

**Janusz STELLER, Alicja KRELLA**

Instytut Maszyn Przepływowych im. R. Szewalskiego PAN, Gdańsk

## **OCENA ODPORNOŚCI KAWITACYJNEJ MATERIAŁÓW METODĄ FRAKCYJNĄ**

### **Słowa kluczowe**

Kawitacja, erozja kawitacyjna, odporność kawitacyjna.

### **Streszczenie**

Przedstawiono koncepcję frakcyjnej odporności kawitacyjnej materiałów, a także podstawowe zasady wyznaczania odporności kawitacyjnej materiału na poszczególne frakcje obciążenia kawitacyjnego, prognozowania krzywych erozyjnych przy zadanym obciążeniu oraz odtwarzania tego obciążenia na podstawie krzywych erozyjnych materiałów wzorcowych. Rozważania te zilustrowano wynikami analizy krzywych erozyjnych stopu aluminium (PA2) oraz żelaza Armco (E04) uzyskanych w tunelu ze szczelinowym wzbudnikiem kawitacji. Wyniki analizy wskazują jednoznacznie na prawidłowe funkcjonowanie opracowanego oprogramowania.

### **Wprowadzenie**

Przez odporność kawitacyjną rozumie się zwykle zdolność materiału do przeciwstawienia się niszczącemu działaniu zjawiska kawitacji. Zdolność ta zależy od składu chemicznego i fazowego materiału, jego cech strukturalnych – ze szczególnym uwzględnieniem warstwy wierzchniej – oraz od charakteru obciążenia kawitacyjnego. Ilościowa definicja odporności kawitacyjnej jest wciąż przedmiotem kontrowersji. Jako miarę tej odporności przyjmuje się często takie parametry krzywych erozyjnych, jak nominalna długość czasu inkuba-

cji erozji  $\tau_{inc}$  [1] (określana przez PN-86/H-04426 [2], jako czas inicjacji procesu erozyjnego), czas progowy niezbędny do osiągnięcia określonej średniej głębokości wnikania erozji  $t_h$ , odwrotność maksymalnej chwilowej szybkości wnikania erozji  $MDPR_{max}$ , czy też tzw. trwałość kawitacyjną  $\delta_{cav}$  [3]. Definicję nie odnoszącą się w sposób jawny do konkretnych warunków kawitacyjnych zaproponował w latach sześćdziesiątych A.P.Thiruvengadam [4], który wprowadził pojęcie wytrzymałości erozyjnej  $S_e$  rozumianej jako stosunek energii zaabsorbowanej przez materiał do ubytku objętościowego w ustalonym okresie niszczenia.

Próby powiązania odporności kawitacyjnej materiałów z ich własnościami mechanicznymi doprowadziły do połowicznych sukcesów. Według F.G. Hammitta i in. [5], z parametrem  $1/MDPR_{max}$  najlepiej koreluje energia deformacji zdefiniowana wzorem

$$UR = R_m^2/2E \quad (1)$$

gdzie  $R_m$  oznacza wytrzymałość na rozciąganie, zaś  $E$  – moduł sprężystości (Younga). Jest rzeczą zmienną, że korelacja z energią deformacji określoną poprzez bezpośrednie całkowanie pola pod krzywą wydłużenie/napężenie jest znacznie gorsza.

Generalnie panuje powszechne przekonanie, że ocena odporności kawitacyjnej materiału w oparciu o wymienione wyżej wskaźniki jednoliczbowe jest bardzo jednostronna. Z tego powodu obowiązujące normy ASTM [1,6] i PN [7] zalecają opieranie tej oceny na przebiegu krzywych erozyjnych wyznaczonych przynajmniej do chwili osiągnięcia maksymalnej kumulacyjnej szybkości niszczenia. Jednak nawet taki sposób postępowania okazuje się zawodny, gdy obciążenie materiału w warunkach eksploatacyjnych różni się zdecydowanie od obciążenia w warunkach laboratoryjnych, co – jak wiadomo – jest sytuacją typową. Świadectwem takiego stanu rzeczy są między innymi wyniki Międzynarodowego Kawitacyjnego Testu Erozyjnego (ICET), wskazujące na zależność uszeregowania badanych materiałów pod względem odporności kawitacyjnej od zastosowanego obciążenia [8, 9].

Obłok kawitacyjny oddziałuje na powierzchnię materiału poprzez silnie zlokalizowane impulsy siły o losowym rozkładzie amplitudowym i przestrzennym, których źródłem są mikrostrugi kumulacyjne i fale uderzeniowe powstające w wyniku implozji pęcherzy i wirów kawitacyjnych. Dlatego, w świetle przytoczonych wyżej obserwacji A.P.Thiruvengadama i F.G.Hammitta, J.Kirejczyk zaproponował pod koniec lat 70., by za miarę obciążenia kawitacyjnego przyjąć gęstość strumienia energii docierającego w wyniku tego procesu powierzchni materiału [10]. Z rozważań opartych o teorię uderzenia hydraulicznego wynika, że wielkość ta jest proporcjonalna do wskaźnika intensywności kawitacji zdefiniowanego wzorem

$$ME = \frac{1}{A_0} \frac{\tau}{2\rho c} \sum_{i=1}^N v_i F_i^2 \quad (2)$$

gdzie  $A_0$  i  $\tau$  oznaczają współczynniki proporcjonalności, które mogą być interpretowane, jako pole powierzchni membrany czujnika referencyjnego i średni czas trwania impulsu kawitacyjnego,  $\rho$  i  $c$  oznaczają gęstość i szybkość rozchodzenia się fali ciśnienia w cieczy, natomiast  $v_i$  jest liczbą impulsów siły o amplitudzie  $F_i$  rejestrowanych w jednostkowym czasie na jednostkowej powierzchni.

Jeśli przy pomiarze posługiwać się czujnikami wzorcowymi w jednostkach ciśnienia, to wyrażenie (2) należy zastąpić wyrażeniem

$$ME = \frac{A}{A_0} \frac{\tau}{2\rho c} \sum_{i=1}^N n_i p_i^2 = \sum_{i=1}^N ME_i \quad (3)$$

gdzie  $n_i$  jest liczbą impulsów o amplitudzie  $p_i$  rejestrowanych w jednostce czasu przez czujnik o powierzchni membrany  $A$ . Autorzy niniejszej pracy przyjęli, że średni czas trwania impulsu kawitacyjnego wynosi  $\tau = 10^{-5}$  s. Za czujnik referencyjny przyjęto czujnik piezoelektryczny *PCB Piezotronics 113A72* o średnicy czynnej membrany  $d_0 = 4,5$  mm, skąd wynika wartość  $A_0 = 15,9$  mm<sup>2</sup>.

Liczne wyniki badań własnych i obcych, np. [11÷13], wskazują, że wskaźnik  $ME$  wykazuje często dobrą korelację z natężeniem erozji, a ilość energii dostarczonej do materiału jest bardziej uniwersalnym parametrem procesu erozyjnego niż czas ekspozycji. Ważność tego stwierdzenie ma jednak swoje ograniczenia. Wspomniane wcześniej przypadki inwersji krzywych erozyjnych dają się wyjaśnić jedynie różnicami jakościowymi w strukturze obciążenia kawitacyjnego występującego na stanowiskach objętych programem ICET. Zasadnicze znaczenie może mieć tu różna wrażliwość materiału na poszczególne frakcje rozkładu amplitudowego impulsów kawitacyjnych. Obserwacja ta stała się podstawą dla sformułowanej jeszcze w latach 90. koncepcji frakcyjnej odporności kawitacyjnej materiałów [14].

## 1. Koncepcja metody

Punktem wyjścia dla prezentowanych niżej rozważań jest przekonanie, że dla oceny odporności kawitacyjnej materiałów podstawowe znaczenia ma ilościowe prognozowanie przebiegu erozji w zależności od obciążenia kawitacyjnego. W latach siedemdziesiątych i później opracowano szereg modeli fenomenologicznych opisujących przebieg erozji za pomocą wzorów, w których po prawej stronie występowała pewna funkcja analityczna czasu ekspozycji i parametrów materiałowych. Na uwagę zasługują między innymi modele J. Noskiewiça [15], K. Stellera [1] i L. Sitnika [16,17], które były przedmiotem

szczególnej analizie porównawczej dokonanej przez jednego z autorów [18]. Model J. Noskiewicza oparty jest na obserwacji, że krzywa szybkości chwilowej erozji przypomina przebieg drgań tłumionych oscylatora harmonicznego. Model K. Stellera nawiązuje bezpośrednio do koncepcji A. Thiruvengadama i zakłada, że odporność (wytrzymałość) na erozję kawitacyjną maleje podczas ekspozycji w sposób opisany pewną funkcją wykładniczą czasu. Model L. Sitnika oparty jest na założeniach dotyczących odstępów czasowych między oderwaniami cząstek erodowanego materiału. Przy próbach modelowania przebiegu erozji liczni autorzy, np. [19, 20], korzystają również z funkcji Weibulla, znanej dobrze z zastosowań w analizie zmęczeniowej. Bardziej zaawansowane modele [21, 22], nawiązujące bezpośrednio do stochastycznej natury zjawiska, opisują proces erozji za pomocą równań całkowych lub całkowo-różniczkowych. Złożony charakter procesu erozji kawitacyjnej sprawia, że zwykle nie prowadzi to do wzrostu praktycznej użyteczności i wiarygodności opisu w porównaniu z prostymi modelami fenomenologicznymi.

Wyniki wspomnianej analizie porównawczej wykazały, że do opisu przebiegu erozji kawitacyjnej szczególnie dobrze nadaje się model zaproponowany przez L. Sitnika. Do jego istotnych zalet, oprócz przekonujących podstaw fizycznych i dość dobrego dopasowania krzywej modelowej do punktów doświadczalnych, należy również możliwość skonstruowania prostego i niezawodnego algorytmu umożliwiającego znalezienie parametrów krzywej modelowej. Modele stosujące dystrybuantę rozkładu Weibulla do modelowania przebiegu czasowego ubytku objętości brano pod uwagę tylko w rozważaniach wstępnych, wychodząc z założenia, że funkcja modelowa nie powinna być ograniczona asymptotą poziomą.

Zasadnicze założenia modelu L. Sitnika można sformułować następująco:

1. Erozja kawitacyjna jest procesem stochastycznym, polegającym na wyrwaniu cząstek o stałej objętości z losowym odstępem czasowym.
2. Chwilowe natężenie erozji,  $d(\Delta V)/dt$ , jest proporcjonalne do intensywności uszkodzeń rozumianej w sensie analizy procesów zmęczeniowych [23], tzn. jako gęstość prawdopodobieństwa, że w określonym miejscu dojdzie do oderwania cząstki, pod warunkiem że nie doszło do niego wcześniej.
3. Czas ekspozycji, po którym dochodzi do wyrwania cząstki z warstwy wierzchniej materiału, określony jest zmienną losową  $t$  z dystrybuantą

$$F(t) = 1 - \exp\left\{-\alpha[\ln(t/t_0 + 1)]^\beta\right\} \quad (4)$$

gdzie  $\alpha$ ,  $\beta$  i  $t_0$  są stałymi parametrami tego rozkładu.

Założenie (2) ma znaczenie fundamentalne – oznacza, że po wyrwaniu każdej cząstki, cząstka następna może zostać wyrwana z każdego miejsca powierzchni z jednakową gęstością prawdopodobieństwa, określoną równaniem

$$\lambda(t) = -f(t)/[1 - F(t)] = F'(t)/[1 - F(t)] \quad (5)$$

Podstawiając wyrażenie (4) do (5) i dokonując odpowiedniego całkowania dowodzi się łatwo, że przebieg erozji w czasie można opisać funkcją

$$\Delta V = \Delta V_0 [\ln(t/t_0 + 1)]^\beta \quad (6)$$

gdzie  $\Delta V_0$  jest pewną objętością charakterystyczną, zależną od pola obciążonej powierzchni. Jak wspomniano już wcześniej, wzór ten dość dobrze przybliża wiele krzywych doświadczalnych. Według L. Sitnika [17], dalszą poprawę dopasowania można uzyskać licząc czas  $t$  od chwili zakończenia okresu inkubacji  $t_{inc}$ , który traktowany jest jako dodatkowy parametr funkcji modelowej<sup>1</sup>.

W przypadku gdy mamy do czynienia z obciążeniem kawitacyjnym o stałej strukturze amplitudowej, równanie (6) zastąpić można równaniem

$$\Delta V = \Delta V_0 [\ln(E/E_0 + 1)]^\beta \quad (7a)$$

lub

$$MDP = MDP_0 [\ln(Y/Y_0 + 1)]^\beta \quad (7b)$$

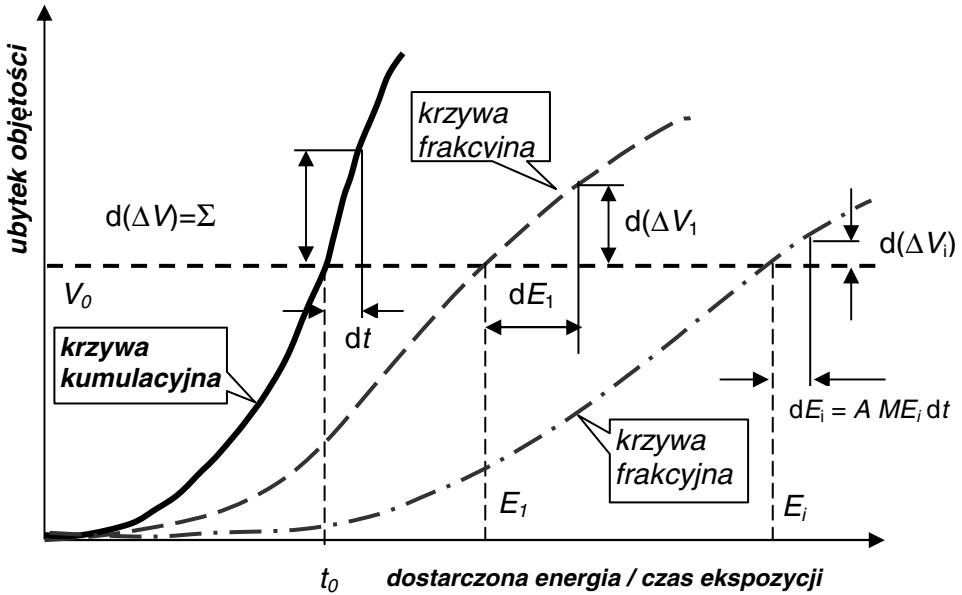
gdzie  $MDP = \Delta V / A$  oznacza średnią głębokość wnikania erozji na powierzchni  $A$ ,  $MDP_0 = \Delta V_0 / A$  jest odpowiednim współczynnikiem proporcjonalności,  $E = A \cdot ME \cdot t$  i  $E_0 = A \cdot ME \cdot t_0$  oznaczają wielkości proporcjonalne do energii dostarczonej do powierzchni  $A$  w czasie  $t$  i  $t_0$ , natomiast  $Y = ME \cdot t$  i  $Y_0 = ME \cdot t_0$  – wielkości proporcjonalne do gęstości powierzchniowej tej energii.

Zgodnie z zaproponowanym w [14] modelem odporności frakcyjnej, wzory (7) powinny być stosowane tylko w przypadku obciążenia amplitudowo-jednorodnego (monofrakcyjnego). Zespół parametrów  $K = [MDP_0, Y_0, \beta]$  może być wówczas traktowany jako wektor odporności kawitacyjnej materiału, odpowiadający rozpatrywanej frakcji obciążenia. Uwzględnienie złożonej struktury amplitudowej obciążenia kawitacyjnego wymaga uzależnienia ubytku materiału od wektora obciążenia kawitacyjnego  $ME = [ME_1, ME_2, \dots, ME_N]$ , którego składowe reprezentują gęstości strumienia energii odpowiadające poszczególnym frakcjom obciążenia oraz od macierzy odporności kawitacyjnej  $K = [K_1, K_2, \dots, K_N]$ , której wiersze tworzą wektory odporności kawitacyjnej odpowiadające poszczególnym frakcjom obciążenia kawitacyjnego.

Z uwagi na fakt, że poszczególne frakcje obciążenia kawitacyjnego oddziałują jednocześnie na powierzchnię materiału, prawo superpozycji musi być skonstruowane tak, by w każdej chwili procesu erozyjnego uwzględniać historię

<sup>1</sup> Uwaga: W oryginalnych pracach L. Sitnika parametr  $t_0$  nie występuje.

uszkodzeń wywołanych wszystkimi frakcjami. Wymaganiu temu czyni zadość metoda superpozycji chwilowych ubytków objętości zaproponowana w latach osiemdziesiątych przez B. Weiglego i Z. Szprengiela w odniesieniu do wielofrakcyjnej erozji kropłowej [24]. Zasadę funkcjonowania tej metody wyjaśnia rys. 1.



Rys. 1. Superpozycja krzywych erozyjnych metodą chwilowych ubytków objętości

Zasadnicze znaczenie dla funkcjonowania metody ma założenie, że materiał „nie rozróżnia” frakcji obciążenia, które wniosły wkład do ubytku objętości, jaki nastąpił od chwili rozpoczęcia procesu. Dlatego chwilowy wkład każdej frakcji można wyznaczać tak, jakby rozpatrywana frakcja była odpowiedzialna za wszystkie skutki oddziaływania kawitacji od początku ekspozycji. Prawo superpozycji realizujące tę zasadę zapisać można w postaci równania różniczkowego

$$\frac{d(\Delta V)}{dt} = A \sum_{i=1}^N M E_i \left. \frac{\partial U}{\partial E} (K_i, E) \right|_{E=\Theta(K_i, \Delta V)} \quad (8)$$

w którym symbolem  $U$  oznaczono funkcję (7a) natomiast symbolem  $\Theta$  – funkcję odwrotną do  $U$  ze względu na parametr  $E$ .

Po dokonaniu odpowiednich podstawień, równanie (8) można zapisać w postaci

$$\frac{d(\Delta V)}{dt} = A \sum_{i=1}^N ME_i \frac{\beta_i V_{0i}}{E_{0i}} \left( \frac{\Delta V}{V_{0i}} \right)^{1/\beta_i - 1} \exp \left[ - \left( \frac{\Delta V}{V_{0i}} \right)^{1/\beta_i} \right] \quad (9)$$

W opracowanych przez jednego z autorów programach FRACTOR i DEFRACTOR, równanie to rozwiązywane jest z powodzeniem czwartorzędową metodą Runge-Kutty [25] z uwzględnieniem osobliwości obserwowanych przy bardzo małych wartościach parametrów  $\beta$ .

Zadanie wyznaczenia macierzy odporności kawitacyjnej  $\mathbf{K}$  można sprowadzić teraz do takiego dopasowania krzywych modelujących przebieg erozji do wyników pomiaru ubytku objętości  $\Delta V_{jm} = \Delta V_m(t_{jm})$ , odpowiadających różnym wektorom (rozkładom) obciążenia kawitacyjnego  $ME_m$ , by doprowadzić do minimalizacji wyrażenia

$$S(\mathbf{K}) = \sum_m \sum_j [\Delta V_{jm} - \text{CEF}(\mathbf{K}, ME_m; t_{jm})]^2 \quad (10)$$

W wyrażeniu tym symbolem CEF oznaczono rozwiązanie równania (9) uzyskane w punkcie  $t_{jm}$  przy założeniu, że intensywność kawitacji jest określona wektorem  $ME_m$ . Indeksy  $j$  i  $m$  oznaczają odpowiednio numer punktu na krzywej doświadczalnej i numer krzywej doświadczalnej.

## 2. Wyznaczanie macierzy odporności kawitacyjnej

Zadanie minimalizacji wyrażenia (10) realizuje wspomniany już program FRACTOR. Punktem wyjścia do obliczeń jest przybliżenie wszystkich krzywych doświadczalnych wykreślonych w układzie współrzędnych  $(E, \Delta V)$  jedną krzywą „monofrakcyjną” (7a) przy użyciu metody najmniejszych kwadratów.

Celem uzyskania zerowego przybliżenia parametru  $E_0$ , wyniki doświadczalne przybliża się dwumianem

$$\Delta V(E) = c \cdot E^3 + d \cdot E^4,$$

z którego wyznacza się nominalną „energię inkubacji”  $E_{inc} = -0.25 c/d$ . Jeśli wyrażenie to przyjmuje wartość dodatnią, to uznaje się je za zerowe przybliżenie parametru  $E_0$ . W przeciwnym przypadku, za przybliżenie to przyjmuje się odciętą pierwszego punktu doświadczalnego leżącego powyżej osi energii.

Sposób wyznaczania zerowego przybliżenia parametrów  $\Delta V_0$  i  $\beta$  oparty jest na spostrzeżeniu, że jeśli znana jest wartość  $E_0$ , to przybliżone wartości obu tych parametrów wynikają z regresji liniowej punktów doświadczalnych nanieśionych w płaszczyźnie  $(\ln(\ln(E/E_0+1)), \ln(\Delta V))$  (patrz: równanie (7a)).

Obliczenia minimalizacyjne prowadzone są metodą simpleksów, wybraną na podstawie licznych testów numerycznych przeprowadzonych z wykorzystaniem wyników doświadczalnych Międzynarodowego Kawitacyjnego Testu Erozyjnego [8,9]. Po wyznaczeniu przybliżenia monofrakcyjnego, skalarne wskaźniki intensywności kawitacji wyznaczone dla krzywych eksperymentalnych ze wzoru (3) zastępuje się wektorami dwuwymiarowymi, których pierwsza składowa opisuje intensywność kawitacji w frakcji najniższej, zaś druga – sumaryczną intensywność kawitacji we frakcjach pozostałych. Następnie przystępuje się do minimalizacji wyrażenia (10), co wymaga wielokrotnego rozwiązywania równania różniczkowego (9).

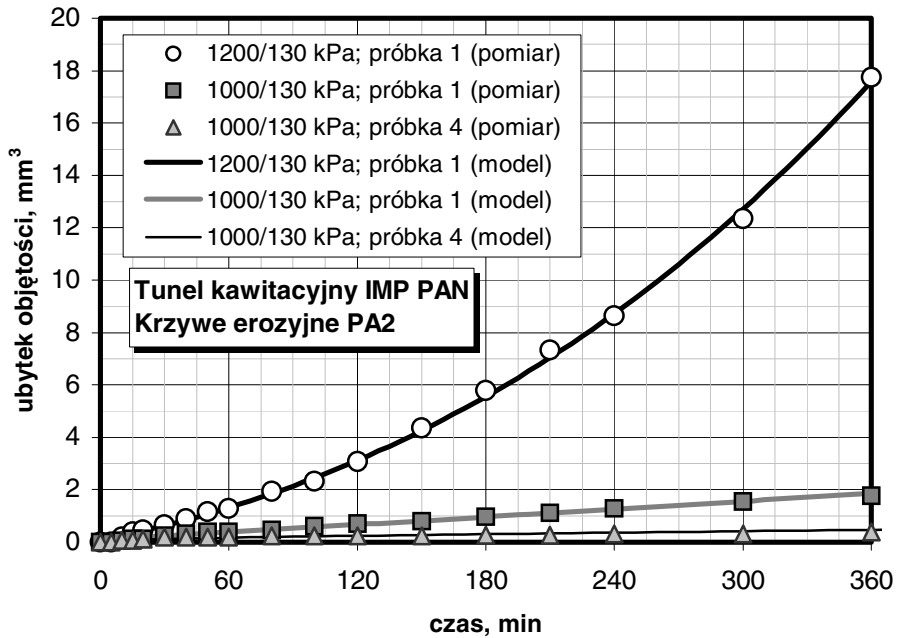
W zerowym przybliżeniu procesu iteracyjnego oba wiersze macierzy  $K$  są określone parametrami wyznaczonymi dla obciążenia monofrakcyjnego. Podobnie jak w przypadku przybliżenia monofrakcyjnego, wierzchołki pierwszego simpleksu wyznacza się z przybliżenia zerowego oraz ze zwiększania wartości kolejnych parametrów o 1 % w stosunku do tego przybliżenia. Dalsze obliczenia polegają na takim wydłużaniu i skracaniu simpleksu oraz inwersji jego wierzchołków, by uzyskiwać coraz mniejsze wartości wyrażenia (10). Zadanie to realizowane jest za pomocą procedury zaczerpniętej z monografii [25] i zmodyfikowanej w taki sposób, by uniknąć pojawiania się wartości ujemnych.

Zwiększanie liczby frakcji przebiega na takich samych zasadach, jak wprowadzanie frakcji drugiej – w każdym kolejnym kroku za przybliżenie zerowe przyjmuje się macierz odporności z kroku poprzedniego z powielonym wierzchem ostatnim. Granice frakcji dobiera się w postępie geometrycznym o ilorazie 2. Fragmenty analizy frakcyjnej wykonanej programem FRACTOR na podstawie wyników badań erozyjnych stopu aluminium PA2 przedstawiono w tabeli 1 oraz na rys. 2 i 3.

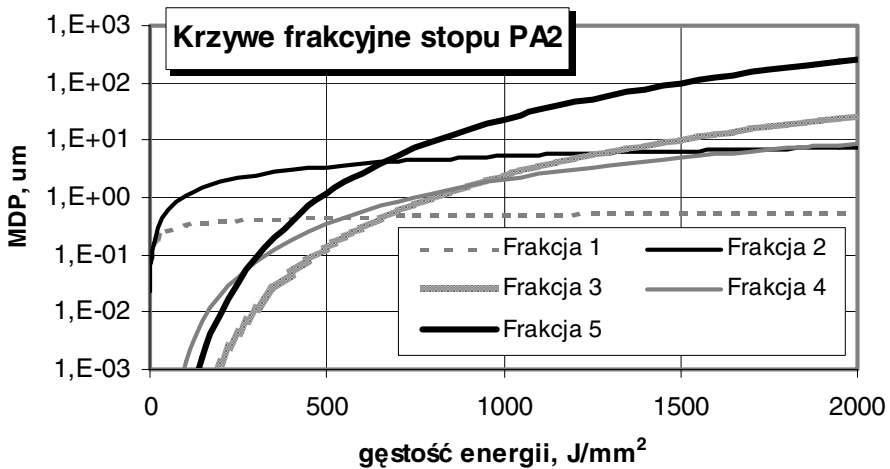
Tabela 1. Obciążenie kawitacyjne,  $\text{kW/m}^2$ , próbek PA2 w położeniach (1) i (4) podczas badań w tunelu IMP PAN (amplitudy przeliczono na czujnik referencyjny  $\varnothing 4.5$ )

Frakcja, MPa	0,5÷1,0	1,0÷2,0	2,0÷4,0	4,0÷8,0	> 8,0	razem
1200/130 kPa (1)	18,4	11,7	10,2	10,7	5,6	56,6
1000/130 kPa (1)	6,3	4,5	3,6	1,8	0,0	16,2
1000/130 kPa (4)	1,2	0,7	0,5	0,0	0,0	2,4





Rys. 2. Doświadczalne i modelowe krzywe erozyjne stopu aluminium PA2 wyznaczone na podstawie badań w tunelu IMP PAN



Rys. 3. Krzywe frakcyjne stopu aluminium PA2 wyznaczone na podstawie badań w tunelu IMP PAN

Badania erozyjne przeprowadzono w tunelu z szczelinowym wzbudnikiem kawitacji. W tunelu tym obciążenie kawitacyjne próbki zależy głównie od jej

położenia, od ciśnienia przed i za komorą oraz od szerokości szczeliny, która podczas badań wynosiła  $a = 5$  mm. Rozkład amplitudowy obciążenia kawitacyjnego wyznaczano techniką doświadczalną opisaną w [26, 27]. Wartości ciśnień oraz numery identyfikujące położenie próbki podano w pierwszej kolumnie tabeli 1.

Uzyskane dopasowanie krzywych modelowych do punktów doświadczalnych należy uznać za satysfakcjonujące, natomiast kształt krzywych frakcyjnych pozwala wyciągać wnioski dotyczące roli poszczególnych frakcji w procesie erozyjnym.

### 3. Wyznaczanie struktury obciążenia kawitacyjnego na podstawie krzywych erozyjnych materiałów wzorcowych

Jak wskazano w poprzednim rozdziale, wyznaczanie macierzy odporności kawitacyjnej materiału wymaga przeprowadzenia badań erozyjnych przy ściśle określonym obciążeniu kawitacyjnym. Wyznaczenie tego obciążenia na podstawie bezpośredniego pomiaru impulsów ciśnienia jest zadaniem trudnym i możliwym do realizacji tylko na specjalnie do tego celu przystosowanych stanowiskach badawczych.

Z tego powodu przewiduje się, że w przypadku wdrożenia prezentowanej tu metody do praktyki laboratoryjnej, efektywne obciążenie kawitacyjne byłoby zwykle wyznaczane pośrednio, na podstawie krzywych erozyjnych materiałów wzorcowych. Tylko w przypadku tych materiałów macierz odporności kawitacyjnej  $K$  musiałaby być wyznaczana w warunkach obciążenia dokładnie kontrolowanego metodami bezpośrednimi – najlepiej w ściśle znormalizowanym tunelu ze szczelinowym wzbudnikiem kawitacji.

Opracowany i oprogramowany algorytm umożliwiający wyznaczanie wektora obciążenia kawitacyjnego  $ME$  na podstawie krzywych erozyjnych materiałów wzorcowych polega na minimalizacji wyrażenia:

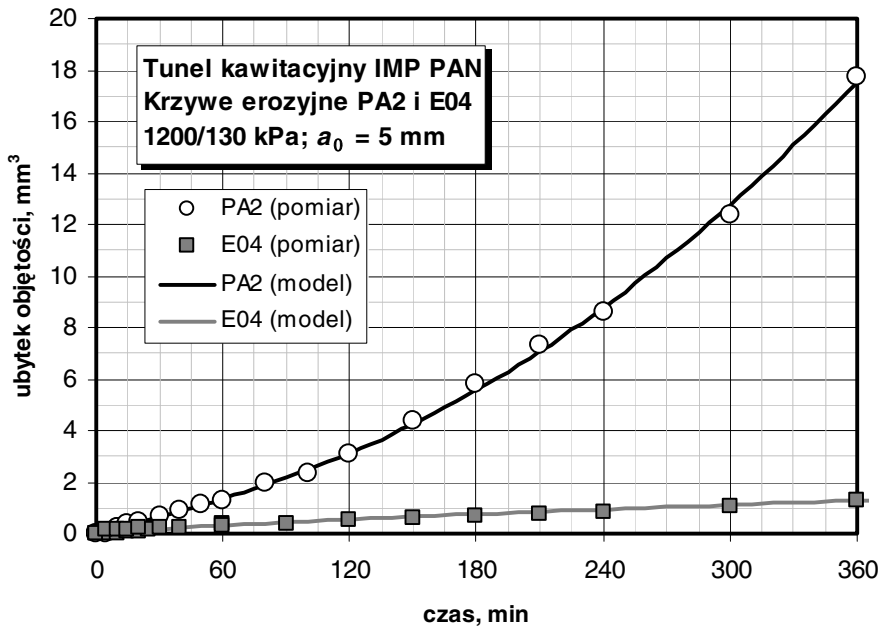
$$\Xi^2(ME) = \sum_m \sum_j [\Delta V_{jm} - \text{CEF}(\mathbf{K}_m, ME; t_{jm})]^2 \quad (11)$$

w którym indeksy  $j$  identyfikują punkt  $(t_{jm}, \Delta V_{jm})$  na jego doświadczalnej krzywej erozyjnej materiału wzorcowego  $m$ . Podobnie jak poprzednio, algorytm ten wykorzystuje metodę simpleksów. Punktem wyjścia do tych obliczeń jest wyznaczenie takiego obciążenia jednofrakcyjnego, dla którego wyrażenie (11) przyjmuje wartość najmniejszą.

Przy obciążeniu jednofrakcyjnym funkcja CEF przyjmuje postać analityczną (7a) z argumentem  $E = AME_n t$ , gdzie  $n$  jest numerem frakcji niezerowej. Wyrażenie (11) może być wówczas minimalizowane technikami typowymi dla funkcji jednej zmiennej. W programie DEFRACTOR stosuje się w tym celu

algorytm Brenta [25] wykorzystujący alternatywnie metodę odwróconej interpolacji parabolicznej i metodę złotego środka. Granice przedziałów wartości  $ME_n$ , w których należy poszukiwać minimum wyrażenia (11) dla kolejnych obciążeń jednofrakcyjnych, wyznacza się wstępnie przyrównując prawą stronę równania (7a) do ubytku objętości każdego materiału wzorcowego pod koniec ekspozycji.

Frację minimalizującą wyrażenie (11) uznaje się wstępnie za frację dominującą, a odpowiadający jej wektor obciążenia kawitacyjnego za wierzchołek bazy simpleksu początkowego dla wielowymiarowej procedury minimalizacyjnej. Pozostałe wierzchołki simpleksu początkowego wyznacza się przesuwając wektor obciążeń w kierunku kolejnych osi o  $0.1 ME_n$ .



Rys. 4. Krzywe modelowe stopu aluminium PA2 oraz żelaza Armco E04 uzyskane w wyniku doboru obciążenia kawitacyjnego do krzywych doświadczalnych za pomocą programu DEFRACTOR

Tabela 2. Obciążenie kawitacyjne obliczone programem DEFRACTOR na podstawie krzywych erozyjnych stopu aluminium PA2 i żelaza Armco wyznaczonych w tunelu IMP PAN przy ciśnieniach 1200/130 kPa (rys. 4)

Fracja, MPa	0,5÷1,0	1,0÷2,0	2,0÷4,0	> 4,0	razem
$ME$ , kW/m <sup>2</sup>	2,0	46,1	7,2	10,3	65,6

Omawiany algorytm przetestowano na przykładzie wyników badań erozyjnych próbek stopu aluminium PA2 i żelaza Armco E04. Macierze odporności obu tych materiałów wyznaczono uprzednio posługując się metodą opisaną w poprzednim rozdziale. Na rys. 4 pokazano dopasowanie krzywych modelowych do danych doświadczalnych, uzyskane w wyniku minimalizacji wyrażenia (11), natomiast w tabeli 2 – wyznaczony rozkład amplitudowy.

Podobnie, jak w przypadku rys. 2, dopasowanie krzywych modelowych do punktów doświadczalnych należy uznać za całkowicie zadowalające. Uzyskano też dość dobre szacowanie całkowitego strumienia energii dostarczonej do materiału. Ocena wyznaczonego rozkładu amplitudowego nie wypada równie pozytywnie, co wiąże się zapewne z faktem, że funkcja  $\Xi^2$  – zbudowana w oparciu o dostępne obecnie dane doświadczalne – charakteryzuje się dużą liczbą minimum lokalnych. Zdaniem autorów, zmiana tego stanu rzeczy wymaga przede wszystkim wyznaczenia wiarygodnych macierzy odporności 4 do 6 materiałów wzorcowych, charakteryzujących się dużą rozpiętością własności mechanicznych. Dotrzymanie tego warunku będzie możliwe po doprowadzeniu techniki pomiaru impulsów kawitacyjnych do stanu, w którym pomiary te będą mogły być wykonywane w sposób pewny, z akceptowalną dokładnością. W świetle istniejących możliwości technicznych jest to w pełni realne, chociaż wymaga niezbędnego nakładu pracy i środków na wyposażenie laboratoryjne.

Równoległym kierunkiem działania powinno być dalsze doskonalenie techniki obliczeniowej zmierzające do umożliwienia prawidłowego rozpoznawania rozkładu impulsów kawitacyjnych nawet w przypadku niekorzystnego uwarunkowania problemu (mała liczba krzywych lub małe różnice własności między materiałami wzorcowymi).

#### 4. Wnioski

1. Dotychczasowe wyniki prac badawczych dotyczących związku między erozją materiału a jego obciążeniem kawitacyjnym wskazują jednoznacznie, że wiarygodne prognozowanie erozji nie jest możliwe bez uwzględnienia struktury tego obciążenia.
2. Zaproponowany model odporności frakcyjnej spełnia wyżej wymienione wymagania, a wyniki testów wstępnych wskazują, że opracowane oprogramowanie funkcjonuje w sposób dobrze rokujący dla zaproponowanej metody.
3. Zasadniczym warunkiem pełnej weryfikacji zaproponowanej metody i jej ewentualnego wdrożenia do praktyki laboratoryjnej jest opanowanie techniki pomiaru impulsów kawitacyjnych w tunelu z szczelinowym wzbudnikiem kawitacji.

## Bibliografia

1. ASTM G32-03: Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus.
2. PN-86/H-04426: Erozja kawitacyjna. Nazwy, określenia i symbole.
3. Steller K.: Nowa koncepcja oceny odporności materiału na erozję kawitacyjną. *Prace IMP*, 1978, z.76, s.127–150.
4. Thiruvengadam A.P.: The concept of erosion strength. [in:] "Erosion by cavitation or impingement". ASTM Special Technical Publication No 408, 1967, pp. 22–35.
5. Hammitt F.G., Huang Y.C., Mitchell T.M.: Discussion. *Trans. ASME, J. Basic Eng.*, 92, Ser.D, No.3, September 1970, pp. 573–576.
6. ASTM G134-95: Standard method for erosion of solid materials by a cavitating liquid jet.
7. PN-86/H-04427: Erozja kawitacyjna. Badanie odporności materiałów metodą wibracyjną.
8. Steller J.: International Cavitation Erosion Test. Preliminary Report. Part I: Co-ordinator's Report, IMP PAN Rep. 17/98.
9. Steller J.: International Cavitation Erosion Test and quantitative assessment of material resistance to cavitation, *Wear* 233-235, 1999, pp. 51–64.
10. Kirejczyk J.: Próba oceny natężenia kawitacji. *Zesz. Nauk. IMP PAN* 59/973/79, s. 14–25.
11. Steller K., Bugała R., Steller J.: Pressure pulses interaction with walls confining a cavitating flow [in:] Zuo Dongqi, Chai Gongchun (ed.) "Cavitation and Erosion in Hydraulic Structures and Machinery", Int. Symposium, Nanjing China, 1992, pp. 51–59.
12. Hattori S., Mori H., Okada T.: Quantitative evaluation of cavitation erosion, *J. Fluids Engineering, Trans. ASME*, Vol. 120, March 1998, pp. 179–185.
13. Krella A.: Badania wpływu czynników mechanicznych i strukturalnych na erozję kawitacyjną wybranych materiałów. Rozprawa doktorska, IMP PAN, Gdańsk 2003.
14. Bugała R., Steller J.: Ocena odporności kawitacyjnej materiałów na podstawie frakcyjnego rozkładu obciążeń dynamicznych – koncepcja i wyniki badań rozpoznawczych. *Opr. IMP PAN* nr 546/97.
15. Noskievič J.: Vyhodnočeni kavitačniho opotřebeni materiálu. *HYDRO-TURBO* 76, C7, Brno, 1976.
16. Sitnik L.: Mathematical description of the cavitation erosion process and its utilization for increasing the materials resistance to cavitation. [in:] *Cavitation in Hydraulic Structures and Turbomachinery. The Joint ASCE/ASME Mechanics Conf.*, Albuquerque, New Mexico, 1985.

17. Sitnik L.: Strömungskavitationsverschleiß. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.
18. Steller J., Kaczmarzyk P.: Fenomenologiczne modele przebiegu erozji kawitacyjnej. I Pomorska Konferencja Naukowa „Inżynieria Materiałowa 2000”, Gdańsk-Sobieszewo, 25–26 maja 2000, s. 241–248.
19. Meged Y.: Modeling of vibratory cavitation erosion test results by a Weibull distribution ASTM Journal of Testing and Evaluation, Vol. 31, No. 3, 2003, pp. 196–209.
20. Szkodo M.: Ocena odporności kawitacyjnej stali obrabianych laserowo, Politechnika Gdańska, Seria Monografie, nr 50, Gdańsk 2004.
21. Heymann F.J.: On the time dependence of the rate of erosion due to impingement or cavitation [in:] “Erosion by Cavitation or Impingement”, ASTM Special Technical Publication no. 408, pp. 70–10.
22. Beckmann G., Pietschmann F.: Vorstellungen zu einem Modell der Kavitationserosion. Schmierungstechnik, Berlin 21, 1990, 8, s. 243–244.
23. Sobczyk K., Spencer B.F.: Stochastyczne modele zmęczenia materiałów. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1996.
24. Weigle B., Szprengiel Z.: An attempt to assess the erosion damage due to the impact of polyfractional rain of droplets. Prace IMP z. 88, 1985, s. 45–70.
25. Press W.H., Teukolsky S.A., Vetterling W.T., Flannery B.P.: Numerical Recipes in FORTRAN. The Art of Scientific Computing. Cambridge University Press, 1992.
26. Steller J., Krella A., Koronowicz J., Janicki W.: Towards quantitative assessment of material resistance to cavitation erosion. Wear 258, 2005, pp. 604–613.
27. Krella A., Steller J.: Badania doświadczalne erozji wybranych materiałów w zależności od obciążenia kawitacyjnego. Problemy Eksploatacji, 2005.

Recenzent:  
**Lech SITNIK**

## **Fractional approach to assessment of cavitation resistance of materials**

### **Summary**

The paper presents the concept of fractional resistance of materials, including some basic principles of determining material resistance to individual cavitation load fractions, prediction of erosion curves under predetermined cavitation load and retrieval of his load basing on erosion curves of some reference materials. The consideration is illustrated by results of analysing aluminium alloy (PA2) and Armco iron (E04) erosion curves determined in a cavitation tunnel with a slot-type cavitator. The results attained prove unambiguously correct functioning of the software developed.

