ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLASKIEJ 2001
Seria: TRANSPORT z. 42 Nr kol. 1524

Jan FILIPCZYK

BADANIA ODPORNOŚCI CERAMICZNEJ WARSTWY OCHRONNEJ Al_2O_3 NA WSTRZĄSY TERMICZNE

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych odporności ceramicznej warstwy ochronnej Al_2O_3 na szoki termiczne. Celem badań było określenie przydatności natryskiwanej plazmowo ceramicznej warstwy ochronnej na pokrycia denka tłoka.

THE TESTS OF Al_2O_3 CERAMIC PROTECTIVE LAYER RESISTANCE UPON THERMAL SHOCKS

Summary. Simulation test results of Al_2O_3 ceramic protective layer resistance upon thermal shocks have been presented in the paper. The aim of the tests was to determine the usability of plasma sprayed protective ceramic layer for covering the bottom of the piston.

1. WPROWADZENIE

W tłokowych silnikach spalinowych natryskiwane plazmowo warstwy ceramiczne stosowane są zarówno jako bariery termiczne TBC [1], jak i powłoki ochronne. Stosowanie cienkich warstw ceramicznych na pokrycie denka tłoka nie powinno w istotny sposób wpływać na przebieg procesu spalania, a może stanowić wystarczającą ochronę zabezpieczającą denko przed nadmiernymi temperaturami występującymi np. podczas anomalii spalania w cylindrze. Miarą przydatności warstwy ceramicznej do zastosowania jako warstwy ochronnej na pokrycie denka tłoka są zarówno jej własność izolacyjne, jak i odporność na wstrząsy termiczne [2]. Przeprowadzono badania odporności warstwy ochronnej Al_2O_3 na wstrząsy termiczne.

2. ZAKRES BADAŃ

Próbki w postaci aluminiowych krążków wykonanych ze stopów aluminium AK12 pokryte zostały warstwą wiążącą wykonaną z modyfikowanego AlNi. Powłoki zostały wykonane przez Przedsiębiorstwo Nowych Technologii ENTECH – Świerk metodą natryskiwania plazmowego w powietrzu. Baza AK12 dostarczona została przez WSK Gorzyce. Po natryśnięciu warstwy zostały poddane wstępnym badaniom jakościowym, które wykazały jednorodność struktury oraz niemalże stałą grubość ($\pm$ 0,05 mm) powłoki. Do badań wybrano próbki z najcieńszą warstwą termoizolacyjną. Średnica próbki bazowej wynosiła 56 mm, wysokość próbki bazowej 8 mm, grubość warstwy wiążącej 0,11– 0,15 mm, przyrost grubości po natryśnięciu warstwy ceramicznej 0,28 mm.

Badania zostały podzielone na trzy oddzielne części. Pierwszą z nich była symulacja pracy warstwy ceramicznej na denku tłoka silnika spalinowego i dotyczyła jedynie próbki z powłoką na bazie Al_2O_3. Badania przeprowadzone zostały na specjalnie przygotowanym do tego celu stanowisku. Próbki umieszczone zostały na wirującej z prędkością 500 obr/min tarczy wykonanej ze stali żaroodpornej. Próbki, przemieszczając się pomiędzy ogniem palnikowym a powietrzem chłodzącym, poddawane były naprzemiennemu grzaniu i chłodzeniu. Do ogrzewania próbek wykorzystano palnik ogniowy zasilany mieszanką gazów propan-butan i powietrza. Jako medium chłodzące użyto sprężonego powietrza atmosferycznego podawanego przez dyszę chłodzącą. Palnik gazowy oraz dysza chłodząca ustawione zostały w uchwytach umożliwiających regulację wysokości. Palnik wyposażony był w zawór regulacyjny, który w połączeniu z regulacją wysokości umożliwiał płynną regulację temperatury płomienia w zakresie 670 – 1520K. Powietrze chłodzące podawane było ze stałą temperaturą ~290K. Symulacja przeprowadzona została w trzech etapach wyznaczonych dla różnej temperatury płomienia:

- 3 godziny w temperaturze 670 – 870K; 90000 cykli,
- 4 godziny w temperaturze 870 – 1070K; 120000 cykli,
- 18 godzin w temperaturze 1270 – 1370K; 540000 cykli.

Na podstawie danych literaturowych określono temperatury pracy denka tłoka w zakresie 490 – 680K. Podczas badań warstwa ceramiczna na próbce osiągała temperatury od 540 do 640K, co odpowiadało temperaturze osiąganej przez materiał na denku tłoka. Pomiary temperatury przeprowadzono za pomocą pirometru (pomiar na powierzchni warstwy) oraz termopary (pomiar temperatury chłodzenia).

Druga część badań miała na celu sprawdzenie odporności na szoki termiczne ceramicznych warstw natryskiwanych na bazie Al_2O_3. Szoki termiczne zapewnione były dzięki naprzemiennemu, długotrwałemu grzaniu i chłodzeniu powłok ceramicznych. Każdy z cykli trwał dwie minuty, po minucie dla nagrzewania i chłodzenia. Temperatura ognia na wysokości próbki wahała się w granicach 1270 – 1520K, powietrze chłodzące utrzymywało stałą temperaturę 290K. Przeprowadzono 1000 cykli termicznych. Pomiary temperatury dokonano za pomocą pirometru (pomiar na powierzchni warstwy) oraz termopary (pomiar temperatury chłodzenia). Warunki, w jakich przeprowadzono badania, przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1

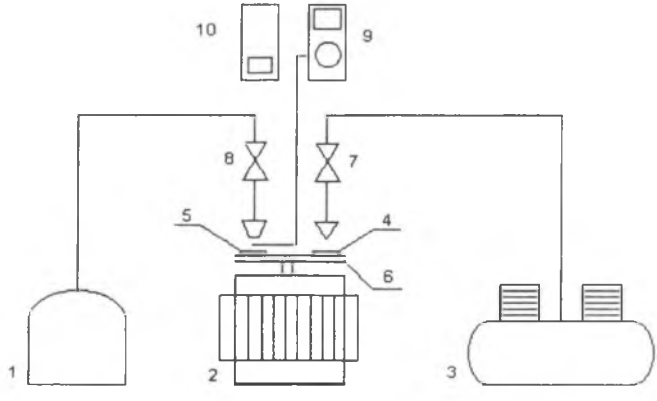
Badania próbki z powłoką na bazie AL_2O_3

Liczba cykli	Temperatura płomienia [K]	Temperatura na powierzchni warstwy po wyjściu z płomienia [K]	Temperatura na powierzchni warstwy po schłodzeniu [K]	Uszkodzenia warstwy	Przegroda powietrzna
50	1270	660	400	Brak	-
100	1370	680-710	400	Brak	-
150	1470	700-720	400	Brak	-
200	1520	660-700	400	Brak	-
250	1520	700-710	400	Brak	+
300	1520	740-750	410	Brak	+
350	1520	730	410	Brak	+
400	1520	730-740	420	Brak	+
1000	1520	730-750	420	Brak	+

Trzecia część badań polegała na określeniu właściwości termoizolacyjnych oraz ochronnych powłok ceramicznych. Pomiary miały na celu określenie różnicy między temperaturą na powierzchni i dnie próbki po każdych pięćdziesięciu cyklach. Próbki umieszczone były na wolno stojącym stojaku i nagrzewane palnikiem gazowym. Pomiar temperatury na powierzchni warstwy odbywał się za pomocą pirometru, natomiast na dnie próbki za pomocą termopary. Temperatura na powierzchni warstwy wynosiła 730 K, na dnie próbki 580 K.

3. STANOWISKO BADAWCZE

Badania przeprowadzono na zbudowanym stanowisku badawczym. Schemat stanowiska badawczego przedstawia rysunek 2. Stanowisko wyposażono w tarczę obrotową (6) ze stali żaroodpornej, na której po przeciwnych stronach umieszczone były dwie próbki (4,5). Tarcza napędzana była silnikiem elektrycznym (2) zasilanym prądem zmiennym 50 Hz, 220 V, obracającym ją z prędkością 500 obr/min. Nad tarczą umieszczono palnik gazowy (8) oraz dyszę chłodzącą (7). Palnik zasilany był mieszanką gazów propan-butan oraz powietrza, przez dyszę chłodzącą pompowane było powietrze. Odpowiednie ciśnienie w dyszy osiągnięto przy zastosowaniu sprężarki tłokowej (3). Palnik oraz dyszę umieszczono na stojakach, umożliwiających regulację wysokości, oraz wyposażono w zawory regulacyjne. W celu eliminacji wzajemnego wpływu grzania i chłodzenia, a tym samym podniesienia temperatury próbki i warstwy ceramicznej, dla wybranych cykli zastosowano przegrodę izolacyjną. Pomiary temperatur przeprowadzano przy użyciu pirometru (10) i termopary (9).



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego
Fig. 1. The arrangement of a test-stand

Do pomiarów temperatury powłoki ceramicznej wykorzystano pirometr przenośny typu Optex PT-3LF, o zakresie temperatur 250 do 700K. Według danych producenta dokładność pomiaru wynosi ±1% lub ±2% ±1 dla większych wartości. Pirometr wyposażony był w celownik laserowy, co pozwoliło na precyzyjne skierowanie wiązki podczerwonej na środek pola pomiarowego. Pomiary wykonywano z odległości 500 mm rejestrując temperaturę próbki na średnicy 20 mm. Ze względu na dużą porowatość materiałów ceramicznych

i prawdopodobieństwo rozproszenia wiązki promieni podczerwonych dokonano kalibracji pirometru.

Do pomiaru temperatury ognia na wysokości tarczy oraz pomiaru temperatury na dnie próbki użyto termopary współpracującej z miernikiem uniwersalnym typu Mastech M890G.

4. WYNIKI BADAŃ

Po przeprowadzonych badaniach wykonano zgłady mikroskopowe na wszystkich próbkach oraz przeprowadzono analizę mikroskopową próbek.

Na powierzchni warstwy wierzchniej próbki wykonanej z AK12 stwierdzono wystąpienie nieciągłości materiału (pory otwarte) - rys.2, oraz nieciągłości materiału pod warstwą wierzchnią (pory zamknięte) - rys.3. Widoczne zmiany na powierzchni próbki bez warstwy ceramicznej posłużyły jako punkt odniesienia dla dalszej analizy zmian materiału pod warstwą ceramiczną.

Podczas całego cyklu badań nie zauważono jakichkolwiek zmian na powierzchniach warstw ceramicznych wykonanych z Al_2O_3. Obserwacje struktury makroskopowej wykazały jednolitość powłok. Nie zaobserwowano pęknięć oraz wykruszeń powłok.

Podczas badań mikroskopowych zauważono miejscowe nieciągłości warstwy wiążącej natryśniętej pod warstwą ceramiki.

Powłoki wykonane z Al_2O_3 charakteryzowały się dużą porowatością otwartą oraz zamkniętą, dzięki czemu warstwy zdolne były do pochłaniania naprężeń powstających podczas długotrwałego wygrzewania oraz chłodzenia.

Badania mikroskopowe warstw na bazie Al_2O_3 wykazały występowanie mikropęknięć w powłoce ceramicznej. Zauważono powstawanie pęknięć propagujących poprzez cały przekrój powłoki oraz pęknięcia zatrzymujące się na pewnej głębokości w materiale ceramicznym. Najczęstszym miejscem powstawania pęknięć „na wskroś" są miejsca nieciągłości warstwy podkładowej – rys.4. Pęknięcia takie powodują zmiany, powstanie porów, na powierzchni materiału bazowego AK12, co świadczy o miejscowym przegrzewaniu się materiału. Mikropęknięcia zatrzymujące się w ceramice nie powodują zmian w materiale bazowym – rys.6.

Rys. 2. Powierzchnia próbki z materiału AK12 po próbie nagrzewania płomieniem do temperatury ok. 720 K, widoczne pory otwarte – powiększenie 850x

Fig. 2. The surface of AK12 sample after heating test up to about 720K – magnification 850x

Rys. 3. Powierzchnia próbki z materiału AK12 po próbie nagrzewania płomieniem do temperatury 720 K, widoczne pory zamknięte - powiększenie 850x

Fig. 3. The surface AK12 sample after heating test up to about 720K with visible closed pores under the surface – magnification 850x

Rys. 4. Pęknięcia powłoki Al_2O_3 sięgające materiału rodzimego po 1000 cykli zmian temperatur – powiększenie 540x

Fig. 4. Al_2O_3 coating cracks penetrating the native material after 1000 temperature change cycles – magnification 540x

Rys. 5. Pęknięcia powłoki Al_2O_3 sięgające warstwy podkładowej po 10 000 cykli zmian temperatur, widoczne zamknięte pory pod warstwa podkładową - powiększenie 540x
Fig. 5. Al_2O_3 coating cracks penetrating the precoat after 10 000 temperature change cycles with visible closed pores under the precoat - magnification 540x

Rys. 6. Pęknięcie powłoki Al_2O_3 „normalne" po 10 000 cykli zmian temperatur - powiększenie 540x
Fig. 6. „Ordinary" Al_2O_3 coating cracks after 10 000 temperature change cycles – magnification 540x

5. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań oraz analizy wyników stwierdzono:

- otrzymane w wyniku procesu natryskiwania plazmowego powłoki ceramiczne na podłożu stopu AK12 przeznaczone do badań odporności na szoki termiczne wykazywały prawidłową budowę i dobrą przyczepność do podłoża,

- stanowisko badawcze zastosowane w badaniach pozwoliło na stworzenie warunków termicznych podobnych do panujących w komorze spalania silnika oraz na jakościowe określenie odporności na szoki termiczne powłok ceramicznych,
- stwierdzono, że badane powłoki z Al_2O_3 po oględzinach wzrokowych nie wykazywały zmian podczas całego cyklu badawczego, co świadczy o dobrej odporności tych materiałów na wstrząsy cieplne,
- w wyniku przeprowadzonych badań mikroskopowych stwierdzono występowanie w badanych powłokach wady w postaci pęknięć,
- w powłoce na bazie Al_2O_3 pęknięcia te propagowały od podłoża do powierzchni warstwy tworząc kanał łączący materiał bazowy z otoczeniem, co prawdopodobnie mogło doprowadzić do miejscowego przegrzewania AK12,
- w powłoce Al_2O_3 stwierdzono jednoczesne występowanie pęknięć od powierzchni powłoki „do wewnątrz", pęknięcia te nie osiągały warstwy wiążącej,
- wydaje się, że pęknięcia należy łączyć ze stwierdzonymi miejscowymi nieciągłościami warstwy podkładowej AlNi.

Literatura

1. Adamiec P., Dziubiński J., Filipczyk J.: Zastosowanie natryskiwanych warstw ceramicznych jako warstw wierzchnich powierzchni elementów ograniczających przestrzeń spalania. KONMOT '94, Kraków – Raba Niżna, październik 1994, s. 11-19
2. Filipczyk J.: Badanie warstw ceramicznych stosowanych do izolacji komór spalania. KONMOT '96, Kraków 1996, s. 43-46

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Bronisław Sendyka

Abstract

Simulation test results of Al_2O_3 ceramic protective layer resistance upon thermal shocks have been presented in the paper. The aim of the tests was to determine the usability of plasma sprayed protective ceramic layer for covering the bottom of the piston. In order to select the proper layer thickness it has been assumed that the layer sprayed upon the piston should act as a protective barrier which would prevent the piston bottom from cracking during the operation in extreme conditions such as long term overloading of the combustion engine. At the same time the protective layer should not significantly effect the combustion process. The arrangement of the test – stand has been described. Test results covered 1000 temeperature change cycles and hypothetical influence of cracks in a layer upon thermal shock resistance has been presented.

Praca wykonana w ramach realizacji pracy BW-429/RM-10/2001 - Warstwy ceramiczne w silnikach spalinowych – badania trwałościowe