ISSN 1733-8670

ZESZYTY NAUKOWE NR 5(77)
AKADEMII MORSKIEJ
W SZCZECINIE

OBSŁUGIWANIE MASZYN I URZĄDZEŃ OKRĘTOWYCH
O M i U O 2 0 0 5

Robert Jasionowski, Dariusz Zasada,
Janusz Grabian

Mechanizm niszczenia stopów intermetalicznych poddanych erozji kawitacyjnej

Słowa kluczowe: erozja kawitacyjna, kawitacja, intermetale

W pracy przedstawiono wyniki badań odporności na zużycie kawitacyjne stopów intermetalicznych z układu Fe-Al przeprowadzonych przy użyciu stanowiska pomiarowego typu strumieniowo-uderzeniowego. Stopy te wykazały dobrą odporność na ten typ erozji w porównaniu z innymi materiałami konstrukcyjnymi. Stwierdzono również korzystny wpływ procesu laserowego przetopu warstwy wierzchniej na zużycie kawitacyjne stopu intermetalicznego FeAl23.

Destructive Mechanism of Inter-metallic Fe-Al Alloys Subjected to Cavitational Erosion

Key words: cavitational erosion, cavitation, intermetallic alloys

This paper presents results of research on inter-metallic Fe-Al alloys cavitational erosion resistance, using the flux-impact measuring device. These inter-metallic alloys are proved to have good resistance from this type of erosion in comparison with other construction materials. It was found that this is an advantageous influence of the laser-melted zone of cavitational erosion resistance of inter-metallic FeAl23 alloys.

Wstęp

Erozja kawitacyjna jest procesem oddziaływania impulsów ciśnień na powierzchnię materiału wywołanym zjawiskiem kawitacji. Pojęcie kawitacji jest określane jako zjawisko polegające na powstawaniu, wzroście i zanikaniu (implozji) pęcherzyków spowodowane cyklicznymi zmianami ciśnienia w cieczy [4, 12, 13, 15, 17].

Inicjatorami zjawiska kawitacji są znajdujące się w wodzie lub na omywanych powierzchniach zarodki (jądra kawitacyjne o średnicy dochodzącej do 50 μm), wpływające na zmniejszenie zdolności cieczy do przenoszenia naprężeń rozciągających [6]. Zarodkami takimi są: mikropęcherze gazów, drobne cząstki ciał stałych, mikroorganizmy, wypełnione gazem pory w powierzchniach opływanych ciał stałych. Gwałtowny spadek ciśnienia i występujące w cieczy jądra kawitacyjne powodują rozerwanie ciągłości cieczy i tworzenie się obszarów wypełnionych mieszaniną parowo-gazową, tzw. pęcherzyków kawitacyjnych [11]. Zmiana ciśnień (z obszaru obniżonego ciśnienia do obszaru podwyższonego ciśnienia) powoduje skraplanie pary wypełniającej pęcherzyk kawitacyjny, prowadząc do jego implozji. Powtarzające się implozje pęcherzyków kawitacyjnych wywołują nierównomierny stan naprężeń prowadząc do umocnienia warstwy wierzchniej i pęknięć pojawiających się bezpośrednio pod umocnioną warstwą, straty materiałowe i zmiany w mikrostrukturze [5, 7, 10, 16]. Ze względu na niejednorodność i zmienność obciążeń siłami mechanicznymi wywołanymi przez: fale ciśnienia, mikro i makroimpulsy ciśnienia, fale akustyczne, lokalne wzrosty temperatury – proces erozji kawitacyjnej porównuje się z procesem zmęczeniowym [8].

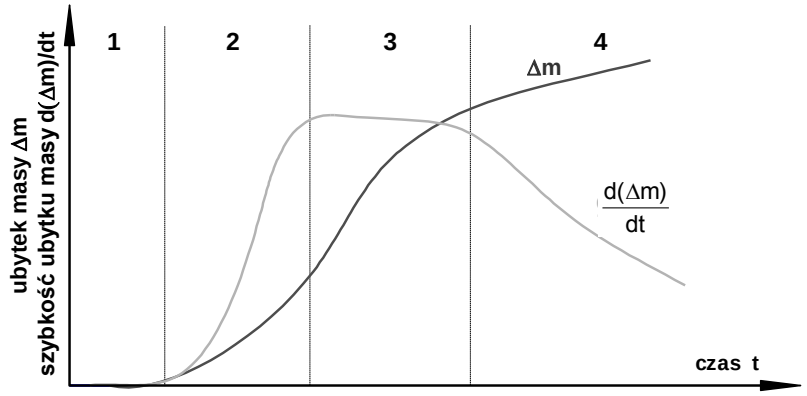
Wpływ mechanicznego oddziaływania procesów kawitacyjnych na powstawanie i rozwój uszkodzeń erozyjno-kawitacyjnych jest najczęściej badany na różnych urządzeniach badawczych, wśród których można wyodrębnić trzy główne grupy:

- przepływowe,
- wibracyjne,
- strugowo-uderzeniowe.

Kinetykę niszczenia kawitacyjnego prezentują krzywe wyrażające się stosunkiem ubytku masy Δm w funkcji czasu t lub stosunkiem szybkości ubytku masy $d(\Delta m)/dt$ w funkcji czasu t, w których wyróżnia się cztery okresy zniszczenia, co przedstawiono na rysunku 1.

W okresie inkubacji (1) następuje umocnienie warstwy wierzchniej, występują procesy odkształcenia plastycznego i zmęczeniowe, pojawiają się mikropęknięcia. Głębokość umocnienia zależy od granicy plastyczności badanego materiału. Ubytek masy materiału jest bardzo mały.

Okres przyśpieszonego ubytku masy (2) charakteryzuje się powstawaniem nierówności i zagłębień, które następnie przekształcają się we wżery zajmujące coraz większą powierzchnię, powodując proces gwałtownego odrywania cząstek materiału. W okresie tym erozja kawitacyjna rozszerza się na cały obszar powierzchni poddanej kawitacji. Zależnie od struktury materiału mogą one mieć różną postać, co znacząco wpływa na cały proces zużycia kawitacyjnego.



Rys. 1. Kinetyka niszczenia kawitacyjnego; ubytek masy Δm w funkcji czasu t, szybkość ubytku masy $d(\Delta m)/dt$ w funkcji czasu t: *1* – okres inkubacji, *2* – okres przyśpieszonego ubytku masy, *3* – okres zmniejszonego ubytku masy, *4* – okres ustalonego ubytku masy [12]

Fig. 1. Cavitational erosion kinetics; mass loss Δm vs time t, mass loss rate $d(\Delta m)/dt$ vs time t: 1 – incubation period, 2 – acceleration erosion rate period, 3 – attenuation erosion rate period, 4 – fixed erosion rate period [12]

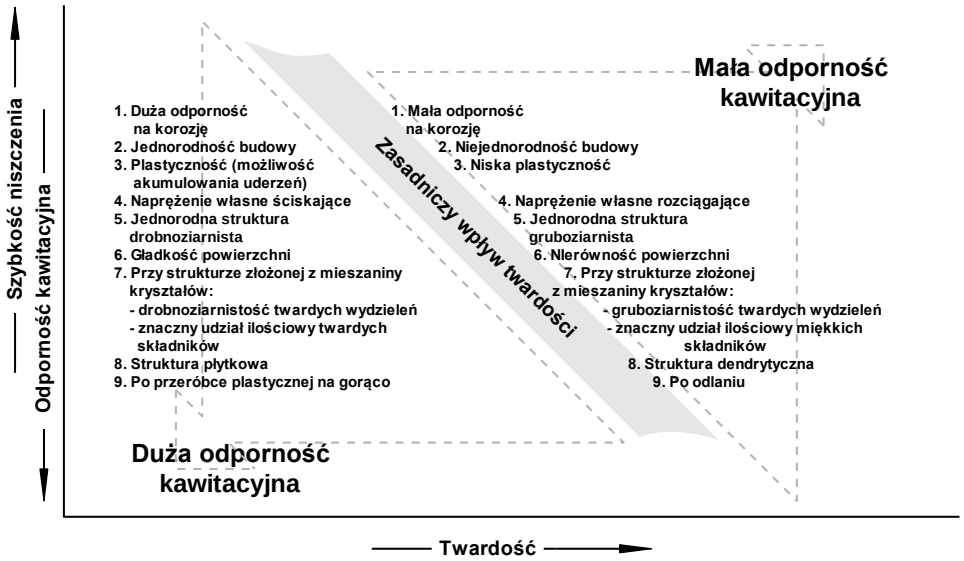
W okresie zmniejszonego ubytku masy (3) dochodzi do obniżenia szybkości ubywania materiału. Powodem spadku szybkości jest wzrost nierówności powierzchni i wypełnianie wżerów cieczą. Znajdujące się w kraterach powierzchni stabilne pęcherze powietrza działają amortyzująco na implodujące pęcherzyki.

Okres ustalonego ubytku masy (4) to stały poziom szybkości ubywania materiału. Dochodzi w nim do równowagi między ilością energii kumulowanej i energii traconej wraz z usuwanymi cząstkami materiału [12].

Kształt krzywych przedstawionych na rysunku 1 odzwierciedla przebieg procesu erozji kawitacyjnej. Zależny jest on od: właściwości cieczy roboczej (skład chemiczny, temperatura, zawartość gazów, lepkość), czasu ekspozycji, stanowiska badawczego, właściwości fizykochemicznych i strukturalnych materiału (rys. 2) [5, 11, 13, 14].

Jednym z podstawowych rozwiązań zapobiegającym niszczącemu działaniu zjawiska erozji kawitacyjnej bądź zmniejszającym je, obok zmian projektowo-

konstrukcyjnych, jest dobór materiału konstrukcyjnego o większej odporności na ten rodzaj erozji. Dodatkowo poprawę odporności danego materiału konstrukcyjnego uzyskuje się poprzez zastosowanie obróbki cieplnej lub obróbkę modyfikującą stan warstwy wierzchniej [1 – 3, 5].



Rys. 2. Zależność szybkości niszczenia oraz odporności metali na działanie kawitacji od twardości dla różnych własności fizyko-chemicznych i strukturalnych metali [11]

Fig. 2. Relation between destroy rate and the resistance of metals to cavitational erosion as function of hardness for different metal physical and structural properties [11]

1. Metodyka badań

Kawitacji przepływowej poddano stopy na osnowie fazy międzymetalicznej FeAl o różnym składzie chemicznym. Dodatkowo warstwę wierzchnią stopu FeAl23, wykazującego najmniejszą odporność na zużycie kawitacyjne, poddano laserowemu nadtapianiu w osłonie azotu, wiązką o mocy P = 1,5 kW, z szybkością przesuwu materiału względem wiązki v = 1 m/min.

Do badań wykorzystano urządzenie strumieniowo-uderzeniowe. W każdym teście odporności kawitacyjnej badano jednocześnie dwie próbki tego samego materiału. Próbki do badań miały kształt walców o średnicy 20 mm i wysokości około 6 mm. Mocowano je w ramionach wirnika w płaszczyźnie pionowej, równolegle do osi strumienia wody tłoczonej pod ciśnieniem 0,06 MPa w sposób ciągły przez dyszę o średnicy 10 mm oddaloną od krawędzi próbek o 1,6 mm. Wirujące próbki uderzały o strugę wody. Natężenie przepływu wody było stałe i wynosiło 1,55 m^3/godz. Próbki poddawano działaniu kawitacji przez okres

30 minut, wyjmowano z uchwytów, odtłuszczano w myjce ultradźwiękowej przez okres 10 minut w temperaturze 30°C, suszono w suszarce laboratoryjnej przez 15 minut w temperaturze 120°C i ważono, po czym ponownie mocowano w ramionach wirnika zachowując pierwotne położenie względem strugi wody. Próbki materiałów poddano badaniom erozyjnym przez okres 3000 minut.

Badaniom odporności kawitacyjnej poddano stopy intermetaliczne z układu FeAl o różnym składzie chemicznym przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1

Właściwości stopów intermetalicznych Fe-Al poddanych badaniom na zużycie kawitacyjne
Properties of intermetallic Fe-Al alloys subjected to cavitational erosion

Oznaczenie stopu	Skład chemiczny (% at)	R_a [μm]	Twardość [HRC]	Wielkość ziarna [μm]
FeAl23	Fe-23Al-5Cr	0,01	25	150÷200
FeAl23 *	Fe-23Al-5Cr	0,01	20	10÷20
FeAl36	Fe-36Al-0,22Mo-0,1Zr-0,13C	0,01	31	150÷300
FeAl45	Fe-45Al-0,22Mo-0,1Zr-0,13C	0,01	51	150÷300

* stop FeAl23 poddany modyfikacji warstwy wierzchniej przez laserowe nadtapianie,
* inter-metallic FeAl23 alloy subjected to advantageous influence of laser-melted zone.

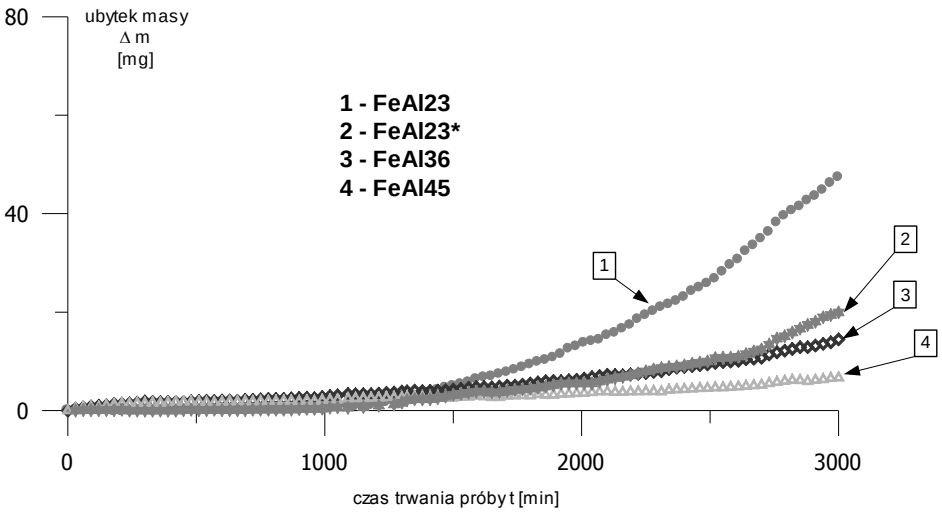
2. Wyniki badań i ich analiza

Krzywe niszczenia kawitacyjnego wyrażonego ubytkami masy w funkcji czasu przedstawiono na rysunku 3.

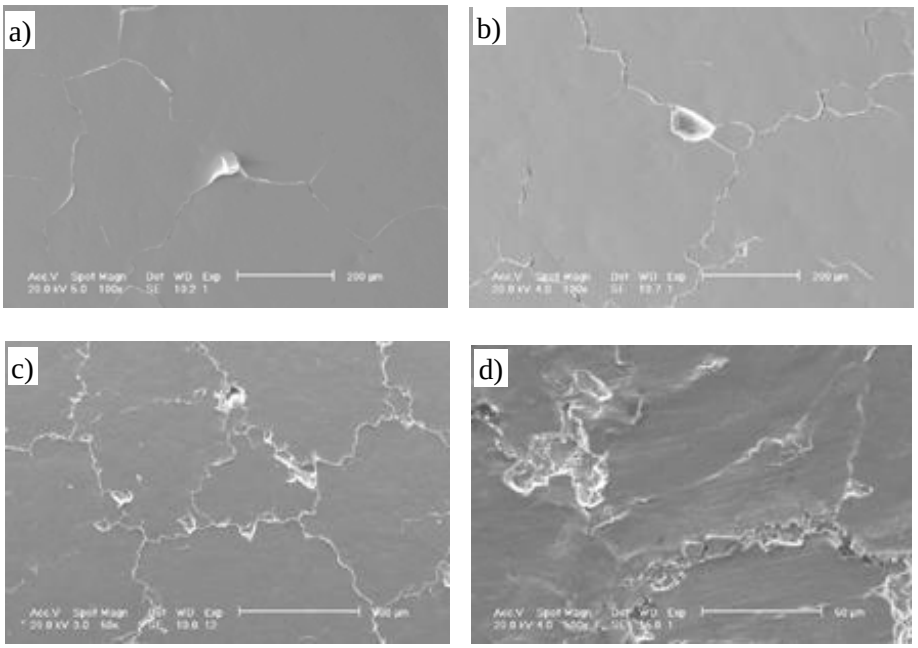
Przebieg erozji kawitacyjnej badanych intermetali (FeAl23, FeAl36, FeAl45) w okresie inkubacji charakteryzował się:

- odkształceniem plastycznym na powierzchni materiału;
- pęknięciami na granicy ziaren;
- punktowymi, pojedynczymi wżerami powstającymi w punktach potrójnych;
- bardzo małym ubytkiem masy.

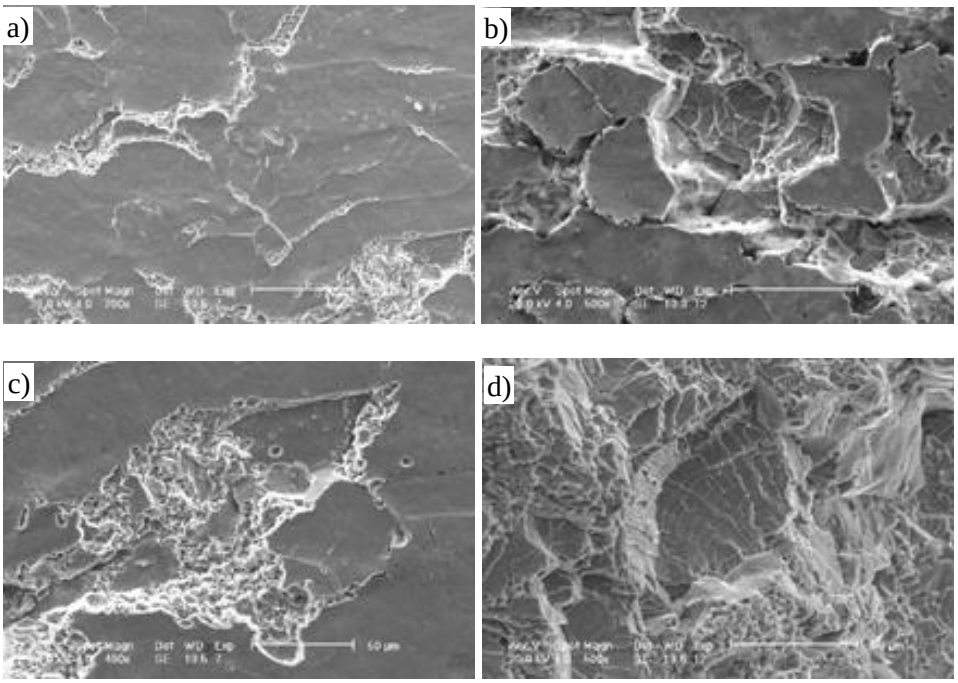
W okresie przyspieszonego ubytku masy wżery punktowe o nieregularnych kształtach łączą się ze sobą w kratery, rozpoczynając proces kruszenia się i wykruszania ziaren lub ich całych grup. Powodem takiego zjawiska są naprężenia zmęczeniowe na powierzchni materiału, efektem których są prążki zmęczeniowe przedstawione na rysunku 5d.



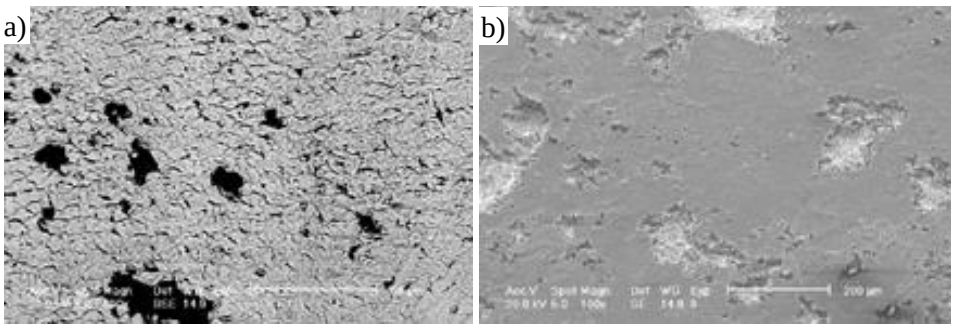
Rys. 3. Przebieg zużycia kawitacyjnego badanych stopów
Fig. 3. Results of cavitational erosion of inter-metallic alloys



Rys. 4. Efekty erozji kawitacyjnej w okresie inkubacji: a) wypiętrzania się ziaren, b) ubytki w punktach potrójnych, c) ubytki wzdłuż granic ziaren, d) kratery wzdłuż granic ziaren
Fig. 4. Effects of cavitational erosion in the incubation period: a) upheval of the grain, b) mass decrement in triple point, c) mass decrement edgewise of the grain, d) craters edgewise of the grain



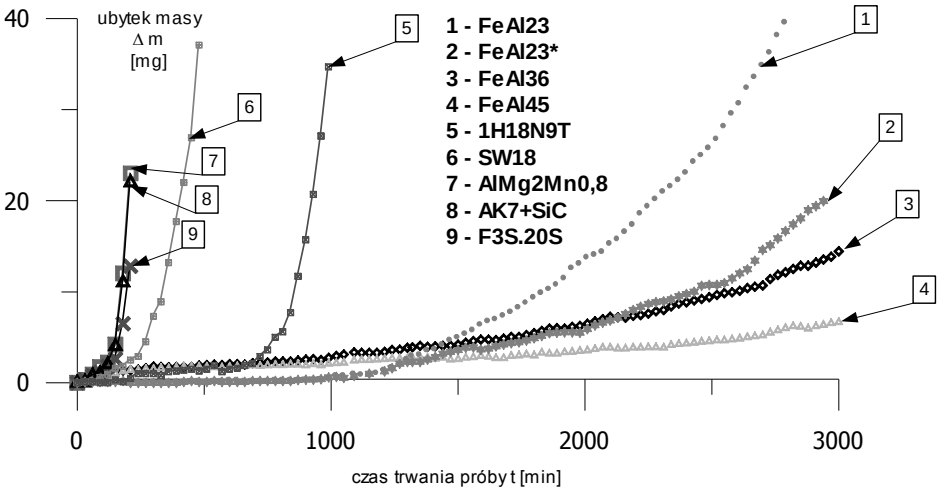
Rys. 5. Efekty erozji kawitacyjnej w okresie przyśpieszonego ubytku masy: a) odkształcenia plastyczne na powierzchni b) wykruszania się ziaren, c) kruszenia się ziaren, d) prążki zmęczeniowe
Fig. 5. Effects of cavitational erosion in the acceleration erosion rate period: a) permanent set of the surface, b) spalling of the grain, c) crushing of the grain, d) fatigue stripes shown



Rys. 6. Efekty erozji kawitacyjnej stopu FeAl23* po nadtopieniu laserowym warstwy wierzchniej: a) okres inkubacji, b) okres przyspieszonego ubytku masy
Fig. 6. Effects of cavitational erosion inter-metallic FeAl23 alloy after advantageous influence of laser-melted zone: a) incubation period, b) acceleration erosion rate period*

Próbki FeAl23 z laserową obróbką warstwy wierzchniej, ze względu na rozdrobnienie ziarna, mają odmienny obraz zniszczenia. Na ubytek masy w okresie inkubacji składają się drobne ubytki w postaci oderwania pojedynczych ziaren materiału o przeciętnej średnicy wynoszącej 10 μm i odłączenia się ziaren na krawędziach pęknięć. Na powierzchni materiału brak typowych odkształceń warstwy wierzchniej, charakterystycznych dla innych intermetali, tj. efektów ścinających wywołanych impulsami ciśnienia i odkształceń pojedynczych ziaren, powodujących pierwsze ubytki w punktach potrójnych. Dalsza erozja kawitacyjna powoduje stałe liniowe zwiększenie pola powierzchni narażonej na niszczące działanie strugi wody.

W celach porównawczych naniesiono na rysunku 7 wyniki badań zużycia kawitacyjnego innych materiałów, klasycznych (AlMg2Mn0,8, SW18, 1H18N9T) i niekonwencjonalnych (kompozytów AK7+SiC, F3S.20S), które testowano przy użyciu tego samego stanowiska i w tych samych warunkach.



Rys. 7. Porównanie wyników badań zniszczenia kawitacyjnego intermetali z innymi materiałami
Fig. 7. Comparison of the test results of cavitation erosion of inter-metallic alloys with other materials

Podsumowanie

Odporność kawitacyjna jest najczęściej definiowana poprzez porównanie kinetyki niszczenia materiałów badanych na danym urządzeniu. Im dłuższy jest okres inkubacji i mniejsza szybkość niszczenia – tym większa zdolność materiału do przeciwstawiania się niszczącemu działaniu kawitacji. Porównanie uzyskanych wyników z rezultatami testu innych materiałów, przeprowadzonych

w tych samych warunkach, pozwala stwierdzić, że badane intermetale posiadają dobrą odporność na zużycie kawitacyjne. Proces niszczenia kawitacyjnego zapoczątkowany zostaje w punktach potrójnych styku ziaren, powodując dalej siatkę pęknięć na ich granicach. W punktach tych występują odkształcenia zmęczeniowe. Orientacja sieci krystalicznej ziarna intermetalu warunkuje jego stopniowe kruszenie się lub całkowite oderwanie od powierzchni materiału.

Nieznacznie wyższą odporność na erozję wśród przebadanych stopów intermetalicznych wykazuje stop FeAl45, a więc o większej zawartości Al. W porównaniu z innymi materiałami, stop FeAl45 posiada wielokrotnie większą odporność na erozję kawitacyjną. Uzasadnione jest wykorzystywanie metod modyfikacji warstwy wierzchniej w celu poprawy odporności materiału na zużycie kawitacyjne. Próbki FeAl23, poddane nadtopieniu wiązką lasera w okresie inkubacji, wykazały porównywalną odporność jak stop FeAl36.

Literatura

1. Gireń B. G., *Wybrane technologie laserowej obróbki powierzchniowej i ich wpływ na wzrost odporności kawitacyjnej stali*, I Krajowa Konferencja „Inżynieria Materiałowa”, Gdańsk-Sobieszewo 1996, s. 219 – 226.
2. Gireń B. G., Szkodo M., Cenian A., *Cavitation resistance of 45 and 2Cr13 steels with laser deposited AlNi+SiC coatings*, International Conference on Environmental Degradation of Engineering Materials, Gdańsk-Jurata 1999, s. 105 – 112.
3. Głowacka M., *Próba określenia kryteriów odporności na erozję kawitacyjną materiałów metalowych*, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1977 (praca doktorska).
4. Głowacka M., Hucińska J., *Stan badań nad niszczeniem kawitacyjnym stopów metali i ich ochroną przed tym procesem*, Inżynieria Materiałowa, 2(2001)79.
5. Hucińska J., *Erozja kawitacyjna w świetle struktury materiałów metalowych*, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1977 (praca doktorska).
6. Kamiirisa H., *The Effect of Water Quality Characteristic on Cavitation Noise*, Fourth International Symposium on Cavitation, California Institute of Technology, Pasadena, CA USA 2001
7. Krzysztofowicz T., *Wpływ zjawiska kawitacji na zmiany własności fizycznych materiałów konstrukcyjnych*, Politechnika Gdańska, Gdańsk 1967 (praca doktorska).
8. Kusiński K., Tasak E., Kędzierski Z., *Kawitacyjne uszkodzenie powierzchni metalu pod działaniem ultradźwięku*, Zeszyty Naukowe AGH nr 352, Kraków 1972.
9. PN-86/H-04426 Erozja kawitacyjna. Nazwy, określenia i symbole.

10. Steller K., *Nowa koncepcja oceny odporności materiału na erozję kawitacyjną*, Zeszyty Naukowe Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku, Nr 175/1107/83, Gdańsk 1983.
11. Steller K., *O mechanizmie niszczenia materiałów podczas kawitacji*, Zeszyty Naukowe Instytutu Maszyn Przepływowych PAN, Gdańsk 1983, Nr 175/1107/83.
12. Steller K., *Pojęcia podstawowe, ze szczególnym uwzględnieniem pojęć dotyczących maszyn hydraulicznych*, Zeszyty Naukowe Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku, Nr 140/1057/82, Gdańsk 1982.
13. Steller J., Bugała R., *Wyniki Międzynarodowego Testu Erozyjnego a nowa koncepcja odporności kawitacyjnej materiałów*, I Krajowa Konferencja, Inżynieria Materiałowa, Gdańsk 1996.
14. Steller J., Kaczmarzyk P., *Fenomenologiczne modele przebiegu erozji kawitacyjnej*, I Pomorska Konferencja Naukowa „Inżynieria Materiałowa 2000", Gdańsk-Sobieszewo 2000.
15. Steller K., Krzysztofowicz T., *Metody testowania materiałów narażonych na działanie kawitacji*, Zeszyty Naukowe Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku, Nr 152/1072/82, Gdańsk 1982.
16. Tasak E., *Powierzchniowe zniszczenie i zmiany struktury metali wywołane kawitacyjnym oddziaływaniem cieczy*, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 1974 (praca doktorska).
17. Trevena D. H., *Cavitation and tension in liquids*, IOP Publishing Ltd, Bristol 1987.

Wpłynęło do redakcji w lutym 2005 r.

Recenzenci

dr hab. inż. Marian Jerzy Jósko
dr hab. inż. Oleh Klyus, prof. AM

Adresy Autorów

mgr inż. Robert Jasionowski
dr hab. inż. Janusz Grabian, prof. AM
Akademia Morska w Szczecinie
Instytut Nauk Podstawowych Technicznych

dr inż. Dariusz Zasada
Wojskowa Akademia Techniczna
Instytut Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej