

Alicja KRELLA, Janusz STELLER

Instytut Maszyn Przepływowych im. R. Szewalskiego PAN, Gdańsk

BADANIA DOŚWIADCZALNE EROZJI WYBRANYCH MATERIAŁÓW W ZALEŻNOŚCI OD OBCIĄŻENIA KAWITACYJNEGO

Słowa kluczowe

Kawitacja, erozja kawitacyjna, intensywność kawitacji, impulsy kawitacyjne.

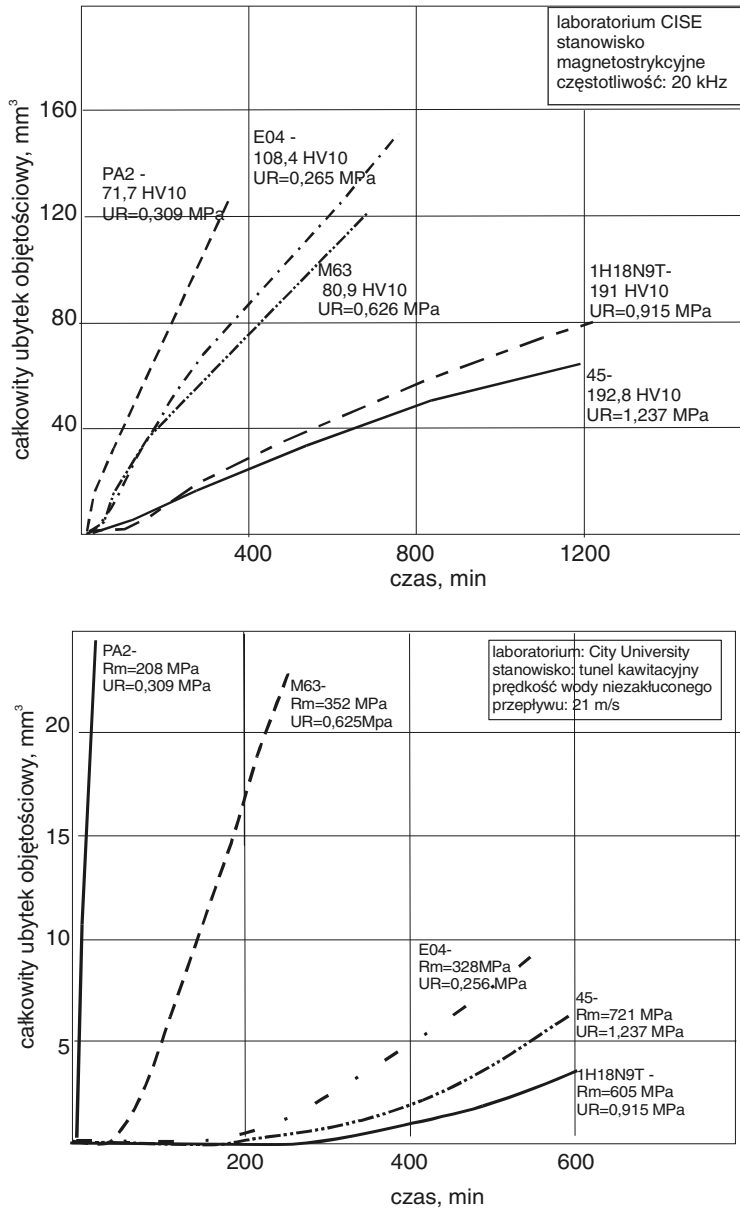
Streszczenie

Podsumowano wyniki badań własnych i obcych dotyczących związku między erozją materiału a jego obciążeniem kawitacyjnym oraz własnościami mechanicznymi. Wskazano, że miarą obciążenia kawitacyjnego może być strumień energii dostarczanej do jednostkowej powierzchni materiału przez implodujące pęcherzyki i wiry kawitacyjne, wyznaczany poprzez obróbkę cyfrową sygnału uzyskiwanego z czujników ciśnienia umieszczonych w strefie kawitacyjnej. Z uwagi na jakościowe zróżnicowanie przebiegu erozji w zależności od struktury materiału i obciążenia kawitacyjnego, pożądane jest jednak prognozowanie tego zjawiska w oparciu o wcześniej wyznaczoną odporność materiału na poszczególne frakcje amplitudowe rozkładu impulsów kawitacyjnych. Podano podstawowe informacje o stanowisku laboratoryjnym i technice pomiarowej służącej do uzyskania niezbędnych w tym celu danych doświadczalnych. Przedstawiono interpretację fizyczną oddziaływania wybranych frakcji na próbki żelaza E04 (Armco) i stopu PA2 (aluminium).

Wprowadzenie

Zjawisko kawitacji powstające przy dużych prędkościach przepływu cieczy powoduje spadek sprawności maszyn hydraulicznych, wzrost poziomu hałasu oraz erozję materiału. Przebieg erozji kawitacyjnej zależy od wielu czynników, m.in. od rodzaju materiału, intensywności zjawiska oraz rodzaju cieczy. Prace badawcze prowadzone nad znalezieniem zależności między mechanicznymi i wytrzymałościowymi parametrami materiałów (twardością, wytrzymałością R_m) a odpornością kawitacyjną nie dały zadowalających wyników (rys. 1). Stosunkowo najlepszą korelację uzyskiwano [1] wiążąc odporność kawitacyjną z energią deformacji wyznaczoną z wykresu wydłużenie/naprężenie. Jednak stosując ten parametr do wyników z Międzynarodowego Kawitacyjnego Testu Erozyjnego (ICET) nie otrzymano zadowalających wyników, aby stanowiła ona podstawę do porównań odporności kawitacyjnej materiałów. W związku z tym odporność ta wyznaczana jest na podstawie obserwacji przebiegu erozji na laboratoryjnych stanowiskach kawitacyjnych. Stosowane w praktyce stanowiska charakteryzują się różną konstrukcją, parametrami pracy i obciążenia kawitacyjnego badanej próbki. Ocena odporności ma zwykle charakter względny i polega na porównywaniu przebiegu krzywej erozyjnej badanego materiału z krzywą erozyjną materiału uznanego za wzorcowy. W użyciu są też wskaźniki jednoliczbowe, takie jak czas inkubacji oraz maksymalna chwilowa, czy kumulacyjna szybkość erozji, jednak i one mają charakter względny i są zależne od stanowiska badawczego. Wyniki testu ICET potwierdziły po raz kolejny dużą rozbieżność ocen odporności na podstawie badań na różnych stanowiskach lub na takich samych stanowiskach pracujących przy różnych parametrach (rys. 1). Przyczynę takiego stanu rzeczy upatruje się w jakościowo różnym rozkładzie impulsów kawitacyjnych obciążających erodowany materiał.

Przyjęto koncepcję [2], że obciążenie kawitacyjne można traktować jako superpozycję oddziaływań poszczególnych frakcji amplitudowych rozkładu impulsów kawitacyjnych, a odporność kawitacyjną materiału można scharakteryzować poprzez krzywe erozyjne odpowiadające poszczególnym frakcjom (krzywe monofrakcyjne). Zakłada się, że dla przebiegu zjawiska kluczowe znaczenie ma całkowita energia deformacji, kumulowana w materiale wskutek oddziaływania poszczególnych frakcji. W wyniku prac prowadzonych w ramach jednego z projektów badawczych KBN opracowano metodę wyznaczania krzywych erozyjnych odpowiadających poszczególnym frakcjom obciążenia kawitacyjnego na podstawie badań wybranego materiału w różnych warunkach, a także metodę wyznaczenia obciążenia kawitacyjnego (rozkładu impulsów kawitacyjnych) na podstawie badań różnych materiałów w tych samych warunkach. Opracowana technika stanowić może klucz do uzyskania kompatybilności między stanowiskami o różnej konstrukcji i istotny krok w kierunku ilościowego przewidywania odporności materiałów w warunkach przemysłowych na podstawie badań laboratoryjnych.



Rys. 1. Krzywe erozyjne otrzymane w Międzynarodowym Kawitacyjnym Teście Erozyjnym

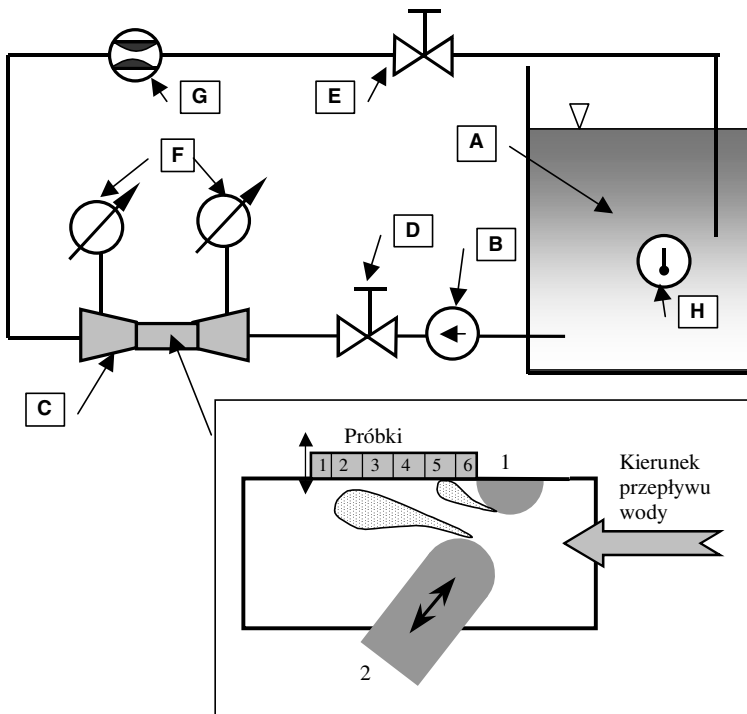
W artykule przedstawione zostały wyniki pomiarów kawitacyjnych wykonane w tunelu ze szczelinowym wzbudnikiem kawitacji, przeprowadzono badania erozyjne stopu aluminium PA2 oraz żelaza Armco. Wyznaczone rozkłady impulsów posłużyły do wyznaczenia gęstości strumienia energii, a także prze-

przewodzenia podziału pęcherzyków na frakcje odpowiedzialne za określony stopień erozji. Następnie przy określonych parametrach przepływu zostały przeprowadzone badania odporności kawitacyjnej.

1. Badania obciążeń i przebiegu erozji kawitacyjnej na stanowisku ze szczelinowym wzbudnikiem kawitacji

1.1. Stanowisko badawcze

Badania doświadczalne przeprowadzono w laboratorium IMP PAN, w tunelu ze szczelinowym wzbudnikiem kawitacji (rys. 2). W tunelu tym, bezpośrednio za szczeliną o regulowanej szerokości umieszcza się zamiennie zestaw próbek poddawanych oddziaływaniu kawitacji lub wkładkę z czujnikami piezoelektrycznymi. Tunel zasilany jest ze zbiornika otwartego o pojemności 8 m³ za pomocą trójstopniowej pompy odśrodkowej o nominalnej wysokości podnoszenia 120 m i regulowanej prędkości obrotowej.



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego: A – zbiornik wyrównawczy, B – pompa obiegowa, C – tunel kawitacyjny, D – zawór kulowy, E – zasuwę regulacyjną, F – pomiar ciśnienia, G – pomiar natężenia przepływu, H – pomiar temperatury; 1, 2 – przeszkoda (stała) i przeciwpreszkoda (regulowana)

Przy zadanym położeniu próbek, warunki kawitacyjne wewnątrz komory określone są szerokością szczeliny, ciśnieniem w przekroju wlotowym i wylotowym oraz temperaturą cieczy. Cieczą roboczą jest woda wodociągowa, której temperatura utrzymywana jest na stałym poziomie (zwykle $20 \pm 2^\circ\text{C}$). Stabilizację warunków na odpływie z komory badawczej umożliwia przelew umieszczony wewnątrz zbiornika wyrównawczego. W razie potrzeby ciśnienie w komorze można podwyższyć za pomocą zasuw regulacyjnej.

Wymiary przekroju komory badawczej wynoszą 45×50 mm. Rozmiary i położenie próbek dobiera się tak, by zapewnić możliwie jednorodny przeszerzenie rozkład obciążenia kawitacyjnego. Powierzchnia dotychczas stosowanych próbek posiadała wymiary 16×45 mm.

1.2. Pomiar impulsów kawitacyjnych

Pomiar impulsów kawitacyjnych obciążających powierzchnię próbki realizowano początkowo za pomocą przetworników piezoelektrycznych PCB. Przetworniki te umieszczano w specjalnej wkładce (próbce „głuchej”) instalowanej naprzemiennie z zestawem próbek erozyjnych (w miejscu instalacji każdej próbki umieszczano jedną parę przetworników). Do analizy amplitudowej impulsów wykorzystywano analizator dwukanałowy *ONO SOKKI CF-910* o częstotliwości próbkowania 100 kHz, a następnie komputer przenośny z oprogramowaniem własnym i 12-bitową kartą pomiarową LC 030 1612 firmy *Ambex*. Z uwagi na wysokie koszty pozyskania przetworników PCB i szybkie uszkodzenie membrany w wyniku oddziaływania kawitacji, podczas każdej serii pomiarowej wykorzystywano tylko jedną parę przetworników. Oznaczało to, że po każdej rejestracji stanowisko należało zatrzymać, aby przełożyć przetworniki w kolejne położenie, a następnie ponownie je uruchomić.

Celem umożliwienia badań w warunkach nasilonej kawitacji bez nadmiernego wzrostu kosztów zdecydowano się na pomiar z użyciem czujników własnych, wykonywanych z dostępnej na rynku folii piezoelektrycznej. Początkowo przewidywano, że czujniki będą wykonywane w sposób opisany przez Soyamę i Lichtarowicza [3], w postaci pasków wklejanych w rowki na powierzchni wkładki pomiarowej i wymienianych po stwierdzeniu uszkodzenia kawitacyjnego. Ostatecznie od zamiaru tego odstąpiono i czujniki wykonano umieszczając folię piezoelektryczną w części czołowej trzpienia wykonanego z poliwęglanu *ERTA PC*, a następnie pokrywając je żywicą epoksydową *UHU Plus 300 kg Epoxy*. Wzorcowanie przetworników prowadzono metodą uderzenia hydraulicznego, przy użyciu urządzenia wzorowanego na kalibratorze 913B02 firmy PCB Piezotronics Inc [4].

Podczas badań prowadzonych w tunelu kawitacyjnym sygnał z przetwornika jest wzmacniany przez wzmacniacz ładunku 2635 firmy *Brüel & Kjaer*, a następnie przekazywany do dwukanałowej, 8-bitowej karty pomiarowej T12840

firmy *Intelligente Meßtechnik GmbH*. Karta ta umożliwiła próbkowanie z częstotliwością do 20 MHz. Częstotliwość próbkowania podczas pomiaru impulsów kawitacyjnych wynosiła 1 MHz. Zarówno akwizycję danych, jak i ich dalszą obróbkę – wyznaczenie histogramów i obróbkę statystyczną – prowadzono z użyciem oprogramowania własnego.

Pomiary impulsów kawitacyjnych prowadzono pod ciśnieniem bezwzględnym wynoszącym odpowiednio $p_1 = 800, 1000, 1050, 1100, 1150$ i 1200 kPa przed komorą kawitacyjną oraz $p_2 = 120 \div 130$ kPa za komorą. Szerokość szczeliny między przeszkodami wynosiła 5 mm. Z punktu widzenia celów niniejszej pracy, najistotniejsze były wyniki przy ciśnieniach $1200/130$ kPa oraz $1000/130$ kPa, przy których prowadzono również badania erozyjne.

Wyniki wielokrotnych badań pozwoliły ostatecznie na ustalenie amplitudowego rozkładu impulsów kawitacyjnych odpowiadającego ww. warunkom, wykonanie analiz omówionych w następnym rozdziale niniejszej pracy oraz przeprowadzenie testów oprogramowania do wyznaczania odporności materiałów na poszczególne frakcje obciążenia kawitacyjnego [5].

1.3. Przykładowe przebiegi i rozkłady impulsów kawitacyjnych

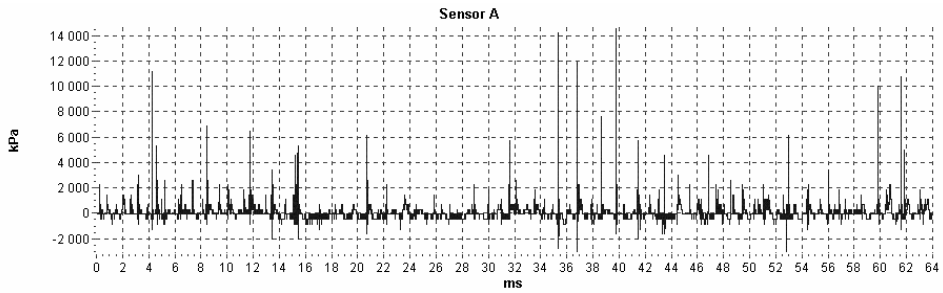
Na rys. 3, 4 przedstawiono przykładowy przebieg czasowy, histogram zarejestrowanych impulsów kawitacyjnych oraz rozkład intensywności kawitacji z podziałem na frakcje impulsów w różnych odległościach od wzbudnika kawitacji. Wyznaczone histogramy rozkładów amplitudowych w różnych odległościach od wzbudnika kawitacji oraz przy różnych wartościach ciśnień przed komorą kawitacyjną pozwoliły wyodrębnić poszczególne frakcje impulsów kawitacyjnych odpowiedzialnych za określony stopień erozji.

Wyznaczone przebiegi czasowe oraz histogramy pozwoliły określić zakresy amplitudowe dla różnych stref obłoku kawitacyjnego oraz wyznaczyć wartości intensywności kawitacji w tych strefach korzystając ze wzoru:

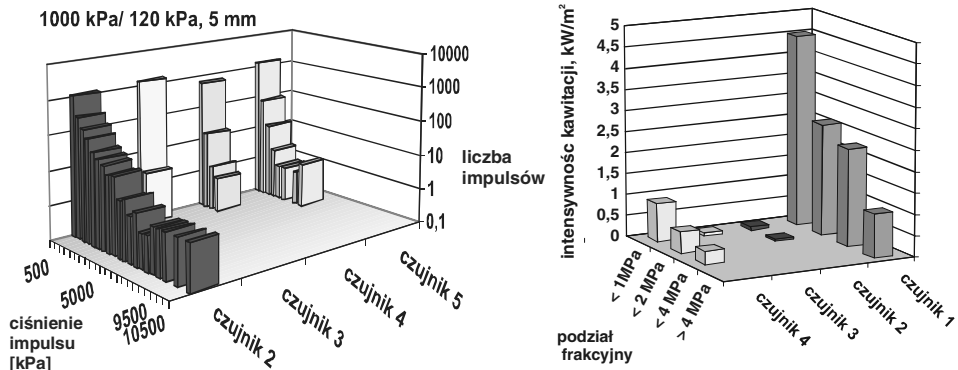
$$J = \frac{\kappa}{T} \cdot \frac{1}{2\rho c} \sum_{k=1}^M n_k p_k^2$$

gdzie:

- κ – współczynnik proporcjonalności, $\kappa = 10^{-5}$ s,
- T – całkowity czas pomiaru,
- ρ – gęstość,
- c – prędkość dźwięku w ośrodku,
- M – ilość przedziałów ciśnienia,
- n_k – ilość impulsów w jednym przedziale,
- p_k – wartość amplitud ciśnienia w k-tym przedziale.



Rys. 3. Przebieg czasowy rejestrowanych impulsów kawitacyjnych, ciśnienie $p_1 = 1200$ kPa, $p_2 = 130$ kPa



Rys. 4. Histogram rozkładu amplitudowego impulsów zarejestrowany przy ciśnieniu $p_1 = 1000$ kPa, $p_2 = 120$ kPa i szerokości szczeliny 5 mm w czasie 1 s a), podział frakcyjny b)

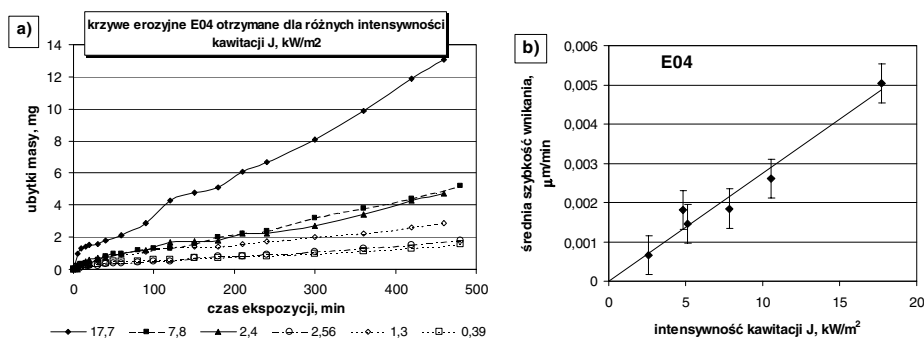
Tabela 1. Obciążenie kawitacyjne w poszczególnych strefach obłoku kawitacyjnego przy $p_1 = 1000$ i 1200 kPa, $p_2 = 120$ kPa

Ciśnienie przed/za komorą kawitacyjną;	Wartość gęstości strumienia energii J, kWm ⁻² , w różnych odległościach od szczeliny kawitacyjnej, mm				
	8	24	40	56	72
1000/120 kPa	10,93	5,12	0,026	0,068	0,72
1200/120 kPa	25,85	9,56	0,024	0,083	1,3

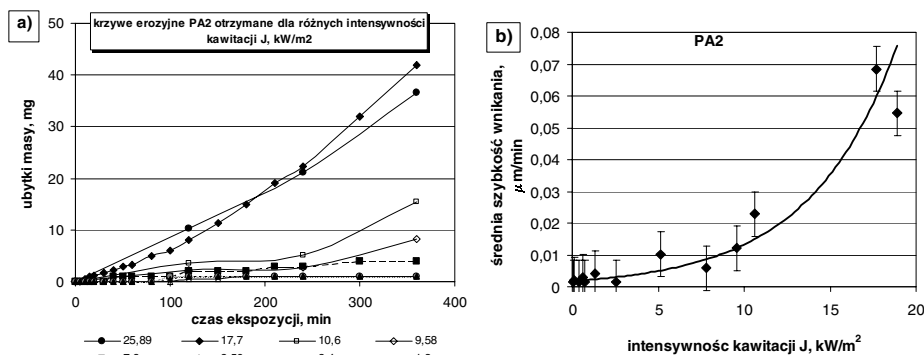
2. Badania erozyjne i analiza wyników

W celu wyznaczenia wpływu oddziaływania poszczególnych frakcji impulsów kawitacyjnych na erozję przeprowadzono wstępne badania na materiałach referencyjnych: żelazie Armco ($R_e = 212$ MPa, $R_m = 270$ MPa, $A_5 = 40,5\%$,

$Z = 73\%$, twardość 140HV) oraz stopie aluminium PA2 ($R_e = 151$ MPa, $R_m = 204$ MPa, $A_5 = 17\%$, twardość 40 HB). Zestawy próbek (poszczególne próbki znajdowały się w innej strefie chmury kawitacyjnej i poddane były innemu obciążeniu) badano przy ciśnieniu przed komorą $p_1 = 1000$ i 1200 kPa, ciśnieniu za komorą $p_2 = 125$ kPa. Wszystkie próbki były dokładnie czyszczone i ważone na wadze analitycznej z dopuszczalnym błędem granicznym dla obciążenia do 50 g wynoszącym ± 1 mg, a dla obciążenia do 70 g $\pm 1,4$ mg. Na rys. 5 i 6 przedstawiono krzywe erozyjne otrzymane dla E04 i PA2 odpowiednio badanych przy różnych intensywnościach kawitacji oraz zależność średniej szybkości wnikania od intensywności kawitacji.



Rys. 5. Krzywe erozyjne żelaza Armco E04 badanego przy różnych intensywnościach kawitacji (a), zależność średniej szybkości wnikania erozji od intensywności kawitacji (b)



Rys. 6. Krzywe erozyjne stopu PA2 badanego przy różnych intensywnościach kawitacji (a), zależność średniej szybkości wnikania erozji od intensywności kawitacji (b)

Przedstawione krzywe erozyjne wykazują zadowalającą zgodność postępu ubytków masy z intensywnością kawitacji. Frakcja 1 charakteryzuje się małą rozpiętością wahań amplitudy oraz niskimi wartościami tych amplitud. W przy-

padku działania na materiał impulsów frakcji 1 (intensywności kawitacji dochodzące do 1 kW/m^2) powierzchnia próbki uległa mechanicznemu czyszczeniu przez wodę, ubytki masy są nieznacznie większe od błędu pomiarowego wagi.

Próbki poddane działaniu frakcji 1 i 2 ($J = 1\text{--}3 \text{ kW/m}^2$) impulsów kawitacyjnych uległy nieznacznej erozji materiału (ubytki mieszczą się w granicach 2–3 mg dla E04 i dla PA2). Zakładając, że poszczególne frakcje impulsów są odpowiedzialne za określony stopień zniszczenia materiału, otrzymujemy, że impulsy o amplitudach dochodzących do 2 MPa działające z zakresie odkształceń sprężystych powodują już powstawanie pęknięć i ich propagację. Nieznaczna wielkość ubytków wskazuje, że jest to niszczenie długoczasowe i niegroźne pod względem wytrzymałościowym.

Żelazo Armco oraz stop PA2 poddane działaniu frakcji 1, 2 i 3 (przy intensywności kawitacji $J = 4\text{--}8 \text{ kW/m}^2$) ulegają nieznacznie większemu uszkodzeniu, przy czym ujawnia się już wpływ własności wytrzymałościowych na skutki erozji. W przypadku żelaza Armco ubytki mieszczą się w granicach 3–4 mg, natomiast w przypadku stopu aluminium PA2 ubytki wynoszą 4–7 mg. Zwiększone ubytki masy zależą zarówno od występowania frakcji 3 w tych warunkach obciążenia jak i od zwiększonej liczby impulsów frakcji 1 i 2. Jak w przypadku żelaza Armco wzrost ubytków masy jest niewielki w porównaniu ze niszczeniem w wyniku oddziaływania frakcji 1 i 2, tak w przypadku stopu PA2 wzrost ten jest wyraźny. Świadczy to, że wpływ pojedynczych impulsów frakcji 3 jest dla E04 porównywalny z wpływem zwiększonej liczby impulsów frakcji 1 i 2. Natomiast w przypadku PA2 wyraźnie zwiększone ubytki można przypisać pojawieniu się impulsów frakcji 3, które przyczyniają się do wzmożonej degradacji niż wynika to ze zmęczenia materiału w wyniku zwiększonej liczby impulsów frakcji 1 i 2.

Próbki badane przy intensywnościach $8\text{--}11 \text{ kW/m}^2$ poddane były działaniu frakcji 1, 2, 3 i 4. Tutaj różnice w ubytkach masy żelaza Armco i stopu PA2 są jeszcze wyraźniejsze. Ubytki masy dla E04 mieszczą się w granicach 4–7 mg, natomiast w przypadku PA2 wynoszą 8–15 mg. Potwierdza to wcześniejsze obserwacje, że stop PA2 jest bardziej czuły na wzrost amplitudy impulsów.

Zależności średniej szybkości erozji od intensywności kawitacji (rys. 4b i 5b) przedstawiają wpływ całkowitej energii niszczenia doprowadzanej do materiału przez implodujące w materiał pęcherzyki na degradację materiału. W przypadku żelaza Armco otrzymano zależność liniową, natomiast w przypadku stopu aluminium PA2 zależność wykładniczą, która potwierdza przekonanie, że impulsy wysokoamplitudowe, które jednorazowo doprowadzają najwięcej energii niszczenia, przyczyniają się do wzmożonej erozji materiału.

Bibliografia

1. Hammitt F.G.: Cavitation and multiphase flow phenomena. Mc Graw-Hill 1980.
2. Steller J., Krella A., Koronowicz J., Janicki W.: Towards quantitative assessment of material resistance to cavitation erosion. *Wear* 258 (2005) 604–613.
3. Soyama H., Lichtarowicz A., Momma T., Williams E.J.: A new calibration method for dynamically loaded transducers and its application to cavitation impact measurement, *Trans.ASME, J.Fluids.Eng.* 120 (December 1998) 712–718.
4. Koronowicz J.: Wykonanie oraz testowanie kalibratora hydrodynamicznego typu JK-K-2002 do pomiarów ciśnień dynamicznych czujników foliowych PVDF i PCB, Opr. IMP PAN nr. 3007/2003.
5. Steller J., Krella A.: Ocena odporności kawitacyjnej materiałów metodą frakcyjną – wyniki badań rozpoznawczych i wstępnych, *Problemy Eksploatacji*, 2005.

Recenzent:

Andrzej BŁASZCZYK

Experimental investigation of selected materials erosion depending on cavitation loading

Summary

The results of research on correlation between erosion of materials, their cavitation load and some mechanical properties as performed by the authors of this and other papers are summarised. It is indicated that the cavitation load may be evaluated using the flux of energy transferred to a unit material surface by collapsing cavitation bubbles and vortices. This flux of energy can be determined in results of digital processing of the signal delivered by pressure pickups located within the cavitation zone. However, due to qualitative differentiation between erosion course depending on material structure and cavitation load, it is advisable to predict this phenomenon basing on the previously determined material resistance to the individual amplitude fractions of cavitation pulses distribution. Basic information on laboratory rig and experimental technique applied in order to acquire the necessary data is given. Finally, physical interpretation of contribution delivered by selected amplitude fractions to erosion of E04 iron (Armco) and PA2 alloy (aluminium) is presented.