

Politechnika Wroclawska
Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn

**Metoda przyśpieszonej oceny
stanu granicznego
elementów mechanicznych**

Seria: PRE 4/2007
Rozprawa doktorska

mgr inż. Katarzyna Topolska

Promotor
Dr hab. inż. Tomasz Nowakowski, prof. PWr

Słowa kluczowe:

1. badania przyśpieszone
2. niezawodność
3. metody ekspertowe
4. teoria Dempstera-Shafera
5. teoria zbiorów rozmytych

Wrocław, 2007

SPIS TREŚCI

Ważniejsze oznaczenia.....	4
ROZDZIAŁ 1. Wstęp.....	6
ROZDZIAŁ 2. Metoda badań przyspieszonych.....	9
ROZDZIAŁ 3. Cel i zakres pracy.....	14
3.1. Cel pracy.....	14
3.2. Zakres pracy.....	14
ROZDZIAŁ 4. Teoretyczne podstawy metod oceny.....	15
4.1. Obszary zastosowań teorii Dempstera-Shafera.....	17
4.2. Teoria Dempstera-Shafera a probabilistyka.....	17
4.3. Teoria zbiorów rozmytych.....	21
ROZDZIAŁ 5. Metoda oceny trwałości elementu mechanicznego.....	30
5.1. Dowód analityczny poprawności modelu trwałości elementu mechanicznego....	34
ROZDZIAŁ 6. Badania obiektu mechanicznego.....	40
6.1. Warunki brzegowe wymiany ciepła dla zaworów.....	40
6.1.1. Obciążenia cieplne zaworów wylotowych w silniku SW680.....	45
6.1.2. Obciążenia cieplne zaworów ssących w silniku SW680.....	48
6.2. Analiza właściwości materiałów ceramicznych.....	50
6.2.1. Właściwości mechaniczne i fizyczne materiałów ceramicznych.....	50
6.2.2. Przyczyny powstawania uszkodzeń.....	55
6.2.3. Metody badań.....	56
ROZDZIAŁ 7. Doświadczalne badania trwałości zaworu w warunkach laboratoryjnych.....	58
7.1. Plan badań.....	59
7.2. Opis stanowiska pomiarowego.....	60
7.2.1. Przygotowanie zaworów do eksperymentu.....	61
7.3. Przebieg badań.....	63
7.3.1. Faza I.....	63

7.3.2. Faza II.....	66
7.3.3. Faza III.....	71
7.3.4. Faza IV.....	74
7.4. Wyniki przeprowadzonych badań.....	78
7.4.1. Charakterystyka próby badanej.....	83
7.4.1.1. Statystyki opisowe dla Fazy I.....	84
7.4.1.2. Statystyki opisowe dla Fazy II.....	84
7.4.1.3. Statystyki opisowe dla Fazy III.....	85
7.4.1.4. Statystyki opisowe dla Fazy IV.....	85
ROZDZIAŁ 8. Badania opinii ekspertów i ich analiza.....	96
ROZDZIAŁ 9. Implementacja wyników badań.....	101
ROZDZIAŁ 10. Wnioski.....	110
LITERATURA.....	113
ZAŁĄCZNIK nr 1.....	122
ZAŁĄCZNIK nr 2.....	146
ZAŁĄCZNIK nr 3.....	152

WAŻNIEJSZE OZNACZENIA

t_B	- czas efektywny badań
t_a	- czas astronomiczny
t_u	- czas użytkowania maszyny
J_{SB}	- intensywność starzenia badanych maszyn
J_{SE}	- intensywność starzenia eksploatacyjnego
I_B	- ilość informacji
J_S	- intensywność starzenia maszyn
W_{WS}	- widma wymuszania starzenia
O_s	- odporność maszyny na starzenie
W_{WM}	- widmo mechanicznego
W_{WC}	- widmo cieplnego
$Bel(A)$	- stopniem przekonania
θ	- dyskretny niepusty skończony zbiór
A	- zbiór
X	- wektor mierzonych parametrów obiektu
$\{A, \neg A\}$	- zbiór zdarzeń
$D_X^{(E_k)}$	- obszary niezawodności
$m_{D_x}(EX_k)$	- kryterium łączenia
$A(X)$	- klasy zdadności elementu do dalszej eksploatacji
$\neg A(X)$	- klasy niezdadności elementu do dalszej eksploatacji
x_g	- punkt rozdzielający dwa rozkłady prawdopodobieństwa
S	- zbiór punktów będących granicami przedziałów dla reguły Eksperta 1
S'	- zbiór punktów będących granicami przedziałów dla reguły Eksperta 2
S^*	- część wspólna dla reguł pochodzących z dwóch źródeł
$\mu_k^{(1)}$	- funkcjach przynależności

$x_k^{(1)}$	- pierwotny zbiór rozmyty
$\Delta U(\varphi)$	- przyrost energii wewnętrznej czynnika
$L(\varphi)$	- praca zmiany objętości w funkcji kąta obrotu wału korbowego
W	- wartość opałowa paliwa
B_0	- dawka paliwa na cykl pracy silnika
T_g	- temperatur gazu
T_s	- temperatura powierzchni ścianki
\bar{w}	- średnia prędkość ślizgania trzonu zaworu w m/s,
α	- współczynnik przewodzenia ciepła ośrodka wypełniającego szczeliny
δ	- szerokość szczeliny
R_m	- wytrzymałość na rozciąganie
R_e	- granica plastyczności
A_5	-wydłużenie
Z	- przewężenie
$KCU2$	- udarność
E	- moduł Younga
σ	- naprężeniem
ΔT	- szok termiczny
ρ_p	- gęstość pozorna
ρ	- gęstość
n	- prędkość obrotowa
R_N	- niezawodność obiektu w fazie
T_{nagr}	- temperatura nagrzewania elementu
t	- czas nagrzewania elementu

ROZDZIAŁ 1

Wstęp

Wraz z rozwojem technologii i motoryzacji na świecie wzrosła niezawodność silników, a wraz z koniecznością i pracami prowadzonymi nad zmniejszeniem zużycia paliwa i zadymieniem spalin pojawiła się potrzeba doskonalenia konstrukcji silników oraz zwiększenie funkcjonalności podzespołów współpracujących z silnikiem.

Ciągły postęp techniczny sprawia, że poszukiwane są nieustannie rozwiązania nad poprawą trwałości elementów mechanicznych, nad różnymi aspektami zmniejszenia ich zużycia, poprawienia ich właściwości jak i w przypadku np. silników spalinowych zmniejszenia zużycia paliwa, poprawy parametrów pracy czy zmniejszenia toksyczności spalin. Tematy te można znaleźć w pracach [41, 47, 48, 49, 53, 76, 97, 98]. Do oceny niezawodności maszyn używa się tzw. parametryczne modele uszkodzeń co można prześledzić w pracach [14, 26, 37, 53, 54, 62, 63, 64, 65]. Zastosowania te jak zauważono w pracy [54] dotyczą badań prototypów jak i diagnostycznych badań wyrobów gotowych a modele wyrażają prawdopodobieństwo poprawnej pracy elementu jako funkcję zmiennych losowych, które opisują stan początkowy oraz zmiany stanu w czasie. W 1989 roku autor [54] zaproponował model złożony z wykorzystaniem procesów stochastycznych i rozszerzył model o trzecią zmienną, mianowicie o składnik w postaci procesu losowego o realizacjach okresowych. Model ten cechuje liniowość przebiegu uśrednionych wartości zużycia i stacjonarność procesu fluktuacji zużycia.

Nowe technologie, modernizacje elementów mechanicznych wymuszają na konstruktorach, producentach przeprowadzenia badań trwałościowych, eksploatacyjnych.

Badania zazwyczaj są czasochłonne i wymagają dużych nakładów finansowych, aby sprawdzić trwałość nowych elementów. Już w latach 70 ubiegłego wieku podejmowano próby przeprowadzania badań przyspieszonych na różnych przykładach co możemy prześledzić w pracach [16, 22, 51, 52,]. Badania przyspieszone pozwalają na zmniejszenie czasu i kosztów podczas testowania elementów mechanicznych. Są to badania, polegające na eksploatacji elementu poprzez poddawanie obiektów działaniu czynników przyspieszających proces do osiągnięcia stanu granicznego. Na podstawie badań przyspieszonych uzyskuje się charakterystyki trwałościowe. Dane uzyskane z doświadczeń poddawane są analizie statystycznej oraz wyznacza się model pozwalający określić trwałość elementu, co można znaleźć w pracach [22, 36, 37, 43, 45].

Znane z literatury [22, 36, 37, 43, 45, 51, 52] są metody analizy wyników badań przyspieszonych, które najczęściej wymagają wiedzy o typie rozkładu eksploatacji elementu jak i zależność czasu potrzebnego do uszkodzenia elementu od czynnika który przyspieszył proces uszkodzenia.

Ponieważ niejednokrotnie zabranie takich informacji jest niemożliwe, dlatego należy podjąć próby opisu takich badań bazując na systemach ekspertowych.

Ciągły postęp techniczny oraz bardzo duży zakres możliwości zastosowania systemów ekspertowych sprawia, że metody rozpoznawania obiektów są ciągle rozwijane i ulepszone. Większość systemów ekspertowych opiera się na przetwarzaniu logicznych reguł, które opisują zależności między obserwowanymi cechami a definiującymi je klasami decyzyjnymi [40, 72, 74, 75, 78]

W rzeczywistości reguły ekspertów, za pomocą których budujemy algorytmy wnioskowania są nieprecyzyjne, niepewne i czasami sprzeczne. W związku z powyższym konieczne jest opracowywanie analizy przetwarzania takich informacji. Modele algorytmów rozpoznawania oparte są na różnych teoriach. Najbardziej znaną teorią wykorzystywaną w systemach ekspertowych jest probabilistyka. W teorii tej do zadania rozpoznawania wykorzystuje się model bayesowski. Przykłady prac z rozpoznawania bayesowskiego odnaleźć można w różnych opracowaniach [72, 89, 90]. Ze względu na niewielką elastyczność w przetwarzaniu wiedzy niepewnej, niepełnej przez model bayesowski powstały stosunkowo niedawno ciekawe teorie, których autorami są Lotfi Zadeh (teoria zbiorów rozmytych) oraz Artur P. Dempster i Glen Shafer (teoria Dempstera – Shafera).

Początki teorii zbiorów rozmytych odnajdujemy w pracy Lotfiego A. Zadeha "Fuzzy Sets" z 1965 roku. Teoria ta jest obecnie rozwijana bardzo intensywnie i odgrywa dużą rolę w zastosowaniach informatycznych matematyki. Logika rozmyta jest narzędziem, za pomocą

którego możemy dokonać opisu nieprecyzyjnej rzeczywistości. Ileż razy mówimy, że ktoś ma "około 176 cm wzrostu", albo, że coś waży "około 3 kg". Okazuje się, że logika wypowiedzi typu "możliwe, że...", "prawie, że...", "około..."..., jest nauce i technice bardzo potrzebna. Często nie jesteśmy w stanie precyzyjnie określić pewnych wartości. Stosując odpowiednie techniki, można na podstawie pewnej analizy sytuacji "rozmytej" uzyskać decyzję całkiem precyzyjną. Przykłady modeli z teorii zbiorów i logiki rozmytej, można odnaleźć w pracach [10, 12, 42, 78, 101]

Obok teorii logiki rozmytej zastosowanie znalazła teoria Dempstera-Shafera, zwana inaczej teorią ewidencji matematycznej bądź teorią funkcji przekonania. Teoria ta została stworzona przez Glena Shafera w 1976 roku. Jest ona rozszerzeniem pewnych zagadnień wnioskowania statystycznego [78, 79, 90, 99, 100, 103]. Ponieważ są to zagadnienia sformułowane przez Artura P. Dempstera więc przyjęto w wielu pracach nazewnictwo jej, jako teorii "Dempstera-Shafera". Teoria ta ma wiele ważnych metodologicznych zalet, tj. daje możliwość składania niezależnych ewidencji, umożliwia wnioskowanie w przypadku niepełnej wiedzy. Istnieją prace [3, 4, 10, 17, 40, 72, 74, 75, 78, 79, 87, 88, 89, 90] świadczące o jej ciągłym rozwoju.

Spotykamy się z próbami łączenia np. teorii zbiorów rozmytych z probabilistyką czego przykładem są prace [10, 25]. Istnieją również próby łączenia teorii zbiorów rozmytych z teorią ewidencji matematycznej Dempstera-Shafera, o czym świadczą prace [78, 101].

W niniejszej pracy skupiono się na opracowaniu przyspieszonej oceny stanu granicznego elementu mechanicznego, w której łączy się teorię Dempstera-Shafera z logiką rozmytą w celu opisu związków między mierzonymi zmiennymi a klasami decyzyjnymi. Zadanie klasyfikacji jest realizowane przez funkcję przekonania a reguły świadczące o zdatności i niezdatności elementu do dalszej eksploatacji są wyznaczane subiektywnie przez ekspertów.

Metoda badań przyspieszonych

Badania przyspieszone (accelerated test) są to takie badania, w których zastosowany poziom narażeń jest tak dobrany, że przekracza poziom narażeń w warunkach normalnych. Badania są przeprowadzane w celu skrócenia czasu wymaganego do zaobserwowania reakcji obiektu na narażenia lub w celu zintensyfikowania reakcji obiektu na narażenia w określonym przedziale czasu. Badanie przyspieszone nie może zmieniać podstawowego rodzaju niezdatności i mechanizmu uszkodzeń lub względnych częstości ich występowania [22].

Celem badań eksploatacyjnych maszyn jest uzyskanie informacji odnośnie [22]:

- ich trwałości w realnych warunkach eksploatacji,
- ich niezawodności w realnych warunkach eksploatacji,
- optymalizacji kierowania systemem ich eksploatacji.

Realizacja badań w zakresie zbierania informacji o trwałości i niezawodności maszyn oraz systemach ich eksploatacji bazuje na odpowiednich programach, obejmujących metody teoretyczne i eksperymentalne.

Badania eksploatacyjne maszyn i systemów eksploatacji mogą być wykonywane jako:

- modelowe, programowane lub statystyczne badania trwałości eksploatacyjnej maszyn,
- programowane lub statystyczne badania niezawodności eksploatacyjnej maszyn,
- programowane lub statystyczne badania organizacji systemów eksploatacji.

Badania eksploatacyjne będą nazywane badaniami przyspieszonymi jeśli:

a) Czas astronomiczny lub czas efektywny badań t_B będzie krótszy od eksploatacyjnego czasu astronomicznego t_g lub sumarycznego czasu użytkowania maszyny t_u :

$$t_B < t_a, t_B < t_u. \quad (2.1)$$

b) Intensywność starzenia badanych maszyn J_{SB} elementów wymuszeń metodami przyspieszonymi będzie większa niż intensywność starzenia eksploatacyjnego J_{SE} :

$$J_{SB}/t_B / < J_{SE}/t_e. \quad (2.2)$$

c) Ilość informacji I_B uzyskana w jednostce czasu podczas badań przyspieszonych starzenia maszyn lub systemów eksploatacji będzie większa niż w analogicznej jednostce czasu podczas badań eksploatacyjnych:

$$I_B/t_B / < I_E/t_E/. \quad (2.3)$$

Trwałość eksploatacyjna maszyn jest oceniana wartością miar eksploatacyjnych w okresie osiągnięcia przez maszynę stanu granicznego starzenia.

Intensywność starzenia maszyn J_S jest zależna od charakterystyki widma wymuszania starzenia W_{WS} oraz charakterystyki odporności maszyny na starzenie O_s przy danym widmie wymuszani a :

$$J_S = \langle W_{WS}, O_s / W_{WS} \rangle. \quad (2.4)$$

Często widmo wymuszające jest superpozycją tylko widma mechanicznego i cieplnego

$$W_{wS} = \langle W_{WM}, W_{Wc} \rangle, \quad (2.5)$$

- lub widma cieplnego i chemicznego:

$$W_{wS} = \langle W_{WC}, W_{wCH} \rangle, \quad (2.6)$$

- lub widma mechanicznego, cieplnego i chemicznego:

$$W_{WS} = \langle W_{WM}, W_{WC}, W_{wCH} \rangle. \quad (2.7)$$

W przypadku starzenia np. na skutek zużywania ściernego, wypadkowe widmo wymuszające jest w zasadzie widmem wymuszania tylko mechanicznego.

Widmo wymuszeń mechanicznych można najogólniej przedstawić jako:

$$W_{WM} = \langle P, V, T, t, \vec{G} \rangle \quad (2.8)$$

gdzie: P - obciążenie uogólnione siłą normalną,

T - obciążenie uogólnione siłą styczną,

V – prędkość względna,

t- czas działania wymuszeń mechanicznych,

- $\vec{G} = \left\{ \frac{dP}{dt}, \frac{dV}{dt}, \frac{dT}{dt} \right\}$ zmienna w czasie mechanicznych wielkości wymuszających starzenie.

Na rysunku 2.1. przedstawiono powiązanie obiektów badań z obszarami zastosowań przyspieszonych ocen niezawodności na przykładzie silników spalinowych.

OBIEKTY BADAŃ						Obszary zastosowań przyspieszonych ocen niezawodności	
Silniki zakwalifikowane do naprawy głównej	Silniki z produkcji seryjnej	Silniki z partii próbnej	Silniki z partii informacyjnej	Prototypy	Przedprototypy		Wzorce
X	X						X
X	X			X	X		
		X	X				
X	X						
						Opracowanie modelu niezawodnościowego	
						Opracowanie wymagań niezawodnościowych	
						Projektowanie niezawodności	
						Poprawa niezawodności nowych obiektów	
						Poprawa niezawodności modernizowanych obiektów	

Rys. 2.1. Powiązanie obiektów badań z obszarami zastosowań przyspieszonych ocen niezawodności [51]

Tematyką prognozowania niezawodności maszyn zajmują się specjaliści z wielu ośrodków naukowych w kraju. Między innymi z Politechniki Warszawskiej i Politechniki Poznańskiej. Zdaniem autora [51] nadal jednak pozostaje do opracowania szereg zagadnień szczegółowych, zarówno pod względem metodologicznym jak i przedmiotowym, z uwagi na różnorodność typów maszyn i elementów.

W pracy [51] przedstawiono metodę przyspieszonej oceny niezawodności i jej zastosowanie.

Rozpatrywana metoda polega na tym, że autor przyjmując za podstawę stochastyczny model zużycia obiektu wyznacza się parametry statystyczne zużycia podczas skróconych badań doświadczalnych, a następnie oblicza się przewidywany czas poprawnej pracy obiektu przy wykorzystaniu symulacji komputerowej. Przyjmuje się, że warunkiem osiągnięcia stanu granicznego jest przekroczenie dopuszczalnego poziomu zużycia. Uzyskany w ten sposób rozkład prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy uznaje się za prognozę trwałości obiektu. Praktyczne zastosowanie metody wymaga uprzedniego zgromadzenia szerokiego materiału empirycznego.

Metoda charakteryzuje się wiarygodnością i wysoką efektywnością. W dalszej perspektywie możliwe jest wykorzystywanie metody na etapie przygotowania produkcji nowych elementów maszyn i maszyn. W pracy [51] przedstawiono również badania nad niezawodnościowymi modelami zużycia obiektu oraz badania nad modelem dynamiki zużycia elementów. Autor pracy [51] przedstawił trójczłonowy stochastyczny model przebiegu zużycia tribologicznego, który opisuje cykliczne odchylenia zużycia od wartości wyznaczonych przez proces przenoszenia. Model ten jest zweryfikowany doświadczalnie, a wyniki posłużyły do opracowania modelu numerycznego, a co za tym idzie stworzenia symulacji komputerowej przebiegu zużycia i prognozowania trwałości. Autor zwraca uwagę, że w odniesieniu do silników spalinowych ważne jest zwrócenie większej uwagi na szczegółowość zagadnienia i systematyzacja rozpatrywanych warunków pracy.

Wprowadzenie badań przyspieszonych pozwala na zmniejszenie czasu trwania badań oraz na redukcję kosztów. Elementy poddaje się działaniu czynnika przyspieszającego proces uszkodzenia. W swojej pracy [43] autor czynnik ten nazywa stresem.

Przykładem metod opartych na założeniach dla badań przyspieszonych jest model Power-Weibull, w którym czas eksploatacji dla każdego poziomu stresu ma z założenia rozkład Weibulla, zaś zależność między czasem eksploatacji a stresem jest określana odwrotnym prawem potęgowym (Inverse Power Law).

W pracy [43] została zastosowana metoda do wyznaczania dystrybuanty czasu eksploatacji na podstawie rezultatów serii badań przyspieszonych prowadzonych przy stałych poziomach stresu. W metodzie założono, że badania były pełne, tzn. zarejestrowano czas do awarii dla wszystkich elementów poddanych badaniu na każdym poziomie stresu.

Podsumowanie

Badania nad trwałością elementów mechanicznych są badaniami czasochłonnymi i niekiedy nie dającymi precyzyjnej odpowiedzi na nurtujące pytania dotyczące zdolności elementu do dalszej eksploatacji. W niektórych elementach obiektów mechanicznych nie udaje się precyzyjnie stwierdzić czy uszkodzenie, które powstało eliminuje element z dalszej eksploatacji. Dlatego jest należy poszukiwać metod, bazujących we wszelkich możliwych źródłach informacji. Ponieważ w przypadku eksploatacji obiektów mechanicznych potrzebny jest czas eksploatacji do opracowania wniosku o trwałości elementu, a zbieranie danych w naturalnych warunkach eksploatacji jest czasochłonne, należy skoncentrować się na wykorzystaniu badań przyspieszonych. Powyższy rodzaj badań pozwoli na ocenę trwałości elementu w sposób doświadczalny w warunkach laboratoryjnych.

Badania wymagają również poszukiwań metod oceny trwałości elementów z uwzględnieniem odejścia od dotychczasowych, tradycyjnych modeli, dzięki którym uzyskujemy niepełną informację o obiekcie i stanie w danej chwili eksploatacji. W modelach probabilistyczny wymagana jest całkowita specyfikacja modelu probabilistycznego, a stopnie przekonania są przypisane indywidualnym odpowiedziom. Kierunkiem poszukiwań są modele, które znajdują zastosowanie w sytuacjach uzyskiwanej niepełnej wiedzy o danym obiekcie. Takim modelem jest teoria Dempstera- Shafera, która przy pomocy wyspecjalizowanych ekspertów i ich opinii, pozwoli na zebranie informacji o badanym obiekcie mechanicznym i ocenieniu trwałości elementu czy całego obiektu mechanicznego. Ponieważ opinie ekspertów są subiektywne, należy zastosować teorię zbiorów rozmytych, aby móc uzyskać precyzyjne wyniki.

Cel i zakres pracy

3.1. Cel pracy

Celem pracy jest opracowanie metody oceny stanu granicznego elementu mechanicznego. W metodzie wykorzystano teorię ewidencji matematycznej do opracowania modelu syntetycznego z wykorzystaniem badań eksploatacyjnych i badań ekspertów.

Celem jest stworzenie metody dla przypadku nieparametrycznego. W modelu nie znane są rozkłady gęstości prawdopodobieństwa cech w klasach. Ocena trwałości elementu mechanicznego ma charakter nieprecyzyjny, a reguły określające zdolności elementu do dalszej eksploatacji zostały utworzone za pomocą teorii Dempstera – Shafera z wykorzystaniem logiki rozmytej. Ponieważ rozkłady gęstości są niewiadomą, w modelu pomocne są subiektywne oceny ekspertów na temat obserwowanej zmiennej, na podstawie, której obiekt zostanie zakwalifikowany do klasy uszkodzalności.

Badania zdecydowano się wykonać na przykładzie zaworu pokrytego powłoką ceramiczną i do eksperymentu użyto zaworów ssących i wydechowych z silnika SW680.

3.2. Zakres pracy

W pierwszym etapie pracy zostały przedstawione rozważania nad metodą oszacowania niezawodności elementu mechanicznego, dokonano analizy literaturowej w zakresie przyspieszonych badań niezawodności jak i przeanalizowano problem trwałości elementów

mechanicznych z naniesionymi powłokami ceramicznymi. Po omówionym przeglądzie literaturowym i wysuniętych wnioskach o konieczności poszukiwań niekonwencjonalnych metod do oceny trwałości elementów mechanicznych została przedstawiona teoria Dempstera – Shafera, jej założenia, możliwości wykorzystywania teorii w różnych dziedzinach badawczych oraz omówiono odniesienie jej do teorii prawdopodobieństwa jak i do teorii zbiorów rozmytych.

W kolejnym etapie pracy została stworzona metoda oceny trwałości elementu mechanicznego na podstawie badań przyspieszonych. Przybliżono założenia metody. Zaprezentowano model matematyczny opisujący trwałość elementu mechanicznego oraz udowodniono analitycznie jego właściwości. Zawarto w nim metody wnioskowania z opinii ekspertów, opierając się na teorii Dempstera – Shafera oraz własne metody wnioskowania, w powstaniu których pomogła ankieta stworzona przez autora pracy dla sporządzenia syntezy wyników z opinii ekspertów analizujących przebieg eksperymentu. Przy rozpatrywaniu różnych wariantów rozwiązań matematycznych również opierano się na teorii logiki rozmytej. Następnie omówiono parametry wybranego elementu do dalszych rozważań, na którym przeprowadzono szereg badań laboratoryjnych. Została przybliżona budowa stanowiska doświadczalnego i omówione jego modyfikacje, które były wymuszone podczas przeprowadzanych badań oraz obserwacji zachodzących procesów.

Ostatni etap pracy jest to opracowanie wyników z przeprowadzonych badań stanowiskowych. Poddano szczegółowej analizie statystycznej wyniki badań jak i wyniki uzyskane z subiektywnej opinii ekspertów zebranych za pomocą ankiety ze szczegółowymi pytaniami, które dotyczyły wiedzy teoretycznej o elemencie i powłokach ceramicznych jak i analizy poszczególnych faz badań, na podstawie której sformułowano wnioski, sprawdzono poprawność metody wnioskowania o trwałości elementu mechanicznego. Wyniki posłużyły do weryfikacji modelu i sprawdzenia jego prawidłowości oraz wskazano możliwości dalszych badań po przez wskazanie ograniczeń metody wnioskowania o trwałości elementów mechanicznych.

Teoretyczne podstawy metod oceny

Przedstawione zostaną podstawowe pojęcia teorii Dempstera – Shafera. Teoria Dempstera-Shafera, zwana jest inaczej teorią ewidencji matematycznej, czy też teorią funkcji przekonania. Wyznaczane są prawdopodobieństwa z jakimi dane hipotezy można udowodnić. Teoria umożliwia rozróżnienie wiedzy od niewiedzy i ma zastosowanie w przypadkach niepełnej informacji, składania ewidencji i aktualizacji przekonań. W teorii Dempstera – Shafera zdaniom przypisuje się wielkości $Bel(A)$, która nazywana jest stopniem przekonania. Teoria wykorzystuje matematyczne prawdopodobieństwa do subiektywnej oceny ekspertów i daje możliwość przypisywania przekonań zarówno dla pojedynczych przekonań jak i grup odpowiedzi oraz w teorii Dempstera – Shafera nie uzupełnia się niepełnej specyfikacji.

Przez funkcję masy w sensie teorii DS rozumie się funkcję $m:2^{\theta} \rightarrow [0,1]$ spełniającą warunki:

$$\sum_{A \in 2^{\theta}} m(A) = 1 \quad (4.1)$$

$$m(\emptyset) = 0 \quad (4.2)$$

$$\forall_{A \in 2^{\theta}} m(A) \geq 0 \quad (4.3)$$

Dowodzono [88], że dla każdej funkcji przekonania Bel istnieje dokładnie jedna funkcja masy m taka, że $Bel(A) = \sum_{B \in A} m(B) = 1$, natomiast dla zbiorów większej liczności funkcję $m(A)$ można traktować jako wyrównanie "ignorancji" podzbiorów danego zbioru.

Przez funkcję przekonania w sensie teorii DS rozumie się taką funkcję $Bel: 2^{\theta} \rightarrow [0, 1]$, że

$$Bel(A) = \sum_{B \in A} m(B) = 1 \quad (4.4)$$

gdzie $m(B)$ jest funkcją masy w sensie teorii DS.

Funkcja przekonania mierzy wiarygodność poszlak na rzecz A .

θ - dyskretny niepusty skończony zbiór, przy czym dla pewnego naturalnego n

$$\theta = \theta_1 \times \theta_2 \times \theta_3 \times \dots \times \theta_n \quad (4.5)$$

Zmienna A - przyjmuje wartości ze zbioru θ

Rozpatrując dwa rozkłady m_1 i m_2 , można dokonać ich połączenia, otrzymując nowy rozkład bazowy m według reguły

$$m(C) = \frac{\sum_{A \cap B = C} m_1(A) \cdot m_2(B)}{\sum_{A \cap B \neq \emptyset} m_1(A) \cdot m_2(B)} \quad (4.7)$$

Budując systemy ekspertowe należy być bardzo ostrożnym przy zastosowaniu reguły 4.7, ponieważ można połączyć dwie bardzo sprzeczne opinie ekspertów i otrzymać w ten sposób nowy nie mający racjonalnego uzasadnienia rozkład bazowy alokacji prawdopodobieństwa.

Zestawienie fundamentalnych wartości funkcji Bel :

$$\begin{aligned} Bel(A) + Bel(\Theta - A) &\leq 1 \\ Bel(A \cap B) &\leq \min(Bel(A), Bel(B)) \\ Bel(A \cup B) &\geq \max(Bel(A), Bel(B)) \end{aligned}$$

4.1. Obszary zastosowań teorii Dempstera – Shafera

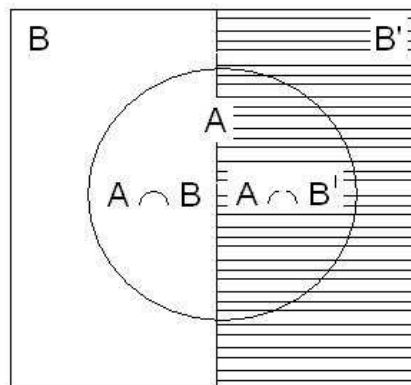
Możliwe obszary zastosowania powyższej teorii obejmują:

- integrację informacji pochodzących z różnych źródeł przy identyfikacji obiektu [deKorvin et al.,1993],
- modelowanie wyszukiwania informacji w bazach danych [Lalmas, 1996],
- rozpoznawanie planu działania [Bauer, 1994],
- zagadnienia diagnostyki technicznej w warunkach zawodności elementów pomiarowych [Durham et al., 1992],
- zastosowania medyczne [Gordon & Shortliffe, 1990, Zarley et al., 1988b, Blau, 1996].

4.2. Teoria Dempstera – Shafera a probabilistyka

W probabilistyce wiedza o obiekcie jest reprezentowana przez prawdopodobieństwa warunkowe i bezwarunkowe, a do składania przekonań jest wykorzystywany wzór Bayesa.

O prawdopodobieństwie warunkowym (rys. 4.1.) mówimy wówczas, gdy dysponujemy informacjami na podstawie których wyeliminować należy pewne zdarzenia elementarne jako takie, które nie będą mogły występować lub takie, których wystąpienia nie bierzemy pod uwagę. Zakładamy wtedy, że określona jest przestrzeń probabilistyczna (V, F, P) . Przez wystąpienie jakiegokolwiek zdarzenia $A \in F$ pod warunkiem zdarzenia B rozumiemy zdarzenie $A \cap B$, to znaczy zdarzenie realizowane przez te zdarzenia elementarne sprzyjające zdarzeniu B , które również sprzyjają zdarzeniu A .



Rys. 4.1. Prawdopodobieństwo warunkowe [6]

Prawdopodobieństwo zdarzenia A pod warunkiem zdarzenia B oznaczamy: $P(A/B)$

Można je obliczyć tworząc nową przestrzeń probabilistyczną, w której przestrzeni zdarzeń elementarnych będzie zdarzenie B . Można wykazać, że klasa F_B podzbiorów zbioru B postaci:

$$A \cap B, \text{ gdzie } A \in F \quad (4.8)$$

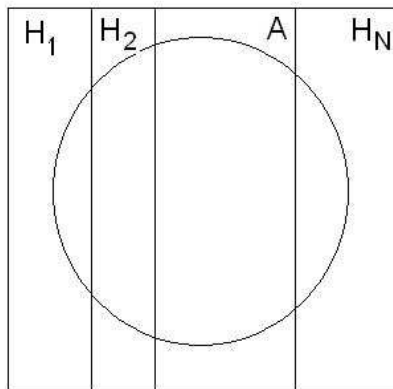
spełnia aksjomaty ciała zdarzeń. Pozostaje wtedy do rozstrzygnięcia sprawa miary probabilistycznej. Nowa warunkowa miara probabilistyczna zostaje wprowadzona jako generowana miara przez miarę probabilistyczną.

$$P: F \rightarrow [0,1] \quad (4.9)$$

to znaczy:

$$P(A/B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}, \quad A, B \in F, P(B) > 0 \quad (4.10)$$

Prawdopodobieństwo całkowite (rys. 4.2.) natomiast wskazuje na sposób jego obliczenia i nie jest jak w przypadku prawdopodobieństwa warunkowego inną miarą probabilistyczną. Prawdopodobieństwo dowolnego zdarzenia $A \in F$ można obliczyć na podstawie znajomości prawdopodobieństwa warunkowego $P(A/H_i)$, gdzie H_i jest jednym ze zdarzeń ($i=1,2,\dots,N$)



Rys. 4.2. Prawdopodobieństwo całkowite [6]

Przy wyznaczaniu modeli probabilistycznych musimy znać kompletną specyfikację badanego elementu. Prawdopodobieństwa z jakimi mamy do czynienia w tych modelach mają charakter częstościowy. Zbiór zdarzeń elementarnych Ω jest dyskretny lub ciągły np.

wyznaczone przez odcinek na układzie kartezjańskim. Istotnym założeniem tych modeli jest to, że suma prawdopodobieństw zarówno a priori i a posteriori opisujących badany element jest równa jedności.

Modele Markowa natomiast służą do badania systemów, gdzie w danej chwili ich stan jest wystarczający by móc wyznaczyć charakterystyki probabilistyczne przyszłego rozwoju systemu. Są to procesy do opisu, których wystarczają rozkłady dwuwymiarowe. Modele te zakładają, iż na kolejne odczytane stany obiektu X_n są zależne od poprzednich stanów X_{n-k} , $0 < k < n$.

Rozróżniamy:

- łańcuchy Markowa – ciąg zmiennych losowych X_0, X_1, \dots , który określony jest na wspólnej przestrzeni probabilistycznej i przyjmuje wartości nieujemnie całkowite,
- ciągi Markowa,
- dyskretne procesy Markowa - proces losowy dyskretny, który spełnia warunek $\{X_t, t \geq T\}$, który został utworzony ze zmiennych losowych dyskretnych,
- procesy Markowa z czasem ciągłym – jest to najważniejsza klasa procesów losowych. Procesy te opisują prawdopodobieństwa przejścia, które zwane są też funkcjami przejścia.

Jeżeli mamy do czynienia w procesie Markowa z przeliczalną przestrzenią stanów, to można wtedy te procesy przedstawić w postaci grafu. Wierzchołki grafu odpowiadają poszczególnym stanom procesu, natomiast łuki, które je łączą wskazują dopuszczalne przejścia pomiędzy stanami.

Tabela 4.1. Zestawienie cech probabilistyki z teorią Dempstera-Shafera

Probabilistyka a teoria Dempstera-Shafera	
Teoria Dempstera-Shafera	Probabilistyka
uznaje model częściowo wyspecyfikowany - nie uzupełnia się brakującej specyfikacji	wymagana całkowita specyfikacja modelu probabilistycznego
wyznaczane są prawdopodobieństwa, z jakimi dane hipotezy można udowodnić na podstawie posiadanej informacji	wyznaczane są prawdopodobieństwa prawdziwości hipotez
Θ [teta] – dyskretny skończony zbiór zdarzeń	Ω [omega] – nieskończona przestrzeń zdarzeń elementarnych
stopnie przekonania są przypisane indywidualnym odpowiedziom, jak i grupą odpowiedzi	stopnie przekonania są przypisane indywidualnym odpowiedziom

Tabela 4.1. przedstawia charakterystyczne cechy dla teorii Dempstera Shafera i dla probabilistyki. Ukazuje ona różnice między nimi, a tym samym wskazuje celowość zastosowania w poszczególnych przypadkach badań.

4.3. Teoria zbiorów rozmytych

Teoria zbiorów rozmytych opisuje zjawiska i pojęcia, które mają charakter wieloznaczny i nieprecyzyjny. Wcześniej znane metody matematyczne, wykorzystujące klasyczną teorię zbiorów i logikę dwuwartościową, nie były w stanie rozwiązać problemów związanych z nieprecyzyjnością i wieloznacznością pojęć np. :

- „wysoka temperatura”
- „młody człowiek”
- „średni wzrost”
- „duże miasto”

Przed podaniem definicji zbioru rozmytego należy ustalić tzw. obszar rozważań (ang. *the universe of discourse*) zwany w dalszej części przestrzenią lub zbiorem. Zbiorem rozmytym A w pewnej (niepustej) przestrzeni \mathbf{X} , co zapisujemy jako $A \subseteq \mathbf{X}$, nazywamy zbiór par [10]:

$$A = \{(x, \mu_A(x)); x \in \mathbf{X}\} \quad (4.11)$$

gdzie: $\mu_A : \mathbf{X} \rightarrow [0,1]$

jest funkcją przynależności zbioru rozmytego A .

Funkcja ta każdemu elementowi $x \in \mathbf{X}$ przypisuje jego stopień przynależności do zbioru rozmytego A , przy czym można wyróżnić 3 przypadki:

- $\mu_A(x) = 1$ oznacza pełną przynależność do zbioru rozmytego A , tzn. $x \in A$,
- $\mu_A(x) = 0$ oznacza brak przynależności elementu x do zbioru rozmytego A , tzn. $x \notin A$,
- $0 < \mu_A(x) < 1$ oznacza częściową przynależność elementu x do zbioru rozmytego A .

Symboliczne zapisy zbiorów rozmytych:

X jest przestrzenią o skończonej liczbie elementów, $X = \{x_1, \dots, x_n\}$:

$$A = \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \dots + \frac{\mu_A(x_n)}{x_n} = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_A(x_i)}{x_i}. \quad (4.12)$$

Standardowe postaci funkcji przynależności:

- funkcja przynależności klasy s :

$$s(x; a, b, c) = \begin{cases} 0 & \text{dla } x \leq a \\ 2\left(\frac{x-a}{c-a}\right)^2 & \text{dla } a \leq x \leq b \\ 1 - 2\left(\frac{x-a}{c-a}\right)^2 & \text{dla } b \leq x \leq c \\ 1 & \text{dla } x \geq c \end{cases}, \quad (4.13)$$

$$b = \frac{a+c}{2},$$

$$A = \int_x \frac{\mu_A(x)}{x},$$

- funkcja przynależności klasy π :

$$\pi(x; b, c) = \begin{cases} s(x; c-b, c-b/2, c) & \text{dla } x \leq c \\ s(x; c-b, c-b/2, c+b) & \text{dla } x \geq c \end{cases}, \quad (4.14)$$

- funkcja przynależności klasy γ :

$$\gamma(x; a, b) = \begin{cases} 0 & \text{dla } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{dla } a \leq x \leq b \\ 1 & \text{dla } x \geq b \end{cases}, \quad (4.15)$$

- funkcja przynależności klasy t :

$$t(x; a, b, c) = \begin{cases} 0 & \text{dla } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{dla } a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{dla } b \leq x \leq c \\ 0 & \text{dla } x \geq c \end{cases}, \quad (4.16)$$

- funkcja przynależności klasy L :

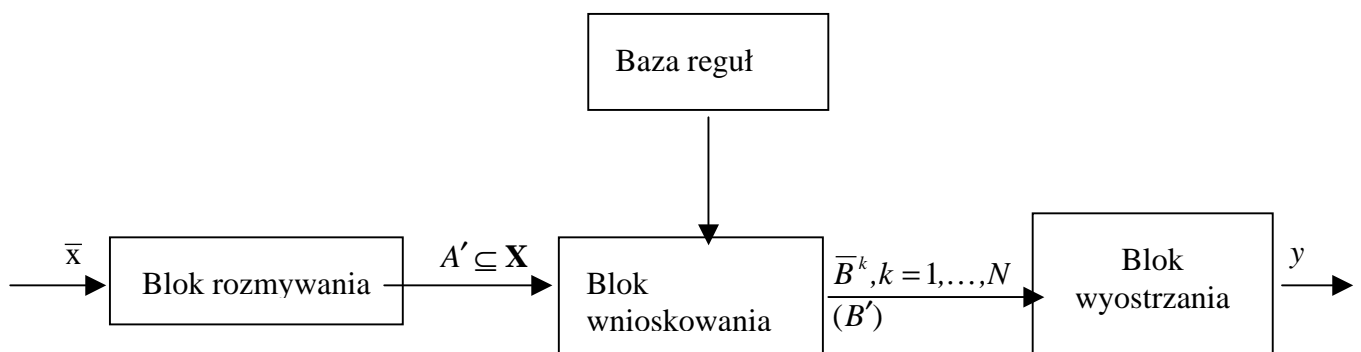
$$L(x; a, b) = \begin{cases} 1 & \text{dla } x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a} & \text{dla } a \leq x \leq b, \\ 0 & \text{dla } x \geq b \end{cases}, \quad (4.17)$$

Liczby rozmyte charakteryzują się brakiem liczby rozmytej przeciwnej i odwrotnej względem dodawania i mnożenia, co np. uniemożliwia zastosowanie metody eliminacji do rozwiązywania równań, w których występują liczby rozmyte.

Relacje rozmyte pozwalają sformalizować nieprecyzyjne sformułowania typu „ x jest prawie równe y ” lub „ x jest znacznie większe od y ”.

Sterowniki rozmyte

Na rys. 4.3. przedstawiono klasyczny sterownik rozmyty



Rys. 4.3. Rozmyty system wnioskujący

Klasyczny sterownik rozmyty składa się z bazy reguł, bloku rozmywania, bloku wnioskowania oraz bloku wyostrzania.

Baza reguł

Bazę reguł, nazywaną czasami modelem lingwistycznym, stanowi zbiór rozmytych reguł $R^{(k)}$, $k = 1, \dots, N$, postaci

$$\begin{aligned} R^{(k)} : & \mathbf{IF} (x_1 \text{ jest } A_1^k \text{ AND } x_2 \text{ jest } A_2^k \dots \text{ AND } x_n \text{ jest } A_n^k) \\ & \mathbf{THEN} (y_1 \text{ jest } B_1^k \text{ AND } y_2 \text{ jest } B_2^k \dots \text{ AND } y_m \text{ jest } B_m^k) \end{aligned} \quad (4.18)$$

gdzie:

N – liczba rozmytych reguł,

A_i^k – zbiory rozmyte takie, że $A_i^k \subseteq X_i \subseteq \mathbf{R}$, $i = 1, \dots, n$,

B_j^k – zbiory rozmyte takie, że $B_j^k \subseteq Y_j \subseteq \mathbf{R}$, $j = 1, \dots, m$,

x_1, x_2, \dots, x_n , – zmienne wejściowe modelu lingwistycznego, przy czym

$$(x_1, x_2, \dots, x_n)^T = \mathbf{x} \in \mathbf{X}_1 \times \mathbf{X}_2 \times \dots \times \mathbf{X}_n$$

y_1, y_2, \dots, y_m , – zmienne wyjściowe modelu lingwistycznego, przy czym

$$(y_1, y_2, \dots, y_m)^T = \mathbf{y} \in \mathbf{Y}_1 \times \mathbf{Y}_2 \times \dots \times \mathbf{Y}_m$$

Symbolami \mathbf{X}_i , $i = 1, \dots, n$, oraz \mathbf{Y}_j , $j = 1, \dots, m$, oznaczamy odpowiednie przestrzenie zmiennych wejściowych i wyjściowych.

Blok rozmywania

W zagadnieniach sterowania najczęściej stosuje się operację rozmywania typu singleton

$$\mu_{A'}(\mathbf{x}) = \delta(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}) = \begin{cases} 1 & \text{dla } \mathbf{x} = \bar{\mathbf{x}} \\ 0 & \text{dla } \mathbf{x} \neq \bar{\mathbf{x}} \end{cases} \quad (4.19)$$

Zbiór rozmyty A' jest wejściem bloku wnioskowania.

Jeżeli sygnał wejściowy jest mierzony wraz z zakłóceniem, to zbiór rozmyty A' można określić poprzez funkcję przynależności

$$\mu_{A'}(\mathbf{x}) = \exp\left[-\frac{(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})^T (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})}{\sigma^2}\right] \quad (4.20)$$

gdzie $\sigma > 0$.

Wówczas operacja rozmywania jest typu non-singleton.

Blok wnioskowania

Zakładamy, że na wejściu bloku wnioskowania mamy zbiór rozmyty:

$$A' \subset \mathbf{X} = \mathbf{X}_1 \times \mathbf{X}_2 \times \dots \times \mathbf{X}_n.$$

Stosując złożeniową regułę wnioskowania otrzymano:

$$B' = A' \circ \bigcup_{k=1}^N R^{(k)}. \quad (4.21)$$

Korzystając z definicji złożenia i sumy wyznaczamy funkcję przynależności:

$$\mu_{B'}(y) = \sup_{\mathbf{x} \in \mathbf{X}} \left[\mu_{A'}(\mathbf{x}) * \max_{1 \leq k \leq N} \mu_{R^{(k)}}(\mathbf{x}, y) \right]. \quad (4.22)$$

Blok wyostrzania

Wielkością wyjściową bloku wnioskowania jest bądź N zbiorów rozmytych \bar{B}^k , $k = 1, \dots, N$, bądź jeden zbiór rozmyty B' . Pojawia się problem odwzorowania zbiorów rozmytych \bar{B}^k (lub zbioru rozmytego B') w jedną wartość $\bar{y} \in Y$, która będzie wyznaczonym sterowaniem na wejściu obiektu. Odwzorowanie to nazywamy wyostrzaniem (ang. defuzzification) i jest ono realizowane w bloku wyostrzania.

Jeżeli wielkością wyjściową bloku wnioskowania jest N zbiorów rozmytych \bar{B}^k , to wartość $\bar{y} \in Y$ obliczamy za pomocą następujących metod [42]:

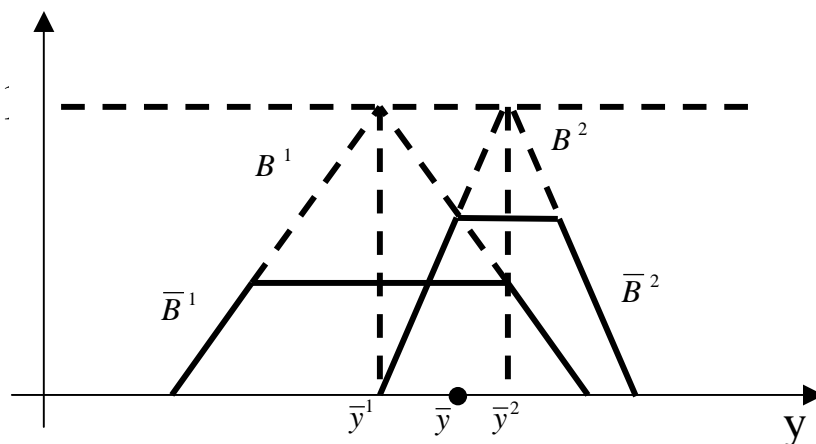
1. Metoda center average defuzzification

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^N \mu_{\bar{B}^k}(\bar{y}^k) \bar{y}^k}{\sum_{k=1}^N \mu_{\bar{B}^k}(\bar{y}^k)}, \quad (4.23)$$

gdzie \bar{y}^k (nazywany środkiem zbioru rozmytego B^k) jest punktem, w którym funkcja $\mu_{B^k}(y)$ przyjmuje wartość maksimum, tzn.

$$\mu_{B^k}(\bar{y}^k) = \max_y \mu_{B^k}(y). \quad (4.24)$$

Ilustracja metody widoczna jest na rys. 4.4.



Rys. 4.4. Metoda center average defuzzification

2. Metoda center of sums defuzzification:

$$\bar{y} = \frac{\int_{\mathbf{Y}} y \sum_{k=1}^N \mu_{\bar{B}^k}(y) dy}{\int_{\mathbf{Y}} \sum_{k=1}^N \mu_{\bar{B}^k}(y) dy}, \quad (4.25)$$

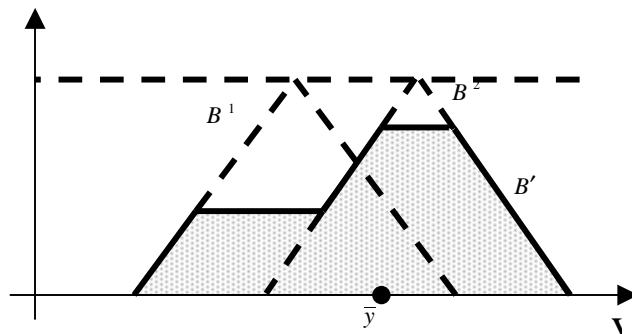
Jeżeli wielkością wyjściową bloku wnioskowania jest jeden zbiór rozmyty B' , to wartość $\bar{y} \in \mathbf{Y}$ obliczamy za pomocą następujących metod:

3. Metoda środka ciężkości (ang. center of gravity method lub center of area method)

Wartość \bar{y} obliczamy jako środek ciężkości funkcji przynależności

$$\bar{y} = \frac{\int_{\mathbf{Y}} y \mu_{B'}(y) dy}{\int_{\mathbf{Y}} \mu_{B'}(y) dy} = \frac{\int_{\mathbf{Y}} y \max_k \mu_{\bar{B}^k}(y)}{\int_{\mathbf{Y}} \max_k \mu_{\bar{B}^k}(y)}, \quad (4.26)$$

Ilustracja metody środka ciężkości przedstawiono na rys. 4.5.



Rys. 4.5. Metoda center of sums defuzzification

4. Metoda maksimum funkcji przynależności.

Wartość \bar{y} obliczamy zgodnie z zależnością

$$\mu_{B'}(\bar{y}) = \sup_{y \in Y} \mu_{B'}(y) \quad (4.27)$$

przy założeniu, że $\mu_{B'}(y)$ jest funkcją unimodalną.

Reguły rozmytej implikacji

Niech A i B będą zbiorami rozmytymi, $A \subseteq X$ oraz $B \subseteq X$. Rozmytą implikacją $A \rightarrow B$ nazywamy relację R określoną w $X \times Y$ i zdefiniowaną za pomocą jednej z poniższych reguł.

1. Reguła typu minimum, tzw. reguła Mamdaniego:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_R(x, y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)]. \quad (4.28)$$

2. Reguła typu iloczyn, tzw. reguła Larsena:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_R(x, y) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(y). \quad (4.29)$$

3. Reguła Łukasiewicza:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_R(x, y) = \min[1, 1 - \mu_A(x) + \mu_B(y)]. \quad (4.30)$$

4. Reguła typu max-min, tzw. reguła Zadeha:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_R(x, y) = \max\{\min[\mu_A(x), \mu_B(y)], 1 - \mu_A(x)\}. \quad (4.31)$$

5. Reguła binarna:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_R(x, y) = \max[1 - \mu_A(x), \mu_B(y)]. \quad (4.32)$$

6. Reguła Goguena:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_R(x, y) = \min\left\{1, \frac{\mu_A(x)}{\mu_B(y)}\right\}. \quad (4.33)$$

7. Reguła Sharpa:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_R(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{gdy } \mu_A(x) \leq \mu_B(y) \\ 0 & \text{gdy } \mu_A(x) > \mu_B(y) \end{cases}. \quad (4.34)$$

8. Reguła Gódel'a:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_R(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{gdy } \mu_A(x) \leq \mu_B(y) \\ \mu_B(y) & \text{gdy } \mu_A(x) > \mu_B(y) \end{cases}. \quad (4.35)$$

9. Reguła probabilistyczna:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_R(x, y) = \min[1, 1 - \mu_A(x) + \mu_A(x)\mu_B(y)]. \quad (4.36)$$

10. Reguła ograniczonej sumy:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_R(x, y) = \min[1, 1 - \mu_A(x) + \mu_A(x)\mu_B(y)]. \quad (4.37)$$

Metoda oceny trwałości elementu mechanicznego

Matematyczny opis obiektu pracującego w warunkach niepewnych i nieprecyzyjnych można przedstawić za pomocą rozmytej obserwacji zmiennych wpływających istotnie na obiekt oraz teorii Dempstera-Shafera, która bardzo dobrze radzi sobie z wnioskowaniem w środowisku niepewnym i nieprecyzyjnym.

W przypadku kiedy nie znamy rozkładu gęstości prawdopodobieństwa zmiennych modelu, do oceny niezawodności obiektu mechanicznego można wykorzystać opinie niezależnych ekspertów. Podobnie jak w modelu dla przypadku parametrycznego [86] niezawodność jest definiowana jako $R(X) = Bel(\tilde{A})$, gdzie \tilde{A} jest zbiorem rozmytym.

Dobór ekspertów nie jest przypadkowy. Są oni wybierani do oceny niezawodności obiektu mechanicznego na podstawie wypełnionych ankiet. Każdy ekspert na podstawie wyników badań laboratoryjnych wyznacza subiektywnie obszary niezawodności $D_X^{(E_k)}$ przyporządkowując im wartości funkcji alokacji prawdopodobieństwa:

$$m_{D_x}(EX_k),$$

gdzie: EX_k - zbiór zdarzeń $\{A, \neg A\}$ wyznaczonych przez k-tego eksperta,

X – wektor mierzonych parametrów obiektu, $X = x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$.

Zatem obszar decyzyjny

$$D_X^{(E_k)} = D_{x_1}^{(E_k)} \times D_{x_2}^{(E_k)} \times \dots \times D_{x_n}^{(E_k)}. \quad (5.1)$$

Jeżeli obszary decyzyjne wyznaczone przez k-ekspertów pokrywają się wówczas:

$$D_X^{(E_1)} \cap D_X^{(E_2)} \cap \dots \cap D_X^{(E_k)} \rightarrow$$

$$m_{D_x}(EX) = m_{D_x}(EX_1) \oplus m_{D_x}(EX_2) \oplus \dots \oplus m_{D_x}(EX_k) = \quad (5.2)$$

$$= \frac{\sum_{EX_1 \cap EX_2 = EX_{1,2}} m_{D_x}(EX_1) \cdot m_{D_x}(EX_2)}{1 - \sum_{EX_1 \cap EX_2 = \emptyset} m_{D_x}(EX_1) \cdot m_{D_x}(EX_2)} \oplus \dots \oplus \frac{\sum_{EX_{1,2,\dots,k-1} \cap EX_k = EX} m_{D_x}(EX_{1,2,\dots,k-1}) \cdot m_{D_x}(EX_k)}{1 - \sum_{EX_{1,2,\dots,k-1} \cap EX_k = \emptyset} m_{D_x}(EX_{1,2,\dots,k-1}) \cdot m_{D_x}(EX_k)}$$

Wzór (5.1) określa obszar decyzyjny, wyznaczony zgodnie przez k-ekspertów i przyporządkowuje jemu wartość alokacji prawdopodobieństwa złożoną regułą kombinacji Dempstera-Shafera, będącą subiektywną oceną zdatności elementu mechanicznego do dalszej eksploatacji, wyznaczoną przez każdego eksperta. Ponieważ oceny ekspertów są subiektywne i czasami ich zbiór ma dużą rozpiętość, więc przyjęto kryterium łączenia $m_{D_x}(EX_k)$. Ze wszystkich ocen wyznaczane są wartości kwartyli dolnych i górnych. Jeżeli dana ocena k-eksperta znajduje się między dolnym a górnym kwartylem

$$\frac{1}{2} me(m_{D_x}(EX)) \leq m_{D_x}(EX_k) \leq \frac{3}{4} me(m_{D_x}(EX)), \quad (5.3)$$

jest brana pod uwagę przy aktualizacji wiedzy. Kryterium takie zabezpiecza przed sprzecznymi informacjami. Np. jeżeli 5 ekspertów wyznaczyło pewien wspólny obszar decyzyjny $D_X^{(E_k)}$ i przyporządkowali jemu kolejno wartości zdadności

$$m(A) = \{85\%, 98\%, 81\%, 86\%, 34\%\},$$

więc $81\% \leq m_{D_x}(EX_k) \leq 86\%$.

Ostatecznie łączymy:

$$m_{D_x}(EX) = m_{D_x}(A = 85\%) \oplus m_{D_x}(A = 81\%) \oplus m_{D_x}(A = 86\%).$$

Jak widać w powyższym przykładzie zostały odrzucone dwie skrajne opinie, różniące się istotnie od pozostałych trzech.

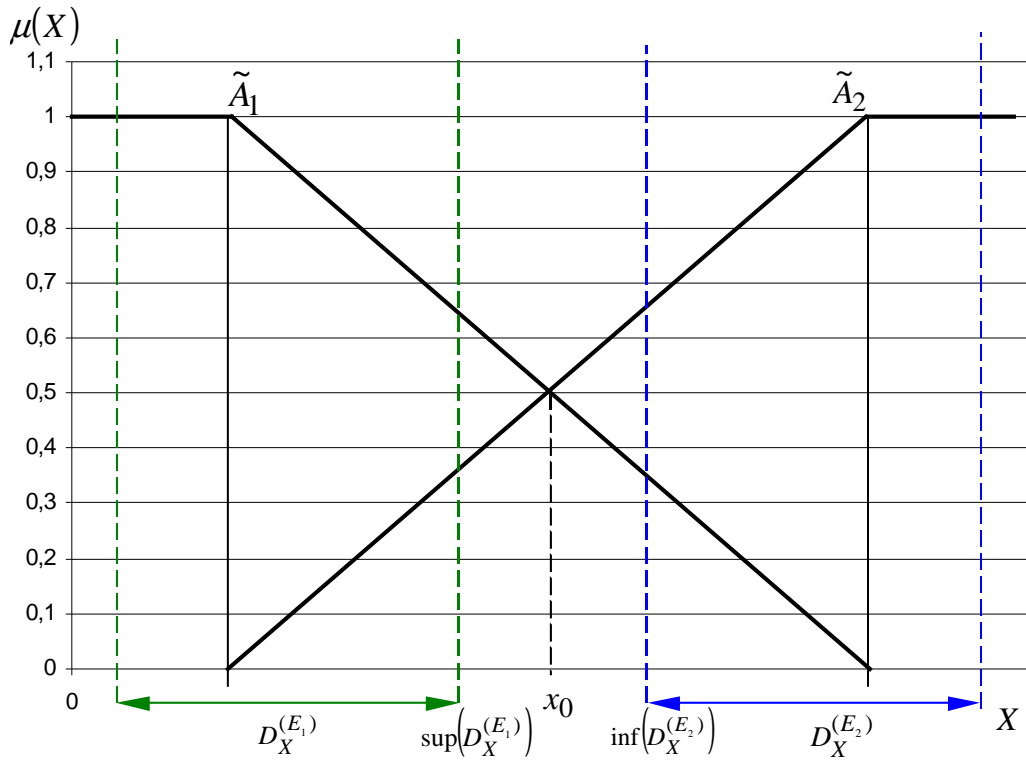
Wyznaczony w powyższy sposób obszar decyzyjny stanowi przedział, na którym zbiór rozmyty \tilde{A}_p przyjmuje wartości maksymalne w porównaniu z innymi zbiorami należącymi do wektora $\tilde{A} = \{\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_{p-1}\}$.

Przypadek 1⁰ Jeżeli obszary decyzyjne $D_X^{(E_1)}$ i $D_X^{(E_2)}$ są rozłączne wówczas pokrywamy je zbiorami rozmytymi w następujący sposób: Punkt przecięcia x_0 zbiorów rozmytych \tilde{A}_1 i \tilde{A}_2 spełnia warunek:

Jeżeli $\sup(D_X^{(E_1)}) < \inf(D_X^{(E_2)})$, to

$$x_0 = \sup(D_X^{(E_1)}) + \frac{1}{2} \sqrt{(\sup(D_X^{(E_1)}) - \inf(D_X^{(E_2)}))^2} \quad (5.4)$$

Interpretacja graficzna znajduje się na rysunku 5.1



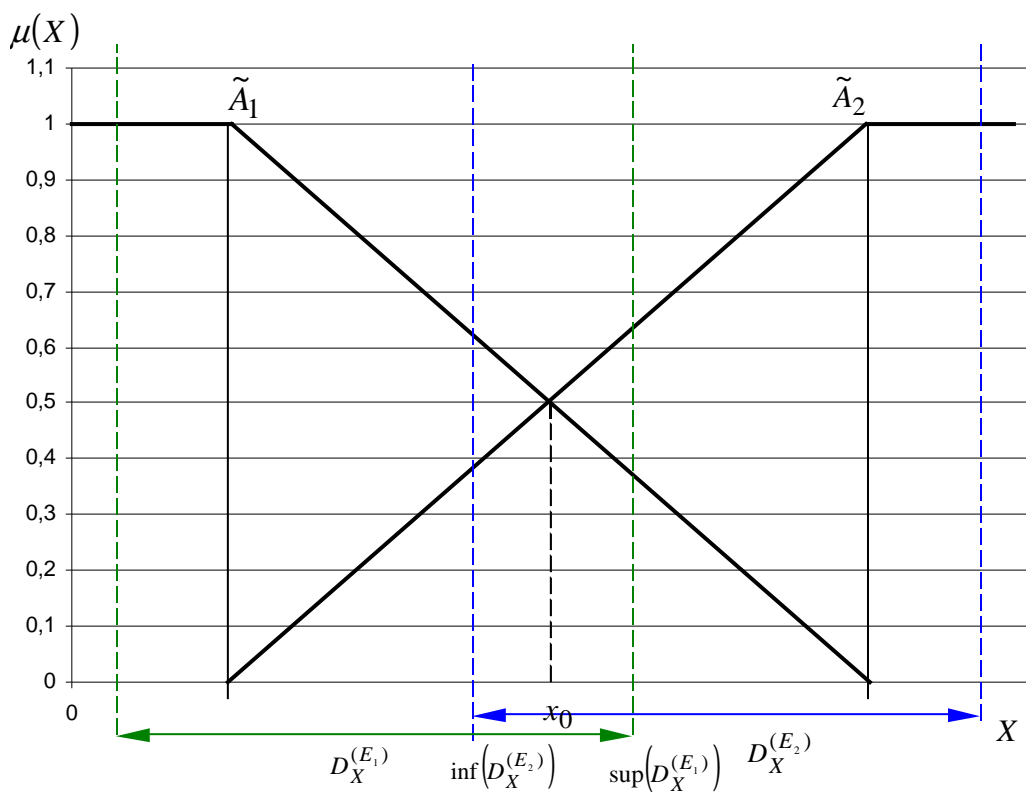
Rys 5.1. Przyporządkowanie zmiennej X obszarów wyznaczonych przez ekspertów i ich fuzyfikacja

Przypadek 2⁰ Jeżeli obszary decyzyjne $D_X^{(E_1)}$ i $D_X^{(E_2)}$ pokrywają się to punkt przecięcia x_0 zbiorów rozmytych \tilde{A}_1 i \tilde{A}_2 spełnia warunek:

Jeżeli $\sup(D_X^{(E_1)}) > \inf(D_X^{(E_2)})$, to

$$x_0 = \inf(D_X^{(E_2)}) + \frac{1}{2} \sqrt{\left(\sup(D_X^{(E_1)}) - \inf(D_X^{(E_2)})\right)^2} \quad (5.5)$$

Interpretacja graficzna znajduje się na rysunku 5.2.



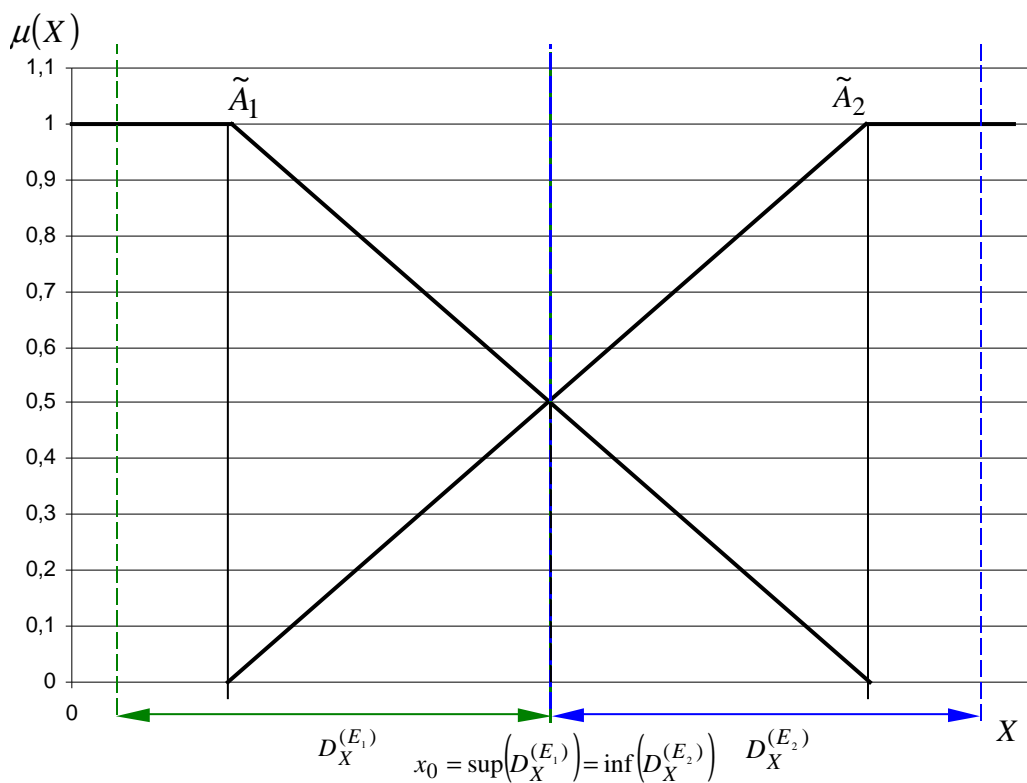
Rys. 5.2. Przyporządkowanie zmiennej X obszarów wyznaczonych przez ekspertów i ich fuzyfikacja

Przypadek 3⁰ Jeżeli $\sup(D_X^{(E_1)}) = \inf(D_X^{(E_2)})$ to punkt przecięcia x_0 zbiorów rozmytych \tilde{A}_1 i \tilde{A}_2 spełnia warunek:

$$x_0 = \sup(D_X^{(E_1)}) = \inf(D_X^{(E_2)}). \quad (5.6)$$

W każdym z trzech przypadków zbiory rozmyte \tilde{A}_1 i \tilde{A}_2 wartości maksymalne w środkach obszarów decyzyjnych.

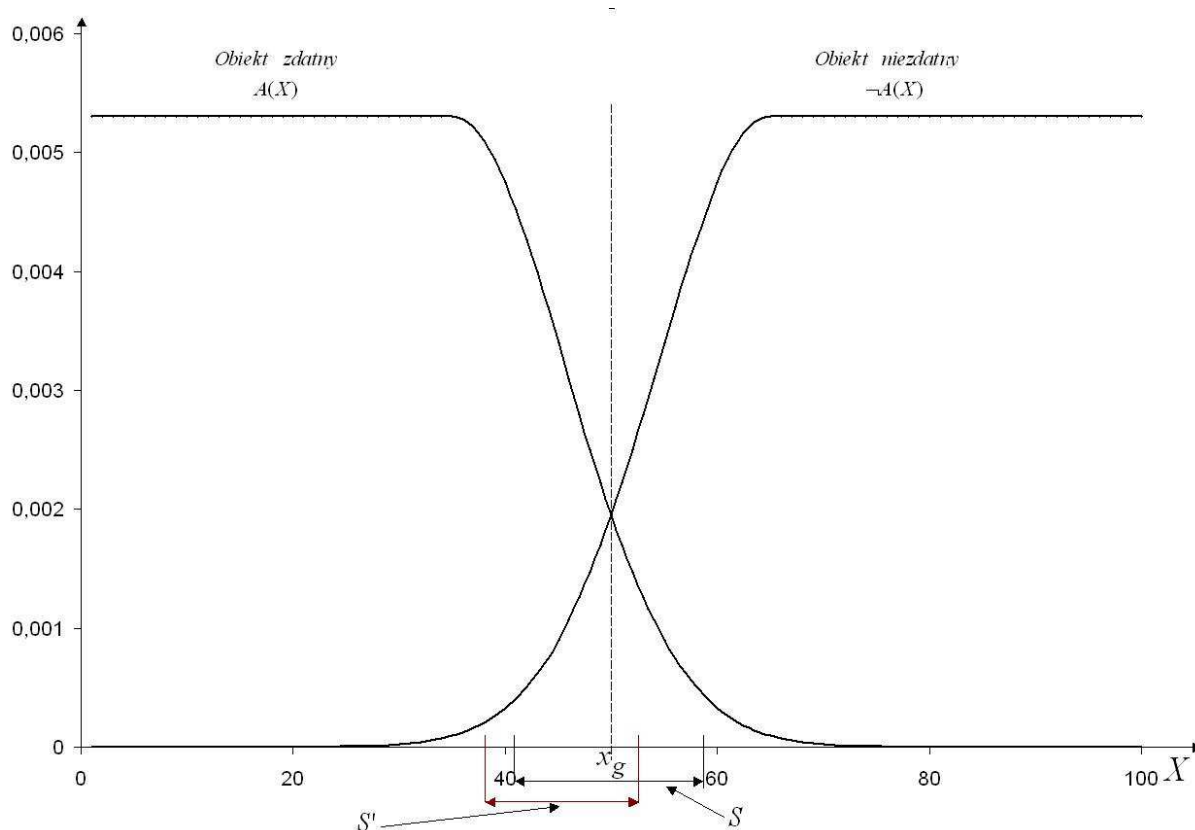
Interpretacja graficzna znajduje się na rysunku 5.3.



Rys 5.3. Przyporządkowanie zmiennej X obszarów wyznaczonych przez ekspertów i ich fuzyfikacja

5.1. Dowód analityczny poprawności modelu trwałości elementu mechanicznego

Rozważono problem klasyfikacji obiektu do odpowiedniej klasy $A(X)$ lub $\neg A(X)$ na podstawie pomiaru ciągłej cechy, której wartości w klasach mają rozkłady pokazane na rys 5.4.



Rys. 5.4. Przykładowe funkcje gęstości prawdopodobieństwa dla klas nieuszkodzalności obiektu.

Na podstawie reguł eksperckich należy rozwiązać problem wyznaczenia takiego odcinka który będzie minimalizował prawdopodobieństwo błędu decyzji. Niech x_g będzie punktem rozdzielających dwa rozkłady prawdopodobieństwa. Prawdopodobieństwo błędu rzeczywistego w zależności od wartości x_g można wyliczyć za pomocą wzoru:

$$error(x_g) = \int_{-\infty}^{x_g} \Pr(x \in \neg A(X)) dx + \int_{x_g}^{+\infty} \Pr(x \in A(X)) dx \quad (5.7)$$

Na podstawie poniższego wzoru wyznaczmy optymalną wartość x_g^* :

$$x_g^* = \arg \min(error(x_g)) \quad (5.8)$$

Jest to wartość optymalna, niestety nie zawsze może być osiągnięta. Jednym z przypadków gdy nie jest możliwe osiągnięcie minimalnej wartości błędu, jest przypadek, gdy dane z którymi pracujemy zostały poddane dyskretyzacji. Oznaczając zbiór punktów będących granicami przedziałów dla reguły eksperta 1 przez S , można wyznaczyć minimalny błąd klasyfikacji dla jego reguły za pomocą wzoru:

$$\min error(S) = \min_{x_g \in S} (error(x_g)). \quad (5.9)$$

Hipoteza

Czy korzystając z dwóch źródeł wiedzy (dwóch lub więcej ekspertów) na temat tego samego zjawiska można poprawić jakość podejmowanej decyzji?

Twierdzenie 1.

Zmniejszanie rozpiętości przedziałów dyskretyzacji (ustalenie części wspólnej przedziałów ustalonych przez ekspertów) może powodować zmniejszenie błędu klasyfikacji.

Dowód

Oznaczmy S jako pierwszy zbiór punktów (granicy przedziału) ustalonego przez eksperta 1, S' będzie zbiorem punktów ustalonych przez eksperta 2. Natomiast $S^* = S \cap S'$ stanowiących część wspólną dla reguł pochodzących z dwóch źródeł, co przedstawia rys 5.1. Dodatkowo założmy, że $\forall x \geq x_g \quad Bel(\neg A(X)) \geq 0.5$ i analogicznie $\forall x < x_g \quad Bel(A(X)) > 0.5$.

$$\begin{aligned} \min error(S) &= \min_{x_g \in S^*} \left(\int_{-\infty}^{x_g} \Pr(x \in \neg A(X)) dx + \int_{x_g}^{+\infty} \Pr(x \in A(X)) dx \right) = \\ &= \min_{x_g \in S \cap S'} \left(\int_{-\infty}^{x_g} \Pr(x \in \neg A(X)) dx + \int_{x_g}^{+\infty} \Pr(x \in A(X)) dx \right) = \\ &= \min \left[\begin{array}{l} \min_{x_g \in S} \left(\int_{-\infty}^{x_g} \Pr(x \in \neg A(X)) dx + \int_{x_g}^{+\infty} \Pr(x \in A(X)) dx \right) \\ \min_{x_g \in S^*} \left(\int_{-\infty}^{x_g} \Pr(x \in \neg A(X)) dx + \int_{x_g}^{+\infty} \Pr(x \in A(X)) dx \right) \end{array} \right] = \\ &= \min[\min error(S), \min error(S')] \end{aligned} \quad (5.10)$$

Ostatecznie:

$$\min error(S^*) \leq \min error(S) \quad (5.11)$$

Na podstawie udowodnionego twierdzenia wiemy, że jakość klasyfikacji dla nowego przedziału S^* jest lepsza, od każdego przedziału utworzonego przez ekspertów z osobna S, S' .

Aby dokładniej opisać nieprecyzyjne, niepełne reguły eksperckie, a tym samym jeszcze bardziej przyczynić się do minimalizacji błędnej klasyfikacji można pokryć przedziały S zbiorami rozmytymi. Im większa rozpiętość przedziałów S tym mamy do czynienia z większą rozmytością. W myśl twierdzenia 1, w miarę zmniejszania rozpiętości zbiorów punktów S dążymy do sytuacji w której np. trójkątna funkcja przynależności zbioru rozmytego dąży do singletonu. W związku z powyższym udowodniono twierdzenie 2, które brzmi.

Twierdzenie 2

Zwiększanie smukłości zbioru rozmytego w otoczeniu punktu rozdzielającego dwa rozkłady gęstości prawdopodobieństwa może powodować minimalizowanie maksymalnej wartości błędnych decyzji.

Dowód

Przyjmijmy, że zmienną na podstawie opinii eksperta 1 pokrywamy k zbiorami rozmytymi o funkcjach przynależności $\mu_k^{(1)}$. Każdy z tych zbiorów ma pewny przedział wsparcia

$$\mu_k^{(1)} = \{x : \mu_k^{(1)}(x) > 0\}, \quad (5.12)$$

który spełnia założenia, że dla pewnego x_p :

$$\mu_k^{(1)}(x_p) = \mu_{k+1}^{(1)}(x_p) = 0.5 \quad (5.13)$$

Błąd klasyfikacji dla zbioru rozmytego k to w najgorszym przypadku wartość maksymalna po przedziale wsparcia, czyli:

$$error \max(x_k^{(1)}) = \max_{x \in x_k^{(1)}} error(x) \quad (5.14)$$

Najlepszym zbiorem rozmytym opisującym punkt rozdzielający dwa rozkłady prawdopodobieństwa (rys 5.4.) jest to taki zbiór, który minimalizuje wartość:

$$error(1) = \min_k error \max(x_k^{(1)}). \quad (5.15)$$

Jeżeli jest dodatkowe źródło wiedzy, w postaci reguł eksperta 2, to pierwotny zbiór rozmyty $x_k^{(1)}$ będzie miał większą rozpiętość niż nowy $x_k^{(2)}$.

W związku z powyższym wsparcie każdego ze starych zbiorów można zapisać jako sumę wsparć nowych zbiorów plus ewentualne dopełnienie (nie zawsze stary zbiór będzie podzielony na dokładnie dwa, trzy, cztery, ...):

$$x_k^{(1)} = \left(\bigcup_j x_j^{(2)} \right) \cup R_k \quad (5.16)$$

Błąd zbioru rozmytego ustalonego dla reguł eksperta 1 można przedstawić za pomocą wzoru:

$$error(1) = \min_k \max_{x \in x_k^{(1)}} error(x) = \min_k \max \left(\max_j \max_{x \in x_j^{(2)}} error(x), \max_{x \in R_k} error(x) \right), \quad (5.17)$$

$$error(1) \geq \min_k \max \left[\max_j \max_{x \in x_j^{(2)}} error(x), \max_{x \in R_k} error(x) \right] \geq \min_k \left[\min_j \max_{x \in x_j^{(2)}} error(x) \right] \geq \min_k \left[\min_j \max_{x \in x_j^{(2)}} error(x), \min_j \max_{x \in x_j^{(2)}} error(x) \right] \quad (5.18)$$

Ostatecznie:

$$error(1) \geq \min_k \max_{x \in x_k^{(2)}} error(x) = error(2). \quad (5.19)$$

Otrzymano w ten sposób dowód twierdzenia, że korzystając z opinii n-ekspertów, którzy wyznaczają reguły, które są pokrywane zbiorami rozmytymi otrzymujemy poprawę jakości klasyfikacji analizowanego modelu. Im więcej ekspertów opisujących dziedzinę cech tym jakość jest coraz lepsza.

Badania obiektu mechanicznego

6.1. Warunki brzegowe wymiany ciepła dla zaworów

Najbardziej obciążoną termicznie częścią silnika spalinowego, tłokowego jest zawór wylotowy. Współczynnik przejmowania ciepła talerzyka zaworu od strony komory spalania może być obliczany dla okresu, gdy zawór jest zamknięty, za pomocą takich samych wzorów, jakie są stosowane dla pozostałych powierzchni otaczających komorę spalania. W tym samym czasie występuje wymiana ciepła przez styk między talerzykiem a gniazdem zaworu, która w zasadzie może być obliczana za pomocą metody podanej dla pierścieni tłokowych. Odprowadzanie ciepła od talerzyka do gniazda występuje tylko przy dużej szczelności zaworów. Jeżeli zamknięcie kanału przez zawór jest nieszczelne, w miejscu nieszczelności występuje przepływ czynnika roboczego, który na początku sprężania chłodzi, a po osiągnięciu wyższych temperatur nagrzewa - talerzyk zaworu. Przy otwarciu zaworu wylotowego zmieniają się warunki wymiany ciepła. Współczynnik przejmowania ciepła obliczany był przez Woschniego za pomocą wzoru na przepływ turbulentny przez część wlotową rury. Dawydow i Owsjannikow [98] zalecają wykonywać obliczenia za pomocą wzoru na opływ turbulentny płyty.

Odptyw ciepła od zaworów odbywa się głównie przez trzon i tuleję [98]. Badania wykazały, że współczynnik przejmowania ciepła przez szczeliny nie zależy od gęstości strumienia ciepła.

W przypadku, gdy w szczelinie znajduje się mieszanina powietrza i oleju, współczynnik przejmowania ciepła wzrasta o 16% w stosunku do przejmowania ciepła

przy braku olejenia szczeliny (gdy w szczelinie jest tylko powietrze). Współczynnik przejmowania ciepła mało zależy od średniej prędkości ślizgania. Przy zmianie tej prędkości od 0 do 0,5 m/s wzrasta tylko o 25%.

Dla warunków, w których $Gr \cdot Pr < 1000$ (Gr – liczba Grashofa, Pr – liczba podobieństwa Prandtla) można obliczać współczynnik przejmowania ciepła na podstawie wzoru [98]:

$$\alpha = (1 + 0,5\bar{w}) \cdot \frac{\lambda}{\delta} \quad (6.1)$$

gdzie: \bar{w} - średnia prędkość ślizgania trzonu zaworu w m/s,

λ - współczynnik przewodzenia ciepła ośrodka wypełniającego szczeliny,

δ - szerokość szczeliny.

Burin i Larionow [98] modelowali pola temperatur zaworu wylotowego silnika o zapłonie samoczynnym przy współczynniku przejmowania ciepła od gazów do zaworu w kanale wylotowym, określonym na podstawie wzoru dla odcinka wlotowego rury

$$N_u = 0,02 \left[1 + 2,5 \left(\frac{l}{d_z} \right)^{-0,9} \right] \cdot Re^{0,8} \quad (6.2)$$

gdzie: d_z – średnica zaworu

Przyjęto również współczynniki przejmowania ciepła:

- od trzonu zaworu do tulejki $\alpha = 730 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$

- od tulejki zaworu do głowicy $\alpha = 20\,800 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$

- od ścianki głowicy do wody $\alpha = 1450 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$

(uwzględniając kamień kotłowy)

- od przylgni zaworu do gniazda

$$\alpha = 5800 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

Zawór wydechowy jest w większym stopniu narażony na wysokie temperatury, które mieszczą się w przedziale 600÷700⁰C. Jest to spowodowane tym, iż w przeciwieństwie do zaworów ssących, które chłodzone są zimnym powietrzem, zawory wydechowe „oblewają” gorące spaliny.

Z powodu różnicy temperatur jakie występują na tych zaworach, są one wytwarzane z różnych materiałów (tabela 6.1. i 6.2.). Do produkcji zaworów wydechowych stosowane są stale austenityczne, które zawierają w sobie 21% Cr i 15% Ni. Pierwiastki jakie zawarte są w stali z której wykonuje się zawory wpływają korzystnie na element silnika spalinowego tj.:

- chrom zapewnia dużą odporność na zużycie i na działanie wysokich temperatur (lecz powyżej 25% zawartości chromu stal staje się krucha),
- nikiel równoważy kruchość stali i poprawia plastyczność,
- aluminium zwiększa żaroodporność,
- molibden i wolfram zwiększają odporność na korozję,
- krzem pomaga w utworzeniu warstwy antykorozyjnej.

W przypadku zaworów ssących, które jak już wspomniano pracują w lepszych warunkach, można stosować do ich produkcji stale węglowe, chromowe lub chromowo – nikłowe.

Przylgni zaworu spełnia dwie funkcje:

- uszczelnienia wnętrza cylindra,
- kierowanie przepływu gazów podczas otwarcia zaworu.

W przypadku zaworów obciążonych cieplnie ich trwałość można zwiększyć dzięki stelliteowaniu przylgni, co również wpływa na zabezpieczenie zaworów przed korozją, a co za tym idzie wydłuża się okres pracy zaworu.

Tabela 6.1. Skład chemiczny stali stosowanych na zawory do silników wysokoprężnych [38]

Gatunek Stali	Skład chemiczny [%]								
	C	Mn	Si	Max P	Max S	Cr	Ni	W	V
18H2N4WA	0,14÷0,20	0,25÷0,55	0,17÷0,37	0,03	0,025	1,35÷1,65	4,00÷4,40	0,8÷1,2	-
H10S2MA	-	≤0,7	≤0,8	≤0,03	≤0,02	13÷15	13÷15	2÷2,75	0,15

Tabela 6.2. Własności mechaniczne dla odkuwek zaworów [38]

Zawór	Stal	R_m [MPa]	R_e [Mpa]	A_5 [%]	Z [%]	KCU2 [J/cm ²]	Twardość Brinella
Wydechowy	H10S2MA	≥900	≥700	≥10	≥35	≥19	255+302
ssący	18H2N4WA	≥1030	≥780	≥12	≥50	≥100	255+302

oznaczenia:

- R_m – wytrzymałość na rozciąganie
- R_e – granica plastyczności
- A_5 – wydłużenie
- Z – przewężenie
- $KCU2$ – udarność

Warunki pracy grzybków zaworów charakteryzowane się przez podanie temperatury pracy, wielkość naprężeń oraz korozyjność produktów spalania. Profil temperatury w zaworze zależy w istotnym stopniu od temperatury gazów wylotowych. Wyższe temperatury gazów są charakterystyczne dla silników z zapłonem iskrowym. Postać rozkładu temperatury wynika z grzania przez gazy wylotowe oraz odprowadzania ciepła wzdłuż trzonka zaworu oraz po przez przyłgnię zaworu do gniazda. Zakres temperatur pracy zaworów wylotowych zależy od mocy jednostkowej silnika, sprawności cyklu spalania i efektywności systemu chłodzenia. Każdy zapłon mieszanki w silniku powoduje powstanie dużych sił wywieranych na powierzchnie zaworu.

Wielkość naprężeń w grzybku zaworu zależy od ciśnienia wywieranego przez gazy i jest znacznie wyższa dla silników z zapłonem samoczynnym niż dla silników z zapłonem iskrowym. Wskutek faktu iż kontakt powierzchni przyłgni grzybka z gniazdem jest w chwili początkowej punktowy, na naprężenia rozciągające nakładają się naprężenia gnące.

Średnioobrotowe silniki Diesla ze względów ekonomicznych powinny mieć zdolność spalania ciężkich paliw oraz do długotrwałej pracy w warunkach dużych obciążeń. Dopływ ciepła do zaworu ma miejsce podczas spalania mieszanki oraz wypływu gazów spalinowych podczas wydechu. Ciepło jest odprowadzane od grzybka zaworu wskutek kontaktu z wkładką zaworu, część ciepła jest odprowadzana także wzdłuż trzonka zaworu. Zakres temperatur zaworów na powierzchni uszczelniającej w warunkach pełnego obciążenia wynosi dla nowoczesnych silników Diesla zaprojektowanych do spalania ciężkich paliw

370-550°C.

Trwałość zaworów ma silny związek z warunkami pracy.

Można wyróżnić następujące fazy w rozwoju uszkodzenia [23]:

- w pierwszej kolejności powstają osady na powierzchni przylgni wskutek spalania ciężkiego paliwa,
- osady ulegają spłaszczeniu podczas zamykania zaworu i mogą wskutek tego pękać,
- osady zawierają związki o niskiej temperaturze topnienia, które mogą powodować korozję powierzchni przylgni,
- stałe produkty spalania, cząstki żużla i twarde cząstki pochodzące z paliwa powodują uszkodzenie powierzchni przylgni podczas zamykania zaworu.

Wskutek pęknięcia osadów i uszkodzeń powierzchni zaworów tworzy się kanał, którym mogą wypływać gazy co powoduje lokalny wzrost temperatury co z kolei prowadzi do przyspieszenia korozji wskutek występowania lokalnie stopionych osadów. Korozja wanadowa jest związana z powstawaniem osadów niskotopliwych z produktów spalania. Głównymi zanieczyszczeniami są tlenki siarki, pięciotlenek wanadu, tlenek sodu oraz tlenki wapnia powstałe ze składników oleju. Osady te tworzą dwie warstwy, z których zewnętrzna zawiera głównie siarczki metali alkalicznych, a warstwa wewnętrzna jest bogata w wanad i pierwiastki materiału podłoża. W przypadku przedmuchów powodowanych przez kanały gazowe na powierzchniach uszczelniających można spodziewać się lokalnego wzrostu temperatury o 200-300K, to znaczy do temperatur wyższych od temperatury topnienia osadów. W pracy [50] badaniom poddano 27 powłok oraz 16 napoin. Poddano także badaniom handlowe nadstopy na bazie Ni oraz stałe. Jako punkty odniesienia przyjęto stopy Nimonic 80A, stal zaworową Inconel 52 oraz stop stelitowy do napawiania Stellite 6. Badania korozyjne wykonano w temperaturach 650°C w sztucznej mieszaninie popiołów o składzie chemicznym zbliżonym do składu osadów. Z badań korozyjnych wynika, że najbardziej istotnym dodatkiem stopowym pierwiastkiem w składzie chemicznym badanych materiałów jest chrom, stopy na bazie Ni oraz Co miały lepszą odporność na korozję od stopów na bazie Co. Najlepszymi powłokami były natryskiwane plazmowo Ni-50%Cr oraz powłoki chromowane dyfuzyjnie. Dobór materiału do napawiania jest wyrazem kompromisu pomiędzy wymaganiami wysokiej odporności na zużycie ścierne w podwyższonych temperaturach i odpornością na korozję. Badania silnikowe potwierdziły wnioski z badań laboratoryjnych i uzyskane w nich rankingi.

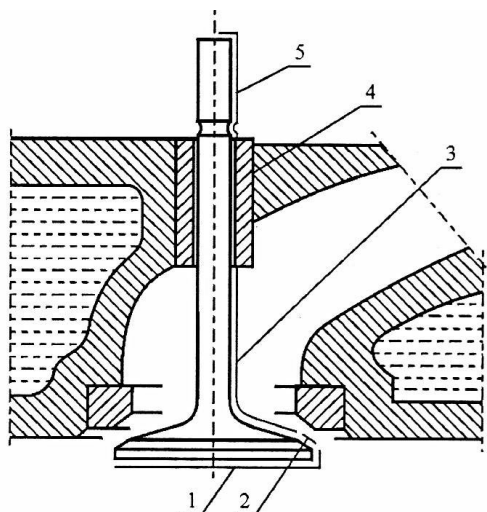
Od wielu lat prowadzone są prace w zakresie obniżenia masy grzybków zaworów wlotowych, powłok na trzonkach i konstrukcji prowadnic są analogiczne do tendencji w budowie zaworów wylotowych. Masa zaworu ceramicznego wynosi około 40% masy zaworu metalowego. Powoduje to obniżenie potrzebnej sztywności sprężyny i związane z tym obniżenie tarcia. Zawory ceramiczne były używane z powodzeniem w samochodach wyścigowych [33]. Problem zużycia powierzchni przyłgni zaworów wylotowych jest mniejszy ze względu na obecność w gazach wylotowych niewielkich ilości mgły olejowej i sadzy mających działanie smarne. Uważa się, że po pewnym czasie eksploatacji tworzy się na powierzchni przyłgni cienka powłoka zabezpieczająca przed zużyciem. Powierzchnie przyłgni zaworów wlotowych, natomiast, mają zwykle metaliczny połysk świadczący o braku smarowania i intensywnym zużyciu.

Można wyróżnić trzy mechanizmy zużycia występujące na przyłgni zaworu: adhezja, zużycie ściernie i odkształcenie plastyczne. Zużycie adhezyjne jest związane z powstaniem mikropołączeń i ich późniejszym rozrywaniem. Zużycie to jest związane z brakiem smarowania współpracujących powierzchni i jest nasilone w przypadku niektórych skojarzeń materiałowych.

Zużycie ściernie ma związek z obecnością twardych cząstek w strefie styku. Jeśli odkształcenie plastyczne nierówności współpracujących powierzchni przekroczy dopuszczalną wartość, wówczas nastąpi ubytek materiału. W tym przypadku korzystnie jest obniżyć współczynnik tarcia oraz stosować materiały o wysokiej granicy plastyczności. Ważną cechą stopów do napawania jest ich odporność na zużycie adhezyjne zachodzące przy dużych naciskach. Zachodzi intensywne płynięcie plastyczne materiału na powierzchni styku.

6.1.1. Obciążenia cieplne zaworów wylotowych w silniku SW 680

Na powierzchni zaworów można wyróżnić conajmniej 5 charakterystycznych powierzchni (rys. 6.1.), w których warunki brzegowe wymiany ciepła są w przybliżeniu jednorodne [36].



Rys. 6.1. Zawór wylotowy na tle głowicy silnika. [36]

Powierzchnia: 1 - talerzyka zaworu od strony komory spalania

2 – styk przylgni zaworu z gniazdem\

3 – stopki zaworu w kanale dolotowym

4 – prowadząca trzonka zaworu w głowicy

5 – trzonka zaworu ponad głowicą

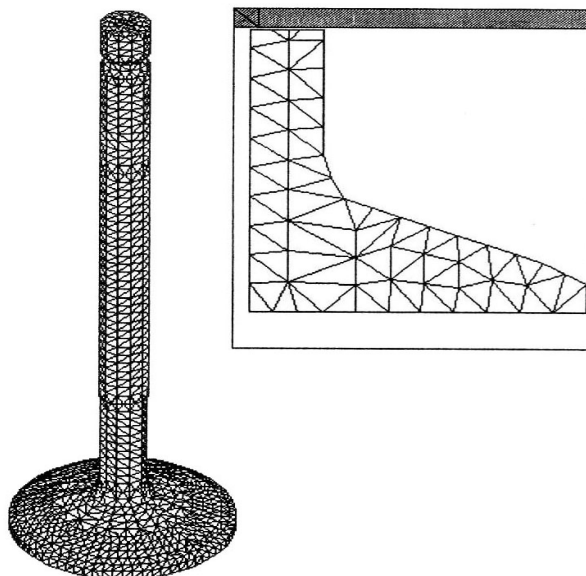
Na powierzchni talerzyka zaworu mogą być przyjmowane jednorodne warunki ciepła, które są równoważne z warunkami jakie panują w komorze spalania silnika, natomiast powierzchnia przylgni zaworu cyklicznie styka się z powierzchnią gniazda zaworowego i dodatkowo jest omywana przez gazy spalinowe. Ze względu na fazy otwarcia i zamknięcia zaworu, wartości średnie warunków wymiany ciepła muszą uwzględnić obie fazy procesu spalania. Identycznie jest w przypadku powierzchni stopy zaworu w kanale wylotowym. W tym przypadku również warunki wymiany ciepła mają charakter cykliczny.

Warunki brzegowe wymiany ciepła zaworów dolotowych zestawiono w tabeli 6.3.

Tabela 6.3 Warunki brzegowe wymiany ciepła dla zaworów wylotowych SW680 [36]

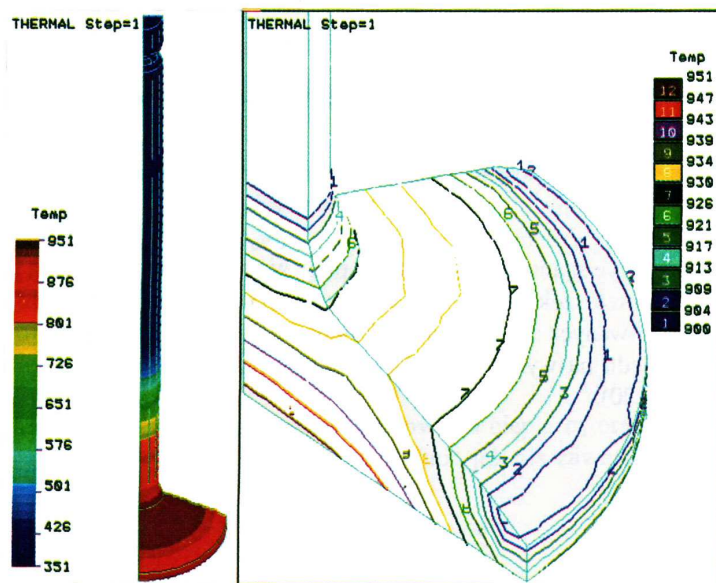
Numer powierzchni i	Współczynnik przejmowania ciepła α_i , W/(m ² K)	Temperatura T _i , K
1	303,3	1152,2
2	915,1	638,3
3	400,0	918,1
4	433,4	358,0
5	80,0	348,0

Na rysunku 6.2. przedstawiono model dyskretny zaworu wylotowego silnika SW 680, który został opracowany z zastosowaniem elementów bryłowych TETRA4. Natomiast rysunek 6.3. obrazuje pole temperatur w przekroju stopki zaworu [36].



Rys.6.2. Model dyskretny (MES) zaworu wylotowego silnika SW680 [36]

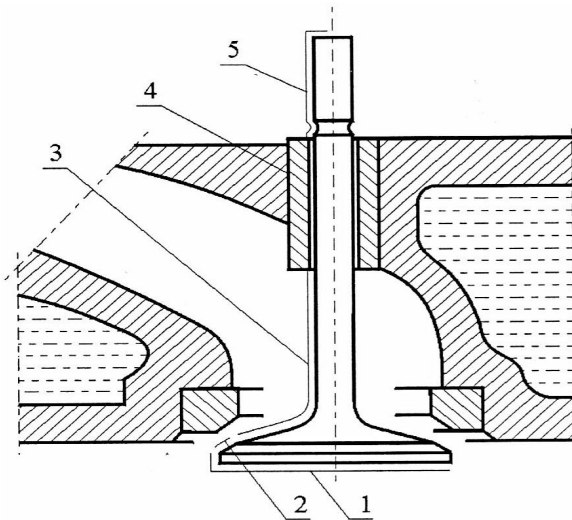
Model dyskretny przedstawiony na rysunku 6.3. składa się z 11916 elementów i 4896 węzłów.



Rys. 6.3. Pole temperatury w przekroju stopki zaworu wylotowego SW680
dla charakterystyki zewnętrznej $n=2200$ obr/min, $N_e=114,6$ kW [36]

6.1.2. Obciążenia cieplne zaworów ssących w silniku SW 680

Zawory ssące są mniej obciążone cieplnie niż zawory wylotowe, ale w przeciwieństwie do omówionej powyżej grupy zaworów są obciążone w większym stopniu szokami termicznymi. Podobnie jak zawory wylotowe zostało wyodrębnionych pięć charakterystycznych powierzchni ze względu na wymianę ciepła. Obrazuje to rysunek 6.4.



Rys 6.4. Szkic zaworu dolotowego na tle głowicy silnika. [36]

Powierzchnia:

- 1 - talerzyka zaworu od strony komory spalania
- 2 - styk przylgni zaworu z gniazdem
- 3 - stopki zaworu w kanale dolotowym
- 4 - prowadząca trzonka zaworu w głowicy
- 5 - trzonka zaworu ponad głowicą

Na powierzchni talerzyka zaworu wymiana ciepła jest charakteryzowana przez średnią wartość współczynnika przejmowania ciepła w komorze spalania oraz średnią temperaturę gazów. Do analizy obciążeń cieplnych na przylgni zaworu również należy wziąć pod uwagę fazę otwarcia i zamknięcia zaworu. W fazie otwarcia zaworu powietrze, które dopływa do cylindra chłodzi zawór i ścianki głowicy, a samo powietrze podgrzewa się do w kanale dolotowym i ogrzewa do temperatury ścian głowicy, tłoka i cylindra. Dalszy wzrost temperatury powietrza następuje w pobliżu gniazda zaworowego. Temperatura przyjęta w fazie otwarcia zaworu jest temperaturą otoczenia powiększoną o przyrost temperatury powietrza w kanale dolotowym.

Na wymianę ciepła na powierzchni stopy zaworu w kanale dolotowym wpływa prędkość przepływu powietrza przez kanał dolotowy. Wartość współczynnika przejmowania ciepła jest mniejsza niż w przypadku zaworu wylotowego, ponieważ występuje mniejsza wartość ciśnień oraz przepływ powietrza jest mniej zaburzony niż wydech spalin, co jest spowodowane poprzez aerodynamikę kanału i kierunek przepływu powietrza.

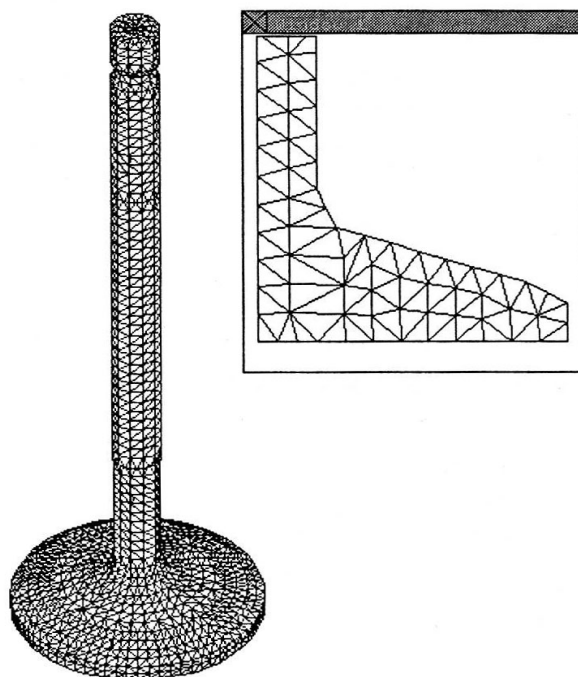
Warunki brzegowe wymiany ciepła zaworów dolotowych zestawiono w tabeli 6.4

Tabela 6.4 Warunki brzegowe wymiany ciepła dla zaworów dolotowych silnika SW680 [36]

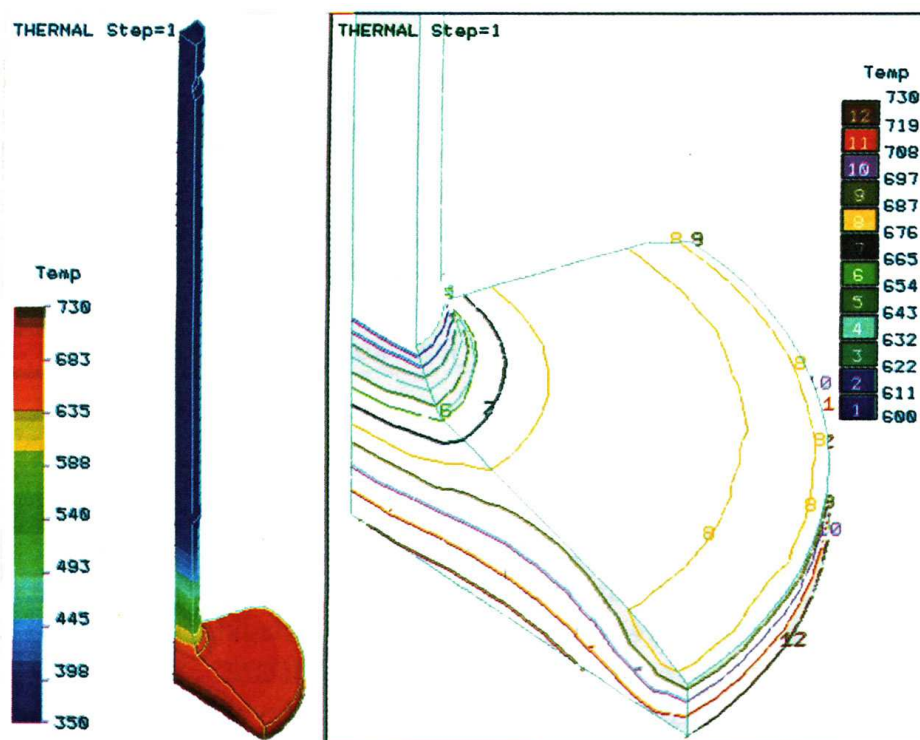
Numer powierzchni i	Współczynnik przejmowania ciepła α_i $W/(m^2K)$	Temperatura T_i, K
1	303,3	1152,2
2	935,8	330,9
3	200,0	295,0
4	432,0	358,0
5	80,0	348,0

Podobnie jak w przypadku zaworów wylotowych tak i przy zaworach ssących stworzono model numeryczny za pomocą elementów bryłowych TETRA4. Elementowi badań przypisano wartości temperatur otoczenia T_i oraz wartości współczynnika przejmowania ciepła α_i . Zgodnie z tabelą 6.4 i zilustrowano to na rysunku 6.6.

Rysunek 6.5. przedstawia model dyskretny zaworu dolotowego silnika SW680, który składa się z 10484 elementów i 4428 węzłów.



Rys.6.5. Model dyskretny (MES) zaworu dolotowego silnika SW680 [36]



Rys. 6.6. Pole temperatury w przekroju stopki zaworu dolotowego SW680 dla charakterystyki zewnętrznej $n=2200$ obr/min, $N_e=114,6$ kW [36]

6.2. Analiza właściwości materiałów ceramicznych

Właściwości materiałów ceramicznych oznaczają reakcje na zewnętrzne czynniki, jakie oddziałują na elementy. Czynnikiem działającym na ceramikę może być np.: strumień ciepła, obciążenie mechaniczne, pole elektromagnetyczne, w którym znajduje się materiał itp.

Najważniejszymi cechami, które wpływają na trwałość powłoki ceramicznej stosowanej na elementach silnika spalinowego jest wytrzymałość cieplna i wytrzymałość na szoki termiczne (wł. mechaniczne), kruchość (wł. mechaniczne), gęstość i porowatość (wł. fizyczne), odporność na utlenianie (wł. chemiczne).

Podstawowe właściwości materiałów ceramicznych przedstawione w tabeli 6.5. scharakteryzowano w rozdziale 6.2.1.

Tabela 6.5. Podstawowe właściwości tworzyw ceramicznych

Właściwości		
Mechaniczne	Fizyczne	Chemiczne
moduł sprężystości	gęstość	odporność na utlenianie
wytrzymałość na rozciąganie	gęstość pozorna	odporność na silne kwasy
wytrzymałość na ściskanie	gęstość nasypowa	odporność na roztwory zasadowe
wytrzymałość na zginanie	sypkość	odporność na roztwory organiczne
wytrzymałość na pękanie	kapilarność	
udarność	porowatość	
wytrzymałość na pełzanie	szczelność	
odporność na udary cieplne	przepuszczalność pary	
twardość	wodnej	
kruchość	wilgotność	
ścieralność	nasiąkliwość	
	ogniotrwałość	
	mrozoodporność	
	rozszerzalność cieplna	
	przewodność cieplna	
	właściwa	
	rozmiar ziaren	

6.2.1. Właściwości mechaniczne i fizyczne materiałów ceramicznych

Właściwości mechanicznych są to zewnętrzne obciążenia mechaniczne, które widoczne są w odkształceniach i dekohezji [27]. Przy małej sile działającej na powierzchnię materiału wszystkie elementy zachowują się identycznie, a ich odkształcenie jest wprost proporcjonalne do obciążenia. Zróżnicowane zachowanie materiału występuje dopiero przy zwiększonym obciążeniu. Można wtedy wyróżnić odkształcenie: sprężyste (odwracalne) i odkształcenie plastyczne (trwałe).

Odkształcenie sprężyste określa moduł sprężystości (E). W zależności od wielkości Modułu Younga można określić zdolność materiału do przyjmowania pierwotnej postaci po odjęciu działającej siły na element. Moduł Younga obliczamy ze wzoru [44]:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} [Pa] \quad (6.3)$$

gdzie:

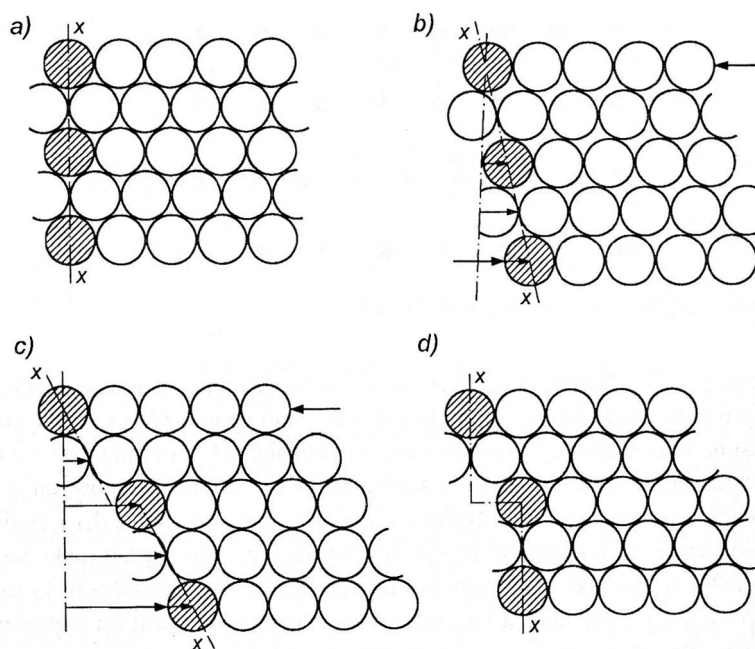
$$\sigma = \frac{F}{S} [Pa] - \text{natężenie powstające przy obciążeniu siłą } F [N] \text{ elementu o przekroju}$$

$$S[\text{mm}^2],$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100\% - \text{odkształcenie sprężyste wywołane naprężeniem } \sigma, \text{ wyznaczone na}$$

podstawie stosunku zmiany Δl do pierwotnej długości pomiarowej l .

Trwałe odkształcenie może wystąpić przy przesunięciu kolumny atomów struktury względem drugiej kolumny atomów. Po powyższym przesunięciu atomy są wolne od oddziaływania na nie sił, a naprężenia są równe zero. Wtedy też element nawet po odjęciu działającej siły F pozostaje w stanie odkształconym.



Rys 6.7. Odkształcenie struktury krystalicznej pod wpływem przyłożenia obciążenia

ścinającego: a- stan początkowy, b- przyłożenie małego obciążenia ścinającego c- przyłożenie dużego obciążenia ścinającego, d- stan po odjęciu obciążenia [71]

Duże obciążenia mogą też doprowadzić do utraty spójności materiału (dekohezji), materiał ulega rozdzieleniu na dwie lub więcej części.

Istotną cechą materiałów ceramicznych jest brak odporności na kruche pękanie. Jest to utrata przez materiał spójności bez wcześniejszego wystąpienia odkształceń.

Największe różnice między tradycyjnymi metalami a materiałami ceramicznymi upatrywać można w ich ciągliwości. Porównując materiały ceramiczne z metalami należy podkreślić, że niepożądaną cechą charakterystyczną jest kruchość lub mała zdolność tolerowania odkształceń. Także bardzo mała jest odporność na kruche pęknięcia materiałów ceramicznych w porównaniu z odpornością metali.

Podłoże metalowe i nałożona na nie warstwa ceramiczna różnią się właściwościami mechanicznymi i fizycznymi, powoduje to chwilowe lub stałe naprężenia w warstwie. Jest to bardzo niepożądane zjawisko, gdyż prowadzi do zniszczenia naniesionej warstwy w wyniku nagłych zmian temperatury. W celu zapobiegania temu zjawisku tzn. skutecznego obniżenia wartości naprężeń stosuje się warstwę pośrednią, a jej dobór nie może być przypadkowy. Zastosowanie warstwy z materiału o dobrej przyczepności wpływa na zwiększenie trwałości warstwy wierzchniej z materiału ceramicznego. Dzieje się tak prawdopodobnie w wyniku mocniejszego klinowania się cząstek ceramiki na chropowatej powierzchni podkładu niż na gładkiej powierzchni stalowej.

Materiały ceramiczne odznaczają się również wysoką odpornością na temperaturę (tabela 6.6.), małym współczynnikiem przewodzenia ciepła, a także odpornością na szoki termiczne (tabela 6.7).

Materiały ceramiczne rozszerzają się wraz ze wzrostem temperatury. Spowodowane jest to zmianą średnich międzyatomowych przestrzeni, co jest rezultatem termicznego ruchu atomów.

Tabela 6.6. Wartości ciepła właściwego dla wybranych materiałów ceramicznych

Materiał	Ciepło właściwe [Jg^{-1}] w temperaturach			
	25 ⁰ C	50 ⁰ C	100 ⁰ C	1000 ⁰ C
Al ₂ O ₃	0,54	0,78	0,92	1,25
BeO	0,69	1,02	1,28	2,23
MgO	0,74	0,94	0,01	1,28
ZrO ₂ (niestabiliz.)	0,38	0,45	0,51	0,64
ThO ₂	0,20	0,23	0,25	0,30
Si ₃ N ₄	-	0,68	0,80	1,30
BN	0,58	0,78	1,02	1,95
SiC	0,48	0,67	0,84	1,26

B ₄ C	-	0,95	1,13	2,21
WC	-	0,18	0,21	0,26

Tabela 6.7. Wartości krytycznej różnicy temperatury powodującej szok termiczny

Material	$\Delta T_{\max} [^{\circ}\text{C}]$
Al ₂ O ₃	90-190
ZrO ₂	70
MgO	40-100
B ₄ C	110-260
SiC	125-500
Si ₃ N ₄	400-500
Kompozyt ziarnisty 85% Al ₂ O ₃ 15% ZrO ₂	800-1000

Przez pojęcie szoku termicznego rozumie się naprężenie cieplne, które pojawia się w części ceramicznej w następstwie poddania jej oddziaływaniu różnic temperatur między powierzchnią i wnętrzem materiału albo między różnymi obszarami części maszyn.

Przy doborze materiałów pracujących w warunkach nieustalonego przepływu ciepła można kierować się zasadą, że materiały posiadające niski współczynnik rozszerzalności termicznej, wysoką odporność na kruche pękanie i wysoką przewodność cieplną są odporniejsze na szok termiczny. Najprostszym sposobem określenia odporności na szoki cieplne jest nagrzewanie próbek do coraz większych temperatur i wrzucanie ich do wody. Miarą szoku jest różnica temperatur jaką uzyskuje się w ten sposób. Różnice temperatur w elementach powodują zniszczenie powierzchni próbki, co widoczne jest w pękaniu i odpadaniu warstwy wierzchniej.

Gęstość materiałów ceramicznych jest zależna od rodzaju występujących w nich faz krystalicznych. Materiały uzyskane na bazie metali ciężkich mają gęstość do 12 g/cm³, zaś dla materiałów ceramicznych konstrukcyjnych wynosi ona poniżej 4 g/cm³.

Gęstość jest stosunkiem masy do objętości [39]:

$$\rho = \frac{m}{V} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) \quad (6.4)$$

gdzie: m- masa próbki

V- objętość próbki

Natomiast porowatość materiałów ceramicznych rozumie się jako stosunek objętości porów do całkowitej objętości ciała i w przypadku materiałów ceramicznych porowatość jest nieunikniona i wynika ona ze specyfikacji wytwarzania.:

Do obliczenia porowatości potrzebna jest „szczelność” tzn. liczba określająca zawartość substancji materiału w jednostce objętości [39]:

$$S = \frac{\rho_p}{\rho} \quad (6.5)$$

gdzie: ρ_p - gęstość pozorna

ρ - gęstość

Do właściwości fizycznych materiałów ceramicznych zaliczamy również ogniotrwałość. Jest to trwałość powłoki ceramicznej podczas długotrwałego działania wysokiej temperatury. Do ogniotrwałych materiałów zalicza się te, które wytrzymują działanie powyżej 1580⁰C bez widocznych odkształceń.

6.2.2. Przyczyny powstawania uszkodzeń

Powłoki ceramiczne, które są stosowane na elementach silnika pracują w podwyższonych temperaturach. Ich zadaniem jest m.in. zabezpieczyć element przed korozją, ograniczyć zużycie erozyjne, kawitacyjne, obniżyć temperaturę elementu czy obniżyć toksyczność spalin. Można wyróżnić dwie przyczyny powstawania pęknięć powłok na elementach silnika spalinowego:

- różnice temperatur między cząstką metalu i podkładu,
- różne współczynniki rozszerzalności cieplnej powłoki i podkładu.

Wartość współczynnika rozszerzalności cieplnej ma istotny wpływ na wielkość naprężeń jakie powstają na powierzchni powłoki a tym samym na trwałość pokrycia elementu silnika spalinowego. Metody jakie stosuje się do pomiaru odporności na zmęczenie cieplne powłoki opierają się na przemiennym nagrzewaniu i chłodzeniu próbki, a maksymalne temperatury mogą wynosić 1500K.

Stosowanymi kryteriami oceny zmęczenia cieplnego powłoki ceramicznej mogą być:

- powierzchnia odpryśniętej powłoki ceramicznej,

- przyrost temperatury badanego elementu, który mierzony jest termoparą umieszczoną na pewnej głębokości pod powłoką,
- wystąpienie określonego układu pęknięć lub też ilości pęknięć.

Zjawisko zmęczenia cieplnego jest podstawowym czynnikiem wpływającym na uszkodzenia powłok ceramicznych w eksploatacji. Jest ono opisywane jako narastający proces pęknięć warstwy wierzchniej elementu mechanicznego silnika spalinowego, który prowadzi do zmiennych naprężeń wywoływanych cyklicznymi zmianami temperatury.

6.2.3. Metody badań

Techniki badania właściwości użytkowych powłok są obszerne i często bardzo specyficzne dla każdego obszaru zastosowań. Do nich należą [34]:

- techniki obserwacji geometrii powierzchni – dostarczają szeregu informacji istotnych z punktu widzenia optymalizacji technologii wytwarzania powłok, jak i przewidywania ich właściwości. Na jej podstawie możemy określić wielkość, kształt i wzajemnie ułożenie krystalitów tworzących powłokę. Możemy również stwierdzić jej wewnętrzną spójność lub porowatość, a także ocenić chropowatość i profil geometryczny powierzchni,
- techniki określenia składu chemicznego – określenie składu chemicznego dokonywane jest oprzyrządowaniem, metodą mikroanalizy rentgenowskiej, które obecnie stanowi standardowe wyposażenie niemal każdego elektronowego mikroskopu skaningowego. Analiza charakterystycznego promieniowania rentgenowskiego może być realizowana dwoma technikami: metodą EDX (analiza energetyczna widma emitowanego promieniowania rentgenowskiego) oraz metodą WDX (analiza emitowanego widma emitowania pod względem długości fali). Stanowi to źródło informacji o składzie emitowanego mikroobszaru, który pochodzi z głębokości kilku mikrometrów, więc dla cienkich powłok wynik jest zakłócony częściowo informacją która pochodzi z podłoża. Wyklucza to możliwość przeprowadzenia analizy ilościowej,
- techniki badania struktury powłok – dostarczają one informacji o przebiegu procesu technologicznego oraz o zjawiskach zachodzących podczas eksploatacji. W badaniach tych napotykamy na szereg trudności z uwagi na niewielką grubość obiektu, co w wielu przypadkach wyklucza użycie metod dyfrakcyjnych. Mimo niewielkiego

zakresu możliwości wykorzystania tych technik stanowią one jednak często szybkie źródło informacji o przeprowadzonym procesie technologicznym i o jakości wytworzonej warstwy. Przy cieńszych powłokach oraz w przypadku ich wielofazowych kompozycji strukturalnych interpretacja dyfraktogramów jest niezwykle trudna, gdyż nakładają się refleksy pochodzące od różnych faz,

- wyznaczanie właściwości mechanicznych powłok – dotyczą one najczęściej wyznaczania twardości oraz adhezji do podłoża jako dwóch podstawowych cech determinujących ich jakość w rzeczywistych warunkach eksploatacji. Pomiar twardości powłok o grubości kilku mikrometrów można dokonywać jako tradycyjne pomiary mikrotwardości przy niewielkich obciążeniach. Dla powłok i cienkich warstw o grubości poniżej jednego mikrometra wykonuje się pomiary nanotwardości przy wykorzystaniu precyzyjnych przyrządów pomiarowych (nanotwardościomierzy). Uniwersalnym sposobem oceny adhezji powłoki do podłoża jest metoda zarysowania powierzchni kulką diamentową, która podczas próby pomiaru przesuwana jest po powierzchni ze stałą prędkością i liniowo narastającym obciążeniem. Miarą adhezji jest wielkość krytycznego obciążenia normalnego przy którym powłoka ulega odspojeniu od powierzchni (wykruszeniu).

Doświadczalne badania trwałości zaworu w warunkach laboratoryjnych

Badania eksploatacyjne podzielić można na laboratoryjne próby stanowiskowe dotyczące wybranych właściwości użytkowych warstw i powłok oraz próby eksploatacyjne na obiektach rzeczywistych.

Próby stanowiskowe dają możliwość stworzenia przybliżonej prognozy zachowania się wytworzonej technologicznej warstwy wierzchniej w warunkach zbliżonych do tych których spodziewamy się podczas eksploatacji obiektów rzeczywistych.

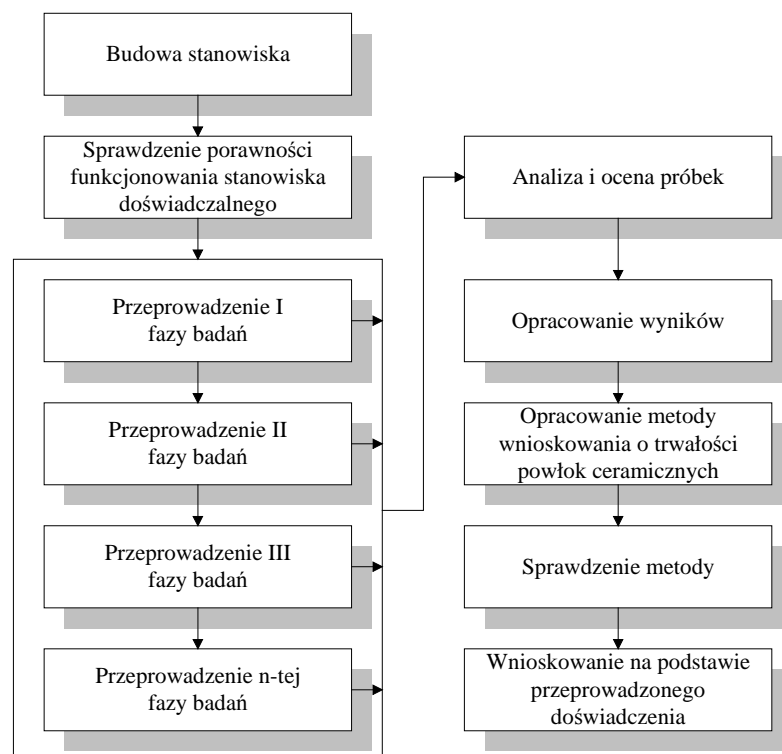
Badania eksploatacyjne podzespołów mechanicznych w pierwszej kolejności prowadzi się na hamowniach i symulatorach, a jeżeli ich wynik jest pomyślny, są one kontynuowane na obiektach rzeczywistych (pojazdach, maszynach roboczych, samolotach, itp.). Próby podzespołów doświadczalnych na hamowniach prowadzi się etapami. Po ściśle określonym planem badań eksploatacji podzespół demontuje się, a poszczególne elementy poddaje się szczegółowym oględzinom i pomiarom. Pozytywny ich wynik jest warunkiem koniecznym dla kontynuowania próby. Kryterium pozytywnego wyniku próby na hamowni jest zakończeniem całego programu badań oraz potwierdzenie założonej poprawy parametrów eksploatacyjnych (np. przyrostu mocy, zmniejszenia zużycia paliwa, zmniejszenia emitowanego hałasu, zmniejszenia emisji spalin itp.) lub poprawy trwałości i niezawodności poszczególnych elementów określanych na podstawie badań wielkości charakteru zużycia w odniesieniu do rozwiązania tradycyjnego.

Badania na obiektach rzeczywistych prowadzi się jako próby porównawcze. W przypadku węzłów ciernych występujących wielokrotnie w jednym obiekcie mechanicznym (np. zawory w silniku spalinowym, węzły układu kierowniczego lub zawieszenia w pojazdach) można zastosować kilka alternatywnych rozwiązań, w tym rozwiązanie dotychczas stosowane jako bazę odniesienia do wszelkich porównań. Można wówczas przyjąć że czasookres eksploatacji i widmo obciążeń były dla wszystkich porównywanych rozwiązań takie same lub bardzo zbliżone, a wynik porównania jest wtedy wiarygodny.

W przypadkach porównywania podzespołu lub węzłów zamontowanych w różnych obiektach doświadczalnych, należy wprowadzić poprawkę wynikającą z różnicy warunku eksploatacji, która bardzo często jest trudna do oszacowania.

7.1. Plan badań

Przed przystąpieniem do eksperymentu opracowano plan badań według którego realizowano poszczególne etapy doświadczenia. Plan realizacji widoczny jest na rysunku 7.1.



Rys 7.1. Plan badań elementu mechanicznego z powłoką ceramiczną

7.2. Opis stanowiska pomiarowego

W ramach prowadzonych badań opracowano stanowisko symulacyjne do badań zmęczeniowych powłok ceramicznych wykonanych na grzybkach zaworów silnikowych lub próbkach materiałowych. Podstawowym założeniem przy konstruowaniu stanowiska badawczego było umożliwienie obserwacji i badań zjawisk zachodzących na powierzchni zaworu poddanego zmiennym i cyklicznym oddziaływaniom temperatury. Stanowisko w przybliżony sposób oddaje charakterystykę zachowania zaworu silnikowego w jego naturalnym środowisku pracy. Dodatkowo zawór pokryty jest izolującą warstwą powłoki ceramicznej, której zadaniem jest wzięcie na siebie i swoją strukturę oddziaływania zjawiska szoku termicznego (grzanie – chłodzenie). Budowa stanowiska badawczego umożliwia ciągłe monitorowanie zachodzących zjawisk w warunkach laboratoryjnych, bez konieczności wykonywania skomplikowanych, czasochłonnych i kosztownych czynności demontażowo – montażowych, jakie występowałyby przy badaniu zaworu podczas pracy w korpusie silnika spalinowego z jego wszystkimi podzespołami.

Stanowisko składa z obrotowej tarczy (rys. 7.2), na której zamocowane są zawory silnika spalinowego z naniesioną powłoką ceramiczną. Z jednej strony zawory podgrzewane są palnikiem a z drugiej strony próbka chłodzona jest nadmuchem powietrza. Pomiar temperatury wykonywany jest przy pomocy kamery termowizyjnej i pirometru optycznego.



Rys. 7.2. Stanowisko doświadczalne

7.2.1. Przygotowanie zaworów do eksperymentu

Badania postanowiono przeprowadzić na silniku SW680, który jest w posiadaniu Zakładu Silników Spalinowych i Pojazdów Samochodowych. Na zawory wylotowe i ssące silnika SW680 została naniesiona powłoka ceramiczna ZrO_2 (rys. 7.3.). Materiał ten jest wykorzystywany do zastosowania w przypadkach, gdzie występuje wysoka temperatura. Dzięki małym wymiarom krystalitów ($<15nm$)[20] tetragonalna struktura może być nawet stabilizowana w temperaturze pokojowej lub poprzez dodanie kationów (np.: CaO lub Y_2O_3).

Na elementy została naniesiona powłoka ZrO_2 metodą plazmową. Na początek została wykonana warstwa podkładowa o grubości ok. 0,1 mm a następnie warstwa materiału ceramicznego o grubości ok. 0,5 mm . powłoka ta jest częściowo stabilizowana itrem czyli jest to stabilizacja w $8\div 12\%$, przy czym całkowita stabilizacja itrem mieści się w granicy 20%. Po naniesieniu powłoki ceramicznej elementy zostały przeszlifowane diamentowo i ich powierzchnia była gładka. Poniżej przedstawiono zdjęcia elementów z naniesioną powłoką ceramiczną.

a)



b)



Rys. 7.3. Widok z boku: a) – zawór wydechowy, b)- zawór ssący

Przed przystąpieniem do eksperymentu na stanowisku doświadczalnym wykonano również zdjęcia z obserwacji mikroskopowych nałożonej powłoki ceramicznej. Obserwacje dokonywano za pomocą trzech powiększeń: x10, x60 i x200. Widoczna jest struktura nałożonego materiału. W czasie dokładnego przeanalizowania powłoki nie stwierdzono zarysowań, pęknięć czy uszkodzeń nałożonego na zawory materiału. Powierzchnia charakteryzowała się jednolitą strukturą, jedynie można było zaobserwować delikatne przebarwienia przy powiększeniu x200.

Na rys. 7.4. przedstawiono zdjęcia zarejestrowane za pomocą mikroskopu z oprogramowaniem komputerowym, umożliwiającym archiwizację danych. Pozostała dokumentacja fotograficzna stwierdzająca stan powłoki ceramicznej na zaworach zamieszczona została w załączniku nr 3. Na fotografiach nie zaobserwowano uszkodzeń powłoki ceramicznej. Materiał został nałożony jednolicie bez widocznych braków w strukturze.

a)



b)



c)



Rys. 7.4. Widok powłoki ceramicznej zaworu ssącego przy powiększeniu

a) x10, b) x60, c) x200

7.3. Przebieg badań

W rozdziale 7.3. autor pracy skoncentruje się na analizie wizualnej badanych elementów, zostały zamieszczone zdjęcia obrazujące stan powłoki ceramicznej po każdej fazie przeprowadzonego eksperymentu. Prócz zdjęć z aparatu cyfrowego, zarejestrowano i zarchiwizowano również za pomocą mikroskopu stan materiału.

Przed przystąpieniem do pomiarów dokonano serii prób, podczas których okazało się iż jest konieczność modyfikacji stanowiska doświadczalnego.

Podczas trwania fazy I, II i III dokonano pomiarów temperatury za pomocą kamery termowizyjnej. We wszystkich tych fazach stanowisko pracowało z prędkością obrotową około 900 obr/min. Prędkość tą również zmierzono za pomocą przyrządów.

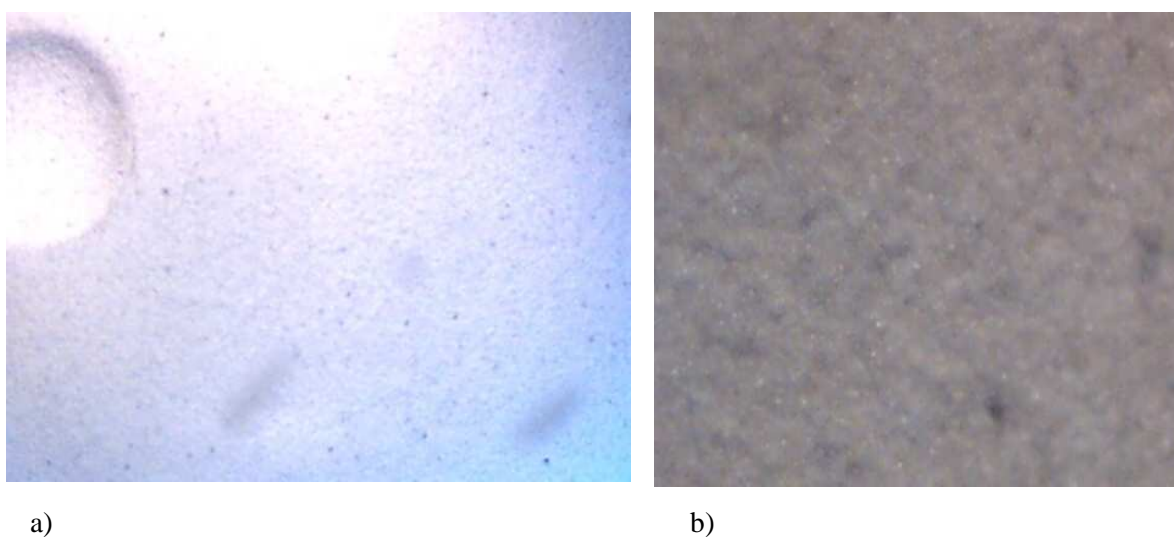
Po przeprowadzeniu prób stanowiskowych, za pomocą których nie uzyskano zniszczenia badanego elementu, podjęto kolejną próbę (faza IV) polegającą na wywoływaniu szoku termicznego nagrzewając elementy w piecu i chłodząc po przez zanurzenie w wodzie.

7.3.1. Faza I

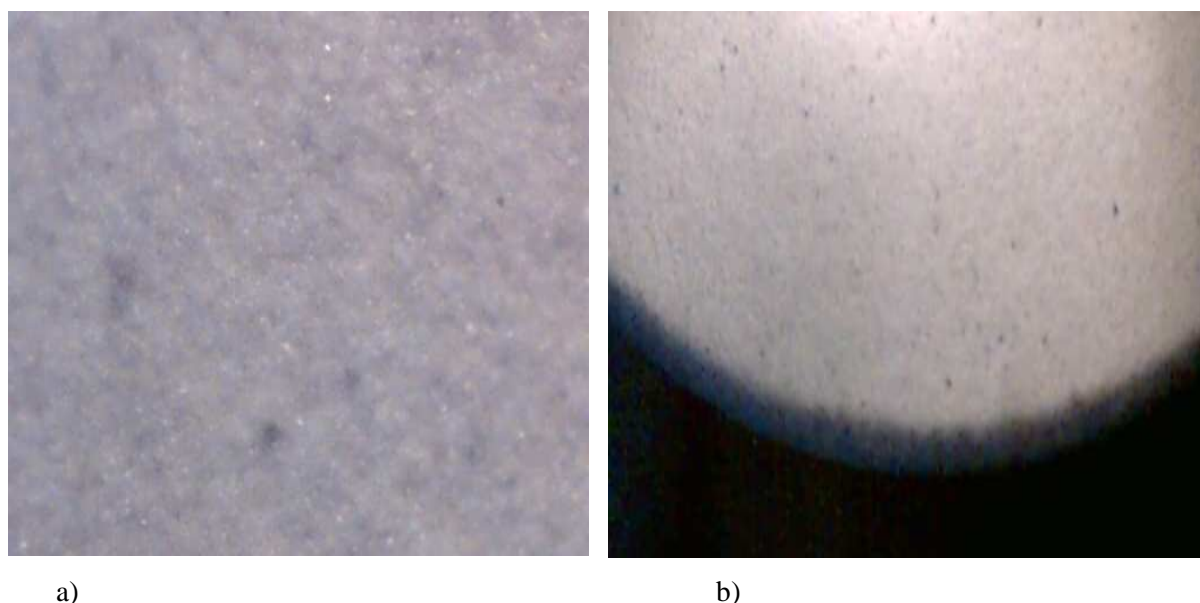
W fazie I elementy zostały poddane działaniu temperatury na stanowisku doświadczalnym za pomocą palnika gazowego. Po zakończeniu 60 godzin badań dokładnie przyjrano się badanym elementom (rys. 7.5.).



Rys. 7.5. Widok zaworów po fazie I



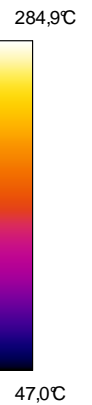
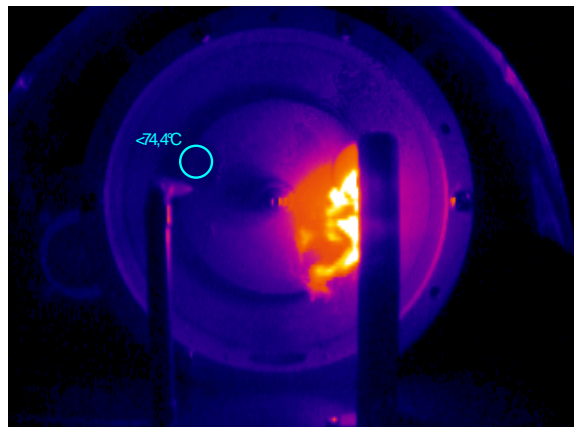
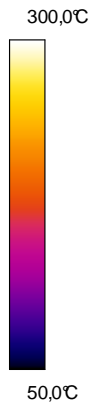
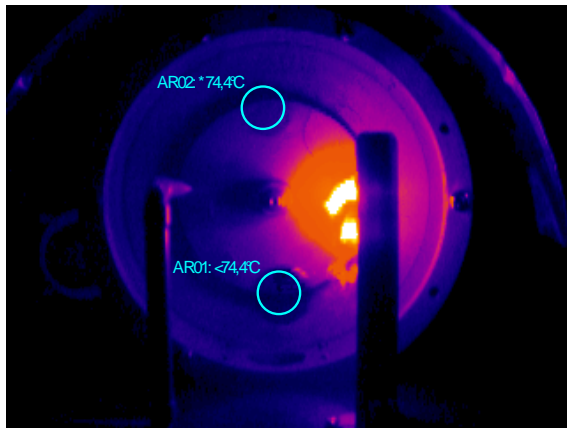
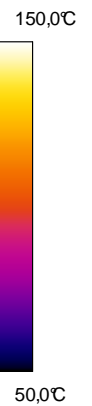
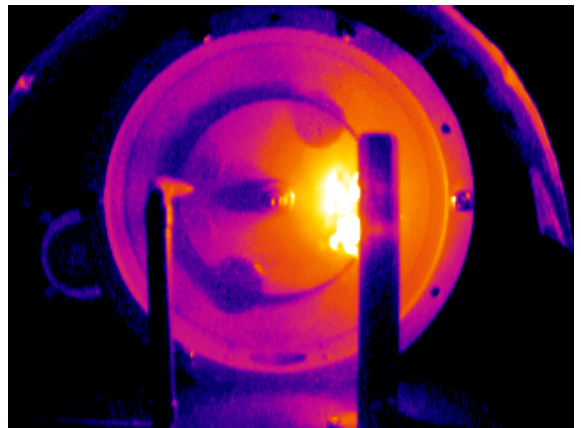
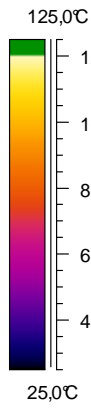
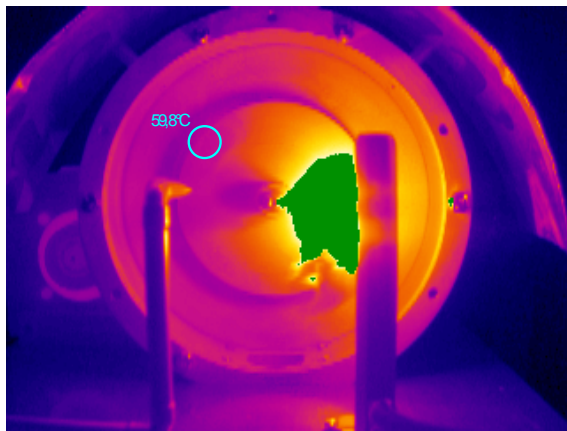
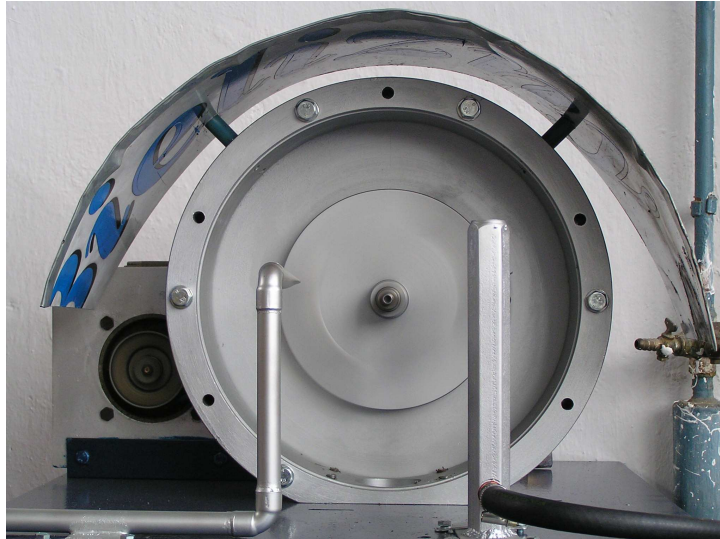
Rys. 7.6. Widok zaworu ssącego a- powiększenie x10, b- powiększenie x200



Rys. 7.7. Widok zaworu wydechowego: a- powiększenie x10, b- powiększenie x200

Po przeprowadzeniu badań w fazie I nie zaobserwowano pęknięć ani zarysowań na materiale (rys. 7.6. i rys.7.7.). Obserwacje pod mikroskopem, której wyniki zamieszczono powyżej również nie wykazały uszkodzenia powłoki. Jediną zmianą jest lekkie przebarwienie materiału w miejscu działania na próbkę płomieniem z palnika gazowego.

W trakcie badań w fazie I, gdzie elementy były grzane palnikiem gazowym, a ich chłodzenie było tylko naturalne, wynikające z obrotu elementów stanowiska doświadczalnego. Dokonano pomiarów temperatury na stanowisku przy użyciu kamery termowizyjnej (rys. 7.8.).



Rys. 7.8. Obraz z kamery termowizyjnej Faza I

Zaobserwowano bardzo mały szok termiczny jak i podczas każdorazowego zatrzymania stanowiska po oględzinach badanych elementów nie stwierdzono żadnych zmian na badanych próbkach.

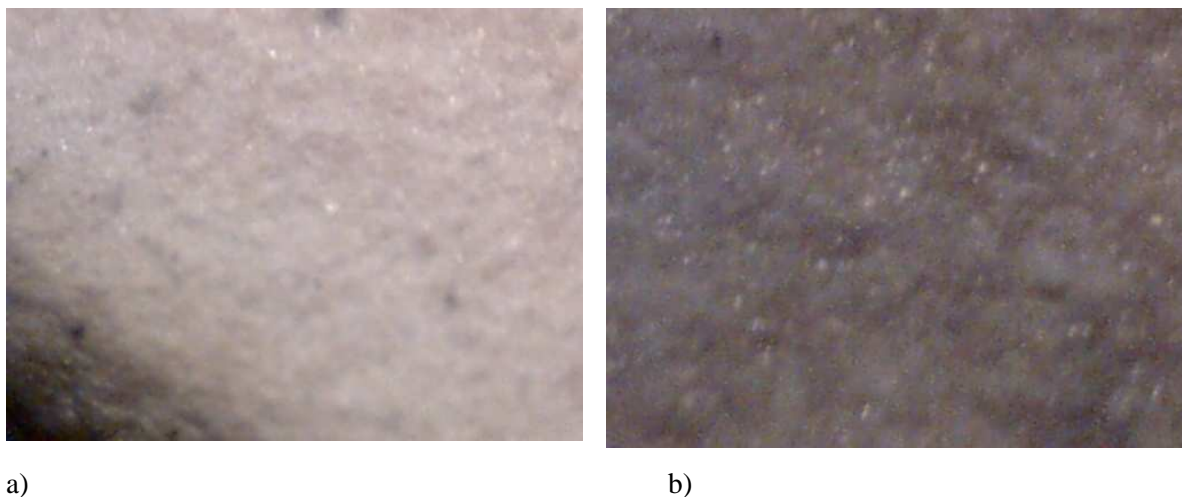
Po przepracowaniu badanych elementów przez 60 godzin podjęto decyzję o modyfikacji i zmianie warunków pracy elementów (FAZA II) i dodano dodatkowe chłodzenie próbek powietrzem ze sprężarki.

7.3.2. Faza II

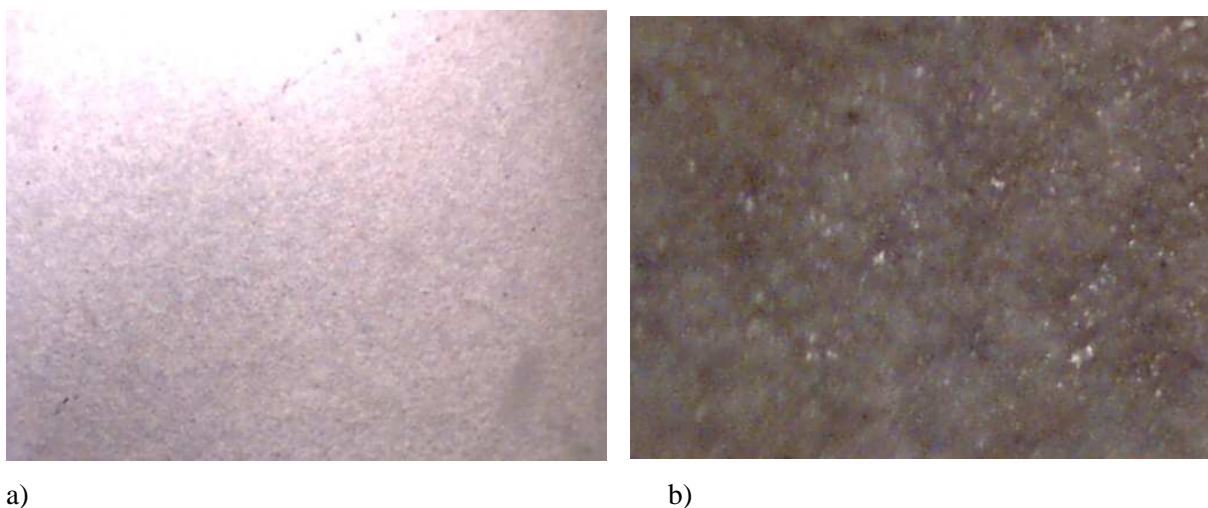
W fazie II zawory zostały poddane eksperymentowi wywołania szoku termicznego poprzez nagrzewanie z jednej strony palnikiem gazowym, a z drugiej strony chłodzone powietrzem ze sprężarki. Podobnie jak po fazie I została przeprowadzona obserwacja badanych elementów (rys. 7.9.).



Rys. 7. 9. Widok zaworu ssącego i wydechowego po fazie II

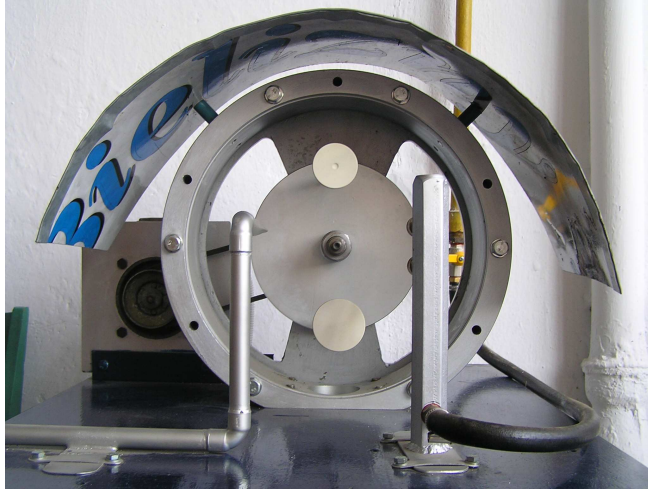


Rys. 7. 10. Widok zaworu ssącego: a- powiększenie x60, b- powiększenie x200

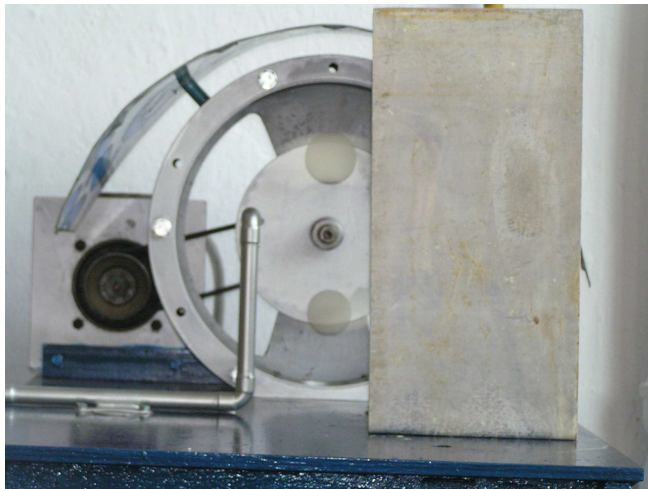


Rys. 7.11. Widok zaworu wydechowego: a- powiększenie x10, b- powiększenie x200

Po przeprowadzeniu badań w fazie II również nie zostały zaobserwowane pęknięcia czy zarysowania na powłoce ceramicznej (rys. 7.10. i rys. 7.11.). Obserwacje pod mikroskopem w powiększeniach x10, x60 i x200 nie wykazały uszkodzenia powłoki, które wskazywałyby na niezdatność elementu do dalszej eksploatacji. Zaobserwowano jedynie ciemniejsze przebarwienia materiału niż po fazie I, które powstały przez osmolenie elementów w trakcie oddziaływania na jego powierzchnię palnikiem gazowym. Podczas badań w Fazie II dokonano pomiarów temperatury przy użyciu kamery termowizyjnej (rys. 7.12, rys. 7.13, i rys. 7.14.).

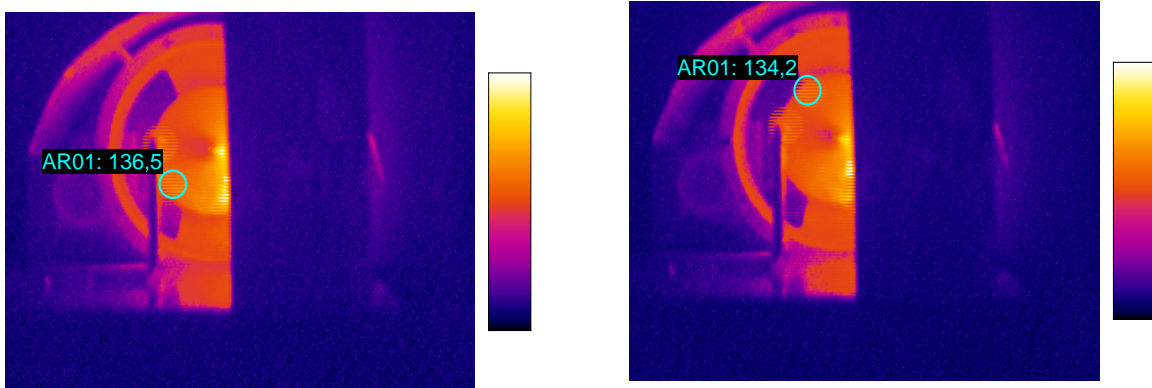


a) stanowisko pomiarowe - wyłączone



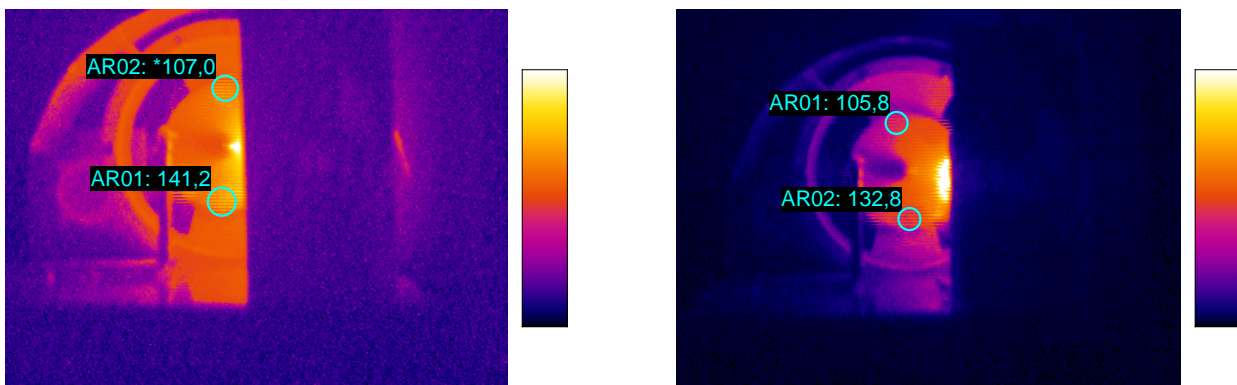
b) podczas próby: $n = 900$ obr/min.

c) pomiar bez chłodzenia

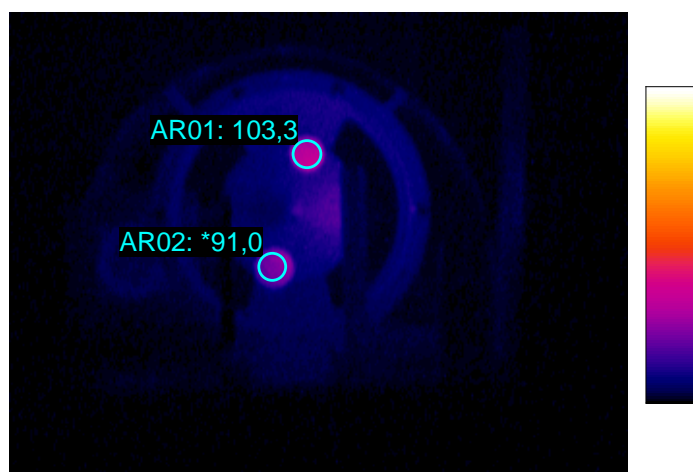


Rys. 7.12. Obraz z kamery termowizyjnej Faza II

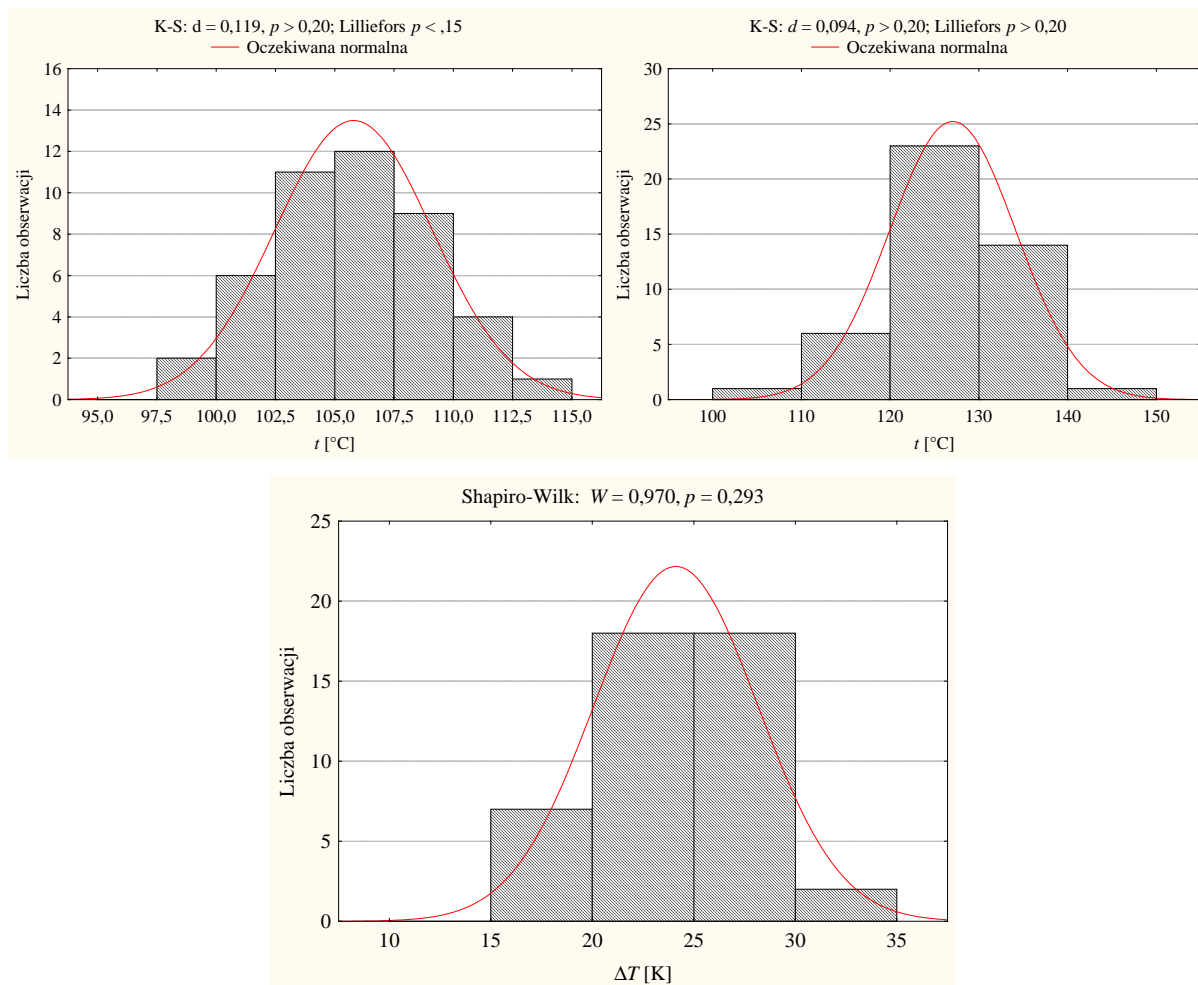
- a) stanowisko pomiarowe – wyłączone, b) podczas próby: $n = 900$ obr/min,
c) pomiar bez chłodzenia



Rys. 7.13. Obraz z kamery termowizyjnej Faza II (z chłodzeniem)



Rys. 7.14. Obraz z kamery termowizyjnej Faza II (po zatrzymaniu badanego elementu)



Rys. 7.15. Histogramy temperatur zaworu ochłodzonego, podgrzanego oraz różnicy temperatur rozkładów normalnych oraz wyniki testów Kołmogorowa-Smirnowa i Shapiro-Wilka

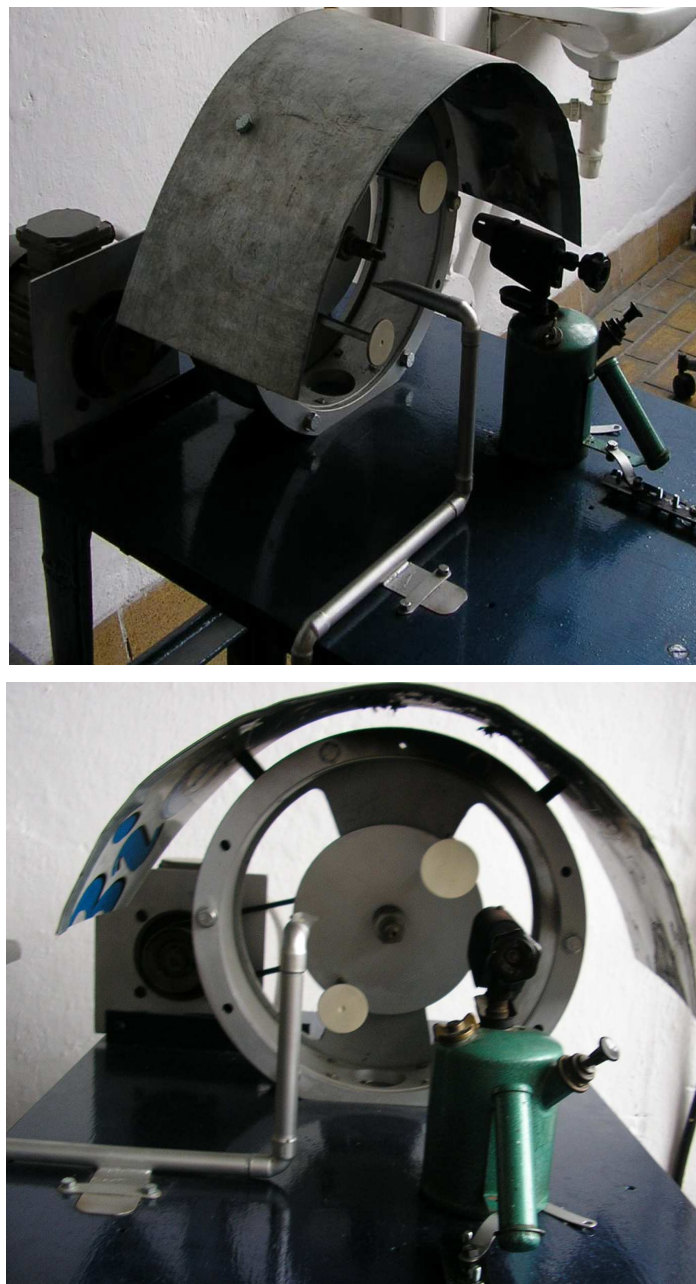
Po dokonaniu pomiarów i przeanalizowaniu temperatur zaobserwowano (rys. 7.15.), że rozkłady temperatur zaworów są zbliżone do rozkładów normalnych: $N(106,1; 2,9)$ oraz $N(129,1; 5,8)$, a różnica temperatur ma rozkład $N(23,0; 4,2)$. Średnia różnica temperatur wynosiła 296 K, ale nie jest możliwe rozróżnienie zaworów (o większej i mniejszej średnicy).

Wyniki z pomiarów termowizyjnych są porównywalne z wynikami, które zmierzono za pomocą pirometru.

Po dokonaniu powyższej analizy wyników zmodernizowano stanowisko doświadczalne zamieniając palnik gazowy na benzynowy, aby uzyskać większą temperaturę nagrzewania elementów i zwiększyć szok termicznych.

7.3.3. Faza III

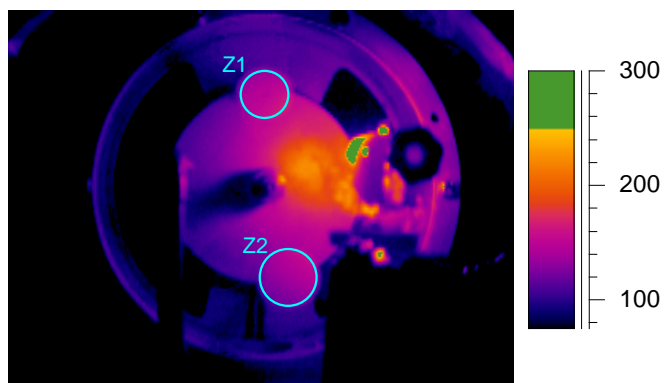
W fazie III zawory zostały poddane eksperymentowi wywołania szoku termicznego poprzez nagrzewanie z jednej strony palnikiem benzynowym, a z drugiej strony chłodzone powietrzem ze sprężarki. Takie rozwiązanie umożliwiło wywołanie większego szoku termicznego niż w fazie II. Analogicznie do faz poprzednich przeprowadzono obserwację badanych elementów i zarejestrowano rezultaty (rys. 7.16.).



Rys. 7.16. Widok zmodernizowanego stanowiska pomiarowego (FAZA III)

Przed przystąpieniem do cyklicznych badań sprawdzono efekt modernizacji przy użyciu kamery termowizyjnej i poniżej zostaną przedstawione wyniki jakie uzyskano.

Z chłodzeniem, $p = 2$



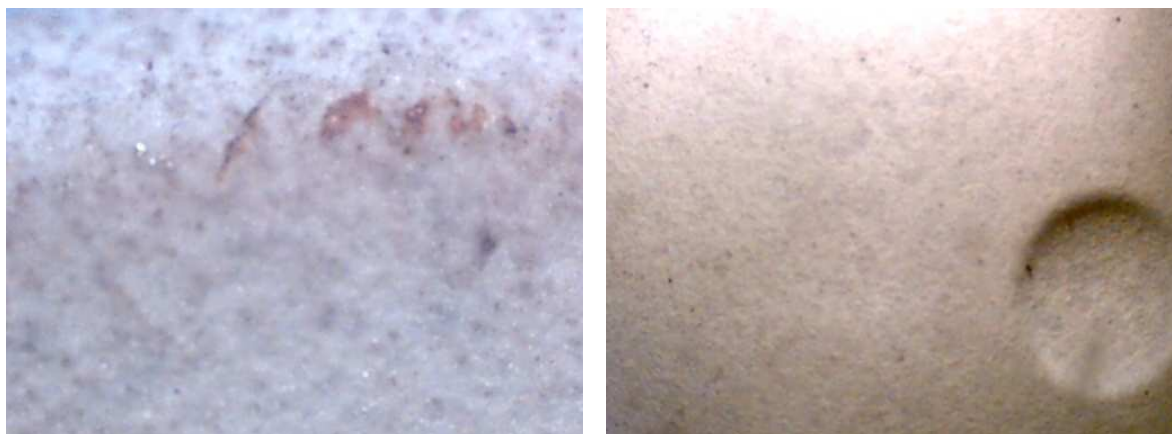
Analysis

Label	Min	Max	Max - Min	Avg	Stdev
Z1	132,3	170,9	38,6	149,5	8,9
Z2	114,4	159,2	44,9	137,0	10,4

Rys. 7.17. Obraz z kamery termowizyjnej Faza III



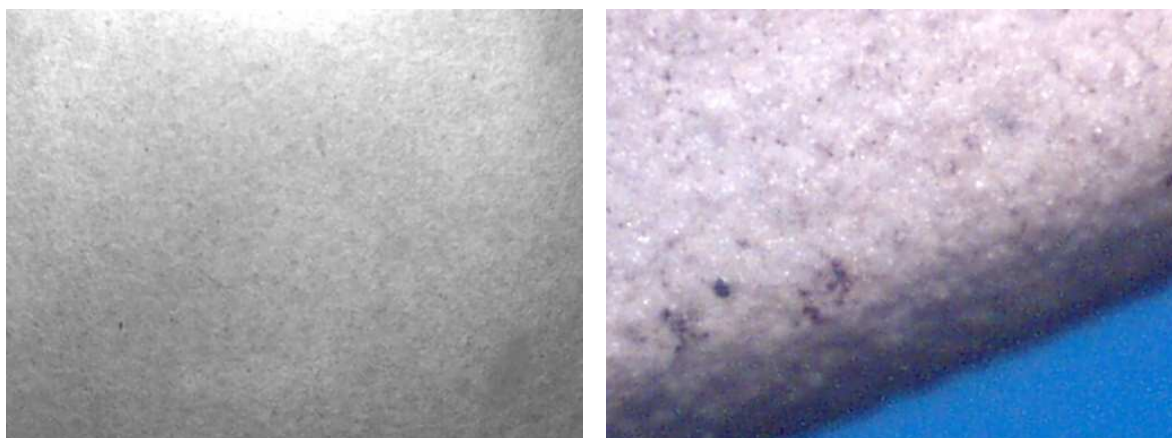
Rys. 7. 18. Widok zaworu ssącego i wydechowego po fazie III



a)

b)

Rys. 7.19. Widok zaworu ssącego: a- powiększenie x60, b- powiększenie x10



a)

b)

Rys. 7.20. Widok zaworu wydechowego: a- powiększenie x10, b- powiększenie x60

Po przeprowadzeniu badań w fazie III zostały zaobserwowane delikatne zarysowania powłoki ceramicznej (rys. 7.18.), ale w dalszym ciągu nie wystąpiły pęknięcia materiału. Obserwacje pod mikroskopem w powiększeniach x10, x60 i x200 nie wykazały głębokich uszkodzeń naniesionego materiału na elementy silnika spalinowego, które wskazywałyby na niezdatność elementu do dalszej eksploatacji (rys. 7.19 i 7.20.). Zaobserwowano przydymienie materiału na powierzchni, gdzie oddziaływał płomień z palnika benzynowego.

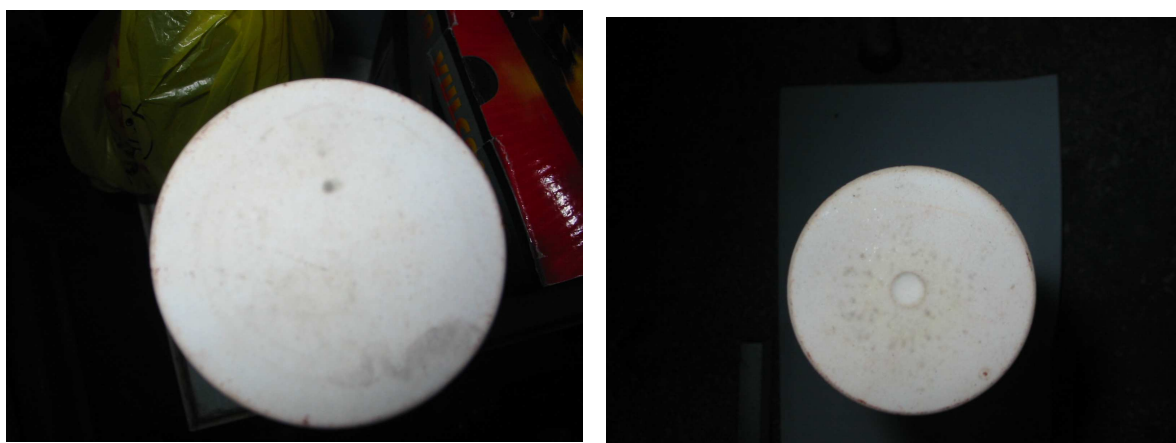
Na rysunku 7.17. przedstawiono zapis obrazu z kamery termowizyjnej wraz z zanotowanymi wartościami występujących temperatur. Jak można zauważyć na opisie zawór nr 1 podgrzewany jest palnikiem do temperatury 443,9 K, natomiast po schłodzeniu jego temperatura jest o ok. 312 K mniejsza, natomiast w przypadku zaworu 2 różnica temperatur wynosi ok. 318 K. Pozostałe zdjęcia z obserwacji zamieszczono w załączniku nr 3.

7.3.4. Faza IV

Ponieważ próby na stanowisku doświadczalnym nie doprowadziły do trwałego uszkodzenia badanych elementów w kolejnej fazie podjęto próby zniszczenia powłoki ceramicznej po przez nagrzewanie jej w piecu do bardzo wysokich temperatur a następnie wywołanie szoku termicznego po przez ochłodzenie zaworów w zimnej wodzie (rys. 7.22.). Początkowe badania zaczęto przeprowadzać na piecu mającym zdolność do nagrzania badanych elementów do ok. 873 K (rys. 7.21.).



Rys. 7.21. Widok pieca użytego do badań



Rys. 7.22. Kolejne obserwacje podczas przeprowadzania fazy IV

Ponieważ w temperaturach, jakie można było uzyskać w powyższym piecu powłoka ceramiczna nie uległa zniszczeniu, natomiast piec uległ awarii, zdecydowano się na zmianę pieca o większym zakresie nagrzewania. Kolejne próby przeprowadzono przy użyciu pieca z możliwością nagrzewania materiałów powyżej 1173 K (rys. 7.23.).



Rys. 7.23. Widok pieca użytego do badań

W trakcie powyższych badań, próbki przy tak wysokich temperaturach ulegały zniszczeniu (rys. 7.24.), było ono spowodowane uszkodzeniem powłoki ceramicznej. W każdej z badanych par zaworów ssących i wydechowych czas uszkodzenia był różny, co zostało ukazane w wynikach pomiarowych (załącznik nr 1) jak i w analizie statystycznej przeprowadzonej w powyższym rozdziale.

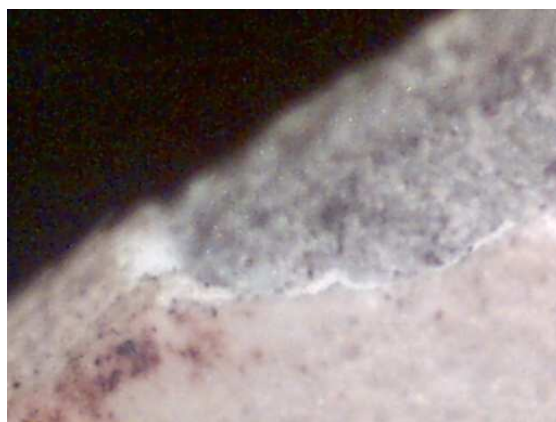


Rys. 7.24. Widok zaworu ssącego i wydechowego z uszkodzoną powłoką ceramiczną

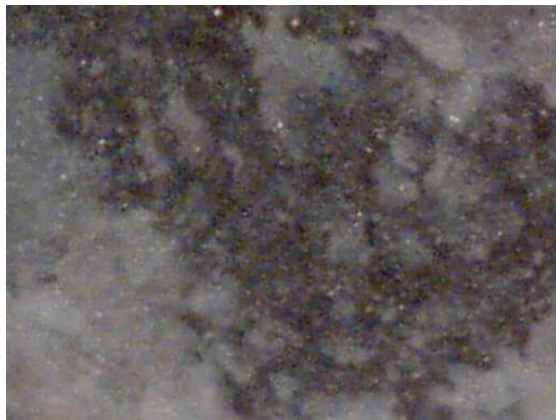
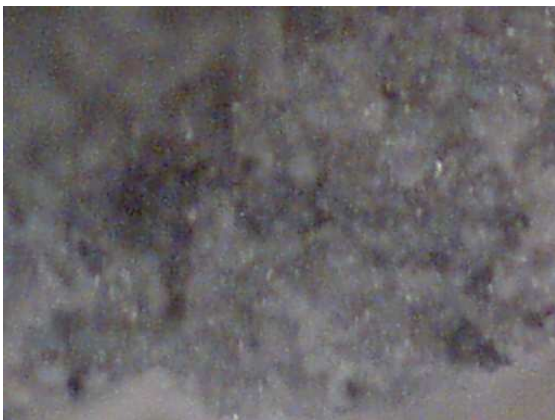
a)



b)



c)



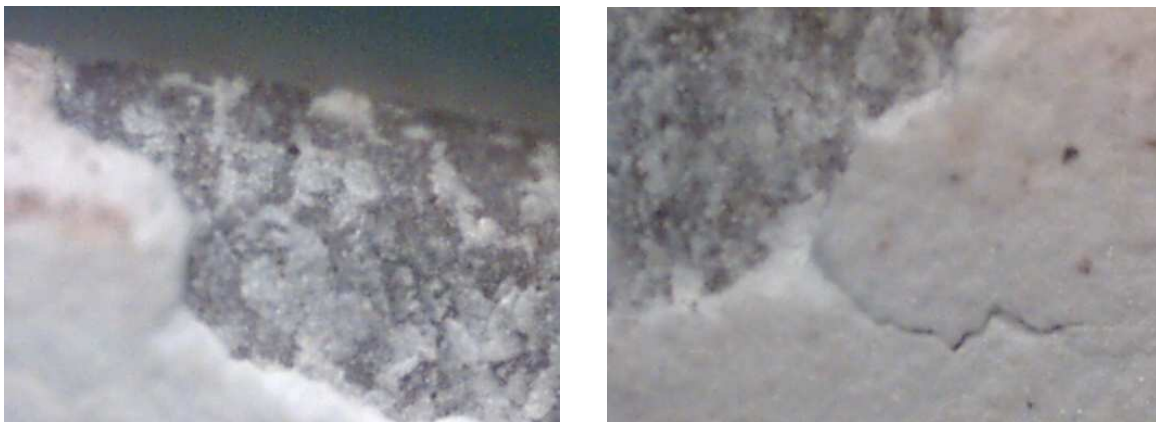
Rys. 7.25. Widok zaworu ssącego:

a- powiększenie x10, b- powiększenie x60, c- powiększenie x200

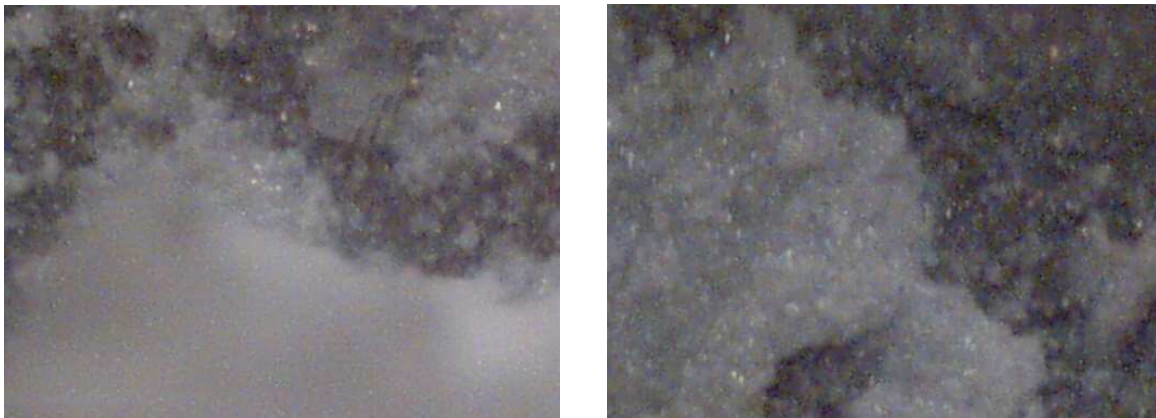
a)



b)



c)

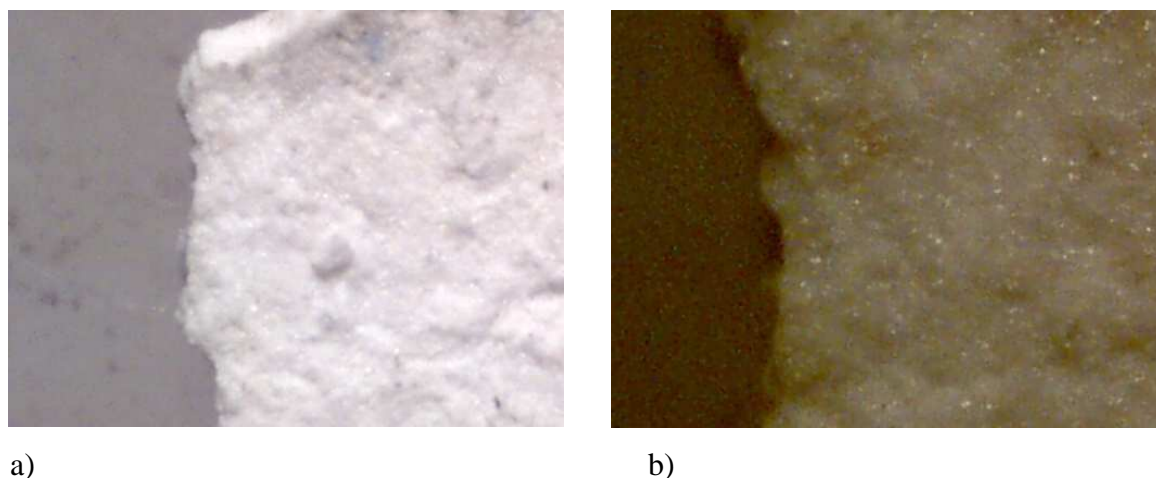


Rys. 7.26. Widok zaworu ssącego:

a- powiększenie x10, b- powiększenie x60, c- powiększenie x200

Na rysunkach 7.25. i 7.26. przedstawiono mikroskopowe obserwacje uszkodzonych powierzchni próbek przy powiększeniu x10, x60 i x200. jak można zaobserwować mają one różną postać i w każdym z pokazanych przypadków widoczne są różne postaci uszkodzeń.

Również dokonano obserwacji mikrofragmentów odzyskanych z pieca, po oderwaniu się powłoki ceramicznej od badanych elementów co widoczne jest na rysunku 7.27.



Rys. 7.27. Widok mikrofragmentów powłoki ceramicznej:
a- powiększenie x60, b- powiększenie x200

7.4. Wyniki przeprowadzonych badań

W rozdziale 7.4. przedstawiono wyniki badań pierwszej pary zaworów (ssący i wydechowy). Wyniki pomiarów eksperymentu na stanowisku doświadczalnym przedstawiono w tabelach 7.1. i 7.2, pozostałe tabele z wynikami zamieszczono w załączniku nr 1.

I. Zawór ssący i wydechowy

Tabela 7.1. Wyniki pomiarów z FAZ I, II, i III.

	dzień	początek	koniec	Ogółem godz.
FAZA I	1	8.15	16.15	8
	2	9.15	20.15	11
	3	9.00	15.00	6
	4	9.00	15.00	6
	5	9.00	15.30	6,30
	6	7.00	15.30	8,30
	7	9.00	15.00	6
	8	8.00	15.00	6
	9	9.00	11.00	2
SUMA				60

FAZA II	Ciśnienie sprężarki 0,5 MPa, n=900 obr/min,			
	1	9.15	16.15	7
	2	10.15	20.15	10
	3	8.00	15.00	7
	4	9.00	15.00	6
	5	8.00	15.30	7,30
	6	8.00	15.45	7,45
	7	9.00	15.00	6
	8	8.00	14.30	6,30
	9	9.00	11.30	2,30
SUMA				60
FAZA III	Ciśnienie sprężarki 0,5 MPa, n=900 obr/min,			
	1	10.00	12.00	2
	2	11.00	14.25	3,25
	3	9.40	15.30	4,50
	4	10.30	12.30	2
	5	10.30	11.30	1
	6	10.30	14.00	3,30
	7	9.45	13.30	3,45
	8	9.15	15.20	6,05
	9	8.45	15.00	6,15
	10	13.25	14.50	1,25
	11	9.45	14.40	4,55
	12	9.10	13.50	4,40
	13	9.55	12.50	2,55
14	11.50	14.05	3,15	
SUMA				50

Tabela 7.2. Wyniki pomiarów z FAZY IV - piec

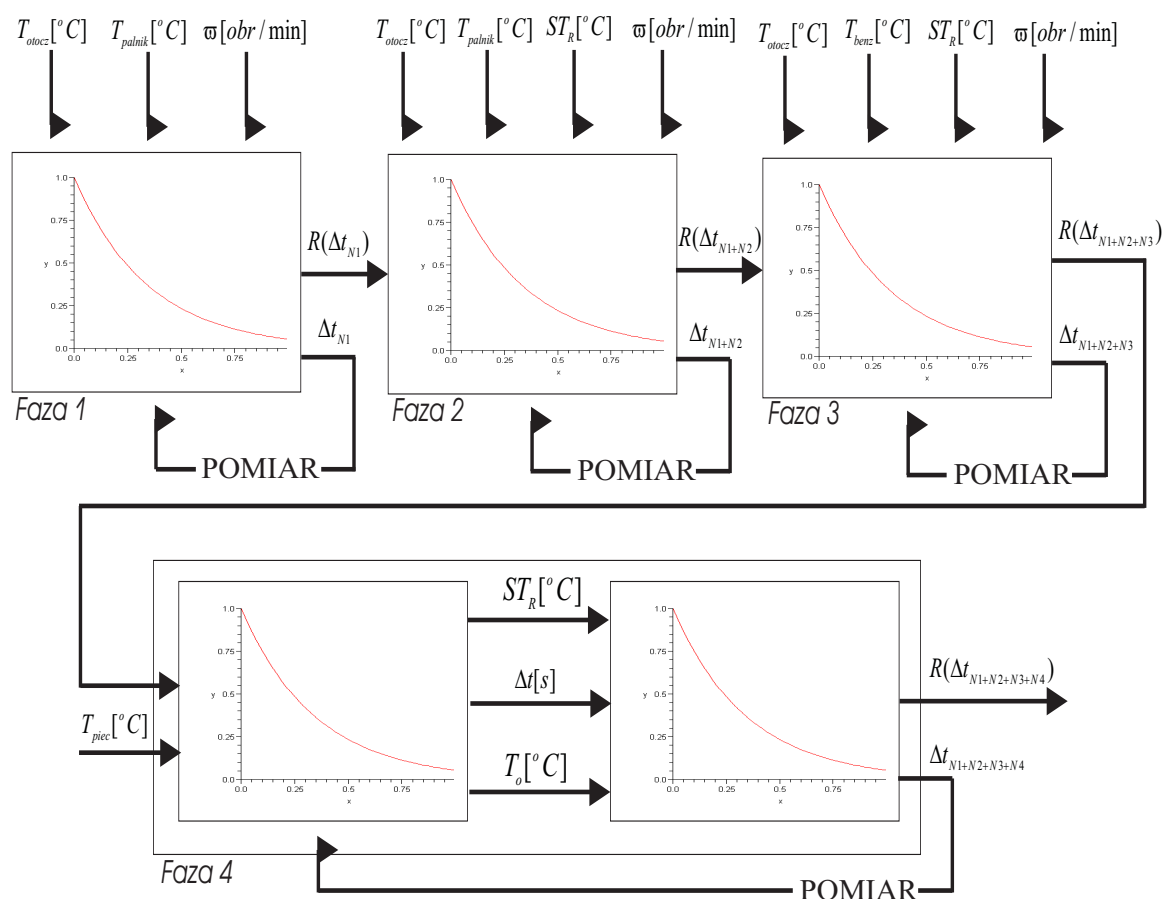
	Temperatura pieca, °C	Czas nagrzewania próbki, s	Temperatura próbki, °C	Czas chłodzenia, s	Temperatura H ₂ O, °C	Temperatura próbki po schłodzeniu, °C	Szok termiczny ΔT, °C
FAZA IV	24.10.2006 godz. 14.35-17.38 (zawór wydechowy)						
	400	1320	351	30	22,9	44,6	306,4
	407	1500	374	120	22,4	33,7	340,3
	394	1800	351	120	22,7	34,9	316,1
	405	1200	330	150	22,8	30,5	299,5
	406	1740	336	120	22,2	31,2	304,8
	403	1260	348	120	34,0	38,3	309,7
	godz.14.35-17.35 (zawór ssący)						
	400	1380	351	40	22,9	43,4	307,6
	407	1800	374	120	22,2	31,9	342,1
	394	1620	320	90	21,5	29,9	290,1
	405	1200	330	120	23,1	29,3	300,7
	396	1620	386	120	22,4	27,9	358,1
	403	1320	336	90	22,4	29,6	306,4
	26.10.2006 godz. 14.05-18.31 (zawór wydechowy)						
	427	1500	347	10	21,1	136,8	210,2
	439	1260	420	10	21,6	85,2	334,8
	448	1920	442	10	21,7	78,4	363,6
	458	1980	454	10	21,7	78,5	375,5
	469	1800	468	10	22,0	72,4	395,6
	479	1800	489	10	21,7	72,8	416,2
	483	1860	488	10	21,8	69,5	418,5
	481	1800	491	10	21,5	80,1	410,9
	godz.14.05-18.30 (zawór ssący)						
	427	1500	366	10	21,4	80,6	285,4
	439	1200	416	10	21,9	76,4	339,6
	448	2100	444	10	21,7	66,7	377,3
	458	1920	456	10	21,8	64,6	391,4
	469	1920	469	10	22,1	62,6	406,4
	479	1980	477	10	21,7	69,1	407,9
483	1980	485	10	21,5	68,0	417,0	

481	1740	475	10	21,4	74,8	400,2
27.10.2006 godz. 12.22-14-22 (zawór wydechowy)						
413	1260	374	10	22,9	107,9	266,1
422	1740	409	5	22,9	180,0	229,0
430	900	414	5	22,9	162,0	252,0
445	1560	453	5	23,8	158,7	294,3
455	1200	454	5	23,3	165,7	288,3
godz. 12.22-14.25 (zawór ssący)						
413	1260	371	10	23,1	83,4	287,6
422	1800	417	5	22,9	155,4	261,6
430	1020	379	5	22,8	131,1	247,9
445	1620	443	5	23,9	166,3	276,7
455	1320	458	5	23,2	159,0	299,0
08.11.2006 godz. 15.09-23.21 (zawór wydechowy)						
460	1800	461	10	18,1	127,0	334
473	1800	480	10	17,8	92,2	387,8
480	1800	492	10	17,2	101,0	391,0
486	1800	509	10	17,4	112,6	396,4
490	1800	515	10	17,6	110,0	405,0
496	1800	515	10	17,1	91,7	423,3
501	1800	528	10	17,8	104,0	428,0
505	1800	517	10	17,8	105,0	412,0
512	1800	526	10	17,7	101,9	424,1
517	1800	528	10	17,1	89,6	438,4
521	1800	530	10	18,5	76,7	453,3
524	1800	539	10	18,8	75,2	463,8
529	1800	536	10	19,3	75,4	460,6
531	1800	540	10	19,3	89,3	450,7
535	1800	543	10	19,2	61,6	481,4
(zawór ssący)						
460	1800	472	10	18,8	81,4	390,6
473	1800	482	10	17,8	76,4	405,6
480	1800	483	10	17,8	78,0	405,0
486	1800	489	10	18,1	69,0	420,0
490	1800	509	10	18,3	67,2	441,8

496	1800	506	10	17,3	57,4	448,6
501	1800	511	10	17,6	75,6	435,4
505	1800	512	10	17,8	70,8	441,2
512	1800	528	10	18,1	71,2	456,8
517	1800	524	10	18,1	71,8	452,2
521	1800	538	10	18,5	64,4	473,6
524	1800	539	10	18,9	48,7	490,3
529	1800	543	10	19,1	57,1	485,9
531	1800	543	10	18,7	63,2	479,8
535	1800	543	10	19,3	57,9	485,1
09.11.2006 godz. 14.45-16.57 (zawór wydechowy)– AWARIA PIECA						
501	1800	520	10	20,0	89,5	430,5
507	1800	533	10	19,7	89,9	443,1
516	1800	542	10	20,2	98,2	443,8
520	1800	542	10	19,8	83,4	458,6
(zawór ssący)						
501	1800	506	10	19,7	68,2	437,8
507	1800	511	10	19,5	67,2	443,8
516	1800	520	10	19,8	76,2	443,8
520	1800	528	10	19,8	Próbka wychładza się wraz z piecem	
20.11.06 (zawór wydechowy)						
897	480	897	10	21,1	78,3	818,7
927	480	927	10	21,0	58,4	868,6
915	480	915	10	21,0	53,7	861,3
Próbka uległa uszkodzeniu						
(zawór ssący)						
890	480	890	10	18,9	102	788
891	480	891	10	18,7	128	763
892	480	892	10	18,8	113,3	778,7 ubytek na krawędzi
897	480	897	10	18,7	107,5	789,5
Próbka uległa uszkodzeniu						

7.4.1. Charakterystyka próby badanej

Próba badana składa się z 16 zaworów pokrytych powłokami ceramicznymi. Próbę tą podzielono na dwie grupy: zawór ssący i zawór wydechowy. Zawory poddawane były badaniom w różnych IV fazach. Są to fazy niezależne od siebie. Mimo, że fazy $N=\{1,2,3,4\}$ nie zależą od siebie to niezawodność obiektu w fazie R_N zależy od niezawodności R_{N-1} . Jest to podyktowane tym, że każda faza $N=2,3,4$ w której obiekt był poddawany działaniu czynników zewnętrznych, np. temperatury jest kontynuacją poprzedniej pracy tego obiektu. W związku z powyższym należy skonstruować taki model, w którym uwzględnia się zależności między obiektami badanymi. Schemat blokowy modelu badań znajduje się na rysunku 7.28. Czas nagrzewania każdej próbki w fazie I wynosił 60 godzin, fazie II 60 godzin, fazie III 50 godzin. Zawory zostały uszkodzone dopiero w fazie IV.



Rys. 7.28. Schemat blokowy modelu badań

7.4.1.1. Statystyki opisowe dla Fazy I

Tabela 7.3. Statystyki opisowe dla fazy I, w której czas pracy zaworu wynosił 60 godzin.

Zmienna	N ważnych pomiarów	Średnia	Mediana	Minimum	Maksimum	Odch. Std.	Skośność
Uszkodzenie	126,00	0,00	0,00	0,000	0,00	0,00	
Temperatura próbki po nagrzaniu	126,00	108,51	106,20	100,800	118,70	7,45	0,474

Z tabeli 7.3. wynika, że temperatura próbki po nagrzaniu wynosi średnio ok. 381 K. Po wykonaniu 126 pomiarów na 8 zaworach pokrytych powłokami ceramicznymi stwierdzić można, że minimalna temperatura na zaworach wynosi ok. 379 K, a maksymalna ok. 391 K. Odchylenie standardowe od wartości średniej wynosi 280,45 K. Rozkład temperatury próbki po nagrzaniu jest w około 48% asymetryczny. Ponieważ jako uszkodzenie elementu mechanicznego przyjęto 1 i wartość średnia wynosi 0, zatem wnioskujemy, że obiekt pracujący w fazie I nie został uszkodzony. Reasumując zawory pokryte powłokami ceramicznymi pracujące średnio w temperaturze 381,51 K, przez 60 godzin nie ulegają uszkodzeniu. Ponadto nie można sprawdzić dla fazy I zależności uszkodzenia (zmiennej zależnej) od czasu pracy i temperatury próbki po nagrzaniu (zmiennych niezależnych). Powodem jest brak zmienności zmiennej zależnej.

7.4.1.2. Statystyki opisowe dla Fazy II

Tabela 7.4. Statystyki opisowe dla fazy II, w której czas pracy zaworu wynosił 60 godzin

Zmienna	N ważnych pomiarów	Średnia	Mediana	Minimum	Maksimum	Odchyl. Std.	Skośność
Uszkodzenie	128	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Temperatura próbki po nagrzaniu	128	131,5	132,8	120,7	141,2	6,2	-0,27
Temperatura próbki po schłodzeniu	128	106,4	107,0	102,2	109,1	2,2	-0,77
Szok termiczny	128	25,1	26,0	18,5	34,2	5,3	0,40

W tabeli 7.4., zestawiono wyniki pomiarów dla fazy II. Zawory nagrzewane osiągały średnio temperaturę 404,50 K. Szok termiczny jakiemu poddawany był obiekt badany był stosunkowo

mały, bo wynosił średnio ok. 298 K. Obiekt w powyższej fazie również nie został uszkodzony.

7.4.1.3. Statystyki opisowe dla Fazy III

Tabela 7.5.. Statystyki opisowe dla fazy III, w której czas pracy zaworu wynosił 50 godzin

Zmienna	N	Średnia	Mediana	Minimum	Maksimum	Odch.Std.	Skośność
Uszkodzenie	8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Temperatura próbki po nagrzaniu	8	172,66	173,80	139,20	204,90	20,52	-0,05
Temperatura próbki po schłodzeniu	8	130,48	127,70	114,40	156,30	14,65	0,67
Szok termiczny	8	42,21	43,35	20,00	57,30	11,01	-1,01

W fazie III obiekt podobnie jak w poprzednich cyklach nie został uszkodzony.

7.4.1.4. Statystyki opisowe dla Fazy IV

Faza IV jest fazą w której badany element mechaniczny ulega zniszczeniu. Zawory są poddawane bardzo wysokim temperaturą w piecu, co obrazuje tabela 7.6.

Tabela 7.6. Statystyki opisowe dla fazy IV-wszystkie próby.

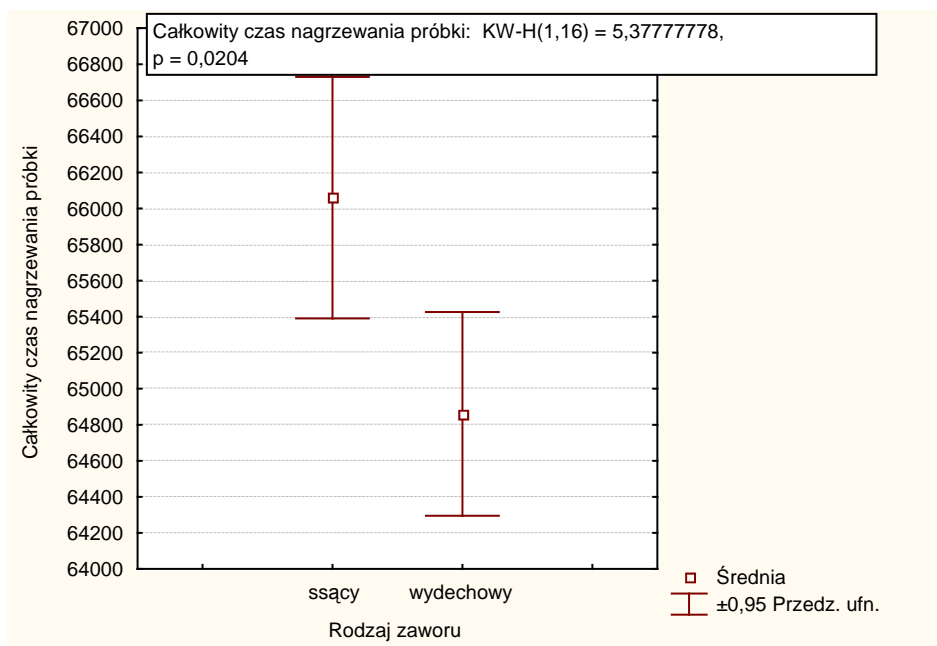
Zmienne	N ważnych pomiarów	Średnia	Mediana	Min.	Maks.	Odch. Std.	Skośność
Uszkodzenie	656	0,02	0,00	0,00	1,00	0,15	6,18
Temperatura pieca	656	501,64	481,00	394,00	927,00	119,98	2,60
Czas nagrzewania próbki	656	1597,32	1800,00	480,00	2100,00	393,04	-1,73
Całkowity czas nagrzewania próbki	656	34248,02	33450,00	1320,00	67380,00	19931,48	0,03
Temperatura próbki po nagrzaniu	656	491,75	479,50	320,00	927,00	128,35	2,18
Czas chodzenia	656	23,17	10,00	5,00	150,00	35,70	2,37
Temperatura wody	656	20,31	19,80	17,10	34,00	2,15	0,79
Temperatura próbki po schłodzeniu	656	82,15	76,70	27,30	180,90	33,83	0,83
Szok termiczny	656	409,60	398,40	210,20	868,60	127,39	2,10

Tabela 7.7. Statystyki opisowe dla fazy IV – uszkodzenie zaworu

Zmienne	N ważnych pomiarów	Średnia	Mediana	Min.	Maks.	Odch. Std.	Skośność
Uszkodzenie	16	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	
Temperatura pieca	16	906,44	899,50	890,00	927,00	14,19	0,38
Czas nagrzewania próbki	16	480,00	480,00	480,00	480,00	0,00	
Całkowity czas nagrzewania próbki	16	65460,00	65460,00	64080,00	67380,00	946,91	0,39
Temperatura próbki po nagrzaniu	16	906,44	899,50	890,00	927,00	14,19	0,38
Czas chodzenia	16	10,00	10,00	10,00	10,00	0,00	
Temperatura wody	16	19,61	19,30	17,70	21,00	1,10	0,15
Temperatura próbki po schodzeniu	16	87,09	93,75	53,70	129,00	25,72	0,01
Szok termiczny	16	819,34	800,70	770,00	868,30	38,66	0,19

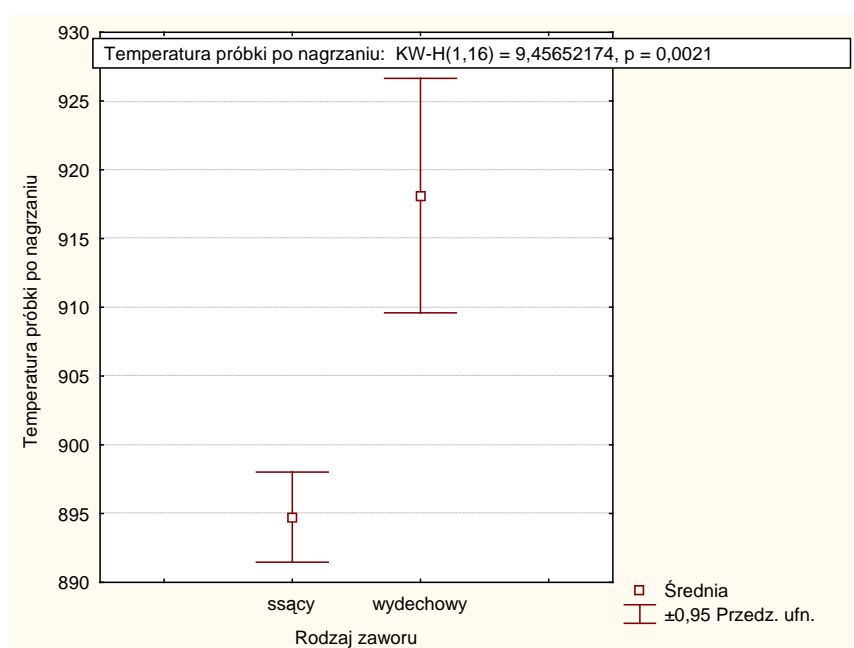
Tabela 7.8 Statystyki opisowe dla fazy IV – zawór nieuszkodzony

Zmienne	N ważnych pomiarów	Średnia	Mediana	Min.	Maks.	Odch. Std.	Skośność
Uszkodzenie	656	0,02	0,00	0,00	1,00	0,15	6,18
Temperatura pieca	656	501,64	481,00	394,00	927,00	119,98	2,60
Czas nagrzewania próbki	656	1597,32	1800,00	480,00	2100,00	393,04	-1,73
Całkowity czas nagrzewania próbki	656	34248,02	33450,00	1320,00	67380,00	19931,48	0,03
Temperatura próbki po nagrzaniu	656	491,75	479,50	320,00	927,00	128,35	2,18
Czas chodzenia	656	23,17	10,00	5,00	150,00	35,70	2,37
Temperatura wody	656	20,31	19,80	17,10	34,00	2,15	0,79
Temperatura próbki po schodzeniu	656	82,15	76,70	27,30	180,90	33,83	0,83
Szok termiczny	656	409,60	398,40	210,20	868,60	127,39	2,10



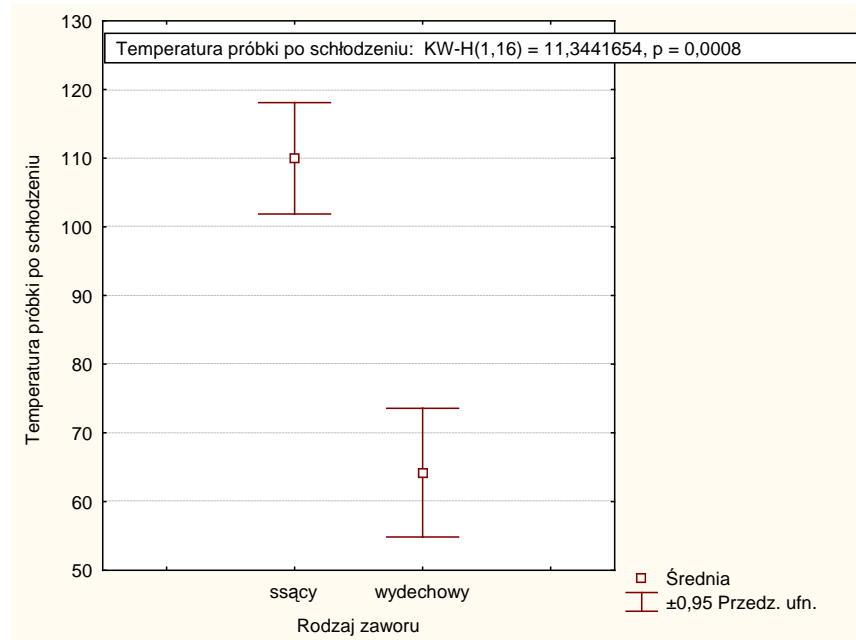
Rys 7.29. Wykres średniej i błędów dla zmiennej całkowity czas nagrzewania próbki oraz nieparametryczny test Kruskala-Walisa

Na podstawie rysunku 7.29. można wysunąć wnioski, że zawór ssący na poziomie istotności statystycznej $p=0.02 < 0.05$ dłużej (średnia=66060 [s] = 18 h 21 min.) wytrzymuje nagrzewanie w piecu niż zawór wydechowy (średnia=64860 [s] = 18 h)



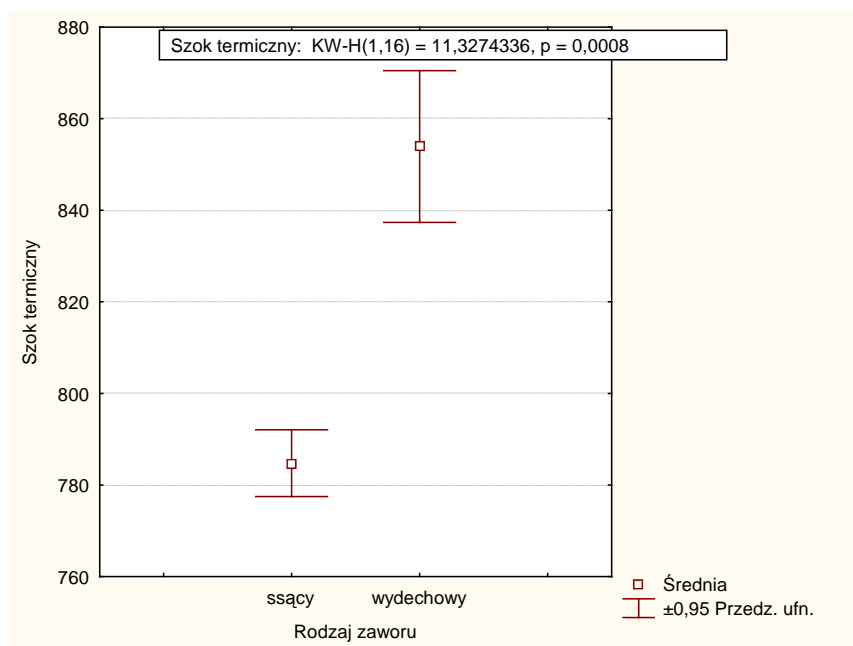
Rys 7.30. Wykres średniej i błędów dla zmiennej temperatura próbki po nagrzaniu oraz nieparametryczny test Kruskala-Walisa

Na wykresie rys. 7.30. widać istotną statystycznie różnicę $p=0,0021 < 0,05$ między temperaturą próbki po nagrzaniu dla zaworów. Zawór wydechowy średnio ma wyższą temperaturę (średnia wynosi ok. 1191 K) niż zawór ssący (średnia wynosi ok. 1167 K).



Rys 7.31. Wykres średniej i błędów dla zmiennej temperatura próbki po schłodzeniu oraz nieparametryczny test Kruskala-Walisa

Na wykresie rys. 7.31. przedstawiono temperaturę próbki po schłodzeniu dla zaworów ssącego i wydechowego. Zawory te różnią się istotnie statystycznie $p=0,0008 < 0,05$. Zawór wydechowy średnio ma niższą temperaturę (średnia wynosi ok. 337 K) niż zawór ssący (średnia wynosi ok. 383 K). Z powyższego porównania wynika, że zawór ssący wolniej oddaje ciepło niż zawór wydechowy. Ponadto na podstawie rysunku 7.28. można wnioskować, że zawór wydechowy pochłania więcej ciepła niż ssący. Nasuwa się zatem oczywisty wniosek, że zawór wydechowy jest narażony na większe szoki termiczne, niż ssący, co obrazuje rys. 7.32.



Rys 7.32. Wykres średniej i błędów dla zmiennej szok termiczny oraz nieparametryczny test Kruskala-Walisa

Na rysunku 7.32. znajduje się wykres szoku termicznego dla zaworów ssącego i wydechowego, po którym nastąpiło uszkodzenie zaworów. Zawory te różnią się istotnie statystycznie $p=0,0008 < 0,05$. Tak jak wcześniej napisano zawór wydechowy jest średnio poddany wyższemu szokowi termicznemu (średnia wynosi 1227 K) niż zawór ssący (średnia wynosi ok. 1057 K).

Na podstawie charakterystyk przedstawiony na rysunkach 7.29. i 7.30. można wnioskować, że zawór wydechowy wykazuje mniejszą odporność na oddziaływanie wysokich temperatur, rzędu około 1173 K od zaworu ssącego. Powyższy wniosek potwierdza rysunek 7.28.

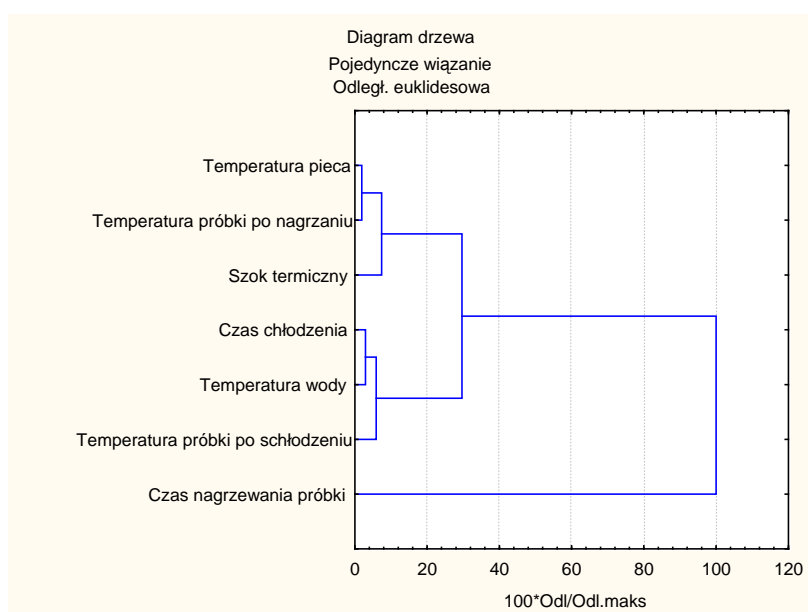
W celu sprawdzenia związku poszczególnych zmiennych w fazie IV ze zmienną uszkodzenie wykonano statystykę Gamma. Statystyka Gamma jest zalecana w przypadkach, gdy dane zawierają wiele obserwacji powiązanych. W kategoriach podstawowych założeń jest ona odpowiednikiem R Spearmana lub Tau Kendalla, natomiast w sensie interpretacji i obliczania jest bardziej podobna do współczynnika Tau Kendalla.

Tabela 7.9. Współczynniki korelacji Gamma

Zmienna	Uszkodzenie
Całkowity czas nagrzewania próbki	0,965
Temperatura próbki po nagrzaniu	0,974
Czas chłodzenia	-0,200
Temperatura wody	-0,198
Temperatura próbki po schłodzeniu	0,111
Szok termiczny	0,963

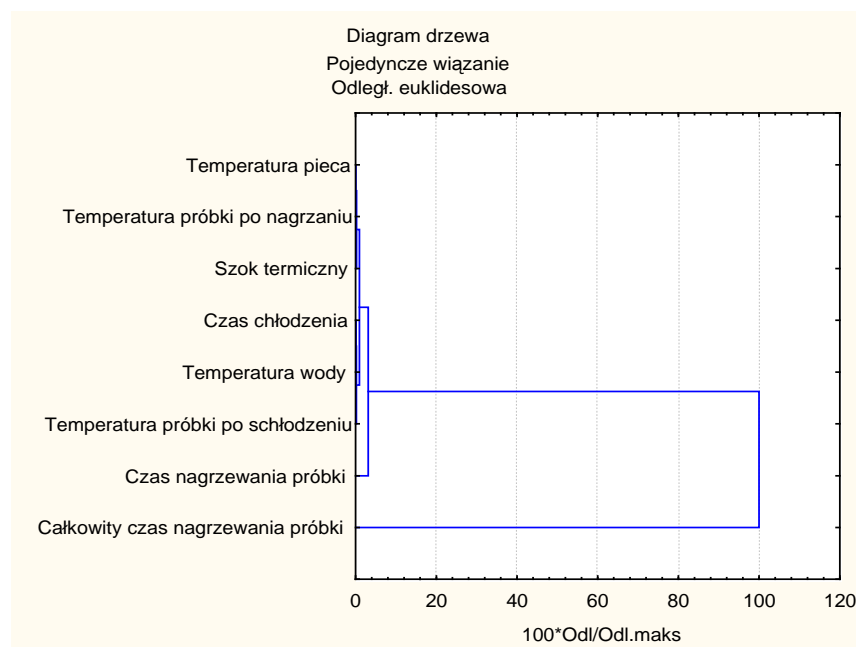
Spośród sześciu zmiennych wyłoniły się najbardziej istotne cechy związane z uszkodzeniem zaworów. Ostatecznie model zawiera trzy zmienne istotnie związane z uszkodzeniem zaworu: całkowity czas nagrzewania próbki, temperatura próbki po nagrzaniu i szok termiczny. W celu weryfikacji przyjętego modelu trzech zmiennych, wykonano analizy wpływu zmiennych innymi metodami. Model zostanie potwierdzony za pomocą analizy skupień (rys. 7.33), analizy czynnikowej oraz analizy rzetelności i pozycji.

Na podstawie tabeli 7.9. można wstępnie wysnuć wniosek, że zaznaczone na czerwono współczynniki korelacji stanowią istotny związek z uszkodzalnością elementu mechanicznego jakim jest zawór silnika spalinowego. W celu wykrycia skupień zmiennych, wykonano analizę skupień metodą aglomeracji zmiennych.



Rys 7.33. Analiza skupień dla 7 zmiennych w modelu

W modelu celowo zrezygnowano ze zmiennej całkowity czas nagrzewania próbki, gdyż po włączeniu jej do analizy skupienia pozostałych zmiennych są nieczytelne, co przedstawia rys 7.34.



Rys 7.34. Analiza skupień dla 8 zmiennych w modelu

Na rysunku 7.33. widać, że za pomocą mierzonych zmiennych można wyłonić co najmniej 2 skupiska. Wiążąc diagram drzewa z rys 7.34. z wynikami korelacji z tabeli 7.7., widać, że tylko skupienie składające się z 3 zmiennych temperatura pieca, temperatura próbki po nagraniu, szok termiczny, istotnie są związane z uszkodzeniem zaworów. Całkowity czas nagrzewania próbki jest zmienną nadrzędną stanowiącą inny ale równoległy wkład w uszkodzalność.

Wykonując analizę czynnikową można istotnie potwierdzić bądź zaprzeczyć sensowności powyższych skupień. Analizę czynnikową z rotacją: Varimax znormalizowana prezentuje tabela 7.10., w której przyjęto, że istotne ładunki czynnikowe to te, które są większe niż 0,7.

Tabela 7.10.. Analiza czynnikowa dla 8 zmiennych modelu

Zmienna	Czynnik 1	Czynnik 2
Temperatura pieca	-0,958	0,253
Czas nagrzewania próbki	0,749	0,311
Całkowity czas nagrzewania próbki	-0,566	0,705
Temperatura próbki po nagrzaniu	-0,931	0,334
Czas chłodzenia	0,080	-0,871
Temperatura wody	0,221	-0,642
Temperatura próbki po schodzeniu	0,062	0,584
Szok termiczny	-0,954	0,181
War.wyj.	3,633	2,314
Udział	0,454	0,289

W tabeli 7.10. pojawiła się w czynniku 1 dodatkowo zmienną czas nagrzewania próbki z ładunkiem ujemnym, co może istotnie wpływać na rzetelność takiego czynnika. Taka sama sytuacja istnieje w przypadku czynnika 2. W związku z powyższym należy wykonać analizę rzetelności i pozycji i wyznaczyć współczynnik „alfę Cronbacha” jako miarę tej rzetelności, co przedstawiono w tabeli 7.11.

Tabela 7.11. Analiza rzetelności zmiennych wchodzących w skład modelu

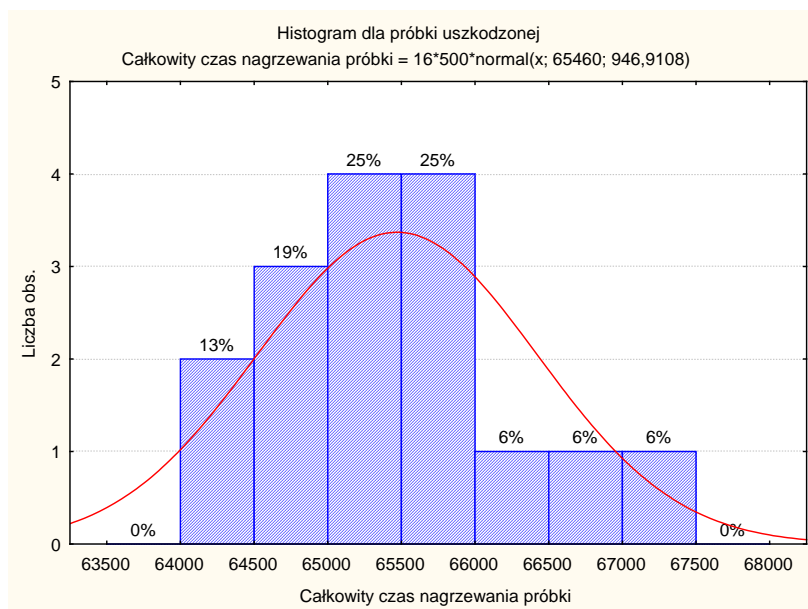
Zmienna	Śred. gdy usunięta	War. Gdy usunięta	OdSt.gdy usunięta	Poz-Całk. korelacji	Alfa gdy usunięta
Temperatura pieca	2498,658	108717,600	329,724	0,009	0,800
Czas nagrzewania próbki	1402,980	138336,000	371,936	-0,578	0,790
Temperatura próbki po nagrzaniu	2498,658	108717,600	329,724	0,009	0,820
Szok termiczny	1402,980	138336,000	371,936	-0,578	0,710

Alfa Cronbacha: 0,83 dla wszystkich zmiennych

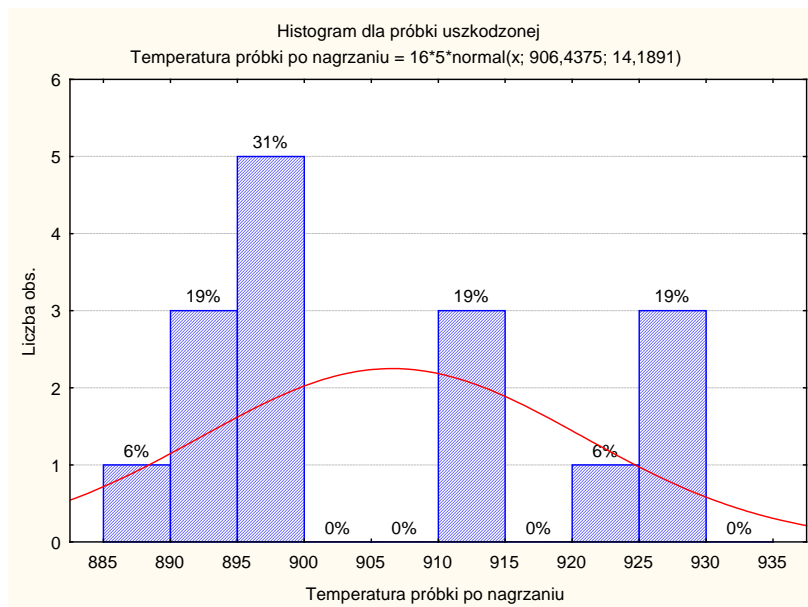
Z tabeli 7.11. można wnioskować, że po usunięciu zmiennej: *szok termiczny*, rzetelność czynnika składającego się z pozostałych trzech zmiennych spadnie do wartości 0,710. Jest to zmienna najsilniej wpływająca na zużycie elementu, podobnie jak temperatura pieca. Ponieważ drugi czynnik składa się tylko z dwóch zmiennych zatem nie można wykonać analizy rzetelności i pozycji. Na podstawie tabeli 7.9. widać, że to całkowity czas nagrzewania próbki wpływa bardzo istotnie na uszkodzenie zaworów w fazie IV, zatem do modelu dołączyć należy tylko tą zmienną. Ostatecznie potwierdzono, że temperatura próbki po nagrzaniu, szok termiczny i całkowity czas nagrzewania próbki są zmiennymi

stanowiącymi ostateczny model najlepiej dyskryminujący zdolność obiektu mechanicznego do dalszej eksploatacji, bądź jego niezdatność.

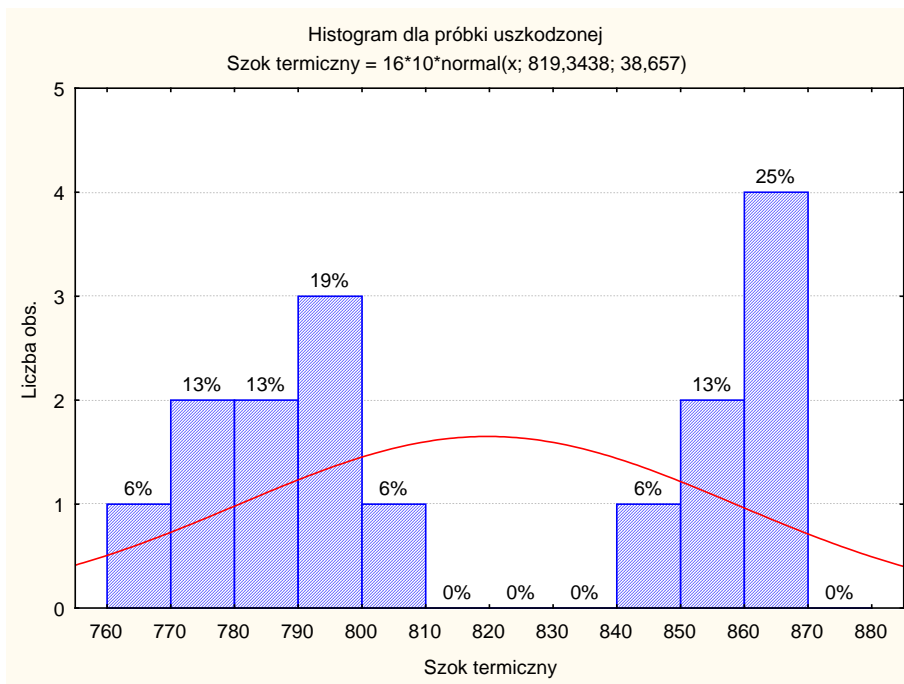
Wyznaczono histogramy częstości pojawiających się wartości zmiennych podczas eksperymentu i przybliżono je rozkładami normalnymi (rys. 7.35. do rys. 7.40.).



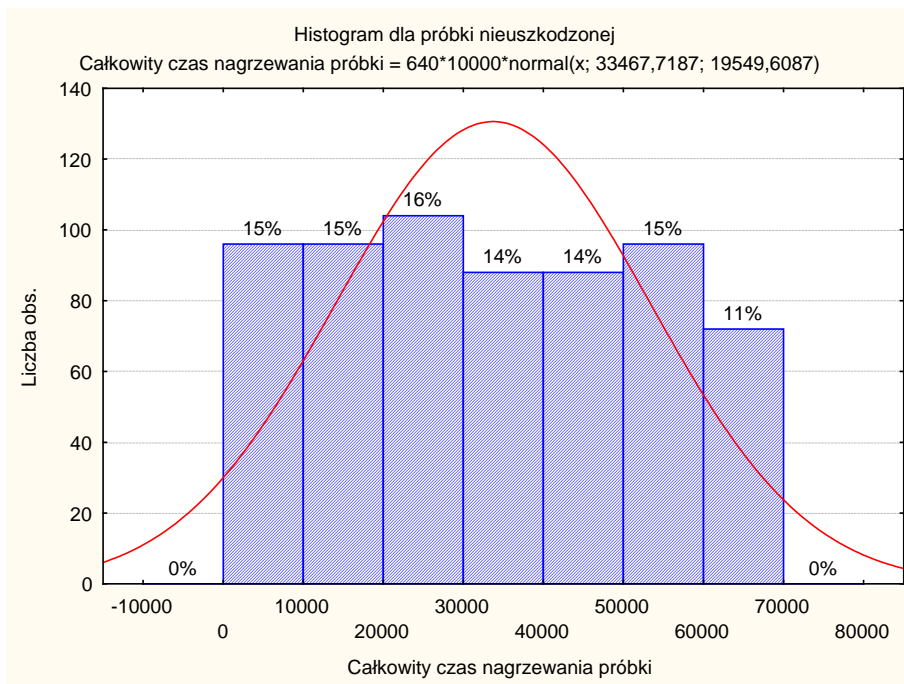
Rys. 7.35. Histogram dla próbki uszkodzonej – całkowity czas nagrzewania próbki



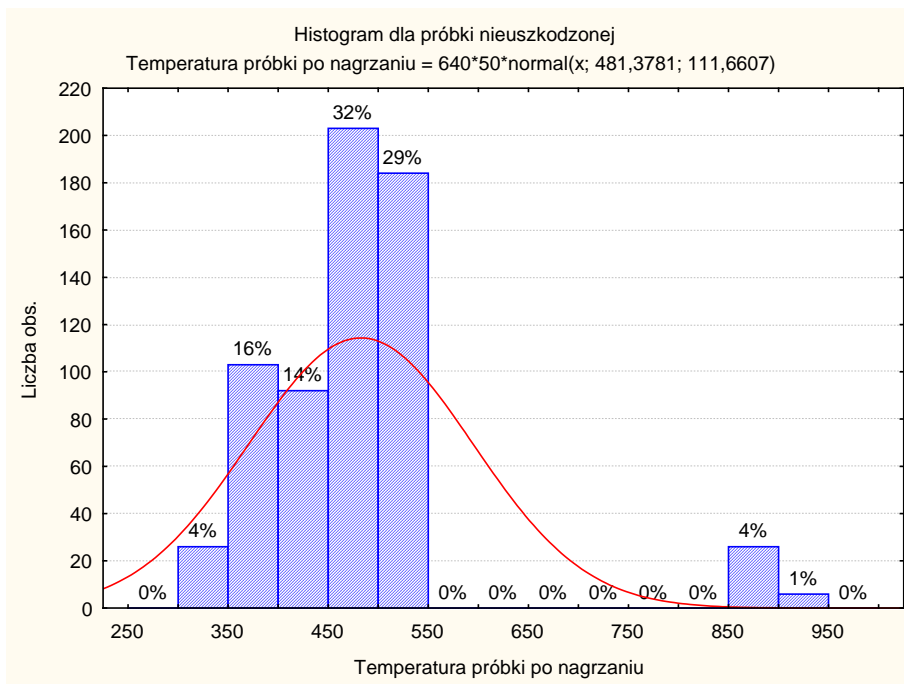
Rys. 7.36. Histogram dla próbki uszkodzonej – temperatura próbki po nagraniu



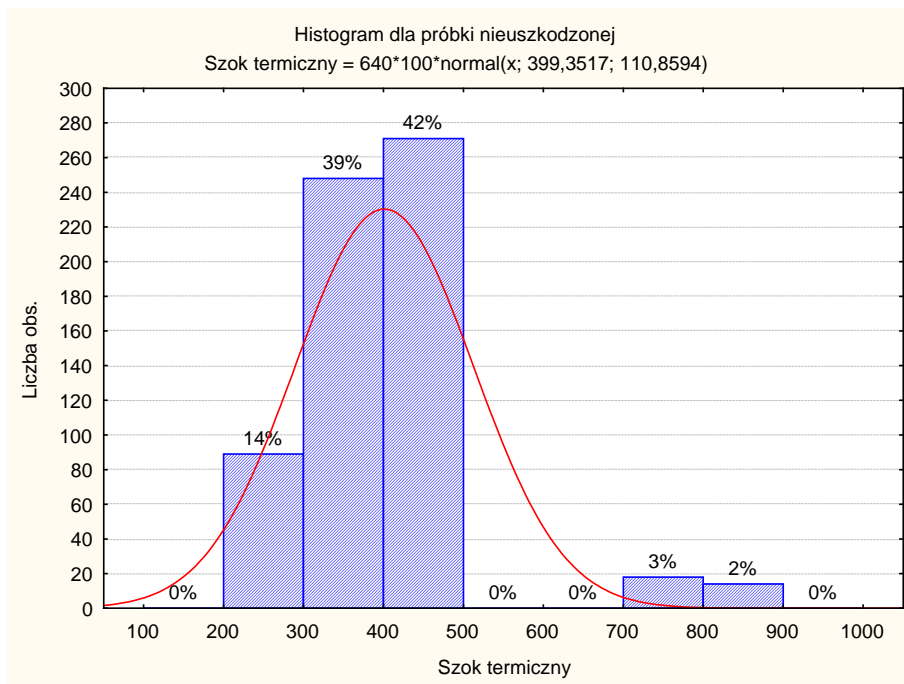
Rys. 7.37. Histogram dla próbki uszkodzonej – szok termiczny



Rys. 7.38. Histogram dla próbki nieuszkodzonej – całkowity czas nagrzewania próbki



Rys. 7.39. Histogram dla próbki nieuszkodzonej – temperatura próbki po nagraniu



Rys. 7.40. Histogram dla próbki nieuszkodzonej – Szok termiczny

Badania opinii ekspertów i ich analiza

Po wykonaniu badań zaworów z powłokami ceramicznymi (wyniki omówiono w rozdziale 7) sześciu ekspertów wypełniło ankietę stworzoną przez autora pracy, odpowiedziało na pytania i ustaliło subiektywnie reguły. Ankieta (załącznik nr 2) dla ekspertów stanowi podstawę doboru sędziów kompetentnych ustalających reguły niezawodności elementu mechanicznego (zaworu silnika spalinowego pokrytego powłoką ceramiczną).

Ankieta zawiera 11 pytań opisowych i zestaw macierzy do uzupełnienia danymi na podstawie analizy wyników badań stanowiskowych (zdjęć, tabel, wykresów).

Ocenę sędziów ustala się na podstawie 6 pytań według klucza:

Pytanie 4	wybrana liczba określa ilość punktów
Pytanie 5	Tak – 0 pkt, Nie – 10 pkt
Pytanie 7	oderwanie powłoki 10 pkt
	Siatka pęknięć 5 pkt
	Pęknięcie 7 pkt
	Rysa 1 pkt
Pytanie 8	I,II – 0 pkt, III – 2 pkt, IV – 10 pkt
Pytanie 9	TAK – 10 pkt, NIE – 0 pkt
Pytanie 10	Zimne powietrze – 3 pkt Zimna woda – 10 pkt

- Pytanie 11 Faza I – Jeżeli zaznaczono $\leq 10\%$ - 10 pkt
 Faza II - Jeżeli zaznaczono $\leq 20\%$ - 10 pkt
 Faza III - Jeżeli zaznaczono $\leq 30\%$ - 10 pkt
 Faza II - Jeżeli zaznaczono $\geq 70\%$ - 10 pkt

Suma punktów z ankiety wynosi 100 pkt. Jeżeli wynik uzyskany przez eksperta jest mniejszy niż 70% wtedy opinia eksperta została odrzucona.

Do subiektywnej oceny wykonanych badań laboratoryjnych przystąpiło 6 ekspertów

Ekspert 1.

Dziedzina badawcza: Budowa i eksploatacja silników spalinowych

Tytuł: dr inż.

Staż pracy: 35 lat

Wynik ankiety – 98/100 punktów

Ekspert 2.

Dziedzina badawcza: Silniki spalinowe. Tribologia

Tytuł: dr hab. inż.

Staż pracy: 24 lata

Wynik ankiety – 96/100 punktów

Ekspert 3.

Dziedzina badawcza: Mechanika, budowa i eksploatacja maszyn

Tytuł: mgr inż.

Staż pracy: 4 lata

Wynik ankiety – 95/100 punktów

Ekspert 4.

Dziedzina badawcza: Pojazdy samochodowe i silniki spalinowe

Tytuł: dr inż.

Staż pracy: 34 lata

Wynik ankiety – 90/100 punktów

Ekspert 5.

Dziedzina badawcza: Pojazdy samochodowe i silniki spalinowe

Tytuł: mgr inż.

Staż pracy: 6 lat

Wynik ankiety – 74/100 punktów

Ekspert 6.

Dziedzina badawcza: Pojazdy samochodowe i silniki spalinowe

Tytuł: mgr inż.

Staż pracy: 3 lata

Wynik ankiety – 51/100 punktów

Ponieważ Ekspert 6 nie zdobył zadawalającej ilości punktów, więc jego ekspertyza nie jest brana pod uwagę do opracowania modelu niezawodności. Ekspertów ponumerowano w zależności od wyniku ankiety.

Obszary decyzyjne, którym eksperci przydzielili procentowe przekonanie, że obiekt jest zdalny do dalszej eksploatacji zestawiono tabelarycznie.

Tabele 8.1. Wyniki oceny uzyskane od eksperta nr 1

Dla $\Delta T \in \langle 273 ; 473 \rangle$, K

t [h]	Zakresy zmiennych	T_{nagrz}, K		
		$\langle 273 ; 573 \rangle$	$\langle 574 ; 873 \rangle$	$\langle 874 ; 1200 \rangle$
	$\langle 0 ; 200 \rangle$	100%	100%	100%
	$\langle 201 ; 500 \rangle$	100%	90%	90%
	$\langle 501 ; 1123 \rangle$	100%	70%	70%

Dla $\Delta T \in \langle 474 ; 673 \rangle$, K

t [h]	Zakresy zmiennych	T_{nagrz}, K		
		$\langle 273 ; 573 \rangle$	$\langle 574 ; 873 \rangle$	$\langle 874 ; 1200 \rangle$
	$\langle 0 ; 200 \rangle$	100%	100%	100%
	$\langle 201 ; 500 \rangle$	100%	80%	75%
	$\langle 501 ; 1123 \rangle$	100%	60%	60%

Dla $\Delta T \in \langle 674 ; 1141 \rangle$ K

t [h]	Zakresy zmiennych	T_{nagrz}, K		
		$\langle 273 ; 573 \rangle$	$\langle 574 ; 873 \rangle$	$\langle 874 ; 1200 \rangle$
	$\langle 0 ; 200 \rangle$		90%	90%
	$\langle 201 ; 500 \rangle$		70%	50%
	$\langle 501 ; 1123 \rangle$		50%	30%

Tabele 8.2. Wyniki oceny uzyskane od eksperta nr 2

Dla $\Delta T \in \langle 443 ; 653 \rangle$, K

t [h]	Zakresy Zmiennych	T_{nagrz}, K		
		$\langle 643 ; 843 \rangle$	$\langle 844 ; 1013 \rangle$	$\langle 1014 ; 1200 \rangle$
	$\langle 0 ; 390 \rangle$	100%	100%	100%
	$\langle 391 ; 680 \rangle$	100%	100%	100%
	$\langle 691 ; 1123 \rangle$	100%	95%	90%

Dla $\Delta T \in \langle 654 ; 763 \rangle$, K

t [h]	Zakresy Zmiennych	T _{nagrz} , K		
		<643 ; 843>	<844 ; 1013>	<1014 ; 1200>
	<0 ; 390>	90%	90%	90%
	<391 ; 680>	90%	90%	85%
	<691 ; 1123>	90%	85%	80%

Dla $\Delta T \in \langle 764 ; 1141 \rangle$, K

t [h]	Zakresy Zmiennych	T _{nagrz} , K		
		<643 ; 843>	<844 ; 1013>	<1014 ; 1200>
	<0 ; 390>	90%	80%	90%
	<391 ; 680>	80%	60%	40%
	<691 ; 1123>	75%	55%	20%

Tabele 8.3. Wyniki oceny uzyskane od eksperta nr 3

Dla $\Delta T \in \langle 673 ; 673 \rangle$, K

t [h]	Zakresy Zmiennych	T _{nagrz} , K		
		<473 ; 723>	<7240 ; 923>	<924 ; 1133>
	<0 ; 350>		80%	
	<350 ; 700>		80%	
	<700 ; 1140>		80%	

Dla $\Delta T \in \langle 674 ; 972 \rangle$, K

t [h]	Zakresy Zmiennych	T _{nagrz} , K		
		<473 ; 723>	<7240 ; 923>	<924 ; 1133>
	<0 ; 350>		70%	
	<350 ; 700>		70%	
	<700 ; 1140>		70%	

Dla $\Delta T \in \langle 973 ; 1173 \rangle$, K

t [h]	Zakresy Zmiennych	T _{nagrz} , K		
		<473 ; 723>	<7240 ; 923>	<924 ; 1133>
	<0 ; 350>			10%
	<350 ; 700>			10%
	<700 ; 1140>			10%

Tabele 8.4. Wyniki oceny uzyskane od eksperta nr 4

Dla $\Delta T \in \langle 483 ; 683 \rangle$, K

t [h]	Zakresy Zmiennych	T _{nagrz} , K		
		<665 ; 854>	<855 ; 1037>	<1035 ; 1193>
	<471 ; 381>	95%	95%	90%
	<381 ; 682>	95%	95%	90%
	<682 ; 1126>	95%	95%	90%

Dla $\Delta T \in \langle 684 ; 821 \rangle$, K

t [h]	Zakresy Zmiennych	T _{nagrz} , K		
		<665 ; 854>	<855 ; 1037>	<1035 ; 1193>
	<471 ; 381>	95%	90%	85%
	<381 ; 682>	95%	90%	85%
	<682 ; 1126>	95%	90%	85%

Dla $\Delta T \in \langle 822 ; 1141 \rangle$, K

t [h]	Zakresy Zmiennych	T _{nagrz} , K		
		<665 ; 854>	<855 ; 1037>	<1035 ; 1193>
	<471 ; 381>	95%	90%	0%
	<381 ; 682>	95%	90%	5%
	<682 ; 1126>	95%	90%	5%

Tabele 8.5. Wyniki oceny uzyskane od eksperta nr 5

Dla $\Delta T \in \langle 273 ; 693 \rangle$, K

t [h]	Zakresy Zmiennych	T _{nagrz} , K		
		<667 ; 847>	<848 ; 1027>	<1028 ; 1200>
	<474 ; 393>	100%	100%	50%
	<393 ; 674>	100%	100%	50%
	<674 ; 1124>	100%	100%	50%

Dla $\Delta T \in \langle 694 ; 913 \rangle$, K

t [h]	Zakresy Zmiennych	T _{nagrz} , K		
		<667 ; 847>	<848 ; 1027>	<1028 ; 1200>
	<474 ; 393>	100%	100%	50%
	<393 ; 674>	100%	100%	50%
	<674 ; 1124>	100%	100%	50%

Dla $\Delta T \in \langle 914 ; 1141 \rangle$, K

t [h]	Zakresy Zmiennych	T _{nagrz} , K		
		<667 ; 847>	<848 ; 1027>	<1028 ; 1200>
	<474 ; 393>	100%	100%	0%
	<393 ; 674>	100%	100%	0%
	<674 ; 1124>	100%	100%	0%

Wyniki przekonań, że obiekt jest zdalny do dalszej eksploatacji posłużą do uzupełnienia metody wnioskowania o trwałości elementu mechanicznego, która zostanie implementowana w rozdziale 9.

Implementacja wyników badań

Po zastosowaniu wzoru (5.1) otrzymano reguły eksperckie, z funkcjami alokacji prawdopodobieństwa oszacowanymi przez ekspertów (tabela 9.1.).

Tabela 9.1. Reguły eksperckie z funkcjami alokacji

Dla $\Delta T \in \langle 474 ; 663 \rangle$, **K**

	Zakresy Zmiennych	T_{nagrz}, K		
		$\langle 667 ; 723 \rangle$	$\langle 847 ; 973 \rangle$	$\langle 1027 ; 1200 \rangle$
t [h]	$\langle 0 ; 300 \rangle$	100%	100%	100%
		100%	100%	100%
		100%	100%	50%
		95%	95%	90%
	$\langle 360 ; 680 \rangle$	100%	80%	75%
		100%	100%	100%
		100%	100%	50%
		95%	95%	90%
	$\langle 701 ; 1123 \rangle$	100%	60%	60%
		100%	95%	90%
		95%	95%	90%
		100%	100%	50%

Dla $\Delta T \in \langle 673 ; 763 \rangle$, K

	Zakresy Zmiennych	T_{nagrz} , K		
		$\langle 667 ; 723 \rangle$	$\langle 847 ; 973 \rangle$	$\langle 1027 ; 1200 \rangle$
t [h]	$\langle 0 ; 300 \rangle$	90%	90%	90%
		100%	100%	90%
		95%	90%	50% 85%
	$\langle 360 ; 680 \rangle$	90%	70%	50%
		100%	90%	85%
		95%	100%	50%
	$\langle 701 ; 1123 \rangle$	90%	90%	85%
		100%	90%	50%
		95%	80%	85%
	90%	50%	60%	
	100%	95%	90%	
	95%	95%	90%	
		100%	50%	

Dla $\Delta T \in \langle 821 ; 1141 \rangle$, K

	Zakresy Zmiennych	T_{nagrz} , K		
		$\langle 667 ; 723 \rangle$	$\langle 847 ; 973 \rangle$	$\langle 1027 ; 1200 \rangle$
t [h]	$\langle 0 ; 300 \rangle$		90%	90%
			100%	90%
			80%	0%
	$\langle 360 ; 680 \rangle$		90%	10%
			60%	50%
			70%	40%
	$\langle 701 ; 1123 \rangle$		100%	0%
			90%	5%
			10%	10%
		50%	30%	
		55%	20%	
		90%	0%	
		100%	5%	
			10%	

Przekreślone wartości funkcji alokacji prawdopodobieństwa są to wartości które nie znajdują się w przedziale określonym wzorem (5.3). Przekreślone sprzeczne wartości funkcji alokacji prawdopodobieństwa są wyznaczone w większości przez Eksperta 5, który uzyskał najniższy ocenę w ankiecie – 74/100 punktów. Zatem przyjęty model zweryfikował znajomość zagadnienie tego eksperta nie dopuszczając jego ocen do analizy. Teraz za pomocą zależności (5.2) łączymy wiedzę ekspercką regułą kombinacji Dempstera-Shafera i

otrzymujemy rozkłady bazowe prawdopodobieństwa (tabela 9.2.), że obiekt jest zdalny do dalszej eksploatacji.

Tabela 9.2. Rozkłady bazowe prawdopodobieństwa

Dla $\Delta T \in \langle 474, 663 \rangle, K$

t [h]	Zakresy Zmiennych	T _{nagrz} , K		
		<667 ; 723>	<847 ; 973>	<1027 ; 1200>
	<0 ; 300>	100%	100%	100%
	<360 ; 680>	100%	100%	100%
	<701 ; 1123>	100%	100%	99%

Dla $\Delta T \in \langle 673 ; 763 \rangle, K$

t [h]	Zakresy Zmiennych	T _{nagrz} , K		
		<667 ; 723>	<847 ; 973>	<1027 ; 1200>
	<0 ; 300>	100%	100%	100%
	<360 ; 680>	100%	100%	97%
	<701 ; 1123>	100%	100%	96%

Dla $\Delta T \in \langle 673 ; 763 \rangle, K$

t [h]	Zakresy Zmiennych	T _{nagrz} , K		
		<667 ; 723>	<847 ; 973>	<1027 ; 1200>
	<0 ; 300>		99%	99%
	<360 ; 680>		95%	1%
	<701 ; 1123>		92%	0%

Otrzymano statecznie reguły eksperckie, które jak łatwo można zauważyć są nieprecyzyjne i niepewne. Ponieważ zbiory są rozłączne co odpowiada analizowanemu wcześniej **Przypadkowi 1⁰** (rozdział 5, str. 32), zatem należy dokonać rozmywania pierwotnie ciągłych zmiennych, czyli ich dyskretyzacji. Ostatecznie otrzymuje się 24 reguły rozmyte w postaci (tabela 9.3.).

Tabela 9.3. Bazy reguł rozmytych

Dla $\Delta T \in \langle 273 ; 703 \rangle$, K

t [h]	Zakresy Zmiennych	T _{nagrz} , K		
		M $\langle 273 ; 910 \rangle$	S $\langle 660 ; 1090 \rangle$	D $\langle 910 ; \infty \rangle$
	M $\langle 0 ; 300 \rangle$	R ₁ 100%	R ₂ 100%	R ₃ 100%
	S $\langle 360 ; 680 \rangle$	R ₄ 100%	R ₅ 100%	R ₆ 100%
	D $\langle 701 ; \infty \rangle$	R ₇ 100%	R ₈ 100%	R ₉ 99%

Dla $\Delta T \in \langle 639 ; 881 \rangle$, K

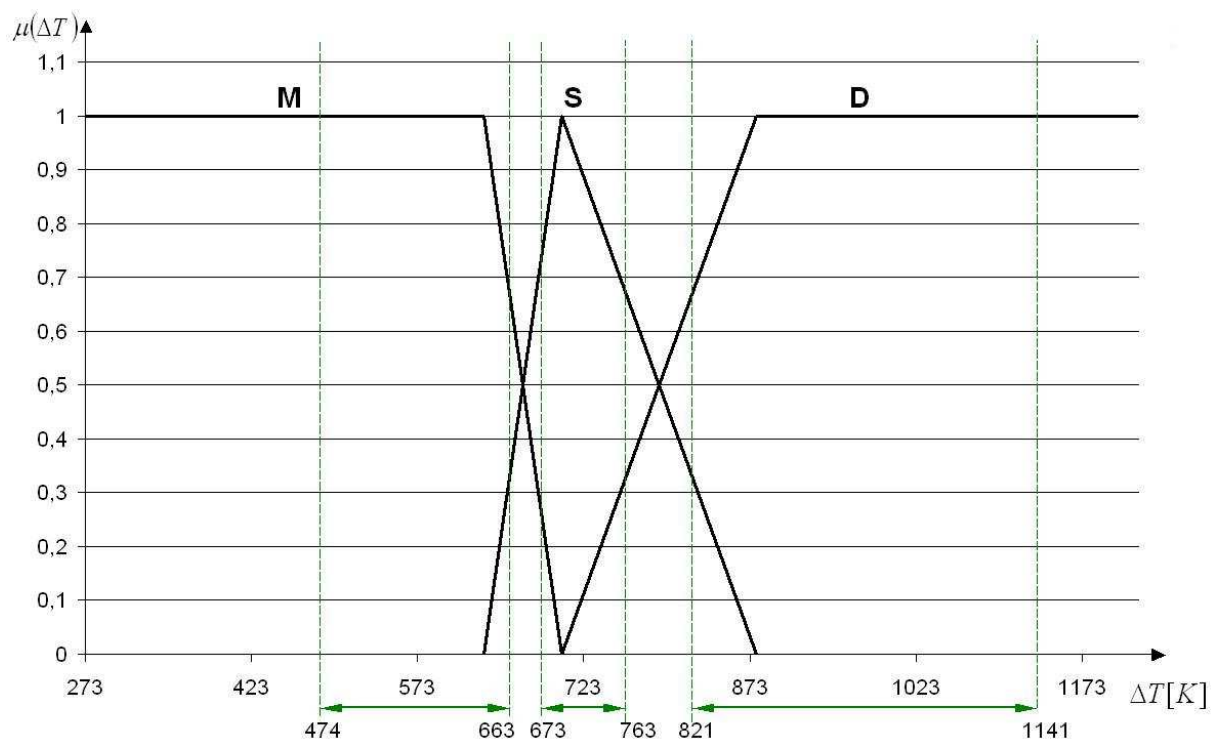
t [h]	Zakresy Zmiennych	T _{nagrz} , K		
		M $\langle 273 ; 910 \rangle$	S $\langle 660 ; 1090 \rangle$	D $\langle 910 ; \infty \rangle$
	M $\langle 0 ; 300 \rangle$	R ₁₀ 100%	R ₁₁ 100%	R ₁₂ 100%
	S $\langle 360 ; 680 \rangle$	R ₁₃ 100%	R ₁₄ 100%	R ₁₅ 97%
	D $\langle 701 ; \infty \rangle$	R ₁₆ 100%	R ₁₇ 100%	R ₁₈ 96%

Dla $\Delta T \in \langle 703 ; \infty \rangle$, K

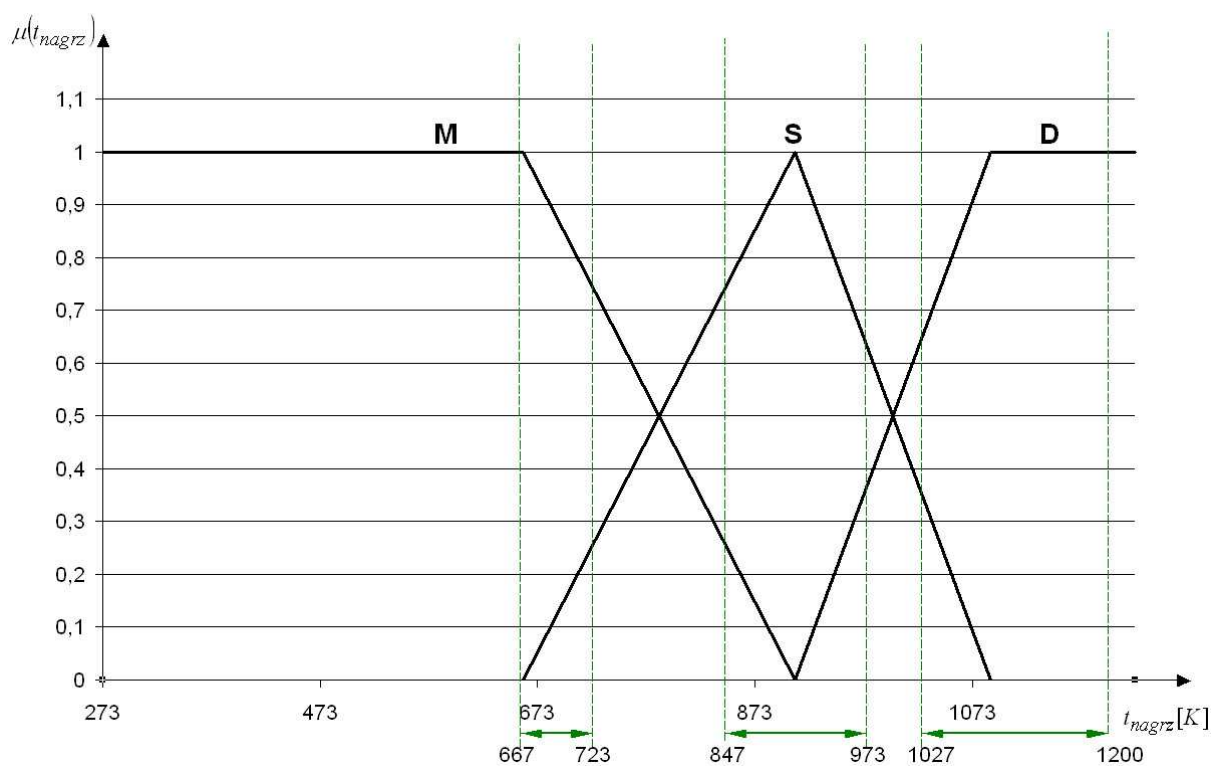
t [h]	Zakresy Zmiennych	T _{nagrz} , K		
		M $\langle 273 ; 910 \rangle$	S $\langle 660 ; 1090 \rangle$	D $\langle 910 ; \infty \rangle$
	M $\langle 0 ; 300 \rangle$		R ₁₉ 99%	R ₂₀ 99%
	S $\langle 360 ; 680 \rangle$		R ₂₁ 95%	R ₂₂ 1%
	D $\langle 701 ; \infty \rangle$		R ₂₃ 92%	R ₂₄ 0%

R_k- oznacza k-tą regułę rozmytą.

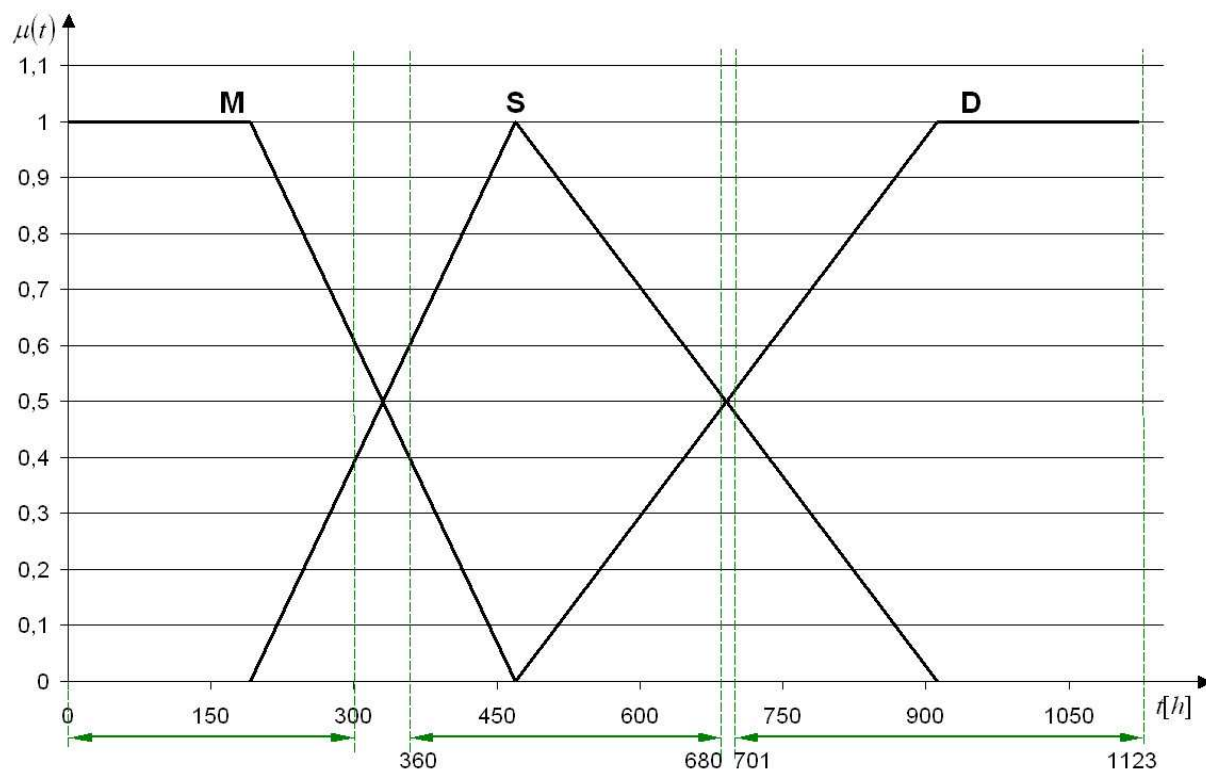
Interpretacja graficzna powyższych reguł rozmytych znajduje się na rysunkach 9.1 , 9.2 i 9.3.



Rys. 9.1. Podział przestrzeni wejściowej na obszary i odpowiadające im funkcje przynależności dla zmiennej ΔT .



Rys. 9.2. Podział przestrzeni wejściowej na obszary i odpowiadające im funkcje przynależności dla zmiennej t_{nagrz} .



Rys. 9.3. Podział przestrzeni wejściowej na obszary i odpowiadające im funkcje przynależności dla zmiennej t .

Obszary zaznaczone kolorem zielonym są to ostre, nie rozmyte reguły eksperckie, które zaznaczono na rysunkach 9.1, 9.2, 9.3 aby zobrazować proces rozmywania.

Funkcje określające zbiory rozmyte są wyznaczone i wynoszą odpowiednio:

Dla zmiennej ΔT dla zbioru rozmytego M:

$$L(\Delta T; 633, 703) = \begin{cases} 1 & \text{dla } \Delta T \leq 633 \\ \frac{703 - \Delta T}{70} & \text{dla } 633 \leq \Delta T \leq 703 \\ 0 & \text{dla } \Delta T \geq 703 \end{cases}$$

Dla zmiennej ΔT dla zbioru rozmytego S:

$$t(\Delta T; 633, 703, 881) = \begin{cases} 0 & \text{dla } \Delta T \leq 703 \\ \frac{\Delta T - 633}{70} & \text{dla } 633 \leq \Delta T \leq 703 \\ \frac{881 - \Delta T}{178} & \text{dla } 703 \leq \Delta T \leq 881 \\ 0 & \text{dla } \Delta T \geq 881 \end{cases}$$

Dla zmiennej ΔT dla zbioru rozmytego D:

$$\gamma(\Delta T; 703, 881) = \begin{cases} 0 & \text{dla } \Delta T \leq 703 \\ \frac{\Delta T - 703}{178} & \text{dla } 703 \leq \Delta T \leq 881 \\ 1 & \text{dla } \Delta T \geq 881 \end{cases}$$

Dla zmiennej t_{nagrz} dla zbioru rozmytego M:

$$L(t_{nagrz}; 660, 910) = \begin{cases} 1 & \text{dla } t_{nagrz} \leq 660 \\ \frac{910 - t_{nagrz}}{250} & \text{dla } 660 \leq t_{nagrz} \leq 910 \\ 0 & \text{dla } t_{nagrz} \geq 910 \end{cases}$$

Dla zmiennej t_{nagrz} dla zbioru rozmytego S:

$$t(t_{nagrz}; 660, 910, 1090) = \begin{cases} 0 & \text{dla } t_{nagrz} \leq 660 \\ \frac{t_{nagrz} - 660}{250} & \text{dla } 660 \leq t_{nagrz} \leq 910 \\ \frac{1090 - t_{nagrz}}{180} & \text{dla } 910 \leq t_{nagrz} \leq 1090 \\ 0 & \text{dla } t_{nagrz} \geq 1090 \end{cases}$$

Dla zmiennej t_{nagrz} dla zbioru rozmytego D:

$$\gamma(t_{nagrz}; 910, 1090) = \begin{cases} 0 & \text{dla } t_{nagrz} \leq 910 \\ \frac{t_{nagrz} - 910}{180} & \text{dla } 910 \leq t_{nagrz} \leq 1090 \\ 1 & \text{dla } t_{nagrz} \geq 1090 \end{cases}$$

Dla zmiennej t dla zbioru rozmytego M:

$$L(t; 191, 469) = \begin{cases} 1 & \text{dla } t \leq 191 \\ \frac{469 - t}{278} & \text{dla } 191 \leq t \leq 469 \\ 0 & \text{dla } t \geq 469 \end{cases}$$

Dla zmiennej t dla zbioru rozmytego S:

$$t(t; 191, 469, 912) = \begin{cases} 0 & \text{dla } t \leq 191 \\ \frac{t - 191}{278} & \text{dla } 191 \leq t \leq 469 \\ \frac{912 - t}{443} & \text{dla } 469 \leq t \leq 912 \\ 0 & \text{dla } t \geq 912 \end{cases}$$

Dla zmiennej t dla zbioru rozmytego D:

$$\gamma(t; 469, 912) = \begin{cases} 0 & \text{dla } t \leq 469 \\ \frac{t - 469}{443} & \text{dla } 469 \leq t \leq 912 \\ 1 & \text{dla } t \geq 912 \end{cases}$$

Aby podjąć decyzję o tym, na ile procent element mechaniczny jest zdatny do dalszej eksploatacji należy wykonać defuzyfikację zwaną inaczej wyostrzaniem. W przypadku rozpatrywanego modelu, w którym decyzje są zależą od funkcji alokacji prawdopodobieństwa w sensie teorii Dempstera-Shafera, wyostrzanie jest realizowane za pomocą zależności:

$$m_{D_x}(EX) = \tilde{Y} = \max(\tilde{A}_{x_1} \cap \tilde{A}_{x_1}, \cap \dots \cap, \tilde{A}_{x_N}) \quad (9.1)$$

co można zapisać w innej formie:

$$m_{D_x}(EX) = \tilde{Y} = \max(\min(\tilde{A}_{x_1}, \tilde{A}_{x_1}, \dots, \tilde{A}_{x_N})) \quad (9.2)$$

$$R(X) = Bel(A(X)) = \sum_{EX \in A(X)} m_{D_x}(EX) \quad (9.3)$$

gdzie: $R(X)$ – przekonanie, że obiekt jest nieuszkodzony

Aby podjąć decyzję czy zawór jest zdalny przy określonych warunkach pracy do dalszej eksploatacji należy dla zadanych wartości ΔT , t_{nagrz} , t aktywować reguły rozmyte.

Zakładając dla przykładu, że całkowity czas pracy zaworu pokrytego powłoką ceramiczną w warunkach laboratoryjnych wynosi $t=640$ h, czas nagrzewania $t_{nagrz}=863$ K, $\Delta T=693$ K. Czy zawór pracujący w takich warunkach jest zdalny do dalszej eksploatacji?

Dla takich wartości otrzymano 6 aktywowanych reguł i przydzielono im wartości funkcji przynależności do odpowiednich zbiorów rozmytych:

	$\Delta T = 1073$ K	$T_{nagrz} = 863$ K	$t = 640$ h	$\max(\tilde{A}_{\Delta T} \cap \tilde{A}_{t_{nagrz}} \cap \tilde{A}_t)$	\tilde{Y}
R ₁₃	$\mu_S(\Delta T) = 0.14$	$\mu_M(t_{nagrz}) = 0.27$	$\mu_S(t) = 0.61$	0.14	100%
R ₁₆	$\mu_S(\Delta T) = 0.14$	$\mu_M(t_{nagrz}) = 0.27$	$\mu_D(t) = 0.38$	0.14	100%
R ₁₄	$\mu_S(\Delta T) = 0.14$	$\mu_S(t_{nagrz}) = 0.73$	$\mu_S(t) = 0.61$	0.14	100%
R ₁₇	$\mu_S(\Delta T) = 0.14$	$\mu_S(t_{nagrz}) = 0.73$	$\mu_D(t) = 0.38$	0.14	100%
R₂₁	$\mu_D(\Delta T) = 0.86$	$\mu_S(t_{nagrz}) = 0.73$	$\mu_S(t) = 0.61$	0.61	95%
R ₂₃	$\mu_D(\Delta T) = 0.86$	$\mu_S(t_{nagrz}) = 0.73$	$\mu_D(t) = 0.38$	0.38	92%

Na podstawie powyższej analizy wzorów (9.2) i (9.3) możemy podjąć decyzję że element mechaniczny pracujący w zadanych warunkach jest zdalny do dalszej eksploatacji w $R(X) = Bel(A(X)) = 95\%$.

Wnioski

I. Podstawowym problemem pracy było opracowanie metody oceny stanu granicznego elementu mechanicznego wykorzystując do tego celu dwie teorie: Dempstera-Shafera i zbiorów rozmytych. Teoria Dempstera-Shafera została wykorzystana do wyznaczenia prawdopodobieństw niezawodności oszacowanych przez ekspertów dla zadanych przedziałów mierzonych zmiennych. Ponieważ charakter takich oszacowań był nieprecyzyjny i niepełny więc zastosowano rozmywanie zmiennych pierwotnie ciągłych tak, aby nie utracić cennych informacji o obiekcie pochodzących od ekspertów. Model dopuszcza sytuację niepełnej specyfikacji tzn. że jeżeli ekspert nie jest w stanie oszacować prawdopodobieństwa zdatności elementu mechanicznego do dalszej eksploatacji, wiedza na ten temat nie jest uzupełniana.

W celu doboru ekspertów do oceny niezawodności opracowano ankietę, która umożliwiła zebranie subiektywnych opinii o stanie badanego elementu podczas przebiegu poszczególnych faz eksperymentu. Klucz opracowany do analizy ankiety pozwolił określić stan wiedzy ekspertów i odrzucić te osoby, które nie spełniały założonych kryteriów o stanie wiedzy eksperta. Uzyskane wyniki poddano analizie.

II. Przedstawiona metoda badań przyspieszonych trwałości elementów mechanicznych jest metodą lepszą od zastosowań dotychczasowych, ponieważ:

- skraca czas przeprowadzania czasochłonnych badań elementów mechanicznych, za pomocą których uzyskuje się wiedzę o trwałości elementu w warunkach rzeczywistych,

- eliminuje również dzięki temu wysoki koszt badań, jaki poniesiono by podczas wykonywania prób w rzeczywistych warunkach eksploatacji,
- łączy w sobie elementy badań doświadczalnych i obserwacji z subiektywną opinią ekspertów. Umożliwiło to wyznaczenie parametrów modelu matematycznego. Im więcej zebranych opinii od ekspertów tym jest mniejsze prawdopodobieństwo błędnej klasyfikacji o zdolności elementu do dalszej eksploatacji, co zostało udowodnione analitycznie w rozdziale 5.

III. Opracowana metoda i wykonanie szeregu analiz statystycznych pozwoliło na uzyskanie następujących wyników:

1. Wnioski z przeprowadzonych badań:

- po przeprowadzeniu cyklu badań, który składał się z czterech faz, faza IV okazała się przełomowa dla trwałości zaworu. Wysoki szok termiczny około 1100 K uzyskiwany po przez podgrzanie próbki w piecu i chłodzenie w zimnej wodzie sprawił oderwanie się powłoki ceramicznej. Analiza statystyczna wyników badań potwierdziła doświadczalne wyniki obserwacji, że największy wpływ na uszkodzenie zaworu ma szok termiczny następnie temperatura pieca i całkowity czas nagrzewania próbki. Nie wykazano natomiast na poziomie istotności $p < 0.05$ istotnych związków między temperaturą wody, czasem chłodzenia, temperaturą próbki po schłodzeniu a uszkodzeniem zaworu pokrytego powłoką ceramiczną,
- rozkład temperatur na zaworze pokrytym powłoką ceramiczną ochłodzonym i podgrzany jest rozkładem normalny (test Kołmogorowa Smirnowa i Shapiro-Wilksa),
- zawór wydechowy średnio ma niższą temperaturę (średnia=337,2 K) niż zawór ssący (średnia=383 K). Z powyższego porównania wynika, że zawór ssący wolniej oddaje ciepło niż zawór wydechowy. Ponadto można wnioskować, że zawór wydechowy pochłania więcej ciepła niż ssący. Nasuwa się zatem wniosek, że zawór wydechowy jest narażony na większe szoki termiczne, niż ssący. Szybciej natomiast chłodzi się zawór wydechowy,
- sprawdzając opracowaną metodę badań przyspieszonych trwałości elementów mechanicznych, otrzymano reguły eksperckie. Ponieważ zbiory są rozłączne dokonano rozmywania pierwotnie ciągłych zmiennych, czyli ich dyskretyzacji i otrzymano 24 reguły rozmyte, które po wyostrzeniu i sprawdzeniu dla

konkretnych danych z badań ukazały, że dla: $t=640$ h, $t_{\text{na grz}}=863$ K, i $\Delta T=693$ K element mechaniczny jest zdalny do dalszej eksploatacji w 95%.

2. Wnioski z zebranych opinii ekspertów:

- eksperci opierając się na wynikach badań, fotografiach poszczególnych stanów eksploatacyjnych badanych elementów i obserwacjach mikroskopowych określili przedziały zdalności zaworów do dalszej eksploatacji i określili subiektywnie ich prawdopodobieństwo zdalności. Zestawienie wszystkich opinii pozwoliło uzyskać reguły eksperckie, z funkcjami alokacji prawdopodobieństwa oszacowanymi przez ekspertów oraz wyniki umożliwiły połączenie wiedzy ekspercką regułą kombinacji Dempstera-Shafera i otrzymanie rozkładów bazowych prawdopodobieństwa, że obiekt jest zdalny do dalszej eksploatacji,
- wprowadzenie klucza do opracowanej ankiety pozwoliło na określenie kryteriów doboru ekspertów na podstawie informacji zdobytych po wypełnieniu ankiety. Dzięki temu usunięte zostały wyniki ankiety od eksperta, który nie spełniał warunków, czyli nie posiadał wymaganej wiedzy na temat badań i badanych elementów mechanicznych.

IV. Na podstawie przeprowadzonych badań i ich analiz można zwrócić uwagę na kierunki dalszych badań omawianego tematu:

- Opracowanie modelu niezawodności łączącego teorię Dempstera-Shafera z metodami statystycznymi.
- Wykorzystanie analizy widma wzajemnego w celu wyznaczenia korelacji między uszkodzalnością zaworu pokrytego powłoką ceramiczną a innymi zjawiskami występującymi w silniku, mogącymi wpływać na niezawodność.

LITERATURA

1. Babul T., Babul W.: Mechanizm formowania stref połączenia powłok nanoszonych detonacyjnie w funkcji prędkości zderzenia cząstek z podłożem. MAT. I Ogólnopolskiej Konferencji Naukowej nt. Nowoczesne Technologie Inżynierii Powierzchni. Łódź – Spała. 1994. 319-322.
2. Babul W., Janecki J.: Badanie na zużycie wybranych powłok natryskiwanych detonacyjnie. Inżynieria Materiałowa. 5. 1999. 444-446.
3. Bacchus F.: L.p., a logic for representing and reasoning with statistical knowledge, Computer Intelligence 6 1990, 209-231.
4. Basir H. O.: Connectionist based Dempster-Shafer evidential reasoning for data fusion, Int. Joint Conf. on Neural Networks (IJCNN2004), July 26 - 29, Budapest, 2004.
5. Białucki P., Dudziński W., Kolanek Cz., Kozerski S., Sroka Z. J, Walkowiak W. W.: Badania silnika 6CT107 z pokryciem ceramicznym głowicy. Raporty Inst. Konstr. Ekspł. Masz. Politechnika Wrocławska 1998, Ser. SPR nr 77.
6. Bobrowski D.: Probabilistyka w zastosowaniach technicznych, WNT Warszawa 1986, 69-147, 496-507.
7. Bocheński C. Janiszewski T. :Diagnostyka silników wysokoprężnych, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności Warszawa 1996.
8. Cantrell B.K., Watts W.F.: Diesel Exhaust Aerosol: Review of Occupational Exposure Appl. Occup. Environ. Hyg. 1997, 1019-1027.
9. Chłopek Z.: Pojazdy samochodowe. Ochrona środowiska naturalnego, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności” Warszawa 2002.

10. Czogała E.: Teoria zbiorów rozmytych i probabilistycznych dla wspomaganie decyzji w medycynie, [w:] M. Nałęcz [red], Problemy Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej, tom V: Informatyka Medyczna, s.124, WKiŁ, Warszawa 1990.
11. Draper N.R.: Smith M.: Analiza regresji stosowana. PWN, Warszawa 1973.
12. Dubois D., Prade H.: An Introduction to Possibilistic and Fuzzy Logics, [w:] Schafer G., Pearl J., [red.] Readings in Uncertain Reasoning, Morgan Kaufmann Publ., Inc, San Mateo, California, s. 742, 1991.
13. Durham S.D., Smolka J.S., Valtorta M.: Statistical consistency with Dempster's rule on diagnostic trees having uncertain performance parameters, International journal of Approximate Reasoning 1992:6, 67-81
14. Dwiliński L.: O pojęciu „niezawodności obiektu technicznego”. Modelowanie niezawodnościowe obiektów technicznych, Zimowa Szkoła Niezawodności ' 87, Ośrodek Postępu Technicznego, Katowice 1987, s. 113-129.
15. Elouedi Z., Mellouli K. Smets Ph.: Assessing sensor reliability for multisensor data fusion with the transferable belief model.IEEE Trans. SMC B:34,782-787 (2004).
16. Frątczak K.: Koncepcja badań przyspieszonych powłok ceramicznych elementu silnika spalinowego. W: X Jubileuszowy Kongres Eksploatacji Urządzeń Technicznych, Stare Jabłonki, 6-9 września 2005. Radom, Instytut Technologii Eksploatacji, cop. 2005. s. 125-132.
17. Gordon J., Shortliffe E.H.: The Dempster-Shafer Theory of Evidence, [w:] Schafer G. Pearl J., [red.] Readings in Uncertain Reasoning. Morgan Kaufmann Publ. Inc., San Mateo, California, 1991.
18. Guy A.G.: Wprowadzenie do nauki o materiałach, PWN, Warszawa 1977.
19. Haś Z., Kula P., Łojko W., Habrajski T., Kaska J., Sadłowski A.: Zastosowanie technologii azotonasiarczania gazowego w podzespołach pojazdów. Materiały I Konferencji Naukowej nt. Nowoczesne Technologie w Inżynierii Powierzchni, Łódź – Spała. 1994. 33-37.
20. Hebda M. Wybrane metody eksperymentalnej analizy naprężeń własnych w warstwie wierzchniej. Rozprawa habilitacyjna, WAT, Warszawa. 1966.
21. Hebda M. Janicki D.: Trwałość i niezawodność samochodów w eksploatacji Wydawnictwo Komunikacji i Łączności Warszawa 1977.
22. Hebda M., Janicki D., Spaliński T.: Metody przyspieszonych badań eksploatacyjnych urządzeń. Problemy i modele eksploatacji, Zimowa Szkoła Niezawodności '74, Ośrodek Postępu Technicznego, Katowice 1974, s. 125-175.

23. Hejwowski T. Weroński A.: Wytwarzanie powłok odpornych na zużycie, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej Lublin 2000.
24. Hong, X., Liu, W. Scanlon, W.: Enhancing model-based diagnosis with belief functions for fault management. Proceedings of the 2003 UK Workshop on Computational Intelligence, 63-67. 1-3 September, Bristol, UK, 2003.
25. Kacprzyk J.: Wieloetapowe sterowanie rozmyte, Wydawnictwa Naukowo Techniczne, Warszawa 2001.
26. Karpiński J.: Dystrybuanta rozkładu łącznego czasu poprawnej pracy systemu i czasów poprawnej pracy jego elementów oraz jej zastosowanie w diagnostyce. Zimowa Szkoła Niezawodności '78: Diagnostyka niezawodności systemów technicznych, Ośrodek Postępu Technicznego, Katowice 1978, s.349-363.
27. Kaźmierczak A. Wpływ zastosowania powłoki ceramicznej na procesy tribologiczne w uszczelnieniu pierścieniowym silników spalinowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002.
28. Kaźmierczak A. Tarcie i zużycie zespołu tłok – pierścienie- cylinder, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.
29. Kaźmierczak J.: Eksploatacja systemów technicznych, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.
30. Kierdorf B.: Diagnostyka silników o zapłonie iskrowym, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1989.
31. Kłopotek M.A.: Metody identyfikacji i interpretacje struktur rozkładów przekonan w teorii Dempstera-Shafera, Instytut Podstaw Informatyki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa 1998.
32. Kocańda S.: Zmęczeniowe niszczenie metali, WNT, Warszawa. 1978.
33. Kojioma, T., Kato, N., Ishida, N, Taniguchi, M.: Ceramic applications and related technology, Proc Instn Mech Engrs, 1990, vol. 204, s.237-244.
34. Kula P.: Inżynieria warstwy wierzchniej. Monografie, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2000.
35. Kurzyński M.: Algorytmy rozpoznawania wieloetapowego oraz ich zastosowania medyczne i techniczne, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1987.
36. Kwaśniewski S., Sroka Z.J., Zabłocki W.: Modelowanie obciążeń cieplnych w elementach silników spalinowych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1997.

37. Jaźwiński J., Smalko Z.: Wykorzystanie trójkątnego rozkładu prawdopodobieństwa w ocenie gotowości i niezawodności obiektów technicznych, Zimowa Szkoła Niezawodności '97: Problemy niezawodności obiektów technicznych i tolerowanie uszkodzeń w procesie realizacji zadań, Sekcja Podstaw Eksploatacji Komitetu Budowy Maszyn, PAN, Szczyrk 1997, s. 74-82.
38. Jezierski J. : Technologia tłokowych silników wysokoprężnych, WNT, Warszawa 1999.
39. Jurczyk M. Jakubowicz J.: Nanomateriały ceramiczne, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004.
40. Liu, W., Hong J.: Re-investigating Dempster's idea on evidence combination, Knowledge and Information Systems Vol 2, No.2: 223-241 (2000).
41. Luft S.: Podstawy budowy silników. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2003.
42. Łachwa A.: Rozmyty świat zbiorów, liczb, relacji, faktów, reguł i decyzji, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.
43. Maciejewski H.: Metoda analizy wyników badań przyspieszonych z uogólnioną funkcją rozkładu czasu życia i bez zakładania modelu starzenia. Wartościowanie niezawodnościowe w procesach realizacji zadań technologicznych w ujęciu logistycznym, Zimowa Szkoła Niezawodności '94, Sekcja Podstaw Eksploatacji Komitetu Budowy Maszyn PAN, Szczyrk 1994, s. 81-87.
44. Matuszewski A., Kłopotek M.A.: What Does a Belief Function Believe In? Prace IPI PAN, 758/94.
45. Mazurkiewicz A.: Model rozproszonego powstawania wiedzy w obszarze nauki o eksploatacji, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn, 3, 1998, s.419-428.
46. Merkisz J., Pielecha J., Walkowiak W. W: Wpływ modyfikacji świec żarowych na emisję związków toksycznych. W: Rozruch silników spalinowych. Materiały sympozjum. Politechnika Szczecińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Eksploatacji Pojazdów Samochodowych. Szczecin, [23-24] Szczecin czerwiec 1998.
47. Merkisz J.: Ekologiczne problemy silników spalinowych T1, T2, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998.
48. Merkisz J: Wpływ motoryzacji na skażenie środowiska naturalnego, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1993.
49. Mysłowski J. Kołtun J.: Elastyczność tłokowych silników spalinowych, WNT, Warszawa 2000.

50. Nicholls J.R.: Coatings and hardfacing alloys for corrosion and wear resistance diesel engines. *Materials Science and Technology*, vol 10, 1994, s. 1002-1012.
51. Niewczas A.: Metody przyspieszonych ocen niezawodności na przykładzie silników spalinowych. *Niezawodność obiektów technicznych. Zimowa Szkoła Niezawodności '92, Sekcja Podstaw Eksploatacji Komitetu Budowy Maszyn PAN, Szczyrk 1992*, s. 185-195.
52. Niewczas A.: Metoda przyspieszonej oceny niezawodności silnika spalinowego, *Eksploatacja i Niezawodność*, 2000, 4, s. 16-23.
53. Niewczas A.: *Modelowanie zużycia i ocena niezawodności silników spalinowych*, Lublin, Politechnika Lubelska, 1998.
54. Niewczas A.: *Podstawy stochastycznego modelu zużywania poprzez tarcie w zagadnieniach trwałości elementów maszyn, rozprawa habilitacyjna, Zeszyty naukowe WSI Radom, Mechanika nr 19, Radom 1989*.
55. Niezgodziński M. E., Niezgodziński T.: *Obliczenia zmęczeniowe elementów maszyn*, PWN, Warszawa. 1973.
56. Nisbet I.C.T., Lagoy P.K.: Toxic for polycyclic aromatic hydrocarbons. *Reg. Toxicol. Pharmacol.* 16,290-300, 1992.
57. Norma PN\EN-45 001: *Ogólne kryteria działania laboratoriów badawczych*.
58. Norma PN- ISO 2639: *Stal. Określenie umownej grubości warstwy nawęglanej i zahartowanej*.
59. Norma PN- ISO 4970: *Stal. Określenie całkowitej i rzeczywistej grubości cienkich warstw utwardzonych*.
60. Norma PN-77/N-04005. *Wskaźniki niezawodności. Nazwy, określenia i symbole*.
61. Norma BN-79/1374-04. *Silniki samochodowe. Badania stanowiskowe. Badania niezawodności*.
62. Nowakowski T.: *Metodyka prognozowania niezawodności obiektów mechanicznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
63. Nowakowski T.: *Zagadnienie niepewności danych niezawodnościowych. W: Niekonwencjonalne metody oceny trwałości i niezawodności. XXXIV Zimowa Szkoła Niezawodności, Szczyrk, Radom 2006, Wydaw. Instytut Technologii Eksploatacji, [2006]. s. 206-217*.
64. Nowakowski T.: *Klasyfikacja metod prognozowania niezawodności maszyn i urządzeń. W: Metody prognozowania w inżynierii niezawodności. XXXI Zimowa Szkoła Niezawodności, Szczyrk, Radom 2003, Instytut Technologii Eksploatacji, s. 387-401*.

65. Nowakowski T.: Metodyka prognozowania niezawodności obiektów mechanicznych. Wrocław, Oficyna Wydaw. PWr., 1999. (Prace Naukowe Instytutu Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Politechniki Wrocławskiej., 0324-962X ; nr 28) Praca habilitacyjna.
66. Nowakowski T.: Wykorzystanie systemów ekspertowych do oceny bezpieczeństwa maszyn. W: Problemy Maszyn Roboczych (Probl. Masz. Rob.) 1994 vol. 3, z. 3, s. 27-41.
67. Oprzędkiewicz J. : Wspomaganie komputerowe w niezawodności maszyn. WNT, Warszawa 1993.
68. Oprzędkiewicz J. (red):Wybrane problemy niezawodności urządzeń technicznych. PAN, Kraków 1995.
69. Osegueda R. A. , Seelam S. R. , B.. Statistical and Dempster-Shafer techniques in testing structural integrity of aerospace structures . Mulupuru, and V. Kreinovich (2003) Journal:Paper No.5047-18, to appear in NDE for Health Monitoring and Diagnostics,SPIE, San Diego, CA, March.
70. Pampuch R.: Budowa i właściwości materiałów ceramicznych. Wydawnictwo AGH, Kraków1995.
71. Pampuch R. Haberko K. Kordek M.: Nauka o procesach ceramicznych. PWN, Warszawa 1992.
72. Pearl J.: Probabilistic Reasoniing in Intelligent Systems: Network of Plausible Inference, Morgan Kaufmann Pub. Inc., San Francisco, California, 1991.
73. Pisecki S.: O modelach niezawodności obiektów technicznych. Modelowanie niezawodnościowe obiektów technicznych. Zimowa Szkoła Niezawodności '87, Ośrodek Postępu Technicznego, Katowice 1987, s. 334-354.
74. Piegat A.: Modelowanie i sterowanie rozmyte, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 1999.
75. Rutkowska D, Piliński M., Rutkowski L.: Sieci neuronowe, algorytmy genetyczne i systemy rozmyte. Wydawnictwo Naukowe PWN, Łódź 1999.
76. Sitnik L.: Kształtowanie charakterystyk silnika o zapłonie samoczynnym do zadanych warunków eksploatacji.(Raporty Inst. Konstr. Ekspł. Masz. Pol. Wroc. 1996, Ser. SPR; nr 15).
77. Sitnik L., Wiśniewski P.: Rozwinięcie modelu matematycznego wybranych procesów zachodzących w komorze spalania silnika tłokowego. Raporty Inst. Konstr. Ekspł. Masz. PWroc. 1993, Ser. SPR; nr 29.

78. Straszecka E., Straszecka J.: Interpretation of Medical Symptoms Using Fuzzy Focal Elements, 4th International Conference on Computer Recognition Systems - CORES2005, Rydzyna (Poland) 22-25 May 2005.
79. Straszecka E., Straszecka J.: Medical Reasoning with Fuzzy and Uncertain Symptoms - Proc. European Symposium on Intelligent Techniques pp. 101-103 ESIT 2000 Aachen, Germany.
80. Szkoda J.: Stany graniczne obiektów technicznych. Zimowa Szkoła Niezawodności '97: Problemy niezawodności obiektów technicznych i tolerowanie uszkodzeń w procesie realizacji zadań. Sekcja Podstaw Eksploatacji Komitetu Budowy Maszyn PAN, Szczyrk 1997, 214-220.
81. Topolska K., Topolski M.: Model Dempstera-Shafera do oceny trwałości obiektu mechanicznego w warunkach laboratoryjnych. W: Journal of KONES 2005 vol. 12, nr 3/4, s. 307-314.
82. Topolska K.: Koncepcja przyspieszonych badań trwałości powłok ceramicznych na elementach silnika spalinowego. Journal of KONES 2005 vol. 12, nr 3/4, s. 315-321.
83. Topolska K.: Ocena trwałości powłok ceramicznych w ujęciu teorii Dempstera Shafera. W: Niekonwencjonalne metody oceny trwałości i niezawodności. XXXIV Zimowa Szkoła Niezawodności, Szczyrk, [8-14 stycznia] 2006. Radom, Wydaw. Instytutu Technologii Eksploatacji, [2006]. s. 333-341.
84. Topolska K.: Własności powłok ceramicznych stosowanych w silnikach spalinowych. Nazwa wydawcy z cop.W: IX Konferencja naukowo-techniczna na temat: Innowacje w motoryzacji a bezpieczeństwo ruchu drogowego, Słupsk, 26.05.2006 / pod red. L. Kukiełki. Słupsk : Starostwo Powiatowe w Słupsku,, cop. 2006. s. 305-314.
85. Topolska K., Walkowiak W. W, Topolski M.: Modelowanie trwałości elementu mechanicznego z wykorzystaniem teorii Dempstera-Shafera. W: Journal of KONES (J. KONES) 2006 vol. 13, nr 4, s. 405-412.
86. Topolska K., Walkowiak W. W, Topolski M.: Metody oceny trwałości powłoki ceramicznej w warunkach laboratoryjnych. W: Journal of KONES 2006 vol. 13, nr 4, s. 413-420.
87. Wieczorkowski R., Zieliński R.: Komputerowe generatory liczb losowych. Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa 1997.
88. Wierzchoń S.: Metody reprezentacji i przetwarzania informacji niepewnej w ramach teorii Dempstera-Shafera, Instytut Podstaw Informatyki Polkiej Akademii Nauk, Warszawa 1996.

89. Woźniak M.: Podstawy komputerowego rozpoznawania sterowanych łańcuchów Markowa z regułami eksperta i ciągiem uczącym – algorytmy i ich zastosowanie w diagnostyce medycznej, Praca doktorska nr 2/96, Politechnika Wrocławska.
90. Wang, A.: A Defect in Dempster-Shafer Theory. Proc. Conf. Uncertainty in Artificial Intelligence, UA196, URL=<ftp://cogsci.indiana.edu/pub/wang.dempster.ps>.
91. Wieczorkowski R., Zieliński R.: Komputerowe generatory liczb losowych. Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa 1997.
92. Wierchoń S.: Metody reprezentacji i przetwarzania informacji niepewnej w ramach teorii Dempstera-Shafera, Instytut Podstaw Informatyki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa 1996 Weroński A.: Zmęczenie cieplne metali. WNT. Warszawa. 1983.
93. Walkowiak W. W, Kolanek Cz., i inni: Badania nad zastosowaniem powłok ceramicznych w budowie silników spalinowych. Raporty Inst. Konstr. Ekspł. Masz. PWroc. 1997, Ser. SPR nr 63.
94. Walkowiak W. Kolanek Cz. Dudziński W. Białucki P. Kozerski S. Sroka Z.J.: Badania nad zastosowaniem powłok ceramicznych w budowie silników spalinowych. Raport Serii Sprawozdanie Nr S 063/97, Politechnika Wrocławska Wrocław 1997.
95. Walkowiak W. Białucki P. Drozd Cz. Kolanek Cz. Kozerski S. Kuśmidrowicz J. Miksiewicz K. Wala D.: Zastosowanie powłok i elementów ceramicznych w silnikach spalinowych pod kątem zwiększenia odporności na obciążenia cieplne oraz poprawy sprawności i trwałości silnika ETAP I. Raport z serii sprawozdania nr 060/86, Politechnika Wrocławska Wrocław 1986.
96. Walkowiak W. W: Wpływ pokryć ceramicznych elementów przestrzeni spalania na parametry pracy silnika o zapłonie samoczynnym. W: Internal combustion engines. Institute of Aeronautics Warsaw Poland, Poznań University of Technology. Warsaw-Poznań, 5-8 September 1995. Warsaw: Institute of Aeronautics 1995 Journal of KONES s. 515-520.
97. Wendeker M. Niewczas A. Piernikarski D.: Wyniki badań silników spalinowych ZI w warunkach ustalonych i nieustalonych, KONES`99 : 25th International Scientific Conference on Combustion Engines : Materiały Konferencyjne, September 8-12, 1999, Zakopane, Warsaw, Institute of Aeronautics, 1999, s. 280-287.
98. Wiśniewski St.: Obciążenia cieplne silników tłokowych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności Warszawa 1972, s. 159-197.

99. Yager R. R., Filev D. P.: Including probabilistic uncertainty in fuzzy logic controller modelling using Dempster-Shafer theory, *IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics*, 25, No.8 (1995) 1221-1230.
100. Yager R. R.: Uncertainty modeling and decision support, *Reliability Engineering and System Safety* 85 (2004) 341-354.
101. Zhu H, Basir O.: Adaptive Fuzzy Evidential Reasoning with Information Theoretic Discounting for Robust Brain Tissue Classification, 5th International Symposium on Soft Computing for Industry (WAC-ISSCI), SEVILLE, Spain, June 28 -- July 1, 2004.
102. Zhu H., Basir O.: Feature Region-Merging Based Fuzzy Rules Extraction for Pattern Classification, *IEEE international Conference on Fuzzy Systems(FUZZ-IEEE2003)*, pp. 696-701, 2003.
103. Zhu H., Basir O.: Connectionist based Dempster-Shafer evidential reasoning for data fusion, *Int. Joint Conf. on Neural Networks (IJCNN2004)*, July 26 - 29, Budapest, 2004
104. Żołnierek A., Rubacha B.: The empirical study of the naive Bayes classifier in the case of Markov chain recognition task. W: *Computer recognition systems*. Marek 14 Kurzyński [i in.] (eds). Berlin [i in.]: Springer, cop. 2005 (*Advances in Soft Computing*, ISSN 1615-3871) s. 329-336, 1 tab. bibliogr. 12 poz. Referat z 4th International Conference on Computer Recognition Systems CORES '05. Rydzyna, Poland, May 22-25, 2005.
105. Żołnierek A., Madecki G.: The pattern recognition algorithm for Markov chains with fuzzy features vector - simulation investigations. W: *Modelling and simulation of systems. Proceedings of the [39th] conference*. Ed. Jan Stefan. [Hradec nad Moravici, Czech Republic, April 19-21, 2005].(*Acta MOSIS*; s. 49-55, 2 rys. 4 tab. bibliogr. 13 poz. nr 102) Ostrava: MARQ 2005.
106. Żołnierek A.: The algorithm of learning in the complex recognition-control system.W: *Advanced simulation of systems. Proceedings of the XXVIth International Autumn Colloquium*. Ed. Jan Stefan. [Sv. Hostyn, Czech Republic, 22-24 September 2004]. Ostrava: MARQ 2004 (*Acta MOSIS*; s. 98-103, bibliogr. 12 poz. nr 98).
107. Żołnierek A.: The pattern recognition algorithm for second-order Markov chains with learning-simulation investigations. W: *Modelling and simulation of systems. Proceedings of the [38th] conference*. Ed. Jan Stefan. [Roznov pod Radhostem, Czech Republic, April 19-21, 2004]. (*Acta MOSIS*; s. 129-134, 2 rys. bibliogr. 10 poz. nr 95) Ostrava: MARQ 2004

ZAŁĄCZNIK NR 1

II. Zawór ssący i wydechowy

	dzień	początek	koniec	Ogółem godz.
FAZA I	1	8.15	15.15	7
	2	8.15	20.15	12
	3	8.00	15.00	7
	4	10.00	15.00	5
	5	9.30	15.30	6
	6	7.00	16.00	9
	7	9.00	15.00	6
	8	8.00	15.00	6
	9	9.00	11.00	2
SUMA				60
FAZA II	Ciśnienie sprężarki 0,5 MPa, n=900 obr/min,			
	1	8.15	16.15	8
	2	11.15	20.15	9
	3	8.00	15.00	7
	4	9.00	15.00	6
	5	8.00	15.00	7
	6	8.45	15.45	7
	7	9.00	15.00	6
	8	8.30	14.30	7
9	9.30	11.30	3	
SUMA				60
FAZA III	Ciśnienie sprężarki 0,5 MPa, n=900 obr/min,			
	1	8.00	12.00	4
	2	11.00	15.00	4
	3	10.00	15.30	4,30
	4	10.30	12.30	2
	5	8.30	11.30	4
	6	10.00	14.00	4
	7	9.45	13.30	3,45
	8	9.15	15.15	6
	9	8.45	15.45	7
	10	13.00	14.15	1,15
	11	9.45	14.45	5
12	9.10	13.20	4,30	
SUMA				50

PIEC

	Temperatura pieca [°C]	Czas nagrzewania próbki [s]	Temperatura próbki [°C]	Czas chłodzenia [s]	Temperatura H ₂ O [°C]	Temperatura próbki po schłodzeniu [°C]	Szok termiczny ΔT [°C]
FAZA IV	24.10.2006 godz. 14.35-17.38 (zawór wydechowy)						
	400	1320	361	30	22,7	45,6	315,4
	407	1500	368	120	22,6	35,7	332,3
	394	1800	370	120	22,7	36,6	333,4
	405	1200	380	150	22,9	34,5	345,5
	406	1740	390	120	22,5	31,9	358,1
	403	1260	385	120	22,4	39,2	345,8
	godz.14.35-17.35 (zawór ssący)						
	400	1380	381	40	22,3	46,4	334,6
	407	1800	340	120	22,0	33,9	306,1
	394	1620	335	90	21,2	29,0	306
	405	1200	325	120	23,0	30,8	294,2
	396	1620	380	120	22,8	28,9	351,1
	403	1320	348	90	22,6	28,9	319,1
	26.10.2006 godz. 14.05-18.31 (zawór wydechowy)						
	427	1500	367	10	21,0	99,8	267,2
	439	1260	410	10	21,4	80,5	329,5
	448	1920	432	10	21,7	79,3	352,7
	458	1980	444	10	21,6	79,2	364,8
	469	1800	455	10	22,1	75,4	379,6
	479	1800	478	10	21,9	70,3	407,7
	483	1860	480	10	21,7	79,6	400,4
	481	1800	480	10	21,5	78,1	401,9
	godz.14.05-18.30 (zawór ssący)						
	427	1500	378	10	21,3	80,0	298
	439	1200	425	10	21,6	78,4	346,6
	448	2100	438	10	21,1	67,6	370,4
	458	1920	455	10	21,5	65,6	389,4
	469	1920	469	10	21,1	62,9	406,1
	479	1980	479	10	21,5	69,9	409,1
	483	1980	476	10	21,7	68,5	407,5
	481	1740	479	10	21,2	69,8	409,2
	27.10.2006 godz. 12.22-14-22 (zawór wydechowy)						
413	1260	399	10	22,9	106,5	292,5	

422	1740	419	5	22,9	175,0	244
430	900	428	5	22,9	165,0	263
445	1560	440	5	22,9	159,9	280,1
455	1200	451	5	22,9	167,9	283,1
godz. 12.22-14.25 (zawór ssący)						
413	1260	461	10	23,1	91,7	369,3
422	1800	480	5	22,9	104,0	376
430	1020	492	5	22,8	105,0	387
445	1620	509	5	23,9	101,9	407,1
455	1320	515	5	23,2	89,6	425,4
08.11.2006 godz. 15.09-23.21 (zawór wydechowy)						
460	1800	371	10	18,1	76,7	294,3
473	1800	417	10	17,8	75,2	341,8
480	1800	379	10	17,2	75,4	303,6
486	1800	443	10	17,4	89,3	353,7
490	1800	488	10	17,6	131,1	356,9
496	1800	498	10	17,1	166,3	331,7
501	1800	499	10	17,8	155,4	343,6
505	1800	458	10	17,8	61,6	396,4
512	1800	515	10	17,7	83,4	431,6
517	1800	536	10	17,1	159,0	377
521	1800	540	10	18,5	127,0	413
524	1800	543	10	18,8	92,2	450,8
529	1800	528	10	19,3	101,0	427
531	1800	530	10	19,3	112,6	417,4
535	1800	539	10	19,2	110,0	429
(zawór ssący)						
460	1800	459	10	18,5	81,4	377,6
473	1800	473	10	18,9	76,4	396,6
480	1800	480	10	19,1	78,0	402
486	1800	485	10	18,1	69,0	416
490	1800	488	10	18,3	71,8	416,2
496	1800	490	10	17,3	64,4	425,6
501	1800	499	10	18,8	48,7	450,3
505	1800	500	10	17,8	57,1	442,9
512	1800	510	10	17,8	63,2	446,8
517	1800	515	10	18,7	57,9	457,1
521	1800	519	10	19,3	67,2	451,8
524	1800	520	10	17,6	57,4	462,6

529	1800	528	10	17,8	75,6	452,4
531	1800	530	10	18,1	70,8	459,2
535	1800	533	10	18,1	71,2	461,8
09.11.2006 godz. 14.45-16.57 (zawór wydechowy)- AWARIA PIECA						
501	1800	500	10	19,0	89,5	410,5
507	1800	505	10	19,7	83,4	421,6
516	1800	515	10	19,2	98,2	416,8
520	1800	519	10	19,8	89,9	429,1
(zawór ssący)						
501	1800	506	10	19,7	68,2	437,8
507	1800	511	10	19,5	67,2	443,8
516	1800	520	10	19,8	76,2	443,8
520	1800	528	10	19,8	78,9	449,1
20.11.06 (zawór wydechowy)						
897	480	897	10	20,1	88,3	808,7
915	480	915	10	20,0	63,5	851,5
Próbka uległa uszkodzeniu						
(zawór ssący)						
890	480	890	10	19,9	102	788
891	480	891	10	19,7	128	763
892	480	892	10	19,8	115	777
Próbka uległa uszkodzeniu						

III. Zawór ssący i wydechowy

	dzień	początek	koniec	Ogółem godz.
FAZA I	1	8.00	16.00	8
	2	8.00	18.00	10
	3	8.00	15.00	7
	4	8.00	15.00	7
	5	8.00	15.30	7,30
	6	8.00	15.30	7,30
	7	8.00	15.00	7
	8	8.00	14.00	6
SUMA				60
FAZA II	Ciśnienie sprężarki 0,5 MPa, n=900 obr/min,			
	1	9.00	16.00	7
	2	9.00	16.00	7
	3	9.00	16.00	7
	4	9.00	16.00	7
	5	9.00	16.00	7

	6	9.00	16.00	7
	7	9.00	16.00	7
	8	9.00	16.00	7
	9	9.00	13.00	4
SUMA				60
FAZA III	Ciśnienie sprężarki 0,5 MPa, n=900 obr/min,			
	1	8.00	18.00	10
	2	8.00	18.00	10
	3	8.00	18.00	10
	4	8.00	18.00	10
	5	8.00	18.00	10
SUMA				50

PIEC

	Temperatura pieca [°C]	Czas nagrzewania próbki [s]	Temperatura próbki [°C]	Czas chłodzenia [s]	Temperatura H ₂ O [°C]	Temperatura próbki po schłodzeniu [°C]	Szok termiczny ΔT [°C]
FAZA IV	24.10.2006 godz. 14.35-17.38 (zawór wydechowy)						
	400	1320	351	30	22,9	43,4	307,6
	407	1500	374	120	22,4	31,9	342,1
	394	1800	351	120	22,7	29,9	321,1
	405	1200	330	150	22,8	29,3	300,7
	406	1740	336	120	22,2	27,9	308,1
	403	1260	348	120	34,0	29,6	318,4
	godz.14.35-17.35 (zawór ssący)						
	400	1380	351	40	22,9	44,6	306,4
	407	1800	374	120	22,2	33,7	340,3
	394	1620	320	90	21,5	34,9	285,1
	405	1200	330	120	23,1	30,5	299,5
	396	1620	386	120	22,4	31,2	354,8
	403	1320	336	90	22,4	38,3	297,7
	26.10.2006 godz. 14.05-18.31 (zawór wydechowy)						
	427	1500	411	10	22,1	86,8	324,2
	439	1260	418	10	21,7	85,2	332,8
	448	1920	442	10	21,5	78,4	363,6
	458	1980	454	10	21,4	78,5	375,5
	469	1800	468	10	22,0	80,6	387,4
479	1800	489	10	21,7	76,4	412,6	
483	1860	488	10	21,8	66,7	421,3	

481	1800	491	10	21,5	64,6	426,4
godz.14.05-18.30 (zawór ssący)						
427	1500	366	10	21,4	72,4	293,6
439	1200	416	10	21,9	72,8	343,2
448	2100	444	10	21,7	69,5	374,5
458	1920	456	10	21,8	80,1	375,9
469	1920	469	10	21,1	62,6	406,4
479	1980	477	10	21,6	69,1	407,9
483	1980	485	10	21,7	68,0	417
481	1740	475	10	21,7	74,8	400,2
27.10.2006 godz. 12.22-14.22 (zawór wydechowy)						
413	1260	453	10	22,9	83,4	369,6
422	1740	454	5	22,9	155,4	298,6
430	900	415	5	22,9	131,1	283,9
445	1560	409	5	23,8	166,3	242,7
455	1200	414	5	23,3	159,0	255
godz. 12.22-14.25 (zawór ssący)						
413	1260	371	10	23,1	107,9	
422	1800	417	5	22,9	180,0	
430	1020	379	5	22,8	162,0	
445	1620	443	5	23,9	158,7	
455	1320	458	5	23,2	165,7	
08.11.2006 godz. 15.09-23.21 (zawór wydechowy)						
460	1800	472	10	18,1	117,0	355
473	1800	482	10	17,8	98,2	383,8
480	1800	483	10	17,2	111,0	372
486	1800	489	10	17,4	112,6	376,4
490	1800	509	10	17,6	110,0	399
496	1800	506	10	17,1	104,0	402
501	1800	511	10	17,8	105,0	406
505	1800	512	10	17,8	101,9	410,1
512	1800	520	10	17,7	91,7	428,3
517	1800	533	10	17,1	89,6	443,4
521	1800	542	10	18,5	76,7	465,3
524	1800	542	10	18,8	75,2	466,8
529	1800	543	10	19,3	75,4	467,6
531	1800	543	10	19,3	89,3	453,7
535	1800	543	10	19,2	61,6	481,4
(zawór ssący)						

460	1800	461	10	18,8	57,1	403,9
473	1800	480	10	17,8	63,2	416,8
480	1800	492	10	18,1	57,9	434,1
486	1800	509	10	18,5	69,0	440
490	1800	515	10	18,9	67,2	447,8
496	1800	515	10	19,1	57,4	457,6
501	1800	528	10	18,7	75,6	452,4
505	1800	517	10	19,3	70,8	446,2
512	1800	526	10	18,1	68,2	457,8
517	1800	528	10	17,8	67,2	460,8
521	1800	530	10	18,1	76,2	453,8
524	1800	539	10	18,3	75,5	463,5
529	1800	536	10	17,3	81,4	454,6
531	1800	540	10	17,6	76,4	463,6
535	1800	543	10	17,8	78,0	465
09.11.2006 godz. 14.45-16.57 (zawór wydechowy)– AWARIA PIECA						
501	1800	528	10	20,0	89,5	438,5
507	1800	524	10	19,7	89,9	434,1
516	1800	538	10	20,2	98,2	439,8
520	1800	539	10	19,8	83,4	455,6
(zawór ssący)						
501	1800	505	10	19,7	71,2	433,8
507	1800	508	10	19,5	71,8	436,2
516	1800	515	10	19,8	64,4	450,6
520	1800	519	10	19,8	48,7	470,3
20.11.06 (zawór wydechowy)						
897	480	897	10	21,1	78,3	818,7
899	480	899	10	21,0	53,7	845,3
915	480	915	10	21,0	58,4	856,6
927	480	927	10	21,0	60,0	867
Próbka uległa uszkodzeniu						
(zawór ssący)						
890	480	890	10	18,9	105	785
891	480	891	10	18,7	118	773
892	480	892	10	18,8	118	774
897	480	897	10	18,7	109	788
898	480	898	10	18,7	112	786
899	480	899	10	18,8	129	770
Próbka uległa uszkodzeniu						

IV. Zawór ssący i wydechowy

	Dzień	początek	koniec	Ogółem godz.
FAZA I	1	8.00	18.00	10
	2	8.00	18.00	10
	3	8.00	18.00	10
	4	8.00	18.00	10
	5	8.00	18.00	10
	6	8.00	18.00	10
SUMA				60
FAZA II	Ciśnienie sprężarki 0,5 MPa, n=900 obr/min,			
	1	8.00	18.00	10
	2	8.00	18.00	10
	3	8.00	18.00	10
	4	8.00	18.00	10
	5	8.00	18.00	10
	6	8.00	18.00	10
SUMA				60
FAZA III	Ciśnienie sprężarki 0,5 MPa, n=900 obr/min,			
	1	8.00	18.00	10
	2	8.00	18.00	10
	3	8.00	18.00	10
	4	8.00	18.00	10
	5	8.00	18.00	10
SUMA				50

PIEC

	Temperatura pieca [°C]	Czas nagrzewania próbki [s]	Temperatura próbki [°C]	Czas chłodzenia [s]	Temperatura H ₂ O [°C]	Temperatura próbki po schłodzeniu [°C]	Szok termiczny ΔT [°C]
FAZA IV	24.10.2006 godz. 14.35-17.38 (zawór wydechowy)						
	400	1320	352	30	22,4	44,0	308
	407	1500	370	120	22,4	33,0	337
	394	1800	355	120	22,4	34,0	321
	405	1200	338	150	22,4	30,0	308
	406	1740	380	120	22,4	31,0	349
	403	1260	368	120	22,4	38,0	330
	godz.14.35-17.35 (zawór ssący)						
	400	1380	360	40	22,5	43,0	317
407	1800	378	120	22,5	34,9	343,1	

394	1620	329	90	22,5	29,9	299,1
405	1200	350	120	22,5	29,3	320,7
396	1620	390	120	22,5	27,8	362,2
403	1320	389	90	22,5	29,6	359,4
26.10.2006 godz. 14.05-18.31 (zawór wydechowy)						
427	1500	420	10	21,4	80,6	339,4
439	1260	430	10	21,9	76,4	353,6
448	1920	443	10	21,7	66,7	376,3
458	1980	453	10	21,8	64,6	388,4
469	1800	462	10	22,1	62,6	399,4
479	1800	475	10	21,7	69,1	405,9
483	1860	487	10	21,5	68,0	419
481	1800	480	10	21,4	74,8	405,2
godz.14.05-18.30 (zawór ssący)						
427	1500	407	10	21,1	98,8	308,2
439	1200	419	10	21,6	85,2	333,8
448	2100	428	10	21,7	78,4	349,6
458	1920	438	10	21,7	78,5	359,5
469	1920	449	10	22,0	72,4	376,6
479	1980	459	10	21,7	72,8	386,2
483	1980	463	10	21,8	69,5	393,5
481	1740	461	10	21,5	80,1	380,9
27.10.2006 godz. 12.22-14-22 (zawór wydechowy)						
413	1260	374	10	23,1	117,9	256,1
422	1740	417	5	23,9	170,0	247
430	900	379	5	22,8	152,0	227
445	1560	443	5	23,9	158,0	285
455	1200	454	5	23,2	165,1	288,9
godz. 12.22-14.25 (zawór ssący)						
413	1260	371	10	22,9	93,4	277,6
422	1800	409	5	22,9	145,4	263,6
430	1020	414	5	22,9	141,1	272,9
445	1620	453	5	23,8	156,3	296,7
455	1320	458	5	23,3	149,0	309
08.11.2006 godz. 15.09-23.21 (zawór wydechowy)						
460	1800	467	10	18,1	117,0	350
473	1800	470	10	17,1	102,2	367,8
480	1800	477	10	17,8	100,9	376,1
486	1800	483	10	17,8	108,6	374,4

490	1800	487	10	17,7	104,0	383
496	1800	490	10	17,8	95,7	394,3
501	1800	499	10	17,2	100,0	399
505	1800	500	10	17,4	105,9	394,1
512	1800	510	10	19,3	101,0	409
517	1800	514	10	19,3	99,6	414,4
521	1800	518	10	19,2	86,7	431,3
524	1800	520	10	18,8	75,5	444,5
529	1800	525	10	17,6	75,9	449,1
531	1800	525	10	17,1	99,3	425,7
535	1800	530	10	18,5	81,6	448,4
(zawór ssący)						
460	1800	457	10	18,8	70,8	386,2
473	1800	470	10	17,8	71,2	398,8
480	1800	470	10	19,1	71,8	398,2
486	1800	484	10	18,7	64,4	419,6
490	1800	485	10	19,3	69,0	416
496	1800	494	10	17,3	67,2	426,8
501	1800	496	10	17,6	57,4	438,6
505	1800	501	10	17,8	75,6	425,4
512	1800	509	10	18,1	48,7	460,3
517	1800	516	10	17,8	57,1	458,9
521	1800	520	10	18,1	63,2	456,8
524	1800	520	10	18,3	81,4	438,6
529	1800	518	10	18,1	76,4	441,6
531	1800	527	10	18,5	78,0	449
535	1800	531	10	18,9	57,9	473,1
09.11.2006 godz. 14.45-16.57 (zawór wydechowy)– AWARIA PIECA						
501	1800	498	10	19,8	89,4	408,6
507	1800	500	10	19,7	89,8	410,2
516	1800	515	10	19,2	98,1	416,9
520	1800	520	10	19,8	83,0	437
(zawór ssący)						
501	1800	501	10	19,7	68,5	432,5
507	1800	507	10	19,8	67,9	439,1
516	1800	516	10	19,8	76,0	440
520	1800	520	10	19,8	74,9	445,1
20.11.06 (zawór wydechowy)						
897	480	897	10	21,1	78,0	819

	927	480	927	10	21,0	68,4	858,6
Próbka uległa uszkodzeniu							
(zawór ssący)							
	892	480	892	10	18,8	113,3	778,7
	897	480	897	10	18,7	107,5	789,5
Próbka uległa uszkodzeniu							

V. Zawór ssący i wydechowy

	dzień	początek	koniec	Ogółem godz.
FAZA I	1	8.00	18.00	10
	2	8.00	18.00	10
	3	8.00	18.00	10
	4	8.00	18.00	10
	5	8.00	18.00	10
	6	8.00	18.00	10
SUMA				60
FAZA II	Ciśnienie sprężarki 0,5 MPa, n=900 obr/min,			
	1	8.00	18.00	10
	2	8.00	18.00	10
	3	8.00	18.00	10
	4	8.00	18.00	10
	5	8.00	18.00	10
6	8.00	18.00	10	
SUMA				60
FAZA III	Ciśnienie sprężarki 0,5 MPa, n=900 obr/min,			
	1	8.00	18.00	10
	2	8.00	18.00	10
	3	8.00	18.00	10
	4	8.00	18.00	10
5	8.00	18.00	10	
SUMA				50

PIEC

	Temperatura pieca [°C]	Czas nagrzewania próbki [s]	Temperatura próbki [°C]	Czas chłodzenia [s]	Temperatura H ₂ O [°C]	Temperatura próbki po schłodzeniu [°C]	Szok termiczny ΔT [°C]
FAZA IV	24.10.2006 godz. 14.35-17.38 (zawór wydechowy)						
	400	1320	361	30	19,9	43,4	317,6
	407	1500	384	120	19,8	31,9	352,1
	394	1800	359	120	19,4	29,9	329,1

405	1200	399	150	19,8	29,3	369,7
406	1740	399	120	19,2	27,9	371,1
403	1260	396	120	19,9	29,6	366,4
godz.14.35-17.35 (zawór ssący)						
400	1380	351	40	19,8	44,6	306,4
407	1800	374	120	19,9	33,7	340,3
394	1620	355	90	19,7	34,9	320,1
405	1200	387	120	19,9	30,5	356,5
396	1620	376	120	19,5	31,2	344,8
403	1320	386	90	19,5	38,3	347,7
26.10.2006 godz. 14.05-18.31 (zawór wydechowy)						
427	1500	400	10	21,1	100,8	299,2
439	1260	419	10	21,6	72,4	346,6
448	1920	438	10	21,7	72,8	365,2
458	1980	446	10	21,8	69,5	376,5
469	1800	449	10	21,5	80,1	368,9
479	1800	471	10	21,7	85,2	385,8
483	1860	480	10	21,7	78,4	401,6
481	1800	481	10	22,0	78,5	402,5
godz.14.05-18.30 (zawór ssący)						
427	1500	426	10	22,1	69,1	356,9
439	1200	437	10	21,7	68,0	369
448	2100	447	10	21,5	74,8	372,2
458	1920	452	10	21,4	62,6	389,4
469	1920	465	10	21,4	80,6	384,4
479	1980	474	10	21,5	76,4	397,6
483	1980	481	10	21,7	66,7	414,3
481	1740	481	10	21,8	64,6	416,4
27.10.2006 godz. 12.22-14.22 (zawór wydechowy)						
413	1260	374	10	22,9	106,8	267,2
422	1740	409	5	22,9	179,0	230
430	900	416	5	22,9	169,0	247
445	1560	444	5	23,8	168,7	275,3
455	1200	451	5	23,3	155,7	295,3
godz. 12.22-14.25 (zawór ssący)						
413	1260	399	10	23,1	95,8	303,2
422	1800	417	5	22,9	135,4	281,6
430	1020	399	5	22,8	139,1	259,9
445	1620	443	5	23,9	166,5	276,5

455	1320	455	5	23,2	151,0	304
08.11.2006 godz. 15.09-23.21 (zawór wydechowy)						
460	1800	459	10	18,8	101,9	357,1
473	1800	470	10	19,3	89,6	380,4
480	1800	479	10	19,3	76,7	402,3
486	1800	481	10	19,2	75,2	405,8
490	1800	485	10	17,6	101,0	384
496	1800	494	10	17,1	112,6	381,4
501	1800	500	10	17,8	104,0	396
505	1800	499	10	17,8	105,0	394
512	1800	502	10	17,7	75,4	426,6
517	1800	507	10	17,1	89,3	417,7
521	1800	511	10	18,5	110,0	401
524	1800	514	10	18,1	91,7	422,3
529	1800	519	10	17,8	127,0	392
531	1800	521	10	17,2	92,2	428,8
535	1800	530	10	17,4	61,6	468,4
(zawór ssący)						
460	1800	455	10	18,8	81,4	373,6
473	1800	463	10	17,8	76,4	386,6
480	1800	477	10	17,8	88,0	389
486	1800	482	10	17,8	69,0	413
490	1800	485	10	18,1	67,0	418
496	1800	491	10	18,1	56,4	434,6
501	1800	501	10	18,5	85,6	415,4
505	1800	500	10	18,9	78,8	421,2
512	1800	502	10	19,3	70,2	431,8
517	1800	511	10	18,1	71,5	439,5
521	1800	518	10	18,3	67,4	450,6
524	1800	520	10	17,3	58,7	461,3
529	1800	520	10	17,6	67,1	452,9
531	1800	522	10	18,7	63,0	459
535	1800	530	10	17,9	58,9	471,1
09.11.2006 godz. 14.45-16.57 (zawór wydechowy)– AWARIA PIECA						
501	1800	500	10	20,0	89,5	410,5
507	1800	501	10	19,7	89,9	411,1
516	1800	511	10	20,2	98,2	412,8
520	1800	519	10	19,8	83,4	435,6
(zawór ssący)						

501	1800	498	10	19,2	72,0	426
507	1800	500	10	19,2	67,2	432,8
516	1800	510	10	19,2	68,2	441,8
520	1800	515	10	19,2	76,2	438,8
20.11.06 (zawór wydechowy)						
897	480	897	10	21,0	88,5	808,5
Próbka uległa uszkodzeniu						
(zawór ssący)						
890	480	890	10	18,8	99,8	790,2
Próbka uległa uszkodzeniu						

VI. Zawór ssący i wydechowe

	dzień	początek	koniec	Ogółem godz.
FAZA I	1	7.00	15.00	8
	2	7.00	15.00	8
	3	7.00	15.00	8
	4	7.00	15.00	8
	5	7.00	15.00	8
	6	7.00	15.00	8
	7	7.00	15.00	8
	8	7.00	11.00	4
SUMA				60
FAZA II	Ciśnienie sprężarki 0,5 MPa, n=900 obr/min,			
	1	7.00	15.00	8
	2	7.00	15.00	8
	3	7.00	15.00	8
	4	7.00	15.00	8
	5	7.00	15.00	8
	6	7.00	15.00	8
	7	7.00	15.00	8
8	7.00	11.00	4	
SUMA				60
FAZA III	Ciśnienie sprężarki 0,5 MPa, n=900 obr/min,			
	1	7.00	15.00	8
	2	7.00	15.00	8
	3	7.00	15.00	8
	4	7.00	15.00	8
	5	7.00	15.00	8
	6	7.00	15.00	8
	7	11.00	13.00	2

SUMA	50
-------------	-----------

PIEC

	Temperatura pieca [°C]	Czas nagrzewania próbki [s]	Temperatura próbki [°C]	Czas chłodzenia [s]	Temperatura H ₂ O [°C]	Temperatura próbki po schłodzeniu [°C]	Szok termiczny ΔT [°C]
FAZA IV	24.10.2006 godz. 14.35-17.38 (zawór wydechowy)						
	400	1320	371	30	22,7	34,6	336,4
	407	1500	373	120	22,5	33,7	339,3
	394	1800	361	120	22,8	34,4	326,6
	405	1200	389	150	22,8	30,9	358,1
	406	1740	396	120	22,3	31,1	364,9
	403	1260	398	120	22,0	35,3	362,7
	godz.14.35-17.35 (zawór ssący)						
	400	1380	361	40	22,8	43,4	317,6
	407	1800	374	120	22,4	31,9	342,1
	394	1620	360	90	21,6	39,9	320,1
	405	1200	370	120	23,0	29,9	340,1
	396	1620	385	120	22,4	29,9	355,1
	403	1320	398	90	22,0	29,1	368,9
	26.10.2006 godz. 14.05-18.31 (zawór wydechowy)						
	427	1500	419	10	22,0	72,4	346,6
	439	1260	427	10	21,7	72,8	354,2
	448	1920	438	10	21,8	69,5	368,5
	458	1980	450	10	21,1	84,8	365,2
	469	1800	460	10	21,6	85,2	374,8
	479	1800	474	10	21,7	78,4	395,6
	483	1860	480	10	21,7	78,5	401,5
	481	1800	477	10	21,5	80,1	396,9
	godz.14.05-18.30 (zawór ssący)						
	427	1500	386	10	21,4	78,6	307,4
	439	1200	416	10	21,9	76,9	339,1
	448	2100	444	10	21,7	65,7	378,3
	458	1920	456	10	21,5	64,1	391,9
	469	1920	469	10	21,4	63,6	405,4
	479	1980	477	10	21,8	69,9	407,1
	483	1980	485	10	22,1	64,0	421
	481	1740	475	10	21,7	64,4	410,6
	27.10.2006 godz. 12.22-14-22 (zawór wydechowy)						

413	1260	375	10	22,3	102,9	272,1
422	1740	408	5	22,9	158,7	249,3
430	900	416	5	22,2	165,7	250,3
445	1560	441	5	23,8	180,0	261
455	1200	453	5	23,3	162,0	291
godz. 12.22-14.25 (zawór ssący)						
413	1260	384	10	22,9	85,3	298,7
422	1800	419	5	22,8	151,4	267,6
430	1020	399	5	23,1	141,1	257,9
445	1620	433	5	23,9	169,1	263,9
455	1320	443	5	23,2	154,9	288,1
08.11.2006 godz. 15.09-23.21 (zawór wydechowy)						
460	1800	449	10	18,1	117,0	332
473	1800	466	10	17,8	100,2	365,8
480	1800	477	10	17,2	101,0	376
486	1800	486	10	18,1	112,6	373,4
490	1800	485	10	18,1	110,0	375
496	1800	495	10	18,1	99,7	395,3
501	1800	495	10	18,1	104,0	391
505	1800	500	10	17,8	105,0	395
512	1800	502	10	17,7	101,9	400,1
517	1800	509	10	17,1	89,6	419,4
521	1800	515	10	18,5	96,7	418,3
524	1800	519	10	18,8	95,1	423,9
529	1800	518	10	18,5	95,0	423
531	1800	529	10	18,5	99,9	429,1
535	1800	530	10	18,5	91,1	438,9
(zawór ssący)						
460	1800	452	10	17,8	70,8	381,2
473	1800	462	10	17,8	76,4	385,6
480	1800	473	10	17,8	71,2	401,8
486	1800	479	10	18,1	71,8	407,2
490	1800	489	10	18,3	78,0	411
496	1800	486	10	17,3	69,0	417
501	1800	491	10	17,6	64,4	426,6
505	1800	502	10	17,8	48,7	453,3
512	1800	508	10	18,1	57,1	450,9
517	1800	514	10	17,8	81,4	432,6
521	1800	518	10	18,5	67,2	450,8

524	1800	519	10	17,8	57,4	461,6
529	1800	513	10	17,8	75,6	437,4
531	1800	523	10	18,7	63,2	459,8
535	1800	530	10	19,3	57,9	472,1
09.11.2006 godz. 14.45-16.57 (zawór wydechowy)- AWARIA PIECA						
501	1800	498	10	19,8	89,0	409
507	1800	500	10	19,8	89,0	411
516	1800	506	10	20,0	98,2	407,8
520	1800	515	10	19,7	89,4	425,6
(zawór ssący)						
501	1800	500	10	20,2	78,9	421,1
507	1800	505	10	19,8	77,9	427,1
516	1800	512	10	19,7	66,0	446
520	1800	518	10	19,5	69,0	449
20.11.06 (zawór wydechowy)						
897	480	897	10	21,1	88,3	808,7
927	480	927	10	21,0	68,9	858,1
915	480	915	10	21,0	66,7	848,3
Próbka uległa uszkodzeniu						
(zawór ssący)						
890	480	890	10	18,9	109	781
891	480	891	10	18,7	125	766
892	480	892	10	18,8	115	777
Próbka uległa uszkodzeniu						

VII. Zawór ssący i wydechowy

	dzień	początek	koniec	Ogółem godz.
FAZA I	1	9.00	16.00	7
	2	9.00	16.00	7
	3	9.00	16.00	7
	4	9.00	16.00	7
	5	9.00	16.00	7
	6	9.00	16.00	7
	7	9.00	16.00	7
	8	9.00	16.00	7
	9	9.00	13.00	4
SUMA				60
FAZA II	Ciśnienie sprężarki 0,5 MPa, n=900 obr/min,			
	1	9.00	16.00	7
	2	9.00	16.00	7

	3	9.00	16.00	7
	4	9.00	16.00	7
	5	9.00	16.00	7
	6	9.00	16.00	7
	7	9.00	16.00	7
	8	9.00	16.00	7
	9	9.00	13.00	4
SUMA				60
FAZA III	Ciśnienie sprężarki 0,5 MPa, n=900 obr/min,			
	1	9.00	16.00	7
	2	9.00	16.00	7
	3	9.00	16.00	7
	4	9.00	16.00	7
	5	9.00	16.00	7
	6	9.00	16.00	7
	7	8.00	16.00	8
SUMA				50

PIEC

	Temperatura pieca [°C]	Czas nagrzewania próbki [s]	Temperatura próbki [°C]	Czas chłodzenia [s]	Temperatura H ₂ O [°C]	Temperatura próbki po schłodzeniu [°C]	Szok termiczny ΔT [°C]
FAZA IV	24.10.2006 godz. 14.35-17.38 (zawór wydechowy)						
	400	1320	378	30	22,4	44,6	333,4
	407	1500	386	120	22,4	43,4	342,6
	394	1800	377	120	22,5	31,9	345,1
	405	1200	364	150	22,7	29,9	334,1
	406	1740	373	120	22,8	31,2	341,8
	403	1260	354	120	22,6	38,3	315,7
	godz.14.35-17.35 (zawór ssący)						
	400	1380	373	40	22,4	33,7	339,3
	407	1800	381	120	22,2	29,3	351,7
	394	1620	372	90	22,5	34,9	337,1
	405	1200	359	120	23,1	27,9	331,1
	396	1620	368	120	22,5	30,5	337,5
	403	1320	349	90	22,1	29,6	319,4
	26.10.2006 godz. 14.05-18.31 (zawór wydechowy)						
	427	1500	365	10	21,8	69,5	295,5
	439	1260	433	10	21,5	80,1	352,9

448	1920	440	10	22,1	88,8	351,2
458	1980	454	10	21,7	85,2	368,8
469	1800	459	10	21,5	72,4	386,6
479	1800	471	10	21,4	72,8	398,2
483	1860	480	10	21,1	78,4	401,6
481	1800	477	10	21,6	78,5	398,5
godz.14.05-18.30 (zawór ssący)						
427	1500	362	10	21,4	66,7	295,3
439	1200	430	10	21,9	69,1	360,9
448	2100	437	10	21,7	68,0	369
458	1920	450	10	21,8	64,6	385,4
469	1920	455	10	21,7	62,6	392,4
479	1980	467	10	21,7	80,6	386,4
483	1980	479	10	22,0	76,4	402,6
481	1740	475	10	21,7	74,8	400,2
27.10.2006 godz. 12.22-14-22 (zawór wydechowy)						
413	1260	371	10	22,8	95,9	275,1
422	1740	409	5	23,9	166,3	242,7
430	900	409	5	22,9	159,1	249,9
445	1560	433	5	23,8	180,9	252,1
455	1200	455	5	23,3	162,5	292,5
godz. 12.22-14.25 (zawór ssący)						
413	1260	370	10	23,1	82,4	287,6
422	1800	416	5	22,9	158,0	258
430	1020	389	5	22,9	165,5	223,5
445	1620	443	5	22,9	155,8	287,2
455	1320	450	5	23,2	131,1	318,9
08.11.2006 godz. 15.09-23.21 (zawór wydechowy)						
460	1800	448	10	17,1	89,0	359
473	1800	455	10	17,6	92,2	362,8
480	1800	463	10	17,2	94,0	369
486	1800	469	10	17,4	99,6	369,4
490	1800	477	10	17,6	96,0	381
496	1800	484	10	17,1	91,7	392,3
501	1800	497	10	17,8	99,0	398
505	1800	499	10	17,8	100,0	399
512	1800	502	10	17,7	98,9	403,1
517	1800	505	10	17,1	75,4	429,6
521	1800	519	10	18,0	89,3	429,7

524	1800	521	10	17,4	61,6	459,4
529	1800	525	10	17,6	89,6	435,4
531	1800	529	10	17,1	76,7	452,3
535	1800	533	10	17,8	75,2	457,8
(zawór ssący)						
460	1800	445	10	18,6	80,4	364,6
473	1800	453	10	17,6	76,1	376,9
480	1800	460	10	17,8	78,5	381,5
486	1800	467	10	18,7	66,0	401
490	1800	475	10	19,3	69,2	405,8
496	1800	482	10	17,3	64,4	417,6
501	1800	495	10	18,9	75,9	419,1
505	1800	497	10	19,1	70,4	426,6
512	1800	500	10	18,1	71,7	428,3
517	1800	502	10	18,1	76,8	425,2
521	1800	518	10	18,5	74,4	443,6
524	1800	520	10	18,1	48,9	471,1
529	1800	522	10	18,3	66,1	455,9
531	1800	525	10	18,1	63,2	461,8
535	1800	531	10	18,2	67,1	463,9
09.11.2006 godz. 14.45-16.57 (zawór wydechowy)– AWARIA PIECA						
501	1800	497	10	20,0	88,3	408,7
507	1800	505	10	19,9	89,1	415,9
516	1800	515	10	20,2	94,1	420,9
520	1800	520	10	19,9	84,7	435,3
(zawór ssący)						
501	1800	496	10	19,8	72,6	423,4
507	1800	503	10	19,7	66,9	436,1
516	1800	515	10	19,8	76,9	438,1
520	1800	517	10	19,6	77,4	439,6
20.11.06 (zawór wydechowy)						
897	480	897	10	18,9	60,4	836,6
927	480	927	10	18,7	58,4	868,6
915	480	915	10	18,8	62,9	852,1
920	480	920	10	18,7	78,3	841,7
922	480	922	10	18,9	53,7	868,3
Próbka uległa uszkodzeniu						
(zawór ssący)						
890	480	890	10	19,9	100	790

	891	480	891	10	19,7	118	773
	892	480	892	10	19,9	111	781
	897	480	897	10	19,7	109,6	787,4
	900	480	900	10	19,7	107,1	792,9
Próbka uległa uszkodzeniu							

VIII. Zawór ssący i wydechowy

	dzień	początek	koniec	Ogółem godz.
FAZA I	1	9.00	16.00	7
	2	9.00	16.00	7
	3	9.00	16.00	7
	4	9.00	16.00	7
	5	8.00	16.00	8
	6	8.00	16.00	8
	7	8.00	16.00	8
	8	8.00	16.00	8
SUMA				60
FAZA II	Ciśnienie sprężarki 0,5 MPa, n=900 obr/min,			
	1	9.00	17.00	8
	2	9.00	17.00	8
	3	9.00	17.00	8
	4	9.00	17.00	8
	5	9.00	16.00	7
	6	9.00	16.00	7
	7	9.00	16.00	7
	8	9.00	16.00	7
SUMA				60
FAZA III	Ciśnienie sprężarki 0,5 MPa, n=900 obr/min,			
	1	8.00	16.00	8
	2	8.00	16.00	8
	3	8.00	16.00	8
	4	8.00	16.00	8
	5	8.00	16.00	8
	6	8.00	16.00	8
	7	14.00	16.00	2
SUMA				50

PIEC

	Temperatura pieca [°C]	Czas nagrzewania próbki [s]	Temperatura próbki [°C]	Czas chłodzenia [s]	Temperatura H ₂ O [°C]	Temperatura próbki po schłodzeniu [°C]	Szok termiczny ΔT [°C]
FAZA IV	24.10.2006 godz. 14.35-17.38 (zawór wydechowy)						
	400	1320	355	30	22,5	45,5	309,5
	407	1500	376	120	22,7	35,7	340,3
	394	1800	354	120	22,9	35,7	318,3
	405	1200	336	150	22,5	36,5	299,5
	406	1740	339	120	22,4	30,2	308,8
	403	1260	355	120	22,0	38,0	317
	godz.14.35-17.35 (zawór ssący)						
	400	1380	354	40	23,1	44,3	309,7
	407	1800	374	120	22,4	39,9	334,1
	394	1620	353	90	22,4	29,5	323,5
	405	1200	334	120	22,9	29,9	304,1
	396	1620	337	120	22,2	27,3	309,7
	403	1320	354	90	21,5	28,9	325,1
	26.10.2006 godz. 14.05-18.31 (zawór wydechowy)						
	427	1500	355	10	21,9	109,9	245,1
	439	1260	420	10	21,7	95,2	324,8
	448	1920	442	10	21,8	79,4	362,6
	458	1980	454	10	22,1	77,5	376,5
	469	1800	467	10	22,0	75,8	391,2
	479	1800	478	10	21,7	78,8	399,2
	483	1860	479	10	21,8	69,8	409,2
	481	1800	480	10	21,5	79,1	400,9
	godz.14.05-18.30 (zawór ssący)						
	427	1500	345	10	21,1	79,6	265,4
	439	1200	417	10	21,6	76,9	340,1
	448	2100	437	10	21,4	65,7	371,3
	458	1920	448	10	21,7	64,6	383,4
	469	1920	465	10	21,7	66,6	398,4
	479	1980	473	10	21,7	69,9	403,1
	483	1980	475	10	21,4	68,5	406,5
	481	1740	478	10	21,5	64,8	413,2
	27.10.2006 godz. 12.22-14-22 (zawór wydechowy)						
413	1260	374	10	23,9	109,9	264,1	

422	1740	411	5	23,7	177,9	233,1
430	900	425	5	23,9	166,9	258,1
445	1560	440	5	23,8	149,9	290,1
455	1200	452	5	23,3	164,7	287,3
godz. 12.22-14.25 (zawór ssący)						
413	1260	371	10	23,1	94,9	276,1
422	1800	410	5	22,9	145,4	264,6
430	1020	423	5	22,8	129,1	293,9
445	1620	435	5	23,9	158,9	276,1
455	1320	450	5	23,2	157,4	292,6
08.11.2006 godz. 15.09-23.21 (zawór wydechowy)						
460	1800	450	10	18,1	125,9	324,1
473	1800	461	10	18,5	102,2	358,8
480	1800	469	10	18,3	101,9	367,1
486	1800	475	10	18,0	109,6	365,4
490	1800	485	10	18,6	110,9	374,1
496	1800	490	10	18,2	99,1	390,9
501	1800	497	10	18,8	102,4	394,6
505	1800	501	10	18,0	102,6	398,4
512	1800	509	10	18,1	107,1	401,9
517	1800	515	10	18,1	99,3	415,7
521	1800	519	10	18,5	88,7	430,3
524	1800	521	10	18,8	91,2	429,8
529	1800	528	10	19,3	89,1	438,9
531	1800	529	10	19,3	99,3	429,7
535	1800	534	10	19,2	88,9	445,1
(zawór ssący)						
460	1800	449	10	18,8	79,4	369,6
473	1800	458	10	17,8	78,4	379,6
480	1800	465	10	17,8	78,9	386,1
486	1800	474	10	18,1	74,0	400
490	1800	483	10	18,5	77,2	405,8
496	1800	486	10	18,9	67,4	418,6
501	1800	494	10	17,6	65,6	428,4
505	1800	498	10	19,1	70,0	428
512	1800	505	10	18,7	69,2	435,8
517	1800	512	10	19,3	65,6	446,4
521	1800	517	10	17,8	63,2	453,8
524	1800	519	10	18,1	64,4	454,6

529	1800	525	10	18,1	57,1	467,9
531	1800	528	10	18,3	68,5	459,5
535	1800	532	10	17,3	57,9	474,1
09.11.2006 godz. 14.45-16.57 (zawór wydechowy)- AWARIA PIECA						
501	1800	489	10	19,6	99,5	389,5
507	1800	498	10	19,7	89,9	408,1
516	1800	506	10	19,2	88,2	417,8
520	1800	514	10	19,8	83,9	430,1
(zawór ssący)						
501	1800	485	10	19,0	75,2	409,8
507	1800	495	10	19,1	73,4	421,6
516	1800	501	10	19,5	76,2	424,8
520	1800	510	10	19,8	73,9	436,1
20.11.06 (zawór wydechowy)						
897	480	897	10	18,6	79,5	817,5
927	480	927	10	18,9	59,1	867,9
Próbka uległa uszkodzeniu						
(zawór ssący)						
890	480	890	10	17,4	98	792
891	480	891	10	17,7	99	792
Próbka uległa uszkodzeniu						

Załącznik Nr 2

ANKIETA DLA EKSPERTÓW

1. Staż pracy
2. Dziedzina badawcza
3. Stanowisko / tytuł
4. Znajomość zagadnień związanych z powłokami ceramicznymi

Zakreślić odpowiednie

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

5. Czy zawór ssący i wydechowy reagują w ten sam sposób na oddziaływanie wysokich temperatur?

TAK

NIE

6. Jak duży szok termiczny może wywołać zniszczenie powłoki ceramicznej? (0÷800⁰C)
7. Jaki stan powłoki ceramicznej można przyjąć za niezdatny do dalszej eksploatacji?

Zakreślić odpowiednie

Rysa pęknięcie przebarwienie siatka pęknięć oderwanie powłoki

I. Jeżeli ΔT zawiera się w przedziale (.....) i t zawiera się w przedziale (.....) i T_{nagrz} zawiera się w przedziale (.....) wtedy element jest uszkodzony na%

II. Jeżeli ΔT zawiera się w przedziale (.....) i t zawiera się w przedziale (.....) i T_{nagrz} zawiera się w przedziale (.....) wtedy element jest uszkodzony na%

III. Jeżeli ΔT zawiera się w przedziale (.....) i t zawiera się w przedziale (.....) i T_{nagrz} zawiera się w przedziale (.....) wtedy element jest uszkodzony na%

IV. Jeżeli ΔT zawiera się w przedziale (.....) i t zawiera się w przedziale (.....) i T_{nagrz} zawiera się w przedziale (.....) wtedy element jest uszkodzony na%

V. Jeżeli ΔT zawiera się w przedziale (.....) i t zawiera się w przedziale (.....) i T_{nagrz} zawiera się w przedziale (.....) wtedy element jest uszkodzony na%

VI. Jeżeli ΔT zawiera się w przedziale (.....) i t zawiera się w przedziale (.....) i T_{nagrz} zawiera się w przedziale (.....) wtedy element jest uszkodzony na%

VII. Jeżeli ΔT zawiera się w przedziale (.....) i t zawiera się w przedziale (.....) i T_{nagrz} zawiera się w przedziale (.....) wtedy element jest uszkodzony na%

VIII. Jeżeli ΔT zawiera się w przedziale (.....) i t zawiera się w przedziale (.....) i T_{nagrz} zawiera się w przedziale (.....) wtedy element jest uszkodzony na%

IX. Jeżeli ΔT zawiera się w przedziale (.....) i t zawiera się w przedziale (.....) i T_{nagrz} zawiera się w przedziale (.....) wtedy element jest uszkodzony na%

13. Który z powyższych przedziałów temperatury nagrzewania jest najbardziej szkodliwy dla powłoki ceramicznej?

I II III

14. Czy zaobserwowane przebarwienia na powłoce ceramicznej sugerują możliwość uszkodzenia powłoki w powyższych miejscach?

TAK NIE

15. Na podstawie wyników pomiarów określić wysokość szoku termicznego jak wpłynęła na uszkodzenie powłoki ceramicznej.

16. Czy np. 5 krotnie większy szok termiczny w eksperymencie daje nam proporcjonalne odniesienie do rzeczywistej pracy elementu w silniku spalinowym?

TAK NIE

17. Czy zawór ssący z powłoką ceramiczną jest bardziej wytrzymały od zaworu wydechowego z powłoką ceramiczną na oddziaływanie wysoką temperaturą?

TAK NIE

18. Jaki czas chłodzenia elementu wpływa na powłokę ceramiczną niszcząco?

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10[s]

19. Jaki czas nagrzewania elementu wpływa na powłokę ceramiczną niszcząco?

0 10 20 30 40[min]

20. Jaki zastosowany w eksperymencie czynnik nagrzewania elementu ma bardziej niekorzystny wpływ na trwałość powłoki ceramicznej?

Palnik gazowy palnik benzynowy piec

Przedziały

ΔT – przedział I (.....,.....)

T_{nagrz}	<i>Przedział I</i>	Przedział II	Przedział III
t	(.....;.....)	(.....;.....)	(.....;.....)
Przedział I (.....;.....)			
Przedział II (.....;.....)			
Przedział III (.....;.....)			

ΔT – przedział II (.....)

T_{nagrz}	<i>Przedział I</i>	Przedział II	Przedział III
t	(.....;.....)	(.....;.....)	(.....;.....)
Przedział I (.....;.....)			
Przedział II (.....;.....)			
Przedział III (.....;.....)			

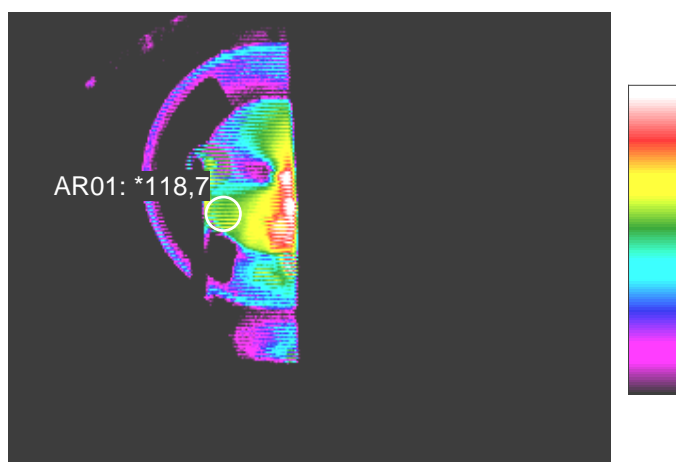
ΔT – przedział III (.....)

T_{nagrz}	<i>Przedział I</i>	Przedział II	Przedział III
t	(.....;.....)	(.....;.....)	(.....;.....)
Przedział I (.....;.....)			
Przedział II (.....;.....)			
Przedział III (.....;.....)			

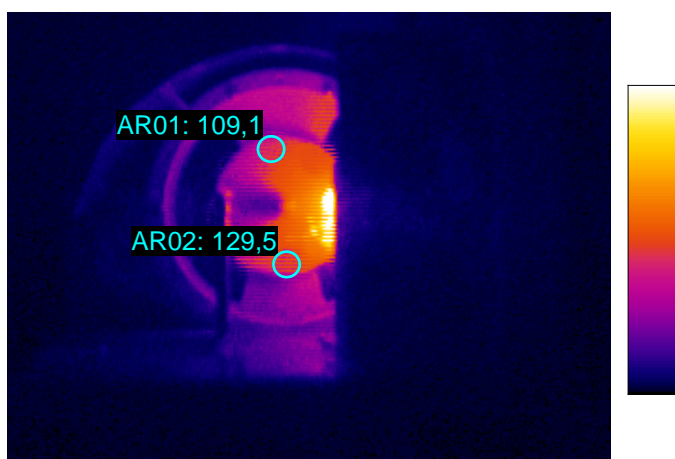
Załącznik nr 3

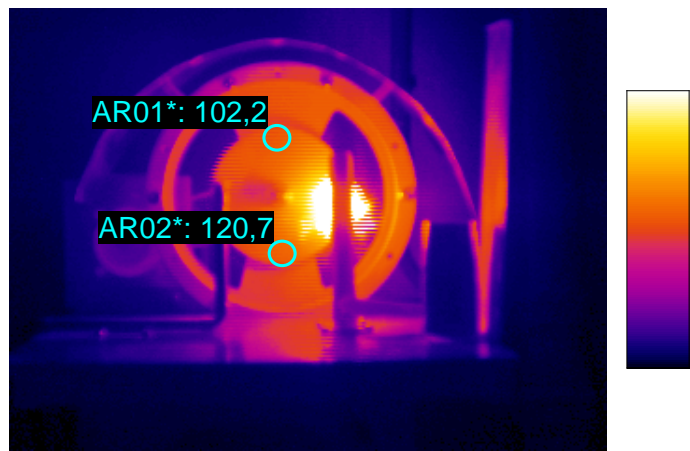
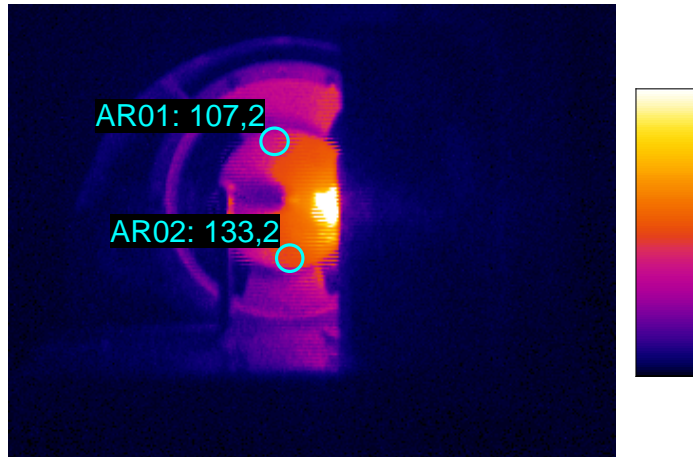
Zarejestrowana temperatura kamerą termowizyjną w Fазie II

Wyłączone chłodzenie elementów

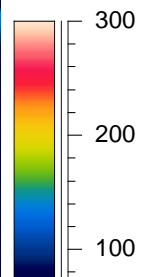
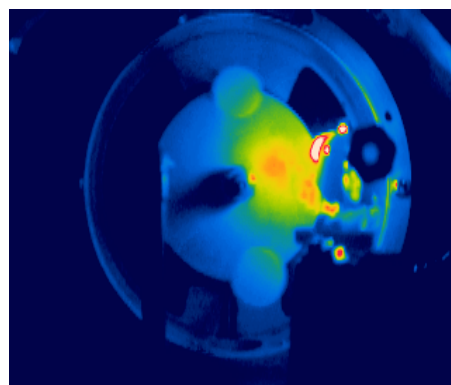
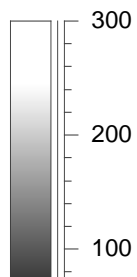
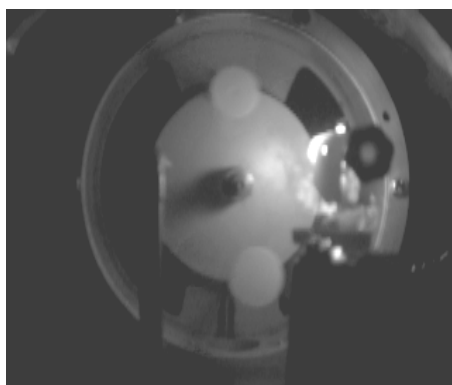


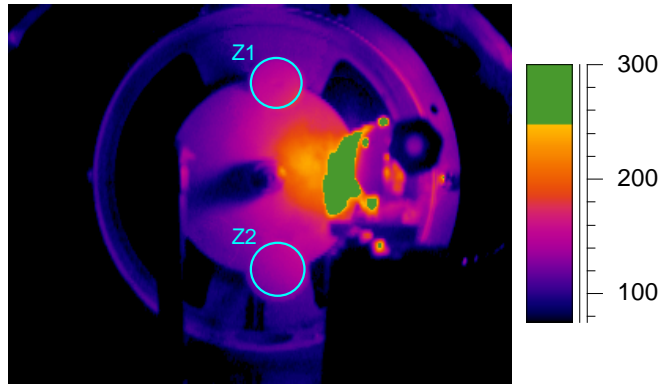
Włączone chłodzenie elementów





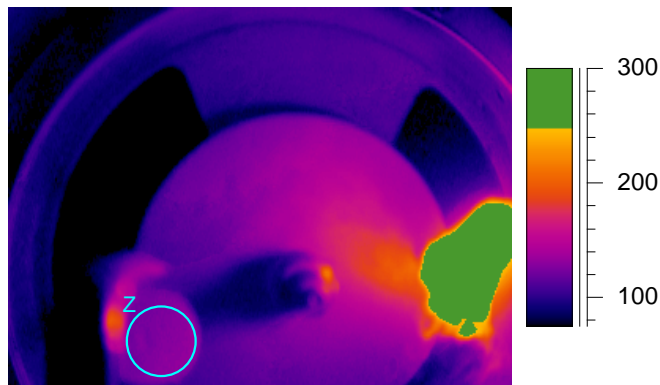
Zarejestrowana temperatura kamerą termowizyjną w Fазie III





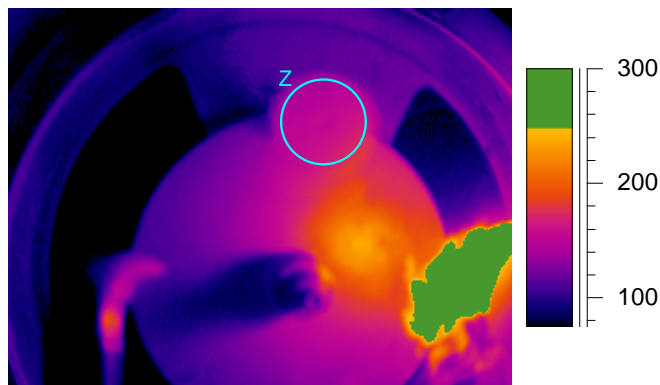
Analysis

Label	Min	Max	Max - Min	Avg	Stdev
Z1	123,1	180,4	57,3	154,6	11,7
Z2	117,1	158,9	41,8	136,8	9,6



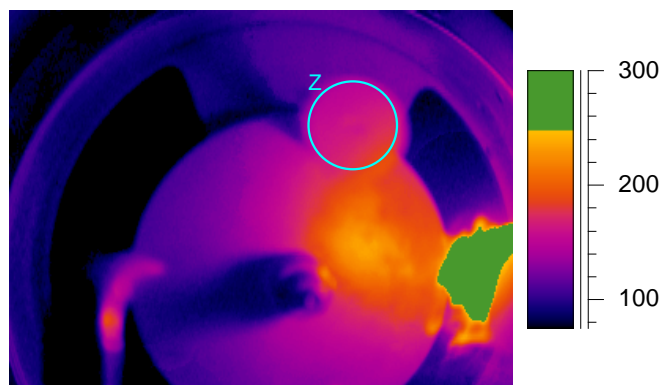
Analysis

Label	Min	Max	Max - Min	Avg	Stdev
Z	119,2	139,2	20,0	127,9	3,5



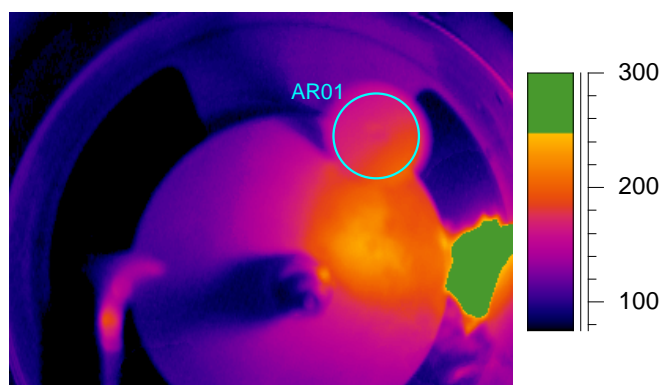
Analysis

Label	Min	Max	Max - Min	Avg	Stdev
Z	139,2	176,7	37,6	155,4	8,4



Analysis

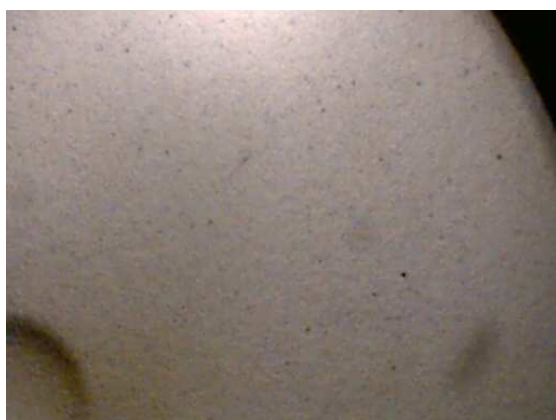
Label	Min	Max	Max - Min	Avg	Stdev
Z	142,2	191,1	48,9	164,9	10,5



Analysis

Label	Min	Max	Max - Min	Avg	Stdev
AR01	156,3	204,9	48,6	176,8	11,5

Obrazy z obserwacji mikroskopowych - stan powłoki ceramicznej



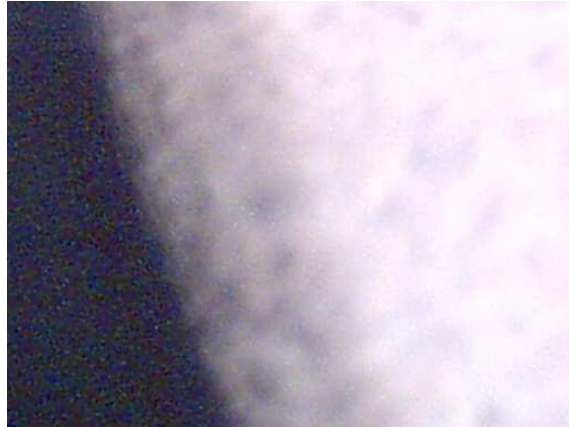


Widok powłoki ceramicznej zaworu ssącego przy powiększeniu x10

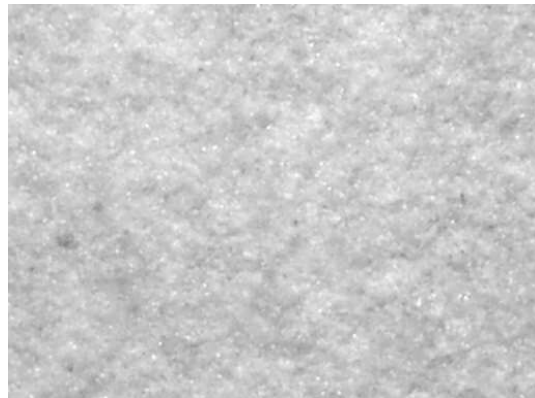


Widok powłoki ceramicznej zaworu wydechowego przy powiększeniu x10





Widok powłoki ceramicznej zaworu ssącego przy powiększeniu x60

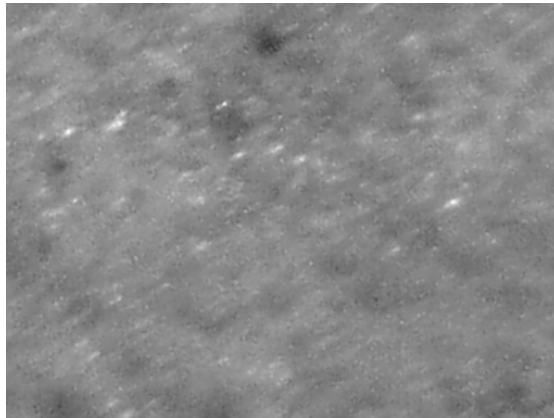


Widok powłoki ceramicznej zaworu wydechowego przy powiększeniu x60





Widok powłoki ceramicznej zaworu ssącego przy powiększeniu x200



Widok powłoki ceramicznej zaworu wydechowego przy powiększeniu x200