

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

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPLYWOWYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

79

WARSZAWA - POZNAŃ 1980
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 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

RADA REDAKCYJNA — EDITORIAL BOARD

TADEUSZ GERLACH · HENRYK JARZYNA · JERZY KRZYŻANOWSKI
STEFAN PERYCZ · WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ · ROMUALD PUZYREWSKI
KAZIMIERZ STELLER (PRZEWODNICZĄCY — CHAIRMAN) · ROBERT SZEWAŁSKI
JÓZEF ŚMIGIELSKI

KOMITET REDAKCYJNY — EXECUTIVE EDITORS

KAZIMIERZ STELLER — REDAKTOR — EDITOR
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ · ZENON ZAKRZEWSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA — EDITORIAL OFFICE

Instytut Maszyn Przepływowych PAN
ul. Gen. Józefa Fiszersa 14, 80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, tel. 41-12-71

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1980

Printed in Poland

ISBN 83-01-02691-X
ISSN 0079-3205

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE — ODDZIAŁ W POZNANIU

Wydanie I. Nakład 370+90 egz. Ark. wyd. 11. Ark. druk. 8,25. Papier sat. kl. V, 70 g, 70×100. Oddano do składania 2 I 1980 r. Podpisano do druku w listopadzie 1980 r. Druk ukończono w listopadzie 1980 r. Zam. nr 343/20, T-6/506.

Cena zł 40.—

DRUKARNIA UNIWERSYTETU IM. A. MICKIEWICZA W POZNANIU

KAZIMIERZ STELLER, EUGENIUSZ PARTYKA, ZDZISŁAW REYMANN
TADEUSZ KRZYSZTOFOWICZ

Gdańsk

Przyczynę do przewidywania trwałości elementów maszyn narażonych na działanie kawitacji. Związek między natężeniem kawitacji i zachowaniem się materiału w początkowym okresie niszczenia*

Przedmiotem pracy jest ustalenie zasad przewidywania odporności materiałów na kawitację rozwijającą się w różnych warunkach. Założono, że podstawą przewidywania powinna być znajomość natężenia kawitacji i wyniki testowania odpowiednich próbek materiału.

Praca opiera się na doświadczeniach. Ocenę natężenia kawitacji oparto na pomiarze impulsów ciśnienia działających na materiał oraz na uśrednionych charakterystykach statystycznych wskazujących na energetyczny poziom tych impulsów. W wyniku określono związek między wskaźnikami energii dostarczonej do materiału przez implodujące w różnych warunkach pęcherzyki kawitacyjne i stopniem uszkodzenia materiału w okresie inicjacji.

1. Wprowadzenie

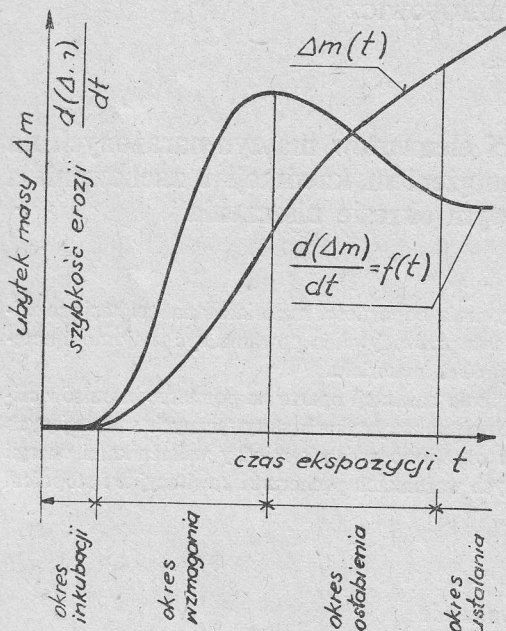
Niszczenie materiału pod wpływem kawitacji rozpoczyna się od przyrostu energii wewnętrznej i zmian strukturalnych w warstwie wierzchniej. W początkowym okresie niszczenia, tak zwanym okresie inkubacji, straty są bardzo małe i praktycznie niemierzalne. Widoczne zmatowienie powierzchni jest świadectwem występowania odkształceń plastycznych.

Wskutek dalszego działania kawitacji na materiał wzrastają nierówności powierzchni, pojawiają się szczeliny i wgłębienia oraz następuje usuwanie (wykruszanie) cząstek materiału. Ubywanie masy nie przebiega liniowo (rys. 1). Po okresie inkubacji następuje okres wzmożonego niszczenia, po którym szybkość niszczenia ustala się lub słabnie. Zmiany szybkości niszczenia w czasie, a więc i długości poszczególnych okresów, zależą od warunków kawitacyjnych oraz rodzaju i stanu materiału.

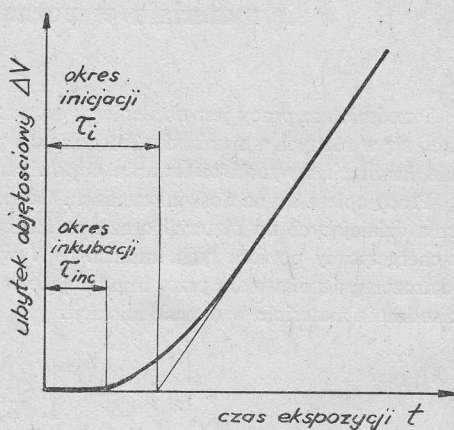
Okres inkubacji jest najczęściej definiowany jako początkowy okres niszczenia materiału, w którym ubywanie masy materiału jest znikome i praktycznie niemierzalne [4, 11], szybkość erozji jest pomijalnie mała (w porównaniu z jej przyszłą ewolucją) [22], materiał ulega przemianom strukturalnym (np. metale ciągliwe — utwardzeniu przez zgniot)[4].

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

Ilościowo okres inkubacji definiuje się albo czasem działania kawitacji na materiał bez powodowania wyraźnych ubytków masy materiału, albo czasem wyznaczonym przez punkt przecięcia osi czasu z prostą, stanowiącą przedłużenie odcinka krzywej erozji o największym nachyleniu (rys. 2). W celu zapewnienia pojęciu „okres inkubacji” jednoznacznej definicji rozróżnia się [11] w początkowym etapie niszczenia dwa okresy: inkubacji i inicjacji. Znaczenie obu pojęć objaśnia rysunek 2.



Rys. 1. Przebieg niszczenia materiału pod wpływem kawitacji



Rys. 2. Niszczenie materiału w okresie inkubacji i inicjacji

J. Varga, G. Sebestyen i T. Bata [12, 21] wskazują na krytyczny punkt erozji, zawarty pomiędzy okresem inkubacji i okresem wzmożonego niszczenia (poza okresem inicjacji). Według nich punkt ten może być dobrym wskaźnikiem odporności materiału na erozję. Jako miernik oceny nie znalazł on jednak szerszego zastosowania.

Odporność materiału na erozję ocenia się często według czasu inkubacji lub inicjacji [9]. Czasy te, podobnie jak inne wskaźniki jednoliczbowe, są wskaźnikami kontrowersyjnymi*. Posługiwanie się nimi uzasadnia się m. in. tym, że w okresie inkubacji względnie

* Nie ma powszechnej zgody co do tego, który ze wskaźników jednoliczbowych posiada większe znaczenie i czy jakikolwiek wskaźnik jednoliczbowy może zastąpić krzywą erozji wyznaczoną z całego testu. Powodem tego są m. in. różnice między oceną próbek materiałów, opartą na czasie inkubacji i innych wskaźnikach kryterialnych, takich jak np. maksymalna szybkość niszczenia [15, 18]. Można je tłumaczyć odmiennym zachowaniem się warstwy wierzchniej od rdzenia materiału. Warstwa wierzchnia różni się bowiem od rdzenia [5] zespołem takich cech, jak skład chemiczny i fazowy, twardość, wielkość ziarn i ich ukierunkowanie, defekty sieci krystalicznej, własności sprężyste, cieplne, elektryczne, magnetyczne i inne. Własności te są ze sobą silnie związane, zmiana jednej z nich wywołuje zmianę drugich.

inicjacji warunki doprowadzenia energii do materiału są prawie stałe (nie występuje rozproszenie energii z powodu wżerów kawitacyjnych) i że energia uderzenia jest zużywana przede wszystkim na podwyższenie energii wewnętrznej materiału, tj. na zmianę jego stanu i naprężeń wewnętrznych.

Podstawą oceny materiałów są przeważnie badania (testy erozyjne) odpowiednich próbek w warunkach laboratoryjnych. Polegają one na porównywaniu ubywania masy próbek pod wpływem działania kawitacji o stałym natężeniu. Małe lub wolno postępujące zmiany masy w jednym materiale, w stosunku do zmian występujących w drugim, świadczą o większej odporności pierwszego materiału.

Odporność materiału oceniana na podstawie wyników testu laboratoryjnego nie zawsze pokrywa się z jego odpornością w naturze. Znane są przypadki [20], że materiał, wykazujący dobrą odporność w warunkach laboratoryjnych, zawiódł w warunkach naturalnych. W związku z tym i ze względu na potrzebę przewidywania odporności materiałów narażonych na działanie kawitacji, podejmowane są badania nad zachowaniem się materiałów w zmiennych warunkach kawitacyjnych [7].

2. Cel i zakres pracy

W pracy podjęto próbę określenia związku między natężeniem kawitacji i stopniem uszkodzenia materiału. Związek ten określano dla początkowego okresu niszczenia, charakteryzującego się prawie stałym stopniem rozproszenia energii dostarczanej do materiału przez implodujące pęcherzyki. Na wybór tego okresu wpłynęły również wyniki prób korelacji czasu inkubacji i inicjacji z innymi wskaźnikami, np. szybkością niszczenia, twardością, wytrzymałością na rozciąganie, granicą plastyczności itp. [8, 11]. Przykładem może być studium [11] poświęcone wpływom energetycznych i wytrzymałościowych własności materiału na początkowy okres niszczenia oraz związkowi między czasem inkubacji τ_{inc} , czasem inicjacji τ_i i czasem τ_m , odpowiadającym maksymalnej szybkości erozji. Między innymi wskazuje się na następujące zależności:

$$\tau_i = 2,9\tau_{inc}^{1,15} \quad \text{ i } \quad \tau_m = 4,0\tau_{inc}^{1,15},$$

które mogą być przydatne do przewidywania zachowania się materiałów w warunkach zbliżonych do modelowych.

Omawiane w niniejszej pracy zagadnienie dotyczy przewidywania zachowania się materiału w różnych warunkach kawitacyjnych na podstawie znajomości natężenia kawitacji oraz wyników testowania próbek materiału.

Przez natężenie kawitacji rozumiemy jednostkową moc uderzenia (gęstość mocy), powstałą w wyniku implozji pęcherzyków kawitacyjnych w obszarze ścianki ograniczającej przepływ (uderzenie przez strumień cieczy lub falę ciśnienia przypadające na jednostkową powierzchnię materiału). Przyjęto, że natężenie kawitacji określa wyróżnik kawitacji σ (wielkość informująca o stopniu rozwoju kawitacji w przepływie) i przynajmniej jedna funkcja statystyczna*, dająca elementarne pojęcie o intensywności uderzeń kawitacyjnych.

* Do opisywania głównych właściwości sygnałów losowych stosuje się [1, 10] wartość średniokwadratową, funkcję gęstości prawdopodobieństwa, funkcję autokorelacji i funkcję widmowej gęstości mocy.

O intensywności procesu może informować także wskaźnik gęstości strumienia energii uderzenia lub inny parametr charakteryzujący energetyczny poziom działania kawitacji na ściankę ograniczającą przepływ.

Ponadto przyjęto, że zmiany w materiale są określone ubytkiem masy i odkształceniami plastycznymi. Podstawą tego ostatniego założenia jest fakt, że wskutek działania kawitacji na materiał zwiększa się liczba defektów strukturalnych i dyslokacji oraz następuje umocnienie warstwy wierzchniej. Wzrost gęstości dyslokacji powoduje zmianę stanu naprężeń w kierunku podwyższenia wytrzymałości* warstwy wierzchniej. Obok wzrostu wytrzymałości następuje obniżenie plastyczności i odporności na korozję. W rezultacie w okresie inkubacji i inicjacji zmienia się nie tylko energia powierzchniowa, lecz również własności fizyczne powierzchni. Stopień zmiany energii powierzchniowej i własności fizycznych zależy od natężenia kawitacji. Wynika stąd, że miarą intensywności działania kawitacji na materiał mogą być zmiany struktury w warstwie wierzchniej materiału określone np. zmianą mikrotwardości. Dlatego m. in. poszukiwano związku między ubytkiem masy, natężeniem kawitacji i zmianą mikrotwardości w warstwie wierzchniej materiału.

Zakres pracy ograniczono do:

- ustalenia związku między stopniem rozwoju kawitacji (wyrażonym wartością wyróżnika σ), długością obłoku kawitacyjnego i uszkodzeniem próbek materiałów w początkowym okresie ich niszczenia,
- ustalenia rozmiaru odkształceń w warstwie wierzchniej próbki powstałych podczas działania kawitacji o różnym natężeniu,
- określenia natężenia kawitacji za pomocą pomiaru rozkładu impulsów ciśnienia, widmowej gęstości mocy, wartości średniokwadratowej i energii jednostkowej dostarczonej do materiału przez implodujące pęcherzyki,
- ustalenia związku między różnymi wielkościami charakteryzującymi natężenie kawitacji i stopniem uszkodzenia materiału w okresie inicjacji.

3. Badania próbek materiałów

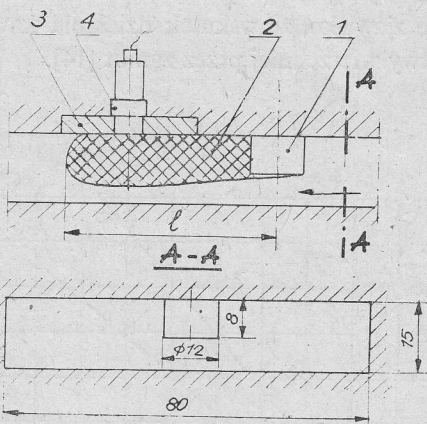
Badania wykonano w Instytucie Maszyn Przepływowych PAN korzystając z urządzenia przepływowego z cylindrycznym wzbudnikiem kawitacji (rys. 3). Obraz pola przepływu za wzbudnikiem zależy od nastawienia zaworów regulacyjnych znajdujących się przed i za komorą pomiarową. Zmiana nastawienia zaworów pociąga za sobą zmianę prędkości i ciśnień, a tym samym zmianę długości obłoku kawitacyjnego tworzącego się w śladzie (cieniu) aerodynamicznym wzbudnika. Zależność długości obłoku kawitacyjnego od wyróżnika kawitacji σ przedstawiono wykreślnie na rysunku 4.

W cieniu aerodynamicznym wzbudnika umieszczano próbki materiału lub przetwornik piezoelektryczny. Elementy te były inkrustowane w ściankę komory pomiarowej w ten sposób, że tworzyły z nią jedną płaszczyznę. Były one poddawane działaniu kawitacji o róż-

* Metale i stopy o sieci regularnej płasko centrowanej zwiększają swoją wytrzymałość w większym stopniu niż metale o sieci regularnej przestrzennie centrowanej [3].

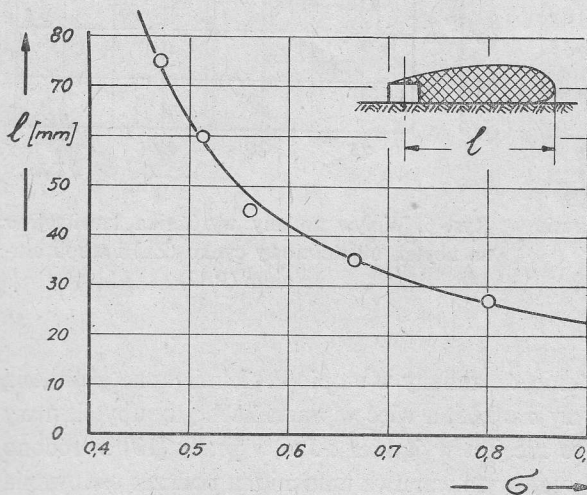
nym natężeniu. Pod wpływem tego zjawiska następowało albo niszczenie próbki (rys. 6, 13), albo przekazywanie odpowiedniego sygnału przez przetwornik (rys. 11, 12).

Przedmiotem badań erozyjnych były okrągłe próbki ($\varnothing 30$ mm) ze stopu aluminium PA2 i cynku, które umieszczano w różnej odległości za wzbudnikiem kawitacji. Zmiana odległości wiązała się ze zmianą długości obłoku kawitacyjnego, wywołaną przez zmianę ciśnienia w układzie przepływowym.



Rys. 3. Układ przepływowy z cylindrycznym wzbudnikiem kawitacji

1 – wzbudnik, 2 – obłok kawitacyjny, 3 – próbka materiału, 4 – miejsce osadzenia przetwornika ciśnienia, l – długość obłoku



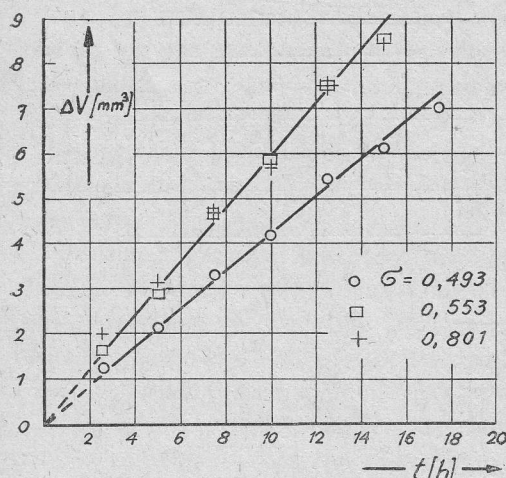
Rys. 4. Zmiana długości obłoku l w zależności od wyróżnika kawitacji $\sigma = 2(p_0 - p_v) / \rho v_0^2$ (gdzie p_0 , v_0 – ciśnienie i prędkość w przepływie niezakłóconym, p_v – ciśnienie pary nasyconej cieczy o gęstości ρ w danej temperaturze)

Próbki przed testowaniem wyżarzano, szlifowano i polerowano oraz płukano, suszono i ważono. Testowanie polegało na ekspozycji próbek na stanowisku przez określony czas (który się „mieścił” w okresie inicjacji), a następnie na ustaleniu ubytku masy z dokładnością 0,05 mg. Całkowity czas ekspozycji wynosił dla próbek ze stopu aluminium 25 godzin, a dla próbek z cynku 17,5 godzin. Przebieg ubywania masy cynku w czasie przedstawiono na rysunku 5.

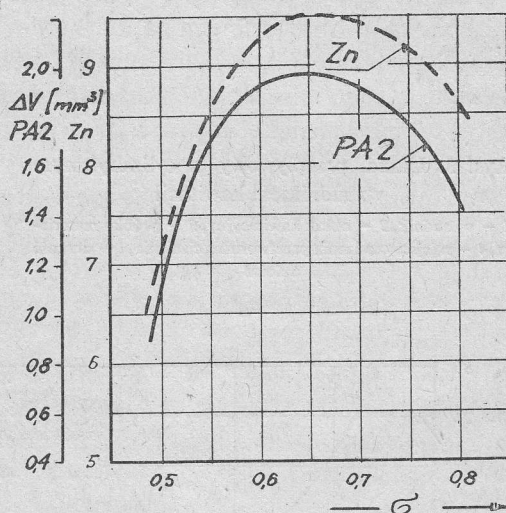
Zachowanie się stopu PA2 i cynku podczas przepływu z kawitacją oceniano na podstawie pomiaru ubytków objętościowych po czasie $\tau_1 = 25$ godzin (stop aluminium) i $\tau_2 = 15$

godzin (cynk) oraz na podstawie pomiaru mikrotwardości w warstwie wierzchniej stopu PA2. Mikrotwardość mierzono metodą Hanemanna stosując obciążenie $P=20$ G.

Wyniki badań próbek przedstawiono na rysunkach 6 - 8. Rysunek 6 wskazuje na powszechnie znany fakt [6, 16], iż uszkodzenie materiału (określone np. ubytkiem masy materiału po ustalonym czasie lub maksymalną szybkością erozji) jest nieliniową funkcją wyróżnika kawitacji σ i że funkcja ta posiada ekstremum (maksimum), które w danym przypadku występuje przy $\sigma \approx 0,65$. Również pomiary mikrotwardości (rys. 7) potwierdziły znane zjawisko, że wskutek działania kawitacji na materiał następuje utwardzenie jego warstwy wierzchniej przez zgniot [14].

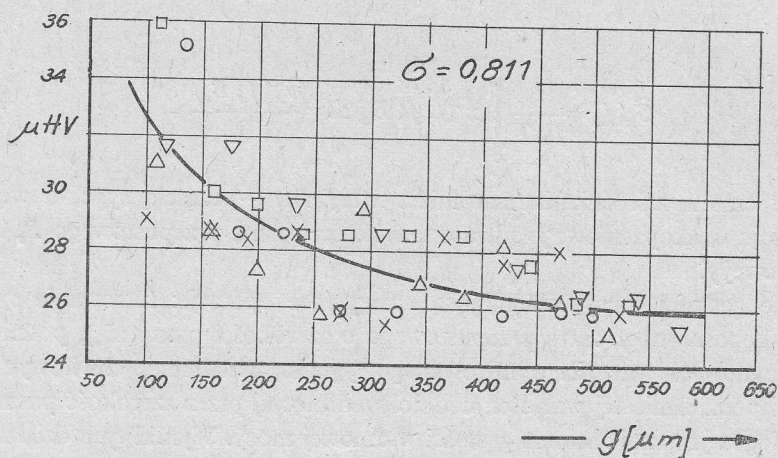
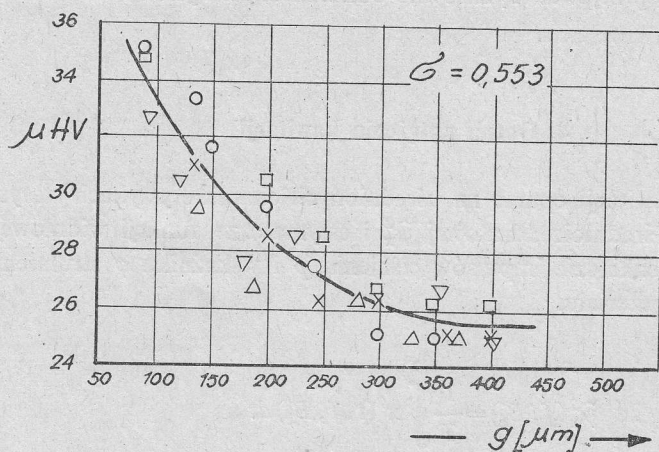
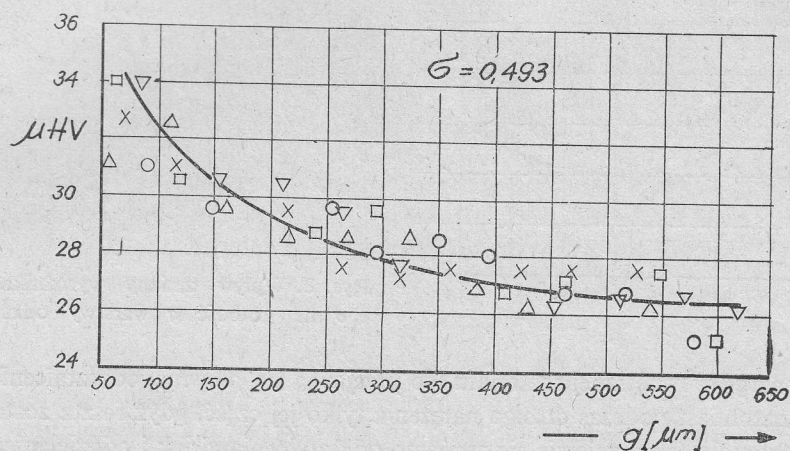


Rys. 5. Niszczenie próbek z cynku w okresie inicjacji

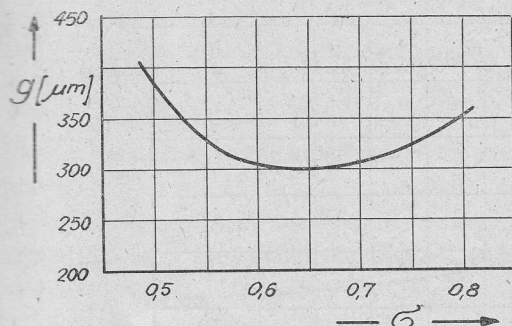


Rys. 6. Wpływ zmiany wyróżnika kawitacji σ na ubytek objętościowy cynku (Zn) i stopu aluminium (PA2)

Na podkreślenie zasługuje spostrzeżenie, że zmiany w stopie PA2, mierzone grubością warstwy utwardzonej są najmniejsze przy $\sigma \approx 0,65$, a więc w warunkach gdy ubytek masy był największy (rys. 8). Spostrzeżenie to nie jest wyjątkiem. Już w pracy [13] zwrócono uwagę, że w żelazie „armco” i staliwie węglowym warstwa umocniona podczas testowania próbek w warunkach laboratoryjnych (urządzenie magnetostrykcyjne) osiąga grubość $30 \div 60 \mu\text{m}$, a w warunkach naturalnych (kawitacja szczelinowa w turbinie wodnej) grubość $250 \div 500 \mu\text{m}$. Wzrost mikrotwardości materiału spowodowany działaniem kawitacji, wyniósł w pierwszym przypadku około 30%, a w drugim około 45%. Wyniki te świadczą o tym, że wraz ze wzrostem natężenia kawitacji (natężenie zjawiska w warunkach laboratoryjnych było większe niż w naturze) grubość warstwy odkształconej i stopień umocnienia materiału przez zgniot zmniejszają się. Tę osobliwość można tłumaczyć niejednakowym rozdziałem doprowadzonej względnie pochłanianej przez materiał energii. Należy przypuszczać, że podczas małego natężenia kawitacji prawie cała energia jest zużywana na pod-



Rys. 7. Zmiany mikrotwardości w warstwach wierzchnich próbek ze stopu PA2 spowodowane kawitacją przy różnych wartościach σ (mikrotwardość mierzono w różnej odległości (g) od powierzchni próbki — w kilku miejscach przekroju poprzecznego; serie pomiarowe wyróżniono stosując różne oznaczenie punktów)



Rys. 8. Wpływ zmiany wyróżnika kavitacji σ na grubość g warstwy odkształconej

wyższenie energii wewnętrznej materiału (co przejawia się głównie odkształceniami plastycznymi), natomiast podczas dużego natężenia tylko jej część, gdyż reszta zostaje zużyta na erozję materiału (co przejawia się zarówno odkształceniami jak i oddzielaniem cząstek materiału).

4. Ocena natężenia kavitacji

Ocenę natężenia kavitacji oparto na uśrednionych charakterystykach statystycznych: estymowanej wartości średniokwadratowej $\hat{\psi}_x^2$ i estymatorze funkcji widmowej gęstości mocy $\hat{G}_x(f)$ oraz na rozkładzie impulsów ciśnienia p i wskaźniku φ strumienia energii $\hat{E}$ doprowadzonej do materiału.

Zgodnie z [1]:

$$\hat{\psi}_x^2(f, B_e) = \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t, f, B_e) dt$$

i

$$\hat{G}_x(f) = \frac{1}{B_e T} \int_0^T x^2(t, f, B_e) dt = \frac{\hat{\psi}_x^2(f, B_e)}{B_e},$$

gdzie T jest czasem uśredniania, natomiast $x(t, f, B_e)$ – częścią sygnału wejściowego $x(t)$ na wyjściu wąskopasmowego filtra o szerokości pasma przepustowego B_e i częstotliwości środkowej f .

Estymację gęstości mocy, obejmującą następujące operacje: filtrowanie sygnału (za pomocą wąskopasmowego filtra przepustowego o szerokości pasma B_e), podniesienie do kwadratu chwilowych wartości wyfiltrowanego sygnału, uśrednienie chwilowych wartości kwadratów i podzielenie tej wartości średniokwadratowej przez szerokość pasma B_e , wykonano analogowym analizatorem gęstości widmowej mocy. Wyniki tych działań rejestrowano na taśmie, uzyskując informacje o dynamicznej charakterystyce badanego procesu.

Informacje o strukturze częstotliwościowej uzupełniano informacją o liczbie i wartości impulsów ciśnienia przejmowanych przez przetwornik w czasie T . Impulsy ciśnienia „segregowano” za pomocą analizatora amplitudy i zliczano przy użyciu częstotlicznika.

Nie wszystkie sygnały docierające do przetwornika pochodziły od implozji pęcherzyków kawitacyjnych; część z nich pochodziła od innych zakłóceń w przepływie (oderwań, zawirowań, drgań itp.). Z kolei nie wszystkie impulsy pochodzące od kawitacji powodują niszczenie materiału; część z nich jest mało skuteczna i ich wpływ na erozję można praktycznie pominąć.

Dla określenia wskaźnika strumienia energii potraktowano działanie kawitacji na materiał jako superpozycję n niezależnych impulsów ciśnienia. Wtedy wartość średnia gęstości strumienia energii $\hat{E}$ (energia uderzenia przyjmowana przez jednostkę powierzchni materiału w jednostce czasu) wyniesie

$$\hat{E} = n_1 \hat{e}_1 + n_2 \hat{e}_2 + n_3 \hat{e}_3 + \dots,$$

gdzie $n_1, n_2 \dots$ jest liczbą impulsów ciśnienia o średnim poziomie energii $\hat{e}_1, \hat{e}_2, \dots$. W ślad za A. Thiruvengadamem [19] przyjęto, że energia pojedynczego impulsu jest określona mocą wypromieniowaną przez implodujący pęcherzyk. Gęstość tej mocy jest określona wzorem

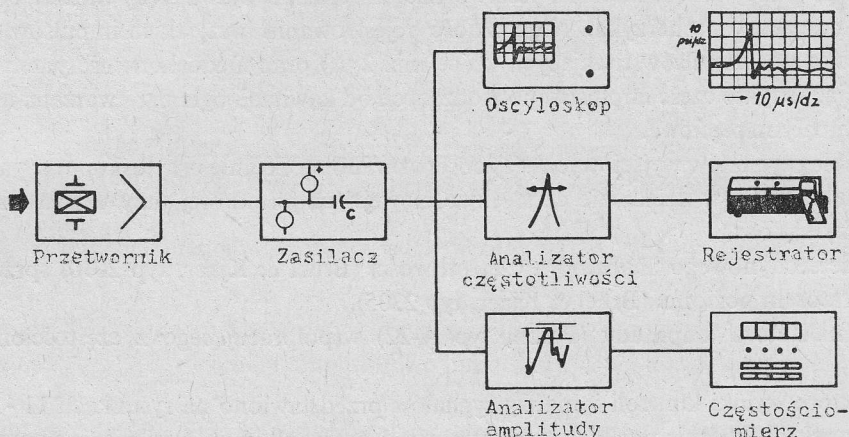
$$e = \frac{p^2}{\rho c},$$

gdzie p jest ciśnieniem uderzania, a c — prędkością dźwięku w ośrodku o gęstości ρ . Na tej podstawie przyjęto, że

$$\hat{E} \propto \varphi = \sum_{k=1}^{k=N} n_k \hat{p}_k^2,$$

gdzie n_k — liczba impulsów przypadająca na k -ty przedział, odpowiadający ciśnieniu $\hat{p}_k$. Wyrażenie $\sum n_k \hat{p}_k^2$ nazwano wskaźnikiem strumienia energii doprowadzanej do materiału.

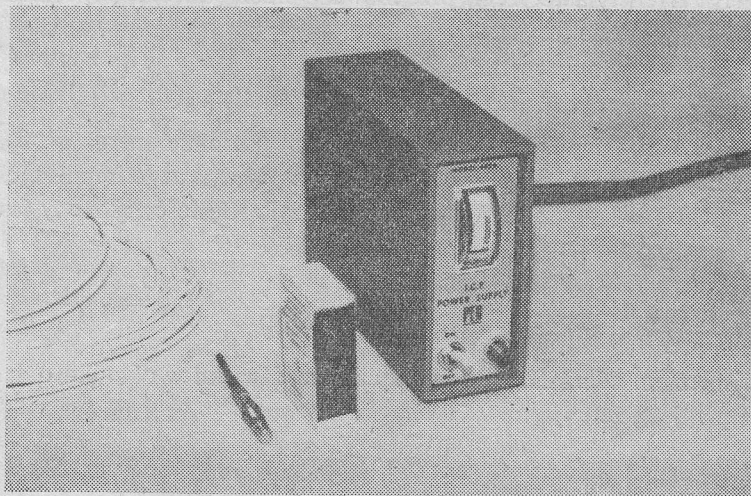
Na rysunku 9 przedstawiono schemat blokowy aparatury służącej do oceny natężenia kawitacji.



Rys. 9. Schemat blokowy aparatury do pomiaru i analizy sygnałów losowych pochodzących od kawitacji

Do pobierania sygnałów zastosowano przetwornik piezoelektryczny (rys. 10) o następujących parametrach znamionowych:

ciśnienie maksymalne	15 000, psi ($1 \text{ psi} = 6,895 \cdot 10^3 \text{ Pa}$)
czułość	1 mV/psi
częstotliwość rezonansowa	500 000 Hz
czas narastania	1 μs
liniowość	1%
wymiar średnicy	5,5 mm



Rys. 10. Przetwornik piezoelektryczny PCB wraz z zasilaczem

Wysoką jakość sygnału wyjściowego $y(t)$ uzyskuje się m. in. dzięki wbudowaniu wzmacniacza ładunku w przetwornik. Sygnał wyjściowy jest jednak obciążony różnymi błędami przetwarzania. Są one spowodowane m. in. ograniczonymi możliwościami reagowania przetwornika na silne i krótkotrwałe impulsy (czas trwania impulsu ciśnienia szacuje się na 10^{-6} s) oraz tym, że membrana przetwornika ma średnicę o dwa rzędy większą od średnicy implodującego pęcherzyka. Niemożność rejestrowania wszystkich impulsów (nie rejestrowano np. impulsów trwających krócej niż 2 μs) oraz niedoskonałość przetwarzania sprawiają, że tylko część impulsów pochodzących od kawitacji była przetwarzana na analogowe sygnały napięciowe.

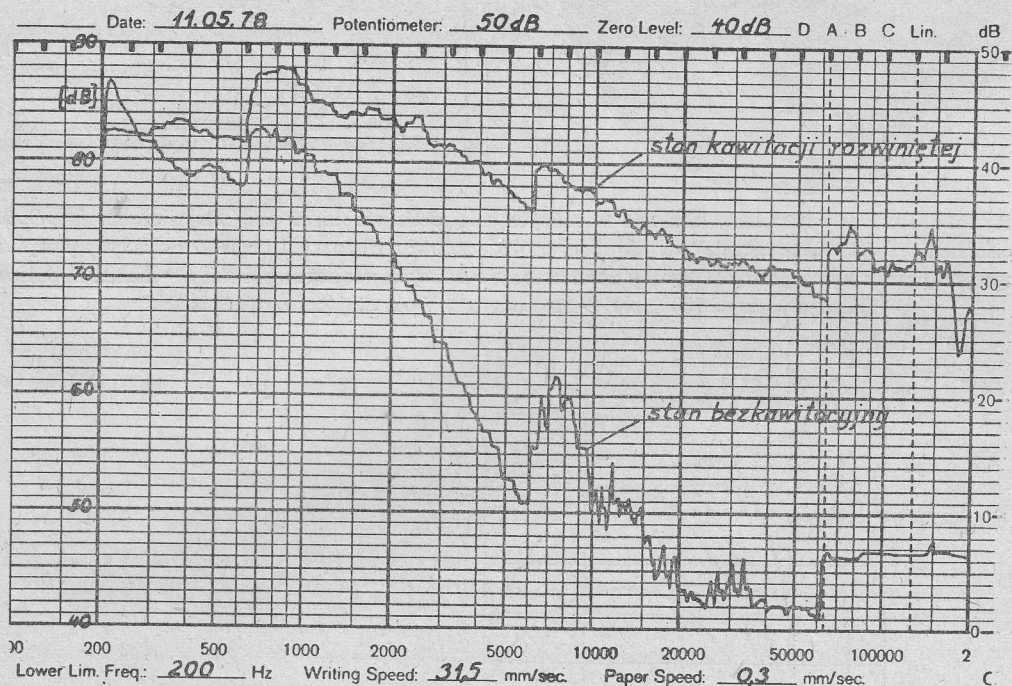
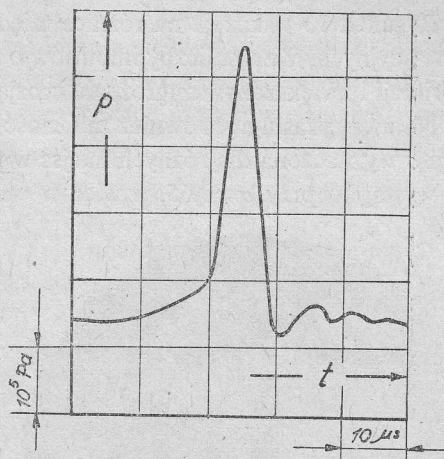
Przebieg sygnałów wyjściowych $y(t)$ obserwowano na ekranie oscyloskopu „z pamięcią” oraz analizowano w dziedzinie częstotliwościowej i amplitudowej przy użyciu następujących przyrządów:

- heterodynowego analizatora częstotliwości (Brüel & Kjaer, typ 2010) sprzężonego z rejestratorem poziomu (Brüel & Kjaer, typ 2305),
- analizatora amplitudy (Polon, typ A-22) współpracującego z częstościomierzem (RFT).

Niektóre wyniki kontroli i analizy sygnałów przedstawiono na rysunkach 11 - 14.

Rysunek 11 ilustruje przebieg sygnału pochodzącego od impulsu ciśnienia w przepływie z kawitacją. Jest to przebieg typowy dla procesów impulsowych wywołanych implozją pęcherzyków kawitacyjnych lub uderzeniem cieczy z dużą prędkością [2].

Rys. 11. Przebieg impulsu ciśnienia p w czasie t ; uderzenie spowodowane implozją pęcherzyka kawitacyjnego



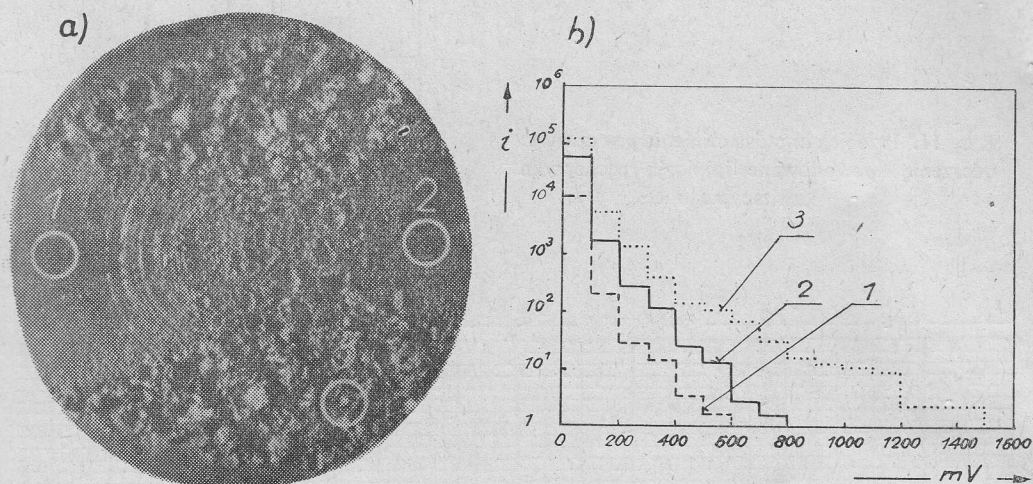
Rys. 12. Struktura częstotliwościowa sygnałów w przepływie z kawitacją i bez kawitacji

Rysunek 12 ukazuje spektrogramy ciśnienia „zdjęte” w przepływie z kawitacją i bez kawitacji, a rysunek 13 rozkłady amplitudowe impulsów ciśnienia pochodzących od przepływu z kawitacją.

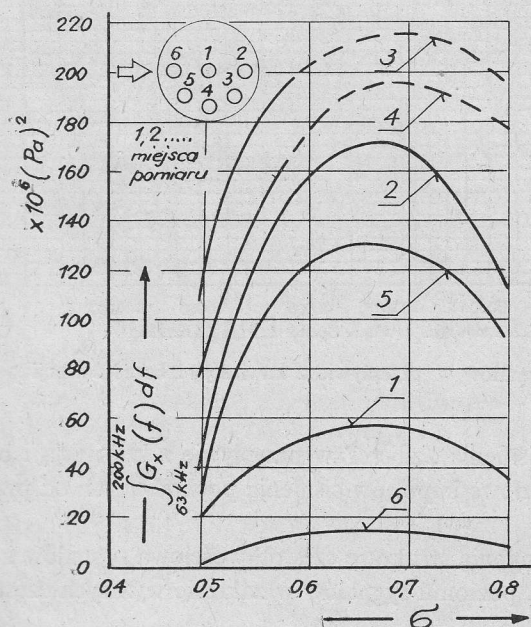
Z rysunku 12 wynika, że kawitacja zmienia strukturę częstotliwościową sygnałów i że jej obecność wpływa wyraźnie na wzrost poziomu sygnałów w zakresie wyższych częstotliwości.

Rysunek 13 wskazuje na różnice między rozkładami impulsów w różnych warunkach kawitacyjnych. Wzrost liczby impulsów o dużej amplitudzie świadczy o wzroście natężenia kawitacji i zwiększonym zagrożeniu erozją.

Na uwagę zasługuje również zależność gęstości widmowej mocy $\hat{G}_x$ od wyróżnika kawitacji σ wyznaczona dla różnych miejsc w przepływie. Z rysunku 14 wynika, że maksimum $\hat{G}_x$ wystąpiło przy $\sigma \approx 0,65$, a więc w warunkach największego nasilenia erozji (rys. 6).



Rys. 13. Rozkłady impulsów ciśnienia w różnych miejscach próbki; a) miejsca zliczania impulsów ciśnienia przedstawione „na tle” zerodowanej próbki z ołowiu, b) rozkład impulsów ciśnienia przejmowanych przez czujnik piezoelektryczny umieszczony w różnych miejscach próbki; i – liczba impulsów zliczona w ciągu 100 s, mV – napięcie w mV określające wartość ciśnienia



Rys. 14. Zależność gęstości widmowej mocy $\hat{G}_x$ od wyróżnika kawitacji σ dla różnych miejsc na próbce

Ten fakt oraz ustalenia wynikające z rysunku 13 świadczą o możliwości śledzenia zmian natężenia kawitacji na podstawie znajomości rozkładu impulsów ciśnienia, gęstości widmowej mocy lub innego wskaźnika identyfikującego poziom i liczbę impulsów ciśnienia w przepływie.

5. Związek między wielkościami określającymi natężenie kawitacji i zachowaniem się materiału w okresie inicjacji

Ze względu na erozję ważną rolę odgrywa energia zawarta w impulsach o dużej amplitudzie. Należy przypuszczać, że przede wszystkim ona jest odpowiedzialna za ubytki materiałowe. Świadczą o tym histogramy impulsów ciśnienia przedstawione na tle zerodowanej próbki z ołowiu (rys. 13). Z histogramów tych, odnoszących się do miejsc o różnym natężeniu kawitacji wynika, że zniszczenie materiału występuje przede wszystkim tam, gdzie obciążenie przekracza pewną graniczną wartość. Wartość obciążenia granicznego (poziomu impulsów ciśnienia) zależy oczywiście od materiału. Od materiału zależy również charakter odkształceń i stan naprężeń wewnętrznych, a także sposób „wykorzystania” energii dostarczanej przez implodujące pęcherzyki. Przy materiałach miękkich i plastycznych duża część energii zużywana jest na odkształcenia plastyczne, przy materiałach twardych i sprężystych – na odkształcenia sprężyste, a przy materiałach twardych i kruchych – na pęknięcia kruche.

Choć odpowiedzialność za ubytki materiału przypisuje się impulsom o dużej amplitudzie, to jednak zmiany w materiale następują pod wpływem wszystkich oddziaływań, a więc także pod wpływem impulsów o małej amplitudzie. Chodzi tu oczywiście o impulsy „znaczące”, a więc takie, które wywierają wpływ na zmiany w materiale. Impulsy pochodzące od „normalnych” fluktuacji ciśnień w przepływie, a więc impulsy o bardzo małych amplitudach względnie niskiej częstotliwości, należałoby przy ocenie zjawiska pominąć. Które z impulsów uznać za znaczące jest oddzielnym zagadnieniem, nie omawianym w tej pracy. Należy jedynie podkreślić, że progowy poziom impulsów znaczących jest dla różnych materiałów różny i że porównując zmiany w materiale i rozkład impulsów ciśnienia (rys. 13) można tę wartość progową ustalić.

Przedstawiony pogląd skłania do wniosku, że natężenie kawitacji określają funkcje statystyczne uwzględniające poziom, kształt i liczbę tzw. znaczących impulsów ciśnienia. Należy jednak pamiętać o trudnościach związanych z wyselekcjonowaniem tych impulsów. Dlatego też ocena intensywności działania kawitacji na materiał z konieczności opiera się na uproszczeniach. Między innymi zakłada się, że wszystkie mierzone impulsy ciśnienia pochodzą od kawitacji i że proces kawitacji jest jednorodnym procesem impulsowym. Jest to model dość odległy od rzeczywistości. Uproszczeniem jest również posługiwanie się wartościami uśrednionymi, które nie pokrywają się z wartościami rzeczywistymi (krótki czas trwania i szybkie narastanie impulsu ogranicza dokładność jego przetwarzania na analogowy sygnał elektryczny; sygnał jest przejmowany przez membranę o średnicy dużo większej od średnicy przeciętnego impulsu).

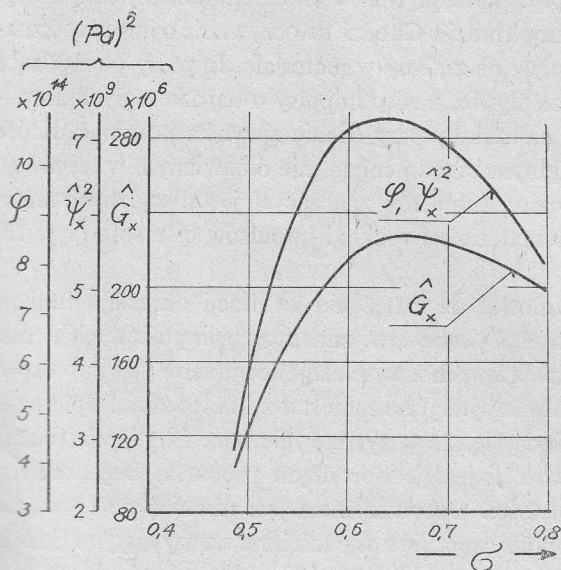
W tabeli 1 zamieszczono wyniki badań natężenia kawitacji w różnych warunkach przepływu. Zamieszczone wartości liczbowe dotyczą wskaźnika gęstości strumienia energii ϕ ,

Tabela 1

Parametry charakteryzujące natężenie kawitacji w dwóch miejscach próbek

Miejsce pomiaru	Wyróżnik kawitacji σ	Wartość średniokwadratowa $\hat{\psi}_x^2$	Widmowa gęstość mocy $\hat{G}_x$	Wskaźnik strumienia energii φ
	—	$\times 10^9 (\text{Pa})^2$	$\times 10^6 (\text{Pa})^2$	$\times 10^{14} (\text{Pa})^2$
I (punkt 3)	0,469	—	—	4,14
	0,493	3,03	106	4,23
	0,553	6,40	181	9,47
	0,801	5,33	201	8,04
II (punkt 5)	0,469	—	—	2,59
	0,493	2,50	57	—
	0,553	3,36	99	4,92
	0,801	3,14	92	5,29

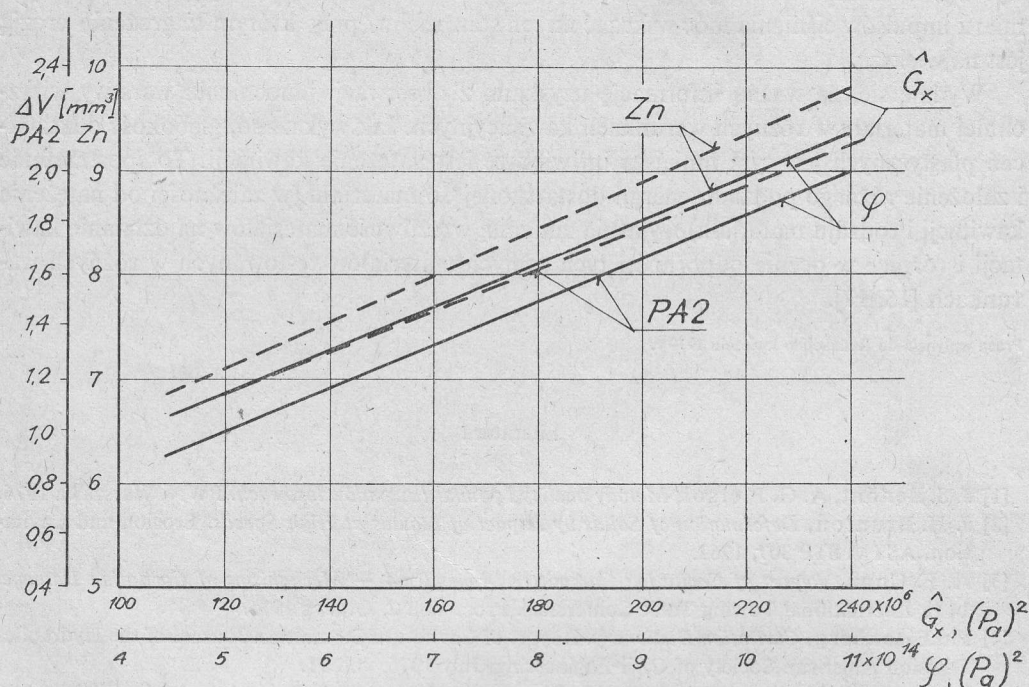
gęstości mocy $\hat{G}_x$ w zakresie od 63 do 200 kHz i estymowanej wartości średniokwadratowej $\hat{\psi}_x^2$ ustalonej dla całego zakresu częstotliwości. Wyniki te uzyskano mierząc pulsacje ciśnień czujnikiem PCB osadzonym zawsze w tym samym miejscu próbki (w celu uzyskania zawsze podobnych warunków ekspozycji zmieniano położenie próbki wraz ze zmianą stopnia rozwoju kawitacji). Widać stąd, że zmiana σ pociągała za sobą zmianę wielkości charakteryzujących natężenie zjawiska kawitacji. Zmiany te wskazują (rys. 15) na maksimum natężenia kawitacji przy $\sigma \approx 0,65$. Jeśli zestawimy te wyniki z ubytkiem materiału w okresie



Rys. 15. Zmiana wskaźników charakteryzujących natężenie kawitacji (wskaźnik strumienia energii φ , estymowana wartość średniokwadratowa $\hat{\psi}_x^2$ i widmowa gęstość mocy $\hat{G}_x$) w zależności od wyróżnika kawitacji σ

inicjacji, dojdziemy do wniosku, że między erozją i natężeniem kawitacji, wyrażonym którymś z omawianych wskaźników, istnieje ścisła współzależność. Ta współzależność upoważnia do przypuszczenia, że rejestrując impulsy ciśnienia czujnikiem PCB można wskazać stan ruchu, podczas którego zagrożenie erozją jest największe.

Na rysunku 16 przedstawiono zależność między wielkościami charakteryzującymi natężenie kawitacji: $\hat{G}_x$ i φ a ubytkiem materiału ΔV w okresie inicjacji. Uzyskane zależności są zależnościami liniowymi. Potwierdzenie tej liniowości w innych warunkach i z innymi próbkami stworzyłoby podstawę do prognozowania trwałości materiału na erozję kawitacyjną.



Rys. 16. Zależność między ubytkiem cynku (Zn) i stopu aluminium (PA2) w okresie inicjacji a wskaźnikiem strumienia energii φ i widmową gęstością mocy $\hat{G}_x$.

6. Uwagi końcowe

Z przedstawionego materiału doświadczalnego wynika, że struktura częstotliwościowa zakłóceń w przepływie z kawitacją i bez kawitacji jest zróżnicowana i że największe różnice występują w zakresie wyższych częstotliwości. Stwierdzono, że erozja materiału następuje przede wszystkim pod wpływem impulsów o dużej amplitudzie. Wykazano, że natężenie kawitacji może być określone albo funkcją statystyczną uwzględniającą główne właściwości sygnałów pochodzących od pulsacji ciśnień w przepływie, albo rozkładem impulsów ciśnienia, albo też gęstością strumienia energii dostarczanej do materiału przez implodujące pęcherzyki kawitacyjne. Tak określone natężenie jest ściśle związane z uszkodzeniem materiału w okresie inicjacji i decyduje o długości tego okresu.

W przypadku istnienia korelacji między ubytkami materiału w różnych okresach niszczenia, powstaje możliwość przewidywania trwałości materiału w naturze na podstawie testowania próbek w warunkach laboratoryjnych. Praktyczne korzystanie z tej możliwości

wymaga oczywiście dodatkowych badań, polegających głównie na weryfikacji opisanych tu zależności, a przede wszystkim na weryfikacji związku między natężeniem kawitacji i trwałością materiału.

Godne podkreślenia są także wyniki wskazujące na możliwość oceny zagrożenia erozją na podstawie pomiaru wielkości charakteryzujących natężenie kawitacji. Możliwość ta wymaga również dokładniejszego rozeznania. Chodzi bowiem o to, aby na podstawie pomiaru impulsów ciśnienia móc wskazać na ten stan ruchu, przy którym zagrożenie erozją jest największe.

Wydaje się, że ważną informację uzyskano z obserwacji umocnienia warstwy wierzchniej materiału w różnych warunkach kawitacyjnych. Jak wykazano, głębokość odkształceń plastycznych jest tym mniejsza im większe jest natężenie kawitacji. To spostrzeżenie i założenie różnego podziału energii dostarczonej do materiału (w zależności od natężenia kawitacji i rodzaju materiału) wyjaśnia zmienną wrażliwość materiałów na działanie kawitacji i różnice w ocenie odporności tych samych materiałów testowanych w różnych warunkach [15, 17].

Praca wpłynęła do Redakcji w kwietniu 1979 r.

Literatura

- [1] J. S. Bendat, A. G. Piersol, *Metody analizy i pomiaru sygnałów losowych*. PWN, Warszawa 1976.
- [2] J. H. Brunton, *Deformation of Solids by Impact of Liquids at High Speeds*. Erosion and Cavitation, ASTM STP 307, 1962.
- [3] A. F. Conn, *Report of Cavitation Committee. Appendix 4 — Mechanisms of Cavitation Damage*. 14 th International Towing Tank Conference. Proc. Vol. 2, Ottawa 1975.
- [4] Ph. Eisenberg, *Cavitation Dictionary*. Report of Cavitation Committee. Journal of the Hydraulics Division American Society of Civil Engineering, July 1976, vol. 91.
- [5] P. Gadaj, Z. Handzel-Powierża, S. Ziemba, S. Żukowski, *Rola warstwy wierzchniej w procesach odkształceń i dekohezji*. Prace IPPT, nr 31/1976.
- [6] H. Grein, *Kavitation — eine Übersicht*. Sulzer-Forschungsheft, 1974.
- [7] F. G. Hammitt, *Cavitation Damage Scale Effects — State of Art Summarization*. Journal of Hydraulic Research IAHR, Vol. 13, 1975, No. 1.
- [8] F. G. Hammitt, M. K. De, *Cavitation Damage Predicting Capability-State of Art and Possibilities*. University of Michigan, Report UMICH No. 14456-23-I, August 15, 1977.
- [9] J. M. Hobbs, A. Laird, *Comparative Erosion Tests on Ferrous Materials. Part II: Vibratory Cavitation Tests*. NEL Rep. No. 495, Dep. of Trade and Industry, 1971.
- [10] D. Middleton, *An Introduction to Statistical Communication Theory*. Mc-Graw-Hill, New York 1960.
- [11] B. C. S. Rao, N. S. L. Rao, P. V. Rao, *The Role of Incubation Period in Cavitation Erosion*. Water Power & Dam Construction, March, 1977.
- [12] G. Sebestyen, T. Bata, *Determination of the Intensity of Cavitation Erosion*. Proc. of the Fifth Conf. of Fluid Machinery, Vol. 2, Akademiai Kiado, Budapest 1975.
- [13] 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, American Society for Testing and Materials, 1974.
- [14] K. Steller, *Niszczanie materiału wskutek kawitacji*. Prace IMP, z. 67 - 68, 1975.
- [15] 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, Akademiai Kiado, Budapest 1975.

- [16] K. Steller, *Uszkodzenia kawitacyjne w maszynach hydraulicznych i związane z nimi gwarancje*. Zesz. Nauk. IMP PAN, Studia i Materiały, nr 23/911/77.
- [17] K. Steller, T. Krzysztofowicz, *Badanie odporności materiałów na erozję metodą przepływową, wibracyjną i uderzeniową*. Prace IMP, z. 75, 1978.
- [18] K. Steller, *Nowa koncepcja oceny odporności materiału na erozję kawitacyjną*. Prace IMP, z. 76 1978.
- [19] A. Thiruvengadam, *On Modeling Cavitation Damage*. Journal of Ship Research, September, 1969.
- [20] A. T. Troskolański, S. Łazarkiewicz, *Pompy wirowe*. 3 wyd. WNT, Warszawa 1973.
- [21] J. Varga, G. Sebestyen, *Beiträge zur Bestimmung der Energie der Kavitationserosion*. [W:] *Zagadnienia maszyn przepływowych*, PWN, Warszawa 1968.
- [22] ASTM, Committee G-2 on Erosion and Wear, Designation: G40-73, Publ. December 1973. Standard Definitions of Terms Relating to Erosion by Cavitation and Impingement.

**К предвидению стойкости машинных элементов подверженных действию кавитации.
Связь между интенсивностью кавитации и поведением
материала в начальный период повреждения**

Резюме

Предметом работы является определение принципов предвидения стойкости материала против эрозии в различных кавитационных условиях. Предположено, что основой предвидения должно быть знание интенсивности кавитации и результаты испытания образцов материала.

Работа основана на экспериментах. Интенсивность кавитации определяется измерениями импульсов давления, действующих на материал, а изменения в материале измерением убыли массы и пластичных деформаций, появляющихся в начальный период (период инициации).

Во вступлении представлены определения основных понятий и общие принципы оценки стойкости материала против эрозии. В пункте 2 определены цель и предел работы. В пункте 3 представлены результаты испытаний образцов из алюминиевого сплава РА2 и цинка (рис. 5—8). Образцы подвергались кавитационному действию в проточном устройстве с цилиндрическим возбудителем (рис. 3). В пункте 4 описан метод оценки интенсивности кавитации. Здесь указывается на способ измерения импульсов давления, возникающих ввиду имплозии кавитационных пузырьков, на частотную структуру сигналов принимаемых пьезоэлектрическим датчиком в течении с кавитацией и без кавитации (рис. 12), а также на распределение импульсов давлений в различных местах образца (рис. 13). В пункте 5 обращается внимание на связь между величинами характеризующими интенсивность кавитации и поведение материала в период инициации. В особенности указывается на изменение оцениваемого среднеквадратичного значения $\hat{\psi}_x^2$, спектральной плотности мощности $\hat{G}_x$ и показателя потока энергии ϕ , подводимой в материал в зависимости от показателя кавитации σ (рис. 14 и 15), а также на связь между осредненными статистическими характеристиками $\hat{G}_x$ и ϕ и объемной убылью материала ΔV в период инициации (рис. 16).

Из представленного экспериментального материала следует, что:

- самые большие разницы между структурами кавитационных помех выступают в полосе высших частот,
- эрозия материала происходит прежде всего под влиянием импульсов давления большой амплитуды,
- интенсивность кавитации может определяться либо статистической функцией, учитывающей основные свойства сигналов происходящих от пульсаций давления в течении, либо распределением импульсов давления, либо также плотностью потока энергии подводимой в материал имплозирующими кавитационными пузырьками,

- интенсивность кавитации тесно связана с повреждением материала; в обсуждаемом случае $\bar{G}_x = f(\Delta V)$ и $\varphi = f(\Delta V)$ оказались линейными зависимостями,
- существующая связь между интенсивностью кавитации, выраженной при помощи энергетических показателей, и разрушающим кавитационным действием, должна позволить правильно предвидывать поведение материала в различных кавитационных условиях.

Remarks on Prediction of the Durability of Machinery Parts Subject to Cavitation. The Relation Between the Cavitation Intensity and Material Behaviour in the Initial Period of Damage

Summary

The work reported has been aimed at establishing principles of prediction of resistance of materials to erosion in various cavitation conditions. It was assumed that the prediction should be based on the data on cavitation intensity and results of testing of material specimens.

The work has been based on experiments. The cavitation intensity was determined by measuring pressure pulses acting on the material, while material changes were determined basing on measurements of mass losses and plastic deformations occurring in the initiation period.

Basic definitions and general principles of evaluation of resistance of materials to erosion are given in the introduction. In paragraph 2 the purpose and scope of the work are defined. Paragraph 3 contains results of tests of specimens made of PA2 aluminium alloy and zinc (Figs 5÷8). The specimens were tested in a flow rig with cylindrical exciter (Fig. 3). The method of cavitation intensity evaluation is described in paragraph 4. Special attention is paid to the method of measurement of pressure pulses caused by collapse of cavitation bubbles, the spectrum of signals received by the piezoelectric sensor in the flow with and without cavitation (Fig. 12), and the distribution of pressure pulses over a specimen (Fig. 13). In paragraph 5 the relation between quantities characterizing the cavitation intensity and the behaviour of materials in the initiation period is discussed. The dependence of the estimated root-mean-square value $\hat{\psi}_x^2$, spectral power density $\hat{G}_x$ and the indicator φ of energy flux delivered to the material on the cavitation number σ (Figs. 14 and 15), and the relation between the averaged statistic characteristics $\hat{G}_x$ and φ and the volume loss of material ΔV in the initiation period are taken into account in particular.

The following can be concluded basing on the experimental data presented:

- maximum differences between structures of cavitation disturbances occur at higher frequencies,
- materials erode mainly due to high-amplitude pressure pulses,
- cavitation intensity can be defined either by a statistical function taking into account principal properties of signals from pressure pulses in flow, or by the pressure pulse distribution, or also by the density of energy flux delivered to the material due to collapse of cavitation bubbles,
- cavitation intensity is strictly related to the material damage in the initiation period; $\hat{G}_x = f(\Delta V)$ and $\varphi = f(\Delta V)$ were linear functions in the case under consideration,
- the relation between the cavitation intensity in terms of energy factors and cavitation damage should render possible correct prediction of behaviour of materials under various cavitation conditions.