

ZDZISŁAW REYMAN, KAZIMIERZ STELLER

Gdańsk

Ocena odporności materiałów na działanie kawitacji przepływowej*

Na podstawie testów laboratoryjnych dokonano oceny 45 materiałów (tworzyw konstrukcyjnych) pod względem ich odporności na działanie kawitacji przepływowej. W pracy omówiono urządzenie badawcze, przedstawiono wyniki badań próbek materiałów, określono ich odporność „kawitacyjną” według różnych kryteriów oceny, przeanalizowano zastosowane mierniki oceny oraz sklasyfikowano testowane materiały według umownej skali odporności.

1. Wstęp

Dobór tworzyw konstrukcyjnych dla maszyn i urządzeń** narażonych na działanie kawitacji powinien uwzględniać ich odporność na erozję kawitacyjną. Odporność tę można ocenić na podstawie testów erozyjnych przeprowadzonych w rzeczywistych warunkach działania maszyn i urządzeń lub w warunkach laboratoryjnych. Podstawą oceny są przeważnie testy laboratoryjne, polegające na obserwacji i porównywaniu zniszczeń próbek materiałów podczas występowania kawitacji o stałym natężeniu.

W pracy dokonano oceny 45 materiałów produkcji krajowej pod względem ich odporności na działanie kawitacji przepływowej. W tym celu poddawano próbki materiałów niszczącemu działaniu kawitacji na stanowisku z wirującą tarczą, wyznaczono krzywe ich ubytków objętościowych i szybkości erozji, określono ich odporność według różnych kryteriów oceny, przeanalizowano zastosowane wskaźniki oceny i sklasyfikowano testowane materiały według odporności względnej.

2. Badane materiały

Do badań wybrano stopy konstrukcyjne (stopy żelaza i metali nieżelaznych) używane do budowy maszyn i urządzeń hydraulicznych oraz stosowane na kadłuby i śruby okrętowe, tuleje cylindrowe silników spalinowych i łopatki turbin parowych. Do badań włączono

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

** Niszczenie elementów konstrukcyjnych pod wpływem kawitacji występuje m. in. w pompach, turbinach wodnych, pędnikach okrętowych, układach chłodzenia reaktorów jądrowych i silników spalinowych, łożyskach ślizgowych silnie obciążonych, instalacjach i armaturze hydraulicznej.

Badane materiały

Żelazo techniczne i stopy żelaza

Żelazo techniczne i stopy żelaza														
Lp.	Materiał	Oznaczenie (cecha)	Zawartość składników stopowych w %								Gęstość kg 10 ³ m ³	Twardość HB	Uwagi	
			C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Inne				
1	Armco E	EO4	0,04	0,14	0,15	0,015	0,03	ślad			Cu 0,1	7,85	103	
2	Żeliwo	Z20	2,85	0,88	1,52	0,20	0,030	0,155				7,34	225	
3		Z25	2,90	0,88	1,82	0,22	0,067	0,27				7,26	225	
4		Z30	2,90	1,00	1,65	0,21	0,075					7,30	230	
5	Żeliwo chromowe	Z1Cr28	1,60	0,40	1,30	0,085	0,079	27,0				7,50	505	
6	Staliwo wyższej jakości	L25 II	0,26	0,50	0,29	0,018	0,018	0,07	0,06		Ni 0,06	7,84	116	
7		L35 II	0,39	0,77	0,26	0,028	0,026	0,11	0,10		Cu 0,15	7,82	149	
8		L47 II	0,26	0,60	0,38	0,019	0,022	0,19	0,08		Cu 0,07	7,83	139 ÷ 141	
9	Staliwo zwykłej jakości	L50 I	0,25	0,51	0,39		0,043	0,12			Cu 0,17	7,80	140	
10		L60 I	0,39	0,55	0,36		0,035	0,11			Cu 0,15	7,79	156	
11	Staliwo chromowe niklowe	LH13N	0,10	0,20	0,64	0,019	0,011	13,0	2,0			7,71	152	
12		LH17N2				analizy składu nie wykonano						7,92	330	
13	Stal zwykłej jakości	St3	0,25	0,84	0,23	0,024	0,034					7,85	126	
14		St5	0,19	0,18	0,31	0,019	0,023					7,85	156	
15	Stal wyższej jakości	45 (a)											175	
16		45 (b)	0,028	0,50	0,30	0,023	0,028	ślad			Cu 0,15	7,83	295	hart. 820°C odp. 450°C/1h
17	Stal o podwyż. zawartości manganu	15GA	0,19	0,84	0,37	0,020	0,020	0,16			Cu 0,16	7,83	143	
18	Stal o podwyż. wł. wytrzymał.	15G2NbA	0,14	0,99	0,38	0,033	0,024	0,11			Cu 0,14	7,84	146	
19	Stal nierdzewna	1H13	0,13	0,24	0,23	0,018	0,031	12,10	1,0			7,74	135	
20		2H13 (a)											159	
21		2H13 (b)	0,19	0,18	0,31	0,019	0,023	12,0				7,71	225	hart. 980°C odp. 300°C
22		2H13 (c)	0,16	0,33	0,22	0,028		13,59	0,12		Al 0,017	7,73	405 ÷ 450	hart. 1030°C odp. 300°C
23	Stal kwasoodporna	OH18N9	0,07	1,36	0,27	0,016	0,08	16,0	10,0			7,71	159	
24		1H18N9T	0,12	1,06	1,15	0,024	0,09	17,1	8,01		Ti 0,45	7,94	162	
25	Stal stopowa konstrukcyjna	23H12MNF	0,23	0,75	0,34	0,021		12,67	0,7		Al 0,086	7,74	482 ÷ 505	hart. 1030°C odp. 300°C
26	Elektroda Cr-Ni	ES24-18	0,07 ÷ 0,11	1 ÷ 2	0,5 ÷ 1,0	0,02 ÷	0,02 ÷	23 ÷ 25	17 ÷ 19			7,89	140	
27		ES18-8	0,07 ÷ 0,09	1 ÷ 2	0,5 ÷ 1,0	0,02 ÷	0,02 ÷	17 ÷ 19	7 ÷ 9			7,89	198	

28		ES18-8-6	0,07÷0,11	5,5÷6,5	0,5÷1,0	0,02÷ ÷0,035	0,02÷ ÷0,035	7÷9	Mo 1÷2	7,83	140	napawano dwuwarstw- wo na stal S13
29	Elektroda Cr-Ni-Mn	ES18-8-2	0,07÷0,11	1÷2	0,5÷1,0	0,02÷ ÷0,035	0,02÷ ÷0,035	7÷9	Mo 1,5÷2,5	7,91	155	
30	Elektroda Cr	ES13Cr	max 0,10	0,5÷1,0	0,3÷0,6	max 0,035	max 0,035	12÷14		7,82	327	
31	Elektroda stelliteowa	ES18CoW	1,0	0,6	1,2	0,04	0,04	26,0	W 8,0 Co 57,0	8,42	395	
32	Stellit	Stellit	1,1		2,2			27,0	W 4,0 Co 62,0	8,16	385	

Miedź i stopy metali nieżelaznych

Lp.	Material	Oznaczenie (cecha)	Skład chemiczny w %										Gęstość kg 10 ³ m ³	Twardość HB	Uwagi
			Cu	Fe	Mn	Al	Pb	Si	Sn	Zn	Ni	Inne			
1	Miedź elektrolityczna	M1	99,9				0,005				0,025		8,94	52	
2	Nosiądz	M70 (a)												49	wyznaczony 850°C/3h chl. w pow.
3		M70 (b)	70,4	śląd						reszta			8,38	68	wyznaczony 500°C/1h chl. w pow.
4	Mosiądz manganowy	MM55	55,51	1,16	3,45	0,51	0,28	0,02	0,5	reszta			8,19	170	
5	Brąz	BK331	reszta	1,15	0,65			3,75		4,60			8,31	137	
6		BAM2	reszta	2,75	1,40	9,95					2,8		7,50	163	
7		BM12733	75,4	3,24	12,45	6,8					1,68		7,42	235	
8		Superston	reszta	3,19	15,34	7,38			0,03	0,13	2,23		7,38	184	
9		Nikalum	reszta	4,96	1,66	8,52			0,03	0,52	5,0		7,65	148	
10	Stop aluminium	PA2N				reszta						Mg 2,3	2,68	32	

Węglik spiekano

Lp.	Gatunek	Skład wg PN-69/H-89500			Gęstość kg 10 ³ m ³	Twardość HRA
		węgiel woltenu	węgiel tytanu	Co		
1	S10	78,0	16,0	6,0	11,20	91,0
2	S30	87,0	5,0	8,0	13,22	89,5
3	G20	89,0		11,0	14,21	87,0

również dwa podstawowe metale stopów technicznych — technicznie czyste żelazo i technicznie czystą miedź — oraz niektóre materiały specjalne (węgliki spiekane).

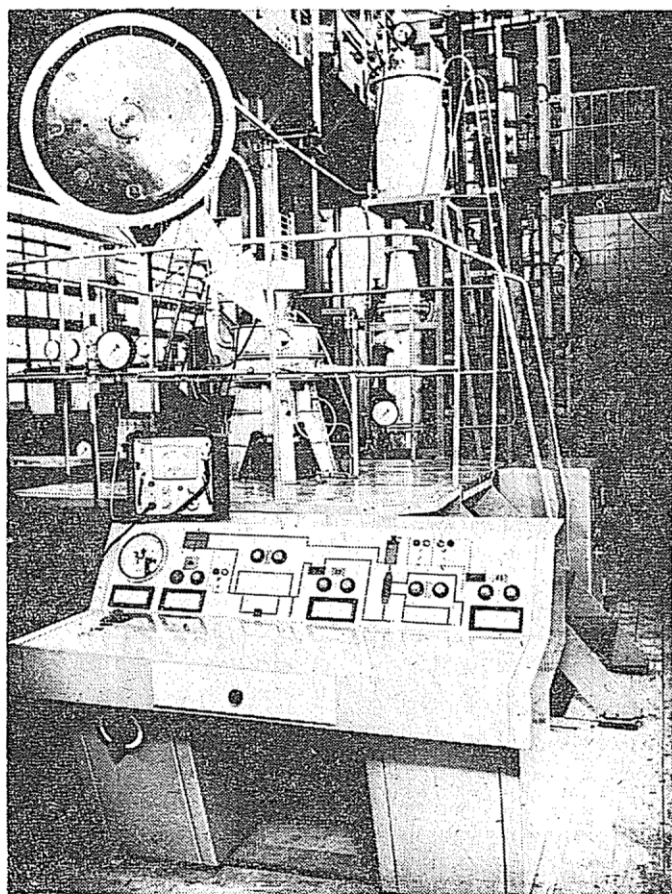
Próbki materiałów pochodziły od producentów maszyn względnie z dostaw handlowych. Poddano je wstępnym badaniom polegającym na określeniu składu chemicznego, pomiarze gęstości i twardości.

Zestawienie badanych materiałów oraz wyniki wstępnych badań materiałowych zamieszczono w tabeli 1.

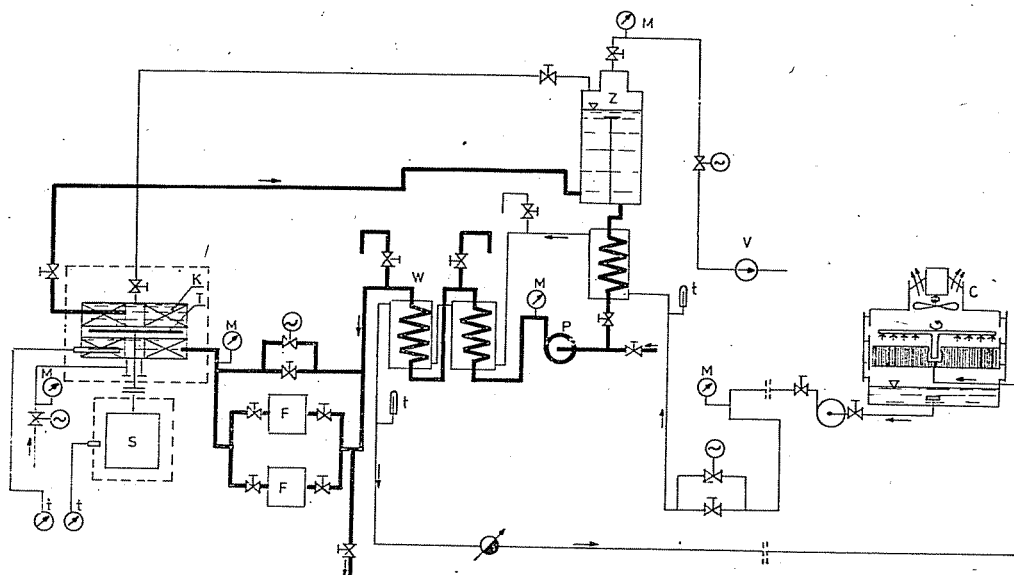
3. Urządzenie badawcze

Testy erozyjne przeprowadzano w laboratorium Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku, na stanowisku z wirującą tarczą (rys. 1 i 2).

Zjawisko kawitacji jest wywoływane w komorze wodnej *K* za pośrednictwem cylindrycznych wzbudników osadzonych w ruchomej tarczy (rys. 3). Tarcza *T*, napędzana silnikiem *S* o mocy 40kW, wiruje między znajdującymi się po obu jej stronach wieńcami łopatkowymi, których zadaniem jest uspokojenie wody porywanej przez wirującą tarczę.



Rys. 1. Ogólny widok stanowiska badawczego (fot. T. Link)

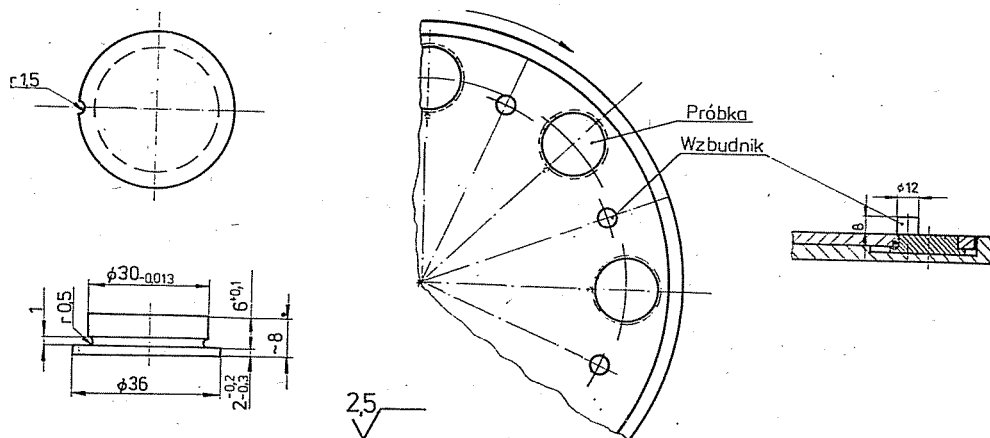


Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego

K — komora wodna, T — tarcza, S — silnik elektryczny, P — pompa wirowa, W — wymiennik ciepła, F — filtry, V — pompa próżniowa, C — chłodnica wyparna (mikroszczelinowa), M — manometry, t — termometry

Próbka

Tarcza



Rys. 3. Postać konstrukcyjna próbki oraz rozmieszczenie próbek i wzbudników w tarczy

i przeciwdziałanie ruchowi obrotowemu cieczy. Próbki materiału (rys. 3), inkrustowane w tarczy, poddawane są niszcącemu działaniu kawitacji w cieniu aerodynamicznym cylindrycznych wzbudników. Wzierniki ze szkła organicznego, umieszczone na pobocznicy i w pokrywie komory K , umożliwiają obserwację wnętrza komory w czasie ekspozycji próbek.

Stanowisko posiada główny i pomocniczy obieg wody (rys. 2). Przepływ wody w obiegu głównym jest wymuszony przez dwustopniową pompę P o wydajności $3,5 \text{ m}^3/\text{h}$ i wysokości podnoszenia 26 m sł. wody. Z pompy woda jest podawana przez wymienniki ciepła W i filtry F do komory pomiarowej K , skąd przepływa do zbiornika Z z przewalem wzmagającym wydzielanie się powietrza z wody. Nadmiar powietrza w zbiorniku jest usuwany pompą próżniową V . Ze zbiornika woda spływa przez chłodnicę do króćca ssawnego pompy P .

Obieg pomocniczy (na rys. 2 oznaczony cienką linią) jest obiegiem wody chłodzącej, współpracującym z wymiennikami ciepła W . Zawiera on centralny układ chłodni mikro-szczelinowych i pracuje przy średniej wysokości ciśnienia 26 m sł. wody oraz natężeniu przepływu $10 \text{ m}^3/\text{h}$.

Stanowisko jest wyposażone w automatyczny układ regulacji. Sterowanie ręczne odbywa się z pulpitu pomiarowo-kontrolnego (rys. 1).

Dane techniczne stanowiska są następujące:

— średnica zewnętrzna tarczy	330 mm
— średnica osadzenia wzbudników	270 mm
— średnica osadzenia próbek materiałów	274 mm
— wymiary wzbudników	$\varnothing 12, h=8 \text{ mm}$
— średnica czynna próbek	30 mm
— liczba wzbudników i próbek w tarczy	8
— szybkość obrotowa tarczy	ok. 3000 obr/min
— prędkość obwodowa wzbudników	42,5 m/s
— zakres regulacji temperatury	$10 \div 60^\circ\text{C}$
— zakres regulacji próżni	$0 \div 80\%$
— moc silnika głównego	40 kW
— łączna moc agregatów pomocniczych	2,5 kW

4. Testy erozyjne

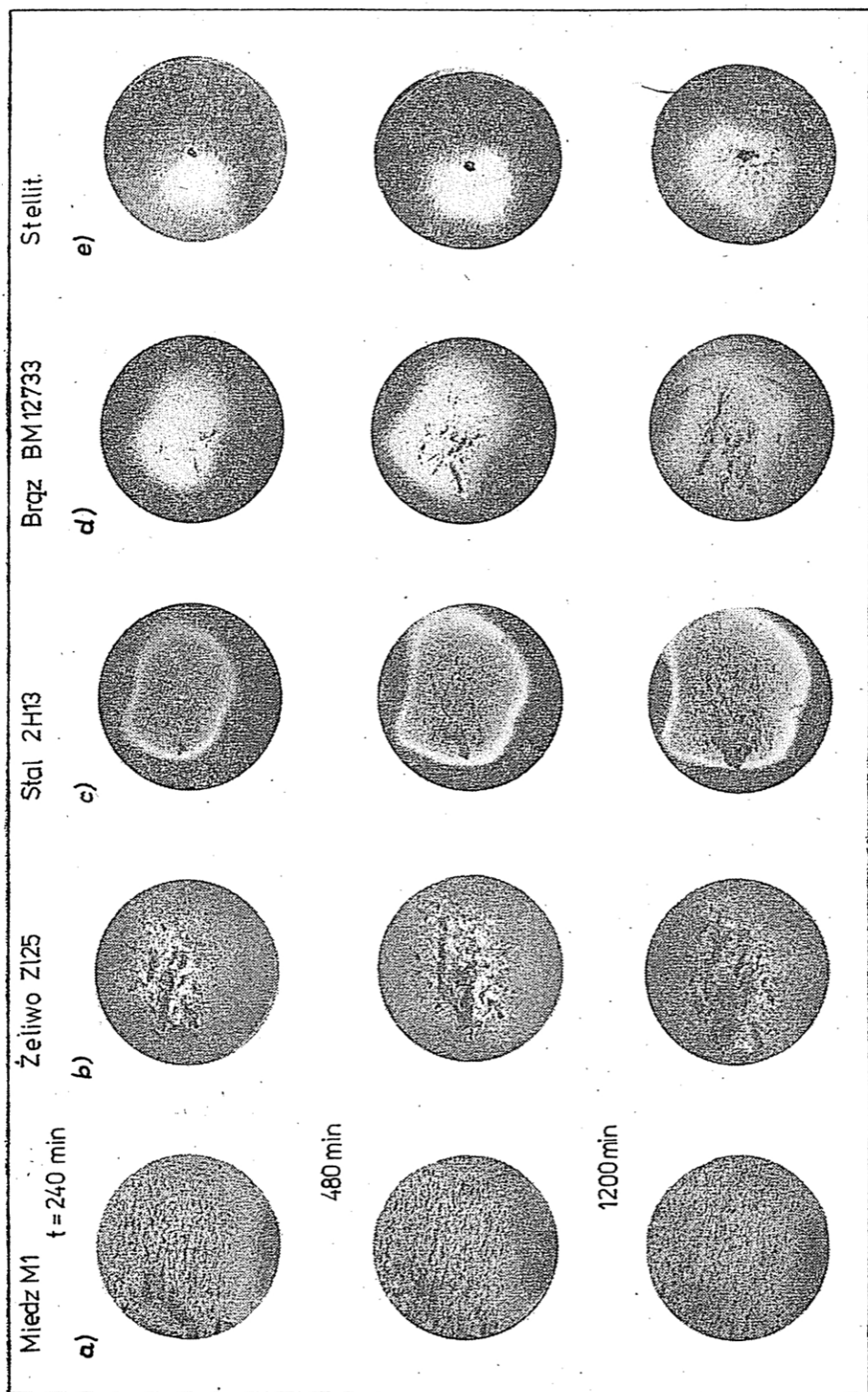
Kształty, wymiary i stany powierzchni wszystkich próbek były jednakowe (rys. 3). Powierzchnie czołowe, narażone na działanie kawitacji, były polerowane do lustrzanego połysku.

Ekspozycję próbek przeprowadzano w wodzie wodociągowej o temperaturze $20 \pm 1^\circ\text{C}$. Polegała ona na wielokrotnym poddawaniu próbek działaniu kawitacji o stałym natężeniu. Całkowity czas ekspozycji jednej próbki wynosił 1200 min, natomiast przedziały czasu testowania odpowiednio: 10, 20, 30, 9×60 , 3×120 i 240 min. Po każdej ekspozycji próbki dokładnie oczyszczano i ważono z dokładnością $\pm 0,05 \text{ mg}$.

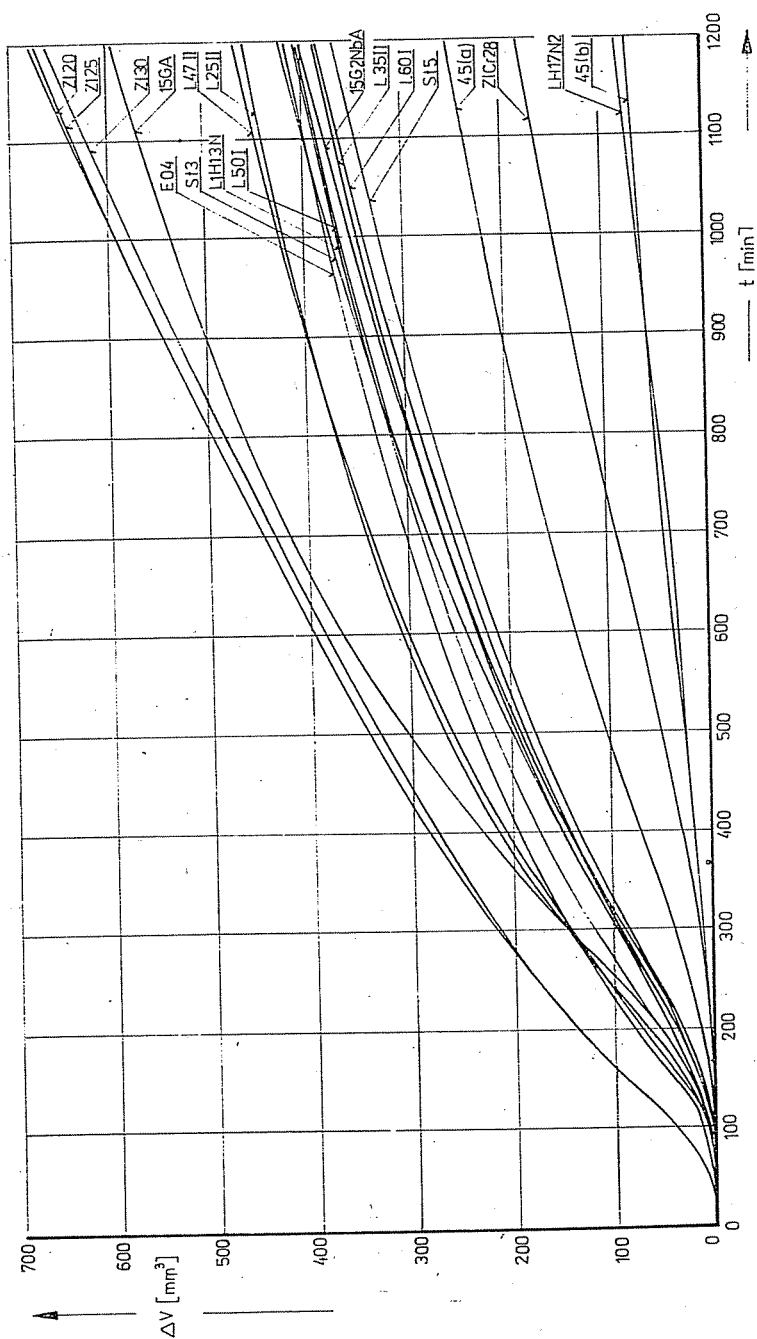
Obrazy ukształtowania powierzchni kilku próbek po badaniach przedstawiono na rysunku 4.

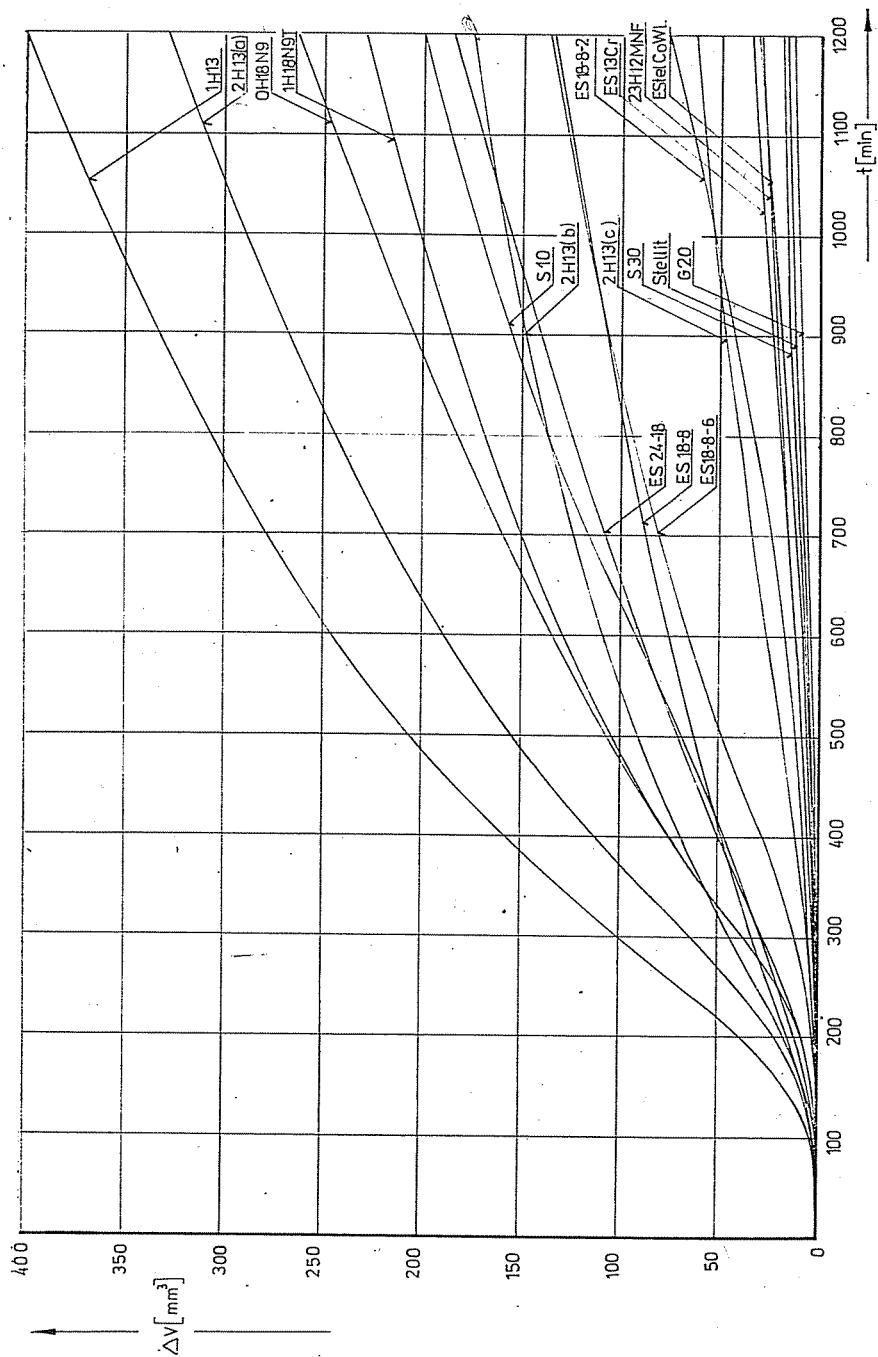
Wyniki testów erozyjnych — ubytki objętościowe ΔV i szybkości erozji $d(\Delta V)/dt$ w czasie t — przedstawiono na rysunkach 5 do 10. Poszczególne krzywe wyznaczono na podstawie wyników testowania kilku próbek z tego samego materiału.

Różnice w przebiegach krzywych wskazują na różną odporność badanych materiałów. W celu określenia tych różnic wprowadzono wskaźniki liczbowe, które w różny sposób charakteryzują odporność materiału przeciw niszcącemu działaniu kawitacji.

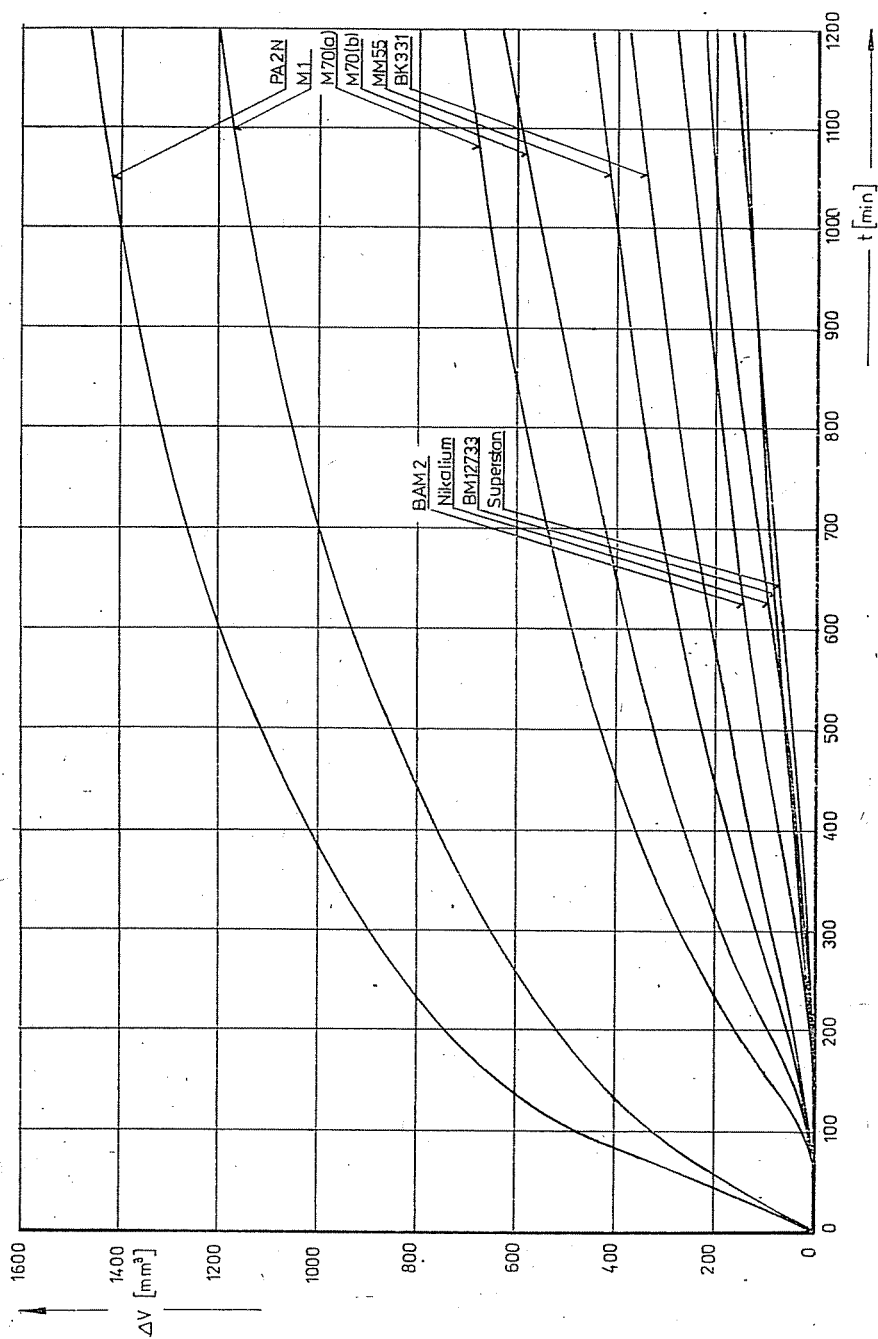


Rys. 4. Topografia powierzchni niektórych próbek po 240, 480 i 1200 min ekspozycji; a) miedź elektrolityczna M1, b) żeliwo Z125, c) stal nierdzewna 2H13, d) brąz BM12733, e) stelit

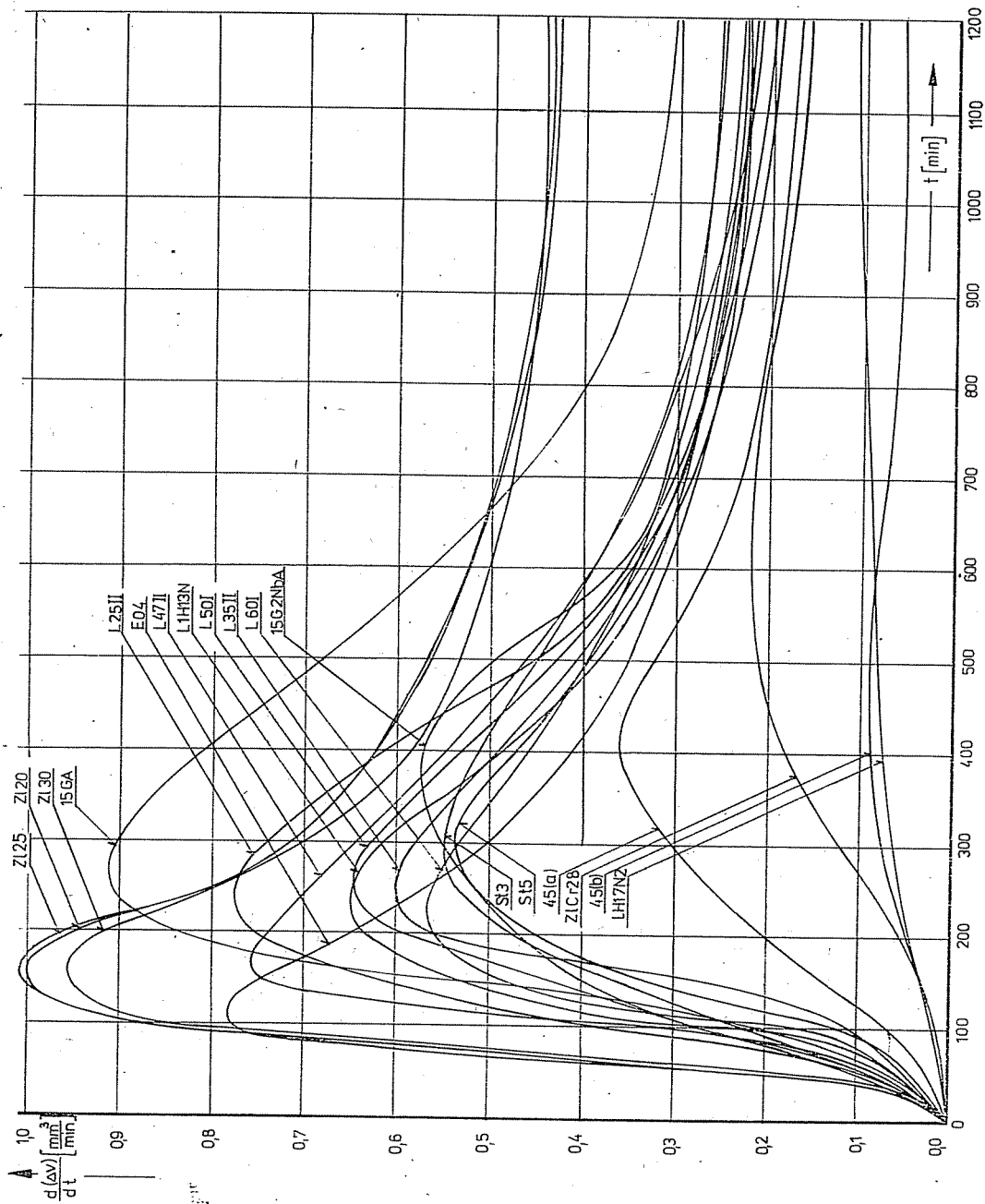




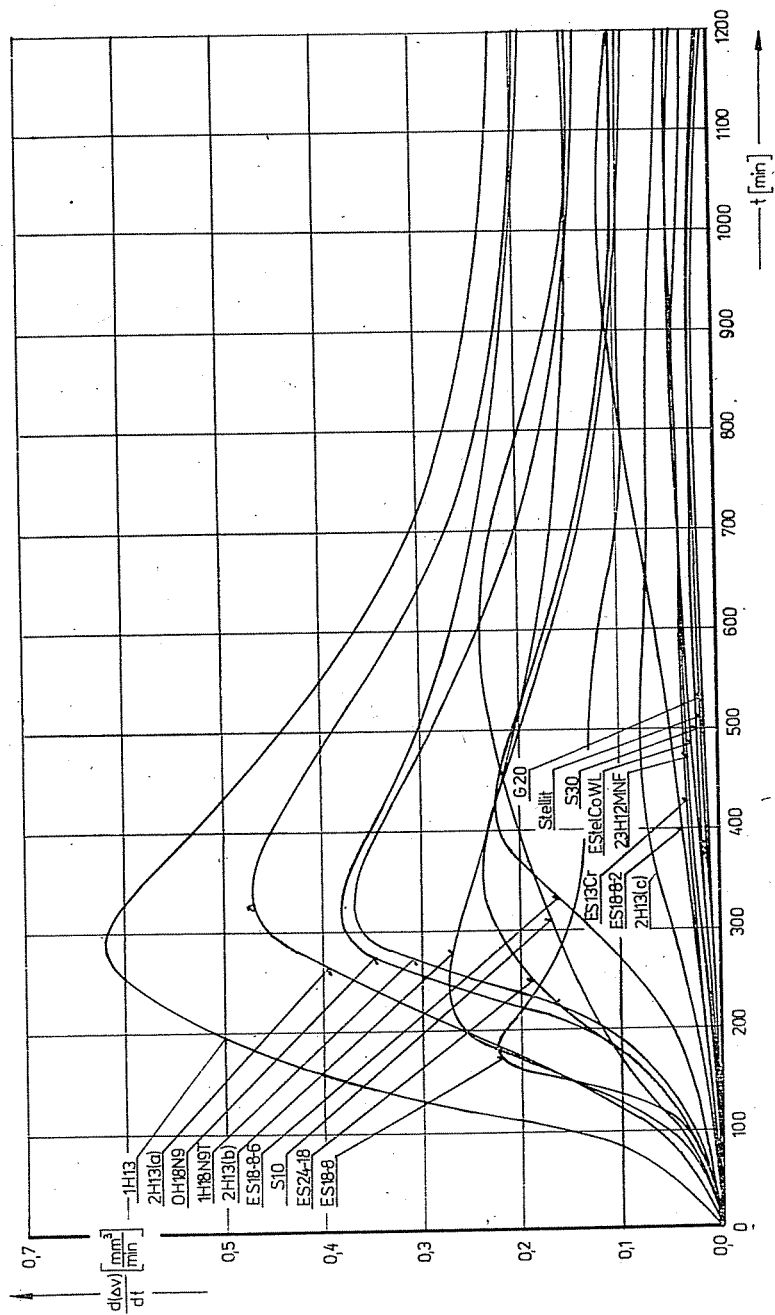
Rys. 6 Wpływ czasu działania kawitacji na ubytek objętościowy próbek ze stopów żelaza i węglików spiekanych



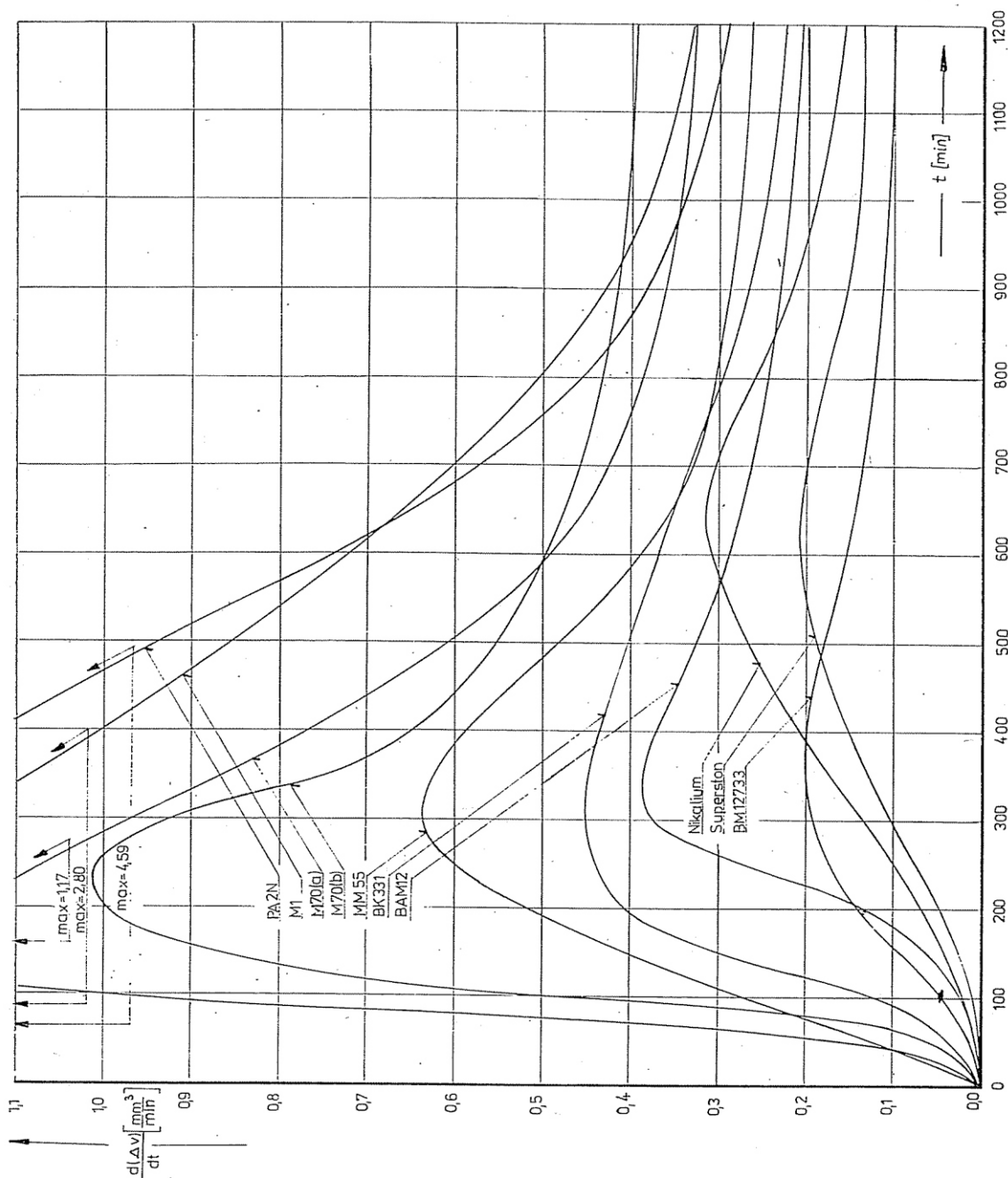
Rys. 7. Wpływ czasu działania kawitacji na ubytek objętościowy próbek z miedzi i niektórych stopów metali nieżelaznych



Rys. 8. Zależność szybkości erozji próbek z żelaza technicznie czystego i niektórych stopów żelaza od czasu działania kavitacji



Rys. 9. Zależność szybkości erozji próbek ze stopów żelaza i węglików spiekanych od czasu działania kawitacji



Rys. 10. Zależność szybkości erozji próbek z miedzi i niektórych stopów metali nieżelaznych od czasu działania kawitacji

5. Ocena odporności erozyjnej

5.1. Kryteria oceny

Stosowane obecnie metody oceny odporności materiałów na erozję kawitacyjną są metodami względnymi. Polegają one na porównywaniu zniszczeń jednego materiału względem drugiego. Ocena taka ma oczywiście sens tylko wówczas, jeżeli ekspozycja próbek odbywa się w tych samych warunkach.

Ocena i klasyfikowanie (szeregowanie) materiałów pod względem ich odporności na erozję kawitacyjną opiera się na porównywaniu:

- ubytków masowych lub objętościowych próbek albo też średniej głębokości erozji w czasie,
- zmian szybkości erozji w czasie,
- wartości wskaźników liczbowych charakteryzujących intensywność niszczenia próbek w określonym etapie testu erozyjnego.

Wskaźniki liczbowe, podobnie zresztą jak krzywe szybkości erozji, wyznacza się na podstawie krzywych zależności ubywania materiału próbek od czasu działania kawitacji. Nie ma jednak powszechnej zgody co do tego, który ze wskaźników liczbowych powinien być miernikiem oceny materiału*). Kontrowersyjność poglądów nie wyklucza jednak stosowania wskaźników liczbowych, które, w odróżnieniu od wskaźników o charakterze jakościowym, są bardziej precyzyjne, a przez to przydatniejsze do oceny i klasyfikowania materiałów.

Najbardziej rozpowszechnionymi wskaźnikami są:

- czas inkubacji τ_{inc} ,
- ubytek masowy Δm lub objętościowy ΔV , względnie średnia głębokość erozji h po określonym czasie ekspozycji,
- czas ekspozycji τ potrzebny do osiągnięcia określonego ubytku masowego lub objętościowego względnie określonej głębokości erozji,
- przeciętna szybkość erozji $\bar{v}$ lub przeciętna trwałość materiału $\bar{v}^{-1}$,
- maksymalna szybkość erozji $[d(\Delta V)/dt]_{max}$ lub szczytowa wartość szybkości „wnikania” erozji MDPR.

Ponieważ wymienione tu wskaźniki nie zawsze ujmują wszystkie charakterystyczne okresy niszczenia, stąd ocena materiału oparta na różnych wskaźnikach może być niejednoznaczna.

Poza wspomnianymi wskaźnikami wprowadzono dwa nowe, a mianowicie:

- estymator wartości średniej z głębokości erozji $\hat{h}$,
- średnią trwałość materiału δ_{cav} .

Pierwszy ze wskaźników zdefiniowano następująco:

$$\hat{h} = \frac{1}{T} \int_0^T h dt, \quad (1)$$

*) W normie ASTM [9] zaleca się stosować ocenę opartą na krzywych przedstawiających ubywanie materiału próbek w czasie. Krytyczny przegląd kryteriów oceny odporności materiałów na erozję zamieszczono w [5].

gdzie $t(0, T)$ jest czasem ekspozycji próbki, h – średnią głębokością erozji. Związek (1) opiera się na założeniu [4], że stosunek energii zużytej na odkształcenie materiału do oporu materiału jest wielkością stałą.

Drugi ze wskaźników określono wzorem

$$\delta_{\text{cav}} = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{d(\Delta V)}{dt} \right)^{-1} dt, \quad (2)$$

w którym $d(\Delta V)/dt$ oznacza szybkość objętościowego ubywania ciała w przedziale czasu $(0, T)$.

Przybliżoną postacią wzoru (2) jest zależność:

$$\delta_{\text{cav}}^* \approx \frac{2T}{\alpha^2 V_T} (\cosh \alpha - 1), \quad (3)$$

w której V_T jest ubytkiem objętościowym ciała po całkowitym czasie ekspozycji T , zaś α współczynnikiem doświadczalnym. Współczynnik $\alpha = [(F_1/F_2) - 1]$ wyznacza się z wykresu $\Delta V = f(t)$, przy czym

$$F_1 = \int_0^{V_T} t d(\Delta V), \quad F_2 = \int_0^T \Delta V dt.$$

Związek (2) i (3) wyprowadzono przy założeniu [7], że

$$\delta_{\text{cav}} = \frac{\bar{R}_{\text{cav}}}{P}, \quad (4)$$

gdzie $\bar{R}_{\text{cav}}$ oznacza średnią odporność danego materiału w przedziale czasu $(0, T)$, zaś P – moc zużywaną na niszczenie materiału.

Zaletą wskaźników δ_{cav} i $\bar{h}$, w stosunku do wskaźników dotychczas stosowanych (z wyjątkiem wskaźnika $\bar{v}$), jest przede wszystkim to, że ich wartości ustalane są na podstawie wyników całego testu erozyjnego.

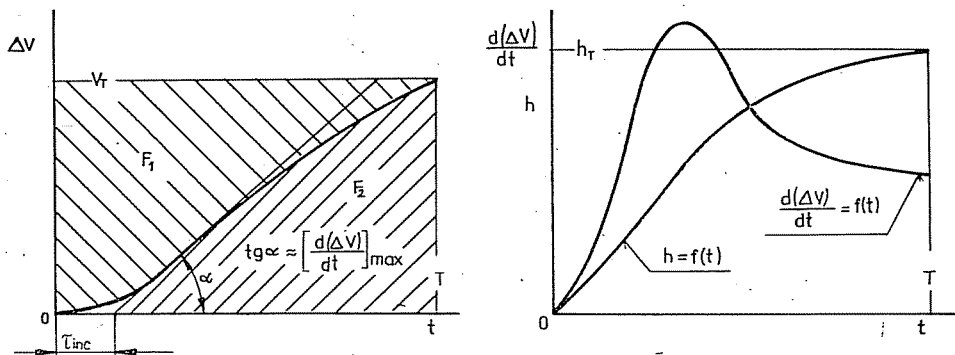
5.2. Analiza kryteriów oceny oraz ocena odporności materiałów na erozję

Klasyfikację materiałów ze względu na ich odporność przeciw erozji kavitacyjnej poprzedzono analizą kryteriów oceny. Opierając się na wynikach testów erozyjnych (rys. 5 do 7) określono najpierw wartości następujących wskaźników odporności (rys. 11):

- czasu inkubacji τ_{inc} [min],
- całkowitego ubytku objętościowego $V_T = V_{20}$ [mm³], po $T=20$ h ekspozycji*),

*) Ponieważ $T=20$ h = const, stąd ubytek objętościowy V_{20} jest proporcjonalny do przeciętnej szybkości erozji, tzn. $V_{20} \propto \bar{v}$.

- średniej głębokości erozji $h_T = h_{20}$ [mm], po $T = 20$ h ekspozycji,
- estymatora wartości średniej z głębokości erozji $\hat{h}$ [mm],
- szczytowej szybkości „wnikania” erozji MDPR [mm/min] („maximum depth of penetration rate”, „peak mean depth of penetration rate”),
- maksymalnej szybkości erozji $v_{\max} = [d(\Delta V)/dt]_{\max}$ [mm³/min],
- średniej trwałości δ_{cav} [min/mm³].



Rys. 11. Wielkości określające wskaźniki odporności

Wartości tych wskaźników, zamieszczone w tabeli 2, stanowiły podstawę do uszeregowania badanych materiałów według różnych kryteriów oceny (tab. 3) oraz do wyznaczenia względnych (znormalizowanych) wskaźników odporności (tab. 4).

Z danych zawartych w tabeli 3 wynika, że uszeregowanie materiałów nie jest jednoznaczne i zależy od przyjętego wskaźnika odporności. Z porównania wyników należy przypuszczać, że niektóre kryteria oceny są mało wiarygodne. Zastrzeżenia budzi przede wszystkim kryterium oparte na czasie inkubacji oraz w pewnym stopniu kryterium maksymalnej szybkości „wnikania” erozji. Wyrazem niedoskonałości tych kryteriów jest rysunek 12. Przedstawiono na nim uszeregowanie badanych materiałów według różnych wskaźników odporności w zależności od uszeregowania według trwałości średniej δ_{cav} . Widać stąd, że najlepszą zgodność ocen uzyskuje się szeregując materiały według całkowitego ubytku objętościowego V_{20} (czyli przeciętnej szybkości erozji $\bar{v}$), a największą niezgodność dla τ_{inc} .

W celu rozpoznania cech szczególnych stosowanych wskaźników zbadano ich wartości względne odniesione do dwóch materiałów: stali austenitycznej OH18N9*) i miedzi elektrolitycznej M1. Wybór tych materiałów nie jest przypadkowy; podobne wzorce stosowane są w innych laboratoriach (np. [1]). Za wyborem tym przemawiały: powtarzalność wyników testowania (bardzo mały rozrzut wyników dla kilku próbek) oraz zgodność uszeregowania według różnych kryteriów (z wyjątkiem kryterium czasu inkubacji).

*) OH18N9 jest materiałem jednofazowym o stabilnej strukturze.

Wartości względne wskaźników odporności zamieszczono w tabeli 4, a ich ocenę, odniesioną do wskaźnika trwałości średniej, dokonano na podstawie rysunku 13. Ocenę oparto na założeniach następujących:

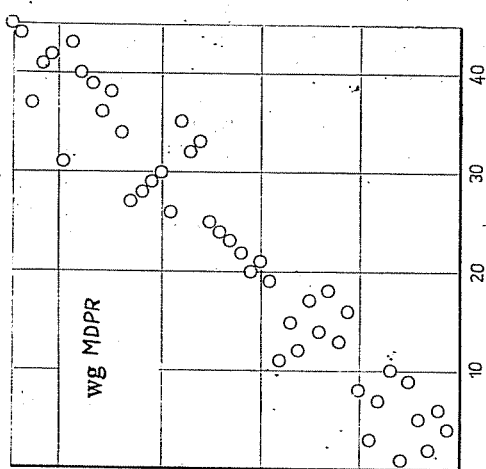
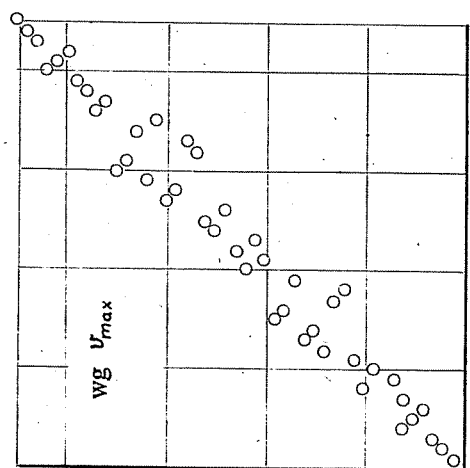
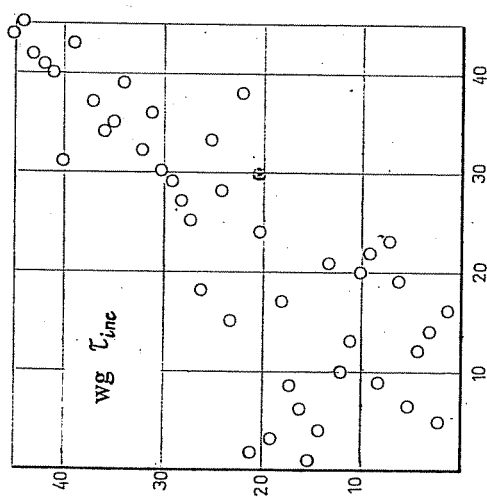
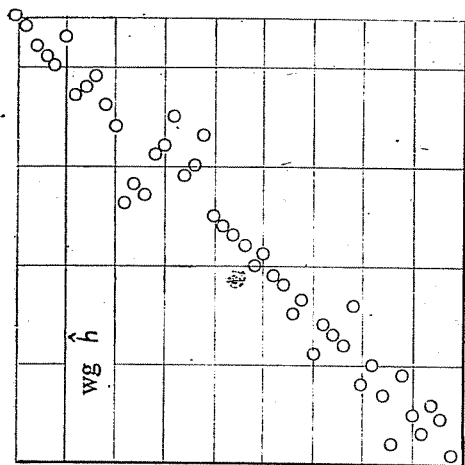
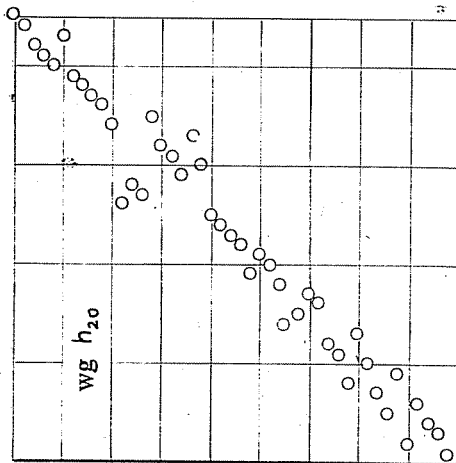
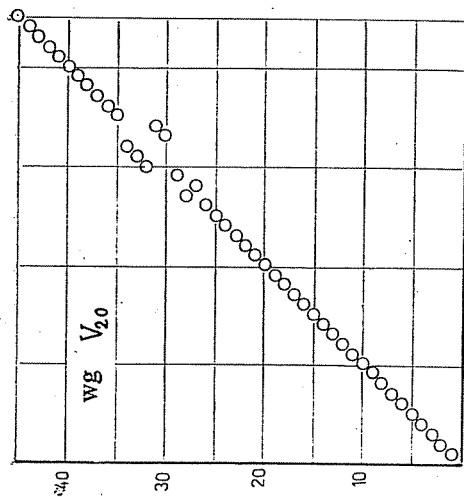
– Jeżeli zachowane są stałe warunki ekspozycji próbek, to odporność materiału na erozję można uważać za własność materiałową, uzależnioną przede wszystkim od struktury, składu fazowego oraz własności fizycznych i chemicznych poszczególnych faz.

– Tylko te kryteria, na podstawie których odporność określona w tych samych wa-

Tabela 2

Wskaźniki odporności badanych materiałów

Lp.	Materiał (cecha)	τ_{inc} [min]	V_{20} [mm ³]	h_{20} [mm]	$\hat{h}$ [mm]	MDPR [mm] [min] · 10 ⁻³	v_{max} [mm ³] [min]	δ_{cav} [min] [mm ³]	δ_{cav}^* [min] [mm ³]
1	ZI20	67	680	1,57	0,95	3,45	1,13	1,81	1,77
2	ZI25	68	678	1,54	0,95	3,48	1,16	1,89	1,78
3	ZI30	69	666	1,51	0,92	3,20	1,18	1,88	1,81
4	ZICr28	287	184	0,36	0,17	0,51	0,226	6,60	6,63
5	L25 II	121	463	1,15	0,75	2,76	0,824	2,63	2,61
6	L35 II	142	391	1,03	0,61	2,27	0,615	3,14	3,07
7	L47 II	106	470	1,17	0,77	4,34	0,792	2,61	2,56
8	L50 I	112	410	1,11	0,70	2,50	0,640	2,87	2,93
9	L60 I	144	389	1,05	0,62	2,24	0,582	3,06	3,09
10	LIH13N	127	413	0,62	0,53	1,93	0,756	2,94	2,92
11	LH17N2	200	83	0,23	0,10	0,30	0,077	13,76	14,79
12	St3	120	424	0,90	0,57	1,57	0,542	2,88	2,83
13	St5	142	371	0,79	0,45	1,53	0,534	3,30	3,24
14	45 (a)	195	257	0,55	0,29	0,93	0,346	4,72	4,68
15	45 (b)	165	74	0,34	0,17	0,47	0,078	16,90	16,26
16	15GA	145	598	1,28	0,76	2,73	0,904	2,02	2,01
17	15G2NbA	143	406	0,87	0,50	1,54	0,565	2,87	2,96
18	1H13	140	402	0,87	0,53	1,93	0,628	3,03	2,99
19	2H13 (a)	154	329	0,74	0,43	1,44	0,470	3,69	3,64
20	2H13 (b)	145	175	0,42	0,24	0,83	0,290	6,91	6,37
21	2H13 (c)	241	64	0,19	0,08	0,32	0,073	18,72	18,93
22	OH18N9	208	265	0,62	0,32	1,25	0,392	4,58	4,54
23	1H18N9T	202	229	0,53	0,30	1,18	0,390	5,36	5,24
24	23H12MNF	190	31	0,10	0,05	0,14	0,027	40,87	39,34
25	ES24-18	159	185	0,41	0,20	0,65	0,190	6,55	6,50
26	ES18-8	118	136	0,35	0,19	0,88	0,176	8,42	8,85
27	ES18-8-6	261	137	0,35	0,17	0,68	0,198	8,39	8,87
28	ES18-8-2	210	77	0,16	0,06	0,25	0,045	15,85	17,32
29	ES13Cr	172	37	0,13	0,05	0,15	0,026	33,79	33,61
30	ES13CoWL	281	32	0,17	0,06	0,23	0,026	37,68	40,27
31	Stellit	150	19	0,16	0,07	0,20	0,015	67,18	65,44
32	EO4	93	420	0,88	0,60	3,44	0,730	2,91	2,87
33	PA2N	17	1466	2,07	1,55	9,56	6,69	0,85	0,85
34	M70 (a)	97	716	1,35	0,90	3,39	1,61	1,77	1,69
35	M70 (b)	118	632	1,32	0,75	2,76	1,08	1,90	1,90
36	MM55	115	453	0,94	0,55	1,69	0,625	2,69	2,65
37	BK331	103	377	1,08	0,64	1,86	0,430	3,27	3,19
38	BAM2	213	280	0,74	0,38	1,36	0,381	4,31	4,30
39	BM12733	200	150	0,32	0,18	0,58	0,202	7,75	8,06
40	Superston	278	169	0,42	0,19	0,64	0,201	7,63	7,22
41	Nikalium	232	225	0,55	0,25	0,89	0,204	5,44	5,40
42	M1	17	1208	1,69	1,21	4,91	4,92	1,10	1,02
43	S10	142	200	0,52	0,25	0,64	0,182	6,23	6,02
44	S30	155	20	0,03	0,06	0,33	0,022	60,88	60,13
45	G20	183	14	0,02	0,01	0,26	0,013	83,55	83,18



Kolejność uszeregowania materiałów wg δ_{env}

Rys. 12. Względne uszeregowanie badanych materiałów według różnych wskaźników odporności

Tabela 3

Uszeregowanie badanych materiałów według różnych kryteriów oceny
(wskaźników odporności)

Materiał (cecha)	δ_{cav}	$\hat{h}$	h_{20}	$V_{20} \propto \bar{v}$	τ_{inc}	v_{max}	MDPR
G20	1	1	1	1	15	1	6
Stellit	2	7	5	2	21	2	3
S30	3	4	2	3	19	3	9
23H12MNF	4	2	3	4	14	6	1
EStelCoW1	5	5	7	5	2	5	4
ES13Cr	6	3	4	6	16	4	2
2H13 (c)	7	8	8	7	5	8	8
45 (b)	8	10	11	8	17	10	10
ES18-8-2	9	6	6	9	8	7	5
LH17N2	10	9	9	10	12	9	7
ES18-8	11	15	12	11	33	11	18
ES18-8-6	12	12	13	12	4	14	16
BM12733	13	13	10	13	11	16	12
Superston	14	14	17	14	3	15	14
2H13 (b)	15	17	16	15	23	19	17
ZiCr28	16	11	14	16	1	18	11
ES24-18	17	16	15	17	18	13	15
Si0	18	18	18	18	26	12	13
Nikalium	19	19	21	19	6	17	19
1H18N9T	20	21	19	20	10	22	21
45 (a)	21	20	20	21	13	20	20
OH18N9	22	22	22	22	9	23	22
BAM2	23	23	23	23	7	21	23
2H13 (a)	24	24	24	24	20	25	24
St5	25	25	25	25	27	26	25
BK331	26	34	34	26	38	24	29
L35II	27	32	32	28	28	30	33
L60I	28	33	33	27	24	29	32
1H13	29	28	28	29	29	32	31
L1H13N	30	27	26	32	30	35	30
EO4	31	31	29	33	40	34	40
St3	32	30	30	34	32	27	27
15G2NbA	33	26	27	30	25	28	26
L50 I	34	35	35	31	36	33	34
MM55	35	29	31	35	35	31	28
L25 II	36	36	36	36	31	37	36
L47 II	37	39	37	37	37	36	43
15GA	38	38	38	38	22	38	35
M70 (b)	39	37	39	39	34	39	37
Zi30	40	41	41	40	41	42	38
Zi25	41	42	42	41	42	41	42
Zi20	42	43	43	42	43	40	41
M70 (a)	43	40	40	43	39	43	39
M1	44	44	44	44	45	44	44
PA2N	45	45	45	45	44	45	45

runkach przyjmie dla poszczególnych materiałów tę samą wartość względną, mogą być podstawą oceny i klasyfikacji materiałów.

— Miarą poprawności kryterium może być porównywalna wartość względnych wskaźników odporności.

Z rysunku 13 wynika, że porównywalne wartości względnych wskaźników odporności wykazują różny stopień rozrzutu. Wyraźny wpływ rodzaju materiału wzorcowego na odporność względną materiałów badanych występuje przy stosowaniu kryterium czasu

Względne (znormalizowane) wskaźniki odporności

Tabela 4

L. p.		Material (cecha)	Wskaźniki odniesione do stali OH18N9										Wskaźniki odniesione do miedzi M1									
			ε_t	φ_V	φ_h	φ_h^*	φ_{MDPR}	φ_{Dmax}	$\varepsilon_{\text{deav}}$	ε_t	φ_V	φ_h	φ_h^*	φ_{MDPR}	φ_{Dmax}	$\varepsilon_{\text{deav}}$						
1		Zi20	0,322	0,390	0,395	0,337	0,362	0,348	0,40	3,94	1,78	1,08	1,27	1,42	4,36	1,65						
2		Zi25	0,327	0,391	0,403	0,337	0,359	0,338	0,41	4,00	1,78	1,10	1,27	1,41	4,24	1,72						
3		Zi30	0,332	0,398	0,411	0,348	0,391	0,331	0,41	4,06	1,81	1,12	1,32	1,53	4,16	1,71						
4		ZiC28	1,38	1,44	1,72	1,88	2,45	1,74	1,44	16,9	6,56	4,69	7,12	9,63	21,8	6,00						
5		L25 II	0,582	0,572	0,539	0,427	0,453	0,476	0,57	7,12	2,61	1,47	1,61	1,78	5,97	2,39						
6		L35 II	0,683	0,678	0,602	0,525	0,551	0,637	0,69	8,35	3,09	1,64	1,98	2,16	8,00	2,85						
7		L47 II	0,510	0,564	0,530	0,416	0,288	0,495	0,57	6,24	2,57	1,44	1,57	1,13	6,21	2,37						
8		L50 I	0,538	0,646	0,559	0,457	0,500	0,613	0,63	6,59	2,95	1,52	1,73	1,96	7,69	2,61						
9		L60 I	0,692	0,681	0,590	0,516	0,558	0,673	0,67	8,47	3,11	1,61	1,95	2,19	8,45	2,78						
10		LH13N	0,611	0,642	0,756	0,604	0,648	0,519	0,64	7,47	2,92	2,06	2,28	2,54	6,51	2,67						
11		LH17N2	0,962	3,19	2,70	3,20	4,17	5,06	3,00	11,8	14,6	7,35	12,1	16,4	63,5	12,5						
12		Si3	0,577	0,625	0,689	0,561	0,796	0,723	0,63	7,06	2,85	1,88	2,12	3,13	9,07	2,62						
13		Si5	0,683	0,714	0,785	0,711	0,817	0,734	0,72	8,35	3,26	2,14	2,69	3,21	9,21	3,00						
14		45 (a)	0,938	1,03	1,13	1,10	1,34	1,13	1,03	11,5	4,70	3,07	4,17	5,28	14,2	4,29						
15		45 (b)	0,793	3,58	1,82	1,88	2,66	5,05	3,69	9,71	16,3	4,97	7,12	10,4	63,3	15,4						
16		15GA	0,697	0,443	0,485	0,421	0,458	0,434	0,44	8,53	2,02	1,32	1,59	1,80	5,44	1,84						
17		15G2NbA	0,688	0,653	0,713	0,640	0,812	0,694	0,63	8,41	2,98	1,94	2,42	3,19	8,71	2,61						
18		1H13	0,673	0,659	0,713	0,604	0,641	0,624	0,66	8,24	3,00	1,94	2,28	2,52	7,83	2,75						
19		2H13 (a)	0,740	0,805	0,838	0,744	0,868	0,835	0,81	9,06	3,67	2,28	2,81	3,41	10,5	3,35						
20		2H13 (b)	0,697	1,51	1,48	1,33	1,51	1,35	1,51	8,53	6,90	4,02	5,04	5,92	16,9	6,28						
21		2H13 (c)	1,16	4,14	3,26	4,00	3,91	5,36	4,09	14,2	18,9	8,89	15,1	15,3	67,2	17,0						
22		OH18N9	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	12,2	4,56	2,73	3,78	3,93	12,6	4,16						
23		1H18N9T	0,971	1,16	1,17	1,07	1,06	1,01	1,17	11,9	5,28	3,19	4,03	4,16	12,6	4,87						
24		23H12MNF	0,913	8,55	6,20	6,40	8,93	14,5	8,92	11,2	39,0	16,9	24,2	35,1	182	37,2						
25		ES24-18	0,764	1,43	1,51	1,60	1,92	2,07	1,43	9,35	6,53	4,12	6,05	7,55	25,9	5,95						
26		ES18-8	0,567	1,95	1,77	1,68	1,42	2,23	1,84	6,94	8,88	4,83	6,37	5,58	28,0	7,65						
27		ES18-8-6	1,25	1,93	1,77	1,88	1,84	1,98	1,83	15,3	8,82	4,83	7,12	7,22	24,9	7,63						
28		ES18-8-2	1,01	3,44	3,88	5,33	5,00	8,70	3,46	12,4	15,7	10,6	20,2	19,6	109	14,4						
29		ES13Cr	0,827	7,16	4,77	6,40	8,33	14,9	7,74	10,1	32,6	13,0	20,2	21,3	188	30,7						
30		ES18CoW1	1,35	8,28	3,65	5,33	5,44	14,9	8,23	16,5	37,8	9,94	20,2	21,3	187	34,3						
31		Stellit	0,721	13,9	3,88	4,57	6,25	26,1	14,7	8,82	63,6	10,6	17,3	24,6	327	61,1						
32		E04	0,447	0,631	0,705	0,533	0,363	0,537	0,64	5,47	2,88	1,92	2,02	1,43	6,74	2,65						
33		PA2N	0,082	0,181	0,300	0,206	0,131	0,059	0,19	1,00	0,82	0,82	0,78	0,51	0,74	0,773						
34		M70 (a)	0,466	0,370	0,459	0,356	0,369	0,244	0,39	5,71	1,69	1,25	1,34	1,45	3,06	1,61						
35		M70 (b)	0,567	0,419	0,500	0,426	0,453	0,363	0,42	6,94	1,91	1,28	1,61	1,78	4,56	1,73						
36		MM55	0,553	0,585	0,660	0,582	0,740	0,627	0,59	6,76	2,67	1,80	2,20	2,91	7,87	2,45						

37	BK331	0,495	0,703	0,574	0,500	0,672	0,911	0,71	6,06	3,20	1,56	1,89	-2,64	11,4	2,97
38	BAM2	1,02	0,946	0,838	0,842	0,919	1,03	0,94	12,5	4,31	2,28	3,18	3,61	12,9	3,92
39	BM12733	0,962	1,77	1,94	1,78	2,16	1,94	1,69	11,8	8,05	5,28	6,72	8,47	24,3	7,05
40	Superston	1,34	1,57	1,48	1,68	1,95	1,95	1,67	16,4	7,15	4,02	6,37	7,67	14,5	6,94
41	Nikalium	1,12	1,18	1,13	1,28	1,40	1,92	1,19	13,6	5,37	3,07	4,84	5,52	24,1	4,95
42	M1	0,082	0,219	0,367	0,264	0,255	0,080	0,24	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
43	S10	0,683	1,33	1,19	1,28	1,95	2,15	1,36	8,35	6,04	3,25	4,84	7,67	27,0	5,66
44	S30	0,745	13,3	20,7	5,33	3,79	17,4	13,3	9,12	60,4	56,3	20,2	14,9	219	55,3
45	G20	0,880	18,9	31,0	32,0	4,81	31,0	18,2	10,8	86,3	84,5	121	18,9	389	76,0

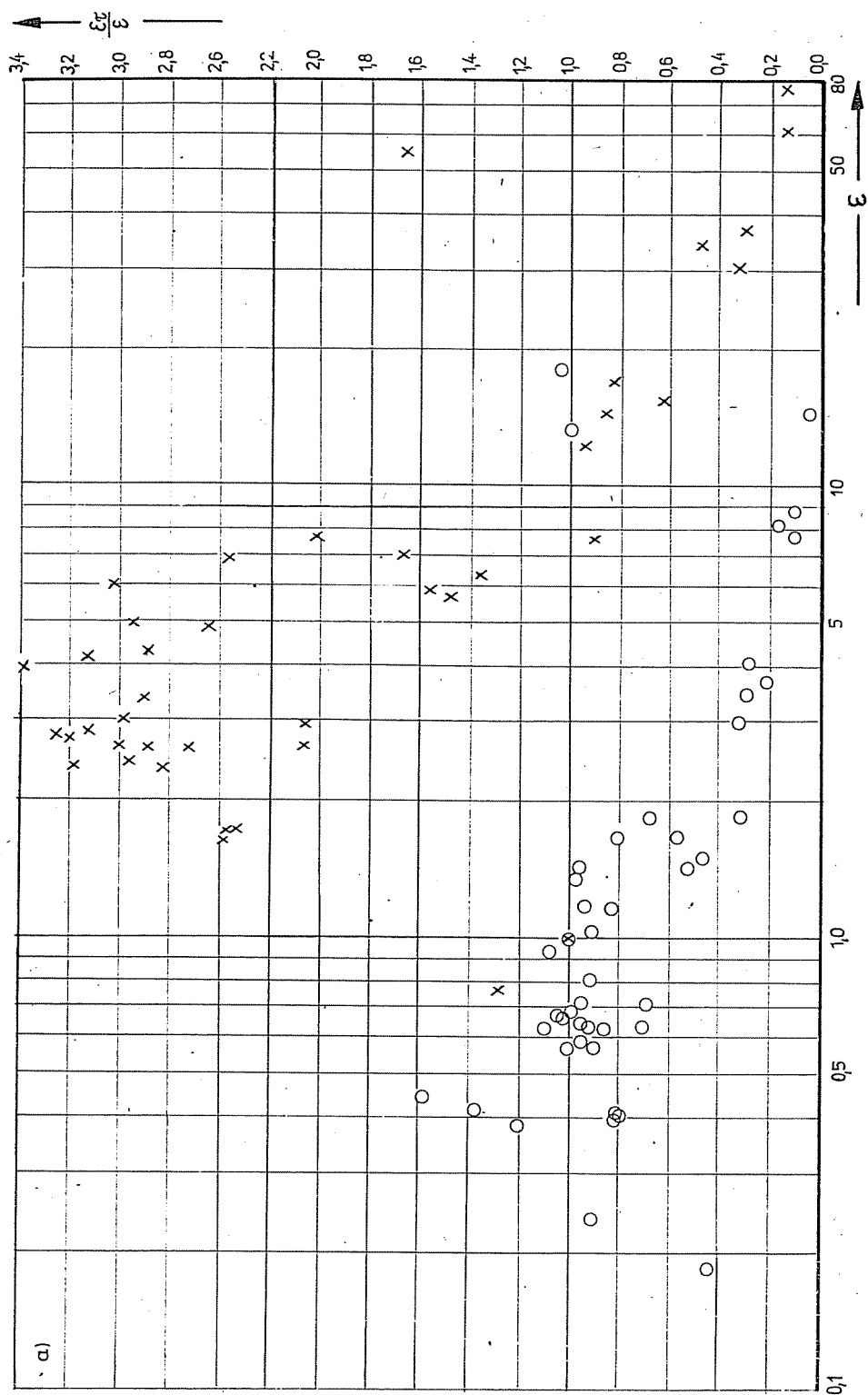
$\varepsilon = \frac{\text{wskaźnik odporności dowolnego materiału}}{\text{wskaźnik odporności materiału wzorcowego}}$

$\rho = \frac{\text{wskaźnik odporności materiału wzorcowego}}{\text{wskaźnik odporności dowolnego materiału}}$

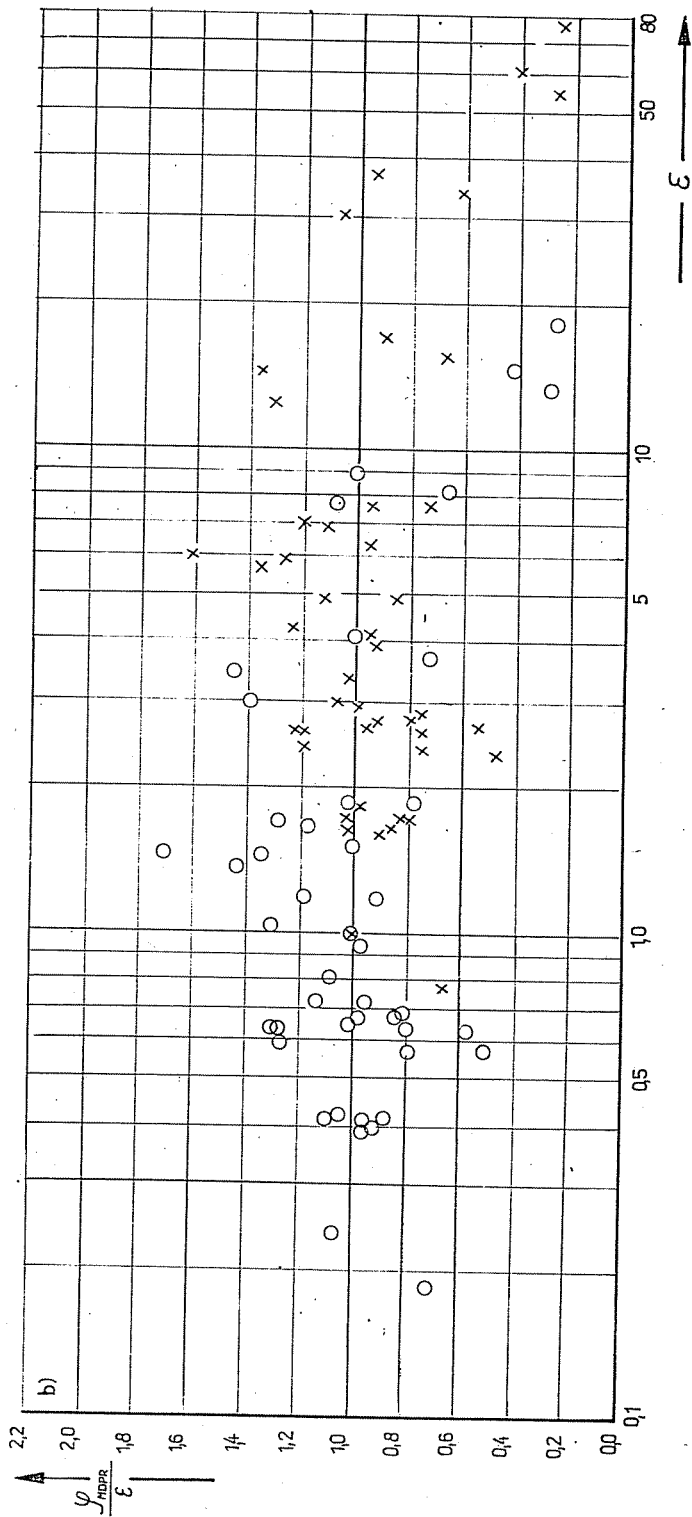
Tabela 5

Związek między twardością a wskaźnikami odporności stopów żelaza i metali nieżelaznych

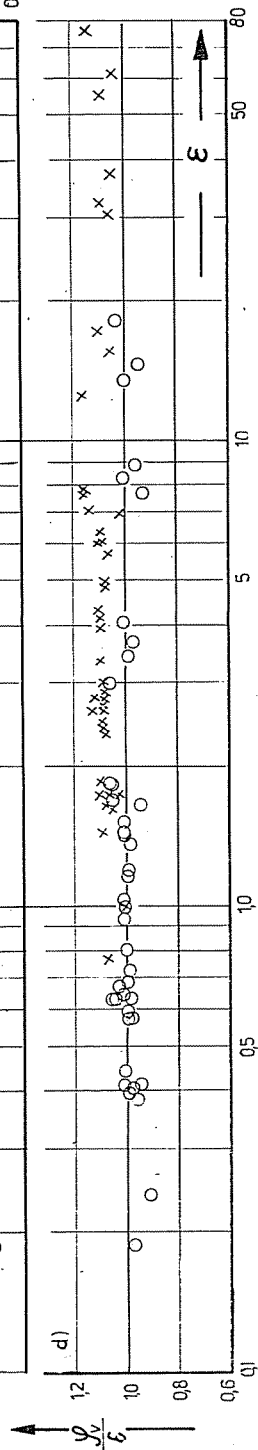
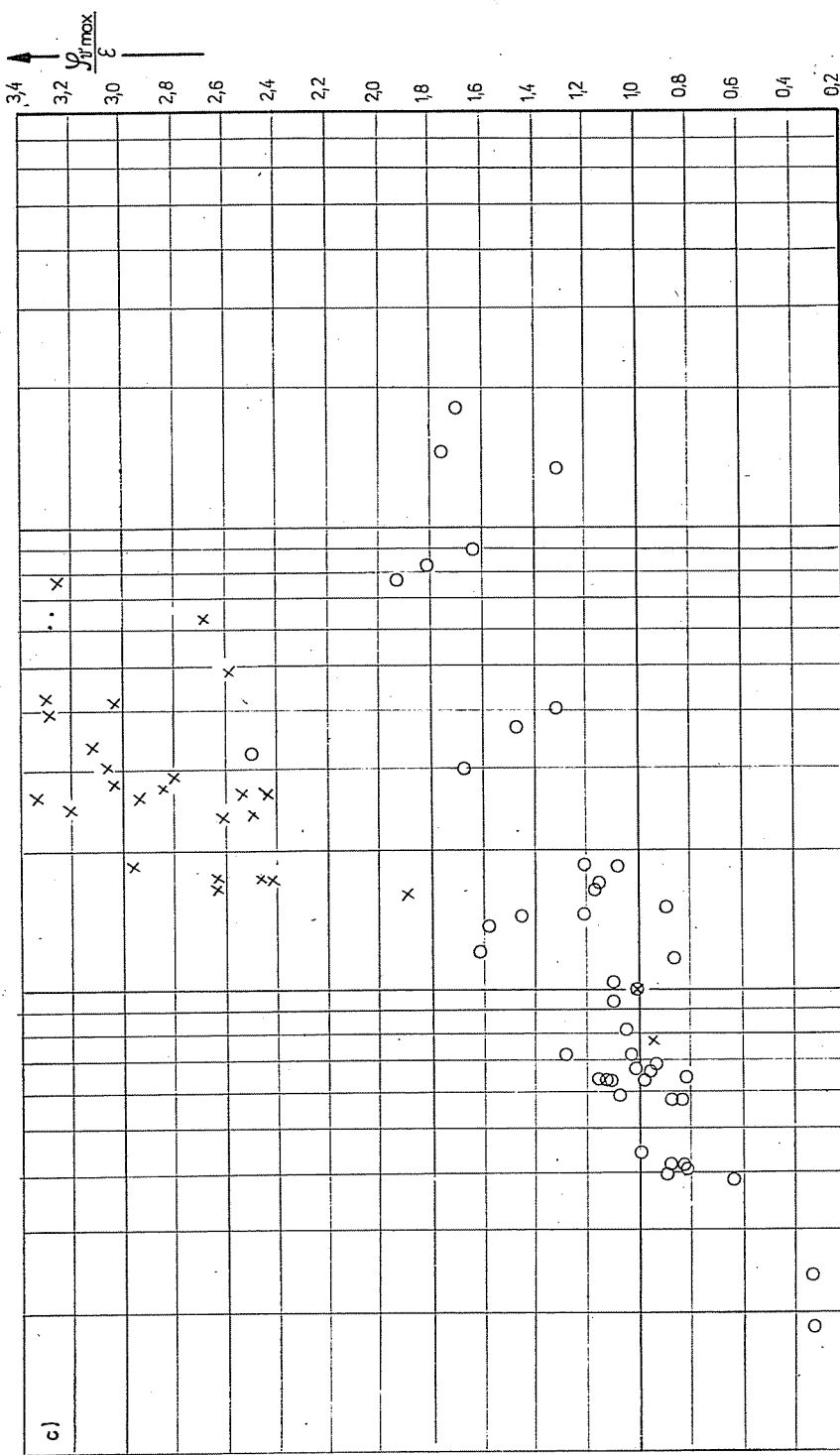
Zależność	C	n	Współczynnik korelacji
$V_{20} = C \text{ (HB)}^n$	$225 \cdot 10^3$	-1,32	-0,918
$\hat{h} = C \text{ (HB)}^n$	177	-1,22	-0,883
$\frac{1}{\text{MDPR}} = C \text{ (HB)}^n$	$6,2 \cdot 10^{-1}$	1,40	0,895
$\delta_{\text{rav}} = C \text{ (HB)}^n$	$5,9 \cdot 10^{-3}$	1,30	0,911



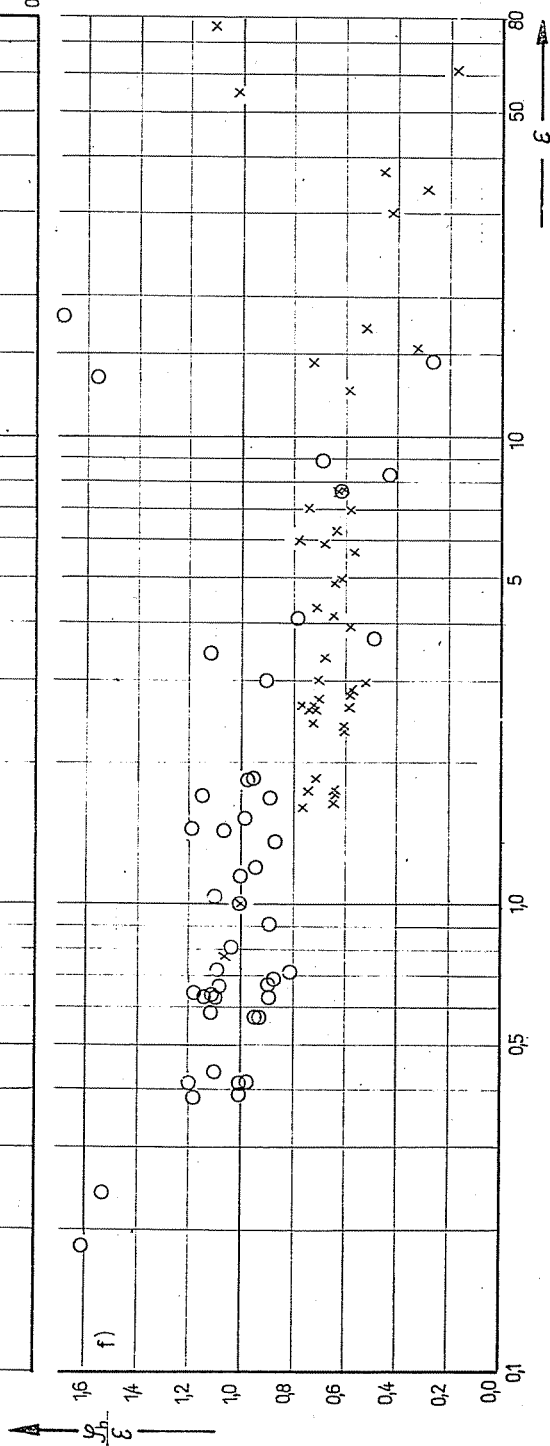
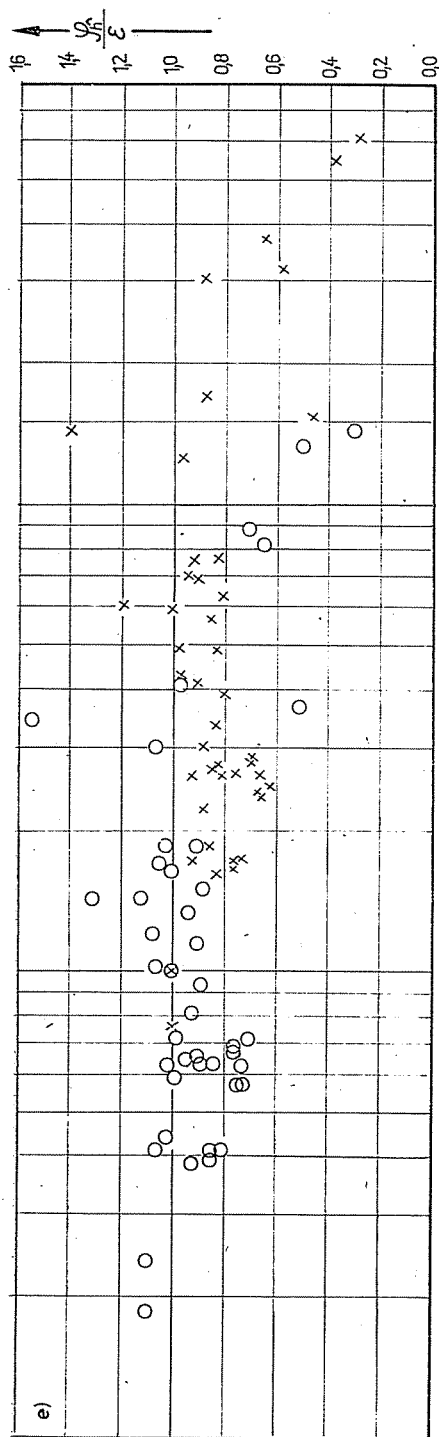
Rys. 13a. Zależność względnego wskaźnika trwałości średniej ϵ od wskaźnika względnego ϵ_1/ϵ odniesionego do stali OH18N9 (kółka) i miedzi M1 (krzyżyki)



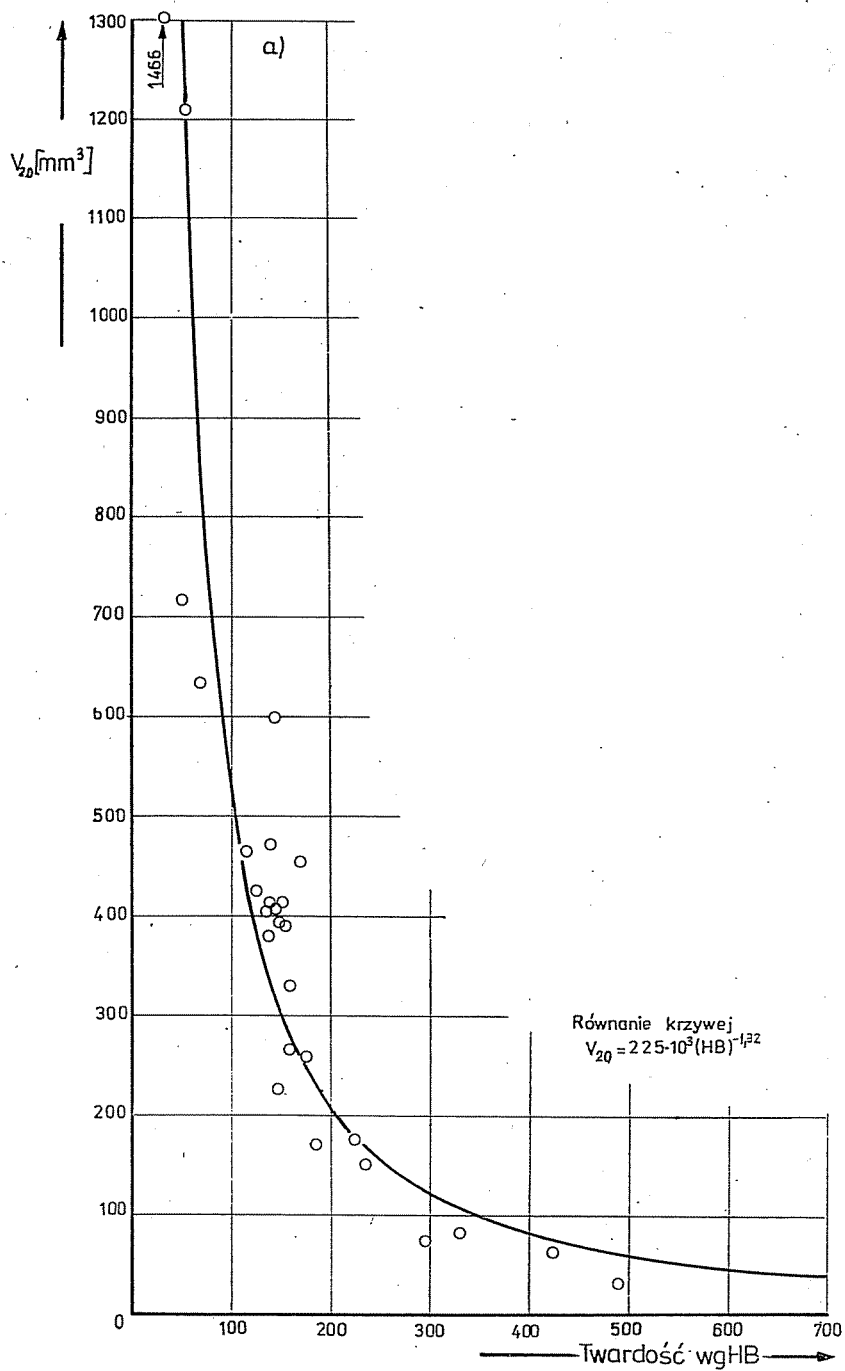
Rys. 13b. Zależność względnego wskaźnika trwałości średniej ϵ od wskaźnika względnego φ_{MDPK}/ϵ odniesionego do stali OH18N9 (kółka) i miedzi M1 (krzyżyki)



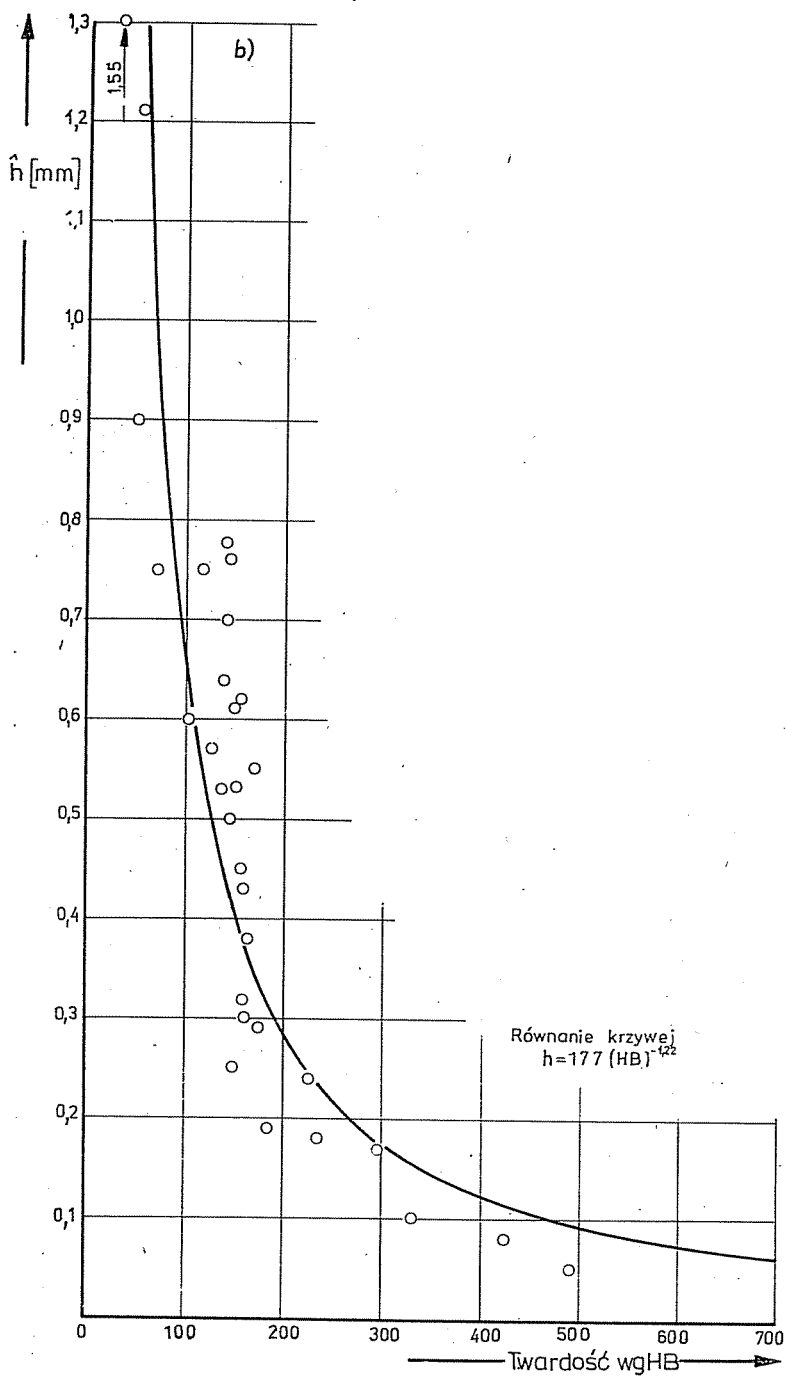
Rys. 13c, d. Zależność względnego wskaźnika trwałości średniej ϵ od wskaźników względnych σ_{max}/ϵ (c) oraz σ_y/ϵ (d) odniesionych do stali OH18N9 (kółka) i miedzi M1 (krzyżyki)



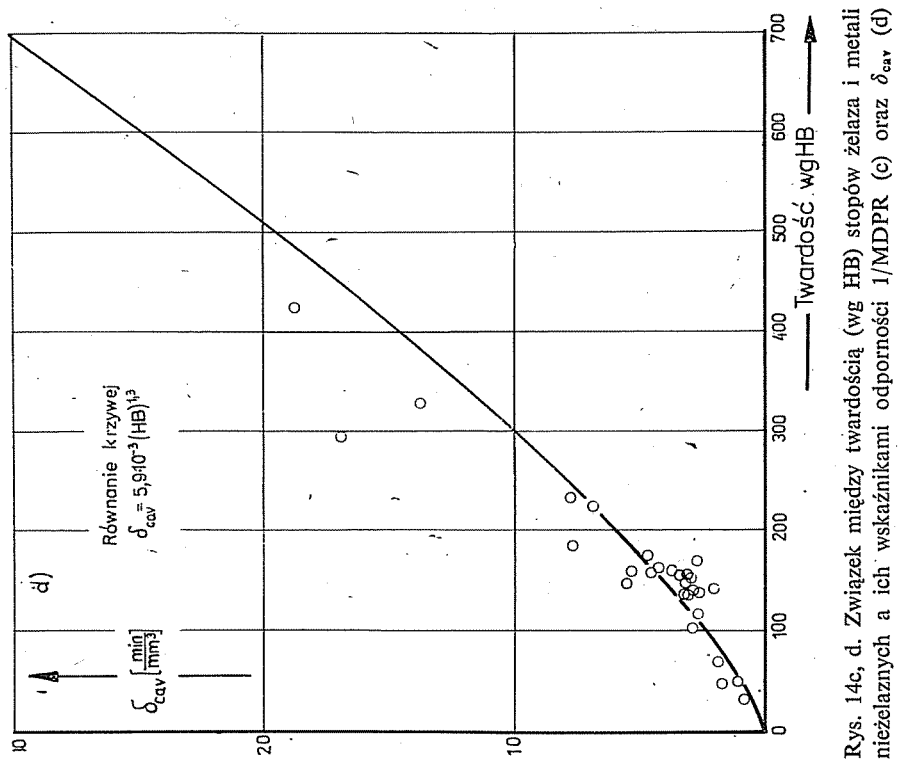
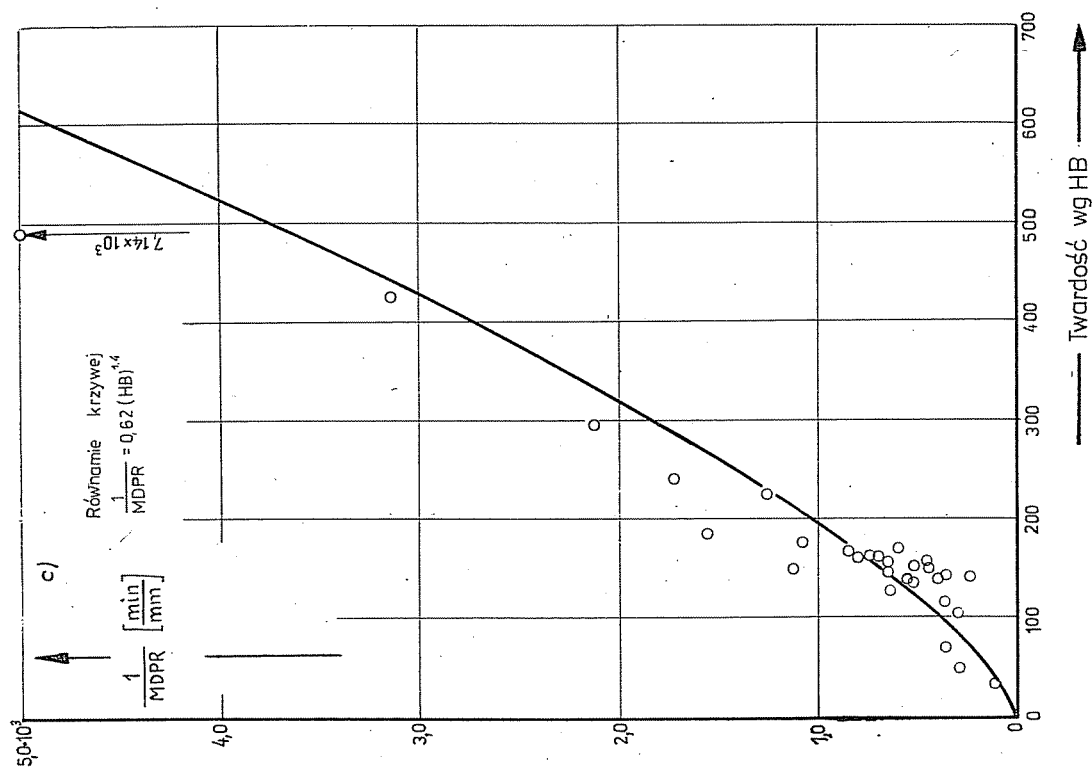
Rys. 13e, f. Zależność względnego wskaźnika trwałości średniej ε od wskaźników względných ϕ_A/ε (e) oraz ϕ_H/ε (f) odniesionych do stali OH18N9 (kółka) i miedzi M1 (krzyżyki)



Rys. 14a. Związek między twardością (wg HB) stopów żelaza i metali nieżelaznych a wskaźnikiem odporności V_{20}



Rys. 14b. Związek między twardością (wg HB) stopów żelaza i metali nieżelaznych a wskaźnikiem odporności $\hat{h}$



Rys. 14c, d. Związek między twardością (wg HB) stopów żelaza i metali nieżelaznych a ich wskaźnikami odporności 1/MDPR (c) oraz δ_{cav} (d)

inkubacji i kryterium maksymalnej szybkości erozji. To spostrzeżenie oznacza, że ocena i klasyfikowanie materiałów według wskaźników ε_r i $\varphi_{v_{max}}$ zależy od przyjętego wzorca. Dążenie do jednoznacznych wyników stawia pod znakiem zapytania celowość stosowania tych wskaźników. Pozostałe wskaźniki odporności względnej praktycznie nie zależą od wzorca lub zależą od niego w małym stopniu. Najlepsza zgodność występuje między wartościami względnymi wskaźnika trwałości i przeciętnej szybkości erozji (całkowity ubytek objętościowy po $T=20\text{ h}=\text{const}$).

Z punktu widzenia prognozowania odporności materiałów na działanie kavitacji interesujący jest związek między wskaźnikiem odporności a własnościami wytrzymałościowymi materiału. W celu zbadania takiego związku między wartościami wskaźników odporności stopów żelaza i metali nieżelaznych a twardością HB, oparto się na twierdzeniu Buckingham'a [8]. Wyniki odpowiednich obliczeń zamieszczono w tabeli 5. Świadczą one o tym, że najlepsze formuły interpolacyjne uzyskuje się dla wskaźnika trwałości średniej (δ_{cav}) i przeciętnej szybkości erozji ($\bar{v} \propto V_{20}$). Porównanie krzywych interpolacyjnych z wynikami badań przedstawiono na rysunku 14.

Reasumując należy stwierdzić, że kontrowersyjne poglądy na temat stosowania takich lub innych kryteriów do oceny odporności materiałów na erozję, są w pełni uzasadnione. Kierując się zasadnością ustalania kryterium oceny oraz wynikami przedstawionej tu analizy uznano, że najbardziej odpowiednim wskaźnikiem odporności jest wskaźnik średniej trwałości materiału.

5.3. Klasyfikacja badanych materiałów

Uszeregowanie badanych materiałów według ich odporności na erozję zamieszczono w pierwszej kolumnie tabeli 3. Celem sklasyfikowania materiałów przyjęto umowną skalę odporności, zawierającą odpowiednie pojęcia i zasady ich określenia. Określenia (wyróżniki oceny) oparto na wskaźniku średniej trwałości δ_{cav} , którego wartość bezwzględna jest ściśle związana z konkretnymi warunkami testowania. Przyjęto następującą skalę ocen:

Odporność	Trwałość średnia δ_{cav}	Względna trwałość ε_s odniesiona do stali OH18N9
bardzo dobra	> 50	> 11
dobra	16 ÷ 50	3,5 ÷ 11
dość dobra	4,5 ÷ 16	1 ÷ 3,5
umiarkowana	2,5 ÷ 4,5	0,55 ÷ 1
słaba	1,5 ÷ 2,5	0,33 ÷ 0,55
bardzo słaba	< 1,5	< 0,33

Wyniki klasyfikacji zamieszczono w tabeli 6.

Przyjętą skalę ocen można oczywiście rozszerzyć wprowadzając np. system stopniowania poszczególnych odporności. Sprawa ta powinna być przedmiotem normalizacji.

Tabela 6

Klasyfikacja badanych materiałów

Określenie odporności	Materiał (cecha)
Bardzo dobra	G20, Stellit, S30
Dobra	23H12MNF, EStelCoW, ES13Cr, 2H13 (c), 45 (b)
Dość dobra	ES18-8-2, LH17N2, ES18-8, ES18-8-6, BM12733, Superston, 2H13 (b), ZICr28, ES24-18, S10, Nikalium, 1H18N9T, 45 (a), OH18N9
Umiarkowana	BAM2, 2H13 (a), St5, BK331, L35II, L60I, 1H13, L1H13N, EO4, St3, 15G2NbA, L50I, MM55, L25II, L47II
Słaba	15GA, M70 (b), ZI30, ZI25, ZI20, M70 (a)
Bardzo słaba	M1, PA2N

6. Uwagi końcowe

Ocenę odporności materiałów na erozję kawitacyjną oparto na wynikach testowania próbek materiałów w konkretnych warunkach. W związku z tym ocena ta jest oceną względną. Ustalenie odpowiedniości ocen względnych wymaga sprawdzenia zachowania się tych samych materiałów w innych warunkach testowania oraz wyjaśnienia, czy w zmienionych warunkach wartości odpowiednich wskaźników odporności są porównywalne. Na podstawie dotychczasowych doświadczeń można jedynie stwierdzić, że mimo różnic w odpornościach względnych, uszeregowanie materiałów testowanych w różnych warunkach jest na ogół zgodne. Natomiast jakie relacje występują między wartościami względnymi odpowiednich wskaźników odporności nie zostało dotąd wyjaśnione. Wyjaśnienie tej sprawy wiąże się z wyjaśnieniem efektu skali w procesach erozyjnych. Choć wiadomo, że przy stałym współczynniku kawitacji σ najbardziej istotne efekty występują wskutek zmian prędkości, ciśnienia i wymiarów ciała, to jednak dokładne przewidywanie rozmiarów tych efektów nie jest dotychczas możliwe [2]. Dlatego też, przy obecnym stanie wiedzy, ocena odporności materiałów na erozję kawitacyjną musi odbywać się za pomocą testów erozyjnych przeprowadzanych w podobnych warunkach.

Praca wpłynęła do Redakcji w czerwcu 1977 r.

Literatura

- [1] F. G. Hammitt, C. Chao, C. L. Kling, T. M. Mitchell, D. O. Rogers, *ASTM Round-Robin Test with Vibratory Cavitation and Liquid Impact Facilities of 6061-T 6511 Aluminium Alloy, 316 Stainless Steel and Commercially Pure Nickel*. The Univ. of Michigan, Report No. MMPP-344-3-T, December 1969.

- [2] F. G. Hammit, *Cavitation Damage Scale Effects — State of Art Summarization*. Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol. 13, No. 1, 1975.
- [3] Z. Reymann, *Urządzenia do badania odporności materiałów na erozję kawitacyjną*. Biuletyn IMP PAN, nr 88/793/1974.
- [4] Z. Reymann, *Charakterystyki odporności kawitacyjnej wybranych materiałów badanych na stanowisku z wirującą tarczą*. Oprac. wew. IMP PAN, nr arch. 121/76, Gdańsk 1977.
- [5] K. Steller, Z. Reymann, T. Krzysztofowicz, *Evaluation of the Resistance of Materials to the Cavitation Erosion*. Proc. of the Fifth Conference on Fluid Machinery, Vol. 2, Akadémiai Kiado, Budapest 1975.
- [6] K. Steller, T. Krzysztofowicz, *Badanie odporności materiałów na erozję metodą przeplywową, wibracyjną i uderzeniową*. Prace IMP, z. 75, 1977.
- [7] K. Steller, *Koncepcja oceny odporności materiału na erozję kawitacyjną*. Oprac. IMP PAN, nr arch. 65/76.
- [8] A. T. Troskolski, *Maszyny i urządzenia hydrauliczne. Pojęcia podstawowe*. PWN, Warszawa — Poznań 1974.
- [9] American Society for Testing and Materials. „Standard Method of Vibratory Cavitation Erosion Test”. Published July, 1972.

Оценка сопротивления материалов против действия проточной кавитации

Резюме

В работе оценивается 45 материалов отечественного производства (таблица 1) с точки зрения их сопротивления против действия проточной кавитации. Основой оценки являлись результаты эрозийных испытаний, произведенных на стенде с вращающимся диском (рис. 1, 2 и 3). Результаты представлены в виде кривых иллюстрирующих объемные убыли и скорость эрозийного износа по времени (рис. 5 - 10). Сопротивление материалов против эрозии оценивается по следующим показателям: время инкубации τ_{inc} , полная объемная убыль V_{20} и средняя глубина эрозии h_{20} после $T=20$ ч. экспозиции образцов, эстиматор среднего значения глубины эрозии $\hat{h}$, максимальная скорость проникания эрозии MDPР, максимальная скорость объемной убыли V_{max} и средняя прочность δ_{cav} . Значения показателей (таблица 2) послужили упорядочению материалов по их сопротивлению против действия эрозии (таблица 3).

Из этого следует, что оценка материалов зависит от принятого показателя и что наибольшие расхождения от коэффициента δ_{cav} , репрезентирующего результаты всей эрозийной проверки, появляются в случае применения показателя τ_{inc} (рис. 12).

Проверены также относительные значения показателей, отнесенные к аустенитной стали ОН19N9 и электролитической меди М1 (таблица 4 и рис. 13). Констатируется не только различная степень дисперсности в оценке исследуемых материалов, но также и влияние образцового материала на относительное сопротивление, оцениваемое по показателю времени инкубации и максимальной скорости эрозийного износа. Этой изъяти не проявляют показатели относящиеся к средней прочности и суммарной объемной убыли.

Окончательно классификацию исследованных материалов произведено по показателю δ_{cav} . Результаты классификации представлены в таблице 6. Эта классификация, конечно, связана с определенными условиями испытания образцов и с условно принятым масштабом сопротивления.

Добавочно произведены исследования зависимости между значениями некоторых показателей сопротивления и твердостью (НВ) испытываемых материалов. Результаты представлены на рис. 14 и в таблице 4. Наилучшие интерполяционные формулы получены для показателя средней прочности δ_{cav} и полной объемной убыли V_{20} .

Evaluation of the Resistance of Materials to the Flow Cavitation

Summary

The paper presents an evaluation of 45 materials of Polish manufacture (Table 1) as to their resistance to flow cavitation. Results of erosion tests conducted with a rotating-disk rig (Figs. 1, 2, and 3) have been used as the evaluation basis. The results have been shown in the form of curves of time resolved volume losses and erosion rates (Figs. 5÷10). The resistance of materials to erosion has been evaluated according to the following factors: the incubation time τ_{inc} , total volume loss V_{20} and mean erosion depth h_{20} after $T=20$ h of specimen exposition period, estimator of mean value of the erosion depth $\bar{h}$, maximum damage penetration rate MDPR, maximum volume loss rate V_{max} and mean durability δ_{cav} . The values of these factors (Table 2) have been used as the basis for arranging the materials according to their resistance to erosion.

This shows that the evaluation of materials depends on the discriminating factor taken into account and that highest deviations from the coefficient δ_{cav} , representing the results of the whole erosion test, occur for τ_{inc} used as the basis of materials arranging (Fig. 12).

Also relative values of the factors under consideration, related to austenitic steel OH18N9 and electrolytic copper M1 (Table 4 and Fig. 13) have been checked. Not only a different degree of dispersion in the evaluation of the materials tested has been ascertained but also an influence of the standard material on the relative resistance as evaluated according to the incubation time and maximum erosion rate has been shown. Discriminating factors related to the mean durability and the total volume loss do not manifest this disadvantage.

The final classification of the materials tested has been made according to the δ_{cav} coefficient. The results have been shown in Table 6. Obviously, this classification is related to the particular conditions of specimen testing and conventional resistance scale.

Also the relations between values of some factors expressing the resistance and the hardness (HB) of the materials tested have been investigated. The results have been shown in Fig. 14 and Table 5. Best interpolation formulae have been obtained for the mean durability factor δ_{cav} and the total volume loss V_{20} .