

## THE CONCEPT OF HASTEN RESEARCH OF CERAMIC COATINGS DURABILITY ON THE COMBUSTION ENGINE ELEMENTS

**Katarzyna Topolska**

*Politechnika Wrocławska  
Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn  
50-371 Wrocław, ul. Łukasiewicza 7/9  
tel./fax: +48 71 347-79-18  
e-mail: katarzyna.topolska@pwr.wroc.pl*

### **Abstract**

*The ceramic material are specified as a materials with a high temperature resistance, small coefficient of thermal conductivity, as well as high resistance on the thermal shock. The use of these materials can lead to the one of solutions for decreasing the exhaust toxicity. Because of insufficient durability of ceramic coatings it is necessary to do the experiment on the durability improvement. The recent work presents based on the combustion engine elements, the use of ceramic coatings with the special properties. The ways of observation in the laboratory conditions of the used element covered with the ceramic coating are also described.*

## KONCEPCJA PRZYSPIESZONYCH BADAŃ TRWAŁOŚCI POWŁOK CERAMICZNYCH NA ELEMENTACH SILNIKA SPALINOWEGO

### **Streszczenie**

*Materiały ceramiczne odznaczają się wysoką odpornością na temperaturę, małym współczynnikiem przewodzenia ciepła, a także odpornością na szoki termiczne. Ich zastosowanie może stanowić jedno z różnych rozwiązań obniżenia toksyczności spalin. Z powodu niedostatecznej trwałości powłok ceramicznych konieczne jest eksperymentowanie nad poprawą trwałości. W pracy, na przykładzie elementu silnika spalinowego, zostało przedstawione zastosowanie powłok ceramicznych o specjalnych własnościach. Opisane są sposoby obserwacji w warunkach laboratoryjnych eksploatowanego elementu z naniesioną powłoką ceramiczną.*

### **1. Wprowadzenie**

Z uwagi na wysoki koszt paliwa i wymagania stawiane producentom samochodów w aspekcie ochrony środowiska nastąpił znaczny wzrost rozwoju motoryzacji. Udoskonalanie konstrukcji silników prowadzi również do rozważań nad opracowaniem zespołów współpracujących z silnikiem. Trwałość i niezawodność części maszyn, urządzeń i pojazdów mechanicznych są w ścisłej korelacji z procesami zużycia zachodzącymi zarówno w obszarach materiału sąsiadującego ze stykiem ciernym, jak i z przeciążeniowym lub zmęczeniowym zniszczeniem jego sił spójności.

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 ogranicza zasięg oddziaływania wymuszeń zewnętrznych, które stanowią 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].

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 niszcącemu 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 zgmiotowe materiałów plastycznych,
- mikroskrawanie 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

Jedną z metod nanoszenia powłok ceramicznych jest natryskiwanie plazmowe, które 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.

Wykorzystanie metody natryskiwania plazmowego, w porównaniu z innymi metodami daje lepsze efekty. Jest to możliwe dzięki temu, że w zwiężeniu łuku elektrycznego, wysokie ciśnienie gazów plazmo twórczych oraz odpowiednia konstrukcja anody powodują wyrzucenie strumienia plazmy o temperaturze 12000-15000 °C, z prędkością 300 m/s. 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.

Stosuje się również metodę nanoszenia powłok detonacyjnie. 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 pokrywającym podłożem, poprzez warstwę przejściową i w samej strukturze warstw.

Energia dostarczona w niezwykle krótkim czasie do ziaren proszku najczęściej powoduje ich nadtopienie powierzchniowe lub zmiękczenie. Najlepszy efekt adhezji powłoki do podłoża uzyskiwany jest przy intensywnym odkształceniu plastycznym, zarówno materiału bombardowanego jak i bombardującego. Mamy wtedy do czynienia z powstawaniem wzajemnych ząbnień mechanicznych łączonych materiałów. Występują wtedy również ząbnienia pomiędzy ziarnami natryskiwanyymi, które dodatkowo polepszają kohezję powłoki i jednocześnie eliminują jej porowatość oraz wzmacniają jej połączenie adhezyjne z podłożem. Dlatego w tych metodach tak ważny jest prawidłowy dobór parametrów detonacji, czyli energii wybuchu i energii fali uderzeniowej w skojarzeniu z właściwościami fizycznymi

nanoszonego proszku. 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 cieplnego 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.

#### 4. Metody badań rozwojowych

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

- 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. 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

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

## 5. Badania eksploatacyjne

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

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

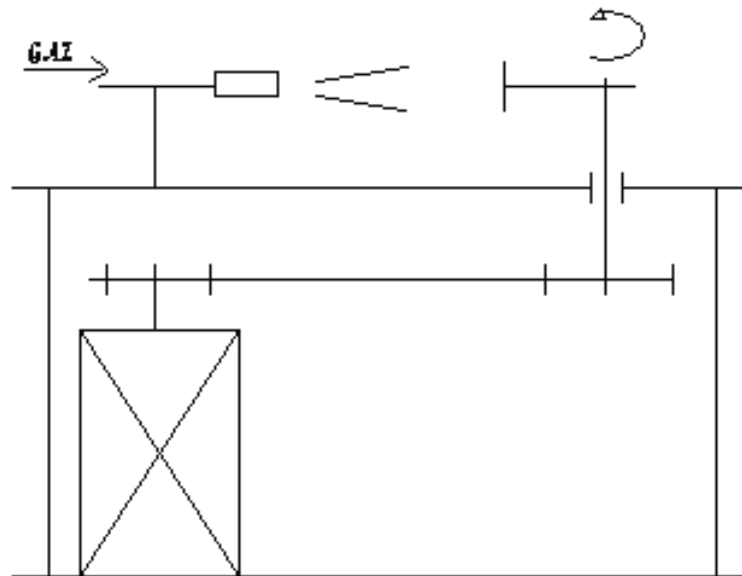
Badania eksploatacyjne podzespołów mechanicznych w pierwszej kolejności prowadzi się na hamowniach i symulatorach, a jeżeli ich wynik jest pomyślny, są one kontynuowane na obiektach rzeczywistych (pojazdach, maszynach roboczych, samolotach, itp.). Próby podzespołów doświadczalnych na hamowniach prowadzi się etapami. Po ściśle określonych 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 rozwiązywania tradycyjnego.

Podstawowym problemem w prowadzeniu badań eksploatacyjnych na obiektach rzeczywistych jest znalezienie takiego obiektu badań którego właściciel lub użytkownik wyrazi na nie zgodę i jednocześnie zagwarantuje na tyle intensywną jego eksploatację aby wynik badania uzyskać w miarę racjonalnym okresie czasu. Badania te na obiektach rzeczywistych prowadzi się jako próby porównawcze. W przypadku węzłów ciernych występujących wielokrotnie w jednym obiekcie mechanicznym (no. zawory w silniku spalinowym, węzły układu kierowniczego lub zawieszenia w pojazdach) można zamontować z nim 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 warunków eksploatacji, która bardzo często jest trudna do oszacowania.

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 się z podstawy i płyty górnej oraz czterech wsporników. Na podstawie zamontowany jest silnik z kłęb pasowym, a w płycie górnej zamocowana jest tuleja, w której ułożony jest wałek z drugim kłęb pasowym. Na kłęb pasowych nałożony jest pasek klinowy, regulowany napinaczem. Na górnej części wałka mocowany jest zawór. W górnej płycie również zamocowany jest podzespół palnika, z którego skierowany płomień oddziałuje na czoło zaworu obracanego ze stałą prędkością za pomocą przekładni pasowej. Pomiar temperatury wykonywany jest przy pomocy kamery termowizyjnej lub pirometru optycznego.



Rys. 1. Budowa i schemat działania stanowiska badawczego  
 Fig. 1. The construction and a running scheme of the research facility

## 6. Podsumowanie

Przedstawione stanowisko badawcze powinno umożliwiać uzyskiwanie zmiennych obciążeń cieplnych, aż do wywołania pęknięć zmęczeniowych badanej warstwy. Problemem wymagającym rozwiązania jest opracowanie metody pomiaru temperatury powierzchni badanej warstwy. Proponuje się zastosowanie metod pomiaru za pomocą kamery termowizyjnej lub pirometru optycznego. Uzyskane wyniki badań pozwolą wstępnie oszacować trwałość warstwy ceramicznej. Weryfikacja uzyskanych wyników nastąpi na drodze badań na stanowisku silnikowym i w warunkach eksploatacji rzeczywistej.

## 7. 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, 1994.
- [2] Babul W., Janecki J., Badanie na zużycie wybranych powłok natrykiwanych detonacyjnie. Inżynieria Materiałowa. 5. 1999. 444-446, 1999.
- [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, 1994.
- [4] Hebda M., Wybrane metody eksperymentalnej analizy naprężeń własnych w warstwie wierzchniej. Rozprawa habilitacyjna WAT. Warszawa. 1966.
  - [5] Kocańda S., Zmęczeniowe niszczenie metali. WNT. Warszawa. 1978.
  - [6] Kula P., Inżynieria warstwy wierzchniej. Monografie. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej. Łódź 2000.
  - [7] Mazurkiewicz A., Model rozproszonego powstawania wiedzy w obszarze nauki o eksploatacji. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn. 3. 1998. 419-428, 1998.
  - [8] Niezgodziński M. E., Niezgodziński T., Obliczenia zmęczeniowe elementów maszyn. PWN. Warszawa. 1973.
  - [9] Weroński A., Zmęczenie cieplne metali. WNT. Warszawa. 1983.
  - [10] Norma PN\EN-45 001, Ogólne kryteria działania laboratoriów badawczych.
  - [11] Norma PN- ISO 2639, Stal, Określenie umownej grubości warstwy nawęglanej i zahartowanej.
  - [12] Norma PN- ISO 4970, Stal, Określenie całkowitej i rzeczywistej grubości cienkich warstw utwardzonych.

