CO₂ z lekkich pojazdów dostawczych, Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej, 2009.
- [28]. Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1014/2010 z dnia 10 listopada 2010 r. w sprawie monitorowania i zgłaszania danych dotyczących rejestracji nowych samochodów osobowych, 2010.
- [29]. J. P. Szybist, S. Busch, R. L. McCormick, J. A. Pihl, D. A. Splitter, M. A. Ratcliff, C. P. Kolodziej, J. M.E. Storeya, M. Moses-DeBuska, D. Vuilleumier, M. Sjöberg, C. S. Sluder, T. Rockstroh, P. Miles, What fuel properties enable higher thermal efficiency in spark-ignited engines?, *Progress in energy and combustion science*, Vol. 82, No. 1, 2021.
- [30]. A. Gupta, S. Sharma, S. Narayan, Combustion Engines: An Introduction to their Design, Performance, and Selection, Wiley - Scrivener, Vol. 12, No. 1, 2016.
- [31]. G. Kumar G. Akhil, Conversion of diesel Engine to CNG engine, *International Journal of Science and Research*, Vol. 6, No. 2, 2017.
- [32]. B. F. Yousif, CNG – diesel engine performance and exhaust emission analysis with the aid of artificial neural network. *Applied Energy*, Vol. 87, No. 5, 2010.
- [33]. R. S. Krishna, Conversion of diesel engine to CNG engine of commercial vehicles and emission control. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, Vol. 6, No. 11, 2018.
- [34]. A. Diogo Lopes, J. Silva, A. de Oliveira, R. Augusto, P. Filleti, J.F. G. de Oliveira, E. J. da Silva, A. R. Ometto, Life Cycle Assessment in automotive sector: A case study for engine valves towards cleaner production, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 184, 2018.
- [35]. A. Hornik, Rozprawa doktorska pt.: „Modelowanie obciążeń cieplnych złożenia gniazdo – zawór doładowanego silnika z zapłonem samoczynnym”, *Politechnika Śląska*, Katowice, 2010.
- [36]. Norma PN – EN 10095:2002, Stale i stopy niklu żaroodporne, 2002.
- [37]. S. S. Kim, J. W. Yi, K.W. Lee, J. H. Lee, The design study of ambient assembly of head valve seat. Fall Conf. Proc., *Korean Society of Automotive Engineers*, 2006.

- [38]. W. Matzke, Projektowanie rozrządu silników trakcyjnych, *Wydawnictwo Komunikacji i Łączności*, Warszawa, 1989.
- [39]. W. Matzke, Konstrukcja rozrządu silników szybkoobrotowych, *Wydawnictwo Komunikacji i Łączności*, Warszawa 1974.
- [40]. R. Lewis, Wear of diesel engine valves and seats. PhD thesis, University of Sheffield, 2000.
- [41]. R. Lewis, R. S. Dwyer – Joyce, Combating automotive engine recession, *Tribology and Lubrication Technology*, Vol. 59, No. 10, 2003.
- [42]. Y. S. Wang, J. M. Narasimhan, J. Larson, J. Larson, G. Barber, The effect of the operating conditions on heavy duty engine valve seat wear, *Wear Journal*, Vol. 201, No. 1-2, 1996.
- [43]. Y. S. Wang, J. M. Narasimhan, J. M. Larson, S. K. Schaefer, Wear and wear mechanism simulation of heavy-duty engine intake valve and seat inserts, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 7, No.1,1998.
- [44]. X. Liang, G. Strong, D. Eickmeyer, K. Myers, A study of valve seat insert wear mechanisms, *SAE Technical Paper Series*, 1999.
- [45]. P. Forsberg, P. Hollman, S. Jacobson, Wear mechanism study of exhaust valve system in modern heavy duty combustion engines, *18th Conference on wear of materials*, Vol. 271, No. 9, 2011.
- [46]. R. Lewis, R. S. Dwyer-Joyce, Wear of Diesel Engine Inlet Valves and Seat Inserts, *Journal of Automobile Engineering*, Vol. 216, No. 3, 2002.
- [47]. O. Lehmann, M. Scherge, A. Renz, Wear mechanism study of Stellite -hardfaced combustion inlet valve spindles in lean-burn large bore gas engines, *9th Dessau Gas Engine Conference*, 2015.
- [48]. R. Zhao, G. C. Barber, Y. S. Wang, J. E. Larson, Wear mechanism analysis of engine exhaust valve seats with a laboratory simulator, *Tribology Transactions*, Vol. 40, No.2, 2008.
- [49]. K. Chun, J. Kim, J. Hong, A study of exhaust valve and seat insert wear depending on cycle numbers, *16th International Conference on Wear of Materials*, Vol. 263, No. 7 - 12, 2007.
- [50]. T. Ootani, N. Yahata, A. Fujiki, A. Ehira, Impact wear characteristics of engine valve and valve seat insert materials at high temperature (impact wear tests of

- austenitic heat-resistant steel SUH36 against Fe-base sintered alloy using plane specimens), *Wear Journal*, Vol. 188, No. 1 – 2, 1995.
- [51]. E. F. De Wilde, Investigation of engine exhaust valve wear, *Wear Journal*, Vol. 10, No. 3, 1967.
- [52]. K. Chun, J. Kim, J. Hong, A study of exhaust valve and seat insert wear depending on cycle numbers, *16th international conference on wear of materials*, Vol. 263, No. 7 - 12, 2007.
- [53]. A. Renz, D. Kurten, O. Lehmann, Wear of hardfaced valve spindles in highly loaded stationary lean-burn large bore gas engines, *21st International Conference on wear of materials*, Vol. 376 – 377, No. B, 2017.
- [54]. C. U. Kim, Review on technology trend of valve seat industries. HMC Internal Report, 2006
- [55]. S. Wiśniewski, Obciążenia cieplne silników tłokowych, *Wydawnictwa Komunikacji i Łączności*, Warszawa, 1972.
- [56]. W. Giles, Valve problems with lead free gasoline, *SAE Technical Paper*, 1971.
- [57]. M. Lane, P. Smith.: Developments in sintered valve seat inserts, *SAE Technical Paper*, 1982.
- [58]. R. Liu¹, Q. Yang, F. Gao, Tribological Behavior of Stellite 720 Coating under Block-on-Ring Wear Test, *Materials Sciences and Applications*, Vol. 3, No. 11, 2012.
- [59]. M. I. Khan, M. A. Khan, A. Shakoor, A failure analysis of the exhaust valve from a heavy duty natural gas engine, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 85, No. 1, 2018.
- [60]. I. Komorska, Z. Stanik, Diagnozowanie uszkodzenia zaworu wylotowego silnika spalinowego na podstawie analizy falowej drgań, *Silniki spalinowe*, Vol. 50, No. 3, 2011.
- [61]. M. Brauss, J. Hiltz, Diesel engine valve failures, *56th Meeting the Society for Machinery Failure Prevention Technology*, Virginia Beach, Virginia, USA, 2002.
- [62]. <https://www.ms-motorservice.com/pl/technipedia/post/uszkodzenia-zaworow-i-ich-przyczyny/> (dostęp: 10.06.2020 r.).

- [63]. V. Mallikarjuna, S. MD. Jameel, K. Rajesh, Process Improvement in the Manufacturing of Engine Valve, *International Journal of Advanced Engineering research and science*, Vol. 3, No. 10, 2016.
- [64]. A. Ludu, Dual fuel engine technology trends, *6th AVL Large Engine TechDays*, 2014.
- [65]. R. Jendrzewski, A. Conde, J. De Damborenea, G. Śliwiński, Characterisation of the laser-clad stellite layers for protective coatings, *Materials and Design*, Vol. 23, No. 1, 2002.
- [66]. Grant KBN - 015721 4TO8C 06224, Opracowanie warunków technologicznych napawania laserowego i plazmowego proszkami na osnowie kobaltu, przylgni grzybków zaworów ze stali X40CrSiMo10-2 oraz wykonanie partii próbnej zaworów – sprawozdanie.
- [67]. H. Kawana, Y. Ichimura, W. Iwata, Development of PVD ceramic coatings for valve seats; Surface and Coatings Technology, *Surface and Coating Technology*, Vol. 86 – 87, No. 86 – 87, 1996.
- [68]. Patent: US 20150203951A1, Alloyed coated workpieces, 2015.
- [69]. Patent: US 8536244B2, Friction lining mixture for a friction material, in particular for brake and clutch linings, 2010.
- [70]. Patent: US 20090078906, Valve with Thin-Film Coating, 2009.
- [71]. K. Garbala, Rozprawa doktorska pt. „Wpływ cech konstrukcyjnych wiatrowej turbiny Savoniusa na jej własności eksploatacyjne”, *Politechnika Śląska*, Katowice, 2014.
- [72]. C. G. Scott A.T. Riga H.Hong, The erosion-corrosion of nickel-base diesel engine exhaust valves, *10th International Conference on Wear of Materials*, Vol. 181 – 183, No. 2, 1995.
- [73]. C. Jia, Q. He, J. Meng, L. Guo, Influence of mechanical alloying time on the properties of Fe₃Al intermetallics prepared by spark plasma sintering, *Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material*, Vol. 14, No.4, 2007.
- [74]. I. Baker, D. J. Gaydosh, Dynamic recrystallization and grain boundary migration in B2 FeAl, *Metallography*, Vol. 20, No. 3, 1987.

- [75]. R. E. Schafrik, A Perspective on Intermetallic Commercialization for Aero – Turbine Application Structural Intermetallics, *3rd international symposium intermetallics*, 2001.
- [76]. B. Szczucka – Lasota, Korozja wysokotemperaturowa powłok z fazami międzymetalicznymi z układu Fe-Al i Ni-Al, *Politechnika Śląska*, Katowice 2004.
- [77]. M. S. Hasan, M. A. Mazid, R.E. Clegg, The Basics of Stellites in Machining Perspective, *International Journal of Engineering Materials and Manufacture*, Vol. 1, No. 2, 2016.
- [78]. Z. Bojar, W. Przetakiewicz, Materiały metalowe z udziałem faz międzymetalicznych, *BEL studio sp. z o. o.*, Warszawa 2006.
- [79]. I. Baker Y. Yang, Recrystallization of FeAl and Ni₃Al with and without boron, *Scripta Materialia*, Vol. 34, No. 5, 1996.
- [80]. C. Sendrowski, Żelazowo – aluminiowe intermetaliczne systemy powłokowe uzyskiwane z naddźwiękowego strumienia metalizacyjnego, *BEL studio sp. z o. o.*, Warszawa 2015,
- [81]. B. Formanek, B. Szczucka-Lasota, Odporność na korozję wysokotemperaturową natryskiwanych metodą HVOF powłok z fazą międzymetaliczną NiAl, *Ochrona przed korozją*, Vol. 10, 2007.
- [82]. H. Bułgacki, M. Smajdor, Mechanical properties of abrasion-resistant hardox 400 steel and their welded joints, *Advances in Materials Science*, Vol. 2, No. 4, 2003.
- [83]. S. Spadło, D. Krajciarz, P. Młynarczyk, A comparison of laser cutting and water – jet cutting, *Journal of Archimedes in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 66, No. 2, 2014.
- [84]. J. Lewandowski, D. Rozumek, Non – destructive methods in the test on welded joints of the rotor fan, *Welding Technology Review*, Vol. 86, No. 4, 2014.
- [85]. PN - EN ISO 17635:2017 – 02, Badania nieniszczące spoin – zasady ogólne dotyczące metali, 2017.
- [86]. PN - EN ISO 17636-2:2013 – 06, Badania nieniszczące spoin, badania radiograficzne – część 2: Techniki promieniowania X i gamma z detektorami cyfrowymi, 2013.
- [87]. PN – EN ISO 6520 – 1:2009, Spawanie i procesy pokrewne, klasyfikacja geometrycznych niezgodności spawalniczych w metalach, część 1: Spawanie, 2009.

- [88]. PN - EN ISO 5817:2014 – 05, Spawanie - złącza spawane ze stali, niklu, tytanu i ich stopów (z wyjątkiem spawanych wiązek). Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych, 2018.
- [89]. Norma PN - EN ISO 17638:2017 – 01, Badania nieniszczące spoin, badanie magnetyczno – proszkowe, 2017.
- [90]. PN - EN ISO 5827:2014 – 05, Poziomy jakości według niezgodności spawalniczych, 2018.
- [91]. B. Nowicki, R. Pierzynowski, S. Spadło,; Investigation of electro-discharge mechanical dressing (EDMD) of diamond abrasive wheels with conductive bonds using brush electrodes, *Pro-ceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 220, No. 3, 2006.
- [92]. R. Filipowski, M. Marciniak, Techniki obróbki mechanicznej i erozyjnej, *Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej*, 2010.
- [93]. D. Oniszczyk – Świercz, Wycinanie elektroerozyjne – wpływ zjawisk fizycznych na geometrię obrabianych przedmiotów, *konferencja naukowa: Szkoła Naukowa Obróbek Elektroerozyjnych 2015*, Vol. 88, No. 12, 2015.
- [94]. PN-EN ISO 6507-01:2018-05, Pomiar twardości metodą Vickersa – część 1: Metody Badania, 2019.
- [95]. P. Twigg, Science for Motor Vehicle Engineers, Butterworth-Heinemann, 1996, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-092868-5.50013-7>.
- [96]. Lee, K.W., Yeom, D.J. Establishment of an installation process of a valve seat to a cylinder head using the cae technique. *Int. J. Automot. Technol.* Vol.13, 2012. <https://doi.org/10.1007/s12239-012-0067-7>
- [97]. D. T., Gervásio, E. C. Rodrigues, and C. E. Lima, Cylinder head valve seats insertion simulation using finite elements non-linear dynamic explicit method. *SAE World Cong.SAE*, No. 2010-36-0095, Detroit, USA. 2010.
- [98]. B. Szczucka-Lasota, W. Tarasiuk, K. Garbala, P. Cybulko, W. Majewski, Comparison of the intensity of abrasive wear of Stellite 6 and Fe₃Al, W: A.Ślaskowski i in.: *Transport problems 2020. XII International scientific conference, IX International symposium of young researchers*, Katowice. *Proceedings, dysk optyczny (CD-ROM)* s. 770-775.
- [99]. B. Szczucka-Lasota, T. Węgrzyn, B. Łazarz, T. Szymczak, A. Jurek, K.I. Wilczyński, P. Cybulko, MAG welding process for S700MC steel, in: Ed. Marian

- A. Giżejowski et al., Modern Trends in Research on Steel, Aluminium and Composite Structures, . *Taylor and Francis*, London and New York, 2021
- [100]. K. Siczek, Tribological Processes in the Valve Train Systems with Lightweight Valves, 1st Edition, Butterworth-Heinemann, 2016
- [101]. L. A. Breda Mascarenhas, J. de Oliveira Gomes, A. Teixeira Portela, Cristiano Vasconcellos Ferreira, Reducing the Development Life Cycle of Automotive Valves and Seat Valves Using a New Workbench for High Temperature Wear Testing, *Procedia CIRP*, Vol. 29, 2015
- [102]. M. Rychter, Monitorowanie silnika o zapłonie samoczynnym w systemie OBD na podstawie emisji spalin w kontekście poprawy właściwości ekologicznych silnika, Rozprawa doktorska, 2004, *Politechnika Poznańska*, Poznań.
- [103]. J. Merkisz, M. Rychter „OBD II system as a future diagnostic methods of vehicles, *Eksploatacja i niezawodność*, 1, 2002.
- [104]. J. Merkisz , M. Jacyna, M. Andrzejewski , J. Pielecha, A. Merkisz - Guranowska., Prędkość jazdy samochodem a emisja substancji szkodliwych w spalinach, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport: Środki i infrastruktura transportu*, Vol. 98, 2013.
- [105]. J. Lasocki, Ocena cyklu istnienia samochodu ze względu na jego eksploatację, rozprawa doktorska, *Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Politechnika Warszawska*, 2014.
- [106]. T. Szczepański, Metoda oceny użytkowych właściwości silnika spalinowego w stanach dynamicznych, rozprawa doktorska, *Wydział Samochodów i Maszyn Roboczych, Politechnika Warszawska*, 2015.
- [107]. M. Zimmermann, Vorlesung Schadensanalyse Reibung und Verschleiß, Technische Universität Dresden, pp. 1-58 dostępne na <https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ifww/wpc/ressourcen/dateien/verschleiss?lang=en> (dostęp 2.05.2021)
- [108]. C. A. Rocha, W. F. Sales, C. Sperb de Barcellos, A. M. Abrão, Evaluation of the wear mechanisms and surface parameters when machining internal combustion engine valve seats using PCBN tools, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 145, No 3, 2004.
- [109]. Peter J. A , Wear model for diesel engine exhaust valves, *Blau Materials Science and Technology*, U.S. Department of Energy, Report of the United States Government, 2009.

- [110]. Wang, Y.S., Narasimhan, S., Larsen, J.M., Larson, J.E. and Barber, G.C. The Effect of Operating Conditions on Heavy Duty Engine Valve Seat Wear. *Wear*, Vol. 201, 1996.
- [111]. K. J. Chun, J. H. Lim, and J. S. Hong , A study of exhaust valve and seat insert wear depending on cycle numbers, *Wear*, Vol. 263, 2007.
- [112]. X. Liang, G. Strong, D. Eickmeyer, K. Myers , A Study of Valve Seat Insert Wear Mechanizmy, SAE Paper 1999-01-3673, *Soc. of Automotive Engineers*, Warrendale, PA, 12 , 1999.
- [113]. G. Roth, Fatigue Analysis Methodology for Predicting Engine Valve Life, SAE Paper 2003-01-0726, *Soc. of Automotive Engineers*, Warrendale, PA, 2003.
- [114]. M. J. Malatesta, G. C. Barber, J. M. Larson i S. L. Narasimhan, Development of a Laboratory Bench Test to Simulate Seat Wear of Engine Poppet Valves, *Tribology Trans.*, Vol. 35, 1993.
- [115]. Y. S. Wang, S. K. Schaefer, C. Bennett i G. C. Barber, Wear Mechanisms of Valve Seat and Insert in Heavy Duty Diesel Engine, SAE Paper No. 952476, *Soc. of Automotive Engineers*, Warrendale PA, 1995.
- [116]. S. K. Schaefer, J. M. Larsen, L. F. Jenkins i Y. Wang , Evolution of Heavy Duty Engine, Valves - Materials and Design, in: [H. A. Bolton i J. M. Larsen, Valvetrain System Design and Materials], ASMn International, Materials Park, Ohio, 1997.
- [117]. K. Garbala, P. Cybulko, Właściwości struktury oraz analiza porównawcza mikrotwardości przylgni zaworu wydechowego wzmocnianej stali Inconel oraz fazą międzymetaliczną Fe₃Al. *Apar. Bad. Dydak.* Vol. 25, No 3, 2020
- [118]. K. M. Adhe, V. Kain, K. Madangopal, H. S. Gadiyar , Influence of sigma-phase formation on the localized corrosion behavior of a duplex stainless steel, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol.5, 1996.
- [119]. C. Issartel, H. Buscail, E. Caudron, i Influence of yttrium as alloying element on the oxidation at 1100°C of a model alumina-forming alloy, *Matériaux & Techniques*, Vol. 91, No.7-8-9, 2003.
- [120]. B.A. Pint, Experimental observations in support of the dynamic-segregation theory to explain the reactive-element effect, *Oxidation of Metals*, Vol. 45, No 1-2, 1996.

- [121]. S. L. Narasimhan, J. M. Larson, and E. P. Whelan Wear characterization of new nickel-base alloys for internal combustion engine valve SEAT applications, *Wear*, Vol. 74, 1981
- [122]. C.H. Xu, Y.Wu, Q.Li, Oxidation behaviour of FeAl intermetallics. The effects of Y and/or Zr on isothermal oxidation kinetics, *Intermetallics*, Vol. 8, No 7, 2000.
- [123]. S. Gedevanishvili , S.C. Deevi, The effect of ZrO₂ grinding media on the attrition milling of FeAl with Y₂O₃, *Materials science and engineering, A* Vol 369, No 1-2, 2004
- [124]. R. Lewis and R. S. Dwyer-Joyce, Design Tools for Prediction of Valve Recession and Solving Valve/Seat Failure Problems, SAE Paper 2001-01-1987, *Soc. of Automotive Engineers*, Warrendale, PA, 2001.
- [125]. T. Slatter, R. Lewis, and R. S. Dwyer-Joyce, Valve Recession Modelling, SAE Paper 2006-01-0365, *Soc. of Automotive Engineers*, Warrendale, PA, 2006

ZAŁĄCZNIK 1	
Zmniejszenie zużycia zaworów wydechowych w silnikach spalinowych zasilanych paliwami CNG/LNG z wykorzystaniem faz międzymetalicznych Fe – Al	Strona 1z 6
Badania tribologiczne- formularz	

Wyniki badań tribologicznych dla kolejnych dziesięciu grup pomiarowych próbek Stellite 6 i Fe₃Al prowadzonych zgodnie z metodyką przedstawioną w rozdziale 10.2. A rozprawy

A) Współczynnik tarcia:

Grupa pomiarów 1

Stellite 6	Fe ₃ Al
0,77	0,56
0,66	0,64
0,65	0,69
0,72	0,62
0,75	0,67
0,66	0,68
0,68	0,6
0,64	0,62
0,69	0,64
0,73	0,69
0,70	0,64

średnia:

Grupa pomiarów 2

Stellite 6	Fe ₃ Al
0,79	0,58
0,66	0,65
0,74	0,67
0,66	0,64
0,73	0,56
0,68	0,68
0,7	0,62
0,65	0,64
0,72	0,65
0,75	0,64
0,71	0,63

Grupa pomiarów 3

Stellite 6	Fe ₃ Al
0,73	0,58
0,7	0,66
0,74	0,68
0,71	0,6
0,73	0,65
0,64	0,61
0,73	0,59
0,66	0,6
0,65	0,66
0,66	0,68
0,70	0,63

Grupa pomiarów 4

Stellite 6	Fe ₃ Al
0,63	0,62
0,68	0,64
0,69	0,65
0,75	0,69
0,76	0,62
0,68	0,64
0,69	0,69
0,74	0,65
0,72	0,57
0,73	0,58
0,71	0,64

średnia:

Grupa pomiarów 5

Stellite 6	Fe ₃ Al
0,65	0,62
0,77	0,67
0,76	0,68
0,74	0,6
0,65	0,65
0,68	0,66
0,73	0,62
0,69	0,57
0,71	0,65
0,75	0,67
0,71	0,64

Grupa pomiarów 6

Stellite 6	Fe ₃ Al
0,65	0,61
0,64	0,63
0,78	0,64
0,76	0,6
0,69	0,65
0,66	0,69
0,67	0,61
0,77	0,63
0,71	0,69
0,69	0,64
0,70	0,64

ZAŁĄCZNIK 1	
Zmniejszenie zużycia zaworów wydechowych w silnikach spalinowych zasilanych paliwami CNG/LNG z wykorzystaniem faz międzymetalicznych Fe – Al	Strona 2 z 6
Badania tribologiczne- formularz	

Grupa pomiarów 7

Stellit 6	Fe ₃ Al
0,76	0,58
0,64	0,64
0,67	0,69
0,72	0,61
0,76	0,68
0,65	0,71
0,68	0,64
0,66	0,63
0,67	0,62
0,79	0,59
średnia: 0,70	0,64

Grupa pomiarów 8

Stellit 6	Fe ₃ Al
0,75	0,65
0,65	0,66
0,65	0,69
0,73	0,63
0,75	0,58
0,72	0,68
0,77	0,58
0,66	0,62
0,65	0,66
0,7	0,69
średnia: 0,70	0,64

Grupa pomiarów 9

Stellit 6	Fe ₃ Al
0,77	0,68
0,65	0,59
0,7	0,58
0,72	0,66
0,7	0,57
0,69	0,68
0,71	0,68
0,64	0,62
0,69	0,64
0,71	0,65
średnia: 0,70	0,64

Grupa pomiarów 10

Stellit 6	Fe ₃ Al
0,75	0,61
0,75	0,63
0,69	0,68
0,66	0,65
0,73	0,59
0,71	0,61
0,66	0,62
0,73	0,56
0,69	0,64
0,64	0,69
średnia: 0,70	0,63

ZAŁĄCZNIK 1	
Zmniejszenie zużycia zaworów wydechowych w silnikach spalinowych zasilanych paliwami CNG/LNG z wykorzystaniem faz międzymetalicznych Fe – Al	Strona 3 z 6
Badania tribologiczne- formularz	

B) Zużycie ściernie

Grupa pomiarów 1

Stellit 6	Fe ₃ Al
1583	1037
1530	1461
1499	1487
1488	1546
1681	1468
1624	1511
1556	1455
1498	1408
1545	1487
1637	1494
średnia:	1564
	1435

Grupa pomiarów 2

Stellit 6	Fe ₃ Al
1480	1033
1430	1359
1687	1390
1488	1443
1584	1384
1621	1411
1453	1352
1498	1305
1441	1385
1534	1401
średnia:	1522
	1381

Grupa pomiarów 3

Stellit 6	Fe ₃ Al
1654	1411
1598	1335
1569	1556
1559	1621
1646	1221
1695	1283
1627	1434
1467	1483
1417	1561
1675	1461
średnia:	1591
	1437

Grupa pomiarów 4

Stellit 6	Fe ₃ Al
1567	1222
1514	1347
1628	1473
1523	1532
1665	1303
1658	1347
1540	1393
1533	1394
1629	1473
1421	1431
średnia:	1568
	1410

Grupa pomiarów 5

Stellit 6	Fe ₃ Al
1681	1496
1433	1185
1500	1416
1477	1351
1681	1370
1468	1490
1687	1490
1688	1486
1585	1492
1687	1460
średnia:	1570
	1424

Grupa pomiarów 6

Stellit 6	Fe ₃ Al
1570	1525
1578	1376
1630	1457
1548	1568
1686	1531
1624	1311
1546	1455
1688	1498
1555	1487
1537	1434
średnia:	1596
	1464

ZAŁĄCZNIK 1	
Zmniejszenie zużycia zaworów wydechowych w silnikach spalinowych zasilanych paliwami CNG/LNG z wykorzystaniem faz międzymetalicznych Fe – Al	Strona 4 z 6
Badania tribologiczne- formularz	

Grupa pomiarów 7

Stellit 6	Fe ₃ Al
1593	1414
1555	1391
1581	1449
1530	1484
1646	1408
1611	1249
1600	1490
1619	1459
1597	1584
1588	1453
średnia:	1592 1441

Grupa pomiarów 8

Stellit 6	Fe ₃ Al
1488	1261
1624	1546
1498	1511
1537	1498
1583	1468
1499	1584
1681	1537
1456	1399
1545	1461
1530	1485
średnia:	1544 1475

Grupa pomiarów 9

Stellit 6	Fe ₃ Al
1584	1235
1592	1558
1499	1490
1505	1541
1614	1468
1671	1403
1586	1460
1498	1119
1542	1587
1670	1594
średnia:	1576 1446

Grupa pomiarów 10

Stellit 6	Fe ₃ Al
1530	1498
1573	1485
1493	1432
1497	1452
1645	1161
1637	1446
1512	1513
1436	1436
1689	1630
1692	1582
średnia:	1570 1464

ZAŁĄCZNIK 1	
Zmniejszenie zużycia zaworów wydechowych w silnikach spalinowych zasilanych paliwami CNG/LNG z wykorzystaniem faz międzymetalicznych Fe – Al	Strona 5 z 6
Badania tribologiczne- formularz	

C) Pomiar temperatury:

Grupa pomiarów 1

Stellit 6	Fe ₃ Al
43,9	44,2
52,7	48,1
55,0	43
44,5	45,3
48,9	50,4
47,1	38,2
56,3	39,8
47,1	44,3
53,6	47,9
43,2	41,3
średnia:	49,2 44,3

Grupa pomiarów 2

Stellit 6	Fe ₃ Al
44,9	44,5
53,1	45,3
54	50,2
43,1	45,4
44,7	42,5
56,4	51
57,3	46,2
52,5	46,5
44,8	37,1
45,2	38,4
średnia:	49,6 44,7

Grupa pomiarów 3

Stellit 6	Fe ₃ Al
53,7	43,8
52,1	45,2
55,6	47,8
47,9	39,7
51,6	42,9
44,1	47,6
55,5	45,6
48,7	46,7
43,8	37,8
44,2	39,7
średnia:	49,7 43,7

Grupa pomiarów 4

Stellit 6	Fe ₃ Al
49,2	43,8
42,5	44,2
49,6	49,8
52,6	38,7
53,2	42,7
48,1	49,7
55,5	45,6
49,7	46,7
43,8	36,2
46,2	38,7
średnia:	49,0 43,6

Grupa pomiarów 5

Stellit 6	Fe ₃ Al
44,0	40,1
47,5	46
52,4	41,7
55,1	44,2
46,0	49,1
45,4	42,2
55,4	50,1
44,8	46,3
51,1	39,4
51,6	47,3
średnia:	49,3 44,6

Grupa pomiarów 6

Stellit 6	Fe ₃ Al
47,9	43,0
47,4	45,1
51,3	47,6
51,2	37,8
50,2	44,9
44,5	48,5
51,8	47,2
48,7	45,7
47,5	35,7
49,3	44,3
średnia:	49,0 44,0

ZAŁĄCZNIK 1	
Zmniejszenie zużycia zaworów wydechowych w silnikach spalinowych zasilanych paliwami CNG/LNG z wykorzystaniem faz międzymetalicznych Fe – Al	Strona 6 z 6
Badania tribologiczne- formularz	

Grupa pomiarów 7		Grupa pomiarów 8		Grupa pomiarów 9	
Stellit 6	Fe ₃ Al	Stellit 6	Fe ₃ Al	Stellit 6	Fe ₃ Al
51,4	43,2	49,3	50,8	46,3	47,8
47,6	46,3	41,9	44,3	48,7	44,8
43,2	44,8	53,1	45,2	42,6	40,3
48,9	48,2	50,2	35,4	47,9	39,8
53,1	42,9	51,2	44,1	52,9	47,5
50,2	49,8	51,9	50,8	48,3	47,6
51,2	42,5	52,3	44,3	52,4	46,2
50,2	44,7	46,9	45,2	51,3	45,1
44,4	45,2	50,1	35,4	49,2	39,3
52,1	33,3	47,8	44,1	52,7	44,6
średnia :	49,2 44,1	49,5 44,0		49,2 44,3	
Grupa pomiarów 10					
Stellit 6	Fe ₃ Al				
50,2	43,2				
50,4	45,1				
47,7	45,6				
49,1	48,0				
52,3	44,9				
48,9	50,8				
47,2	44,3				
50,2	45,2				
47,8	35,4				
51,2	44,1				
średnia:	49,5 44,7				

Uzyskane wyniki badań tribologicznych charakteryzują się bardzo małym rozrzutem w związku z tym na podstawie danych literaturowych i norm dotyczących badań tribologicznych nie ma potrzeby przeprowadzać analizy statystycznej. Wyniki jednoznacznie wskazują na mniejsze zużycie tribologiczne fazy Fe₃Al.

ZAŁĄCZNIK 2

Zmniejszenie zużycia zaworów wydechowych
w silnikach spalinowych zasilanych paliwami
CNG/LNG z wykorzystaniem faz
międzymetalicznych Fe - Al

Strona | 1 z 3

Certyfikat WPQR

TÜV Thüringen e.V. Notifizierte Stelle nach Druckgeräterichtlinie 2010/29/EG Notified Body for Pressure Equipment 2010/29/EG			
ZERTIFIKAT - CERTIFICATE - ŚWIADCTWO IM GELTUNGSBEREICH DER RICHTLINIE 2014/68/EU ANHANG I 3.1.2 IN THE SCOPE OF DIRECTIVE 2014/68/EU ANNEX I 3.1.2 W ZAKRESIE DYREKTYWY 2014/68/UE ZAŁĄCZNIK I 3.1.2			
Qualifizierung eines Schweißverfahrens Welding Procedure Qualification Record (WPQR) Protokół Kwalifikowania Technologii Spawania (WPQR)			
Zertifikat-Nr. / Certificate No. / Świadectwo Badania Nr.:		PL06/208269/21	
WPS-Nr. / WPS-No. / WPS nr.:		141/Fe3Al	
Zertifizierungsstelle / Certification body / Jednostka certyfikacyjna:		TÜV Thüringen e.V.	
Hersteller / Manufacturer / Wytwórca:		Piotr Cybulko	
Anschrift / Address / Adres:		ul. Władysława 5B/45 PL 15-327 Białystok	
Prüfgrundlagen / Specifications / Prospec. norma dotycząca badań:		EN ISO 15614-7: 2020	
Datum der Schweißung / Date of welding / Data spawania:		24.05.2021	
Schweißprozess / Welding process / Proces(-y) spawania:		141 (MIG / TIG / TIG)	
Nahtart / Type of joint / Typ złącza:		Hartauftragung an der Blech / Hard facing up plate / Napawanie utwardzające na blachę (Siehe / See / Patrz: 6.4.3 (EN ISO 15614-1))	
Nahtform / Form of joint / Szeregły złącza:		Blech / Plate / Blacha	
Grundwerkstoff(e) / Parent material(s) / Materiały podstawowe:		st	
Dicke des Grundwerkstoffes / Parent metal thickness / Grubość materiału podstawowego (mm):		ISO/TR 15635: — mit/with/ z — (Siehe / See / Patrz: Tab. 5 (EN ISO 15614-1))	
Von / From / Od:		1,30	
Bis / To / Do:		7,00	
Schweißgütekriter / Deposited weld metal thickness / Grubość spawy (mm):		—	
Nennstärke / Nominal thickness / Grubość spawiny (nomin.) (mm):		—	
Außendurchmesser / Outside diameter / Średnica zewnętrzna (mm):		—	
Anwendungstemperatur / Application temperature / Temperatura pracy (°C):		Wie Grund- bzw. Zusatzwerkstoff, jedoch nicht tiefer als / As base or weld metal respectively, however not lower than / Jak materiał podstawowy oraz spoiny, jednakże nie niższa niż: 20	
Art des Zusatzwerkstoffes / Filler metal type / Rodzaj materiału dodatkowego:		(S) Massivdrahtelektrode, -stab / Solid wire electrode, rod / Drut lit., pręt	
Werkstoff-Nr. / Material-No. / Oznaczenie:		Fe3Al	
Normbezeichnung / Standard designation / Oznaczenie normowe:		EN ISO 14175: II	
Schutzgas / Shielding gas / Gaz osłonowy:		—	
Wurzelschutzgas / Backing gas / Gaz formujący:		—	
Schweißpositionen / Welding position / Pozycja spawania:		PA und/and/ i (Siehe / See / Patrz: 6.5.2 (EN ISO 15614-7))	
Vorwärmung / Preheat / Temperatura podgrzewania wstępno (°C):		min. —	
Stromart / Type of welding current / Rodzaj prądu spawania i biegunowość:		Zwischenlegtemperatur / Interpass Temperature / Temperatura międzydogoski (°C): max. —	
Wärmeeinbringung / Heat input / Rodzaj wprowadzonego ciepła (J/mm):		DC (-)	
Wärmehandhabung / Post weld heat treatment / Obróbka cieplna po spawaniu:		Von / From / Od: 0,14 Bis / To / Do: 1,26	
Sonstige Angaben / Other information / Inne informacje:		—	
Ergänzungen und Veränderungen mittels Nachtragungen sind in AQ 0030 WP 21.1, 21.2, 21.3 und WP 22.1, 22.2, 22.3, 22.4, 22.5, 22.6, 22.7, 22.8, 22.9, 22.10, 22.11, 22.12, 22.13, 22.14, 22.15, 22.16, 22.17, 22.18, 22.19, 22.20, 22.21, 22.22, 22.23, 22.24, 22.25, 22.26, 22.27, 22.28, 22.29, 22.30, 22.31, 22.32, 22.33, 22.34, 22.35, 22.36, 22.37, 22.38, 22.39, 22.40, 22.41, 22.42, 22.43, 22.44, 22.45, 22.46, 22.47, 22.48, 22.49, 22.50, 22.51, 22.52, 22.53, 22.54, 22.55, 22.56, 22.57, 22.58, 22.59, 22.60, 22.61, 22.62, 22.63, 22.64, 22.65, 22.66, 22.67, 22.68, 22.69, 22.70, 22.71, 22.72, 22.73, 22.74, 22.75, 22.76, 22.77, 22.78, 22.79, 22.80, 22.81, 22.82, 22.83, 22.84, 22.85, 22.86, 22.87, 22.88, 22.89, 22.90, 22.91, 22.92, 22.93, 22.94, 22.95, 22.96, 22.97, 22.98, 22.99, 23.00, 23.01, 23.02, 23.03, 23.04, 23.05, 23.06, 23.07, 23.08, 23.09, 23.10, 23.11, 23.12, 23.13, 23.14, 23.15, 23.16, 23.17, 23.18, 23.19, 23.20, 23.21, 23.22, 23.23, 23.24, 23.25, 23.26, 23.27, 23.28, 23.29, 23.30, 23.31, 23.32, 23.33, 23.34, 23.35, 23.36, 23.37, 23.38, 23.39, 23.40, 23.41, 23.42, 23.43, 23.44, 23.45, 23.46, 23.47, 23.48, 23.49, 23.50, 23.51, 23.52, 23.53, 23.54, 23.55, 23.56, 23.57, 23.58, 23.59, 23.60, 23.61, 23.62, 23.63, 23.64, 23.65, 23.66, 23.67, 23.68, 23.69, 23.70, 23.71, 23.72, 23.73, 23.74, 23.75, 23.76, 23.77, 23.78, 23.79, 23.80, 23.81, 23.82, 23.83, 23.84, 23.85, 23.86, 23.87, 23.88, 23.89, 23.90, 23.91, 23.92, 23.93, 23.94, 23.95, 23.96, 23.97, 23.98, 23.99, 24.00, 24.01, 24.02, 24.03, 24.04, 24.05, 24.06, 24.07, 24.08, 24.09, 24.10, 24.11, 24.12, 24.13, 24.14, 24.15, 24.16, 24.17, 24.18, 24.19, 24.20, 24.21, 24.22, 24.23, 24.24, 24.25, 24.26, 24.27, 24.28, 24.29, 24.30, 24.31, 24.32, 24.33, 24.34, 24.35, 24.36, 24.37, 24.38, 24.39, 24.40, 24.41, 24.42, 24.43, 24.44, 24.45, 24.46, 24.47, 24.48, 24.49, 24.50, 24.51, 24.52, 24.53, 24.54, 24.55, 24.56, 24.57, 24.58, 24.59, 24.60, 24.61, 24.62, 24.63, 24.64, 24.65, 24.66, 24.67, 24.68, 24.69, 24.70, 24.71, 24.72, 24.73, 24.74, 24.75, 24.76, 24.77, 24.78, 24.79, 24.80, 24.81, 24.82, 24.83, 24.84, 24.85, 24.86, 24.87, 24.88, 24.89, 24.90, 24.91, 24.92, 24.93, 24.94, 24.95, 24.96, 24.97, 24.98, 24.99, 25.00, 25.01, 25.02, 25.03, 25.04, 25.05, 25.06, 25.07, 25.08, 25.09, 25.10, 25.11, 25.12, 25.13, 25.14, 25.15, 25.16, 25.17, 25.18, 25.19, 25.20, 25.21, 25.22, 25.23, 25.24, 25.25, 25.26, 25.27, 25.28, 25.29, 25.30, 25.31, 25.32, 25.33, 25.34, 25.35, 25.36, 25.37, 25.38, 25.39, 25.40, 25.41, 25.42, 25.43, 25.44, 25.45, 25.46, 25.47, 25.48, 25.49, 25.50, 25.51, 25.52, 25.53, 25.54, 25.55, 25.56, 25.57, 25.58, 25.59, 25.60, 25.61, 25.62, 25.63, 25.64, 25.65, 25.66, 25.67, 25.68, 25.69, 25.70, 25.71, 25.72, 25.73, 25.74, 25.75, 25.76, 25.77, 25.78, 25.79, 25.80, 25.81, 25.82, 25.83, 25.84, 25.85, 25.86, 25.87, 25.88, 25.89, 25.90, 25.91, 25.92, 25.93, 25.94, 25.95, 25.96, 25.97, 25.98, 25.99, 26.00, 26.01, 26.02, 26.03, 26.04, 26.05, 26.06, 26.07, 26.08, 26.09, 26.10, 26.11, 26.12, 26.13, 26.14, 26.15, 26.16, 26.17, 26.18, 26.19, 26.20, 26.21, 26.22, 26.23, 26.24, 26.25, 26.26, 26.27, 26.28, 26.29, 26.30, 26.31, 26.32, 26.33, 26.34, 26.35, 26.36, 26.37, 26.38, 26.39, 26.40, 26.41, 26.42, 26.43, 26.44, 26.45, 26.46, 26.47, 26.48, 26.49, 26.50, 26.51, 26.52, 26.53, 26.54, 26.55, 26.56, 26.57, 26.58, 26.59, 26.60, 26.61, 26.62, 26.63, 26.64, 26.65, 26.66, 26.67, 26.68, 26.69, 26.70, 26.71, 26.72, 26.73, 26.74, 26.75, 26.76, 26.77, 26.78, 26.79, 26.80, 26.81, 26.82, 26.83, 26.84, 26.85, 26.86, 26.87, 26.88, 26.89, 26.90, 26.91, 26.92, 26.93, 26.94, 26.95, 26.96, 26.97, 26.98, 26.99, 27.00, 27.01, 27.02, 27.03, 27.04, 27.05, 27.06, 27.07, 27.08, 27.09, 27.10, 27.11, 27.12, 27.13, 27.14, 27.15, 27.16, 27.17, 27.18, 27.19, 27.20, 27.21, 27.22, 27.23, 27.24, 27.25, 27.26, 27.27, 27.28, 27.29, 27.30, 27.31, 27.32, 27.33, 27.34, 27.35, 27.36, 27.37, 27.38, 27.39, 27.40, 27.41, 27.42, 27.43, 27.44, 27.45, 27.46, 27.47, 27.48, 27.49, 27.50, 27.51, 27.52, 27.53, 27.54, 27.55, 27.56, 27.57, 27.58, 27.59, 27.60, 27.61, 27.62, 27.63, 27.64, 27.65, 27.66, 27.67, 27.68, 27.69, 27.70, 27.71, 27.72, 27.73, 27.74, 27.75, 27.76, 27.77, 27.78, 27.79, 27.80, 27.81, 27.82, 27.83, 27.84, 27.85, 27.86, 27.87, 27.88, 27.89, 27.90, 27.91, 27.92, 27.93, 27.94, 27.95, 27.96, 27.97, 27.98, 27.99, 28.00, 28.01, 28.02, 28.03, 28.04, 28.05, 28.06, 28.07, 28.08, 28.09, 28.10, 28.11, 28.12, 28.13, 28.14, 28.15, 28.16, 28.17, 28.18, 28.19, 28.20, 28.21, 28.22, 28.23, 28.24, 28.25, 28.26, 28.27, 28.28, 28.29, 28.30, 28.31, 28.32, 28.33, 28.34, 28.35, 28.36, 28.37, 28.38, 28.39, 28.40, 28.41, 28.42, 28.43, 28.44, 28.45, 28.46, 28.47, 28.48, 28.49, 28.50, 28.51, 28.52, 28.53, 28.54, 28.55, 28.56, 28.57, 28.58, 28.59, 28.60, 28.61, 28.62, 28.63, 28.64, 28.65, 28.66, 28.67, 28.68, 28.69, 28.70, 28.71, 28.72, 28.73, 28.74, 28.75, 28.76, 28.77, 28.78, 28.79, 28.80, 28.81, 28.82, 28.83, 28.84, 28.85, 28.86, 28.87, 28.88, 28.89, 28.90, 28.91, 28.92, 28.93, 28.94, 28.95, 28.96, 28.97, 28.98, 28.99, 29.00, 29.01, 29.02, 29.03, 29.04, 29.05, 29.06, 29.07, 29.08, 29.09, 29.10, 29.11, 29.12, 29.13, 29.14, 29.15, 29.16, 29.17, 29.18, 29.19, 29.20, 29.21, 29.22, 29.23, 29.24, 29.25, 29.26, 29.27, 29.28, 29.29, 29.30, 29.31, 29.32, 29.33, 29.34, 29.35, 29.36, 29.37, 29.38, 29.39, 29.40, 29.41, 29.42, 29.43, 29.44, 29.45, 29.46, 29.47, 29.48, 29.49, 29.50, 29.51, 29.52, 29.53, 29.54, 29.55, 29.56, 29.57, 29.58, 29.59, 29.60, 29.61, 29.62, 29.63, 29.64, 29.65, 29.66, 29.67, 29.68, 29.69, 29.70, 29.71, 29.72, 29.73, 29.74, 29.75, 29.76, 29.77, 29.78, 29.79, 29.80, 29.81, 29.82, 29.83, 29.84, 29.85, 29.86, 29.87, 29.88, 29.89, 29.90, 29.91, 29.92, 29.93, 29.94, 29.95, 29.96, 29.97, 29.98, 29.99, 30.00, 30.01, 30.02, 30.03, 30.04, 30.05, 30.06, 30.07, 30.08, 30.09, 30.10, 30.11, 30.12, 30.13, 30.14, 30.15, 30.16, 30.17, 30.18, 30.19, 30.20, 30.21, 30.22, 30.23, 30.24, 30.25, 30.26, 30.27, 30.28, 30.29, 30.30, 30.31, 30.32, 30.33, 30.34, 30.35, 30.36, 30.37, 30.38, 30.39, 30.40, 30.41, 30.42, 30.43, 30.44, 30.45, 30.46, 30.47, 30.48, 30.49, 30.50, 30.51, 30.52, 30.53, 30.54, 30.55, 30.56, 30.57, 30.58, 30.59, 30.60, 30.61, 30.62, 30.63, 30.64, 30.65, 30.66, 30.67, 30.68, 30.69, 30.70, 30.71, 30.72, 30.73, 30.74, 30.75, 30.76, 30.77, 30.78, 30.79, 30.80, 30.81, 30.82, 30.83, 30.84, 30.85, 30.86, 30.87, 30.88, 30.89, 30.90, 30.91, 30.92, 30.93, 30.94, 30.95, 30.96, 30.97, 30.98, 30.99, 31.00, 31.01, 31.02, 31.03, 31.04, 31.05, 31.06, 31.07, 31.08, 31.09, 31.10, 31.11, 31.12, 31.13, 31.14, 31.15, 31.16, 31.17, 31.18, 31.19, 31.20, 31.21, 31.22, 31.23, 31.24, 31.25, 31.26, 31.27, 31.28, 31.29, 31.30, 31.31, 31.32, 31.33, 31.34, 31.35, 31.36, 31.37, 31.38, 31.39, 31.40, 31.41, 31.42, 31.43, 31.44, 31.45, 31.46, 31.47, 31.48, 31.49, 31.50, 31.51, 31.52, 31.53, 31.54, 31.55, 31.56, 31.57, 31.58, 31.59, 31.60, 31.61, 31.62, 31.63, 31.64, 31.65, 31.66, 31.67, 31.68, 31.69, 31.70, 31.71, 31.72, 31.73, 31.74, 31.75, 31.76, 31.77, 31.78, 31.79, 31.80, 31.81, 31.82, 31.83, 31.84, 31.85, 31.86, 31.87, 31.88, 31.89, 31.90, 31.91, 31.92, 31.93, 31.94, 31.95, 31.96, 31.97, 31.98, 31.99, 32.00, 32.01, 32.02, 32.03, 32.04, 32.05, 32.06, 32.07, 32.08, 32.09, 32.10, 32.11, 32.12, 32.13, 32.14, 32.15, 32.16, 32.17, 32.18, 32.19, 32.20, 32.21, 32.22, 32.23, 32.24, 32.25, 32.26, 32.27, 32.28, 32.29, 32.30, 32.31, 32.32, 32.33, 32.34, 32.35, 32.36, 32.37, 32.38, 32.39, 32.40, 32.41, 32.42, 32.43, 32.44, 32.45, 32.46, 32.47, 32.48, 32.49, 32.50, 32.51, 32.52, 32.53, 32.54, 32.55, 32.56, 32.57, 32.58, 32.59, 32.60, 32.61, 32.62, 32.63, 32.64, 32.65, 32.66, 32.67, 32.68, 32.69, 32.70, 32.71, 32.72, 32.73, 32.74, 32.75, 32.76, 32.77, 32.78, 32.79, 32.80, 32.81, 32.82, 32.83, 32.84, 32.85, 32.86, 32.87, 32.88, 32.89, 32.90, 32.91, 32.92, 32.93, 32.94, 32.95, 32.96, 32.97, 32.98, 32.99, 33.00, 33.01, 33.02, 33.03, 33.04, 33.05, 33.06, 33.07, 33.08, 33.09, 33.10, 33.11, 33.12, 33.13, 33.14, 33.15, 33.16, 33.17, 33.18, 33.19, 33.20, 33.21, 33.22, 33.23, 33.24, 33.25, 33.26, 33.27, 33.28, 33.29, 33.30, 33.31, 33.32, 33.33, 33.34, 33.35, 33.36, 33.37, 33.38, 33.39, 33.40, 33.41, 33.42, 33.43, 33.44, 33.45, 33.46, 33.47, 33.48, 33.49, 33.50, 33.51, 33.52, 33.53, 33.54, 33.55, 33.56, 33.57, 33.58, 33.59, 33.60, 33.61, 33.62, 33.63, 33.64, 33.65, 33.66, 33.67, 33.68, 33.69, 33.70, 33.71, 33.72, 33.73, 33.74, 33.75, 33.76, 33.77, 33.78, 33.79, 33.80, 33.81, 33.82, 33.83, 33.84, 33.85, 33.86, 33.87, 33.88, 33.89, 33.90, 33.91, 33.92, 33.93, 33.94, 33.95, 33.96, 33.97, 33.98, 33.99, 34.00, 34.01, 34.02, 34.03, 34.04, 34.05, 34.06, 34.07, 34.08, 34.09, 34.10, 34.11, 34.12, 34.13, 34.14, 34.15, 34.16, 34.17, 34.18, 34.19, 34.20, 34.21, 34.22, 34.23, 34.24, 34.25, 34.26, 34.27, 34.28, 34.29, 34.30, 34.31, 34.32, 34.33, 34.34, 34.35, 34.36, 34.37, 34.38, 34.39, 34.40, 34.41, 34.42, 34.43, 34.44, 34.45, 34.46, 34.47, 34.48, 34.49, 34.50, 34.51, 34.52, 34.53, 34.54, 34.55, 34.56, 34.57, 34.58, 34.59, 34.60, 34.61, 34.62, 34.63, 34.64, 34.65, 34.66, 34.67, 34.68, 34.69, 34.70, 34.71, 34.72, 34.73, 34.74, 34.75, 34.76, 34.77, 34.78, 34.79, 34.80, 34.81, 34.82, 34.83, 34.84, 34.85, 34.86, 34.87, 34.88, 34.89, 34.90, 34.91, 34.92, 34.93, 34.94, 34.95, 34.96, 34.97, 34.98, 34.99, 35.00, 35.01, 35.02, 35.03, 35.04, 35.05, 35.06, 35.07, 35.08, 35.09, 35.10, 35.11, 35.12, 35.13, 35.14, 35.15, 35.16, 35.17, 35.18, 35.19, 35.20, 35.21, 35.22, 35.23, 35.24, 35.25, 35.26, 35.27, 35.28, 35.29, 35.30, 35.31, 35.32, 35.33, 35.34, 35.35, 35.36, 35.37, 35.38, 35.39, 35.40, 35.41, 35.42, 35.43, 35.44, 35.45, 35.46, 35.47, 35.48, 35.49, 35.50, 35.51, 35.52, 35.53, 35.54, 35.55, 35.56, 35.57, 35.58, 35.59, 35.60, 35.61, 35.62, 35.63, 35.64, 35.65, 35.66, 35.67, 35.68, 35.69, 35.70, 35.71, 35.72, 35.73, 35.74, 35.75, 35.76, 35.77, 35.78, 35.79, 35.80, 35.81, 35.82, 35.83, 35.84, 35.85, 35.86, 35.87, 35.88, 35.89, 35.90, 35.91, 35.92, 35.93, 35.94, 35.95, 35.96, 35.97, 35.98, 35.99,			

ZAŁĄCZNIK 2	
Zmniejszenie zużycia zaworów wydechowych w silnikach spalinowych zasilanych paliwami CNG/LNG z wykorzystaniem faz międzymetalicznych Fe - Al	Strona 2 z 3
Certyfikat WPQR	

TÜV Thüringen e.V. Prüflabor für Druckgeräte Testing Laboratory of Pressure Equipment			
Qualifizierung eines Schweißverfahrens Welding Procedure Qualification Record (WPQR) Protokół Kwalifikowania Technologii Spawania (WPQR) Prüfbericht (Test Report)			
WPQR-Nr./ WPQR-No./ WPQR nr: PL06208269/21		Seite/ Page/ Strony: 1 von/ of / z 1	
Zertifizierungsstelle/ Certification body/ Jednostka egzaminacyjna: TÜV Thüringen e.V.		Prüf-Nr. / Test No./ Nr. raportu: 485/T/21	
WPS-Nr./ WPS-No./ WPS nr: 141/Fe3Al		Prüfstelle/ Test laboratory/ Laboratorium: GAMMA - MONTEX	
Hersteller/ Manufacturer/ Wytwórca: Piotr Cybulko			
Anschrift/ Address/ Adres: ul. Władysław 5B/45			
PL 15-327 Białystok			
Prüfgrundlagen/ Specifications/ Prospecja, norma dotycząca badań: EN ISO 15614-7: 2020			
Datum der Schweißung/ Date of welding/ Data spawania: 24.05.2021			
Schweißprozess/ Welding process/ Proces(-y) spawania: 141 (WIG / TiG / TiG)			
Nahten/ Type of joint/ Typ złącza: —			
Nahtform/ Form of joint/ Szczegół złącza: Hartauftragung an der Blech / Hard facing up plate / Napawanie utwardzające na blaszce			
Blech / Plate / Blacha			
st			
EN 10090			
H1052M			
Grundwerkstoff(e)/ Parent material(s)/ Materiał(-y) podstawowe: —			
Dicke des Grundwerkstoffes(e)/ Parent material(s) thickness/ Grubość materiału podstawowego [mm]: 3,80			
Kehlnahtdicke/ Throat thickness/ Grubość spoiny pachemowej [mm]: —			
Außendurchmesser/ Outside diameter/ Średnica zewnętrzna rury [mm]: —			
Art des Zusatzwerkstoffes/ Filler metal type/ Rodzaj materiału dodatkowego: (S) Massivdrahtelektrode,-stab / Solid wire electrode, rod / Drut lity, pręt			
Markenbezeichnung/ Trade name / Oznaczenie producenta: Fe3Al			
Normbezeichnung/ Standard designation/ Oznaczenie stopów: Fe3Al			
Schutzgas/ Shielding gas / Gaz osłonowy: EN ISO 14175 - II			
Wurzel Schutzgas/ Backing gas/ Gaz formujący: —			
Schweißpositionen/ Welding position / Pozycja spawania: PA			
Vorwärmung/ Preheat / Temperatura podgrzewania wstępnego [°]: —			
Zwischenlagentemperatur/ Interpass Temperature/ Temperatura międzyzłągien [°]: —			
Stromart/ Type of welding current/ Rodzaj prądu spawania: DC (-)			
Lichtbogenart/ Type of arc/ Sposób przenoszenia: —			
Wärmeeinbringung/ Heat input/ Ilość wprowadzonego ciepła [kJ/mm]: Von/ From/ Od: 0,58		Bis/ To/ Do: 0,68	
Wärmeschmelzbehandlung/ Post weld heat treatment/ Obróbka cieplna po spawaniu: —			
Bemerkungen/ Remarks/ Uwagi: —			
Hiermit wird bestätigt, dass die Prüfungsschweißungen in Übereinstimmung mit der WPS und den Anforderungen der vorbeschriebenen Regeln bzw. Prüfnormen vorbereitet, geschweißt und geprüft wurden. Die gestellten Anforderungen sind erfüllt. Certified that test welds were prepared, welded and tested in accordance with the WPS and the requirements of the rules / testing standards indicated above. The requirements are fulfilled. Potwierdza się, że złącza próbowe zostały przygotowane, spawane i obrabiane zgodnie z WPS oraz wymaganiami / normami badawczymi wskazanymi powyżej. Wymagania zostały spełnione.			
Ort/ Location/ Miejsce testu: Katowice		Datum der Ausstellung/ Date of issue/ Data wystawienia: 25.05.2021	
		Ing. Andrzej Kucharski Prüfer des Prüflabors für Druckgeräte des TÜV Thüringen e.V. The tester of the Laboratory of Pressure Equipment of TÜV Thüringen e.V.	
		Rev. 7	

ZAŁĄCZNIK 2

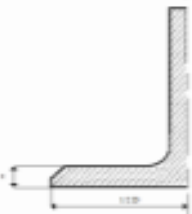
Zmniejszenie zużycia zaworów wydechowych
w silnikach spalinowych zasilanych paliwami
CNG/LNG z wykorzystaniem faz
międzymetalicznych Fe – Al

Strona | **3 z 3**

Certyfikat WPQR

Piotr Cybulko UL Wiadukt 5B/45 15-327 Białystok	WSTĘPNA INSTRUKCJA TECHNOLOGICZNA SPAWANIA (pWPS) <i>Preliminary Welding Procedure Specification (pWPS)</i> №/No 14I/Fe₂Al
--	---

WPQR – Nr : _____ WPQR – No : _____ Materiał podstawowy: <i>Base material:</i> H10S2M wg PN-71/H-86022 oraz EN 10090 + Fe₂Al (napoina) Metoda (-y) spawania: <i>Welding process (-es):</i> 14I wg PN-EN ISO 4063 Norma klasyfikacyjna: <i>Welder's qualification:</i> PN-EN ISO 15614-7	Rodzaj złącza: <i>Joint type:</i> napoina Grubość ścianki (mm): <i>Material thickness:</i> t = 3,8 Srednica (mm): <i>Outside diameter:</i> D = 40 Pozycja spawania: <i>Welding position:</i> PA wg PN-EN ISO 6947
---	--

Kształt rowka / Joint design 	Kolejność spawania / Welding sequences 
---	--

Szczegóły spawalnicze / Welding details:

Kolejność warstw <i>Run</i>	Metoda spawania <i>Process</i>	Ø drutu, elektrody <i>Size of filler metal (mm)</i>	Natężenie <i>Current (A)</i>	Napięcie <i>Voltage (V)</i>	Polaryzacja <i>Polarity</i>	Prędkość spawania <i>Travel speed (mm/min)</i>	Wprowadzone ciepło <i>Heat input (kJ/mm)</i>
1	14I	2,4	60-70	19	DC (-)	70	0,58 – 0,68

Materiały spawalnicze: <i>Filler materials:</i> Fe₂Al (napoina)	Rodzaj podkładki: <i>Backing:</i> _____ Szczegóły Robienia: <i>Details of gascutting:</i> _____ Temperatura podgrzewania (°C): <i>Preheat temperature:</i> _____ Temperatura międzyścięgnowa (°C): <i>Interpass temperature:</i> _____ Suszenie: Topnik (°C): _____ <i>Drying:</i> Flux: _____ Elektroda (°C): _____ <i>Electrode:</i> _____ Elektrody wolframowe: <i>Tungsten electrode:</i> WT 02,4 mm Inne materiały: <i>Other materials:</i> II /100% Ar/ wg PN-EN 14175 Badania NDT: Zgodnie z PN EN ISO 15614-7 <i>Non-destructive:</i> _____ Inne informacje: Koordynujący personel spawalniczy jest odpowiedzialny za dostosowanie parametrów do pozycji spawania, natężenia <i>Other information:</i> i materiałów spawalniczych. The welding coordination personnel, is responsible for the correct parameters, between weld position, current and filler materials.
--	--

Data / Date	24.05.2021	Opracował / Prepared	mgr inż. Piotr Cybulko
Data / Date		Zatwierdził / Approved	



ANNEX
TÜV THÜRINGEN
 TO: _____
 NO: _____
 PAGE: _____ / _____



Streszczenie pracy

mgr inż. Piotr Cybulko

„Zmniejszenie zużycia zaworów wydechowych w silnikach spalinowych zasilanych paliwami CNG/LNG z wykorzystaniem faz międzymetalicznych Fe – Al”

Promotor: dr hab. inż. Bożena Szczucka – Lasota, prof. PŚ.

Promotor pomocniczy: dr inż. Krzysztof Garbala,

Analiza literatury z zakresu wykorzystania gazu ziemnego wskazuje na znaczny przyrost liczby pojazdów zasilanych gazem ziemnym zarówno w transporcie samochodowym jak i morskim. Gaz ziemny ze względu na swoje parametry spalania, działa w znacznie bardziej degradującym stopniu na przyłgnię zaworów wydechowych niż konwencjonalne paliwa płynne. Przyspieszone zużycie przyłgni zaworów prowadzi do spadku stopnia sprężania w cylindrach oraz wymaga częstszej wymiany zaworów w silniku zasilanym gazem ziemnym. Dlatego celem pracy było opracowanie metody zabezpieczenia przyłgni zaworów wydechowych w silniku ZS adaptowanym do zasilania gazem ziemnym przy zastosowaniu fazy międzymetalicznej Fe_3Al .

Realizując założony cel opracowano koncepcję materiałowo – technologiczną, która obejmowała dobór gatunku/rodzaju materiału zabezpieczającego na przyłgnię zaworowe, wybór technologii nanoszenia tego materiału oraz dobór parametrów w tym dobór geometrii materiału spoiwa i sposobu jego obróbki. Przyjęta koncepcja zakładała wytworzenie warstwy zabezpieczającej z fazy międzymetalicznej Fe_3Al metodą TIG na powierzchni stożkowej przyłgni zaworu. Badania wstępne obejmowały dobór parametrów wytwarzania warstw zabezpieczających wolnych od niezgodności spawalniczych. Dobrano geometrię spoiwa oraz parametry prądowo – napięciowe procesu a także jego prędkość. Przeprowadzono badania rentgenograficzne, mające na celu ocenę jakościową wytworzonych napoin.

Analiza literatury i badania wstępne pozwoliły postawić tezę, że **zastosowanie fazy międzymetalicznej Fe_3Al do napawania powierzchni przyłgni zaworowych silników w środkach transportu, adaptowanych do zasilania paliwem CNG/LNG, wpłynie na zwiększenie trwałości jednostki napędowej w warunkach eksploatacji i pozwoli na zmniejszenie częstotliwości regulacji luzu zaworowego.**

W celu udowodnienia tezy przeprowadzono testy laboratoryjne i badania walidacyjne - eksploatacyjne. Testy laboratoryjne obejmowały badania tribologiczne, pomiary twardości oraz badania strukturalne. Celem badań laboratoryjnych było porównanie napoiny wykonanej z fazy międzymetalicznej Fe_3Al z powłoką Stellite, ocenienie jednorodności objętościowej otrzymanej metodą TIG napoiny z fazy

międzymetalicznej oraz określenie właściwości odporności na zużycie ścierne i powtarzalności uzyskiwanych wyników. Wyniki badań metalograficznych makroskopowych, mikroskopowych (LM) oraz mikroskopowych (SEM) oraz mikroanaliza rentgenowską potwierdziły prawidłowość wykonania warstw zabezpieczających na przylgniach zaworów wydechowych.

W pracy omówiono proces dostosowania opracowanej technologii laboratoryjnej wytwarzania warstwy zabezpieczającej do warunków produkcyjnych. Przeprowadzono badania walidacyjne na hamowni silnikowej. Pozytywne rezultaty badań eksploatacyjnych, umożliwiły udowodnienie tezy oraz stanowiły podstawę do zgłoszenia wniosku patentowego nr P.434745 [WIPO ST/10C PL434745], „Sposób podwyższenia odporności ściernej powierzchni elementów konstrukcyjnych”.

Summary

mgr inż. Piotr Cybulko

„Reduction of exhaust valve wear in combustion engines powered by CNG / LNG fuels
with the use of Fe - Al intermetallic phases”

PhD thesis supervisor: dr hab. inż. Bożena Szczucka – Lasota, prof. PŚ.

Auxiliary supervisor: dr inż. Krzysztof Garbala,

An analysis of the literature on the use of natural gas shows a significant increase in the number of vehicles powered by natural gas, both in road and sea transport. Due to its combustion parameters, natural gas acts to a much more degrading degree on the seat of exhaust valves than conventional liquid fuels. Accelerated valve seat wear leads to a decrease in cylinder compression ratio and requires more frequent valve replacement in a natural gas engine. Therefore, the aim of the work was to develop a method of securing the face of exhaust valves in a CI engine adapted to be fed with natural gas using the Fe₃Al intermetallic phase.

Realizing the assumed goal, a material and technological concept was developed, which included the selection of the type of protective material for the valve seat, the selection of the technology for applying this material and the selection of parameters, including the selection of the binder material geometry and the method of its processing. The adopted concept assumed the creation of a protective layer from the Fe₃Al intermetallic phase by the TIG method on the conical surface of the valve seat. The preliminary tests included the selection of parameters for the production of protective layers free from welding imperfections. The geometry of the binder and the current-voltage parameters of the process as well as its speed were selected. X-ray examinations were carried out in order to qualitatively assess the produced padding welds.

The analysis of the literature and preliminary research allowed to formulate the thesis that **the use of the Fe₃Al intermetallic phase for surfacing the valve seat surfaces of engines in means of transport, adapted to be supplied with CNG / LNG fuel, will increase the durability of the drive unit under operating conditions and will allow for a significant reduction in the frequency of valve lash adjustment .**

In order to prove the thesis, laboratory tests and operational validation tests were carried out. Laboratory tests included tribological tests, hardness measurements and structural tests. The aim of the laboratory tests was to compare the padding weld made of the Fe₃Al intermetallic phase with the Stellite coating, to assess the volume homogeneity of the intermetallic phase padding weld obtained by TIG method, and to determine the abrasive wear resistance properties and repeatability of the obtained results. The results of

macroscopic, microscopic (LM) and microscopic (SEM) metallographic tests as well as X-ray microanalysis confirmed the correctness of the implementation of protective layers on the faces of exhaust valves.

The paper discusses the process of adapting the developed laboratory technology for producing a protective layer to the production conditions. The validation tests were carried out on an engine dynamometer. The positive results of the operational tests made it possible to prove the thesis and were the basis for the patent application no. P.434745 [WIPO ST / 10C PL434745], "A method of increasing the abrasive resistance of the surface of structural elements".