

## THE DURABILITY OF CERAMIC COATINGS UNDER COMBUSTION ENGINE CONDITIONS

Katarzyna Topolska, Wojciech Walkowiak

Politechnika Wroclawska, Wydział Mechaniczny,  
Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn,  
e-mail katarzyna.topolska@pwr.wroc.pl, e-mail: wojciech.walkowiak@pwr.wroc.pl  
tel/ fax +48 71 3477918

### Abstract

The present work summaries properties and use of ceramic coatings. The main problem of durability of ceramics coating use in combustion engines is putting low thermal fatigue. Therefore in this paper physical properties of selected ceramic coatings are shown and the methods of fitting of ceramic coating on the engine elements are studied. The paper presents also the methods of ceramic coatings testing (techniques of surface geometry observation, techniques of chemical composition determination, techniques of coatings structure investigation, techniques of mechanical properties determination) and aspect of operation of top layer because in operation process the surface layer of construction and parts of machines is used without standard friction contact. The surface is destruct by exploitation materials, products of combustion, formed or converted materials, interaction of corrosive or erosive environment. The aspect of corrosion, coatings cracking and adhesion influence on life cycle of ceramic coating under combustion engine conditions is also investigated.

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

## TRWAŁOŚĆ POWŁOK CERAMICZNYCH W WARUNKACH PRACY SILNIKA SPALINOWEGO

### Streszczenie

W pracy zostaną omówione powłoki ceramiczne i ich zastosowanie. W przypadku stosowania powłok ceramicznych w silnikach spalinowych podstawowym problemem ograniczającym trwałość powłoki jest mała odporność na zmęczenie cieplne, dlatego też zostaną omówione właściwości fizyczne wybranych powłok ceramicznych jakie są stosowane w silnikach spalinowych. Przedstawione zostaną metody nanoszenia powłok na elementy silnika spalinowego jaki i metody jakimi bada się owe powłoki (techniki obserwacji geometrii powierzchni, techniki określania składu chemicznego, techniki badania struktury powłok, wyznaczanie właściwości mechanicznych powłok). Zwrócono również uwagę na eksploatację warstwy wierzchniej, gdzie w procesie eksploatacyjnym zużywanie warstw wierzchnich konstrukcji i części maszyn w wielu przypadkach przebiega bez zaistnienia klasycznego styku ciernego. Zużywana powierzchnia poddawana jest niszczącemu działaniu materiałów eksploatacyjnych, produktów spalania, formowanych lub przetwarzanych tworzyw, korozyjnemu lub erozyjnemu oddziaływaniu otoczenia. Zwrócono również uwagę na korozję i pękanie powłok ceramicznych oraz wpływ przyczepności na trwałość powłoki ceramicznej w warunkach pracy silnika spalinowego.

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

### 1. Wprowadzenie

W rozważaniach nad inżynierią i eksploatacją warstw wierzchnich podstawowym problemem jest wyodrębnienie i zdefiniowanie obszaru przypowierzchniowego części maszyn, szczególnie

narażonego na zużycie eksploatacyjne oraz określeniem najbardziej prawdopodobnego mechanizmu jego przebiegu. Z tego punktu widzenia eksploatacyjną warstwę wierzchnią można zdefiniować jako pewną część materiału ograniczoną z jednej strony jego powierzchnią zewnętrzną, z drugiej strony umowną powierzchnią wewnętrzną materiału, która określa obszar oddziaływania wymuszeń zewnętrznych, stanowiących przyczyny zużycia eksploatacyjnego[6].

Technologiczną warstwę wierzchnią definiuje się natomiast jako przypowierzchniową strefę materiału, w której za pomocą zabiegów lub procesów technologicznych w sposób świadomy modyfikowana jest struktura w taki sposób, aby przeciwdziałać niekorzystnym zjawiskom, które mogą występować w eksploatacyjnej warstwie wierzchniej[6].

Każdy materiał posiada specyficzne właściwości charakterystyczne dla swojej grupy. Tworzywa ceramiczne są materiałami twardymi, ale jednocześnie kruchymi. Wszystkie cechy materiałowe w powłokach ceramicznych można podzielić na korzystne i niekorzystne właściwości materiału.

Z punktu widzenia zastosowań w silnikach spalinowych (i nie tylko) korzystne właściwości powłok ceramicznych, to:

- duża twardość,
- mała gęstość,
- odporność na ściskanie,
- odporność na wysokie temperatur,
- izolacja termiczna,
- niewrażliwość na działanie środowiska zewnętrznego (np. korozyjnego),

Natomiast niekorzystne cechy materiałów ceramicznych to:

- kruchość,
- niska plastyczność,
- wrażliwość na szoki termiczne,
- skomplikowane procesy technologiczne,

W przypadku stosowania powłok ceramicznych w silnikach spalinowych podstawowym problemem ograniczającym trwałość powłoki jest mała odporność na zmęczenie cieplne.

## 2. Eksploatacja warstwy wierzchniej

W procesie eksploatacyjnym zużywanie warstw wierzchnich konstrukcji i części maszyn w wielu przypadkach przebiega bez zaistnienia klasycznego styku ciernego. Zużywana powierzchnia poddawana jest niszczącemu działaniu materiałów eksploatacyjnych, produktów spalania, formowanych lub przetwarzanych tworzyw, korozyjnemu lub erozyjnemu oddziaływaniu otoczenia. Skuteczna ochrona części maszyn które podlegają zużyciu erozyjnemu jest problemem trudnym do rozwiązania. W wyniku dynamicznego uderzenia w powierzchnię przedmiotu strugi płynu w warstwie wierzchniej mogą zachodzić pośrednie i bezpośrednie procesy zużywania materiału[8]:

- brzdowanie i umacnianie zgniotowe materiałów plastycznych,
- mikroskrwanie twardymi cząstkami,
- pękanie i wykruszenie materiałów kruchych w mikroobszarach,
- tworzenie adhezyjnych połączeń cząstek z atakowaną powierzchnią i ich zrywanie,
- zużywanie o charakterze zmęczeniowym,
- transport ciepła do powierzchni, generowanie na niej dodatkowych impulsów cieplnych i gradientów temperatury,
- oddziaływanie chemiczne i elektrochemiczne,

Zmęczenie cieplne z reguły pojawia się po względnie niewielkiej liczbie cykli obciążenia. Nowoczesne matryce do kucia i prasowania na gorąco mogą wytworzyć co najwyżej kilkanaście tysięcy odkuwek, zaś ilość cykli obciążenia cieplnego elementów silnika spalinowego do zmęczeniowego

uszkodzenia ich powierzchni nie przekracza kilkudziesięciu tysięcy i jest mierzona ilością jego uruchomień a następnie wystudzeń[9]. Dlatego też prowadzone są prace badawcze nad zastosowaniem metod inżynierii powierzchni do wytwarzania warstw powierzchniowych, uodparniających żaroodporne stale konstrukcyjne i stale narzędziowe do pracy na gorąco przed pękaniem w warunkach cyklicznych obciążeń cieplnych. Prace badawcze prowadzone są w następujących kierunkach:

- izolacji cieplnej elementów poprzez wytworzenie na ich powierzchni ceramicznych powłok o niskim współczynniku przewodnictwa cieplnego,
- utrudnienie oraz opóźnienie zarodkowania i pęknięć zmęczeniowych poprzez wytworzenie jednostrefowych warstw azotowanych o wysokiej wytrzymałości,
- jednoczesnego oddziaływania w obu ww. kierunkach poprzez wytworzenie warstw typu „duplex” składających się z cienkiej powłoki ceramicznej na podłożu uprzednio azotowanym,

Wyżej wymienione warstwy i powłoki, oprócz poprawy odporności na zmęczenie cieplne powinny spełniać warunek dobrej adhezji czyli przylegania do podłoża oraz wykazywać odporność na inne postacie zużywania, możliwe do zaistnienia w warunkach eksploatacji tj. erozję, kawitację, zużycie adhezyjne i ściernie.

Powstawanie pęknięć na powłokach występuje z dwóch zasadniczych powodów:

- różnicy temperatur między krzepnącą cząstką powłoki a metalem,
- różnicy we współczynnikach rozszerzalności cieplnej powłoki i podłoża.

Mała wytrzymałość zmęczeniowa elementu pokrytego powłoką ceramiczną zależy przede wszystkim od własności i grubości pokrycia. Źródłem naprężeń jest także dyfuzja, zachodzące reakcje chemiczne oraz procesy starzenia.

### **3. Metody nanoszenia powłok ceramicznych**

#### **- Natryskiwanie plazmowe**

Metodą natryskiwania plazmowego polega na wstrzeliwaniu proszku ceramicznego w strumień plazmy za pomocą gazu transportującego. W strumieniu plazmy cząstki proszku ceramicznego są roztopiane i rozpędzane do prędkości 30 m/s. Roztopione i rozpędzone ziarna proszku uderzają w podłoże ulegając przy tym deformacji, w wyniku czego klinują się na chropowatościach powierzchni i po zakrzepnięciu tworzą powłokę.

Powłoki tak otrzymane wykazują większą przyczepność do stalowego podłoża, są bardziej spójne wewnętrznie. Cenną zaletą tej metody jest możliwość regulowania porowatości powłok w dość szerokim zakresie za pomocą parametrów natryskiwania.

Metoda natryskiwania plazmowego umożliwia nanoszenie dowolnego materiału, pod warunkiem, że przed roztopieniem nie będzie on odparowywał ani dysocjował. Natryskiwany materiałami mogą być metale, ich stopy, tlenki, borki, węgliki i cermetale wyłącznie w postaci proszków. Dużym problemem w rozpowszechnianiu tej metody jest wysoki koszt urządzeń do natryskiwania i proszkowych materiałów ceramicznych.

#### **- Metoda detonacyjna**

Jest to nowoczesna metoda cieplnego natryskiwania materiałów proszkowych, w których energia cieplna niezbędna do podgrzania ziaren proszku i energia kinetyczna dla ich dynamicznego skierowania do powierzchni natryskiwanej uzyskiwane są w efekcie wybuchu i działania fali uderzeniowej. Opracowano i zastosowano w praktyce kilka metod impulsowego – wysokoenergetycznego nanoszenia powłok[1]:

- metodę elektryczno – wybuchową, w której do materiału napyłanego w postaci przewodnika elektrycznego o małym przekroju dostarczany jest duży gwałtowny impuls elektryczny. W efekcie jego działania materiał ulega odparowaniu, a jego pary zostają przyspieszone w kierunku powierzchni natryskiwanej nawet do prędkości 800 m/s,
- metodę kompresowo – wybuchową w której stosując klasyczne materiały wybuchowe i wykorzystując kumulacji fali uderzeniowej, możliwe jest osiągnięcie ekstremalnie wysokich prędkości proszków nanoszonych poprzez fale – nawet do 60000 m/s,
- metodę gazodetonacyjną, polegającą na maksymalnie szybkim spalaniu mieszaniny gazów palnych i utleniających w efekcie czego w pobliżu powierzchni natryskiwanych wytworzone zostają bardzo wysokie ciśnienia – rzędu gigapaskali.

Powłoki wytworzone ww. metodami cechują unikatowe właściwości fizyczne i użytkowe zarówno w sprzężeniu z pokrywanym podłożem, poprzez warstwę przejściową i w samej strukturze warstw. Dotychczas zastosowanie metody detonacyjnej w nanoszeniu warstw natryskiwanych obejmowało następujące zadania techniczne:

- podwyższenie odporności elementów maszyn na zużycie erozyjno – ściernie,
- podwyższenie odporności powlekanych materiałów na korozję w ośrodkach agresywnych,
- wytwarzanie warstw kompozytowych lub międzywarstw o specjalnych właściwościach fizycznych,
- wytwarzanie powłok szkieł metalicznych i struktur nanokrystalicznych.

Powłoka ta w odróżnieniu od tradycyjnych metod natryskiwania ciepłego oferuje szersze możliwości kształtowania struktury i właściwości technologiczne warstwy wierzchniej. Jedynym ograniczeniem zakresu aplikacji jest wysoki koszt urządzeń, konieczność podejmowania szczególnie ostrych środków bezpieczeństwa przy ich obsłudze oraz bardzo duży hałas, który sięga do 140 dB.

#### - **Metoda RVS<sup>®</sup> Technology**

W ostatnim czasie pojawiła się metoda RVS<sup>®</sup> Technology, która stanowi innowacyjną formułę metaloceramicznego powlekania metalowych powierzchni oraz regeneracji powierzchni zużytych (starcia i zużycia silników, przekładni, łożysk i innych ruchomych systemów mechanicznych powodowany jest tarciami metalicznych powierzchni). Technologia RVS<sup>®</sup> n i e bazuje na tworzeniu filmu olejowego i n i e jest dodatkiem do oleju.

Technologia RVS<sup>®</sup> polega na modyfikowaniu struktury powierzchni ocierających się części metalowych i tworzeniu n o w e j , bardzo gładkiej metaloceramicznej struktury powierzchni. Aktywne komponenty technologii RVS<sup>®</sup> składają się z naturalnych minerałów – głównie silikatu magnezu oraz katalizatorów. Przy użyciu produkt RVS<sup>®</sup> dodaje się do oryginalnego oleju i poprzez niego dostaje się on do powierzchni pracujących części, gdzie zachodzi stopniowo reakcja modyfikacji starych struktur powierzchniowych nową metaloceramiczną powłoką.

Przyrost powłoki metaloceramicznej może wynieść od niewielu mikronów do jednego milimetra. Proces kończy się automatycznie z chwilą, gdy powstaną powierzchnie metaloceramika – metaloceramika. Kontakt powierzchni metal – metal zostaje zastąpiony kontaktem powierzchni metaloceramika – metaloceramika. Związek pomiędzy pierwotną powierzchnią metalową i nową powłoką metaloceramiczną jest mocniejszy i trwalszy od powłok chromowych i niklowych. Poprzez reakcję chemiczną z powierzchni metalowej zostaje wyeliminowany wodór, co zapobiega tworzeniu się nadżerek wodorowych. Nowa powierzchnia ma identyczny współczynnik rozszerzalności termicznej jak stal, jakiegokolwiek odpryski od pierwotnej powierzchni nie są możliwe, niezależnie od wysokich czy niskich temperatur.

Zalety technologii RVS<sup>®</sup>:

- Znaczne zredukowanie sił tarcia, wibracji i hałasu przy pracy silników i urządzeń.
- Reperacja/rewitalizacja powierzchni metalowych silników i urządzeń w trakcie eksploatacji.

- Ponowne uzyskanie geometrii powierzchni do stanu nowości współpracujących części metalowych.
- Skrócenie procesu dotarcia w nowych urządzeniach i silnikach.
- Znaczne wydłużenie okresu żywotności mechanizmów i urządzeń.
- Oszczędność kosztów poprzez:
  - skrócenie okresów postojowych,
  - redukcję napraw,
  - wydłużenie okresów konserwacyjnych,
- Wzrost stopnia skuteczności systemowej urządzeń i silników.
- Oszczędność zużycia energii i/lub paliw nawet do 30%.
- Oczyszczenie ze spieczonych powłok i powleczenie na nowo pracujących powierzchni w cylindrach silników spalinowych i dzięki temu zapobieganie ich zużyciu oraz redukcja zużycia oleju.
- Właściwości awaryjnej pracy przez pewien okres w przypadku totalnej utraty oleju silnikowego.
- Ponadto nie do przecenienia w kład w ochronę środowiska dzięki:
  - redukcji emisji CO<sub>2</sub>, HC i NO<sub>x</sub>,
  - mniejszemu zużyciu zasobów energii, paliwa oleju i smarów.

#### **4. Metody badań powłok ceramicznych**

Metody badania właściwości użytkowych powłok ceramicznych są obszerne i często bardzo specyficzne dla każdego obszaru zastosowań. Do nich należą:[5]

- techniki określenia składu chemicznego – określenie składu chemicznego dokonywane metodą mikroanalizy rentgenowskiej. 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),
- techniki obserwacji geometrii powierzchni – 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 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. Pomiary 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 prędkości i liniowo narastającym obciąże-

niem. Miarą adhezji jest wielkość krytycznego obciążenia normalnego przy którym powłoka ulega odspojeniu od powierzchni (wykruszeniu).

## 5. Właściwości ceramicznych materiałów technicznych

### - Podstawowe właściwości tworzyw ceramicznych

<b>Właściwości</b>	<b>Mechaniczne</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- moduł sprężystości</li> <li>- wytrzymałość na rozciąganie</li> <li>- wytrzymałość na ściskanie</li> <li>- wytrzymałość na zginanie</li> <li>- wytrzymałość na pękanie</li> <li>- udarność</li> <li>- wytrzymałość na pełzanie</li> <li>- odporność na udary cieplne</li> <li>- twardość</li> <li>- kruchość</li> <li>- ścieralność</li> <li>-</li> </ul>
	<b>Fizyczne</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-</li> <li>- gęstość</li> <li>- gęstość pozorną</li> <li>- gęstość nasypową</li> <li>- sypkość</li> <li>- kapilarność</li> <li>- porowatość</li> <li>- szczelność</li> <li>- przepuszczalność pary wodnej</li> <li>- wilgotność</li> <li>- nasiąkliwość</li> <li>- ogniotrwałość</li> <li>- mrozoodporność</li> <li>- rozszerzalność cieplna</li> <li>- przewodność cieplna właściwa</li> <li>- rozmiar ziaren</li> <li>-</li> </ul>
	<b>Chemiczne</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-</li> <li>- odporność na utlenianie</li> <li>- odporność na silne kwasy</li> <li>- odporność na roztwory zasadowe</li> <li>- odporność na roztwory organiczne</li> </ul>

Powyższe właściwości stanowią podstawę informacyjną o przydatności materiałów ceramicznych.

Najważniejszymi właściwościami, które wpływają na trwałość powłoki ceramicznej stosowanej na elementach silnika spalinowego jest wytrzymałość cieplna i wytrzymałość na szoki termiczne (wł. mechaniczne), wskaźnik kruchości (wł. mechaniczne), gęstość i porowatość (wł. fizyczne), odporność na utlenianie (wł. chemiczne) – poniżej scharakteryzowano kilka właściwości materiałów ceramicznych.

### - wytrzymałość cieplna i szoki termiczne

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

Tab. 1. Wartości ciepła właściwego dla wybranych materiałów ceramicznych  
Tab 1. Specific heat values for selected ceramic materials

Material	Ciepło właściwe [ $Jg^{-1}$ ] w temperaturach			
	25 <sup>0</sup> C	50 <sup>0</sup> C	100 <sup>0</sup> C	1000 <sup>0</sup> C
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,54	0,78	0,92	1,25
MgO	0,74	0,94	0,01	1,28
ZrO <sub>2</sub> (niestabiliz.)	0,38	0,45	0,51	0,64
ThO <sub>2</sub>	0,20	0,23	0,25	0,30
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	-	0,68	0,80	1,30
SiC	0,48	0,67	0,84	1,26
B <sub>4</sub> C	-	0,95	1,13	2,21

Tab. 2. Wartości krytycznej różnicy temperatury powodującej szok termiczny  
Tab. 2. Critical temperature differences values causing thermal shock

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

Przez pojęcie wstrząsu cieplnego 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 pęknięcie i wysoką przewodność cieplną są odporniejsze na szok termiczny.

### - gęstość i porowatość

Gęstość materiałów ceramicznych jest zależna od rodzaju występujących w nich faz krystalicznych. Materiały uzyskane na bazie metali ciężkich mają gęstość do 12 g/cm<sup>3</sup>, zaś dla materiałów ceramicznych konstrukcyjnych wynosi ona poniżej 4 g/cm<sup>3</sup>.

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.

### - ciągliwość i wskaźnik kruchości

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.

### - odporność na utlenianie

Pokrywanie metali powłokami ceramicznymi zabezpiecza je przed utlenianiem, co ma duże znaczenie podczas pracy elementów w wysokich temperaturach. Materiały ceramiczne posiadają również najwyższy wskaźnik odporności na korozję.

## 6. Podsumowanie

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.

Materiały ceramiczne od metali wyróżnia również ich zmienność właściwości. Zmienność ta wynika przede wszystkim z różnic w metodach wytwarzania. Materiały ceramiczne nie są na ogół wytwarzane za pomocą topienia, lecz przez zagęszczanie i spiekanie proszku, a co za tym idzie jest większe zagrożenie brakiem jednorodności zarówno w odniesieniu do składu chemicznego jak i mikrostruktury. Defekty wywołane procesem technologicznym przyczyniają się do znacznych wahań właściwości materiału ceramicznego. Konstruowanie wyrobu na podstawie jednoznacznych wartości nie jest możliwe i wymaga takiego poznania zmienności własności wyrobu ceramicznego, aby można było zapewnić odpowiedni poziom jego trwałości, a tym samym niezawodności eksploatacyjnej.

## 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] 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.
- [4] Hebda, M. *Wybrane metody eksperymentalnej analizy naprężeń własnych w warstwie wierzchniej*. Rozprawa habilitacyjna WAT. Warszawa. 1966.
- [5] Jurczyk, M., Jakubowicz, J., *Nanomateriały ceramiczne WPP*. Poznań 2004.
- [6] Kocańda, S., *Zmęczeniowe niszczenie metali*. WNT. Warszawa. 1978.
- [7] Kula, P., *Inżynieria warstwy wierzchniej*. Monografie. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej. Łódź 2000.



- [8] Mazurkiewicz, A., *Model rozproszonego powstawania wiedzy w obszarze nauki o eksploatacji*. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn*. 3. 1998. 419-428.
- [9] Niezgodziński, M. E., Niezgodziński, T., *Obliczenia zmęczeniowe elementów maszyn*. PWN. Warszawa. 1973.
- [10] Weroński, A., *Zmęczenie cieplne metali*. WNT. Warszawa. 1983.
- [11] Norma PN\EN-45 001, *Ogólne kryteria działania laboratoriów badawczych*.
- [12] Norma PN- ISO 2639, Stal. *Określenie umownej grubości warstwy nawęglanej i zahartowanej*.
- [13] Norma PN- ISO 4970, Stal. *Określenie całkowitej i rzeczywistej grubości cienkich warstw utwardzonych*.

