THE VALIDATION METHODS OF DURABILITY OF CERAMIC COATING UNDER LABORATORY CONDITIONS

Katarzyna Topolska, Wojciech Walkowiak

Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny
Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn
Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
e-mail: katarzyna.topolska@pwr.wroc.pl, wojciech.walkowiak@pwr.wroc.pl
tel./ fax: +48 71 3477918

Mariusz Topolski

Politechnika Wrocławska, Wydział Elektroniki
Katedra Systemów i Sieci Komputerowych
Wyb. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
e-mail: mariusz.topolski@pwr.wroc.pl.pl

Abstract

The difference between ceramic materials and metals is in their mechanical and physical properties. Prevalence of metals and knowledge about their properties cause their universal usage in many areas of human life. Therefore the authors decide to present properties of technical ceramic materials using on mechanical components. The ceramic materials are expanding with increasing of temperature because of changing average interatomic spaces (which is relevant with thermal moves of atoms). During selection of materials working under unsteady state of heat transfer it is suggested to select materials which are characterize by better thermal shock resistance (i.e. low coefficient of thermal expansion, high brittle fracture resistance, and high thermal conductivity). Very important is also corrosion resistance of ceramic coating because if it is low it would cause separation of ceramic coating from mechanical component. This paper is focused on description of thermal shocks which appear during machines run and on methods of their investigation. In frame of the research work the authors construct a test bench to simulate fatigue research of ceramic coatings (applied on valve heads or material samples). The main aim of the researches was observation and investigation of phenomena on surface of engine valve putting on variation and cyclic operations of temperature.

Keywords: *combustion engines, combustion processes, modelling, ceramic coating, durability*

METODY OCENY TRWAŁOŚCI POWŁOKI CERAMICZNEJ W WARUNKACH LABORATORYJNYCH

Streszczenie

Materiały ceramiczne i metale stanowią dwie grupy materiałów, różniące się od siebie tym, że każda z nich ma odmienne właściwości, głównie mechaniczne i fizyczne. Ze względu na ogólną dostępność i dające się przewidzieć własności metali ich zastosowanie jest jeszcze zdecydowanie powszechniejsze. Dlatego zdecydowano się na przedstawienie w pracy własności ceramicznych materiałów technicznych stosowanych na elementach mechanicznych. Materiały ceramiczne rozszerzają się wraz ze wzrostem temperatury. Spowodowane jest to zmianą średnich międzyatomowych przestrzeni, co jest rezultatem termicznego ruchu atomów. 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. Bardzo ważna jest również odporność korozyjna powłok ceramicznych. Mała jej odporność powoduje odspajanie powłoki ceramicznej od elementu mechanicznego. W pracy skoncentrowano się na omówieniu szoków termicznych jakie występują podczas pracy maszyn jak i na sposobach badania szoków termicznych. 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.

Słowa kluczowe*: silniki spalinowe, procesy spalania, modelowanie, powłoka ceramiczna, trwałość*

1. Wstęp

Materiały ceramiczne posiadają szerokie zastosowanie w prawie wszystkich dziedzinach gospodarki. Najlepszymi powłokami ceramicznymi, pracującymi w wysokich temperaturach są materiały, posiadające wiązania kowalencyjne – są nimi np. Si_3N_4, SiC, Al_2O_3, ZrO_2. Materiały te wykazują dużą odporność na pełzanie i małą rozszerzalność oraz duże przewodnictwo cieplne. Stosowanie powłok ceramicznych w silnikach spalinowych przyczynia się do podwyższenia ich sprawności, redukcji spalania oraz korzystnie wpływa na ekologię poprzez zmniejszenie toksyczności spalin.

Jednakże ocena trwałości obiektu mechanicznego z naniesionymi powłokami ceramicznymi w warunkach laboratoryjnych przy subiektywnym jej wyznaczaniu może okazać się nieprecyzyjna, niepełna. Rozpatrując ją w kategoriach czysto probabilistycznych może okazać się, że oszacowanie prawdopodobieństw warunkowych wystąpienia pewnej zmiennej pod warunkiem zaistnienia grupy zmiennych może okazać się nie możliwe. Może być to przyczyną niepełnej specyfikacji informacji. Uszkodzenia danego fragmentu konstrukcji mechanicznej mają charakter nagły, zużyciowy lub starzeniowy, a zagadnienia naprawialności nie są brane pod uwagę [3].

Podstawową wadą metod niezawodności są:

- przyjęcie uproszczeń opisu danych towarzyszących obiektom mechanicznym,
- brak informacji o tych obiektach.

Przy zaworach z powłokami ceramicznymi, możemy przyjąć, że niepewnymi wielkościami opisującymi konstrukcję zaworu są: wytrzymałość zmęczeniowa, zużycie graniczne oraz wymiar krytyczny pęknięcia (zmienne podstawowe). Czynnikami zewnętrznymi (kontekstowymi) wpływającymi na zmienne podstawowe może być oddziaływanie temperatury na element, czas eksploatacji jak i prędkość obrotowa wału z zamocowanym zaworem na stanowisku badawczym. Zdjęcie budowy stanowiska badawczego znajduje się na rys. 1.

Rys. 1. Stanowisko badawcze

Fig. 1. Test bench

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 stosuję 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
- wzrost temperatury próbki, który mierzony jest termoparą umieszczoną na pewnej głębokości pod powłoką
- wystąpienie określonego układu pęknięć lub też ilości pęknięć

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

3. Metody oceny trwałości elementów mechanicznych

3.1. Metody probabilistyczne

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

3.2. Teoria możliwości – possibility

Teoria możliwości wyraża nieprecyzyjność świata w języku naturalnym. Jest wyrażeniem raczej "możliwości" niż prawdopodobieństwa.

- Rozkład możliwości

Dany jest zbiór rozmyty na U z funkcją $m_{F\sim}(u)$.

Rozkład możliwości $p_X(u)$ jest definiowany jako $m_{F\sim}(u)$.

X – mała liczba naturalna.

$F\sim=\{(1,1), (2,1), (3, 0.8), (4, 0.6), (5, 0.4), (6, 0.2)\}$.

$p_X = F\sim$.

(3, 0.8) oznacza, że możliwość, że X wynosi 3 jest równa 0.8.

- Specyficzność teorii możliwości

Specyficzność podaje miarę ilości informacji zawartej w zbiorze rozmytym lub rozkładzie możliwości.

Definicja:

Niech A będzie podzbiorem rozmytym skończonego zbioru X. Miarą specyficzności A – Sp(A) jest wartość leżąca w przedziale jednostkowym, która ma następujące właściwości:

a). Sp(A)=1 wtedy i tylko wtedy, gdy istnieje jedno i tylko jedno x*ÎX, dla którego A(x*)=1 i A(x)=0 dla pozostałych x. *(specyficzność największa tylko gdy A jest nierozmytym punktem)*

b). Jeżeli A(x)=0 dla każdego x, to Sp(A)=0

c). Jeżeli A_1 i A_2 są normalnymi zbiorami rozmytymi oraz $A_1(x)>=A_2(x)$ dla każdego x, to $Sp(A_1)<=Sp(A_2)$ *(dowolny wzrost możliwości kilku elementów zmniejsza specyficzność zbioru rozmytego)*

d). Jeżeli A_1 A_2 są normalne i nierozmyte takie, że $card(A_1)<=card(A_2)$, to zawsze $Sp(A_1)>=Sp(A_2)$.

3.3. Teoria zbiorów rozmytych

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 **X**, co zapisujemy jako A **X**, nazywamy zbiór par
gdzie:

$$\mu_A : \mathbf{X} \rightarrow [0,1] \qquad \mathrm{A} = \{(x, \mu_A(x)); x \in \mathbf{X}\}$$

jest funkcją przynależności zbioru rozmytego A. Funkcja ta każdemu elementowi *x* **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* A,

$\mu_A(x) = 0$ oznacza brak przynależności elementu *x* do zbioru rozmytego A, tzn. *x* 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** = $\{x_1, ..., x_n\}$:Liczby rozmyte charakteryzują się brakiem liczby rozmytej przeciwnej i odwrotnej

$$\mathrm{A} = \frac{\mu_A(x_1)}{x_1} + \cdots + \frac{\mu_A(x_n)}{x_n} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\mu_A(x_i)}{x_i}$$

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

$$\mathrm{A} = \int_X \frac{\mu_A(x)}{x}$$

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*”.

3.4. Metoda Monte Carlo

Metody Monte Carlo (MC) można zdefiniować jako dowolną technikę wykorzystująca liczby losowe do rozwiązania problemu.

Natomiast w 1970 definicja zapisana przez Haltona brzmi:

- metoda Monte Carlo jest to metoda reprezentująca rozwiązanie problemu w postaci parametru pewnej hipotetycznej populacji i używająca sekwencji liczb losowych do skonstruowania próbki losowej danej populacji, z której można otrzymać statystyczne oszacowania tego parametru.

To czy metody MC mogą lub nie mogą być zastosowane do danego problemu nie zależy od stochastycznej natury układu, który jest badany, a jedynie od naszej zdolności do sformułowania problemu w taki sposób, aby liczby losowe mogły być użyte do jego rozwiązania.

Problem do rozważania może być natury probabilistycznej lub statystycznej, w którym to przypadku jego rozwiązanie MC będzie bezpośrednia symulacja, ale może też być natury deterministycznej lub analitycznej, w którym to przypadku odpowiednie sformułowanie MC może wymagać pewnej wyobraźni, a czasem nawet wydawać się sztuczne i nienaturalne. Stosowalność wybranej metody będzie zależeć od jej matematycznych własności, a nie od jej powierzchownego podobieństwa do rozwiązywanego problemu.

3.5. Modele Markowa

Modele Markowa 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 $\mathbf{X}_n$ są zależne od poprzednich stanów $X_{n-k,}$ $0<k<n$.

Rozróżniamy:

- łańcuchy Markowa – ciąg zmiennych losowych X_0, X_1, ... , który określony jest na wspólnej przestrzeni probabilistycznej i przyjmuje wartości nieujemni 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.

3.6. Metoda Dempstera – Shafera

Teoria Dempstera-Shafera, zwana inaczej teorią ewidencji matematycznej, czy też teorią funkcji przekonania. Możliwe obszary zastosowania powyższej teorii obejmują:

- integracja informacji pochodzących z różnych źródeł przy identyfikacji obiektu [deKorvin et al.,1993],
- modelowania 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].

Przytoczmy jeszcze kilka podstawowych pojęć z powyższej teorii.

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

$$\theta = \theta_1 \times \theta_2 \times \theta_3 \times \ldots \times \theta_n \,. \tag{1}$$

Zmienna A - przyjmuje wartości ze zbioru θ

Definicja 1. Przez funkcję masy w sensie teorii DS rozumie się funkcję m:2^{ θ }→[0,1] spełniającą warunki:

$$\sum_{A \in 2^{\theta}} m(A) = 1 \,, \tag{2}$$

$$\mathrm{m}(\phi) = 0 \,, \tag{3}$$

$$\forall_{A \in 2^{\theta}} m(A) \geq 0 \quad . \tag{4}$$

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

W teorii DS operuje się także pojęciem:

Definicja 2 Przez funkcję przekonania w sensie teorii DS rozumie się taką funkcję Bel:2^{ θ }→[0,1], że

$$\mathrm{Bel(A)} = \sum_{B \in A} m(B) = 1 \,, \tag{5}$$

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

Definicja 3 Przez funkcję domniemania w sensie teorii DS rozumie się funkcję Pl:2^{ θ }→[0,1],

$$\mathrm{Pl(A)} = \sum_{B; B \cap A \neq \phi} m(B) = 1 \tag{6}$$

Definicja 4 Rozpatrując dwa rozkłady m1 i m2, można dokonać ich połączenia, otrzymując nowy rozkład bazowy m według reguły

$$\mathrm{m(C)} = \frac{\sum_{A \cap B = C} m1(A) \cdot m2(B)}{\sum_{A \cap B \neq \phi} m1(A) \cdot m2(B)} \quad . \tag{7}$$

4. Przedstawienie wybranego modelu

Ponieważ w badanym przypadku powłok ceramicznych element uszkodzony nie będzie podlegał naprawie, więc gotowość obiektu, prawdopodobieństwo gotowości (jeżeli obiekt nie jest naprawiany) jest definiowane [3] jako:

$$K_g(t) = R(t) \,. \tag{8}$$

W naszym przypadku po okresie pracy urządzenia Δt poddajemy subiektywnej ocenie procentowe uszkodzenie elementu pokrytego powłoką ceramiczną. Zaleca się w celu dokładniejszej analizy, aby analiza była dokonywana co najmniej przez dwóch ekspertów (są to informacje niezależne). Przyjmijmy, zatem następującą postać nieuszkadzalności:

$$\begin{aligned} R_{k,PP}^{KT} &= R_k^{KT}(t,,TP,\omega) = Bel_k^{KT}\{A(t,TP,\omega; \;\; 0 \leq \tau < t)\}, \\ R_{k,PW}^{KT} &= R_k^{KT}(L,S) = Bel_k^{KT}\{A(L,S; \;\; 0 \leq \tau < t)\}, \\ R_k^{KT} &= Bel_k^{KT}\{A(t,TP,\omega)\} \otimes \{A(L,S)\}, \end{aligned} \tag{9}$$

gdzie:

t – czas eksploatacji części konstrukcyjnej ,

L – głębokość pęknięcia,

$S = \left[S_u, S_p\right]^T$ - wektor wytrzymałości,

S_u - wielkość pęknięcia,

S_p - zużycie powłoki ceramicznej,
TP – temperatura zaworu w trakcie badań,
ω - prędkość obrotowa [obr/min] tarczy z zaworami,
k – kolejny etap badania,
PP – parametry pracy,
PW – parametry wytrzymałości,
$\otimes$- suma ortogonalna.

Ocena każdego eksperta o wartości nieuszkadzalności będzie wyznaczana na podstawie reguł:
Reguła eksperta:
JEŻELI obiekt pracował w danym przedziale czasu Δt^n
i wystąpiły w tym czasie wartości parametrów pracy TP, ω oraz parametry wytrzymałości L, S
TO obiekt jest nieuszkodzony

$$A(\{L, S\} \otimes \{\omega, t, TP\}) \tag{10}$$

ze średnią wartością funkcji alokacji prawdopodobieństwa $m_{ij}(\{L_j, S_j\})$ i $m_{ij}(\{TP_j, \omega_j, t_j\})$
gdzie:
i – ilość prób
j – ilość ekspertów
Tak otrzymane reguły funkcji masy od n-ekspertów łączymy za pomocą reguły kombinacji Dempstera (2.7). Następnie łatwo można wyznaczyć wartość funkcji przekonania (2.3), która w kontekście tak postawionego zadania będzie miała postać:

$$Bel_k^{KT}\{A_{j_1\dots j_n}^{KT}(t, TP, \omega)\} \otimes \{A_{j_1\dots j_n}^{KT}(L, S)\} = m_{j_1\dots j_n}^{KT}\{A_{j_1\dots j_n}^{KT}(t, TP, \omega)\} \otimes \{A_{j_1\dots j_n}^{KT}(L, S)\}, \tag{11}$$

gdzie:
$m_{j_1\dots j_n}^{KT}\{A_{j_1\dots j_n}^{KT}(t, TP, \omega)\} \otimes \{A_{j_1\dots j_n}^{KT}(L, S)\}$ - jest funkcją masy złożoną z niezależnych rozkładów wyznaczonych przez ekspertów.

Zwróćmy uwagę na fakt, że wszystkie wartości parametrów w zadanych odstępach czasowych są mierzone, obliczane i zapamiętywane.

5. Podsumowanie

W pracy przedstawiono metody ocen jakie mogą być stosowane w ocenie elementów mechanicznych i wybrany model oceny uszkadzalności powłok ceramicznych w silniku spalinowym. Model ten na podstawie opinii ekspertów o stanie powłoki w danym czasie eksploatacji daje w wyniku wartość przekonania o dalszej użyteczności zaworu. Jeżeli ustalimy, że zawór nie nadaje się do dalszej eksploatacji przyjmujemy wartość przekonania Bel jako graniczną dla zadanego przedziału czasu eksploatacji. W rezultacie tak postawionego problemu otrzymać możemy rozkład bazowy np. funkcji przekonania od czasu eksploatacji. Uzyskamy rozkład funkcji przekonania, który będzie dokładniej odzwierciedlał bazowy rozkład przekonania oraz graniczną wartość użyteczności obiektu w zadanych warunkach eksploatacyjnych np. w dziedzinie czasu.

Literatura:

[1] Bacchus, F., *A logic for representing and reasoning with statistical knowledge*, Computer Intelligence 6 1990, 209-231.

[2] Bobrowski, D., *Probabilistyka w zastosowaniach technicznych*, WNT , 69-147, 496-507. Warszawa 1986.
[3] 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: 6, 67-81, 1992.
[4] Nowakowski, T., *Metodyka prognozowania i niezawodności obiektów mechanicznych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1999.
[5] Matuszewski, A., Kłopotek, M.A., *What Does a Belief Function Believe In?* Prace IPI PAN 758/94, 1994.
[6] Wang, A., *A Defect in Dempster-Shafer Theory*. Proc. Conf. Incertainty in Artificial Intelligence, UA196, URL=ftp://cogsci.indiana.edu/pub/wang.dempster.ps.
[7] Wieczorkowski, R., Zieliński, R., *Komputerowe generatory liczb losowych*. Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa 1997.
[8] Wierzchoń, S., *Metody reprezentacji i przetwarzania informacji niepewnej w ramach teorii Dempstera-Shafera*, Instytut Podstaw Informatyki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa 1996.