

Badania spalaniem węglowych dysz pocisków raketowych wykonanych z kompozytu węgiel-węgiel

Maciej Miszczak¹, Zygmunt Pierechod¹, Cezary Wajler²

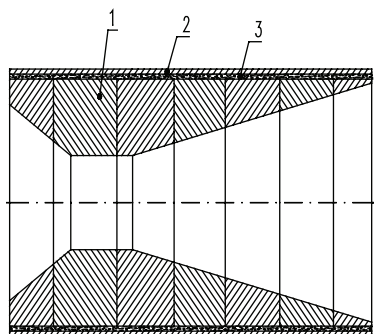
1 - Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia- Zielonka k. Warszawy

2 - Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie

Streszczenie: Przedstawiono badania dysz pocisków raketowych GROM, wykonanych z kompozytu węgiel-węgiel (kompozytu C-C). Badania obejmowały pomiar erozji dyszy spowodowanej przepływem produktów spalania stałego paliwa raketowego, wykazując, że kompozyt C-C nie spełnia wymagań taktyczno-technicznych jako materiał dyszy ze względu na nadmierną erozję jej przekroju krytycznego.

1. Wprowadzenie

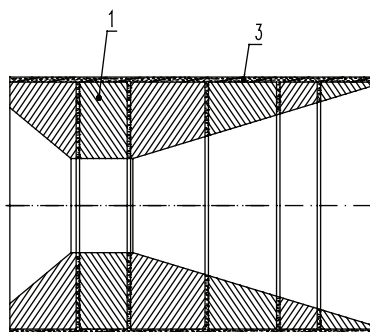
Podstawowym warunkiem prawidłowego działania układu napędowego pocisku raketowego jest zabezpieczenie dyszy przed nadmiernym zużyciem erozyjnym zachodzącym podczas oddziaływania (intensywnego przepływu) gorących produktów spalania paliwa raketowego, powodujących wymywanie/erozję kanału przelotowego dyszy, głównie na wysokości przekroju krytycznego, co wpływa niekorzystnie na uzyskanie przez pocisk raketowy wymaganego ciągu i ciśnienia w komorze spalania, o stabilnym przebiegu, a w konsekwencji - wymaganej prędkości i zasięgu. Grafit pirolityczny jest jednym z niewielu materiałów stosowanych jako materiał dyszy, ulegającym niewielkiemu, dopuszczalnemu zużyciu erozyjnemu podczas spalania stałego paliwa raketowego. Grafit pirolityczny stosowany jest w konstrukcji przeciwlotniczych pocisków raketowych typu STINGER, IGŁA i GROM. Przykładową konstrukcję dyszy pirografitowej pocisku raketowego „Grom” przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Konstrukcja dyszy do pocisku „Grom”: 1 – krążki grafitu pirolitycznego, 2 – tulejka z grafitu pirolitycznego, 3 – warstwa kleju

Dysza ta składa się ze stosu krążków (1) wykonanych z grafitu pirolitycznego, obrobionych mechanicznie, wklejonych w tulejkę (2) wykonaną również z grafitu pirolitycznego. Minimalna gęstość krążków (1) wynosi 2,15 g/cm³ natomiast tulejki (2) - 2,10 g/cm³.

Dysza pirografitowa oraz sposób wytwarzania płytek z grafitu pirolitycznego, będących półfabrykatami do otrzymywania krążków, stanowią przedmiot wynalazków [1, 2]. Inną konstrukcję dyszy wykonanej z grafitu pirolitycznego przedstawiono na rys. 2 [3, 4]. Funkcję kleju (spoiwa/lepiszcza) spełnia tu warstwa grafitu pirolitycznego.



Rys. 2. Dysza wykonana całkowicie z grafitu pirolitycznego: 1 – krążki z grafitu pirolitycznego, 3 – spoiwo z grafitu pirolitycznego

Z grupy termoodpornych materiałów węglowych nowej generacji, które znalazły szerokie zastosowanie w technice raketowej, duże znaczenie praktyczne mają kompozyty węgiel-węgiel (kompozyty C-C). Są one m.in. wykorzystywane jako osłony termiczne raket i samolotów [5 - 7].

Nowoczesnym rozwiązaniem w konstrukcji dysz, jest zastosowanie kompozytów C-C. Materiały tego typu posiadają wiele właściwości fizykochemicznych zbliżonych do właściwości grafitu pirolitycznego, natomiast zdecydowanie przewyższają go pod względem właściwości mechanicznych.

Kompozyty C-C w stosunku do grafitu pirolitycznego charakteryzują się wyższą wytrzymałością na zginanie i rozciąganie, wyższym modułem Younga oraz znacznie wyższą energią pęknięcia. Kompozyty C-C są jedynymi tworzywami węglowymi, które pozwalają na otrzymanie wyrobu (elementu konstrukcyjnego) praktycznie o dowolnej wielkości, o złożonych formach, a jednocześnie o kontrolowanych właściwościach fizycznych w określonym kierunku. Rodzaj włókien węglowych, sposób ich rozłożenia w matrycy węglowej, a także wzajemne oddziaływanie włókien i matrycy kompozytu C-C, mają decydujący wpływ na parametry produktu końcowego. A zatem, można w ten sposób kształtować w szerokich granicach podstawowe właściwości tego kompozytu.

2. Badania eksperymentalne

W celu obniżenia kosztów badań zjawiska erozji dysz z kompozytu C-C w wyniku oddziaływania produktów spalania wytworzonych w komorze spalania silnika raketowego oraz doboru warunków otrzymywania dysz z tego kompozytu, w pierwszej kolejności przeprowadzono badania na odporność na erozję pod wpływem strumienia produktów spalania wytworzonych przez lancę tlenową, tulejek z kompozytu C-C, wykonanych w różnych warunkach technologicznych.

Badania tulejek wykonanych z kompozytu C-C przeprowadzono w Katedrze Ceramiki Specjalnej Wydziału Inżynierii Materiałowej i Ceramiki Akademii Górniczo-Hutniczej. Badania spalaniem dysz do pocisku raketowego GROM, wykonanych z kompozytu C-C przeprowadzono w Wojskowym Instytucie Technicznego Uzbrojenia.

2.1. Badanie erozji tulejek z kompozytu C-C

Tulejki poddawano działaniu strumienia gazów o wysokiej temperaturze z lancy tlenowej, wytwarzanego w wyniku spalania acetylenu w tlenie, symulującego z pewnym przybliżeniem rzeczywiste oddziaływanie produktów spalania na materiał dyszy w warunkach pracy silnika raketowego. Za pomocą mikroskopu warsztatowego mierzono średnicę wewnętrzną tulejki przed i po działaniu na nią strumienia gazów. Pomiaru erozji (wymycia) średnicy otworów tulejek przeprowadzono w połowie ich wysokości, od strony czoła lancy tlenowej. Do pomiaru temperatury płomienia przy powierzchni czoła tulejek zastosowano pirometr typu RAYTEK MIRS o możliwości pomiaru temperatury do 3200 K. Warunki i wyniki badań erozji tulejek z kompozytu C-C przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki badań tulejek wykonanych z kompozytu C-C

Rodzaj mierzonego parametru tulejki	Wartość mierzonego parametru tulejki	Temperatura gazowych produktów spalania T , °C	Czas oddziaływania produktów spalania na tulejkę t , s	Nazwa próbki		
				M 46	P 55	P 75
Masa m , g	Przed spalaniem	2500÷3000	7	14,17	13,33	14,08
	Po spalaniu			13,74	12,86	12,18
Średnica wew. D_w , mm	Przed spalaniem	2500÷3000	7	15,14	15,18	15,15
	Po spalaniu			15,25	15,51	17,07
Średnica zew. D_z , mm	Przed spalaniem	2500÷3000	7	30,28	30,31	30,37
	Po spalaniu			30,28	30,30	30,36
Wysokość H , mm	Przed spalaniem	2500÷3000	7	17,10	17,55	17,31
	Po spalaniu			17,09	17,54	17,31

Na podstawie otrzymanych wyników podanych w tabeli 1 wynika, że wzrost średnicy wewnętrznej otworów tulejek wykonanych z kompozytu C-C, próbek oznaczonych symbolami M 46, P 55 i P 75, spowodowany erozją produktów spalania odpowiednio wynosił 0,11 mm, 0,33 mm i 1,92 mm, zaś ubytek masy - 0,44 g, 0,47 g i 1,90 g, potwierdzając wzrastające, w wyniku erozji, zużycie tulejek, opisane zmianami ich średnicy krytycznej i masy.

Z otrzymanych rezultatów wynika, że należy zwiększyć wytrzymałość termiczną kompozytu C-C przeznaczonego na wykonanie dyszy. W związku z tym określono następujące warunki procesu technologicznego wytwarzania dysz z kompozytu C-C, przewidujące zastosowanie nasycania kompozytu węglem pirolitycznym.

2.2. Sposób przygotowania do badań próbek- dysz z kompozytu C-C

Na podstawie analizy otrzymanych wyników opracowano Założenia Taktyczno-Techniczne na dyszę wykonaną z kompozytu C-C, które obejmowały:

- Tymczasowe Warunki Techniczne (TWT) na materiały stosowane do otrzymywania dyszy z kompozytu C-C,
- Tymczasowe Warunki Techniczne na dyszę wykonaną z kompozytu C-C,
- Tymczasowe Warunki Techniczne na wykonanie, kontrolę i odbiór dyszy kompozytowej C-C.

Dysza wykonywana była z materiałów spełniających wymagania TWT na materiały stosowane do jej otrzymywania. Półfabrykatem do jej otrzymania była tulejka wykonana z kompozytu C-C. Po obróbce mechanicznej na wymiary konstrukcyjne wymagane było jej wielokrotne dosycanie węglem pirolitycznym. Dosycanie przeprowadzano, stosując propan jako prekursor węglowy. Po każdym dosycaniu wymagana była korekta wymiarów konstrukcyjnych dyszy za pomocą obróbki mechanicznej.

Jako materiał osnowy kompozytu zastosowano włókno węglowe M46JB 3K w postaci rowingu składającego się z 300 włókien elementarnych M46. Włókno posiadało następujące właściwości:

- moduł Younga o wartości 436 GPa,
- wytrzymałość na zrywanie wynoszącą 4,2 GPa,
- wydłużenie względne do zerwania – 1%.

Jako prekursor matrycy węglowej kompozytu zastosowano żywicę fenolową. W procesie dosycania półfabrykatów powstałych po karbonizacji żywicy fenolowej zastosowano propan.

W procesie technologicznym wytwarzania dysz zachowywano następującą kolejność operacji:

- Otrzymanie na wałku elektrografitowym tulejki wykonanej z rowingu węglowego nasycanego żywicą fenolową. Rowing nawijany był na wałku lekko krzyżowo w kształcie szpuli.
- Przeprowadzenie karbonizacji uzyskanego kompozytu,
- Naprzemienne dosycanie na wałku wstępnie uformowanego kompozytu C-C węglem pirolitycznym uzyskiwanym poprzez pirolizę propanu w temperaturze 1200 K metodą pulsacyjną CVI,
- Dosycanie płynną żywicą fenolową (ilość dosycań była nie mniejsza niż 5 razy),
- Rekarbonizacja kompozytu,
- Zdjęcie z wałka elektrografitowego tulejki z kompozytu C-C,
- Obróbka wysokotemperaturowa tulejki kompozytowej w temperaturze 2420 K z wykorzystaniem przystosów temperaturowych wynoszących 570 K/h,
- Obróbka mechaniczna tulejki kompozytowej metodą szlifowania za pomocą narzędzia diamentowego. W wyniku obróbki uzyskiwano dyszę spełniającą wymagania rysunku konstrukcyjnego.

2.3. Badania erozji dysz z kompozytu C-C

Zasadniczym celem przeprowadzonych badań było określenie zużycia erozyjnego dysz wykonanych z kompozytu C-C nasycanego węglem pirolitycznym.

Podstawowym kryterium oceny dysz, zgodnie z obowiązującymi Wymaganiami Taktyczno -Technicznymi (WTT) na dyszę do pocisku GROM, jest jej dopuszczalna erozja wyrażona wzrostem wielkości średnicy krytycznej wynoszącej przed spalaniem 14,5 mm, który nie powinien przekroczyć 0,2 mm.

Na podstawie przeprowadzonych prób spalaniem dysz wykonanych z kompozytu C-C nasycanych węglem pirolitycznym, stwierdzono, że erozja ich przekroju krytycznego wyrażona wzrostem średnicy przekroju krytycznego, wynosiła średnio 1,7 mm, czyli wyraźnie powyżej wartości dopuszczalnej.

Pomiar erozji przekroju krytycznego dyszy przeprowadzono stosując mikroskop warsztatowy. Nie stwierdzono przy tym nadmiernej, spowodowanej wymywaniem zmiany kształtu przekroju krytycznego dyszy z kołowego na owalny. Na rysunku 3 przedstawiono dyszę z kompozytu C-C nasycanego węglem pirolitycznym po próbie spalaniem w balistycznym silniku raketowym.



Rys. 3. Dysza z kompozytu C-C po statycznej próbie spalaniem

3. Wnioski

Prezentowane powyżej badania związane ze sprawdzeniem wykorzystania kompozytów C-C w konstrukcji dysz pocisków raketowych, były pierwszymi tego typu pracami prowadzonymi w Polsce. Porównując otrzymane wyniki badań dysz z kompozytu C-C nasycanego węglem pirolitycznym z Wymaganiami Technicznymi (WT) na dyszę z grafitu pirolitycznego do pocisku raketowego GROM, należy stwierdzić, że wykonane dysze na bazie kompozytu C-C nie spełniły tych WT.

A zatem, celowe jest prowadzenie dalszych prac badawczych w poszukiwaniu technologii otrzymywania

doskonalszych, bardziej odpornych termicznie i mechanicznie materiałów węglowych i/lub konstrukcji spełniających wymagania eksploatacyjne dysz, wykorzystujących dwa lub więcej rodzajów materiałów węglowych, tworzących struktury t. zw. „dysz hybrydowych”.

Podziękowanie

Niniejszy artykuł powstał podczas realizacji pracy naukowej finansowanej ze środków na naukę w latach 2005 - 2007 w ramach Projektu Badawczego Nr 0 T00B 026 29 p.t. „Badanie dysz hybrydowych”, przyznanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- [1] Pierechod Z., Koteran T., Habaj H., Moskalewicz M., Orlikowski W., Zawadzki K.: *Dysza pirografitowa*, Patent UP RP Nr 174084, 1998.
- [2] Pierechod Z., Koteran T., Habaj W., Moskalewicz M., *Sposób wytwarzania płytek z grafitu pirolitycznego*, Patent UP RP Nr 184256, 2003.
- [3] Pierechod Z., Wiśniewski A., *Pyrolytic graphite in the nozzle construction of the rocket missiles*, Materiały „VII Konferencji Naukowo-Technicznej Problemy Rozwoju Produkcji i Eksploatacji Techniki Uzbrojenia”, WITU, Zeszyt 73, 2000.
- [4] Pierechod Z., Wiśniewski A., *Pyrolytic graphite in the rocket missiles*. Problemy Techniki Uzbrojenia I Radiolokacji, WITU. Zeszyt 73, 2000.
- [5] Fitzer E., *Carbon as fibres and composites*. The most promising candidate for future materials, Proceedings of The 9th Graphite Conference, Zakopane, 1988, 289-312.
- [6] Savage G. *Carbon-Carbon Composites*, Chapman & Hall, London, 1993.
- [7] Błażewicz S., Błocki J., Chłopek J., Godlewski J., Michałowski J., Pakoński K., *Thin C-C composite shells for high energy physics - their manufacture and properties*, Carbon, vol. 34, Nr 11, 1996, 1393-1399.