

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

PRACE  
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

67-68

W A R S Z A W A - P O Z N A Ń 1975

---

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**  
**JERZY KOŁODKO · JÓZEF ŚMIGIELSKI**  
**ANDRZEJ ŻABICKI**

**REDAKCJA - EDITORIAL OFFICE**  
Instytut Maszyn Przepływowych PAN,  
80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, ul. Gen. Józefa Fiszerza 14, tel. 41-12-71

Copyright  
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe  
Warszawa 1975

Printed in Poland

**PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE - ODDZIAŁ W POZNANIU**

Nakład 380+90 egz.

Ark. wyd. 28,5. Ark. druk. 22

Pap. druk. sat. kl. V, 70 g 70×100 cm

Nr zam. 112/77

Oddano do składania 10 I 1975 r.

Podpisano do druku 20 IX 1975 r.

Druk ukończono we wrześniu 1975 r.

R-17/661 Cena zł 86,-

**DRUKARNIA UNIWERSYTETU im. A. MICKIEWICZA W POZNANIU**

HYDROFORUM

KONFERENCJA NAUKOWO-TECHNICZNA

na temat

WSPÓŁCZESNE PROBLEMY BADAŃ  
I EKSPLOATACJI MASZYN HYDRAULICZNYCH

Gdańsk, 3 - 5 października 1973 r.

\*

HYDROFORUM

SCIENTIFIC-TECHNICAL CONFERENCE

on

MODERN PROBLEMS OF RESEARCH AND  
UTILIZATION OF HYDRAULIC MACHINES

Gdańsk, October 3 - 5, 1973

\*

ГИДРОФОРУМ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

на тему

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЙ  
И ЭКСПЛУАТАЦИИ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МАШИН

г. Гданьск, 3 - 5 октября 1973 г.

MARIA GŁOWACKA, JOANNA HUCIŃSKA

Gdańsk\*

## Wykorzystanie metody wibracyjnej do oceny zniszczenia kawitacyjnego

W badaniach zjawiska erozji kawitacyjnej stosowane są różne metody laboratoryjne [13]. Jedną z nich jest metoda wibracyjna, powszechnie wykorzystywana przy klasyfikacji materiałów pod względem odporności na erozję kawitacyjną. Badania podstawowe prowadzone na urządzeniu wibracyjnym dotyczyły w szczególności wpływu czasu ekspozycji na erozję kawitacyjną, wpływu parametrów pracy i własności cieczy, oddziaływania korozji oraz zależności pomiędzy własnościami materiału i ich odpornością erozyjną [3].

Urządzenie wibracyjne zastosował po raz pierwszy Gaines w roku 1932 [5] wykorzystując zjawisko magnetostrykcji niklu. Pierwsze modele stanowisk wykazały liczne wady, co zmusiło do wprowadzenia szeregu poprawek redukujących zużycie mocy, a podwyższających sprawność i niezawodność pracy. Jedną z najistotniejszych wad urządzenia był sam przetwornik — rurka niklowa, charakteryzujący się niską sprawnością i znaczną skłonnością do pęknięć zmęczeniowych. Od około roku 1960 zaczęto stosować inne rodzaje przetworników — nikłowe, płaszczone bądź piezoelektryczne. Obecnie częściej używane są magnetostrykcyjne, lecz prostsze i tańsze piezoelektryczne przypuszczalnie zyskają w przyszłości szersze zastosowanie.

Przetwornik jest sprzężony z koncentratorem-transformatorem akustycznym dla wzmocnienia amplitudy drgań. W ten sposób na przetwornik nie działają zbyt wysokie naprężenia, a końcowa amplituda jest ograniczona tylko wytrzymałością materiału koncentratora.

Pomysł zastosowania transformatora akustycznego wprowadził Mason [17] stosując po raz pierwszy koncentrator eksponencjalny. Dalsze zwiększenie amplitudy przy tym samym źródle mocy jest możliwe poprzez zastosowanie innych rodzajów koncentratorów — stopniowych [21], katenoidalnych [8], a dla bardzo wysokich amplitud poprzez sprzężenie kilku koncentratorów dostrojonych do tej samej częstotliwości [4].

Rozwój techniki ultradźwiękowej stworzył warunki dla prowadzenia badań kawitacyjnych przy wyższych częstotliwościach, z wykorzystaniem generatorów ultradźwiękowych produkowanych seryjnie dla innych celów. Większość urządzeń wibracyjnych działających obecnie w różnych laboratoriach badawczych pracuje przy częstotliwości około 20 kHz (tabela 1). Wybór tej częstotliwości do badań kawitacyjnych był więc raczej przypadkowy, spowodowany dostępnością takich generatorów. Później jednak stwierdzono

\* Instytut Technologii Materiałów Maszynowych i Spawalnictwa Politechniki Gdańskiej.

Tabela 1

Laboratorium (autor)	Poz. lit.	Rok*	Częstotli- wość [kHz]	Amplituda** [m]	Próbka		Przetwornik	Koncentrator, kształt
					kształt	średnica [m]		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Gaines (USA)	[3]	1932	8,9	$2,94 \cdot 10^{-5}$	—	—	magnetostrykcyjny rurka niklowa	—
Hunsaker (USA)	[14]	1935	6,5	$8,25 \cdot 10^{-5}$	płaska	$1,588 \cdot 10^{-2}$	magnetostrykcyjny rurka niklowa	—
Kerr (USA)	[15]	1937	6,5	$8,25 \cdot 10^{-5}$	płaska	$1,588 \cdot 10^{-2}$	magnetostrykcyjny rurka niklowa	—
Beeching (W. Bryt.)	[1]	1942	9,0	—	wklęsła	$1,588 \cdot 10^{-2}$	magnetostrykcyjny rurka niklowa	—
Glikman (ZSRR)	[7]	1955	8,0	$7,0 \cdot 10^{-5}$	płaska	$1,80 \cdot 10^{-2}$	magnetostrykcyjny rurka niklowa	—
Wheeler (W. Bryt.)	[29]	1956	8,0	$3,43 \cdot 10^{-5}$	rowko- wana	$0,98 \cdot 10^{-2}$	magnetostrykcyjny rurka niklowa	—
ASME	[22]	1955***	6,5	$8,38 \cdot 10^{-5}$	płaska	$1,588 \cdot 10^{-2}$	magnetostrykcyjny rurka niklowa	—
Pisarewskij, Eraszow (ZSRR)	[18]	1958	20,0	$2,50 \cdot 10^{-5}$	płaska	—	magnetostrykcyjny płaszczowy	...
Escher Wyss (Szwajcaria)	[24]	1960	9,0	$4,90 \cdot 10^{-5}$	płaska	$1,0 \cdot 10^{-2}$	magnetostrykcyjny rurka niklowa	—
California Institute of Techno- logy (USA)	[19]	1960	15,0	$5,08 \cdot 10^{-5}$	misko- wa	$1,588 \cdot 10^{-2}$	magnetostrykcyjny płaszczowy	eksponecjalny
Budapest Technical University (Węgry)	[28]	1962	6,5	$8,40 \cdot 10^{-5}$	—	—	magnetostrykcyjny rurka niklowa	—
National Engineering Labora- tory (W. Bryt.)	[11]	1967	20,0	$5,08 \cdot 10^{-5}$	płaska	$1,588 \cdot 10^{-2}$	magnetostrykcyjny płaszczowy	stopniowy

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Meiji University Kawasaki (Japonia)	[18]	1967	22,0	$3,0 \cdot 10^{-5}$	plaska miska-rowkowana	$1,60 \cdot 10^{-2}$ $0,80 \cdot 10^{-2}$	magnetostrykowy piaszczowy	eksponencjalny
General Motors Corporation (USA)	[9]	1968	20,0	$5,08 \cdot 10^{-5}$	miska	$1,60 \cdot 10^{-2}$ $1,588 \cdot 10^{-2}$	magnetostrykowy piaszczowy	stopniowy
Hydronautics (USA)	[8]	1969	14,2	$4,07 \cdot 10^{-5}$	plaska	$1,588 \cdot 10^{-2}$	magnetostrykowy piaszczowy	eksponencjalny
Westinghouse Electric Corporation	[8]	1969	20,0	$5,08 \cdot 10^{-5}$	plaska	$1,43 \cdot 10^{-2}$	piezoelektryczny	katenoidalny
NASA Lewis Center (USA)	[8]	1969	25,0	$4,445 \cdot 10^{-5}$	plaska	$1,435 \cdot 10^{-2}$	magnetostrykowy piaszczowy	eksponencjalny
University of Michigan (USA)	[6]	1970	20,0	$5,08 \cdot 10^{-5}$	plaska	$1,389 \cdot 10^{-2}$	piezoelektryczny	eksponencjalny
Metal Research Institute (Holandia)	[26]	1970	20,0	$2,0 \cdot 10^{-5}$	miska	$1,60 \cdot 10^{-2}$	magnetostrykowy piaszczowy	eksponencjalny
Darmstadt Technical University (NRF)	[23]	1970	14,0 - 15,0 18,0 - 20,0	$5,0 \cdot 10^{-5}$ $2,5 \cdot 10^{-5}$	plaska	$1,50 \cdot 10^{-2}$ $1,60 \cdot 10^{-2}$	magnetostrykowy piaszczowy	eksponencjalny
Moskowskij Gidromelioratiwnyj Institut (ZSRR)	[16]	1972	8,1	$7,0 \cdot 10^{-5}$	plaska	$1,90 \cdot 10^{-2}$	magnetostrykowy piaszczowy	...
University of Rome	[2]	1972	20,0	$12,7 \cdot 10^{-5}$	pow. 112 mm <sup>2</sup>	—	piezoelektryczny	...
Tokyo Institute of Technology	[25]	1972	10,1	$5,5 \cdot 10^{-5}$	miska	$1,60 \cdot 10^{-2}$	magnetostrykowy piaszczowy	eksponencjalny

\* data publikacji, \*\* wartość maksymalna, \*\*\* data podjęcia pracy.

trafność tego wyboru, gwarantującego znacznie lepszą jednolitość zniszczenia powierzchni próbek, lepszą aniżeli przy częstotliwościach niższych [8].

Ponadto dla poprawienia jednolitości zniszczenia, a tym samym dla powtarzalności wyników, były prowadzone badania nad opracowaniem odpowiedniego kształtu próbki i sposobu zamocowania. Wynikiem była propozycja zastosowania próbki „miskowej” [10], bądź umieszczenia płaskiej próbki w okrągłym otworze ograniczającej płyty [27].

Znaczne naprężenia działające na próbkę powodowały często pęknięcia w przypadku materiałów kruchych lub o niskiej wytrzymałości. Opracowana została więc metoda, przy której próbka pozostaje nieruchomą podczas badań, a kawitacja na jej powierzchni zostaje wytworzona za pomocą przeciwpróbki [12].

Dalszym usprawnieniem mającym na celu osiągnięcie wyższej powtarzalności wyników badań, było wprowadzenie zamkniętego pojemnika cieczy i przez to umożliwienie niezależnej kontroli ciśnienia, temperatury i zawartości powietrza w cieczy [12].

Jednym z zasadniczych przedmiotów krytyki urządzenia wibracyjnego był krótki czas badań i duża intensywność kawitacji, co nie pozwalało ocenić chemicznego oddziaływania środowiska. Istnieje jednak możliwość redukcji przyspieszonego charakteru zniszczenia przez zastosowanie techniki kawitacji „impulsowej” opracowanej przez Plesseta [20].

Pomimo usunięcia pewnych usterek pozostają w metodzie wibracyjnej wady związane z samą metodą. Wytworzona kawitacja jest typu wibracyjnego i różni się znacznie od występującej w systemach rzeczywistych.

Ponadto, zakres ciśnienia i prędkości jest odmienny, jak również wymiary powstających pęcherzyków.

Metoda wibracyjna posiada jednak szereg zalet. Jest to najszybsza metoda oceny zniszczenia kawitacyjnego. Próbki materiałowe są proste i niewielkie, badania są łatwe do prowadzenia i mają wysoką powtarzalność. Urządzenie wibracyjne jest ekonomiczne i zajmuje niewiele miejsca.

Ze względu na wymienione cechy, metoda wibracyjna jest bardzo popularna. Szerokie jej rozpowszechnienie, duża różnorodność parametrów stosowanych stanowisk (tabela 1), a tym samym nieporównywalność wyników badań skłoniły do podjęcia pierwszej próby normalizacyjnej (1955 r.). Opublikowane w roku 1958 zalecenia Komitetu Kawitacyjnego ASME dotyczące budowy oraz parametrów pracy szybko się zdezaktualizowały. Dalsze prace nad uporządkowaniem badań erozji kawitacyjnej na stanowisku wibracyjnym podjął Komitet Badań Erozji Kawitacyjnej i Uderzeniowej ASME. Celem programu „round robin” [8] było porównanie urządzeń pracujących w jedenastu ośrodkach badawczych USA i Europy oraz opracowanie następnej znormalizowanej próby wibracyjnej.

Parametry badań były tak dalece ujednolicone, jak tylko pozwalały na to indywidualne różnice poszczególnych urządzeń. Każde laboratorium przebadalo po trzy identyczne materiały pochodzące z tego samego wytopu. Raport Komitetu (1969 r.) przedstawił dość dobrą zgodność względnej oceny zniszczenia kawitacyjnego, mimo że parametry pracy niektórych urządzeń różniły się znacznie, a bezwzględne wartości ubytków erozyjnych wykazywały duży rozrzut. W literaturze są opisane przypadki odwrotne, gdy laboratoria dysponujące urządzeniami o tych samych lub zbliżonych parametrach podawały wyniki prób erozyjnych różniące się znacznie między sobą [24]. Wskazuje to na koniecz-

mość ustalenia poprawnej i znormalizowanej interpretacji wyników badań, która posiada większe znaczenie aniżeli formalne ustalenie jednakowych parametrów.

Poprawne rozwiązanie powyższego problemu wymaga współpracy szeregu ośrodków, aby przeprowadzone próby przez różne laboratoria były miarodajne.

Uzyskana zgodność w badaniach laboratoryjnych umożliwi wprowadzenie tych prób na stałe do odbioru materiałów stosowanych na elementy maszyn, narażone w czasie pracy na erozję wskutek kawitacji.

W Polsce tylko nieliczne ośrodki prowadzą badania laboratoryjne tego typu (znane są nam: IMP PAN Gdańsk, AGH Kraków, WSWM Gdynia oraz Politechnika Szczecińska).

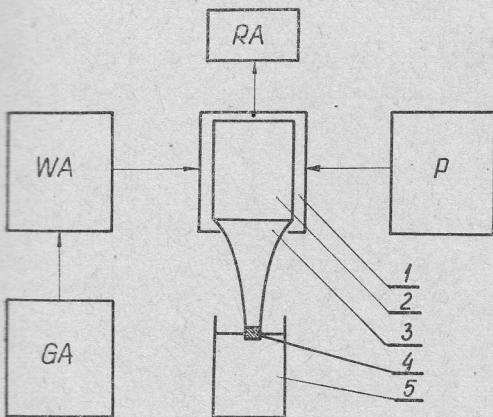
Należy przy tym podkreślić, że między krajowymi ośrodkami brak szerszych kontaktów i wymiany doświadczeń, a przede wszystkim brak znajomości tematyki rozwiązywanych zagadnień w poszczególnych ośrodkach. Nawiązanie współpracy polegającej na podejmowaniu wspólnych badań laboratoryjnych mogłoby doprowadzić do opracowania znormalizowanej metodyki badawczej, a w perspektywie, osiągnięcie znacznego postępu w wykorzystaniu badań laboratoryjnych w praktyce przemysłowej.

Proponujemy więc podjęcie przez ośrodki krajowe, które zajmują się erozją kawitacyjną, badań mających na celu porównanie wyników pomiarów odporności erozyjnej na różnych urządzeniach wibracyjnych.

Warunkiem przystąpienia do realizacji wspólnego programu badań jest posiadanie urządzenia magnetostrykcyjnego.

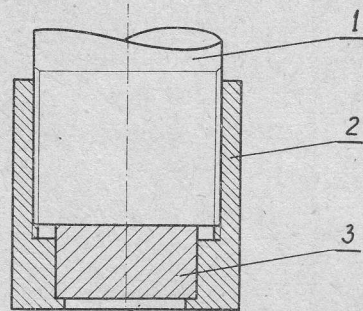
Dla uniknięcia wpływu zbyt wielu zmiennych, konieczne jednak byłoby zachowanie pewnych ustalonych i niezmiennych warunków badań:

- a) rodzaju i temperatury cieczy oraz sposobu jej przygotowania do próby,
- b) ilości badanych próbek materiałowych,
- c) rejestracji szybkości ubytków wagowych w czasie.



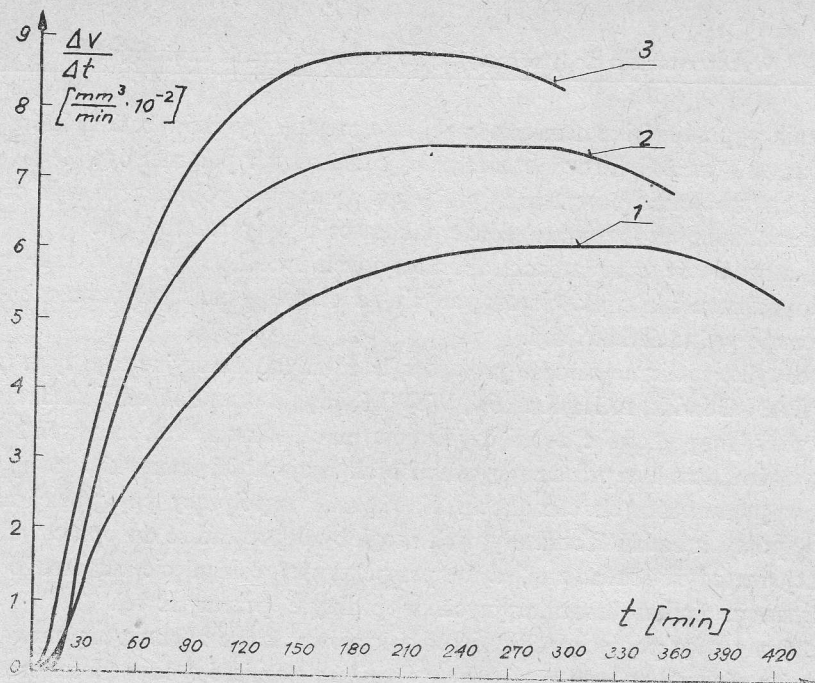
Rys. 1. Blokowy schemat urządzenia magnetostrykcyjnego

GA - generator akustyczny, WA - wzmacniacz akustyczny, RA - rejestrator amplitudy, P - polaryzator; 1 - układ chłodzący, 2 - przetwornik, 3 - koncentrator, 4 - próbka, 5 - pojemnik z cieczą

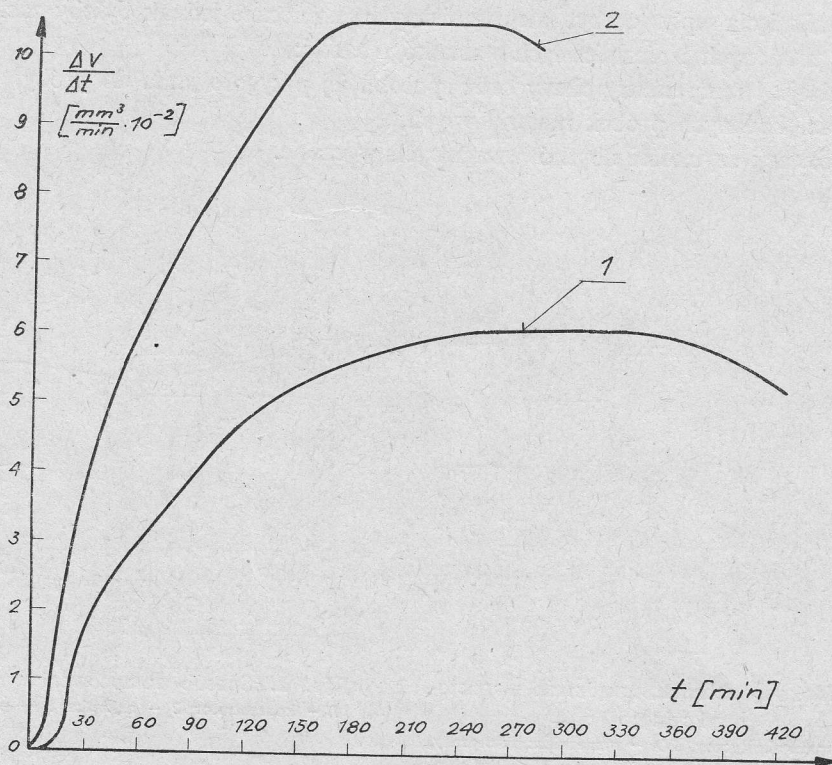


Rys. 2. Sposób zamocowania próbki  
1 - koncentrator, 2 - nakrętka, 3 - próbka





Rys. 3a. Wpływ różnych temperatur wyżarzania na szybkość zniszczenia kawitacyjnego żelaza „Armco”  
 1 – w temperaturze 1300°C, 2 – w temperaturze 1200°C, 3 – w temperaturze 1100°C (przy zachowaniu stałego czasu wygrzewania=1 godzinę oraz chłodzenia na powietrzu)

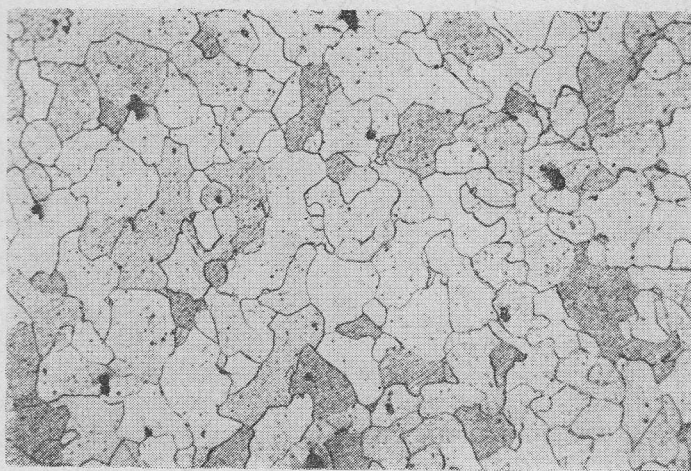


Rys. 3b. Wpływ sposobu chłodzenia żelaza „Armco” po wyżarzeniu przez 1 godzinę w temperaturze 1300°C, na szybkość zniszczenia kawitacyjnego  
 1 – na powietrzu, 2 – z piecem

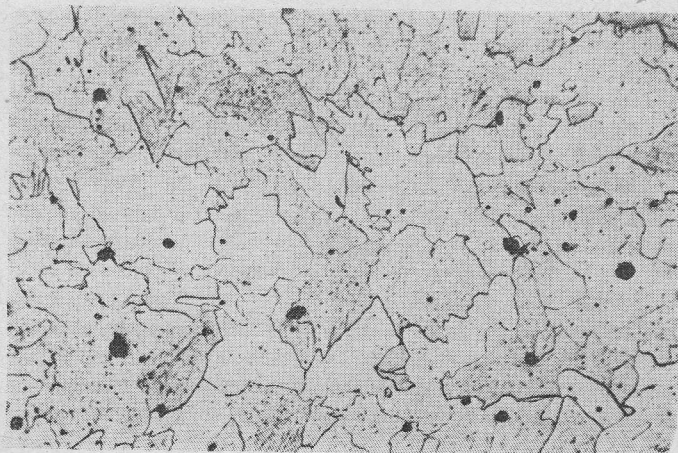
Ponadto każde laboratorium powinno dostarczyć następujące informacje:

- a) krótki opis urządzenia magnetostrykcyjnego, który ma obejmować: generator, przetwornik, koncentrator, próbkę materiałową,
- b) częstotliwość,
- c) amplitudę drgań.

Badania przeprowadzone byłyby na 3 - 5 materiałach dostarczonych do poszczególnych laboratoriów przez koordynujący ośrodek. Ze względu na wpływ zróżnicowanego sposobu wykonania próbek (zmienna głębokość i stopień umocnienia) na wartość zniszczenia, należałoby ustalić jednakową obróbkę cieplną przeprowadzaną centralnie. Stan materiału



Rys. 4. Struktura żelaza „Armco” wyżarzonego w temperaturze 1100°C/1 godz., chłodzonego na powietrzu. Widoczne drobne jasne ziarna ferrytu oraz liczne wtrącenia niemetaliczne. Trawiono nitałem. Powiększenie 100 ×

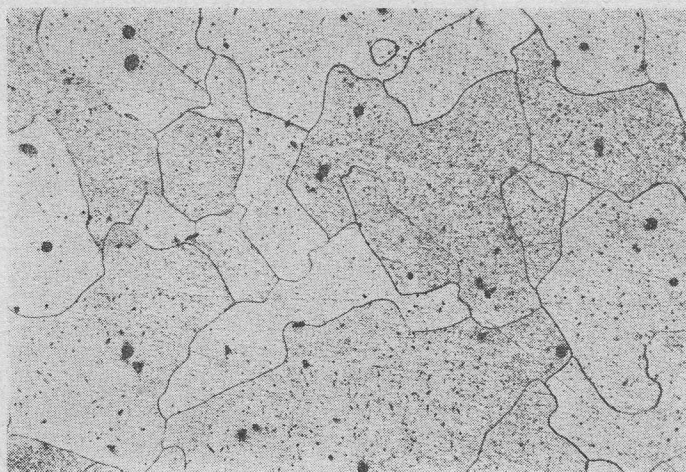


Rys. 5. Struktura żelaza „Armco”, wyżarzonego w temperaturze 1200°C/1 godz., chłodzonego na powietrzu. Widoczne jasne ziarna ferrytu oraz liczne zanieczyszczenia. Trawiono nitałem. Pow. 100 ×

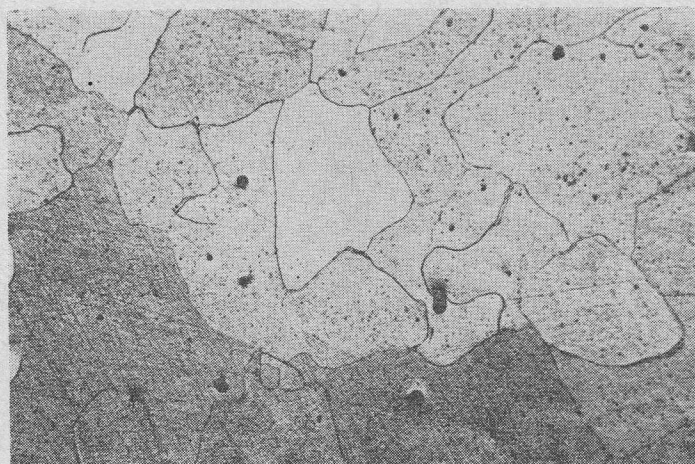
jest bowiem bardzo istotnym czynnikiem oddziaływającym na szybkość zniszczenia, czego dowodzi przykładowo wybrane badanie na żelazie „armco”, przedstawione dalej.

Uzgodnienie metodyki badań może nastąpić po zgłoszeniu propozycji przez zainteresowane laboratoria.

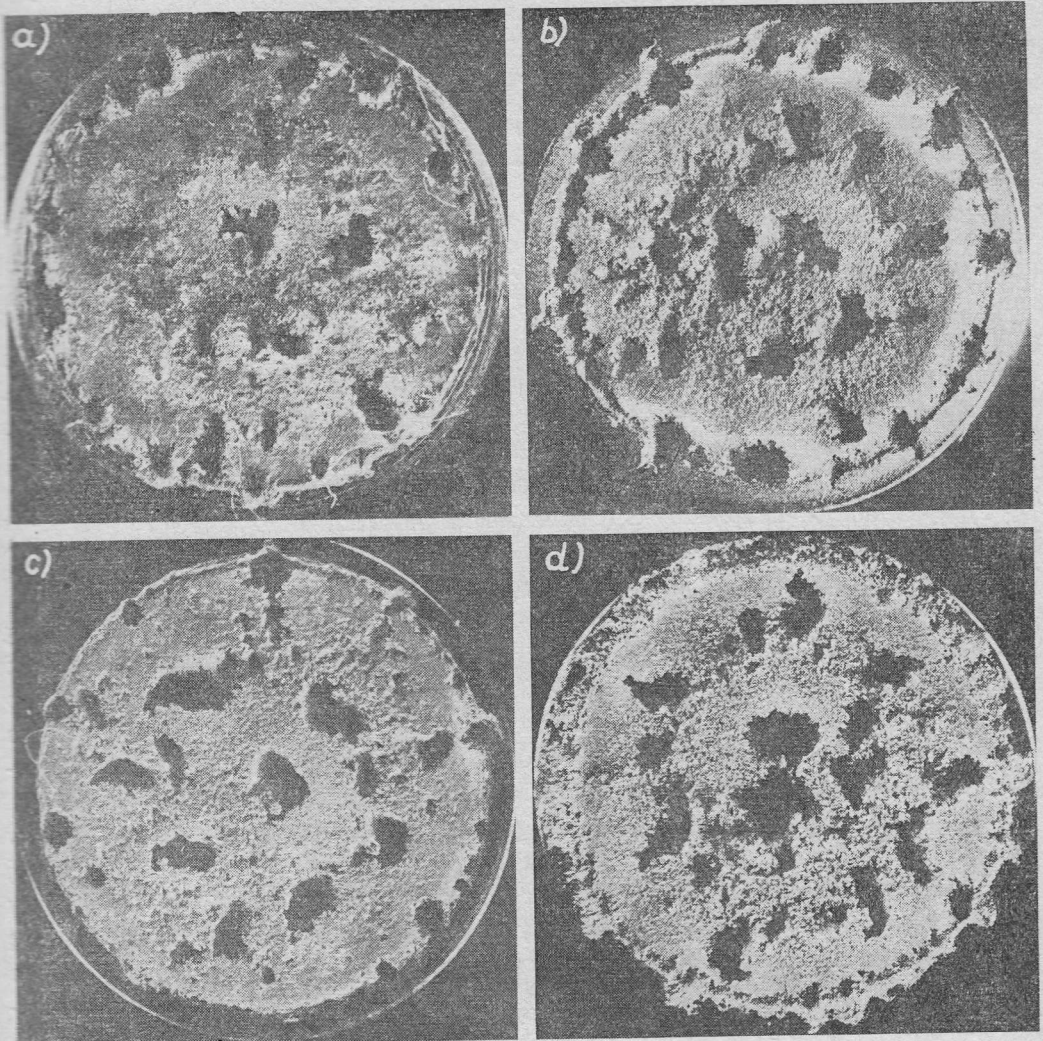
W Instytucie Technologii Materiałów Maszynowych i Spawalnictwa Politechniki Gdańskiej badania przeprowadzane są na urządzeniu magnetostrykcyjnym, którego schemat blokowy przedstawia rys. 1. W skład urządzenia wchodzi: dekadowy generator RC typu PW-6 (prod. ZOPAN), wzmacniacz WD-500, przetwornik niklowy płaszczowy



Rys. 6. Struktura żelaza „Armco”, wyżarzonego w temp.  $1300^{\circ}\text{C}/1$  godz., chłodzonego na powietrzu. Widoczne duże jasne ziarna ferrytu oraz ciemne zanieczyszczenia. Trawiono nitałem. Powiększenie  $100\times$



Rys. 7. Struktura żelaza „Armco”, wyżarzonego w temperaturze  $1300^{\circ}\text{C}/1$  godz., chłodzonego z piecem. Duże jasne ziarna ferrytu. Na granicach niektórych ziarn wydzielienia cementytu trzeciorzędowego. Liczne zanieczyszczenia. Trawiono nitałem. Powiększenie  $100\times$



Rys. 8. Widok powierzchni badanej próbki żelaza „Armco” w okresie maksymalnej szybkości erozji. Powiększenie  $5\times$ ; a) żelazo „Armco” po wyżarzeniu w  $1100^{\circ}\text{C}$ , b) po wyżarzeniu w  $1200^{\circ}\text{C}$ , c) po wyżarzeniu w  $1300^{\circ}\text{C}$ , d) po wyżarzeniu w  $1300^{\circ}\text{C}$  i chłodzeniu w piecem.

wraz z eksponencyjnym koncentratorom drgań wykonanym ze stali 18/8. Próbkę (rys. 2) mocuje się w dolnej części koncentratora. Drgania powierzchni próbki zanurzonej w cieczy wywołują okresowe zmiany ciśnienia powodując kawitację i erozję powierzchni próbki. Głębokość zanurzenia próbki wynosi 3 - 4 mm. Przed każdym kolejnym pomiarem wagi, dokonywanym z dokładnością 0,1 mg, próbka jest oczyszczana acetonem i suszona strumieniem powietrza.

Badanie szybkości zniszczenia kawitacyjnego przeprowadza się w wodzie destylowanej o temperaturze  $20\pm 1^{\circ}\text{C}$  przy ustabilizowanej zawartości powietrza. Wysokość całkowita słupa cieczy wynosi 100 mm. Ciecz badawcza, w ilości około 400 ml, znajduje się w naczyniu cylindrycznym o średnicy 70 mm i wysokości 120 mm.

Tabela 2

Temperatura wygrzewania i sposób chłodzenia	Twardość $HV \left[ \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2} \right]$	Szybkość erozji $\max \frac{\Delta V}{\Delta t} \left[ \frac{\text{mm}^3}{\text{min}} \right] \cdot 10^{-2}$
1100°C (powietrze)	86,2	8,80
1200°C (powietrze)	89,3	7,50
1300°C (powietrze)	89,6	6,00
1300°C (piec)	67,4	10,80

Określenie zniszczenia przeprowadza się metodą wagową. Sposób przedstawienia wyników pokazuje rys. 3a, b, gdzie podano szybkość zniszczenia żelaza „armco” w czasie. Dla wykazania wpływu obróbki cieplnej, a tym samym oddziaływania stanu materiału na erozję kawitacyjną, próbki żelaza poddano następującej obróbce:

- 1) wyżarzanie w temp. 1100°C (chłodzenie na powietrzu),
- 2) wyżarzanie w temp. 1200°C (chłodzenie na powietrzu),
- 3) wyżarzanie w temp. 1300°C (chłodzenie na powietrzu),
- 4) wyżarzanie w temp. 1300°C (chłodzenie z piecem).

Czas wygrzewania był we wszystkich przypadkach stały, równy 1 godz. Struktury żelaza „armco” badanych próbek przedstawiają rys. 4–7. Widoczna jest różnica w wielkości ziarn. Po wyżarzaniu w temperaturze 1100°C uzyskano według PN-66/H-04507 ziarno nr 6, w temperaturze 1200°C – nr 3, zaś w temperaturze 1300°C – nr 1. Obróbka cieplna według punktu 3 i 4 nie doprowadziła do zróżnicowania wielkości ziarna, tylko przy chłodzeniu z piecem uzyskano wydzielenie  $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$  na granicach ziarn ferrytu (rys. 7).

W tabeli 2 zestawione są twardości materiałów oraz maksymalne szybkości ubytków erozyjnych przyjęte za kryterium zniszczenia erozyjnego. Rysunki 8a, b, c, d ilustrują rozwój zniszczenia w badanych materiałach w okresie maksymalnej szybkości zniszczenia. Przy podanych parametrach pracy stanowiska, szybkość zniszczenia erozyjnego maleje w miarę wzrostu wielkości ziarn żelaza „armco”, przy zachowaniu tej samej twardości. Obróbka cieplna powodująca wydzielenie cementytu trzeciorzędowego i obniżenie twardości żelaza, doprowadziła do zwiększenia szybkości zniszczenia erozyjnego.

W pracy niniejszej przedstawiono urządzenie magnetostrykcyjne oraz sposób zapisu wyników badań wraz z oceną zniszczenia erozyjnego stosowaną w laboratorium Instytutu Technologii Materiałów Maszynowych i Spawalnictwa. Potwierdzenie poprawności stosowanej metodyki i w perspektywie jej normalizacja, możliwa tylko przy współudziale krajowych laboratoriów, pozwoli na wprowadzenie wskaźnika odporności erozyjnej do warunków odbioru materiałów.

#### Literatura

- [1] Beeching R., *Resistance to cavitation erosion*. Transactions of the Institution of Engineers and Shipbuilders in Scotland, vol. 85, 1942, s. 210–276.
- [2] Benanti A., Pighini V., *Cavitation erosion: dimensional analysis*. Proceedings of the Fourth Conference of Fluid Machinery, Budapest 1972, s. 157–174.

- [3] Eisenberg P., Preiser H. S., Thiruvengadam A., *On the mechanisms of cavitation damage and methods of protection*. Transactions, Society of Naval Architects and Marine Engineers, vol. 73, 1965, s. 241 - 286.
- [4] Eisner E., *Design of sonic amplitude transformers for high magnification*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 35, No. 9, 1963, s. 1367 - 1377.
- [5] Gaines N., *A magnetostriction oscillator producing intense audible sounds and some effects obtained*. Physics, vol. 3, 1932, s. 209 - 229.
- [6] Garcia R., Hammitt F. G., Nystrom R. E., *Correlation of cavitation damage with other material and fluid properties*. Erosion by Cavitation or Impingement, ASTM STP 408, ASTM, 1968, s. 239 - 279.
- [7] Glikman Ł. A., *Korozionno-miechaniczeskaja procznost' mietallow*. Maszgziz, 1955.
- [8] Hammitt F. G., Chac C., Kling C. L., Mitchel T. M., Roges D. O., *ASTM round-robin test with vibratory cavitation and liquid impact facilities of 6061-T6511 aluminum alloy, 316 stainless steel, commercially pure nickel*. Report Nr MMPP-344-3-T (Mod) 01357-4-T, 1969.
- [9] Hickling R., *Cavitation damage measurements for the ASTM Round Robin Test*. GMR-784, General Motors Corporation, 1968.
- [10] Hirotsu M., Abe Y., *On the cavitation phenomena in the magnetostrictive vibratory method*. Bulletin of Japan Society Mechanical Engineers, vol. 10, No. 41, 1967, s. 786 - 793.
- [11] Hobbs J. M., Laird A., Brunton W. C., *Laboratory evaluation of the vibratory cavitation erosion test*. National Engineering Laboratory, Report No. 271, 1967.
- [12] Hobbs J. M., Rachman D., *Current knowledge of cavitation phenomena, their prevention or application*. Transactions of the Institution of Engineers and Shipbuilders in Scotland, vol. 114, 1970 - 71, part 6, s. 207 - 254.
- [13] Holl J. W., Wodd G. M. (redaktorzy), *Proceedings of a Symposium on Cavitation Research Facilities and Techniques*. Fluids Engineering Division Conference, ASME, Philadelphia, Pennsylvania, 1964.
- [14] Husaker J. C., *Cavitation research*. Mechanical Engineering, vol. 57, 1935, s. 211 - 216.
- [15] Kerr S. L., *Determination of the relative resistance to cavitation erosion by the vibratory method*. Transactions of the American Society Mechanical Engineers, vol. 59, 1937, s. 373 - 397.
- [16] Litwak D. W., *Korozionno-kawitacionnaja stojkost' olowianych i aluminiowych bronz*. Mietałłowiedzenie i termiczeskaja obrabotka mietałłow, No. 1, 1972, s. 62 - 64.
- [17] Mason W. P., *Internal friction and fatigue in metals at large strain amplitudes*. Journal of the Acoustical Society of America, vol. 28, No. 6, 1956, s. 1207 - 1218.
- [18] Pisarewskij M. M., Eraszow A. F., *Opriedielenije kawitacionnoj stojkosti materialow s posmoszczju magnitostriktionnogo wiratora*. Energiomaszinstrojenije, No. 9, 1957, s. 38 - 39.
- [19] Plesset M. S., *On cathodic protection in cavitation damage*. Journal Basic Engineering Transactions, vol. 82, series D, 1960, s. 808 - 820.
- [20] Plesset M. S., *The pulsation method for generating cavitation damage*. Journal of Basic Engineering Transactions, vol. 85, series D. 1963, s. 360 - 364.
- [21] Preiser H. S., Thiruvengadam A., Couchman C., *Cavitation damage research facilities for high-temperature liquid alkali metal studies*. Proceedings of a Symposium on Cavitation Research Facilities and Techniques, Fenids Engineering Conference, ASME, Philadelphia, Pennsylvania, s. 146 - 156.
- [22] Robinson L. E., Holmes B. A., Leith W. C., *Progress report on the standardisation of the vibratory-cavitation test*. Transactions of the American Society Mechanical Engineers, vol. 80, 1958, s. 103 - 107.
- [23] Schulmeister R., *Vibratory tests in water on the combined action of cavitation and corrosion*. Characterisation and Determination of Erosion Resistance ASTM, STP 474, ASTM 1970, s. 109 - 126.
- [24] Stauffer W., Flury E., *Kavitationsversuche mit einer Magnetostrictionsapparatur*. Escher Wyss Mitteilungen, z. 1, 2, 3, 1960, s. 183 - 185.
- [25] Suezawa Y., Matsamura M., Nakajima M., Tsuda K., *Studies on cavitation erosion*. Journal of Basic Engineering Transactions, vol. 94, series D, 1972, s. 521 - 532.

- [26] Tichler J. W., Van der Elsen J. B., de Gee A. W. J., *Resistance against cavitation erosion of 14 chromium steels*. Journal of Basic Engineering Transaction, vol. 92, series D, 1970, s. 220 - 227.
- [27] Tima E. E., Hammitt F. G., *Cavitation damage test procedure using baffle plate configuration*. Cavitation Forum, ASME, 1969, s. 5 - 6.
- [28] Vasvári F., *Investigation of the initial phase of cavitation damage*. Acta Technica Academia Scientiarum Hungarica, t. 39, z. 1 - 2, 1962, s. 101 - 121.
- [29] Wheeler W. M., *Mechanism of cavitation erosion, Cavitation in Hydrodynamics*. Proceedings of a Symposium, National Physical Laboratory London, paper No. 21, 1956.

## Employment of the Vibratory Method for the Determination of the Cavitation Damage

### Summary

The vibratory method is generally applicable for the classification of materials with regard to the resistance to cavitation damage.

Since 1932, the year of the application of this method for the first time, a non-stop improvement of the construction of vibratory sets is observed in connection with the simultaneous optimization of their parameters of work. It is expressed in the uniformity of the damage of the examined surface as well as in the high repeatability of results.

The now applied vibratory sets are characteristic of a great variety of working parameters. It is the main reason of differences in the absolute determination of the cavitation damage to the specific materials.

The first attempt to receive the conformity of the determination of the cavitation damage in different laboratories resolved into a formal settlement of identical parameters for the vibratory sets. In the present-day opinion the sense of standardization of the vibratory method lies in the settlement of correct and uniform interpretation of the results of researches. The solution to this problem needs a cooperation of all home laboratories that conduct research into cavitation damage.

In further part of the paper main attention was paid to the role of the condition of the material proper in the qualification of its resistance to cavitation damage. It was ascertained that increasing the grain size in Armco iron from no. 6 to no. 1 (Figs 4, 5, 6), (obtained as result of annealing at temperatures: 1100°C, 1200°C, 1300°C and cooling in the air) and keeping constant hardness (table 2), caused the cavitation damage rate to decrease (Fig. 3a). On the other side, annealing the Armco iron at a temperature of 1300°C and cooling it with the furnace caused the hardness (table 2) to decrease,  $Fe_3C_{III}$  (Fig. 7) to evolve and the cavitation damage rate (Fig. 3b) to increase in comparison with the specimens annealed at the same temperature and cooled in the air.

The above presented report informs at the same time on the manner of registering the results and determining the cavitation damage in the ITMMS-laboratory.

## Использование вибрационного метода для оценки кавитационного разрушения

### Резюме

Вибрационный метод повсеместно используется для классификации материалов в отношении сопротивляемости кавитационной эрозии.

Начиная с 1932 года, когда впервые был применен этот метод, наблюдается непрерывное улучшение конструкции вибрационных установок с одновременной оптимизацией их рабочих параметров, направленной на достижение однородности разрушения испытуемого образца и высокой повторяемости исследований.

Применяемые в настоящее время вибрационные установки характеризуются значительной разнообразностью рабочих параметров, которая является основной причиной разногласий в оценке кавитационного разрушения отдельных материалов. Первая попытка достижения согласия различных лабораторий в оценке кавитационного разрушения сводилась к формальной наброске одинаковых рабочих параметров вибрационным установкам. Сейчас считают, что смысл нормализации метода заключается в установлении верной, унифицированной интерпретации результатов испытаний. Решение этой проблемы требует сотрудничества всех отечественных лабораторий, занимающихся исследованием кавитационного разрушения.

В дальнейшей части статьи обращено особое внимание на роль состояния материала при оценке его сопротивления кавитационному разрушению. Показано, что увеличение зерна железа Армко с № 6 до № 1 (рис. 4, 5, 6), полученного путем отжига при температурах 1100°C, 1200°C, 1300°C и охлаждения железа на воздухе, при сохранении постоянной твердости (табл. 2) уменьшает скорость кавитационного разрушения (рис. 3а). Отжиг железа Армко в температуре 1300°C с охлаждением в печи, по отношению к образцам железа, отожженным в этой же температуре и охлажденным на воздухе, вызвал снижение твердости (табл. 2), выделение  $Fe_3C_{III}$  (рис. 7) и в последствии увеличение скорости кавитационного разрушения (рис. 3б).

Представленные результаты испытаний информируют одновременно о способе оценки кавитационных разрушений, применяемом в лаборатории Института технологии машиностроительных материалов и сварки.