

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
I N S T Y T U T M A S Z Y N P R Z E P Ł Y W O W Y C H

P R A C E
I N S T Y T U T U M A S Z Y N
P R Z E P Ł Y W O W Y C H

T R A N S A C T I O N S
O F T H E I N S T I T U T E O F F L U I D - F L O W M A C H I N E R Y

75

W A R S Z A W A — P O Z N A Ń 1 9 7 8

P A Ń S T W O W E W Y D A W N I C T W O N A U K O W E

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPLYWOWYCH

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

Copyright

by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1978

Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE — ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 370+90 egz.

Oddano do składania 13 VII 1977 r.

Ark. wyd. 14. Ark. druk. 11,25

Podpisano do druku 22 maja 1978 r.

Papier druk. mat. kl. V, 70 g

Druk ukończono w maju 1978 r.

Nr zam. 761/58

Cena zł 45,— J-7/292

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. A. MICKIEWICZA W POZNANIU

KAZIMIERZ STELLER, TADEUSZ KRZYSZTOFOWICZ

Gdańsk

Badanie odporności materiałów na erozję metodą przepływową, wibracyjną i uderzeniową*

Praca ma charakter doświadczalny. Zawiera opis zjawiska erozji kawitacyjnej i erozji uderzeniowej oraz wyniki badań próbek materiałów na urządzeniu magnetostrykcyjnym, z wirującą tarczą i strumieniowym. Wnioski z badań dotyczą podobieństwa między przebiegiem niszczenia tych samych materiałów na wymienionych stanowiskach oraz oceny odporności materiałów na erozję.

1. Wstęp

Stosowane obecnie metody oceny odporności materiałów na kawitację (erozję kawitacyjną) są metodami względnymi. Polegają one na porównywaniu zniszczeń kawitacyjnych jednego materiału względem drugiego. Ocena taka ma oczywiście sens tylko wówczas, jeśli test przeprowadzono w tych samych warunkach.

Względną odporność materiałów określa się za pomocą różnych urządzeń badawczych. Najczęściej stosowane są urządzenia przepływowe i wibracyjne. Działanie urządzeń przepływowych opiera się na przepływie cieczy z dużą prędkością przez kanały o zmiennym przekroju (tunele wodne, zwężki, wirujące tarcze), zaś urządzeń wibracyjnych na wytwarzaniu w cieczy ciśnień przemiennych za pomocą drgań o wysokiej częstotliwości (pulsatory magnetostrykcyjne lub piezoelektryczne).

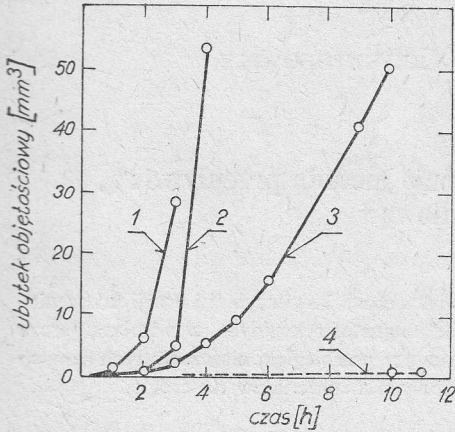
Oprócz urządzeń przepływowych i wibracyjnych stosowane są również urządzenia uderzeniowe. Ich działanie polega na uderzaniu cieczy o materiał z dużą prędkością względną (uderzenia pojedyncze lub wielokrotne, np. strumieniem zwartym).

Jak wiadomo kawitacja niszczy wszystkie materiały. Rozmiar uszkodzeń zależy jednak od rodzaju i stanu materiału, od formy i natężenia kawitacji oraz od ośrodka, w którym ona się rozwija.

W literaturze przedmiotu znajdujemy wiele informacji na temat zachowania się materiałów narażonych na działanie kawitacji oraz zależności, jakie występują między niszczeniem materiałów o różnej strukturze i własnościach fizykochemicznych a parametrami charakteryzującymi przebieg kawitacji. Na ogół informacje te pochodzą z ekspozycji próbek materiałów na wybranych stanowiskach doświadczalnych, a więc odnoszą się do określonego sposobu modelowania kawitacji. Wyniki badań tych samych materiałów na różnych stanowiskach można znaleźć tylko w nielicznych publikacjach (np. w [4, 6]). Przy-

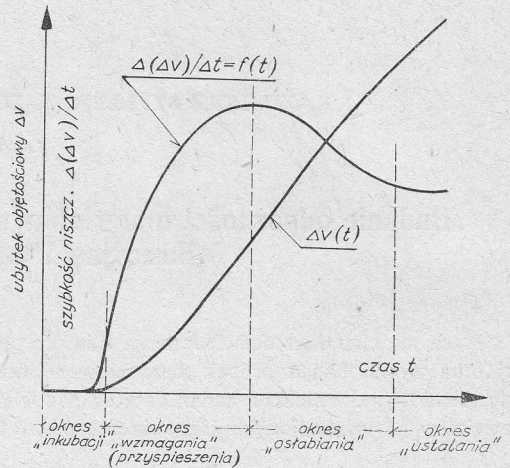
* Praca wykonana w ramach problemu międzyresortowego MR.I.26, temat 07.2.

kładem mogą być wyniki zaczerpnięte z pracy [4] i przedstawione na rys. 1 oraz w tabeli 1. Lecz i w tym przypadku wnioski z badań ograniczono do uszeregowania materiałów



Rys. 1. Przebieg niszczenia próbek materiałów na stanowisku z uderzającą strugą przy prędkości obwodowej 78 m/s (wg [4])

1 - tytan techniczny, 2 - stal 2H13, 3 - stop tytanu z aluminium, 4 - stellite kobaltowy



Rys. 2. Krzywe erozji (rysunek poglądowy)

według ich odporności na erozję kawitacyjną i uderzeniową, a więc pominięto różnice między przebiegami zniszczeń.

Przebieg niszczenia materiału w czasie dzielimy najczęściej na cztery okresy (rys. 2). W pierwszym okresie, tzw. inkubacji, występują odkształcenia w warstwie wierzchniej materiału, natomiast straty masy są praktycznie niemierzalne. W następnym okresie

Tabela 1

Wyniki badań próbek wybranych materiałów na stanowisku magnetycznym przy częstoci drgań 20 kHz i amplitudzie 25 μm (wg. [4])

Materiał	Twardość HB	Ubytki po 3 h ekspozycji	
		mg	mm ³
Tytan techniczny	170	36,5	8,1
Stal 2H13	207	57,5	7,4
Stop tytanu z aluminium	270	14,1	3,2
Stellite kobaltowy	360	1,8	0,2

(przyspieszenia) występuje gwałtowny wzrost szybkości niszczenia, która po osiągnięciu wartości ekstremalnej maleje (okres opóźnienia) lub utrzymuje się przez pewien czas na prawie niezmiennym poziomie. W końcowym okresie szybkość niszczenia jest prawie stała (okres ustalony) lub maleje z czasem. Spadek szybkości niszczenia tłumaczy się m. in. osłabieniem skuteczności uderzeń hydraulicznych przez zmianę konfiguracji powierzchni materiału oraz przez ciecz wypełniającą wżery kawitacyjne.

Opisany przebieg procesu niszczenia można uznać za reprezentatywny tylko dla niektórych warunków badań. Istnieją przypadki wykazujące wyraźne odstępstwa od tego przebiegu. Tak np. „równowaga” w okresie ustalonym jest na ogół obserwowana w czasie niszczenia materiałów metodą przepływową, natomiast podczas ekspozycji próbek na urządzeniu uderzeniowym szybkość niszczenia po pewnym czasie przeważnie maleje i podlega fluktuacjom. Różnice w przebiegach zależą również od rodzaju i stanu materiału. Przykładowo, przy materiałach o dużej wytrzymałości „opóźnienie” często nie występuje lub występuje po okresie niszczenia prawie ustalonego.

Niezależnie od opisanych różnic należy stwierdzić, że zależność stopnia erozji od czasu ekspozycji jest na ogół znana i to zarówno dla erozji kawitacyjnej, jak i uderzeniowej. Natomiast mechanizm niszczenia materiałów przez kawitację i uderzenie oraz sposób oceny odporności materiałów na erozję pozostają nadal nie wyjaśnione. Znajomość mechanizmu niszczenia i sposobu oceny jest warunkiem dla przewidywania zachowania się danego tworzywa podczas kawitacji naturalnej i określania jego odporności na erozję. Obecny stan wiedzy nie upoważnia do wyrażania ogólnych opinii na ten temat. Wyrazem tego mogą być m. in. wyniki dotychczasowych prac Sekcji Maszyn Hydraulicznych, Wyposażenia i Kawitacji IAHR-u, a w szczególności raporty grupy roboczej nr 1 „kawitacyjne efekty skalowe między modelem a prototypem”. W jednym z raportów [7] stwierdza się jedynie, że szybkość niszczenia rośnie ze wzrostem prędkości przepływu, ciśnienia i wymiarów ciała i że w chwili obecnej natężenie niszczenia materiałów może być porównywane tylko w podobnych warunkach erozyjnych.

Celem niniejszej pracy jest ustalenie stopnia podobieństwa między przebiegiem niszczenia tych samych materiałów na stanowisku przepływowym, wibracyjnym i uderzeniowym oraz udzielenie odpowiedzi na pytanie, czy ocena materiałów może pomijać różnice w sposobie ekspozycji (obciążenia) próbek na różnych stanowiskach badawczych.

Najpierw zwrócono uwagę na sposób niszczenia materiałów podczas kawitacji i uderzenia, a następnie przedstawiono wyniki badań wybranych materiałów na trzech stanowiskach laboratoryjnych: magnetostrykcyjnym, z wirującą tarczą i z uderzającym strumieniem. Porównanie wyników umożliwiło wyciągnięcie wniosków na temat przebiegu niszczenia próbek materiałów oraz ustalenie związku między ich odpornością względną na kawitację i uderzenie strumieniem cieczy.

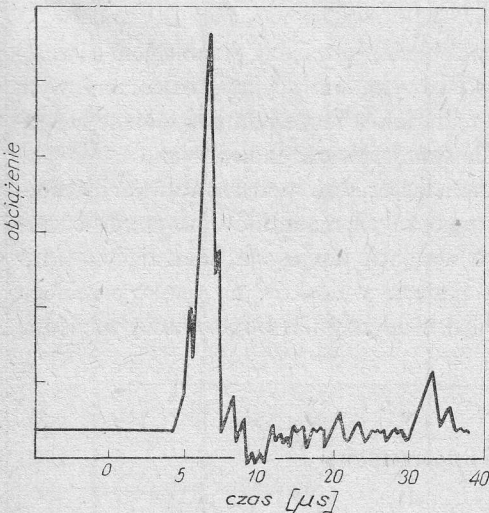
2. Erozja kawitacyjna i uderzeniowa

Kawitacją przyjęto nazywać tworzenie się w cieczy obszarów parowo-gazowych (pęcherzy kawitacyjnych, kawern, obłoków) podczas spadku ciśnienia do wartości równej lub bliskiej ciśnieniu pary nasyconej cieczy w danej temperaturze i ich „zanikanie” pod wpływem wzrostu ciśnienia, np. po przemieszczeniu się obszarów parowo-gazowych do miejsc o wyższym ciśnieniu. Przez „zanikanie” rozumiemy zarówno zamykanie się pęcherzy jak i ich kompresję oraz podział. Zanikanie odbywa się gwałtownie i ma charakter implozji. W wyniku powstają fale ciśnieniowe oraz tworzą się mikrostrumienie cieczy o dużej prędkości. Ciała stałe, przejmujące te impulsy i związane z nimi obciążenia, narażone są na uszkodzenie (erozję kawitacyjną).

Opisany przebieg zjawiska wskazuje na mechaniczny charakter uszkodzeń materiałów. Jest to jednak opis uproszczony. Proces niszczenia materiałów pod wpływem kawitacji jest bardziej złożony; obok zjawisk mechanicznych występują zjawiska chemiczne, elektryczne i ciepłne, które w różnym stopniu mogą wpływać na rozwój zniszczeń. Dlatego m. in. poglądy na mechanizm erozji kawitacyjnej są podzielone, choć na ogół uważa się, że główną rolę w procesie niszczenia odgrywają zjawiska mechaniczne.

Podobny skutek – erozję materiału, wywołują silne uderzenia cząsteczek cieczy o materiał. Podczas zderzenia cząstki cieczy z ciałem stałym następuje najpierw stromy wzrost ciśnienia uderzenia, a następnie jego spadek do ciśnienia spiętrzenia. Wartości ciśnień (uderzenia i spiętrzenia) zależą od prędkości zderzenia, kształtu cząstki i gęstości cieczy. W wyniku zderzenia rozprzestrzenia się, zarówno w cieczy jak i w ciele, fala uderzeniowa, a następnie, po przekroczeniu pewnych warunków granicznych, zaczyna się promieniowy odpływ cieczy z prędkością większą od prędkości zderzenia. Ciśnienie uderzenia (rys. 3) powoduje wgłębienie w materiale, zaś promieniowy odpływ cieczy jego ścinanie i formowanie się wokół wgłębienia otoczki z materiału odkształconego [2, 20].

Na rys. 4a przedstawiono schematycznie zmiany ciśnienia w czasie, spowodowane zderzeniem kulistych cząstek cieczy z nieodkształcalną i początkowo suchą powierzchnią ciała stałego [1]. Po przekroczeniu granicznej wartości zderzeń ($v_T > v_G$), kuliste cząstki cieczy nakładają się i tworzą „sznur” kropeł, zbliżony swym kształtem do strumienia

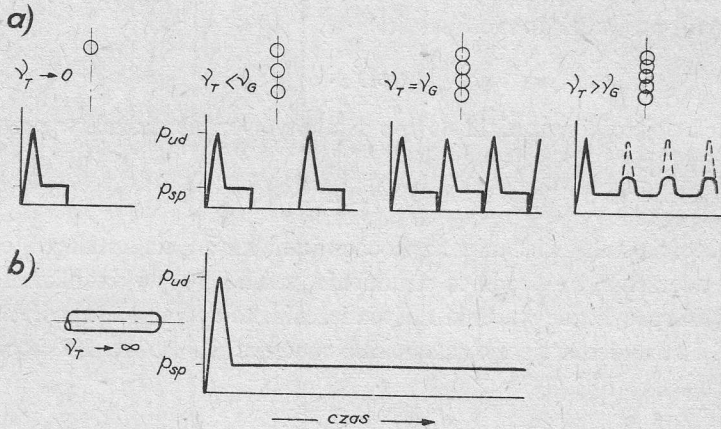


Rys. 3. Przebieg obciążenia ciała stałego podczas uderzenia strumieniem wody o średnicy 3 mm z prędkością 720 m/s (wg [2])

cylicylnicznego. W tych warunkach powierzchni ciała nie można uważać za suchą, lecz pokrytą filmem cieczy. Film ten obniża szczytową wartość ciśnienia uderzenia.

Przy strumieniu zwartym, o stałej średnicy, ciśnienie po zderzeniu utrzymuje się na poziomie ciśnienia spiętrzenia (rys. 4b), a więc jest mniejsze niż podczas uderzeń wielokrotnych. Pod wpływem uderzeń następuje uszkodzenie ciała, przy czym o stopniu uszkodzenia decyduje nie tylko wartość ciśnienia, lecz również odległość ciała od dyszy oraz kształt strumienia. Jeżeli np. strumień uderzający rozpada się, wówczas jego działanie na materiał jest skuteczniejsze od działania strumienia zwartego [1, 4].

Liczne badania wykazały [3, 4], że bez względu na sposób obciążenia materiału — kawitacja lub uderzenie strumieniem cieczy — obraz zniszczeń jest w obydwu przypadkach podobny. Na analogię tę wskazał już w roku 1937 M. Vater [14]; jednak jak dotąd nie



Rys. 4. Schematyczne przedstawienie zmian ciśnienia podczas uderzeń pojedynczych kropli sferycznych (a) oraz strumienia zwartego (b)

udało się zebrać odpowiednich dowodów świadczących o jednakowym mechanizmie erozji kawitacyjnej i uderzeniowej.

Interesujące są natomiast hipotezy O. G. Engela [5], oparte zresztą na materiale doświadczalnym, wskazujące na powstawanie i rozwój pęcherzyków kawitacyjnych po uderzeniu kropli cieczy o ciało stałe. Według Engela pęcherzyki pojawiają się w cieczy po odbiciu fali uderzeniowej od powierzchni rozdziału kropla-powietrze (powstaje wówczas strefa rozrzedzenia) lub podczas rozpływu kropli (przy dużych prędkościach promieniowych ciśnienie obniża się do wartości ciśnienia pary nasyconej). Czas życia pęcherzyka w rozpływającej się kropli ocenia Engel na 0,0014 s.

Ze względu na podobieństwo erozji kawitacyjnej do erozji uderzeniowej R. Canavelis [3] wysunął tezę, że działanie kawitacji na określoną powierzchnię jest równoznaczne z działaniem strumienia zwartego, jeżeli średnie naciski σ i ich częstotliwości ν będą w obydwu przypadkach takie same.

O ile można mówić o podobieństwie zjawisk fizycznych (oddziaływanie kawitacji na materiał jako szczególny przypadek obciążenia udarowego, podobny przebieg niszczenia), a nawet o identyczności głównych parametrów decydujących o rozmiarach erozji (średni nacisk jednostkowy, częstotliwość i czas), to jednak między sposobem działania kawitacji i strumienia zwartego na materiał występują wyraźne różnice. Przyjmując, że przyczyną uszkodzeń jest w obydwu przypadkach uderzenie, to różnice przejawiają się przede wszystkim w wymiarach i formach strumieni, a więc w różnym sposobie obciążenia materiału*).

*) Sposób obciążenia materiału wpływa na jego trwałość (odporność), która przy kawitacji zależy zarówno od uśrednionych własności z makroskopowych objętości, jak również (a może przede wszystkim) od własności mikroobjętości, tj. wytrzymałości poszczególnych składników strukturalnych i ich rozmieszczenia.

Określając nacisk σ jako funkcję prędkości uderzenia v i parametrów postaci strumienia κ , a więc

$$\sigma = f(v, \kappa),$$

to nierówność parametrów postaci strumienia (κ_1 przy kawitacji, κ_2 przy uderzeniu strumieniem zwartym) prowadzi do nierówności

$$v_1 \neq v_2.$$

Ponieważ ubytek objętości materiału ΔV po ustalonym czasie można w przybliżeniu wyrazić zależnością [3]:

$$\Delta V = kv^\alpha d^\beta,$$

gdzie k jest wielkością stałą związaną z fizykochemiczną naturą ciała stałego i jego strukturą, v – prędkością uderzenia, d – średnicą strumienia, zaś α i β – wykładnikami potęgowymi uwzględniającymi specyficzne warunki doświadczenia, to równoznaczność skutków działania kawitacji i strumienia cieczy na ten sam materiał ($k = \text{const}$, $\Delta V = \text{const}$) wymaga spełnienia warunku

$$v_1^{\alpha_1} d_1^{\beta_1} = v_2^{\alpha_2} d_2^{\beta_2}.$$

Warunek ten, opierający się na parametrach $v_1, d_1, \alpha_1, \beta_1$ (przy kawitacji) i $v_2, d_2, \alpha_2, \beta_2$ (przy uderzeniu), wskazuje na różny sposób obciążenia materiału.

Należy dodać, że stosowanie metody uderzeniowej do oceny odporności materiałów na kawitację wymaga, aby wyniki testu uzyskane tą metodą były zgodne z wynikami testów opartych na modelowaniu kawitacji. Oczywiście, nie ma powodu aby różne warunki erozji, scharakteryzowane przez różne wartości parametrów σ i v , prowadziły do podobnych wyników ilościowych. Co więcej, różne metody badań mogą spowodować zróżnicowanie w zachowaniu się tych samych materiałów nawet wówczas gdy σ i v będą te same. Chodzi jednak o to, aby określone materiały były podobnie uszeregowane, a ich odporność względna na erozję we wszystkich przypadkach jednakowa. Spełnienie tego warunku jest nieodzowne dla stosowania metod uderzeniowych do wyznaczania odporności materiału na erozję kawitacyjną. Sprawdzenie tego warunku było głównym celem badań, których wyniki przedstawiono w następnym rozdziale.

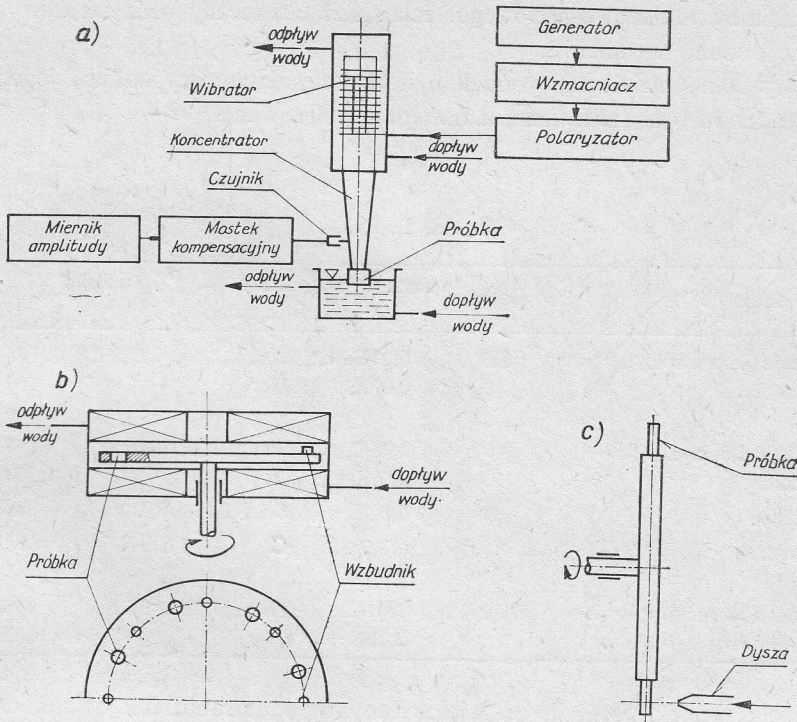
3. Badania doświadczalne

3.1. Stanowiska doświadczalne

Schematy urządzeń badawczych [9, 12] przedstawiono na rys. 5. Parametry charakterystyczne tych urządzeń są następujące:

Urządzenie z pulsatorem magnetostrykcyjnym

średnica próbki	∅ 14 mm
częstotliwość drgań	8,5 kHz
amplituda drgań	55 μm
ciecz	woda o temperaturze $20 \pm 0,5$ deg C
moc wejściowa (nominalna)	250 W



Rys. 5. Schematy stanowisk badawczych: a) urządzenie z pulsatorem magnetostrykcyjnym (IMP PAN Gdańsk), b) urządzenie z wirującą tarczą (IMP PAN Gdańsk), c) urządzenie z uderzającą strugą (ITS Ljubljana)

Urządzenie z wirującą tarczą

średnica próbek	∅ 30 mm (8 szt. w tarczy)
miejsce osadzenia próbek	w tarczy na średnicy 270 mm
rodzaj i wymiary wzbudników	sworznie ∅ 12 × 8
prędkość obwodowa próbek i wzbudników	42 m/s
ciecz	woda o temperaturze 20 ± 1 deg C
moc silnika napędowego	40 kW

Urządzenie z uderzającym strumieniem

wymiary próbek	∅ 15 × 35
miejsce osadzenia próbek	na obwodzie tarczy o średnicy 498 mm
prędkość obwodowa próbek	85 m/s
dysza — średnica na wypływie	∅ 6,1 mm
— odległość od próbek	35 mm
prędkość wypływu z dyszy	13 m/s
ciecz	woda o temperaturze 15 ... 22 deg C

3.2 Przedmiot i sposób badań

Przedmiotem badań były próbki następujących materiałów: żelaza „armco”, stali konstrukcyjnej zwykłej i wyższej jakości, staliwa chromowo-niklowego oraz brązu man-

ganowo-aluminiowo-żelazowo-niklowego. Ich skład chemiczny oraz niektóre własności mechaniczne podano w tabeli 2.

Wyjściowy stan powierzchni próbek był we wszystkich przypadkach jednakowy – próbki po toczeniu były szlifowane, a następnie polerowane.

Tabela 2

Badane materiały

Materiał	Cecha	Skład chemiczny w % wzgl. składnik stopowy	HB	R_m
Stal węglowa konstrukcyjna zwykłej jakości	St3	0,27C, 0,52Mn, 0,17Si, 0,028P, 0,032S, 0,15Cu	125	43
			130	45
			135	46
Stal węglowa konstrukcyjna wyższej jakości	45	0,45C, 0,66Mn, 0,35Si, 0,021P, 0,09S, 0,16Cr, 0,16Cu	158	54
			168	58
Żelazo „armco”	E04	0,02C, 0,08Mn, 0,025Si, 0,034S	84	29
Staliwo stopowe	L1H13N	(13,3 ÷ 14,1)Cr, (0,8 ÷ 1,2)Ni	138	47
			145	50
Brąz manganowo-aluminiowo-żelazowo-niklowy (Novoston)	BM12733	75,7Cu, 11,3Mn, 7,2Al, 3,2Fe, 2,2Ni	168	58
			162	56

Ekspozycja próbek polegała na wielokrotnym poddawaniu ich działaniu kawitacji i strumienia zwartego (na opisanych w pkt. 3.1 stanowiskach) przez okres od kilkunastu do kilkudziesięciu minut (przedział czasowy). Po każdej ekspozycji próbkę omywano, płukano i suszono, a następnie ważono z dokładnością do 0,1 mg. W wyniku tych operacji uzyskano informację o stracie masy materiału w czasie. Ze względu na niejednorodności materiałowe, informację o zachowaniu się danego materiału w określonych warunkach oparto na badaniach co najmniej dwóch próbek. Łączny czas ekspozycji jednej próbki wynosił:

- na urządzeniu magnetostrykcyjnym 360 min,
- na urządzeniu z wirującą tarczą 1200 min,
- na urządzeniu z uderzającym strumieniem 900 - 1200 min.

Czasy ekspozycji próbek wyznaczone były przez warunki doświadczenia i odporność badanych materiałów.

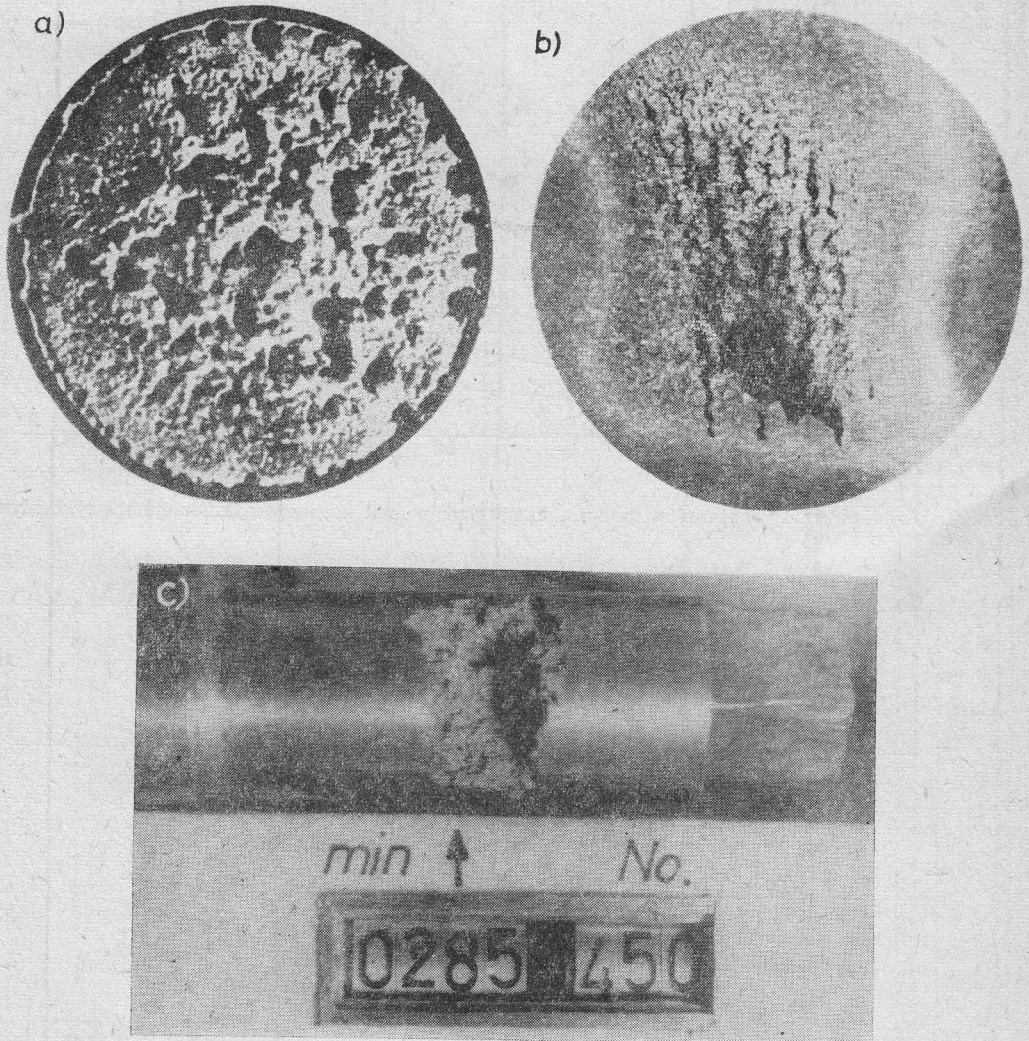
Podczas ekspozycji próbek parametry ruchu urządzeń badawczych były stałe i kontrolowane w sposób ciągły.

3.3. Wyniki badań

Na rys. 6 przedstawiono zdjęcia próbek z żelaza „armco” po badaniach na stanowisku magnetostrykcyjnym (rys. 6a), z wirującą tarczą (rys. 6b) i z uderzającym strumieniem (rys. 6c). Obrazy zniszczeń wskazują na różnice między konfiguracją wżerów powstałych w różnych warunkach. Już na tej podstawie można przypuszczać, że przebieg niszczenia materiałów jest zależny od warunków ekspozycji próbek.

Zmiany ilościowe stwierdzone na próbkach pod wpływem kawitacji i uderzeń strumienia cieczy przedstawiono na rysunkach 7÷12.

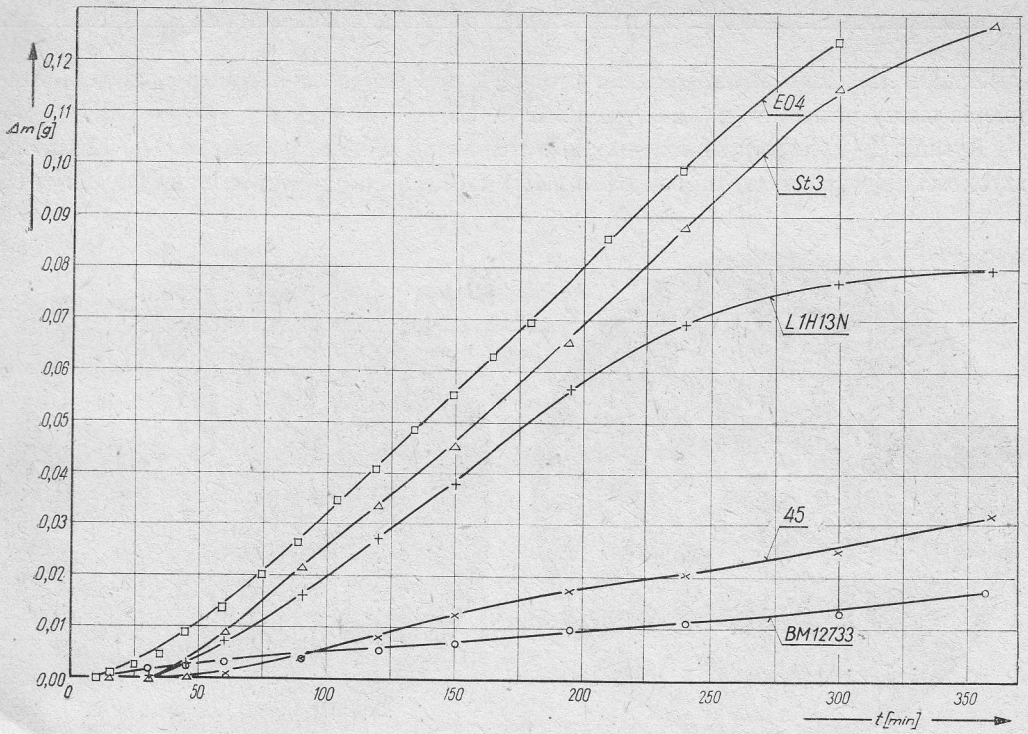
Rysunki 7-9 ilustrują zmianę ubytków masowych Δm , zaś rysunki 10, 11 i 12 zmianę szybkości ubywania masy próbek $\Delta(\Delta m)/\Delta t$ w czasie t . Na podstawie krzywych $\Delta m=f(t)$



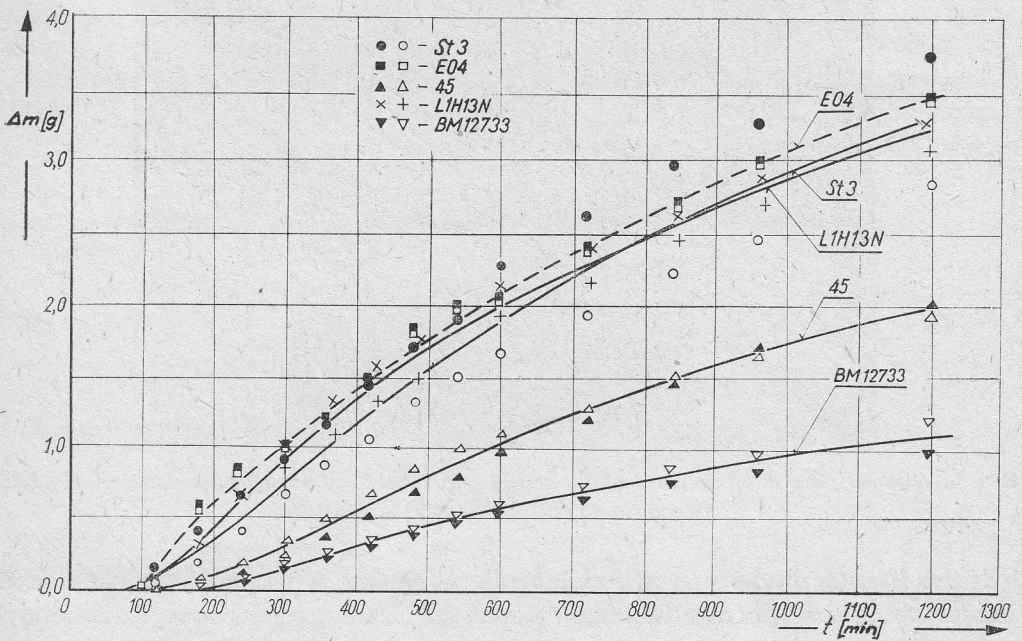
Rys. 6. Zdjęcia próbek z żelaza „armco” po badaniach na stanowisku magnetostrykcyjnym (a), z wirującą tarczą (b) i uderzającą strugą (c)

i $\Delta(\Delta m)/\Delta t=f(t)$ można wnosić o zachowaniu się badanych materiałów w określonych warunkach oraz o wpływie warunków badań na przebieg niszczenia poszczególnych materiałów.

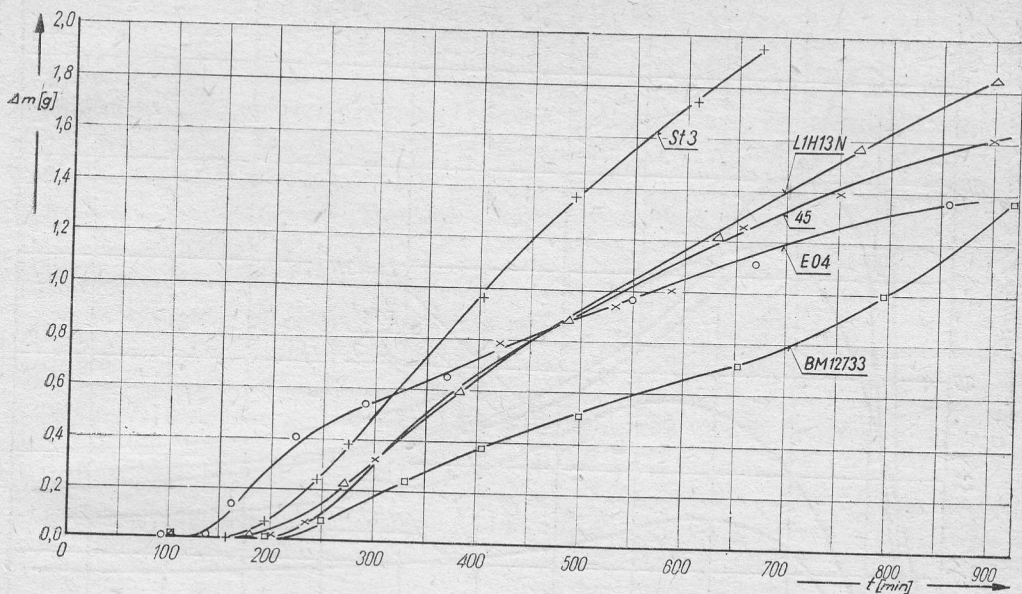
Z przedstawionych wykresów wynika, że badane materiały cechuje różna wytrzymałość na obciążenia szybkozmiennie i że największą wytrzymałość (spośród badanych próbek)



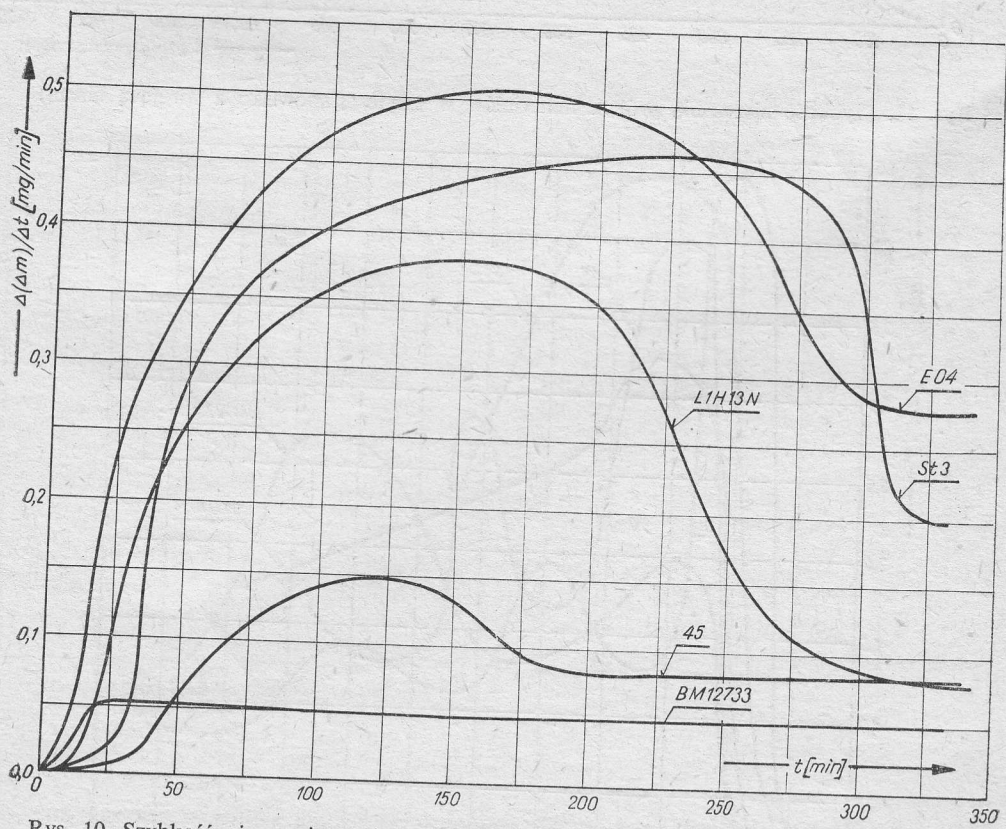
Rys. 7. Ubywanie masy materiałów podczas ekspozycji próbek na stanowisku magnetostrykcyjnym



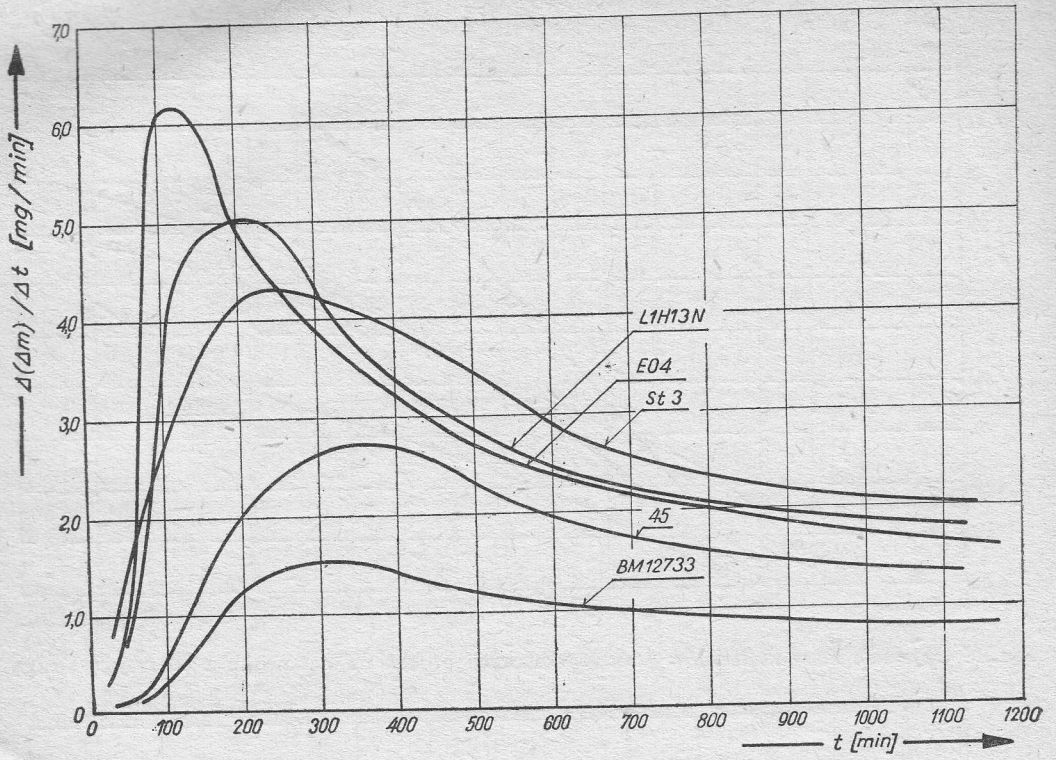
Rys. 8. Ubywanie masy materiałów podczas ekspozycji próbek na stanowisku z wirującą tarczą



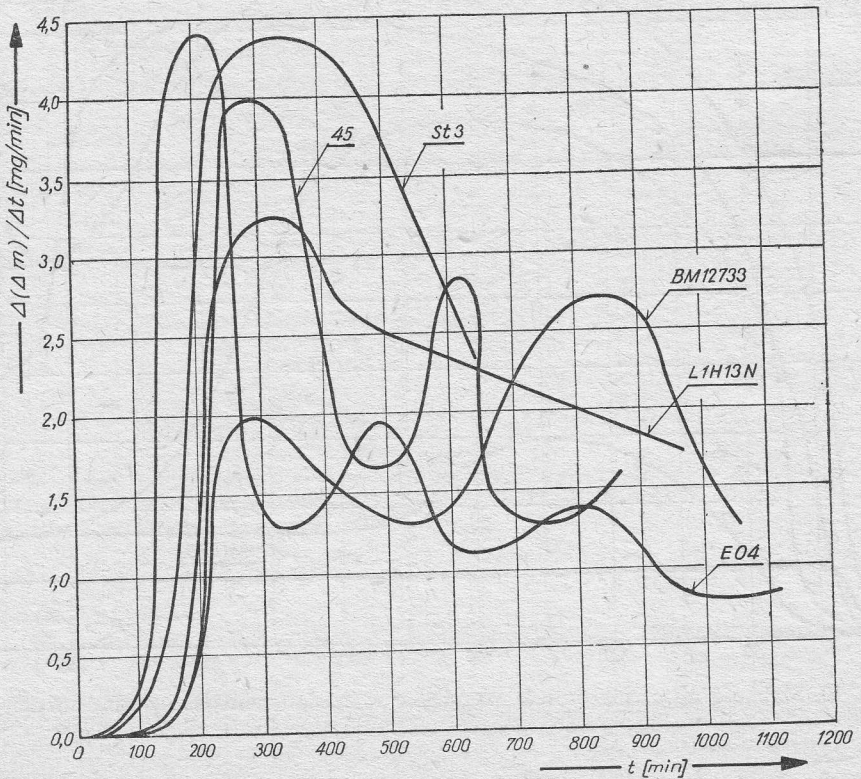
Rys. 9. Ubywanie masy materiałów podczas ekspozycji próbek na stanowisku z uderzającą strugą



Rys. 10. Szybkość niszczenia próbek materiałów w czasie (stanowisko magnetostrykcyjne)



Rys. 11. Szybkość niszczenia próbek materiałów w czasie (stanowisko z wirującą tarczą)



Rys. 12. Szybkość niszczenia próbek materiałów w czasie (stanowisko z uderzającą strugą)

wykazały próbki z brązu BM 12733. Porównując wykresy $\Delta m=f(t)$ i $\Delta(\Delta m)/\Delta t=f(t)$ zauważamy różnice między postaciami i położeniem względnym odpowiednich krzywych odnoszących się do różnych warunków badań. Różnice te rzutują na oceny ilościowe, a przede wszystkim na względną odporność materiałów przeciw erozji. W celu określenia tych różnic posłużono się wybranymi wskaźnikami kryterialnymi. Przyjęto następujące wskaźniki jednoliczbowe:

- czas inkubacji,
- ubytek masy po określonym czasie ekspozycji,
- czas ekspozycji dla spowodowania określonego ubytku masy,
- maksymalną szybkość niszczenia.

Wartości względne tych wskaźników były podstawą oceny materiałów badanych w różnych warunkach. Zamieszczono je w tabeli 3.

Wyniki badań próbek na stanowisku magnetostrycyjnym i z wirującą tarczą wskazują na podobne uszeregowanie materiałów, mimo różnic między wartościami δ określającymi

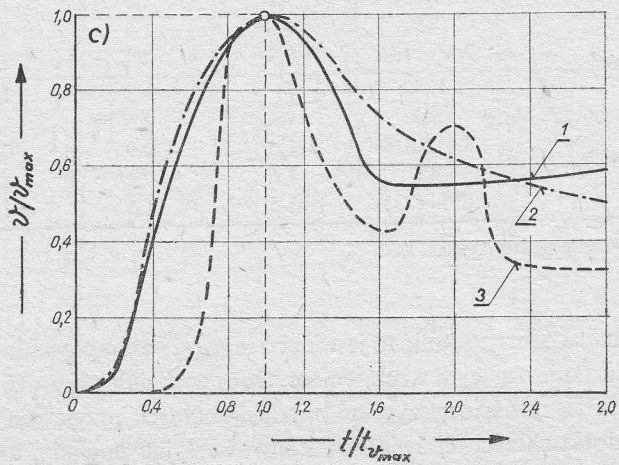
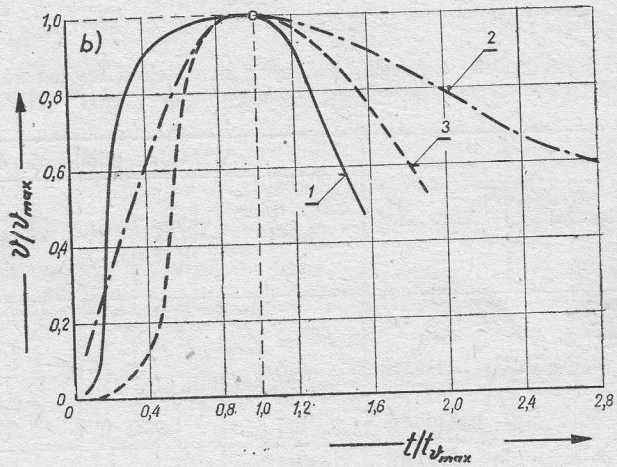
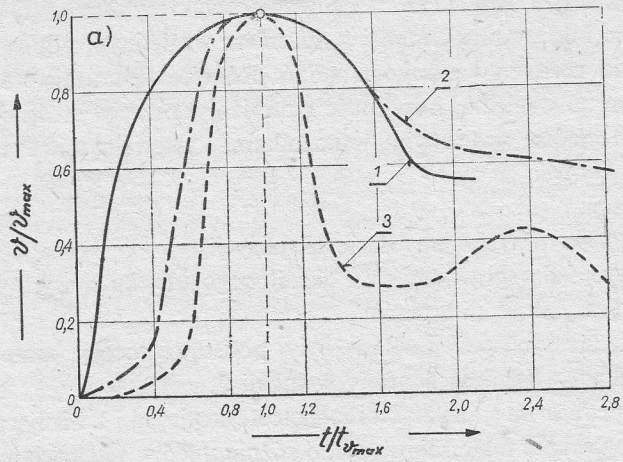
Tabela 3

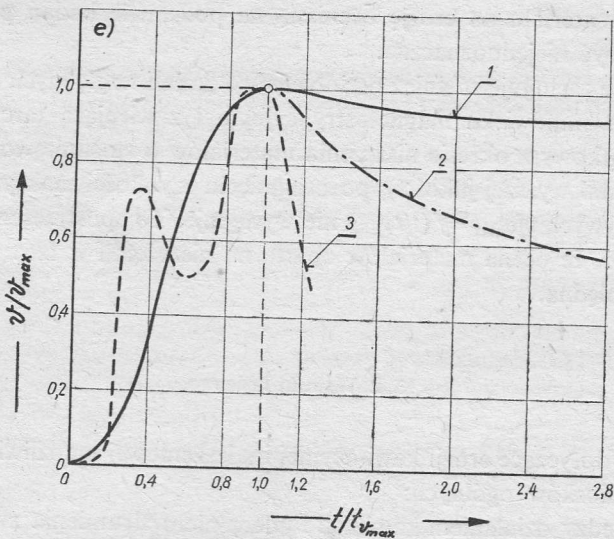
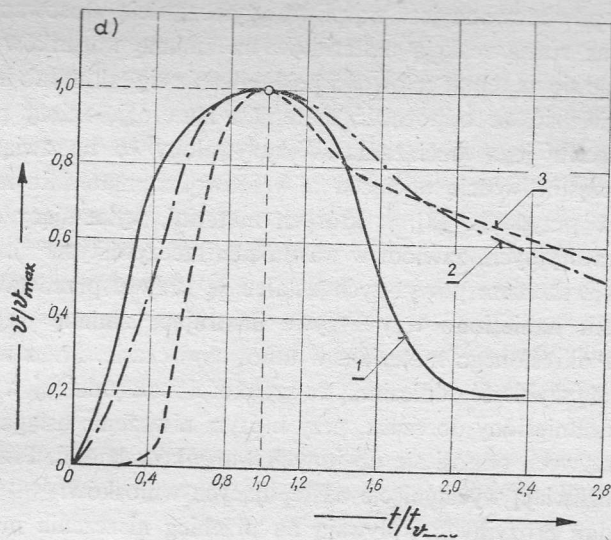
Porównanie względnej odporności erozyjnej badanych materiałów według różnych kryteriów klasyfikacyjnych

Stanowisko badawcze	Materiał	Względna odporność δ według			
		czasu inkubacji δ_{in}	ubytku masy δ_m	czasu ubywania masy δ_t	maksymalnej szybkości niszczenia δ_v
Magnetostrycyjne (δ_m po 3h, δ_t dla 15 mg)	E04	1	1	1	1
	St3	1,3	1,2	1,2	1,1
	L1H13N	1,6	1,4	1,4	1,3
	45	1,6	4,1	2,8	3,4
	BM12733	0,5	7,8	5,1	8,5
Wirująca tarcza (δ_m po 6h, δ_t dla 1g)	E04	1	1	1	1
	St3	1,3	1,0	1,2	1,4
	L1H13N	1,2	1,0	1,1	1,2
	45	1,8	1,9	1,9	2,3
	BM12733	1,9	3,4	3,6	4,1
Uderzająca struga (δ_m po 6h, δ_t dla 1g)	E04	1	1	1	1
	St3	1,4	0,6	0,7	1,0
	L1H13N	1,6	0,9	0,9	1,4
	45	1,6	0,9	1,0	1,1
	BM12733	1,5	1,5	1,4	1,6

Uwaga: Odporność δ odniesiona do żelaza E04.

odporność względną. Uszeregowanie to jest nieco inne od uszeregowania wynikającego z badań na stanowisku z uderzającym strumieniem. Odpowiedzialność za różnice w klasyfikacji materiałów można oczywiście przypisać niedoskonałości przyjętych wskaźników kryterialnych. O niedoskonałości tej świadczą kontrowersyjne poglądy, a nawet wątpliwości





Rys. 13. Zmiana względnej szybkości niszczenia próbek z żelaza „armco” (a), stali konstrukcyjnej zwykłej (b) i wyższej jakości (c), staliwa chromowo-niklowego (d) oraz brązu manganowo-aluminiowo-żelazowo-niklowego (e) w zależności od czasu umownego

1 – stanowisko magnetostrykcyjne, 2 – stanowisko z wirującą tarczą, 3 – stanowisko z uderzającą strugą

co do celowości stosowania wskaźników jednoliczbowych do oceny materiałów [13]. Jednak nie tylko wskaźniki świadczą o różnicach w ocenie. Porównując np. krzywe $\Delta m = f(t)$, wyznaczone na podstawie ekspozycji próbek w różnych warunkach stwierdzimy, że krzywe obrazujące przebieg erozji uderzeniowej układają się inaczej niż krzywe odnoszące się do erozji kawitacyjnej. Rozbieżności te wpłynęły oczywiście na uszeregowanie materiałów oraz na różnice w ocenie ich odporności względnej. Ostatecznie należy przyjąć, że

niepewność oceny spowodowana jest wątpliwą użytecznością stosowanych wskaźników jednoliczbowych oraz różną reakcją materiałów na zmianę warunków badań.

Nie wypowiadając się na temat celowości posługiwania się takim lub innym miernikiem oceny*) należy stwierdzić, że odporność materiału na erozję zależy przede wszystkim od rodzaju i sposobu jego obciążania. Wskazywałoby to na związek między formą, poziomem i częstotliwością obciążeń a wrażliwością materiału na erozję. Tłumaczyłoby to również przypadki [8], w których materiał, wykazujący dobrą odporność w warunkach laboratoryjnych, zawiódł w warunkach rzeczywistych**).

Pośrednim potwierdzeniem powyższych ustaleń są krzywe przedstawione na rys. 13. Na każdym rysunku naniesiono trzy krzywe ilustrujące zmianę względnej szybkości niszczenia próbek z określonego materiału w umownym czasie. Przez względną szybkość niszczenia rozumie się szybkość odniesioną do szybkości maksymalnej, a przez czas umowy, czas ekspozycji odniesiony do czasu, przy którym niszczenie osiąga szybkość maksymalną. Każda z krzywych odnosi się do innych warunków badań. Przedstawione w ten sposób wyniki umożliwiają wyciągnięcie następujących wniosków:

- warunki badań erozyjnych wpływają na przebieg niszczenia materiału w czasie,
- materiały wykazują różną wrażliwość na zmianę warunków badań (najmniej wrażliwe są materiały o dużej wytrzymałości),
- odporność materiału na erozję oceniana na podstawie badań próbek w różnych warunkach może być niejednoznaczna.

Na podkreślenie zasługuje również podobieństwo zmian względnych szybkości niszczenia materiałów na stanowisku magnetostrykcyjnym i z wirującą tarczą. Podobieństwo występuje w początkowym okresie niszczenia materiałów o stosunkowo dużej odporności na erozję (brąz i stal wyższej jakości); po osiągnięciu szybkości maksymalnej ($t/t_{v_{\max}} = 1$) podobieństwo krzywych $v/v_{\max} = f(t/t_{v_{\max}})$ nie występuje. To spostrzeżenie stanowi jeszcze jeden dowód na to, że ocena materiałów oparta na niszczeniu w tzw. okresie ustalonym może być oceną błędną.

3.4. Wnioski końcowe

Wyniki badań dotyczące erozji kawitacyjnej i uderzeniowej umożliwiają sformułowanie następujących wniosków ogólnych:

a. Różnice między działaniem kawitacji i uderzeniem strumienia zwartego o materiał przejawiają się m. in. w postaci różnego przebiegu krzywych niszczenia próbek z tego samego materiału.

b. Ocena względnej odporności materiału na erozję zależy od sposobu przeprowadzania testu erozyjnego i przyjętego wskaźnika oceny. W związku z tym ma ona zasięg ograniczony;

*) Skłaniamy się do poglądu wyrażonego w normie ASTM [15], aby klasyfikację materiałów pod względem ich odporności na erozję, przeprowadzać na podstawie przebiegu krzywych przedstawiających zależność między ubytkiem objętościowym lub głębokością wżerów i czasem ekspozycji próbek.

***) Oczywiście w warunkach rzeczywistych występują dodatkowe czynniki wpływające na przebieg niszczenia materiału. Sprawa adekwatności wyników testu erozyjnego do zachowania się materiałów w warunkach rzeczywistych jest odrębnym zagadnieniem, które częściowo omówiono w [11].

może być w pełni miarodajna tylko wtedy, jeżeli proces erozyjny wywołany w warunkach laboratoryjnych będzie podobny do procesu występującego w naturze oraz gdy podstawą oceny będą charakterystyki niszczenia materiałów w czasie, tj. krzywe $\Delta m = f(t)$.

c. Wskaźniki jednoliczbowe, stosowane przy ocenie odporności materiałów na erozję są umowne i nie odzwierciedlają zachowania się materiałów we wszystkich okresach niszczenia. Ponieważ nie są one reprezentatywne dla całego testu, mogą prowadzić do mylnych ocen. Z tego względu należy je zaliczyć do parametrów pomocniczych, przydatnych do przybliżonej oceny materiałów.

d. Stosując różne metody badań, uzyskujemy na ogół podobną kolejność w uszeregowaniu materiałów pod względem ich odporności na erozję. Odnosi się to do materiałów o wyraźnie zróżnicowanych własnościach fizykochemicznych. Przy materiałach o zbliżonych własnościach i niejednorodnej strukturze nie można wykluczyć rozbieżności w ich uszeregowaniu.

e. Największe zróżnicowanie ocen odporności materiałów na erozję uzyskuje się z badań próbek metodą wibracyjną, najmniejsze – z badań metodą uderzeniową.

Praca wpłynęła do Redakcji we wrześniu 1976 r.

Literatura

- [1] E. F. Beutin, *Flüssigkeitsschlag, Grundlagen der Beanspruchung und ihre technische Nutzenwendung*. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität Hannover, 1975.
- [2] J. H. Brunton, *Deformation of Solids by Impact of Liquids at High Speeds*. Erosion and Cavitation, ASTM STP 307, 1962.
- [3] R. Canavelis, *Analyse du mécanisme de l'érosion de cavitation*. La Houille Blanche, 2 - 3, 1968.
- [4] B. S. Dorogow, *Erozija lopatok w parowych turbinach*. Izdat. „Energija”, Moskwa – Leningrad 1965.
- [5] O. G. Engel, *Waterdrop Collisions with Solid Surfaces*. Jour. of Research of the Nat. Bur. Standards, Vol. 54, No. 5, 1955.
- [6] J. Grychowski, J. Lamboj, *Wpływ stosowanej metody na wynik laboratoryjnych badań kawitacyjnej odporności tworzyw konstrukcyjnych*. Ochrona przed korozją, z. 1, 1974.
- [7] F. G. Hammit, *Cavitation Damage Scale Effects - State of Art Summarization*. Journal of Hydraulic Research IAHR, Vol. 13, 1975, No. 1.
- [8] A. T. Troskoleński, S. Łazarkiewicz, *Pompy wirowe*. 3 wyd. WNT, Warszawa 1973.
- [9] Z. Reymann, *Urządzenia do badania odporności materiałów na erozję kawitacyjną*. Biuletyn IMP PAN nr 88/793/1974.
- [10] M. C. Rochester, J. H. Brunton, *Surface Pressure Distribution During Drop Impact*. 4th Int. Conf. on Rain Erosion and Allied Phenomena, Meersburg, Mai 1974.
- [11] K. Steller, T. Krzysztofowicz, Z. Reymann, *Effects of Cavitation on Materials in Field and Laboratory Conditions*. Erosion, Wear, and Interfaces with Corrosion, ASTM STP 567, 1974.
- [12] K. Steller, V. Horvat, T. Krzysztofowicz, *Odporność niektórych materiałów na erozję uderzeniową*. Biuletyn IMP PAN nr 112/806/1975.
- [13] 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.
- [14] M. Vater, *Das Verhalten metallischer Werkstoffe bei Beanspruchung durch Flüssigkeitsschlag*. VDI-Zeitschrift, Bd. 81, Nr 45, 1937.
- [15] American Society for Testing and Materials. „Standard Method of Vibratory Cavitation Erosion Test”. Published July 1972.

Исследование эрозиоустойчивости материалов проточным, вибрационным и ударным методами

Резюме

Работа имеет экспериментальный характер. Целью работы является определение степени подобия между ходом разрушающего действия кавитации на проточном и ударном стендах, а также определение, разрешает ли экспозиция образцов на различных стендах давать такую же самую оценку исследуемых материалов.

Во вступлении подчеркивается, что ныне применяемые методы оценки эрозиоустойчивости материалов являются относительными методами.

Во втором разделе описываются явления кавитационной и ударной эрозий обращая внимание на гипотезы О. Г. Энгела (1955) и Р. Канавелиса (1968), касающиеся подобия обоих явлений.

В разделе 3 даны описания экспериментальных стендов (рис. 5), информации на тему исследуемых материалов (таблица 2), а также результаты экспериментальных исследований (рис. 7 ÷ 12). Основой оценки материалов, исследованных в различных условиях, были одночисловые показатели и время инкубации, убыль массы за определенное время экспозиции, время экспозиции, необходимое для осуществления определенной убыли массы, а также максимальная скорость разрушения. Оценка сводилась к сравнению их относительной эрозиоустойчивости (таблица 3).

В заключении формулируются следующие выводы:

1. Разницы, выступающие между действием кавитации и ударом сплошного потока в материал объявляются, м. пр. в виде различного хода кривых разрушения образцов из этого же самого материала.

2. Оценка относительной эрозиоустойчивости материала зависит от способа эрозионного испытания и от принятого показателя оценки.

3. Применяя различные методы исследований получается в общем похожая очередность в упорядочении материалов с точки зрения их эрозиоустойчивости. Это касается материалов отчетливо различающихся физико-химическими свойствами. При материалах характеризующихся похожими свойствами и неоднородной структурой нельзя исключить расхождения в их упорядочении.

Testing of Erosion Resistance of Materials Using the Flow, Vibratory and Impact Methods

Summary

The purpose of the work, which is of experimental nature, is to determine to what extent is the course of damaging due to the cavitation similar in the fluid-flow, vibratory and impact test stands and to decide whether exposure of specimens on different test stands allows for identical evaluation of the materials tested.

It has been pointed out in the introduction that the methods of evaluation of the erosion resistance of materials as used nowadays are of relative nature.

The phenomena of cavitation and percussive erosion have been described in Chapter 2. Hypotheses of O. G. Engel (1955) and R. Canavelis (1968) concerning the similarity of the both phenomena have been mentioned.

Chapter 3 contains a description of the test stands (Fig. 5), specification of the materials tested (Table 2) and the results of experiments (Figs 7 through 12). Single-number indicators and the incubation time, the mass loss after a given exposure time, the exposure time needed to cause a given mass loss, and the maximum damaging rate were the basis of evaluation of materials tested in various con-

ditions. The evaluation has been reduced to the comparison of the relative resistance of materials to erosion (Table 3).

The following conclusions have been formulated:

– Differences between the effects of cavitation and impact of a continuous jet with material manifest themselves, among others, in the form of different material damage vs. time curves for the same material.

– Different methods of testing result, in general, in similar arrangement of materials with respect to their resistance to erosion. This is true for materials having clearly different physico-chemical properties. For materials of similar properties and heterogeneous structure differences in arranging can not be excluded.