

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
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPŁYWOWYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

67-68

WARSZAWA—POZNAŃ 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 PRZEPŁYWOWYCH

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

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

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

KOMITET REDAKCYJNY - EXECUTIVE EDITORS
KAZIMIERZ STELLER - REDAKTOR - EDITOR
JERZY KOŁODKO · JÓZEF ŚMIGIELSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

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

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1975

Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE - ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 380 + 90 egz.	Oddano do składania 10 I 1975 r.
Ark. wyd. 28,5. Ark. druk. 22	Podpisano do druku 20 IX 1975 r.
Pap. druk. sat. kl. V, 70 g 70×100 cm	Druk ukończono we wrześniu 1975 r.
Nr zam. 112/77	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.

TADEUSZ KRZYSZTOFOWICZ

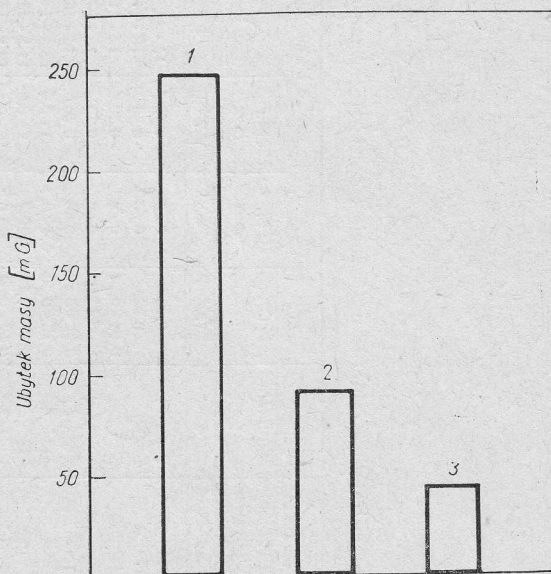
Gdańsk*

Sposoby zwiększania odporności materiałów konstrukcyjnych na niszczące działanie kawitacji

1. Sformułowanie zagadnienia

Mimo braku jednoznacznego obrazu rozwoju zniszczeń kawitacyjnych oraz kontrowersji na temat wpływu niektórych wielkości na przebieg erozji kawitacyjnej [2, 4, 5, 18, 21], istnieje na ogół zgodność co do tego, że:

a. Główną i bezpośrednią przyczyną niszczenia materiałów są zjawiska mechaniczne – zderzenia strug cieczy z powierzchnią materiału oraz obciążenia dynamiczne wywołane



Rys. 1. Wpływ dodatków stopowych na odporność erozyjną ferrytu [7];
1 – ferryt niestopowy, 60 HB, 2 – ferryt z dodatkiem Ni, 125 HB, 3 – ferryt z dodatkiem Cr, 148 HB

falami uderzeniowymi. Nie wyklucza się przy tym występowania procesów niemechanicznych, a w szczególności współistnienia zjawisk elektrochemicznych.

b. Z reguły ślady oddziaływań kawitacyjnych są związane z wzmocnieniem warstwy wierzchniej, wskutek odkształceń plastycznych.

* Politechnika Gdańska.

Tabela 1

Stale i staliwa odporne na korozję i erozję stosowane w budowie maszyn i urządzeń hydraulicznych

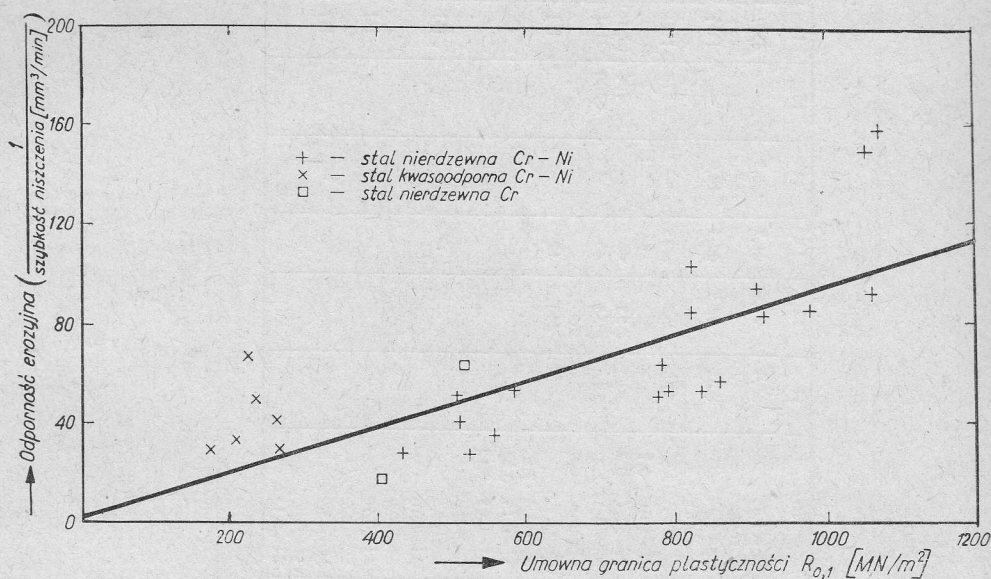
Lp.	Cecha materiału wg GOST	Odpowiednik wg PN lub mat. zastępczy	Struktura	Skład chemiczny [%]						Własności mechaniczne					Źródło
				C max	Si max	Mn max	Cr	Ni max	Inne	R_e [kG/ /mm ²]	R_m [kG/ /mm ²]	A [%]	U [kGm/ /cm ²]	HB [kG/ /mm ²]	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	OX13	OH13	F ¹⁾	0,08	0,60	0,60	12 - 14	0,6	—	≤30	50 - 65	≤20	—	140 - 180	[6]
2	—	OH13J	F	0,08	0,60	0,60	12 - 14	0,6	Al=0,1÷0,3	≤30	50 - 65	≤20	—	140 - 180	[6]
3	2X13	2H13	S	0,16 - 0,24	0,60	0,60	12 - 14	0,6	—	45	66	16	8	—	[6]
4	X17	H17	F	0,12	0,80	0,70	16 - 18	0,6	—	25	40	20	—	126 - 197	[6]
5	1X17H2	H17N2	T(S+F)	0,11 - 0,17	0,80	0,80	16 - 18	1,5 - 2,5	—	90	110	10	5	≤332	[6, 16]
6	25X14HJL	—	M*	0,22 - 0,30	0,4 - 0,7	0,3 - 0,6	12,5 - 14,5	0,5 - 0,8	—	24 - 30	53 - 60	21 - 32	1,6 - 7,4	160 - 180	[11]
7	20X13HJL	—	M*	0,17 - 0,22	≤0,7	0,3 - 0,6	11,5 - 13,5	0,6 - 1,0	Ti≥0,15	41,6	61,2	13,7	1,2	187	[11]
8	OX12HJL	—	F+M*	0,07 - 0,09	0,16 - 0,4	0,36 - 0,52	12,5 - 14,5	1,2 - 1,5	Cu=1,17	77 - 84	88 - 93	13 - 16	5,9 - 6,6	229	[11]
9	OX18H3F3J2L	—	A*	0,08 - 0,10	0,2 - 0,48	2,5 - 3,0	17,5 - 19,0	3,0 - 3,5	Cu=1,8 - 2,2	28 - 33	83 - 93	13 - 16	10	196	[11]
10	3OH10Γ1O	—	A	0,26 - 0,44	0,3 - 0,5	7 - 11	9,5 - 12	—	—	32 - 40	57 - 65	6 - 10	6 - 8	186 - 200	[11]
11	OX18H12BP1	—	A	0,03 - 0,04	0,31	1,25	17 - 17,9	11 - 12	N=1,06 B=0,53	—	—	—	—	—	[15]
12	X14Γ30HP1	—	A*	≤0,08	0,20 - 0,40	28 - 32	12,5 - 14,5	1 - 2	B=0,50	30,7	66,0	49,3	13,6	—	[15]
13	—	—	A	0,04	0,60	0,25	16,0	4,0	Cu=3,2	120	135	13	—	—	[3, 14]
14	—	—	A*	0,07	0,40	0,60	17,0	7,0	Al=1,1	150	160	6,0	—	—	[3, 14]
15	—	—	A*	0,08	0,40	0,60	15,0	7,0	Mo=2,2 Al=1.1	150	165	7,0	—	—	[3, 14]
16	OX17H7JO	—	A+F _δ	0,08	0,34	≤0,8	16 - 18	6,5 - 7,5	Al=0,8 - 1,3	72,5	91,8	23,7	8,2	—	[20]
17	OX15H4Γ3	—	S+F _δ	0,06	0,15	2,69	14,9	3,12	—	64,6	80,0	23,8	15,7	—	[20]
18	OX17H6T	—	S+M+ +A _{sz} +F _δ	0,07	0,45	0,38	18,0	5,9	Mo=0,26	92,3	104,2	18,0	13,5	—	[20]
19	OX17H4K5	—	S+M	0,04	0,11	0,12	17,05	3,84	Co=4,5	101,2	109,3	19,3	6,0	—	[20]

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
20	OX17H4M2K5	—	S + M + F _s	0,03	0,19	0,26	17,83	4,34	Co = 1,85 Mo = 2,12	86,0	97,5	21,7	5,5	—	[20]
21	OX17H4B2K5	—	S + M + F _s	0,03	0,11	0,30	17,85	3,77	Co = 1,94 W = 2,02	80,2	92,5	22,3	10,0	—	[20]
22	1X17H13M2T ²⁾	H17N13M2T	A	0,08	0,8	2,0	16 - 18	11 - 14	Mo = 2,0 - 2,5 Ti = 5 × C - 0,7	23	53	~ 35	—	273	[16]
23	1X18H9T	1H18N9T	A	0,12	0,8	2,0	17,0 - 19,0	8,0 - 11,0	Ti = 5 × C - 0,9	20	55	40	—	196	[6, 16]
24	1X18H9M	H18N10MT	A	0,10	0,8	2,0	17,0 - 20,0	9,0 - 11,0	Mo = 1,5 - 2,2 Ti = 5 × C - 0,8	22	55	40	—	~ 200	[16]
25	—	—	—	0,03 - 0,04	—	—	—	17 - 19	Co = 8 - 9 Mo = 3,0 - 3,5 Ti = 0,15 - 0,25 Al = 0,05 - 0,15	—	240	12	—	—	[1]
26	—	—	—	0,03 - 0,04	—	—	—	8 - 10	Co = 3 - 5 Mo = 0,5 Al = 0,10	—	—	—	—	—	[1]
27	—	—	—	0,03 - 0,04	—	—	—	5 - 10	Mo = 0,75 Al = 0,70	—	—	—	—	—	[1]
28	—	—	—	0,03 - 0,04	—	—	—	18	Co = 0,5 Mo = 5,2 Ti = 0,8 Al = 0,15	—	—	—	—	—	[1]

1) F — ferryt, A — austenit, M — martenzyt, S — sorbit, T — trostyt.

2) Stal stosowana tylko w przypadkach uzasadnionych.

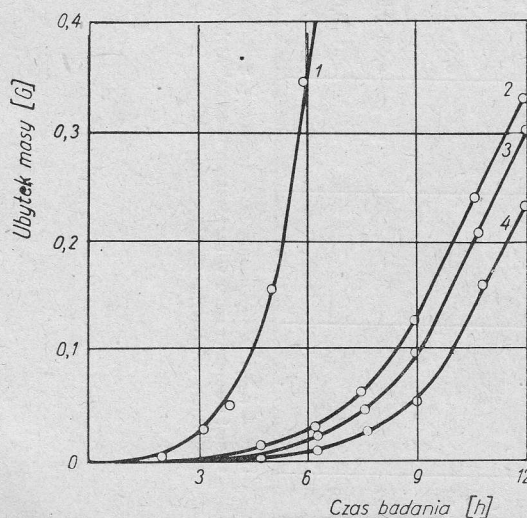
* Struktura orientacyjna.



Rys. 2. Zależność odporności erozyjnej materiałów konstrukcyjnych od umownej granicy plastyczności [5]

c. Przy określonej formie i natężeniu kawitacji na rozwój i przebieg zniszczeń wpływają zarówno cechy fizykochemiczne i strukturalne materiałów, jak i własności cieczy w szerokim znaczeniu tego pojęcia.

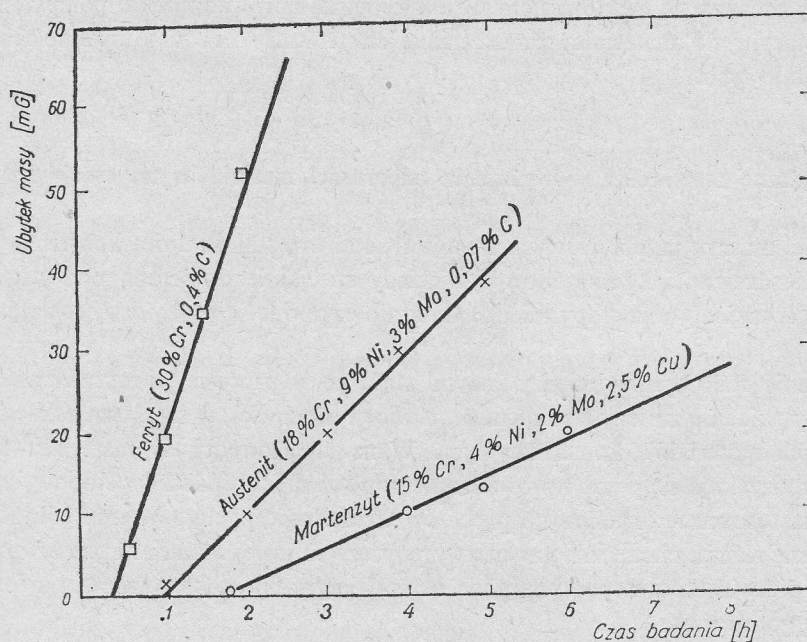
Taki charakter oddziaływań kawitacji stanowi na ogół punkt wyjścia przy doborze materiału konstrukcyjnego. Dążenie do zwiększenia odporności erozyjnej wymaga więc uwzględnienia następujących cech materiału:



Rys. 3. Ubytek masy próbek z różnych stali w czasie ekspozycji na stanowisku [15]
1 — 1X18H10T, 2 — X18H12BP1, 3 — X14Г30HP1,
3 — 30X10Г10

- składu chemicznego,
- własności mechanicznych,
- odporności na korozję,
- struktury (jednofazowa, wielofazowa, grubo-drobnziarnista),
- nieciągłości i mikropęknięć.

Na przykład w stali przeznaczanej na elementy konstrukcyjne narażone na działanie kawitacji (tab. 1) pożądane jest występowanie przede wszystkim takich pierwiastków stopowych, jak: Cr, Ni, Mn, Ti, V, Cu, B [6, 11, 15, 16] (rys. 1). Wskutek stosowania wymienionych pierwiastków stopowych osiąga się dobre własności mechaniczne i przeciwkorozyjne. W szczególności wzrasta granica plastyczności, która według [5, 9] korzystnie wpływa na odporność materiału na erozję kawitacyjną (rys. 2). Warto zwrócić też uwagę



Rys. 4. Niszczenie stali ferrytycznej, austenitycznej i martenzytycznej w czasie badań na stanowisku magnetostrykcyjnym [9]

Tabela 2

Wpływ mikropęknięć na wartość ubytków erozyjnych hartowanej stali konstrukcyjnej o zawartości 0,62 %C [7]

Lp.	Struktura stali	HB [kG/mm ²]	Ubytek ciężaru próbek w ciągu 10 h badań [mG]
1	martenzyt	460	5,2
2	martenzyt z mikropęknięciami	578	60,4

na to, że wprowadzenie boru do stali chromowo-manganowej powoduje zwiększenie jej odporności kawitacyjnej do tego stopnia, iż materiał ten staje się odporniejszy od wysokostopowych stali chromowo-niklowych (rys. 3). Ze względu na oddziaływania kawitacyjne struktura materiału powinna być: przy jednorodnej – drobnoziarnista, przy wielofazowej – z drobnymi wydzieleniami fazy utwardzającej i znacznym jej procentowym udziałem. Tak na przykład stwierdzono [9], że odporność stali (chromowo-niklowej) o strukturze austenitycznej jest mniejsza od stali o strukturze martenzytycznej (rys. 4).

Mikropęknięcia i nieciągłości materiału obniżają jego odporność erozyjną. Wpływ mikropęknięć stali hartowanej na niszczenie kawitacyjne podano w tabeli 2.

Uwzględniając powyższe czynniki wpływające na odporność erozyjną materiału, można rozważać procesy technologiczne zmierzające do podwyższenia trwałości elementów maszyn narażonych na działanie kawitacji.

W pracy omawia się niektóre zabiegi technologiczne prowadzące do polepszenia „właściwości kawitacyjnych” materiałów przez zmianę ich struktury oraz zastosowanie ochronnych warstw metalowych.

2. Technologiczne możliwości podwyższania odporności materiałów na erozję kawitacyjną

Na części maszyn przepływowych stosuje się staliwo, stal węglową konstrukcyjną, stal stopową (nierdzewną i kwasoodporną, niekiedy specjalnie dobieraną pod kątem dużej odporności erozyjnej) oraz stopy miedzi. Ostatnio czynione są próby zastosowania stopów tytanu.

Stosowanie stali wynika między innymi stąd, że w procesie jej wytwarzania można uzyskać odpowiednie zmiany strukturalne, a więc i właściwości, w szerszym zakresie aniżeli wśród innych materiałów konstrukcyjnych. Wymaganą odporność materiału na erozję kawitacyjną uzyskuje się przez wprowadzanie odpowiednich dodatków stopowych (tab. 1) lub przez zastosowanie określonych procesów technologicznych, a w szczególności przez:

- zmianę składu chemicznego warstwy powierzchniowej materiału przez wprowadzenie do niej pierwiastków stopowych (podczas oddziaływania ciekłego metalu z formą specjalnie przygotowaną),

- zmianę struktury w całym przekroju lub na jego powierzchni poprzez: hartowanie, hartowanie powierzchniowe, obróbkę cieplno-dyfuzyjną, zgniot i wywołane nim przemiany fazowe, dyspersyjne utwardzanie austenitu lub martenzytu („maraging”) albo dyspersyjne utwardzanie połączone z dechromizacją austenitu,

- nanoszenie warstw ochronnych metalowych przez napawanie lub galwaniczne pokrywanie, ewentualnie innymi sposobami.

W dalszej części pracy zostaną omówione tylko te procesy technologiczne, które obecnie uważa się za możliwe do zastosowania.

Zmiana składu chemicznego przez wprowadzenie pierwiastków stopowych do warstwy wierzchniej materiału podczas odlewania może dotyczyć jedynie tych powierzchni elementów, które nie będą podlegały obróbce skrawaniem. W związku z tym sposób odlewania powinien zagwarantować wymaganą gładkość i odpowiedni kształt elementu. Praktycznie można to osiągnąć przy stosowaniu specjalnych metod odlewniczych. Wy-

eliminowanie obróbki skrawaniem jest spowodowane małą grubością warstwy o zmienionym składzie chemicznym.

W przypadku zniszczenia warstwy powierzchniowej przez kawitację nie występują przeciwwskazania dla naprawy przez napawanie.

Zmiana struktury materiału przez obróbkę cieplno-chemiczną (np. azotowanie, chromowanie dyfuzyjne) zachodzi na głębokość rzędu setnych lub dziesiątych części milimetra. Procesy te stosowane dla części obrobionych „na gotowo” mogą dotyczyć jedynie elementów o niedużych wymiarach. W związku z tym zakres zastosowania tego rodzaju obróbki jest ograniczony. Ograniczenia dotyczą także regeneracji elementów uszkodzonych. Naprawa ewentualnych uszkodzeń kawitacyjnych powoduje zniszczenie warstw dyfuzyjnych.

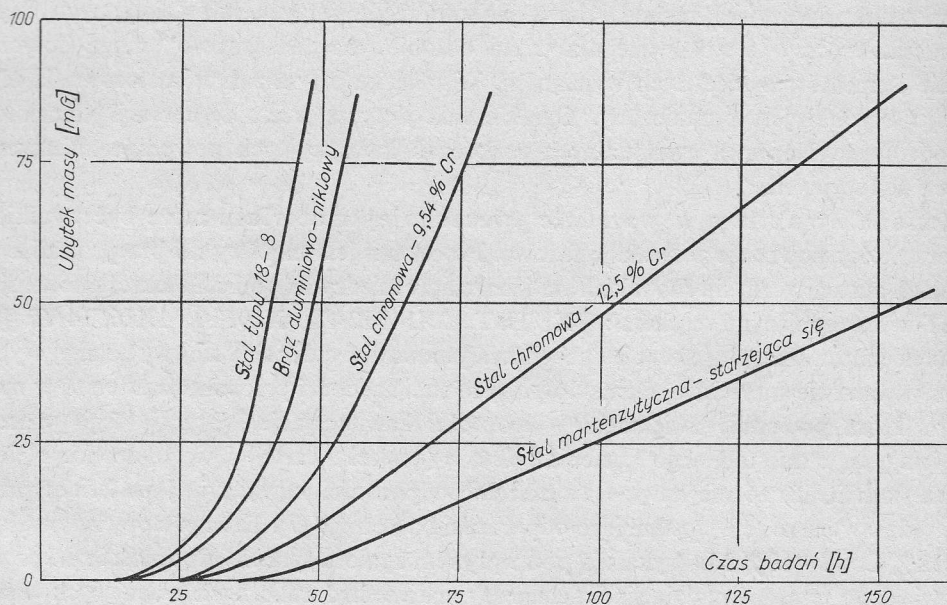
Zmiana struktury w warstwie wierzchniej materiału może być wynikiem zgniotu, który powoduje przemianę fazową. Proces ten jest możliwy do przeprowadzenia w stalach austenitycznych. Do takich stali zaliczamy między innymi stale określone według GOST-u następującymi cechami: 1X18H9T, 2X14Г12АТ, X10Г10, 1X16Г14АТ [8]. Wskutek śrutowania, dogniatania lub oddziaływania fali uderzeniowej wywołanej wybuchem, w warstwie wierzchniej elementów z tych stali zachodzi przemiana austenitu w martenzyt, która powoduje zwiększenie odporności kawitacyjnej. W czasie tego procesu wydzielają się z niestabilnego austenitu: faza ε (o sieci zwartej) i węgiel-azotki. Należy jednak nadmienić, że nie zawsze zwiększenie odporności kawitacyjnej materiału przez zgniot idzie w parze ze wzrostem jego odporności na korozję [7]. Tak np. stopy zawierające 10 - 12% Cr i 8 - 10% Mn wykazują pod wpływem zgniotu spadek odporności na korozję i w związku z tym, nie nadają się na elementy maszyn hydraulicznych pracujących w środowisku korozyjnym. Do pracy w takich warunkach nadają się natomiast stale o następującym składzie [20]: 0,1 - 0,2% C, 14 - 16% Cr, 12 - 14% Mn, 0,2 - 0,25% Ni i 0,1% Ti, które pod wpływem odkształceń plastycznych zwiększają swą odporność kawitacyjno-korozyjną.

Zmianę struktury materiału można również uzyskać przez utwardzanie dyspersyjne. Do tego celu nadają się niektóre stale austenityczne i martenzytyczne. W stalach tych, pod wpływem starzenia w podwyższonej temperaturze, tworzą się związki między-metaliczne wywołujące wzrost wytrzymałości i odporności kawitacyjno-korozyjnej. Proces ten zachodzi w stalach zawierających m.in. Ni, Mo, Cu i Al. Zawartość węgla winna wahać się w granicach 0,03 - 0,04%. Przy większej zawartości węgla mogą tworzyć się węgliki, które spowodują obniżenie odporności erozyjnej materiału.

Colombier i Hochmann [3] wskazują na dobre efekty utwardzania dyspersyjnego stali martenzytycznej o następującym składzie: 0,04% C, 0,25% Mn, 0,60% Si, 16% Cr, 4% Ni i 3,2% Cu (tab. 1, poz. 13). Dobre wyniki można też uzyskać w stalach klasy pół-austenitycznej, a mianowicie w stalach chromowo-niklowych z aluminium lub z molibdeenem i aluminium oraz w stalach austenitycznych nie zawierających chromu [1]. W tym ostatnim przypadku zawartość Ni nie powinna przekraczać 20%, a Co - 10%.

W Japonii [19] opracowano ostatnio nową stal klasy martenzytycznej ($C \leq 0,08\%$, $Si \leq 0,8\%$, $Mn \leq 0,2 - 0,8\%$, $Cr = 11 - 13\%$, $Ni = 4,5 - 7,0\%$, $Mo = 1,0 - 2,5\%$, $Co = 3,5 - 5,0\%$, $Cu < 3,5\%$, $B = 0,001 - 0,005\%$) podlegającą starzeniu i przeznaczoną do odlewania dużych elementów. Wskutek powolnego chłodzenia (przy krzepnięciu), a następnie

starzeniu tej stali, uzyskuje się następujące własności mechaniczne: $R_e=107 \text{ kG/mm}^2$, $R_m=114 \text{ kG/mm}^2$, $A=10\%$, $HB=365 \text{ kG/mm}^2$, $U=6,5 \text{ kGm/cm}^2$ oraz dobrą odporność na korozję w wodzie morskiej. Badania odporności erozyjnej tej stali wykazały jej przewagę nad innymi materiałami konstrukcyjnymi (rys. 5).



Rys. 5. Ubytek masy próbek wykonanych z różnych materiałów konstrukcyjnych w czasie badań na stanowisku laboratoryjnym [19]

Zmiana struktury w warstwie wierzchniej materiału przez napawanie – elektrodami zwykłymi i rdzeniowymi, drutem, taśmą, proszkami itp. – stosowana jest przede wszystkim podczas regeneracji elementów uszkodzonych wskutek oddziaływań kawitacji. Można też stosować proces napawania dla polepszenia własności warstwy wierzchniej elementu wykonanego z materiału o gorszych własnościach przeciwkawitacyjnych (antykawitacyjnych).

Warstwę wierzchnią odporną na erozję, korozję i kawitację, uzyskuje się za pomocą jedno- lub wielowarstwowych napoin o strukturze martenzytycznej, austenityczno-martenzytycznej i austenitycznej, a także ferrytyczno-martenzytycznej. Do tego celu stosuje się przeważnie stale zawierające 13 - 30% Cr i 5 - 20% Ni.

Technologia nanoszenia warstw ochronnych względnie regeneracyjnych nie jest przedmiotem niniejszej pracy. Należy jednak podkreślić, że zagadnienie jest technicznie bardzo ważne i zawiera szereg elementów trudnych do opanowania. Na przykład nagrzewanie części regenerowanych do temperatury 300 - 400°C, stosowanie warstw pośredniczących zapobiegających pęknięciom itp., wymaga szczególnych analiz i doświadczeń praktycznych. Na uwagę zasługują tu niektóre wyniki doświadczeń radzieckich opisane przez Miliczenkę [16].

3. Uwagi końcowe

Z zebranych materiałów wynikają następujące wnioski:

1. Odporność na erozję kawitacyjną materiału zależy od składu chemicznego (pożądane jest występowanie takich pierwiastków jak Cr, Ni, Mn, Ti, V, Cu i B), struktury i obecności nieciągłości oraz mikropęknięć.

2. Istnieje szereg możliwości zwiększenia odporności erozyjnej materiałów konstrukcyjnych. Wymaganą odporność elementu na oddziaływanie kawitacyjne można uzyskać nie tylko przez stosowanie materiałów wysokostopowych, lecz także przez stosowanie odpowiednich procesów technologicznych wywołujących zmianę składu chemicznego warstwy przypowierzchniowej materiału lub zmianę struktury.

3. Brak dostatecznego rozeznania co do skuteczności omawianych sposobów zwiększania odporności materiałów na erozję kawitacyjną nie upoważnia do określenia metod najbardziej odpowiednich. Z tego względu wydaje się celowe prowadzenie prób statystyczno-eksploatacyjnych zmierzających do ustalenia procesu technologicznego, który prowadzi do najlepszych wyników.

4. W praktyce przemysłowej najczęściej dotychczas jest stosowana zmiana struktury warstwy wierzchniej przez napawanie. Odporność erozyjna części maszyn, osiągnięta przez napawanie (szczególnie przy napoinach wielowarstwowych) jest większa od odporności osiąganey w wyniku stosowania innych zabiegów technologicznych.

5. Kierując się informacjami na temat nowej stali klasy martenzytycznej przystosowanej do starzenia (bez przesycenia), można przypuszczać, że proces ten, prowadzący do znacznego zwiększenia odporności korozyjno-erozyjnej, znajdzie w przyszłości szerokie zastosowanie przemysłowe.

6. Niezależnie od powyższych stwierdzeń należy podkreślić, że elementy przepływowe wykonane ze stali wysokostopowych (np. chromowo-niklowych) wykazują dobrą odporność na działanie kawitacji. Pożądane jest, aby stale te odznaczały się możliwością zwiększania swej odporności erozyjnej przez zastosowanie dodatkowych procesów technologicznych.

Literatura

- [1] Assonow A. D., *Obróbka części maszyn*. WNT, Warszawa 1972.
- [2] Borbe P. Ch., *Beitrag zur Werkstoffzerstörung durch Strömungskavitation in kalten und warmen Brauchwässern*. Dissertation, TU Hannover 1968.
- [3] Colombier L., Hochmann I., *Stale odporne na korozję i stale żaroodporne*. Śląsk, Katowice 1967.
- [4] Eisenberg Ph., *Cavitation and Impact Erosion - Concepts, Correlations, Controversies, Characterization and Determination of Erosion Resistance*. ASTM, STP 474, 1970.
- [5] Eisenberg Ph., Preiser H. S., Thiruvengadam A., *On the mechanisms of cavitation damage and methods of protection*. Trans. SNAME, Vol. 73, 1965.
- [6] Famuła I., Mrowiec S., Szumański T., *Tablice stali jakościowych*. Śląsk, 1970.
- [7] Fomin W. W., *Gidroerozija metallov*. Izd. Maszinstrojenije, Moskwa 1966.
- [8] Fomin W. W., Kazarnovskaja I. I., *Kavitacionnaja stojkost' chromomargancovistych austenitnych stalej s azotom*. Stal, 4, 1967.
- [9] Hobbs I. M., Laird A., *Comparative Erosion Tests on Ferrous Materials. Part II: Vibratory Cavitation Tests*. NEL Report No. 495, 1971.

- [10] Ivanczenko N. N., Skuridin A. A., Nikitin M. D., *Kavitacionnyje razruszenija v dizielach*. Izd. Maszynostrojenije, Leningrad 1970.
- [11] Kjanin I. R., *Mietally dla gidroturbin*. Izd. Maszynostrojenije, Moskwa 1969.
- [12] Kubo H., *Cavitation Erosion Resistance of Electro Chromium Plating Applied to Ships Propellers*.
- [13] Livszic L. S., Griuberg N. A., Kurkumefli E. G., *Osnovy legirowanija naplavlennogo mietalla*, Izd. Maszynostrojenije, Moskwa 1969.
- [14] Malkiewicz T., *Metaloznawstwo stopów żelaza, t. II*. PWN, Warszawa—Kraków 1971.
- [15] Medovar B. I., Pinczuk N. I., Czekatiło W., *Austienitnoboridnyje stali i splawy dla swarnych konstrukcij*. Izd. Naukova dumka, Kijów 1970.
- [16] Miliczenko S. L., *Riemont kavitacionnych razruszenij gidroturbin*. Izd. Energija, Moskwa 1971.
- [17] Piltz H. H., *Werkstoffzerstörung durch Kavitation*. VDI, Düsseldorf 1966.
- [18] Steller K., Krzysztofowicz T., Reymann Z., *Effect of Cavitation on Materials in Field and Laboratory Conditions*. ASTM, Philadelphia 1973.
- [19] Taniguchi K., Oda T., Ueda S., Nakajima M., *Development of New High Strength Special Steel Propeller for Big Ships*. Mitsubishi Technical Bulletin, No. 67, June 1970.

Methods of Increasing the Resistance of Structural Materials to the Destructive Influence of Cavitation

Summary

It was shown by analyzing the course of damages caused by cavitation to materials that the resistance of materials to cavitation erosion can be increased by changing their chemical composition (Fig. 5), physico-chemical properties and structure (Fig. 4). Good „anti-cavitation” properties of a material can be obtained by appropriate technological processes.

Discussed were some technical processes causing changes in the chemical composition in the near-surface layer of the material and structural changes on the surface or in the whole volume of the material. Special attention was paid to the heat treatment, thermo-chemical treatment and surface welding. Emphasized was also the advisability of carrying out statical-operating tests aimed at establishing such technological processes that can be useful during the construction of hydraulic machines and that will cause an increase in their lifetime despite the action of cavitation.

Способы увеличения сопротивления конструкционных материалов разрушительному действию кавитации

Резюме

Из анализа процесса разрушений материалов вследствие кавитации следует, что увеличение их сопротивления кавитационной эрозии может быть достигнуто путем изменения их химического состава (рис. 5), физико-химических свойств и структуры (рис. 4). Полезные „антикавитационные” свойства могут быть достигнуты в результате применения соответствующих технологических процессов.

В работе обсуждаются некоторые технологические процессы, вызывающие изменения химического состава приповерхностного слоя материала и изменения структуры на поверхности или во всем сечении материала. В особенности обращается внимание на термическую и термо-химическую обработку, а также на наплавку. Подчеркивается целесообразность проведения статическо-эксплуатационных испытаний, направленных на определение таких технологических процессов, которые могут найти практическое применение в гидромашиностроении и которые способствовали бы увеличению их прочности в случае появления кавитации.

should be applied for repairing the cavitation damages with the aid of materials resistant to cavitation erosion in order to increase the reliability and lifetime of the machines in use.

Next, the proper arrangement of functions concerned with the regeneration of the damaged components was presented. The order and scope of necessary works at the respective stages of repairs were specified. More detailed discussion of various methods of surface regeneration, such as putting on anti-cavitation coats with the aid of electric arc, covering the components with alloy steel sheet, flame-coating with metal powders as well as covering with plastics, was given. Based on the experience gained by the Liquid Dynamics Division of the I.F.-F.M. P.A.S. during the supervision of the repairs carried out in water-power stations throughout the country, the methods of surface generation were described. Materials used for the respective repair methods were specified. At the end the operations required when accepting the regeneration repairs were mentioned.

Устранение кавитационных разрушений в гидротурбинах

Резюме

Во вступлении обсуждаются факторы, влияющие на эксплуатационную надежность гидротурбин. Указывается, что одним из них является сопротивление проточных деталей кавитационному действию. Отмечается, что в отечественных условиях (недостаток гидротурбиностроения) для повышения безаварийности и живучести эксплуатируемых машин необходимо м. пр. применение современных методов ремонта мест, поврежденных кавитацией с использованием материалов, устойчивых против кавитационной эрозии.

В дальнейшей части статьи представлена схема надлежащей организации работ, связанных с регенерацией поврежденных деталей, с определением последовательности и объема необходимых действий в отдельных этапах ремонта.

Более обширно обсуждаются различные способы поверхностной регенерации, как например: путем нанесения антикавитационных покрытий, электрической дугой, обтяжкой деталей жестью из легированных сталей, огневым нанесением металлических порошков, а также покрытием пластмассовыми материалами. Способы регенерации поверхностей охарактеризованы по опыту Отдела гидродинамики Института проточных машин ПАН, накопленному во время надзора ремонтов, проводимых на отечественных гидроэлектростанциях. Приводятся составы материалов, применяемых при отдельных способах ремонта.

В заключении статьи перечисляются действия, необходимые при проверке принимаемых регенерационных работ.