

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
INSTYTUT MASZYN PRZEPIYWOYCH

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPIYWOYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

76

WARSZAWA-POZNAŃ 1978
PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machinery

KOMITET REDAKCYJNY — EXECUTIVE EDITORS

KAZIMIERZ STELLER — REDAKTOR — EDITOR

WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ . ZENON ZAKRZEWSKI

ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA — EDITORIAL OFFICE

Instytut Maszyn Przepływowych PAN,

80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, ul. Gen. Józefa Fiszer 14, tel. 41-12-71

Copyright

by Państwowe Wydawnictwo Naukowe

Warszawa 1978

Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE — ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 340+90 egz.	Oddano do składania 27 lutego 1978 r.
Ark. wyd. 12,25. Ark. druk. 9,375	Podpisano do druku 24 października 1978 r.
Papier druk. sat. kl. V, 70 g, 70×100 cm.	Druk ukończono w październiku 1978 r.
Nr zam. 319/98. J-14/662.	Cena zł 40,—

DRUKARNIA UNIWERSYTETU IM. ADAMA MICKIEWICZA W POZNANIU

KAZIMIERZ STELLER

Gdańsk

Nowa koncepcja oceny odporności materiału na erozję kawitacyjną*

W pracy dokonano przeglądu najczęściej stosowanych kryteriów służących do oceny odporności materiału na erozję kawitacyjną, a następnie przedstawiono nową koncepcję, opartą na założeniu, że odporność niszczonego materiału nie jest wielkością stałą. W związku z tym, wyróżniono odporność początkową, zależną od cech materiałowych, odporność chwilową zależną od odporności początkowej oraz warunków i czasu działania kawitacji na materiał, oraz odporność graniczną, będącą ułamkiem odporności początkowej. Na tej podstawie oraz opierając się na związku między pracą włożoną i wykonaną, wyprowadzono zależności opisujące przebieg procesu erozji w czasie i wzór na trwałość materiału.

Przedstawioną koncepcję zweryfikowano posługując się przybliżonymi zależnościami i wynikami badań próbek materiałów na stanowisku z wirującą tarczą.

1. Kryteria oceny

Przez odporność materiału na erozję kawitacyjną rozumiemy zdolność materiału do przeciwstawiania się niszczącemu działaniu kawitacji. Ocena tej zdolności jest na ogół względna; opiera się na porównywaniu zmian w materiałach wywołanych przez kawitację o stałym natężeniu i przebiegającą w niezmiennych warunkach. Małe lub wolno postępujące zmiany w jednym materiale, w stosunku do zmian zachodzących w drugim, świadczą o większej odporności pierwszego materiału.

Podstawą oceny materiałów są przeważnie badania (testy erozyjne) odpowiednich próbek przeprowadzane na urządzeniach przepływowych lub wibracyjnych. Polegają one na obserwacji niszczenia próbek w czasie (rys. 1a i b). W zarysie przebieg niszczenia wygląda następująco. W pierwszym okresie, tzw. inkubacyjnym, straty masy są bardzo małe i na ogół niemierzalne. Powierzchnia materiału jest miejscami odkształcona plastycznie przez zgniot. W drugim etapie, tzw. okresie wzmożonego niszczenia, występują wyraźne ubytki masy. Powierzchnia materiału staje się chropowata; powstają zagłębienia i nierówności typowe dla wżerów kawitacyjnych. Te zagłębienia, wypełnione częściowo cieczą, osłabiają proces niszczenia. Po okresie osłabionego niszczenia następuje okres niszczenia ustalonego, charakteryzujący się prawie stałą szybkością ubywania masy materiału.

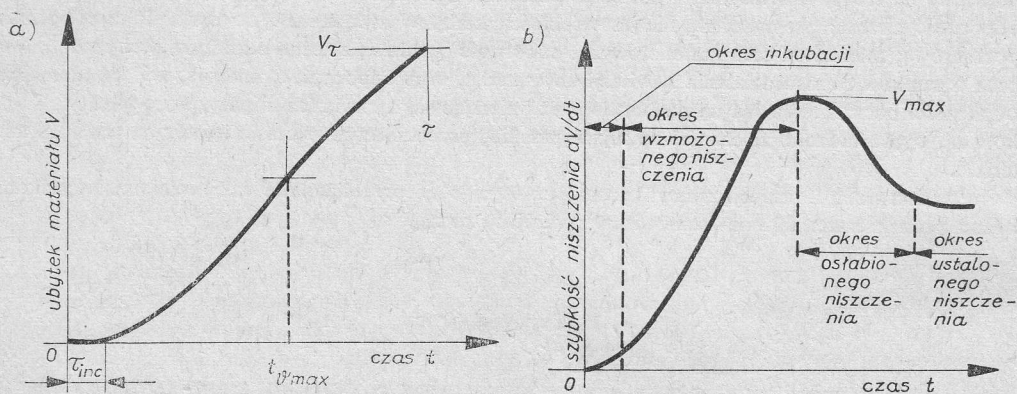
Opisany przebieg zjawiska obserwujemy najczęściej podczas kawitacji wytwarzanej za pomocą pulsatora magnetostrykcyjnego. W innych warunkach, np. przy kawitacji

* Praca wykonana w ramach problemu międzyresortowego MR. I. 26 „Podstawy projektowania maszyn i urządzeń energetycznych”, grupa tematyczna 07.

przepływowej, niszczenie może przebiegać inaczej. Decydujący jednak wpływ na przebieg niszczenia mają fizykochemiczne własności materiału oraz natężenie zjawiska kawitacji.

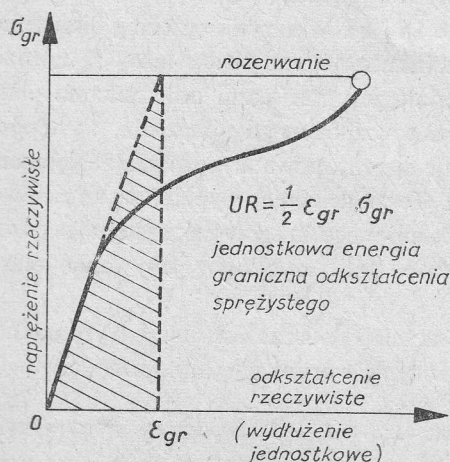
Ocena i szeregowanie materiałów pod względem odporu ości na erozję odbywa się na podstawie różnych kryteriów. Do najczęściej stosowanych należą:

- krzywe, wskazujące na ubytek masy lub objętości próbek, albo też wzrost średniej głębokości wżerów kawitacyjnych w czasie,
- krzywe, wskazujące na szybkość erozji w czasie,
- wskaźniki jednoczłone, charakteryzujące intensywność lub stopień zniszczenia próbek (np. czas inkubacji lub czas potrzebny do osiągnięcia określonego ubytku, ubytek osiągany po określonym czasie, przeciętna lub maksymalna szybkość erozji albo szybkość erozji w okresie niszczenia ustalonego).



Rys. 1. Przebieg niszczenia materiału pod wpływem kawitacji; a) ubytek objętościowy w czasie, b) szybkość objętościowego ubywania w czasie

Wskaźniki jednoczłone, podobnie zresztą jak krzywe szybkości erozji w czasie, są określane na podstawie krzywych przedstawiających ubywanie materiału w czasie. Nie ma jednak powszechnej zgody co do tego, który ze wskaźników jednoczłonowych posiada



Rys. 2. Wykres naprężeń rzeczywistych (krzywa rozciągania) odniesiona do rzeczywistego przekroju próbki) oraz sposób wyznaczania energii jednostkowej UR [12]

większe znaczenie i czy jakikolwiek wskaźnik jednoliczbowy może zastąpić krzywą wyznaczoną z testu erozyjnego. Z krytycznego przeglądu kryteriów oceny materiałów i analizy efektów skalowych przy niszczeniu kawitacyjnym można wyciągnąć następujące wnioski [5, 9, 13, 17, 18]:

- stosowane wskaźniki jednoliczbowe nie są wskaźnikami uniwersalnymi i mogą niekiedy prowadzić do mylnych ocen,
- do czasu opracowania racjonalnych zasad oceny odporności materiałów na kawitację, podstawą oceny powinny być krzywe przedstawiające zależność między ubytkiem objętościowym lub głębokością wżerów i czasem działania kawitacji na materiał (pogląd ten wyrażono również w normie ASTM [21]).

Przedstawiony pogląd na sprawę oceny odporności materiałów na erozję kawitacyjną odnosi się do oceny bezpośredniej, dokonywanej na podstawie wyników badań próbek materiałów w warunkach laboratoryjnych. Prócz oceny bezpośredniej stosowana jest ocena pośrednia, polegająca na przewidywaniu odporności bez przeprowadzania testu erozyjnego. Przewidywanie (prognozowanie) jest przeważnie oparte na twierdzeniu Buckingham'a (twierdzenie II) i założeniu, że o odporności decydują mechaniczne własności materiału. Za miarę odporności względnej przyjmowany jest jeden ze wskaźników liczbowych, najczęściej maksymalna szybkość erozji. Odpowiednie wzory empiryczne ustalane są na podstawie statystycznego opracowania wyników badań pewnej liczby próbek.

W pracy zajęto się przede wszystkim oceną bezpośrednią. Ponieważ podstawą tej oceny są badania próbek w czasie, w związku z tym podjęto próbę określenia metody służącej do oceny materiałów na podstawie wyników całego testu erozyjnego. Przedmiotem poszukiwań była więc zależność między odpornością materiału na działanie kawitacji a warunkami i wynikami testu erozyjnego. Próbę rozwiązania tych zagadnień oparto na kinetycznej koncepcji niszczenia ciał stałych.

2. Dotychczasowe koncepcje

Jak wiadomo, główną przyczyną niszczenia materiału podczas kawitacji są siły mechaniczne. Choć działania chemiczne i elektrochemiczne – występujące przede wszystkim w warunkach kawitacji naturalnej – wzmagają mechaniczny proces niszczenia, to jednak nie są one niezbędne do rozwoju uszkodzeń. Nie można również wykluczyć termodynamicznych aspektów zjawiska kawitacji, wynikających z „ciśnienia implozji” i wpływających na działania chemiczne. Jednak i one mają znaczenie drugorzędne.

Mechaniczne działanie kawitacji na materiał wyróżnia się tym, że siły o stosunkowo dużej wartości działają krótkotrwale na bardzo małe powierzchnie. Ze względu na charakter obciążeń (wielokrotność i zmienność), proces erozji kawitacyjnej jest porównywalny z procesem zmęczeniowym. Jest on jednak osobliwy i ściśle związany z naturą zjawiska kawitacji, z jego formą i natężeniem.

W literaturze przedmiotu można znaleźć krzywe przedstawiające przebieg niszczenia różnych materiałów w różnych warunkach kawitacyjnych oraz informacje o podejmowanych próbach korelacji odporności materiału na kawitację z różnymi wskaźnikami materiałowymi. Spotykane są m.in. wzory określające zależność między niszczeniem materiału a jego własnościami mechanicznymi oraz związku między natężeniem kawitacji, odpornością

materiału i wynikami testu erozyjnego. Poniżej przedstawimy kilka typowych przykładów ilustrujących poszukiwanie takich zależności oraz wynikające stąd ustalenia.

Na podstawie badań próbek różnych materiałów w wodzie, rtęci, licie i mieszaninie litowo-bismutowej R. Garcia i F. G. Hammitt [4] ustalili następujący związek między szybkością niszczenia, wyrażoną stosunkiem głębokości wżerów kawitacyjnych do czasu (MDPR, mils/hr – „mean depth of penetration rate”) i energią jednostkową nagromadzoną przy sprężystym odkształceniu ciała (UR, psi – „ultimate resilience”)

$$\text{MDPR} = C_1 C_2 [0,142 + 8,918(\text{UR})^{-\frac{1}{2}}], \quad (1)$$

gdzie $0 < C_1 < 1$ jest współczynnikiem korekcyjnym, uwzględniającym zmienność tzw. przeciwkawitacyjnej nadwyżki ciśnienia, zaś $0 < C_2 < 1$ – współczynnikiem korekcyjnym, uwzględniającym przemiany cieplne zachodzące w obszarze kawitacyjnym. Wielkość UR autorzy określają w ślad za J. M. Hobbsem [12] w sposób następujący (rys. 2)

$$\text{UR} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sigma_R^2}{E}, \quad (2)$$

gdzie σ_R jest granicą wytrzymałości materiału, a E – modułem Younga.

Stopień korelacji między szybkością niszczenia i innymi wskaźnikami mechanicznymi, takimi np. jak wytrzymałość na rozerwanie czy twardość, jest według autorów znacznie gorszy. Powyższe stwierdzenia odnoszą się do wyników badań uzyskanych na stanowisku wibracyjnym o częstości drgań próbki około 20 kHz i podwójnej amplitudzie około 2 mils (50 μm). Względna ocena materiałów badanych w wodzie na innych stanowiskach wykazała [4], że związek (1) jest słuszny tylko dla niektórych warunków badań.

F. G. Hammitt i in. [7, 8], w wyniku dalszych badań potwierdzili w zasadzie poprzednie ustalenia, że najodpowiedniejszym wskaźnikiem charakteryzującym odporność materiału na kawitację jest energia jednostkowa UR. Świadczą o tym wyniki zamieszczone w tabeli 1 i zacerpnięte z [8].

Tabela 1

Zależność	n	Współczynnik korelacji	Granica przedziału ufności na poziomie ufności 95% dla populacji współczynnika korelacji
$1/\text{MDPR} = C(\text{UR})^n$	0,998	0,811	0,64 - 0,91
„ $= C(\text{UR} \times \text{BHN})^n$	0,720	0,798	0,62 - 0,89
„ $= C(\text{UR} \times E^2)^n$	0,659	0,744	0,52 - 0,86
„ $= C(\text{BHN})^n$	1,788	0,734	0,52 - 0,85
„ $= C(\text{SE})^n$	0,738	0,517	0,21 - 0,73

Oznaczenie

- MDPR – maximum mean depth of penetration rate, mils/hr (maksymalna szybkość „penetracji” erozji, tzn. stosunek głębokości wżerów do czasu, określony przy maksymalnej szybkości niszczenia),
 UR = $\text{TS}^2/2E$ – ultimate resilience; psi (energia jednostkowa nagromadzona przy sprężystym odkształceniu ciała),
 BHN – Brinell hardness (twardość Brinella),
 E – elastic modulus; psi (moduł sprężystości),
 SE – strain energy to failure; psi (energia odkształcenia niszczącego, wyznaczona na podstawie wykresu naprężenie-wydłużenie),
 TS – tensile strength; psi (wytrzymałość na rozerwanie).

Przytoczone w tabeli 1 zależności różnią się jednak od wzoru (1) podanego w pracy [4]. Ten fakt, wynikający z zebrania następnych danych statystycznych, podkreśla przejściowy charakter poprzednich oraz obecnych ustaleń.

Ostatecznie autorzy wyróżnili dwie zależności, a mianowicie:

$$1/\text{MDPR} = C(\text{UR}), \quad (3)$$

$$1/\text{MDPR} = C(\text{BHN})^{1,8}. \quad (4)$$

B. C. Syamala Rao i inni [18], wychodząc z założenia, że

$$\frac{V \cdot M}{t} \cong \text{const}, \quad (5)$$

(gdzie V oznacza ubytek objętościowy materiału po czasie t , zaś M — wskaźnik charakteryzujący własności mechaniczne materiału) stwierdzają, że najlepszą zgodność zależności (5) z wynikami badań próbek w dyszy Venturiego i na stanowisku z wirującą tarczą uzyskuje się, gdy

$$M = (\text{UR}) H, \quad (6)$$

gdzie H jest twardością materiału w stopniach Brinella.

Podobny pogląd reprezentuje również F. J. Heymann [10], według którego odporność materiału Y (erosion resistance) jest związana z parametrem materiałowym X następującą zależnością

$$Y = a \cdot X^b. \quad (7)$$

Zgodnie z [11] dla $X = (\text{UR}) H$ wykładnik potęgowy b wynosi 1,03. Wówczas współczynnik korelacji przyjmuje wartość 0,980.

Zarówno Heymann jak i Syamala Rao wyniki badań różnych materiałów odnosili do materiałów uznanych przez siebie za standardowe (stal nierdzewna lub czyste aluminium).

Odmienny sposób ilościowego ujęcia erozji i cech materiałowych prezentuje A. Thiruvengadam [20]. Uzależnia on ubytek objętościowy materiału ΔV od energii E_a zaabsorbowanej przez usunięty materiał w sposób następujący:

$$E_a = \Delta V \cdot S_e, \quad (8)$$

gdzie S_e oznacza odporność erozyjną materiału (zdolność materiału do absorbowania energii jednostkowej, pochodzącej od sił zewnętrznych). Zależność (8) odnosi się*) do ustalonego okresu niszczenia [20]. Wartość S_e można wyznaczyć z wykresu naprężenie-odkształcenie lub oszacować z zależności następującej [1]:

$$S_e = (R_m + R_e) \frac{\varepsilon}{2}, \quad (9)$$

gdzie R_m — wytrzymałość materiału na zerwanie, R_e — granica plastyczności, ε — ma-

*) W późniejszej pracy [6] zależność (8) i „natężenie erozji” autor odnosi do maksymalnej szybkości niszczenia.

ksymalne wydłużenie. Według [15] wartości S_e [kp/cm²] dla niektórych metali wynoszą:

Stellit	Stal nierdzewna	Brąz	Aluminium	Żeliwo	Miedź	Ołów
$65 \cdot 10^3$	$35 \cdot 10^3$	$18 \cdot 10^3$	$12 \cdot 10^3$	$9,5 \cdot 10^3$	$7,5 \cdot 10^3$	$1,7 \cdot 10^3$

A. Thiruvengadam podał również definicję natężenia erozji

$$I = \frac{\Delta V}{A_e} \cdot \frac{S_e}{t} = i \frac{S_e}{t}, \quad (10)$$

gdzie A_e — pole powierzchni zerodowanej, t — czas trwania testu (ekspozycji), i — średnia głębokość wżerów kawitacyjnych.

Przedstawione sposoby oceny odporności materiału na erozję kawitacyjną mają kilka istotnych ograniczeń:

a) odnoszą się do określonych warunków badań i do pewnych charakterystycznych okresów niszczenia (np. okresu niszczenia ustalonego lub maksymalnej szybkości niszczenia),

b) pomijają efekty wynikające z różnicy między sposobem obciążania materiału podczas zwykłych prób wytrzymałościowych i w czasie działania kawitacji,

c) nie uwzględniają zmiany stanu i własności materiału z czasem oraz wpływu otaczającego ośrodka (ciśnienia, prędkości, temperatury, korozji) na przebieg tych zmian.

Usunięcie tych ograniczeń wymaga uwzględnienia zachowania się materiału we wszystkich okresach niszczenia, tzn. uzależnienia odporności materiału od czasu i warunków badań.

Z tego względu na uwagę zasługuje matematyczny opis przebiegu erozji kawitacyjnej przedstawiony przez J. Noskieviča [14]. Autor założył, że dynamika procesu erozji kawitacyjnej może być opisana takim samym równaniem różniczkowym co drgania mechaniczne wymuszone (tłumione), a więc

$$\frac{d^2 v}{dt^2} + a_1 \frac{dv}{dt} + a_2 v = I. \quad (11)$$

W równaniu tym (11) $v \propto dV/dt$ oznacza szybkość masowego ubywania ciała, V — ubytek objętościowy ciała, t — czas, a_1 i a_2 — stałe współczynniki określające własności materiału ($a_1 = \text{const}$ — określa umocnienie materiału, $a_2 = \text{const}$ — określa odporność materiału na działanie kawitacji), I — intensywność kawitacji ($I = \text{const}$). Na podstawie równania (11) otrzymano następujące rozwiązania:

$$\text{a) dla } \frac{a_1^2}{4} - a_2 > 0$$

$$v = v_s(1 + v_\alpha e^{-\alpha t} - v_\beta e^{-\beta t}), \quad (12)$$

gdzie

$$v_\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{a_1}{2a_0} - 1 \right), \quad v_\beta = \frac{1}{2} \left(\frac{a_1}{2a_0} + 1 \right),$$

$$a_0 = \frac{a_1^2}{4} - a_2, \quad \alpha = \frac{a_1}{2} + a_0, \quad \beta = \frac{a_1}{2} - a_0,$$

oraz

$$m = \int_0^t v dt = v_s \left(t + \frac{v_\alpha}{\alpha} - \frac{v_\beta}{\beta} - \frac{v_\alpha}{\alpha} e^{-\alpha t} + \frac{v_\beta}{\beta} e^{-\beta t} \right); \quad (13)$$

b) dla $a_2 - \frac{a_1^2}{4} > 0$

$$v = v_s \left[1 - e^{-\alpha t} \left(\cos \omega t + \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega t \right) \right], \quad (14)$$

gdzie

$$\alpha = \frac{a_1}{2}, \quad \beta = \sqrt{a_2}, \quad \omega^2 = a_2 - \frac{a_1^2}{4},$$

oraz

$$m = \int_0^t v dt = v_s \left\{ t - 2 \frac{\alpha}{\beta^2} + \frac{\alpha}{\beta^2} e^{-\alpha t} \left[\left(\frac{\alpha}{\omega} - \frac{\omega}{\alpha} \right) \sin \omega t + 2 \cos \omega t \right] \right\}. \quad (15)$$

Intensywność kawitacji autor definiuje następująco:

$$I = a_2 v_s, \quad (16)$$

gdzie $v_s = \text{const}$ jest szybkością ubywania ciała w okresie rozwiniętego niszczenia. Graficzną interpretację równań (12) ÷ (15) przedstawiono na rys. 3.

J. Noskiewicz wyróżnia trzy okresy niszczenia:

a) okres inkubacji ($0 \leq t \leq t_i$), opisany równaniem

$$\frac{d^2 v}{dt^2} + a_1 \frac{dv}{dt} = I, \quad (17)$$

b) okres rozwoju zniszczeń, opisany równaniem (11),

c) okres rozwiniętego niszczenia, opisany równaniem

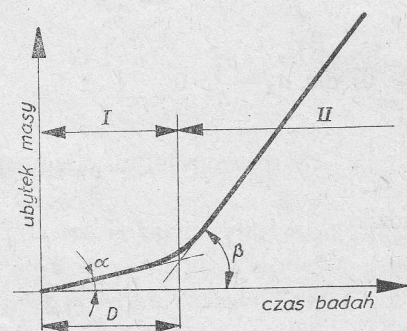
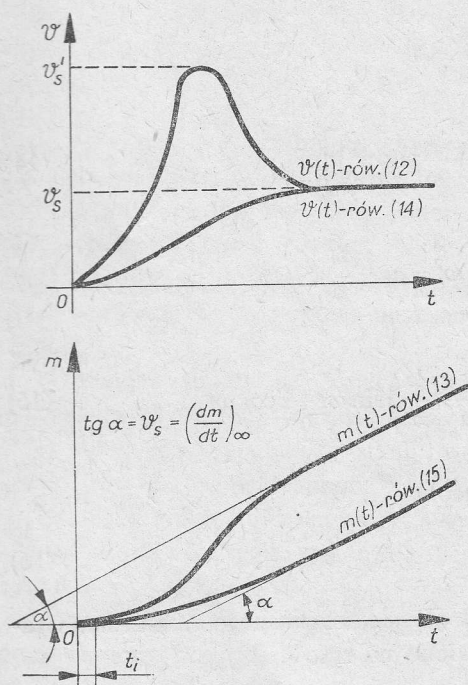
$$\frac{d^2 v}{dt^2} + a_2 v = I. \quad (18)$$

Z przedstawionego modelu wynika, że przy niezmienniej intensywności kawitacji ($I = \text{const}$) proces erozji jest opisany funkcją $F(m, t, \alpha, \beta, v_s) = 0$. Oznacza to, że przeżywanie przebiegu erozji kawitacyjnej jest możliwe tylko wtedy, gdy znamy dwa parametry charakteryzujące własności materiału (współczynniki a_1 i a_2 , względnie α i β) oraz szybkość erozji v_s . Wielkości te, jak stwierdza sam autor, zależą od intensywności kawitacji i mogą być wyznaczone tylko doświadczalnie.

Pomijając zasadność założeń, które posłużyły autorowi do opisu przebiegu erozji-

kawitacyjnej, należy zwrócić uwagę na nieuwzględnienie w opisie niszczenia zmian stanu i własności materiału, które następują pod wpływem czasu działania kawitacji na materiał.

Inny opis przebiegu erozji podaje W. W. Fomin [2], który wyróżnia (rys. 4) dwa



Rys. 4. Krzywa niszczenia według W. W. Fomina [2]

Rys. 3. Graficzna interpretacja opisu przebiegu erozji kawitacyjnej przedstawionego przez J. Noskiewicza [14]

okresy niszczenia: okres inkubacji i okres totalnego niszczenia. Ubytek masy δP w zależności od czasu t opisuje równanie:

– w pierwszym okresie niszczenia ($t < D$)

$$\delta P_1 = at, \quad (19)$$

gdzie a jest tangensem kąta (α) nachylenia krzywej erozji w tym okresie,

– w drugim okresie niszczenia ($t > D$)

$$\delta P_2 = bt - C, \quad (20)$$

gdzie b jest tangensem kąta (β) nachylenia krzywej erozji w tym okresie, a C – stałą, zależną od długości okresu $D = C/(a - b)$.

Opis ten, będący aproksymacją krzywej erozji za pomocą dwóch prostych, nie zezwala na ocenę odporności materiału, a jedynie (według analizy przedstawionej w [2]) na stwierdzenie, że odporność zależy od długości okresu inkubacji D i wartości parametrów a i b .

3. Nowa koncepcja

3.1. Założenia

a. Wskaźniki materiałowe wynikają przede wszystkim z budowy jądra atomu i powłok elektronowych, ciężaru atomowego i wartościowości chemicznej pierwiastków tworzących dany materiał. Rzeczywiste ciała stałe, utworzone z elementów rzędu atomowego, cząstkowego, submikroskopowego, mikroskopowego i makroskopowego, wykazują jednak różnego rodzaju odstępstwa od modeli teoretycznych. Odstępstwa te ujawniają się w postaci najróżniejszych zakłóceń sieci krystalicznej (wakanse, atomy międzysiatkowe i obce, dyslokacje, granice ziaren), w postaci granic faz i tekstury oraz wad materiałowych (zanieczyszczenia, likwacje, jamy, pory). Wpływają one na wskaźniki materiałowe, a w szczególności na wytrzymałość materiałów pod różnego rodzaju obciążeniami. W rezultacie, rzeczywista wytrzymałość materiału różni się od wytrzymałości teoretycznej, wynikającej bądź to z atomowych modeli wolnych od defektów struktur sieciowych, bądź też z fenomenologicznych modeli ciągłych i jednorodnych ciał odkształcalnych. Podstawowym pojęciem łączącym obie wytrzymałości jest pojęcie sprężystości materiału, której wskaźniki można obliczyć w przybliżeniu, znając strukturę sieci. Elementami różniącymi te dwie wytrzymałości są różne cechy defektów uporządkowania, których wpływ można uchwycić jedynie doświadczalnie. Jako wysokowytrzymałe określa się na ogół takie materiały, których wytrzymałość obserwowana podczas próby rozciągania osiąga znaczny ułamek teoretycznej wartości wytrzymałości [3]. Materiały o dużej wytrzymałości wykazują też duże wartości E (moduł sprężystości podłużnej, moduł Younga) oraz G (moduł sprężystości poprzecznej), a więc małe stałe sieciowe i duże walencje, które odpowiadają wiązaniom homopolarnym.

b. Zniszczenie ciała stanowi złożony proces, którego przebieg zależy od rodzaju obciążenia, jego amplitudy i częstości (widma obciążenia), warunków zewnętrznych, geometrii i własności fizykochemicznych ciała, jego struktury wewnętrznej, a głównie od rozkładu miejsc osłabionych i naprężeń wewnętrznych w ciele.

Zgodnie z koncepcją mechaniczną rozerwanie wiązań atomowych, a co za tym idzie, naruszenie ciągłości ciała, zachodzi w wyniku utraty stabilności ciała stałego, znajdującego się w polu naprężeń wewnętrznych i zewnętrznych. Według koncepcji kinetycznej, (rozpatrującej rozwój procesu zniszczenia) zniszczenie jest etapem końcowym stopniowego rozwoju i kumulowania się uszkodzeń submikroskopowych. Wprowadza się pojęcie trwałości pod obciążeniem, tj. czasu τ od chwili przyłożenia obciążenia aż do zerwania ciała. Ustalono doświadczalnie [22], że trwałość τ jest związana z naprężeniem normalnym σ i temperaturą bezwzględną T zależnością następującą:

$$\tau = \tau_0 \exp [(U_0 - \gamma\sigma)/kT],$$

gdzie τ_0 , U_0 i γ są wielkościami związanymi z fizykochemiczną naturą ciała stałego i jego strukturą (U_0 oznacza energię wiązań atomów, $\tau_0 \approx 10^{-13} - 10^{-12}$ s odpowiada w przybliżeniu okresowi cieplnych drgań atomów, γ określa stopień obniżenia trwałości τ w za-

leżności od struktury materiału, głównie wzmocnienia, zgniotu i dodatków stopowych, a także od orientacji i ciężaru cząsteczek).

Przyjmując, że początek niszczenia ciała jest równoznaczny z początkiem rozprzestrzeniania się jakiejś istniejącej szczeliny, to odpowiadające temu procesowi stany graniczne mogą leżeć w przedziale nominalnie sprężystych odkształceń lub w obszarze odkształceń w pełni pozasprężystych.

W naszych rozważaniach ograniczymy się do pierwszego przypadku, zakładając równocześnie, że proces powstawania i rozprzestrzeniania się szczelin w materiale jest poprzedzany przez niejednorodne i lokalne odkształcenia pozasprężyste. W tych warunkach niebezpieczeństwo zniszczenia określa energia jednostkowa, nagromadzona przy sprężystym odkształceniu ciała w pobliżu granicy zniszczenia, czyli zgodnie z (2)

$$UR = \frac{1}{2} \varepsilon^2 E = \frac{\sigma^2}{2E},$$

gdzie ε — wydłużenie względne, σ — naprężenie graniczne.

Im energia UR jest większa, tym lepiej materiał wytrzymuje działanie obciążeń nagłych i udarowych.

c. Podczas kawitacji występują zderzenia mikrostrumienia cieczy i fal ciśnienia z materiałem. Czas trwania tych zderzeń jest bardzo krótki, a powstające przy tym naprężenia powierzchniowe są bardzo duże.

Skutkiem powtarzających się zderzeń występują w materiale procesy nieodwracalne, podobne do tych, jakie obserwujemy podczas zniszczeń zmęczeniowych (pochłanianie energii, wydzielenie się ciepła, przemieszczanie się dyslokacji, tworzenie się skupisk wakanów, powstawanie lokalnych odkształceń plastycznych i linii poślizgów, występowanie ekstruzji lub intruzji, pojawiania się pęknięć i szczelin rozwijających się do wnętrza materiału, występowanie przemian fazowych). Osobliwe działanie kawitacji na materiał oraz fakt, że woda i wodór tworzą atmosfery nadzwyczaj agresywne w stosunku do wielu metali sprawiają, że niszczenie kawitacyjne jest wyraźnie przyspieszone w stosunku do niszczenia powodowanego przez „zwykłe” odkształcenia wielokrotne.

Charakter zjawisk kawitacyjnych oraz podobieństwo zmian stanu materiałów pod wpływem zmęczenia i kawitacji skłaniają do traktowania niszczenia kawitacyjnego jako procesu zmęczeniowego. W tych warunkach można przyjąć, że naprężenia niszczące podczas kawitacji są mniejsze od granicy wytrzymałości przy obciążeniu statycznym i, że procesy kawitacyjne obniżają wytrzymałość materiału. Za przyjęciem takiego założenia przemawia i to, że zarówno wytrzymałość na zmęczenie, jak i odporność materiału na kawitację w dużym stopniu zależą od charakteru, częstotliwości i długotrwałości obciążenia, od ilości wtrąceń niemetalicznych, lokalnych fluktuacji stężenia dodatków stopowych, rozmiarów ziarn, stanu powierzchni, obróbki cieplno-chemicznej i innych czynników określających własności fizykochemiczne metalu.

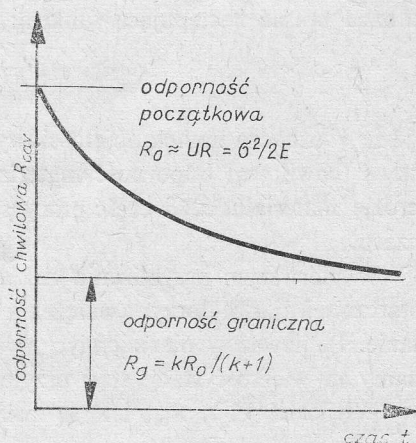
d. Proces niszczenia materiału pod wpływem kawitacji jest procesem ciągłym, przebiegającym ze zmienną szybkością. Podczas tego procesu zmienia się nie tylko struktura geometryczna powierzchni materiału, lecz również jego struktura wewnętrzna.

Wynikiem tych zmian nieodwracalnych jest m. in. ciągła zmiana własności fizycznych materiału, a więc i jego odporności na działanie kawitacji. Przebieg zmiany odporności zależy od czasowej (chwilowej) i umownej odporności materiału oraz od parametrów charakteryzujących warunki niszczenia (natężenia kawitacji, kształtu i wymiarów próbek oraz rodzaju i parametrów stanu medium roboczego). Przez odporność umowną rozumiemy odporność graniczną (minimalną), do której asymptotycznie zmierza odporność czasowa. Można przyjąć, że wartość tej odporności jest pewnym ułamkiem $\left(\frac{k}{k+1}\right)$ odporności początkowej R_0 , charakteryzującej materiał w stanie wyjściowym.

Zakładając hipotetycznie, że szybkość zmiany odporności materiału na erozję kawitacyjną jest proporcjonalna do różnicy między odpornością czasową R_{cav} i umowną R_g , tj. do istniejącej w danej chwili i w danych warunkach „nadwyżki” ($R_{cav} - R_g$), to z założenia wynika, że

$$\frac{dR_{cav}}{dt} = -\kappa(R_{cav} - R_g), \quad (21)$$

gdzie t jest czasem działania kawitacji na materiał, a κ – współczynnikiem, określającym stopień zmiany odporności materiału z czasem. W ogólnym przypadku współczynnik κ nie jest wielkością stałą, gdyż zależy nie tylko od materiału, lecz również od warunków i etapu (czasu) niszczenia. W pierwszym przybliżeniu zakładamy możliwość posługiwania się średnią wartością tego współczynnika. Przyjmujemy więc, że dla danego materiału i określonych warunków niszczenia $\kappa \approx \text{const}$.



Rys. 5. Zmiana odporności materiału pod wpływem czasu działania kawitacji ($k = \text{const}$, $\kappa > 0$)

Zgodnie z poprzednimi ustaleniami i rysunkiem 5 możemy napisać, że

$$R_g = \frac{k}{k+1} R_0 \approx \frac{k}{k+1} UR, \quad (22)$$

gdzie $k \geq 0$ jest współczynnikiem określającym odporność minimalną, a odporność po-

czątkowa R_0 jest stałą materiałową, określoną w przybliżeniu energią jednostkową UR, nagromadzoną przy sprężystym odkształcaniu ciała w pobliżu granicy zniszczenia, tj. zgodnie z (2) i (22)

$$R_0 \approx UR = \frac{\sigma^2}{2E}. \quad (23)$$

Rozdzielając zmienne i całkując równanie (21) otrzymujemy

$$R_{\text{cav}} = R_g - A e^{-\kappa t},$$

a po uwzględnieniu warunku brzegowego $t=0$, $R_{\text{cav}} = R_0$ i zależności (22)

$$R_{\text{cav}} = \frac{R_0}{k+1} (k + e^{-\kappa t}). \quad (24)$$

Funkcję (24), obrazującą spadek odporności R_{cav} z czasem t (gdy $\kappa > 0$), przedstawiono na rysunku 5. Krzywa $R_{\text{cav}} = f(t)$ przedstawia funkcję monotonicznie malejącą, podobnie jak krzywa Wöhlera. Postać tej funkcji jest również podobna do funkcji wykładniczej opisującej „trwałość materiału pod obciążeniem”, gdy $T = \text{const}$ (patrz str. 135).

3.2. Wyprowadzenie zależności podstawowych

Niszczenie materiału, pod wpływem kawitacji działającej w określonych warunkach, można opisać następującą funkcją:

$$F(V, t, R_{\text{cav}}, P) = 0, \quad (25)$$

gdzie V oznacza ubytek objętościowy materiału, t – czas działania kawitacji, R_{cav} – czasową (chwilową) odporność materiału wyrażoną wzorem (24), P – moc zużywaną na erozję materiału, czyli część pracy sił zewnętrznych działających na materiał w jednostce czasu.

W pierwszym przybliżeniu zakładamy, że moc P jest proporcjonalna do mocy dostarczonej, tj. do iloczynu natężenia kawitacji i pola powierzchni narażonej na jej działanie. Ponieważ w niezmiennych warunkach badań erozyjnych moc dostarczaną uważamy za wielkość stałą, stąd przyjmujemy również $P \approx \text{const}$.

Wielkości V , t , R_{cav} i P są związane następującą zależnością:

$$Pt = R_{\text{cav}} V. \quad (26)$$

Ponieważ w przedstawionym ujęciu pracę sił zewnętrznych wiążemy z ubytkiem masy materiału, stąd zależność (26) należy uważać za słuszną dla $V > 0$.

W okresie inkubacji praca sił zewnętrznych jest zużywana na odkształcenie sprężyste i pozasprężyste, powodujące rozwój uszkodzeń bez wyraźnego ubytku materiału ($V \approx 0$). W związku z tym i zgodnie z zasadą zachowania energii, obowiązuje dla okresu inkubacji

inna postać wzoru (26), a mianowicie:

$$Pt = V^* R_{\text{cav}}^*, \quad (27)$$

gdzie V^* oznacza odkształcaną objętość materiału, a R_{cav}^* pracę odkształcenia odniesioną do jednostki objętości. Inna interpretacja fizyczna wielkości R_{cav} wynika m. in. stąd, że całkowita praca odkształcenia jest większa od energii sprężystej, którą uwzględniano przy określaniu odporności materiału na zniszczenie rozdzielcze.

Równanie opisujące dynamikę procesu erozji otrzymamy różniczkując dwukrotnie funkcję (26) złożoną z trzech argumentów t , $R_{\text{cav}}(t)$ i $V(t)$. Druga pochodna tej funkcji przyjmuje postać następującą:

$$R_{\text{cav}} \frac{d^2 V}{dt^2} + 2 \frac{dV}{dt} \cdot \frac{dR_{\text{cav}}}{dt} + V \frac{d^2 R_{\text{cav}}}{dt^2} = 0, \quad (28)$$

lub, po uwzględnieniu zależności (24)

$$(1 + k e^{\kappa t}) \frac{d^2 V}{dt^2} - 2\kappa \frac{dV}{dt} + \kappa^2 V = 0. \quad (29)$$

Szybkość objętościowego ubywania ciała określa pierwsza pochodna równania (26), wyznaczona względem zmiennej niezależnej t . Po zróżniczkowaniu tego równania oraz odpowiednim przekształceniu, uwzględniającym zależności (23), (24) i (26) oraz przybliżenie $dP/dt \approx 0$, otrzymujemy:

$$\frac{dV}{dt} = V \left(\frac{\kappa}{1 + k e^{\kappa t}} + \frac{1}{t} \right), \quad (30)$$

oraz

$$\frac{dV}{dt} = \frac{(1+k)P}{R_0(k+e^{-\kappa t})} \left(1 + \frac{\kappa t}{1+k e^{\kappa t}} \right) \approx \frac{2(1+k)EP}{\sigma^2(k+e^{-\kappa t})} \left(1 + \frac{\kappa t}{1+k e^{\kappa t}} \right). \quad (31)$$

Z równania (30) wynika, że ubytek objętościowy ciała wynosi:

$$V = C \frac{t}{k + e^{-\kappa t}}, \quad (32)$$

gdzie C jest stałą całkowania, którą można wyznaczyć z warunku $t = \tau$, $V = V_\tau$. Po uwzględnieniu tego warunku wzór (32) przyjmuje postać:

$$V = \frac{V_\tau(k + e^{-\kappa \tau})}{\tau} \frac{t}{k + e^{-\kappa t}}, \quad (33)$$

lub, po wykorzystaniu zależności

$$\frac{V_\tau}{\tau} (k + e^{-\kappa \tau}) = \frac{(1+k)P}{R_0}$$

oraz (23), postać następującą:

$$V = \frac{(1+k)Pt}{R_0(k+e^{-\kappa t})} \approx \frac{2(1+k)EPt}{\sigma^2(k+e^{-\kappa t})}. \quad (34)$$

Zależności (31) i (34) wskazują, że szybkość dV/dt i ubytek objętościowy V zależą od wskaźników materiałowych (E, σ), wrażliwości materiału na działanie kawitacji (k), nasilenia i czasu działania kawitacji oraz warunków niszczenia (P, t, κ). Wynika stąd, że przewidywanie zachowania się materiału pod wpływem kawitacji wymaga znajomości szeregu parametrów stałych, bądź uważanych za stałe. Wartości niektórych z nich (E, σ) są na ogół znane, natomiast inne (P, κ, k) powinny być wyznaczone eksperymentalnie. W dalszej części pracy przedstawiono przybliżony sposób wyznaczania wartości współczynnika κ (jego wartości średniej). Natomiast sposób określania parametrów P i k pozostaje sprawą nadal otwartą. Do wstępnych (szacunkowych) ocen można przyjąć, że

$$k \rightarrow 0 \text{ i } P \approx \frac{\sigma^2}{2E} \left(\frac{dV}{dt} \right)_{\max}, \quad (35)$$

gdzie $(dV/dt)_{\max}$ oznacza maksymalną szybkość erozji ustaloną podczas badań próbek materiałów.

Badając przebieg zmienności funkcji (34) można wykazać, że gdy $t \rightarrow 0$, to $V \rightarrow 0$ oraz gdy $t \rightarrow \infty$, to $V \rightarrow \infty$. Gdy druga pochodna funkcji $V(t)$ jest równa zero, to

$$\kappa t \frac{k e^{\kappa t} - 1}{k e^{\kappa t} + 1} = 2. \quad (36)$$

Równanie (36) określa warunki, przy których szybkość objętościowego ubywania ciała osiąga wartość maksymalną. Ekstremum szybkości znajdziemy rozwiązując równanie (36) względem t i podstawiając otrzymany wynik do równania (31) lub (30) i (33).

Wyniki testu erozyjnego oraz znajomość wielkości charakteryzujących przebieg testu, są podstawą do oceny odporności początkowej R_0 , czasowej R_{cav} i umownej R_g . Po uwzględnieniu równań (22), (24), (26) i (33) otrzymujemy bowiem wzory następujące:

$$R_0 = \frac{(1+k)P\tau}{V_\tau(k+e^{-\kappa\tau})}, \quad (37)$$

$$R_{cav} = \frac{(k+e^{-\kappa\tau})P\tau}{V_\tau(k+e^{-\kappa\tau})}, \quad (38)$$

$$R_g = \frac{kP\tau}{V_\tau(k+e^{-\kappa\tau})}. \quad (39)$$

Warto tu zaznaczyć, że przy porównywaniu odporności kawitacyjnej różnych materiałów górna granica przedziału czasu $(0, \tau)$ powinna być jednakowa dla wszystkich materiałów i powinna obejmować możliwie wszystkie charakterystyczne okresy niszczenia.

Na razie jednak, ze względu na trudność określenia mocy zużywanej na niszczenie materiału, liczbowa ocena odporności nie jest możliwa. Trudność tę można ominąć po-

sługując się względną miarą odporności, a mianowicie trwałością materiału w danych warunkach kawitacyjnych. Trwałość materiału definiujemy w sposób następujący:

$$\delta_{\text{cav}} = \frac{R_{\text{cav}}}{P} = \frac{t}{V} \quad (40)$$

lub po uwzględnieniu zależności (38)

$$\delta_{\text{cav}} = \frac{\tau}{V_{\tau}} \cdot \frac{k + e^{-\kappa t}}{k + e^{-\kappa \tau}} \quad (41)$$

Celem porównania materiałów badanych w tych samych warunkach można posłużyć się pojęciem trwałości średniej:

$$\bar{\delta}_{\text{cav}} = \frac{\bar{R}_{\text{cav}}}{P}, \quad (42)$$

gdzie $\bar{R}_{\text{cav}}$ jest średnią odpornością materiału na erozję w przedziale czasu ($\approx 0, \tau$).

Uwzględniając, że

$$\bar{R}_{\text{cav}} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} R_{\text{cav}} dt = \frac{R_0(1 + k\kappa\tau - e^{-\kappa\tau})}{(1+k)\kappa\tau} = \frac{P(1 + k\kappa\tau - e^{-\kappa\tau})}{\kappa V_{\tau}(k + e^{-\kappa\tau})}, \quad (43)$$

to po podstawieniu (43) do wzoru (42) otrzymujemy

$$\bar{\delta}_{\text{cav}} = \frac{1 + k\kappa\tau - e^{-\kappa\tau}}{\kappa V_{\tau}(k + e^{-\kappa\tau})}. \quad (44)$$

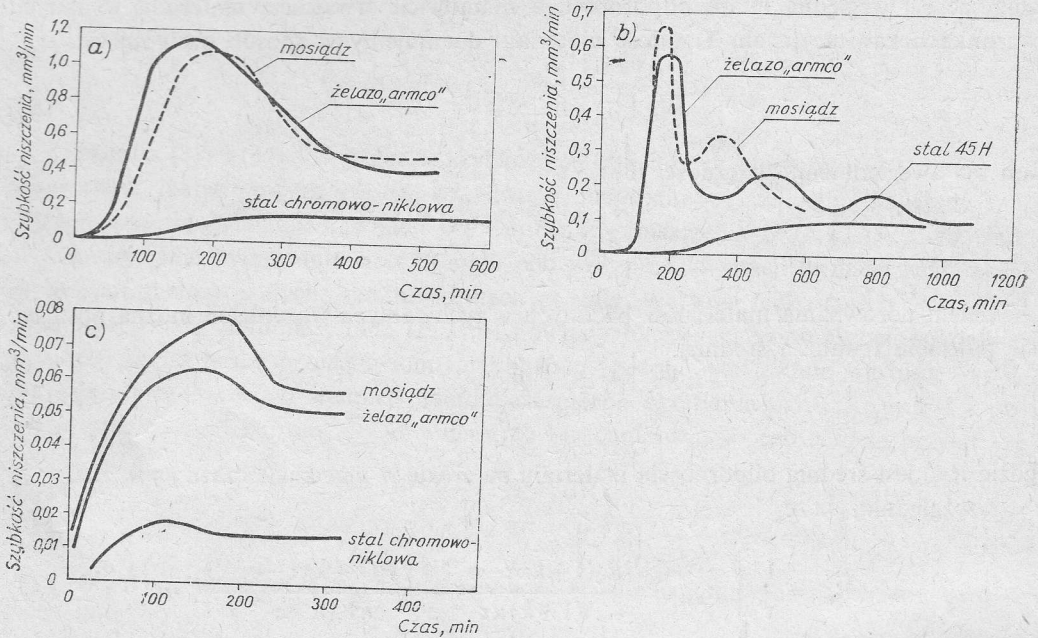
Przedstawione wyżej zależności wyprowadzono przy upraszczającym założeniu, że $P \approx \text{const}$ i $\kappa \approx \text{const}$. Założenie to rzutuje oczywiście na dokładność uzyskiwanych wyników i związanych z nimi ocen. Dokładność tę można zwiększyć przez rozgraniczenie poszczególnych etapów (okresów) niszczenia i przypisanie im odpowiednio zróżnicowanych wartości współczynnika κ .

3.3. Wyznaczanie współczynnika κ gdy $k \rightarrow 0$

Z praktyki laboratoryjnej wiadomo, że „klasyczny” przebieg niszczenia (rys. 1) nie zawsze jest osiągalny, a okres niszczenia ustalonego nie zawsze jednoznacznie określony (rys. 6). Jest to spowodowane nie tylko różną wrażliwością materiałów na działanie kawitacji, ale i tym, że zmiana warunków kawitacyjnych pociąga za sobą zmianę przebiegu niszczenia danego materiału (względnie grup materiałów). Między innymi dlatego nasze dalsze rozważania ograniczymy do przypadku, gdy krzywa $R_{\text{cav}} = f(t)$ monotonicznie opada, a więc gdy $k \rightarrow 0$. Zresztą w obecnej chwili nie potrafimy wskazać na właściwy sposób postępowania, który umożliwiłaby wyznaczanie wartości współczynnika k na drodze doświadczalnej*).

*) Szacunkowo można ocenić wartość współczynnika k na podstawie następujących przesłanek. Gdy odporność materiału R_{cav} zbliża się do odporności umownej R_g , tzn.

$$R_{\text{cav}} \rightarrow R_g = k R_0 / (1 + k),$$



Rys. 6. Wyniki testów erozyjnych przeprowadzonych na trzech stanowiskach: z wirującą tarczą (a), z uderzającą strugą (b), magnetostrykcyjnym (c)

Jak już nadmieniano, współczynnik κ , występujący we wzorze (21) i dalszych, nie jest w ogólnym przypadku wielkością stałą. Jego wartość zależy od materiału oraz warunków i czasu testowania materiału. Przy porównywaniu własności „kawitacyjnych” materiałów, na podstawie wyników testowania ich próbek w niezmiennych warunkach, można posłużyć się średnią wartością współczynnika κ .

Gdy $k \rightarrow 0$, to zgodnie z (33)

$$V = \frac{V_\tau}{\tau} t e^{-\kappa(\tau-t)}, \quad (45)$$

a po obustronnym pomnożeniu (45) przez dt i scałkowaniu w przedziale czasu $t(\tau_{inc}, \tau)$

$$\int_{\tau_{inc}}^{\tau} V dt = \frac{V_\tau}{\kappa^2 \tau} [\kappa \tau - 1 - (\kappa \tau_{inc} - 1) e^{-\kappa(\tau - \tau_{inc})}]. \quad (46)$$

to szybkość objętościowego ubytku ciała osiąga wartość maksymalną $(dV/dt)_{max}$. Przeciętnej szybkości niszczenia $(V_\tau/\tau)_p$ możemy przypisać średnią wartość odporności $\frac{1}{2}(R_0 + R_g)$. W związku z tym, że $P \approx \text{const}$, możemy w przybliżeniu napisać, że

$$R_g(dV/dt)_{max} \approx \frac{1}{2}(R_0 + R_g)(V_\tau/\tau)_p.$$

W wyniku odpowiednich podstawień i przekształceń otrzymujemy

$$\frac{1}{2k} \approx [(dV/dt)_{max}/(V_\tau/\tau)_p] - 1.$$

Rozwijając na szereg potęgowy funkcję wykładniczą $y=e^{-\kappa\tau}$ i ograniczając dokładność rozwinięcia do czterech pierwszych wyrazów, tj.

$$e^{-\kappa\tau} \approx 1 - \kappa\tau + \frac{\kappa^2\tau^2}{2} - \frac{\kappa^3\tau^3}{6}$$

oraz zakładając w przybliżeniu, że $\tau_{\text{inc}} \approx 0$ (przyjmujemy, że udział okresu inkubacji w całym okresie niszczenia jest mały i przy ustalaniu wartości κ może być pominięty), to po wstawieniu odpowiednich wyrażeń do (46) otrzymujemy:

$$\int_{\tau_{\text{inc}} \approx 0}^{\tau} V dt \approx \frac{V_{\tau}}{\tau} \cdot \frac{\kappa\tau - 1 + (1 - \kappa\tau + \frac{1}{2}\kappa^2\tau^2 - \frac{1}{6}\kappa^3\tau^3)}{\kappa^2} = \frac{V_{\tau}\tau}{6} (3 - \kappa\tau). \quad (47)$$

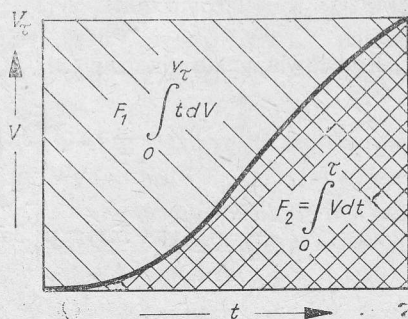
Z zależności (47) wynika, że

$$\kappa \approx \frac{3}{\tau} \cdot \frac{V_{\tau}\tau - 2 \int_0^{\tau} V dt}{V_{\tau}\tau}. \quad (48)$$

Geometryczną interpretacją całki określonej $\int_0^{\tau} V dt$ jest powierzchnia pola oznaczona na rysunku 7 literą F_2 . Ponieważ $v_{\tau} \cdot \tau = F_1 + F_2$ (patrz rys. 7), stąd

$$\kappa \approx \frac{3}{\tau} \cdot \frac{F_1 - F_2}{F_1 + F_2}. \quad (49)$$

Rys. 7. Szkic objaśniający sposób wyznaczania współczynnika κ



Wprowadzając oznaczenie $F_1/F_2 = \beta$ oraz $(\beta - 1)/(\beta + 1) = \alpha$ otrzymujemy ostatecznie:

$$\kappa \approx \frac{3}{\tau} \cdot \frac{\beta - 1}{\beta + 1} = \frac{3\alpha}{\tau}. \quad (50)$$

Otrzymane wyrażenie na κ zawiera łatwo mierzalne wielkości, które mogą być wyznaczone eksperymentalnie dla poszczególnych przypadków (z testów erozyjnych, na podstawie planimetrowania odpowiednich powierzchni pól F_1 i F_2 wykresu $V=f(t)$).

3.4. Wzory przybliżone

Gdy $k \rightarrow 0$ ($R_g \rightarrow 0$), wyprowadzone w punkcie 3.2 zależności przyjmują postać następującą:

- ubytek objętościowy ciała

$$V = \frac{V_\tau}{\tau} t e^{-\kappa(\tau-t)} = \frac{P}{R_0} t e^{\kappa t} \approx \frac{2EP}{\sigma^2} t e^{\kappa t}, \quad (51)$$

- szybkość objętościowego ubywania ciała

$$\frac{dV}{dt} = \frac{V_\tau}{\tau} (1 + \kappa t) e^{-\kappa(\tau-t)} = \frac{P}{R_0} (1 + \kappa t) e^{\kappa t} \approx \frac{2EP}{\sigma^2} (1 + \kappa t) e^{\kappa t}, \quad (52)$$

- odporność początkowa

$$R_0 = \frac{P\tau}{V_\tau} e^{\kappa\tau} \approx \frac{\sigma^2}{2E}, \quad (53)$$

- odporność czasowa (chwilowa)

$$R_{\text{cav}} = R_0 e^{-\kappa t} = \frac{P\tau}{V_\tau} e^{\kappa(\tau-t)} \approx \frac{\sigma^2}{2E} e^{-\kappa t}, \quad (54)$$

- trwałość chwilowa

$$\delta_{\text{cav}} = \frac{\tau}{V_\tau} e^{\kappa(\tau-t)} = \frac{R_0}{P} e^{-\kappa t} \approx \frac{\sigma^2}{2EP} e^{-\kappa t}, \quad (55)$$

- trwałość średnia

$$\bar{\delta}_{\text{cav}} = \frac{e^{\kappa\tau} - 1}{\kappa V_\tau}. \quad (56)$$

Podstawiając do wzorów (51)–(56) wyrażenie na κ otrzymujemy odpowiednio:

$$V = \frac{V_\tau}{\tau} t \exp \left[3\alpha \left(\frac{t}{\tau} - 1 \right) \right] = \frac{P}{R_0} t \exp \left(-3\alpha \frac{t}{\tau} \right), \quad (51a)$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{V_\tau}{\tau^2} (\tau + 3\alpha t) \exp \left[3\alpha \left(\frac{t}{\tau} - 1 \right) \right] = \frac{P}{R_0 \tau} (\tau + 3\alpha t) \exp \left(3\alpha \frac{t}{\tau} \right), \quad (52a)$$

$$R_0 = \frac{P\tau}{V_\tau} \exp 3\alpha, \quad (53a)$$

$$R_{\text{cav}} = R_0 \exp \left(-3\alpha \frac{t}{\tau} \right) = \frac{P\tau}{V_\tau} \exp \left[3\alpha \left(1 - \frac{t}{\tau} \right) \right], \quad (54a)$$

$$\delta_{\text{cav}} = \frac{\tau}{V_\tau} \exp \left[3\alpha \left(1 - \frac{t}{\tau} \right) \right] = \frac{R_0}{P} \exp \left(-3\alpha \frac{t}{\tau} \right), \quad (55a)$$

$$\bar{\delta}_{\text{cav}} = \frac{\tau(e^{3\alpha} - 1)}{3\alpha V_\tau} \approx \frac{(2 + 3\alpha + 3\alpha^2)\tau}{2V_\tau}. \quad (56a)$$

Gdy $k \rightarrow 0$ i $\kappa \rightarrow 0$ ($\beta \rightarrow 1$), to

$$V = \frac{V_\tau}{\tau} \cdot t, \quad \frac{dV}{dt} = \frac{V_\tau}{\tau} = \text{const},$$

$$R_{\text{cav}} = R_0 = \frac{P\tau}{V_\tau} = \text{const} \text{ i } \delta_{\text{cav}} = \bar{\delta}_{\text{cav}} = \frac{\tau}{V_\tau} = \text{const}.$$

Jest to przypadek szczególny, który może wystąpić tylko w okresie tzw. niszczenia ustalonego, to znaczy wtedy, gdy szybkość objętościowego ubywania ciała jest wielkością stałą. Jednak ogólnie przypadek ten nie może obowiązywać. Dlatego też przypisywanie niszczonej próbce niezmienniej „energii odkształcenia niszczącego przypadającej na jednostkę objętości próbki” (np. [20]), lub innych wielkości stałych, charakteryzujących badany materiał (np. [7, 8]), jest zbyt daleko idącym uproszczeniem rzeczywistości.

4. Porównanie z doświadczeniem

Weryfikację przedstawionej hipotezy oparto na porównaniu:

- odporności względnej wybranych materiałów, ocenianej na podstawie zaleceń ASTM [21] i obliczeń trwałości średniej (wzór (56a)),
- krzywych $V=f(t)$ wyznaczonych doświadczalnie i obliczonych według zależności przybliżonej (51a).

Przedmiotem badań były próbki następujących stopów żelaza: żeliwa ZI25, staliwa wyższej jakości L25II, stali wyższej jakości 45 (po hartowaniu w temperaturze 820°C i odpuszczaniu 450°C/1h), stali kwasoodpornej OH18N9, stali nierdzewnej 2H13 (po obróbce cieplnej: hart. 980°C i odp. 300°C oraz hart. 1030°C i odp. 300°C), napoiny chromowo-niklowo-manganowej ES18-8-2 oraz stopu metali nieżelaznych – mosiądzu M70 (wyżarzany w temperaturze 850°C).

Testy erozyjne przeprowadzono w laboratorium Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku na stanowisku z wirującą tarczą [16]. Wyniki testów – ubytki objętościowe V w funkcji czasu t – przedstawiono na rysunku 8. Poszczególne krzywe wyznaczano na podstawie uśrednienia wyników badań kilku próbek z tego samego materiału.

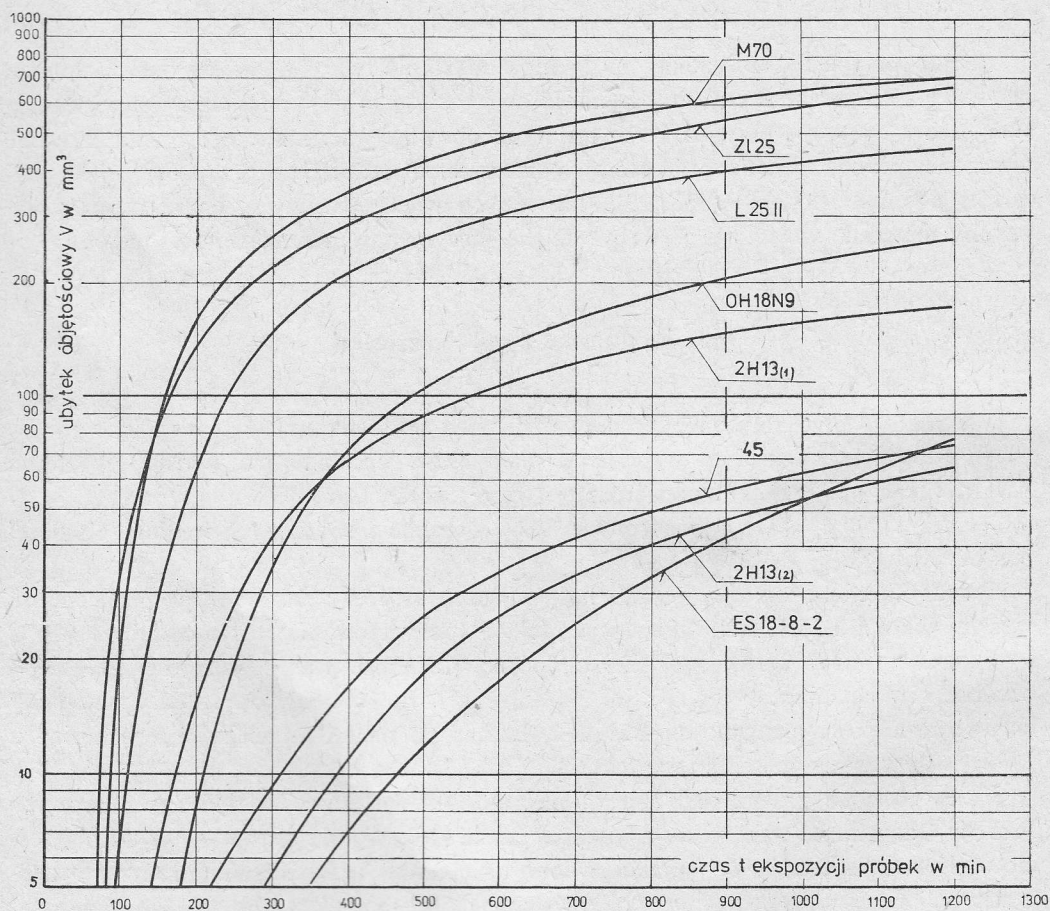
Przebiegi krzywych $V=f(t)$ wskazują na różną zdolność badanych materiałów do przeciwstawiania się niszczącemu działaniu kawitacji. W tabeli 2 zamieszczono ich uszeregowanie według odporności względnej posługując się zaleceniami ASTM [21] i wzorem (56a). Z zestawienia widać, że obydwa sposoby postępowania prowadzą do tych samych wyników.

Obliczone wartości $\bar{\delta}_{\text{cav}}$ zezwalają również na ocenę ilościową badanych materiałów. Ponieważ wartości $\bar{\delta}_{\text{cav}}$ odnoszą się do określonych warunków ekspozycji próbek, należy uważać je za wskaźniki materiałowe związane z danym urządzeniem badawczym.

Zaletą wskaźnika $\bar{\delta}_{\text{cav}}$ jest to, że jego wartość ustala się na podstawie wyników całego testu erozyjnego, a nie na podstawie jednego z elementów krzywej $V=f(t)$; np. τ_{inc} , $1/\text{MDPR}$, $(dV/dt)_{\text{max}}$ itp. W związku z tym można przypuszczać, że ocena materiałów

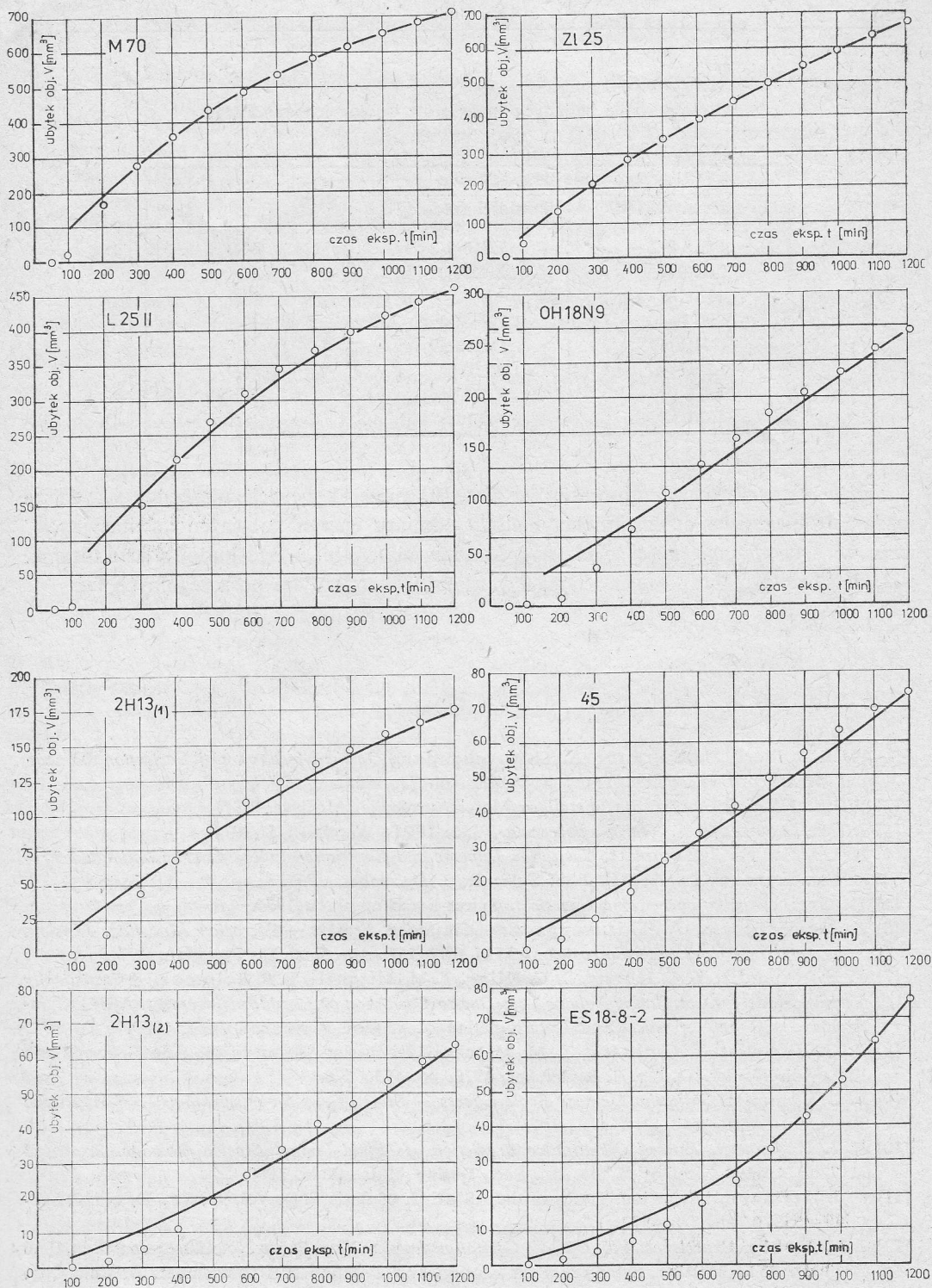
oparta na wskaźniku trwałości średniej ($\bar{\delta}_{\text{cav}}$) będzie trafniejsza od ocen opartych na dotychczas stosowanych wskaźnikach jednolicebowych.

Wyniki testów erozyjnych i wyniki obliczeń (z pominięciem okresu inkubacji) przedstawiono wykreślić na rysunku 9. Porównując krzywe zależności $V=f(t)$ można stwierdzić, że funkcja (51a) dość dobrze opisuje rzeczywisty przebieg niszczenia materiałów



Rys. 8. Przebieg niszczenia materiałów na stanowisku z wirującą tarczą. Prędkość obwodowa próbek ($\phi 30$) i wzбудników kawitacji ($\phi 12 \times 8$), osadzonych w tarczy na średnicy 270 mm, wynosiła 42,5 m/s; czynnik roboczy – woda wodociągowa o temperaturze $20 \pm 1^\circ\text{C}$

pod wpływem kawitacji przepływowej. Należy sądzić, że występujące różnice są spowodowane przede wszystkim założeniami upraszczającymi ($P \approx \text{const}$, $\kappa \approx \text{const}$, $k=0$, wartość τ_{inc}/τ bardzo mała), które zastosowano w przyjętym modelu obliczeniowym. Na uwagi różnice wpłynęła również dyspersja wyników badań erozyjnych, która w tego rodzaju badaniach jest nieunikniona. Celem uzyskania lepszej zgodności wyników należałoby zmniejszyć liczbę założeń i ograniczeń, a w szczególności określić wartość współczynnika k oraz uzmiennić parametr κ .



Rys. 9. Porównanie wyników doświadczeń z wynikami obliczeń; punkty $\circ$ dotyczą wartości zmierzonych, linie ciągłe są krzywymi wyznaczonymi na podstawie wzoru (51a)

Tabela 2

Uszeregowanie badanych materiałów według ich odporności
na erozję kawitacyjną

Uszeregowanie na podstawie		Obliczona wartość $\bar{\delta}_{cav}$ [min/mm ³]
zaleceń ASTM	trwałości średniej $\bar{\delta}_{cav}$	
ES18-8-2	ES18-8-2	24,0
2H13 ₍₂₎	2H13 ₍₂₎	22,8
45	45	18,9
2H13 ₍₁₎	2H13 ₍₁₎	5,9
OH18N9	OH18N9	4,9
L25II	L25II	2,0
Z125	Z125	1,5
M70	M70	1,2

W celu zwiększenia uniwersalności przedstawionej koncepcji niezbędne są dalsze badania zmierzające do znalezienia metody pomiaru energii „obciążeń kawitacyjnych” oraz do ustalenia zależności między odpornością materiału, a jego budową strukturalną, składem fazowym oraz własnościami fizycznymi i chemicznymi poszczególnych faz.

Praca wpłynęła do Redakcji w lipcu 1976 r.

Literatura

- [1] Ph. Eisenberg, H. S. Preiser, A. Thiruvengadam, *On the Mechanism of Cavitation Damage and Methods of Protection*. Trans. SNAME, vol. 73, 1965.
- [2] W. W. Fomin, *Gidrozerozija metalłow*. Maszynostrojenije, Moskwa 1977.
- [3] A. M. Freudenthal, *Teoria zniszczenia*. Prace IPPT, Warszawa 51/1974.
- [4] R. Garcia, F. G. Hammitt, *Cavitation Damage and Correlations with Material and Fluid Properties*. Trans. of the ASME, J. of Basic Eng., December, 1967.
- [5] H. Grein, *Kavitation — eine Übersicht*. Sulzer-Forschungsheft, 1974.
- [6] T. Mc Guinness, A. Thiruvengadam, *Cavitation Erosion — Corrosion Modeling. Erosion, Wear, and Interfaces with Corrosion*. ASTM STP 567, Am. Soc. Testing Mat., 1974.
- [7] F. H. Hammitt, Y. C. Huang, L. C. Kling, T. M. Mitchell, L. P. Solomon, *A Statistically Verified Model for Correlating Volume Loss Due to Cavitation or Liquid Impingement*. ASME Symposium on Characterization and Determination of Erosion Resistance, June, 1969.
- [8] F. G. Hammitt, Y. C. Huang, T. M. Mitchell, Discussion. Trans. of the ASME, J. of Basic Eng., vol. 92, Ser. D, No. 3, September, 1970, pp. 573 - 576.
- [9] F. G. Hammitt, *Cavitation Damage Scale Effects — State of Art Summarization*. J. of Hydraulic Research, IAHR, vol. 13, No. 1, 1975.
- [10] F. J. Heymann, *Toward Quantitative Prediction of Liquid Impact Erosion Damage*. Presented at 72nd Annual Meeting of the Am. Soc. Testing Mats., June, 1969.
- [11] F. J. Heymann, Discussion. Trans. of the ASME, J. of Basic Eng., Vol. 92, Ser. D, No. 3, September, 1970, pp. 576 - 577.
- [12] J. M. Hobbs, *Experience With a 20-ke Cavitation Erosion Test*. Paper No. 120 Presented at 1966 Annual ASTM Meeting, Symposium on Erosion by Cavitation or Impingement, Atlantic City, N. Y., June, 1966.
- [13] G. Hutarew, *Kavitationsschäden und ihre Garantie*. Österreichische Zeitschrift für Elektrizitätswirtschaft, Heft 7, Juli 1975.

- [14] J. Noskiewicz, *Vyhodnocení kavitačního opotřebení materiálu*. HYDROTURBO 76, C7, Brno, 12 - 14 X 1976.
- [15] J. Raabe, *Hydraulische Maschinen und Anlagen, Teil 2*. VDI-Verlag, Düsseldorf 1970.
- [16] Z. Reymann, *Urządzenia do badania odporności materiałów na erozję kawitacyjną*. Biuletyn IMP PAN, nr 88/793/1974.
- [17] K. Steller, Z. Reymann, T. Krzysztofowicz, *Evaluation of the Resistance of Materials to the Cavitation Erosion*. Proc. of the Fifth Conf. on Fluid Machinery, Vol. 2, Akadémiai Kiadó, Budapest 1975.
- [18] K. Steller, *Niszczanie materiału wskutek kawitacji*. Prace IMP, z. 67 - 68, 1975.
- [19] B. C. Syamala Rao, N. S. Lakshmana Rao, K. Seetharamiah, *Cavitation Erosion Studies with Venturi and Rotating Disk in Water*. Trans. of the ASME, J. of Basic Eng., Vol. 92, Ser. D, No. 3, September, 1970.
- [20] A. Thiruvengadam, *The Concept of Erosion Strength. Erosion by Cavitation or Impingement*. ASTM STP 408, Am. Soc. Testing Mats. 1967.
- [21] Standard Method of Vibratory Cavitation Erosion Test. Annual Book of ASTM Standards. Publ. July 1972.
- [22] Praca zbiorowa. *Encyklopedia fizyki*, t. 3, PWN, Warszawa 1974.

Новая идея оценки сопротивления материала против действию кавитационной эрозии

Резюме

Работа касается количественной оценки результатов исследований образцов материалов, которых целью является определение сопротивления твердого тела против действию кавитационной эрозии.

Во вступлении сделан просмотр чаще всего применяемых критериев служащих оценке сопротивления материала против эрозионному действию (способности материала к сопротивлению против разрушающему действию кавитации), приведены некоторые формулы указывающие на зависимость между степенью разрушения материалов и их механическими свойствами, а также между интенсивностью кавитации, сопротивлением материала и ходом разрушения.

Затем представлена новая идея оценки, основанная на кинетической теории разрушения твердых тел и при предположении, что сопротивление материала не является постоянной величиной; изменяется во время кавитационного действия на материал. В этой связи отличаются: начальное сопротивление R_0 , зависящее от свойств материала (формула (23)), мгновенное сопротивление R_{cav} , зависящее от начального сопротивления, а также от условий и времени кавитационного действия (формула (24)) и предельное сопротивление R_g , являющееся дробью начального сопротивления (формула (22)). На этой основе и на основе зависимости (формула (26)) между работой внешних сил и произведенной работой (разрушение тела) выведены зависимости описывающие ход процесса эрозии по времени (формулы (28) - (34)) и формулы определяющие прочность материала (формулы (40) - (44)). Эти зависимости выведены при упрощающем предположении, что коэффициент k , определяющий степень понижения стойкости материала по времени, а также мощность P , поглощаемая на разрушение материала являются постоянными величинами. Формула (49), служащая расчетам среднего значения коэффициента k , выведена при предположении, что мгновенное значение стойкости материала монотонно уменьшается.

Представленная идея была проверена используя приближенные зависимости представленные в пункте 3.4 и результаты исследований образцов из сплавов железа и нежелезных металлов. Исследования проводились в Институте проточных машин ПАН в Гданьске на стенде с вращающимся диском. Сравнение относительной стойкости, оцениваемой по предложениям ASTM [21] и средней стойкости (по формуле (56a)), представлено в таблице 2, а сравнение кривых $V=f(t)$, определенных экспериментально и рассчитанных по формуле (51a), представлено на рис. 9. Сопоставление резуль-

татов указывает на сходимость упорядочения исследуемых материалов по их относительной стойкости, а также на правильность численной оценки их средней прочности. Также ходы разрушений, определенные на основе эрозионных испытаний и по формуле (51a), подтверждают правильность идеи.

В заключении подчеркивается, что для увеличения универсальности представленной идеи необходимо произвести дальнейшие исследования направленные на поиск метода измерения энергии „кавитационной нагрузки”, а также и на определение зависимости между начальным сопротивлением материала R_0 и его структурой, фазовым составом, а также физическими и химическими свойствами отдельных фаз.

New Concept of Evaluation of the Resistance of Materials to the Cavitation Erosion

Summary

The paper concerns a quantitative analysis of results of material specimen testing aimed at determining the resistance of a solid to the cavitation erosion. It begins with a review of criteria used most frequently for the evaluation of the material resistance to erosion (i.e. of its capability to resist the destructive effect of cavitation). Some formulae showing relations between the degree of the material damage and mechanical properties of the material, and between the intensity of cavitation, material resistance and damage progress have been presented.

Next a new concept of evaluation has been presented. The concept has been based on the kinetic theory of solid body damaging and on an assumption that the resistance of a material is not constant but changes while the material is subject to cavitation. This gave the reason for introducing the notions of an initial resistance R_0 , depending on the material properties (formula (23)), an instantaneous resistance R_{cav} , depending on the initial resistance and cavitation conditions and duration (formula (24)), and a limit resistance R_g , which is a fraction of the initial resistance (formula (22)). These formulae, together with formula (26) expressing the relation between the work of external forces and the work used for the material damaging, have been employed as a basis for derivation of relations describing the erosion progress vs. time (formulae (28)÷(34)) and the material durability (formulae (40)÷(44)). The above relations have been derived under a simplifying assumption that the coefficient κ , defining the degree of decrease of the material resistance in time, and the power P used up for the material damaging are constant quantities. Formula (59) used for calculation of the mean value of the parameter κ has been derived under an assumption that the instantaneous material resistance is a monotonously decreasing function.

The concept presented in the paper has been verified with the aid of approximate relations presented in para. 3.4 and results of tests of specimens made of alloys of iron and non-ferrous metals.

The tests have been conducted at the Institute of Fluid-Flow Machinery with a rotating disk facility. Relative resistances, evaluated basing on the ASTM recommendations (21) and the mean durability (according to formula (56a)), are compared in Table 2. Figure 9 shows curves $V=f(t)$ determined experimentally and those calculated according to formula (51a). It follows from a comparison of the results that they are in agreement with the arrangement of the materials tested made according to their relative resistances. Also the correctness of the numerical evaluation of the mean durability is evident. The progress of damaging as determined from the erosion tests and formula (51a) has justified the concept put forward in the paper.

Finally it has been emphasized that in order to increase the versatility of the concept under consideration further investigations are required which will be aimed at finding a method of measuring the „cavitation loading” energy and formulating the relation between the initial resistance R_0 of a material and its structure, phase composition and physicochemical properties of the respective phases.