

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.

ZDZISŁAW REYMANN

Gdańsk*

Naprawa uszkodzeń kawitacyjnych w turbinach wodnych

1. Wstęp

Dynamiczny rozwój energetyki wodnej ostatnich lat związany jest z budową turbozespołów, charakteryzujących się stosunkowo dużymi mocami jednostkowymi. W związku z tym, z ekonomicznego punktu widzenia, istotne staje się zagadnienie niezawodności ruchu tych maszyn, jak również ich żywotność. Awaryjne przestoje hydrozespołów i długie okresy remontowe powodują, prócz oczywistych strat w produkcji energii, również znaczne zmniejszenie elastyczności energetycznej sieci państwowej. Należy przy tym wspomnieć, że znaczna ilość elektrowni wodnych w naszym kraju pracuje jako jednostki szczytowe, które z natury powinny charakteryzować się maksymalną dyspozycyjnością ruchu.

Planowany rozwój energetyki zakłada dalsze instalowanie hydrozespołów dużej mocy, przeznaczonych do pracy szczytowej. Wynika to z konieczności dalszego uelastycznienia sieci państwowej, w związku z szybkim rozwojem energetyki, opartej na paliwie węglowym oraz, w niedalekiej przyszłości, na paliwie jądrowym.

Jednym z podstawowych czynników, limitujących stopień niezawodności oraz żywotność maszyn wodnych, jest odporność elementów przepływowych tych jednostek na erozję kawitacyjną.

Okresowe przeglądy dużych hydroelektrowni, zarówno krajowych jak i zagranicznych, wskazują, że w większości współcześnie instalowanych jednostek występuje zjawisko kawitacji. Jej natężenie jest zróżnicowane i uzależnione od konstrukcji maszyn (dotyczy to elementów przepływowych), dokładności ich wykonania, parametrów pracy, posadowienia (wartość wyróżnika kawitacji), warunków eksploatacji (dochowanie nominalnych parametrów ruchowych) itp. Stopień występujących zniszczeń kawitacyjnych zależy od istniejącego w turbinie natężenia kawitacji oraz odporności materiału na erozję kawitacyjną. Elementy maszyn (np. komory wirnikowe, łopatki) wykonywane ze staliwa węglowego względnie niskostopowego, wykazują zazwyczaj po 5 - 10 tys. godzin eksploatacji ślady erozji kawitacyjnej, a w niektórych przypadkach zniszczenia kwalifikujące jednostkę do naprawy (tab. 1). Wykonywanie elementów przepływowych turbin z materiałów wyższej jakości, takich jak staliwa chromowe względnie chromowo-niklowe, w zdecydowany sposób zwiększa ich żywotność. W warunkach krajowych, z uwagi na brak przemysłu budowy

* Instytut Maszyn Przepływowych PAN.

Tabela 1

Hydroelektrownia	Typ turbiny	Parametry ruchowe				Materiały							Rok prod.	Średni okres eksploat. między- remont. [mies.]	Średni czas remontu kapit. [dni]	Maksym. pow. zniszczeń kawitacy- nych [m²]
		Moc [MW]	Spad [m]	Średn. wirn. [m]	Prędk. obrot. [obr] [min]	Znak marka nazwa	skład chemiczny %									
							węgiel	krzem	mangan	chrom	nikiel	inne				
Nowosybirska	Kaplan	58,6	14,3	8,0	68,2	K Cm3 Ł 20ГCJI	0,14÷0,22 0,16÷0,22	0,12÷0,3 0,6÷0,8	0,4÷0,65 1,0÷1,3	— —	— —	— —	1955	24	30	12,0
Wołżańska im. W. J. Lenina	Kaplan	118,2	20,0	9,0	68,2	K Cm3 Ł 18 DГCJI	0,14÷0,22 0,14÷0,20	0,12÷0,3 0,6÷0,8	0,4÷0,65 1,0÷1,3	— —	— —	— 1,2÷1,5 miedź	1954	20	45	18,5
Wołżańska im. 22 Zjazdu KP ZSRR	Kaplan	130,0	22,5	9,3	68,2	K Cm3 Ł 20 ГCJI	0,14÷0,22 0,16÷0,22	0,12÷0,3 0,6÷0,8	0,4÷0,65 1,0÷1,3	— —	— —	— —	1954	24	45	18,0
Bracka im. 50-lecia Wielk. Paźdz.	Francis	230,0	96,0	5,5	125	Ł 20 ГCJI	0,16÷0,22	0,6÷0,8	1,0÷1,3	—	—	—	1959	18	50	25,0
Koronowo	Kaplan	12,3	26,0	3,28	214	K staliwo 25L	0,25	0,40	0,55	0,15	—	0,032 siarka, 0,20 miedź	1959	77	61	4,2
Żydowo	Francis rewersyj- ny	50,0	77,4	4,50	187	Ł staliwo chromo- wo-niklowe P staliwo manga- nowe	0,11 0,23	0,25 0,42	0,75 1,15	13,0 0,13	1,1 0,12	0,16 miedź 0,15 miedź	1971	28	30	1,0

Oznaczenia: Ł — łopatka, P — piasta, K — komora wirnika.

turbin wodnych, zagadnienie podwyższenia niezawodności i żywotności realizuje się poprzez wdrażanie nowoczesnych metod naprawy zniszczeń, przy użyciu materiałów o właściwościach antykawitacyjnych.

Dobór optymalnej metody napraw zniszczeń, opracowanie właściwej technologii oraz użycie odpowiednich tworzyw regenerujących, wymaga szeregu badań laboratoryjnych, jak również sprawdzenia ich na obiektach rzeczywistych. Obecnie zasadniczo nie ma możliwości opracowania uniwersalnego sposobu naprawy zniszczeń kawitacyjnych, ponieważ stosowane materiały konstrukcyjne w poszczególnych jednostkach hydroenergetycznych, lokalizacja zniszczeń, jak również występujące tam natężenie kawitacji, są różnicowane. Z tych względów metodę naprawy trzeba na razie opracowywać indywidualnie dla każdego obiektu. Dopiero zebranie szeregu doświadczeń w tym zakresie pozwoli w przyszłości opracować zbiór typowych metod napraw ubytków kawitacyjnych, uwzględniających zarówno czynniki materiałowe, lokalizację zniszczeń, natężenie kawitacji itp.

W referacie zostanie omówione, w oparciu o doświadczenia obce i własne, zagadnienie lokalizacji zniszczeń kawitacyjnych i współczesne metody ich napraw, z uwzględnieniem procesów przygotowania, organizacji pracy itp. Przytoczone zostaną również niektóre wyniki badań nad doбором materiałów używanych w pracach regeneracyjnych.

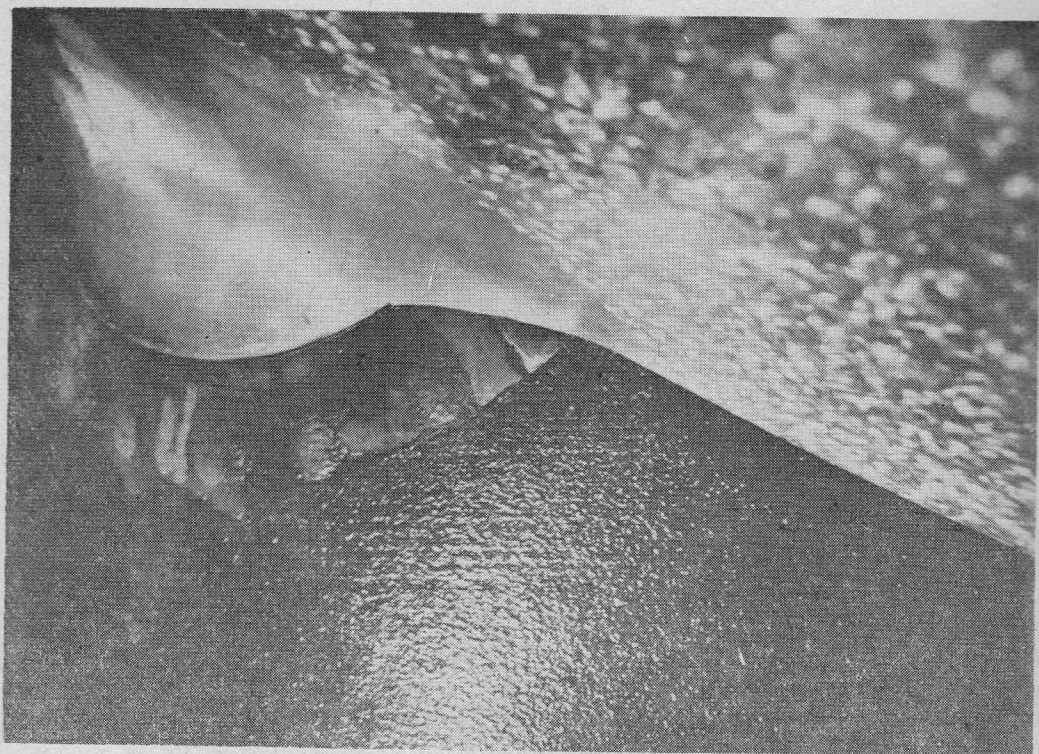
2. Lokalizacja zniszczeń kawitacyjnych w turbinach wodnych

Doświadczenia eksploatacyjne szeregu hydroelektrowni wskazują, że w turbinach tego samego typu występuje podobne rozmieszczenie zniszczeń kawitacyjnych elementów przepływowych.

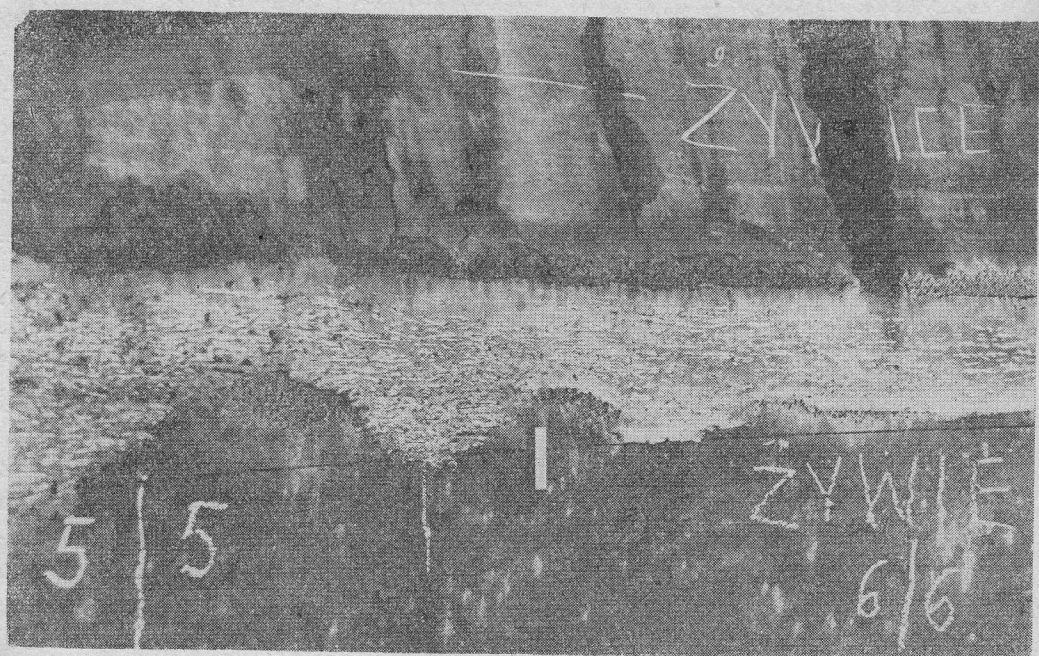
W turbinach Kaplana erozję obserwuje się na powierzchniach łopatek i w komorze roboczej wirników. Na łopatkach największe zniszczenia występują w okolicach otworu montażowego (po stronie ssącej) oraz na czołowej krawędzi łopatki, rzadziej na kołnierzach łopatek (rys. 1). Typowe są zniszczenia zewnętrznej krawędzi łopatki, powstałe wskutek kawitacji szczelinowej. Zniszczenia w komorach wirnikowych usytuowane są zazwyczaj poniżej osi obrotu łopatek (rys. 2). Obszar tych zniszczeń w miarę eksploatacji zwiększa się, a strefa erozji rozprzestrzenia się w dół, zgodnie z kierunkiem przepływu wody. W niektórych jednostkach zniszczenia kawitacyjne w komorze nie są rozmieszczone koncentrycznie na całej powierzchni, lecz tworzą oddzielne pasy skierowane pod kątem $45 \div 75^\circ$ w stosunku do osi obrotu wirnika. Zjawisko to występuje w przypadku istnienia zmiennej szczeliny między zewnętrzną krawędzią łopatki a powierzchnią komory.

W turbinach Franciszki zniszczenia kawitacyjne występują zazwyczaj na powierzchniach łopatek po stronie ssącej oraz na pierścieniach fundamentowych. Na powierzchniach łopatek zniszczenia te lokalizują się na samych krawędziach wlotowych, przy linii przeniesienia łopatki z wieńcem wirnika (rys. 3) oraz w ich pobliżu. Powierzchnie łopatek aparatu kierowniczego, jak również krawędzie wlotowe łopatek wirnika, znacznie rzadziej ulegają większemu zniszczeniu.

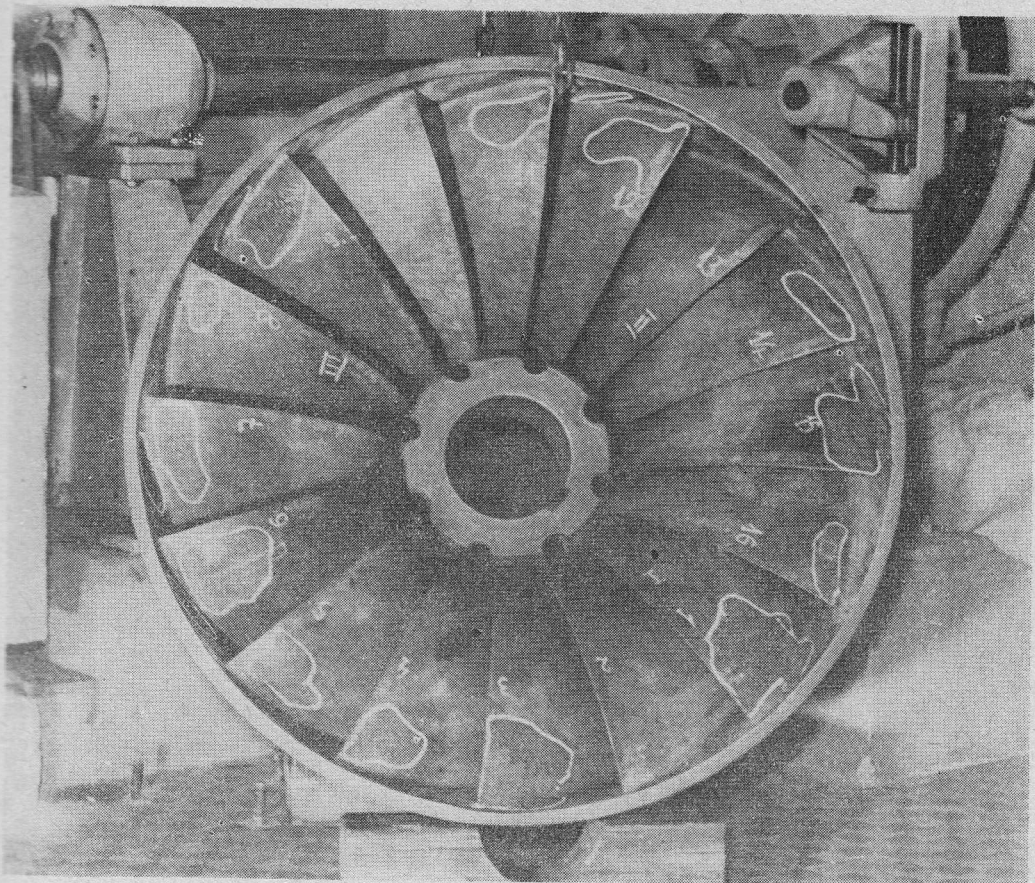
W maszynach odwracalnych można wyodrębnić ślady zniszczeń pochodzące od pracy



Rys. 1. Zniszczenia kawitacyjne na kołnierzu łopatkı turbıny Kapłana



Rys. 2. Zniszczenia kawitacyjne osłony wirnika turbıny Kapłana

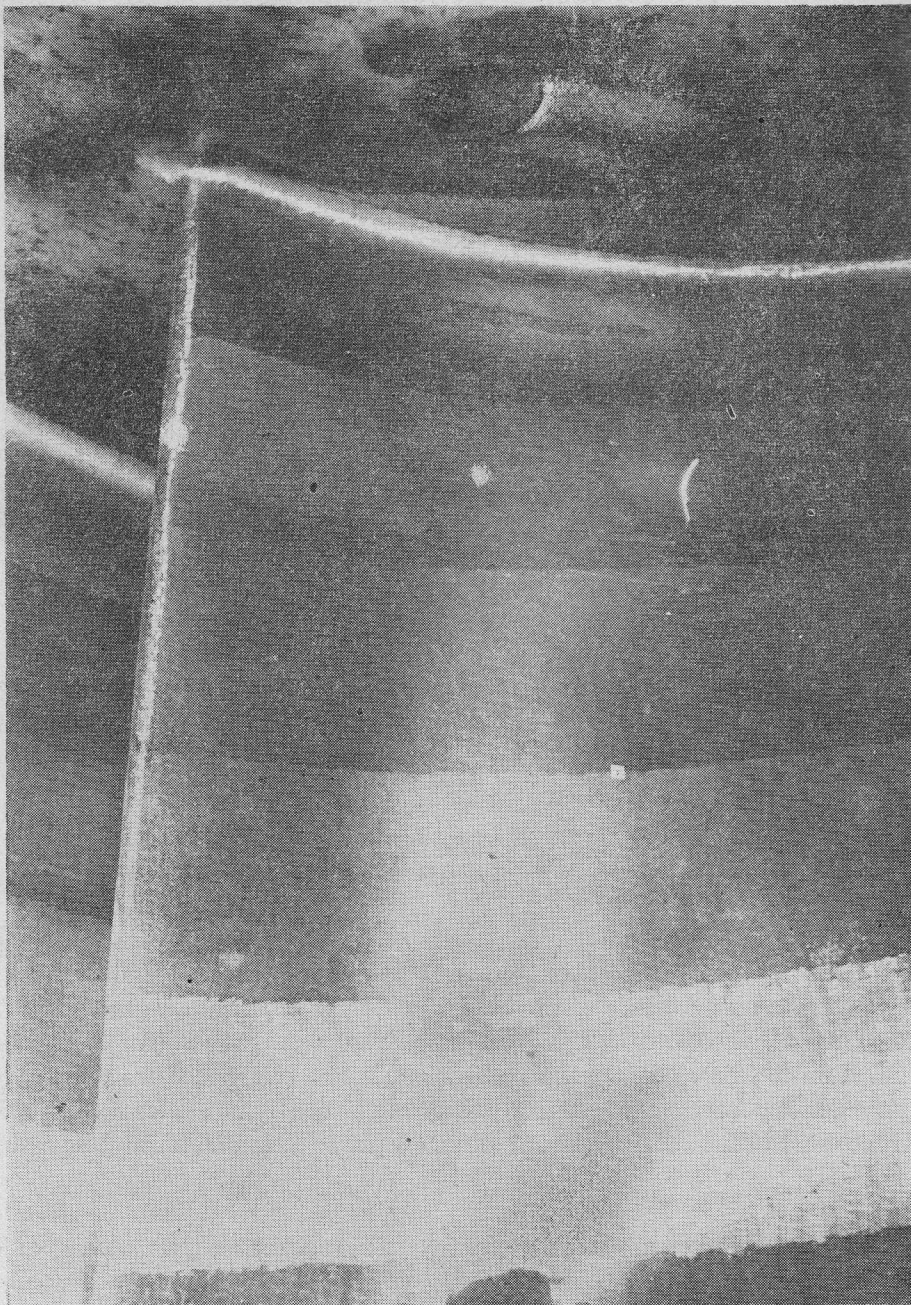


Rys. 3. Zniszczenia kawitacyjne powierzchni łopatek wirnika turbiny Francisa

turbinowej i pracy pompowej jednostki. Ślady zniszczeń, powstające w trakcie pracy turbinowej jednostek, usytuowane są zazwyczaj na powierzchniach ssących (biernych) wirnika, wzdłuż krawędzi wylotowej łopatki (ruch turbinowy) oraz na krawędzi spływu łopatek aparatu kierowniczego. Na łopatkach największe zniszczenia koncentrują się w pobliżu linii przenikania powierzchni łopatki z powierzchnią wieńca (rys. 4), natomiast na łopatkach kierownicy wzdłuż krawędzi spływu, po stronie styku tej krawędzi z listwą uszczelniającą (rys. 5).

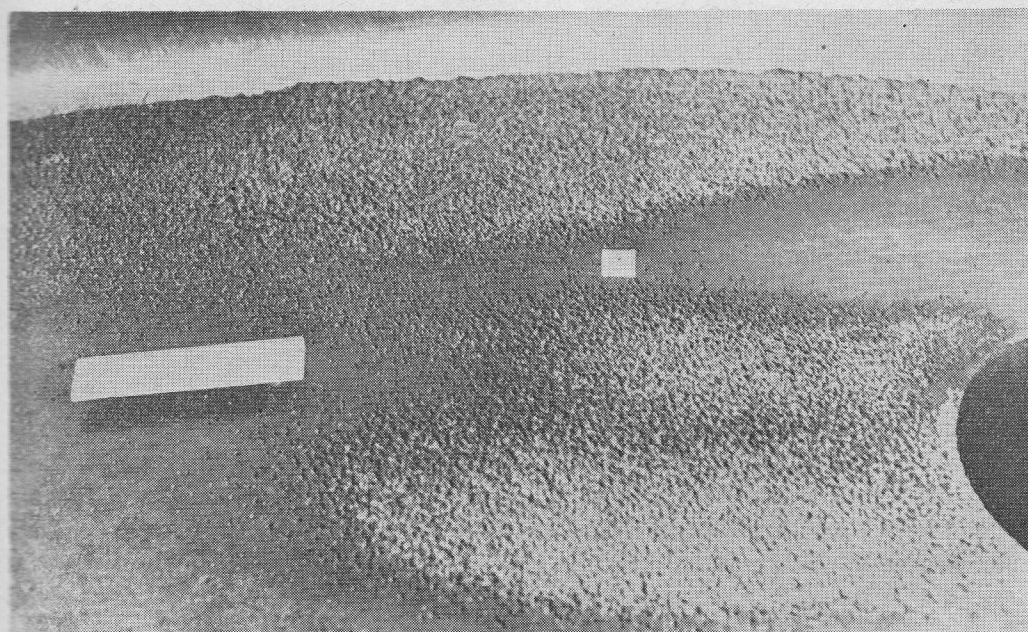
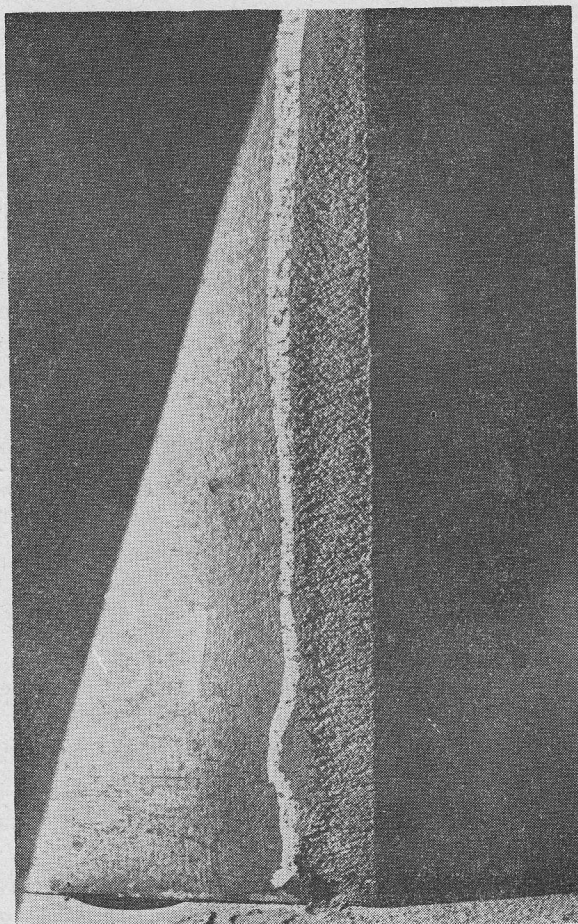
Zniszczenia kawitacyjne wynikłe z pracy pompowej jednostek usytuowane są zazwyczaj na piastie, bezpośrednio za otworami odciażającymi i w pobliżu linii przenikania powierzchni łopatki z piastą (rys. 6).

Poczynione obserwacje rozkładu zniszczeń kawitacyjnych w maszynach odwracalnych są jednostkowe i niepełne. Wynika to z niewielkiej, jak dotychczas, ilości zainstalowanych w kraju maszyn tego typu, jak również braku literatury technicznej z tego zakresu.



Rys. 4. Zniszczenia kawitacyjne powierzchni łopatek wirnika maszyny odwracalnej

Rys. 5. Zniszczenia kawitacyjne powierzchni łopatkı aparatu kierowniczego



Rys. 6. Zniszczenia kawitacyjne powierzchni piasty wirnika maszyny odwracalnej

3. Przebieg naprawy zniszczeń kawitacyjnych

Dotychczasowa praktyka remontowa wykazuje, że organizacja prac regeneracyjnych uszkodzeń kawitacyjnych nie jest zadowalająca. Wynika to przede wszystkim z braku większego doświadczenia w prowadzeniu napraw tego typu, zwłaszcza na obiektach, gdzie występują duże zniszczenia erozyjne elementów przepływowych.

Przebieg naprawy uszkodzeń kawitacyjnych można zasadniczo podzielić na następujące etapy:

- 1) przygotowanie robót,
- 2) usunięcie warstwy materiału zniszczonego wskutek kawitacji,
- 3) regeneracja podkładowa (w przypadku głębszych wżerów),
- 4) regeneracja powierzchniowa z naniesieniem warstwy antykawitacyjnej,
- 5) odbiór prac regeneracyjnych.

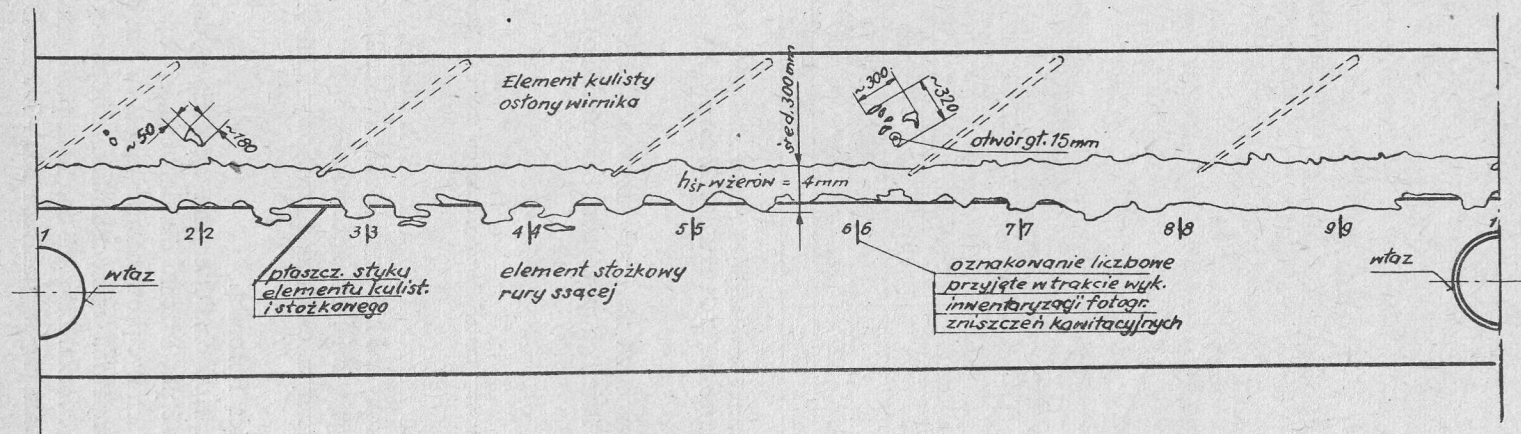
3.1. Przygotowanie robót

W pierwszym etapie prac jest konieczne przeprowadzenie szczegółowych oględzin stanu powierzchni zniszczonych przez kawitację łącznie z inwentaryzacją obszarów zniszczonych, tzn. określeniem ich położenia, wymiarów powierzchni i głębokości wżerów oraz rejestracją fotograficzną.

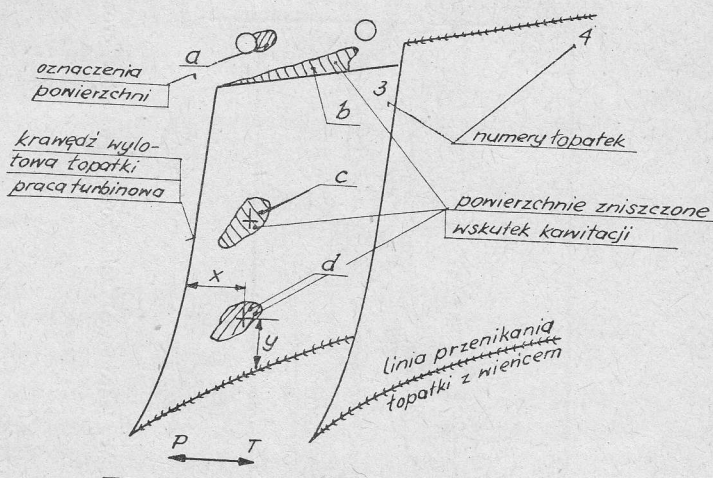
Na rys. 7 i 8 pokazano wybrane przykłady zewidencjonowanych zniszczeń kawitacyjnych elementów przepływowych z elektrowni w Koronowie i Żydowie. W oparciu o ilustrację i inwentaryzację zniszczeń, należy opracować instrukcję, dotyczącą sposobu naprawy oraz szczegółowy harmonogram prac. W harmonogramie tym, zwłaszcza przy rozległych zniszczeniach, należy również przewidzieć możliwość równoległego wykonywania różnych operacji technologicznych w zależności od stanu powierzchni względnie zaawansowania prac bieżących.

W trakcie przygotowywania robót należy zabezpieczyć, w zależności od przyjętej technologii, odpowiednią ilość materiałów regeneracyjnych, wyposażenie i narzędzia oraz zapewnić odpowiednią kadrę wykwalifikowanych robotników i personel inżyniersko-techniczny.

Istotnym zagadnieniem, nie zawsze docenianym w praktyce, jest bezpieczeństwo i higiena pracy. Dotyczy to przede wszystkim zabezpieczenia przeciwpożarowego oraz zapewnienia w zamkniętych przestrzeniach odpowiedniej wentylacji. W trakcie wykonywania prac spawalniczych, cięcia gazowego oraz wypalania łukiem, wydziela się znaczna ilość szkodliwych dla organizmu ludzkiego gazów i pyłów (np. tlenków manganu, krzemu, węgla, azotu itp.). Duża ilość wydzielających się środków toksycznych wymaga stosowania w zamkniętych przestrzeniach wentylacji wyciągowo-tłocznej o odpowiedniej wydajności. Intensywność wymiany powietrza jest uzależniona od rodzaju i ilości używanych elektrod oraz, w przypadku spawania względnie cięcia gazowego, od ilości zużytego acetylenu. Przyjmuje się [4], że dla zwykłych elektrod spawalniczych urządzenie wentylacyjne powinno usuwać około 5000 m³ powietrza na 1 kg zużywanych elektrod, natomiast przy pracy



Rys. 7. Rozwinięcie powierzchni osłony wirnika i elementu stożkowego rury ssącej turbiny H2 (E. W. Koronowo) zniszczonych wskutek erozji kawitacyjnej



Erozja na płaszczyźnie łopatek Nr	Lokalizacja pow. zerodowanych (wg oznaczeń na rysunkach)	Odległości środka pow. zerodowanej w [mm]	Wielkość powierzchni zerodowanej w [cm ²]	Maks. głęb. wżerów kawitacyjnych w [mm]	Śred. głęb. wżerów kawitacyjnych w [mm]	Ubytek masy z pow. zerodowanej w [g] przy $\rho = 7,86 \text{ g/cm}^3$	Łączny ubytek masy z powierzchni płaszczyzny w [g]	Łączny ubytek masy z powierzchni łopatek w [g]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	a	-	122	4,0	3,2	307	1591	188
	b	-	419	5,0	3,9	1284		
	c	x=260 y=480	82	2,5	2,0	129		
	d	x=265 y=250	75	2,5	1,0	59		

Rys. 8. Przykład inwentaryzacji zniszczeń kawitacyjnych powierzchni płaszczyzny i łopatek wirnika maszyny odwracalnej TG1 w E. P. Żydowo

z użyciem gazu — 1000 m³ powietrza na 1 m³ zużywanego acetylenu. Wymagane jest poza tym ciągle dostarczanie świeżego powietrza bezpośrednio do strefy oddychania spawaczy.

3.2. Usunięcie warstwy materiału zniszczonego wskutek kawitacji

Usuwanie warstwy materiału zniszczonego wskutek kawitacji, stanowiące drugi etap naprawy uszkodzeń, można wykonywać kilkoma metodami (tab. 2). Na największą uwagę, ze względu na swe zalety, zasługują dwie, a mianowicie:

- wypalanie łukiem elektrycznym, elektrodami węglowymi lub grafitowymi z użyciem sprężonego powietrza,
- obróbka ruchomą głowicą frezerską.

Pierwsza z przytoczonych metod charakteryzuje się dużą wydajnością (tab. 3) oraz zapewnia wystarczającą gładkość powierzchni dla dalszego jej napawania. Proces wypalania metalu elektrodami powinien być prowadzony prądem stałym o odwrotnej biegunowości (plus na elektrodzie), co zapewnia lepsze usuwanie roztopionego metalu (sprężonym powietrzem) dzięki wypukłemu jeziorku. Zalecane natężenie prądu uzależnione jest od przekroju stosowanej elektrody i waha się w granicach 300 ÷ 700 A. Do wypalania zerodo-

wanego materiału używa się zasadniczo płaskich elektrod węglowych względnie grafitowych. Elektrody okrągłe znajdują zastosowanie przy usuwaniu drobnych wżerów względnie powierzchniowych pęknięć materiału.

Właściwą jakość powierzchni przy wypalaniu elektrodami z użyciem sprężonego powietrza otrzymuje się spełniając następujące warunki [4]:

a. Strumień powietrza powinien być skierowany równolegle do powierzchni elektrody.

Tabela 2

Metoda usuwania materiału zniszczonego wskutek kawitacji	Wady metody	Zalety metody
Wypalanie łukiem elektr. elektrodami metalowymi lub węglowymi	Niska wydajność; jakość powierzchni po obróbce niedostateczna; w trakcie wypalania następuje zaptanie drobnych wżerów i defektów powierzchni; zanieczyszczenie powietrza	—
Wypalanie płomieniem tlenowo-acetylenowym	Niska wydajność; jakość powierzchni po obróbce niedostateczna, zwłaszcza na łukach; przegrzanie powierzchni wypalanej; nadaje się wyłącznie do stali węglowych i nisko stopowych; zanieczyszczenie powietrza	—
Wypalanie łukiem elektr. elektrodami węglowymi lub grafitowymi z użyciem sprężonego powietrza	Zanieczyszczenie powietrza	Duża wydajność, zwłaszcza przy używaniu elektrod grafitowych; jakość powierzchni po obróbce dostateczna
Wycinanie przecinakami pneumatycznymi	Niska wydajność; bardzo duże natężenie hałasu	Jakość powierzchni po obróbce dobra
Wycinanie tarczami szlifierskimi	Niska wydajność; duże natężenie hałasu; duże zanieczyszczenie powietrza	Jakość powierzchni po obróbce dostateczna
Czekanka młotkami pneumatycznymi z bijakami o kulistym zakończeniu	Niska wydajność; bardzo duże natężenie hałasu; niedostateczne usuwanie wżerów kawitacyjnych	—
Obróbka ruchomą głowicą frezerską	Wysoki koszt urządzenia	Duża wydajność, zwłaszcza przy naprawie płytkich zniszczeń kawitacyjnych w komorach wirnikowych; jakość powierzchni po obróbce bardzo dobra

Tabela 3

Metal poddawany obróbce	Przekrój elektrody [mm]	Intensywność wypalania [kG/h]	Zużycie na 1 kG wypalanego metalu		
			powietrza [m ³]	elektrod [G]	energii elektrycznej [kWh]
Stal węglowa	15 × 5	12,9	3,4	40 ÷ 50	2,9
	20 × 5	15,5	2,8		2,9
	25 × 6	16,4	2,65		3,3
Stal nierdzewna	15 × 5	16,7	2,6		2,2
	20 × 5	20,1	2,2		2,2
	25 × 6	21,4	2,0		2,5

Uwaga: zużycie elektrod podano z uwzględnieniem odpadów na ogarki przy długościach elektrod 250 mm.

b. Ciśnienie podawanego powietrza powinno ustalać się w granicach $4,5 \div 6$ kp/cm². Niższe ciśnienie obniża jakość powierzchni i wydajność wypalania. Wyższe natomiast pogarsza stabilność palenia się łuku (przechłodzenie).

c. Kąt nachylenia elektrody względem powierzchni obrabianej powinien wynosić $25 \div 40^\circ$. Wartość jego jest uzależniona od grubości zdejmowanej warstwy materiału. Zbyt mały kąt powoduje zdejmowanie cienkiej warstwy materiału zerodowanego, pozostawiając nierówne podłoże. Z kolei zwiększenie kąta prowadzi do podpływania metalu pod łuk, co w konsekwencji pogarsza również jakość powierzchni podłoża.

d. Uchwyt elektrod powinien umożliwiać regulację długości czynnej elektrody. Jej długość w przypadku np. elektrody grafitowej, należy utrzymywać w granicach $100 \div 180$ mm. Większa długość powoduje jej przegrzanie i znacznie szybsze zużycie.

e. Grubość zdejmowanej warstwy materiału przy jednym przejściu elektrody powinna wahać się w granicach $4 \div 6$ mm. Wartość tę należy zachować dobierając właściwy stosunek szybkości przesuwu elektrody i natężenia prądu.

f. Aby uniknąć zjawiska błędzenia łuku oraz jego rozrywania poprzez strumień powietrza, wypalanie należy prowadzić przy minimalnej długości łuku.

Drugą z podanych metod usuwania zniszczonego materiału jest obróbka ruchomą głowicą frezerską. Stosowanie głowicy w warunkach remontowych turbiny wymaga dodatkowego oprzyrządowania, umożliwiającego swobodne manewrowanie obrabiarką. Metoda ta jest polecana przy naprawach komór wirnikowych, gdzie ukształtowanie zerodowanej powierzchni jest stosunkowo proste. Duże wydajności pracy głowicy osiąga się przy jednorazowym zdejmowaniu warstwy o grubości nie większej niż $3 \div 4$ mm. Otrzymana jakość powierzchni jest bardzo dobra. Niewątpliwą wadą stosowania tej metody jest wysoki koszt ruchomej głowicy oraz oprzyrządowania dodatkowego.

3.3. Regeneracja podkładowa

Następnym etapem napraw uszkodzeń kawitacyjnych jest regeneracja podkładowa, którą należy wykonywać w przypadku ujawnienia głębszych wżerów kawitacyjnych (powyżej 5 mm). Regeneracja ta polega na całkowitym wypełnieniu zagłębień, powstałych

po uprzednim usunięciu warstwy zerodowanego materiału, wielowarstwową spoiną. Do wypełnienia zagłębień stosunkowo płytkich i niewielkich jest zalecane napawanie łukowe elektrodami z otuliną zasadową średnicy 5 względnie 6 mm, o znakach EP49-29P i EP60-22P (dla stali niskowęglowych i niskostopowych) oraz ES18-8-2 (dla stali wysokostopowych). W przypadku bardzo głębokich i rozległych zniszczeń należy stosować łukowe napawanie półautomatyczne w środowisku gazów ochronnych (argonu dla stali wysokostopowej, a dwutlenku węgla dla stali węglowej i niskostopowej). Warstwy spoin powinny być nakładane na przemian oddzielnymi odcinkami. W celu uniknięcia zbędnych odkształceń i naprężeń, każdą warstwę spoiny należy młotkować. Sposób nakładania spoiny należy opracowywać indywidualnie, uwzględniając ukształtowanie i wymiary regenerowanego elementu. W miarę potrzeby należy również, zwłaszcza dla stali wysokostopowych, przewidzieć odpowiednią obróbkę termiczną (np. podgrzew wstępny). W trakcie wykonywania regeneracji podkładowej wymagana jest bieżąca kontrola napawanej powierzchni, gwarantująca po nałożeniu ostatecznej warstwy antykawitacyjnej wierne odtworzenie pierwotnych kształtów.

Wyniki doświadczeń remontowych uszkodzeń kawitacyjnych wskazują [4], że częściej rezygnuje się z regeneracji podkładowej poprzez napawanie elektrodami na rzecz napawania półautomatycznego w środowisku gazów ochronnych. Wpływa to zarówno ze względów ekonomicznych (duża wydajność), jak również ze względów technicznych (uniwersalność, mały przegrzew itd.).

3.4. Regeneracja powierzchniowa

Regeneracja powierzchniowa, jako kolejny etap naprawy zniszczeń kawitacyjnych, jest zabiegiem polegającym na naniesieniu warstwy antykawitacyjnej na uprzednio wykonany zazwyczaj podkład. Warstwę tę można nanieść drogą:

- a) napawania łukiem elektrycznym,
- b) pokrywania blachami stalowymi,
- c) płomieniowego nakładania proszków metalowych,
- d) nakładania powłok z tworzyw sztucznych.

Wybór sposobu nakładania warstwy antykawitacyjnej powinien uwzględniać możliwości wykonawcze poszczególnych metod, ukształtowanie i wymiary elementu regenerowanego, jak również intensywność występującego zjawiska kawitacji. I tak, na przykład, pokrywania blachami stalowymi nie należy stosować na elementach przepływowych, charakteryzujących się skomplikowanym ukształtowaniem powierzchni, natomiast nakładanie powłok z tworzyw sztucznych jest w tym przypadku przydatne pod warunkiem, że występująca kawitacja nie jest zbyt intensywna.

3.4.1. Napawanie łukiem elektrycznym

Napawanie łukiem elektrycznym warstwy wierzchniej elementu regenerowanego jest obecnie najpowszechniej stosowane w praktyce remontowej. Zabieg ten można wykonywać poprzez napawanie elektrodami otulonymi względnie drutami spawalniczymi w osłonie gazów ochronnych. Stosowane w tych procesach materiały spawalnicze (rdzenie

elektrod względnie druty spawalnicze) powinny charakteryzować się dużą odpornością kawitacyjno-korozyjną oraz gwarantować dobrą technologiczność. Ogólnie warunki te spełniają stale nierdzewne o strukturze martenzytycznej (stale chromowe o zawartości 13 % Cr oraz stale chromoniklowe o zawartości 12÷16 % Cr i 4÷8 % Ni).

Aby osiągnąć wymagany skład i strukturę materiału warstwy antykawitacyjnej napawanie należy wykonywać co najmniej dwuwarstwowo (o grubości 4÷5 mm). Wynika to z zachodzącego procesu przetapiania (w trakcie spawania) podkładu z materiałem elektrod, w wyniku czego w pierwszej warstwie powstaje stop odbiegający składem i własnościami od wyjściowego materiału spawalniczego. Również niemają wpływ na własności wytrzymałościowe warstwy antykawitacyjnej mają procesy termiczne oraz wypalanie składników stopowych zachodzące w trakcie napawania.

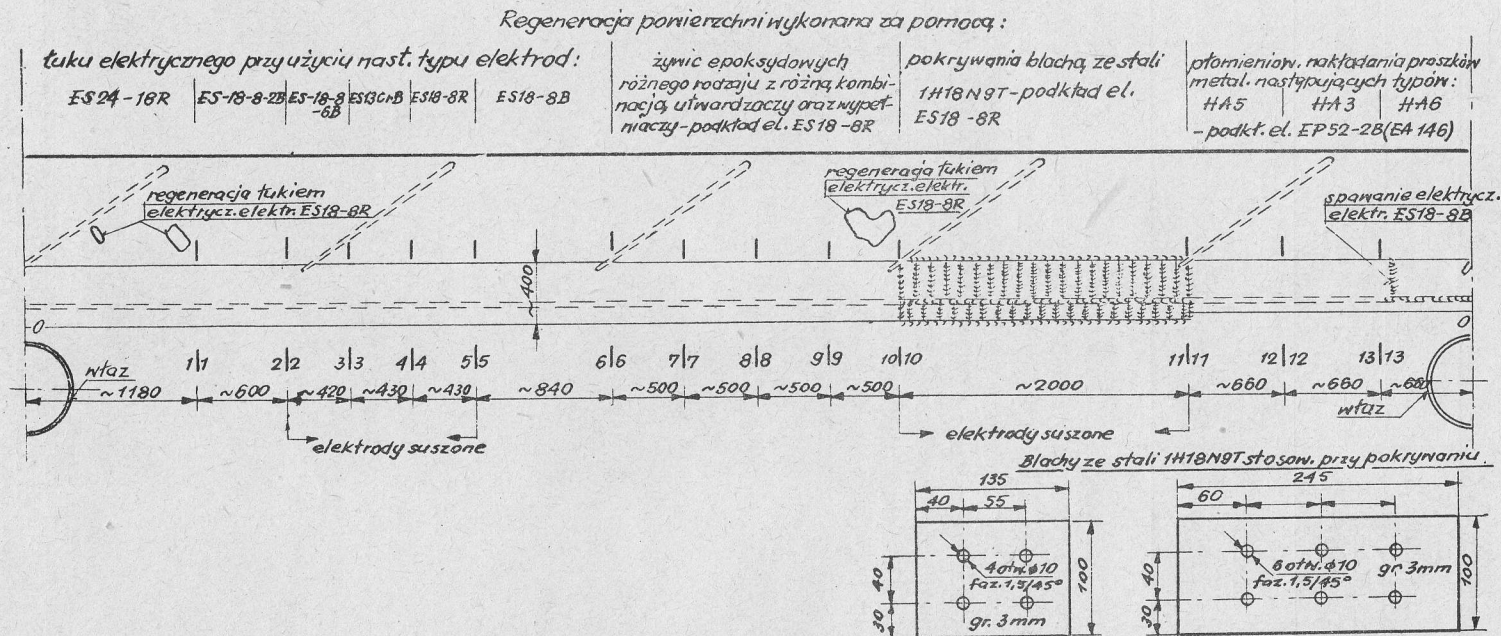
Przy wykonywaniu regeneracji powierzchniowej drogą napawania elektrodami otulonymi, największe zastosowanie znalazły elektrody z rdzeniem ze stali chromowo-niklowej typu 18-8 (np. ES18-8B; ES18-8R). Doświadczenia zarówno krajowe [8] jak i zagraniczne [2, 4] wykazują, że regeneracja wykonana przy użyciu tych elektrod gwarantuje trwałą powierzchnię o dobrych własnościach antykawitacyjnych. Napawany metal posiada strukturę austenitu niestabilnego (lub austenityczno-martenzytyczną) i własności antykawitacyjne zbliżone do stali 1H18N9T. Nie mniejsze zastosowanie znalazły elektrody gwarantujące wprowadzenie chromu w ilości ok. 13 % do napawanego metalu. Z krajowych elektrod do tego celu nadaje się elektroda z otuliną zasadową ES13Cr. W trakcie napawania tą elektrodą należy unikać szybkiego chłodzenia, ponieważ spoina posiada skłonność do podhartowania (twardość 400 HB). W celu uniknięcia tego zjawiska, napawanie należy prowadzić krótkimi ściegami o małym przekroju. Średnice stosowanych elektrod nie powinny przekraczać 3,25 mm.

Ogólnie można stwierdzić, że regeneracja powierzchniowa wykonywana elektrodami otulonymi charakteryzuje się niską wydajnością, a jakość powierzchni w znacznym stopniu zależy od kwalifikacji spawacza. W związku z tym, ten sposób wykonywania regeneracji powierzchniowej może być polecany do naprawy obszarowo niedużych zniszczeń kawitacyjnych.

Znacznie bardziej wydajne i doskonalsze jakościowo jest prowadzenie regeneracji powierzchniowej przy użyciu półautomatów drogą napawania w osłonie gazów ochronnych. W przypadku stosowania dwutlenku węgla istotny jest właściwy dobór drutów spawalniczych. Powinny one zawierać prócz wymaganych składników stopowych, jak chrom względnie chrom z niklem, również niezbędną ilość odtleniaczy (manganu, krzemu, tytanu). Przy doborze drutów należy uwzględnić zwiększone wypalanie pierwiastków stopowych, wskutek znacznych własności utleniających CO_2 , jak również duże rozpuszczenie metalu spoiny wskutek zwiększonego przetopu podłoża.

Z krajowych półautomatów spawalniczych do regeneracji mogą być stosowane urządzenia typu PS-300 (FAWOD — Wrocław) względnie EMD-300 (ASPA — Wrocław). Półautomaty te umożliwiają spawanie w osłonie CO_2 drutami o średnicy 0,8÷1,6 mm.

Przy spawaniu drutami chromowymi względnie chromowo-niklowymi lepsze wyniki osiąga się stosując osłonę argonu. W tym przypadku można posługiwać się uniwersalnym półautomatem typu EAa-400 (ELMET — Warszawa), umożliwiającym stosowanie drutów w zakresie średnic 1,2÷2,4 mm.

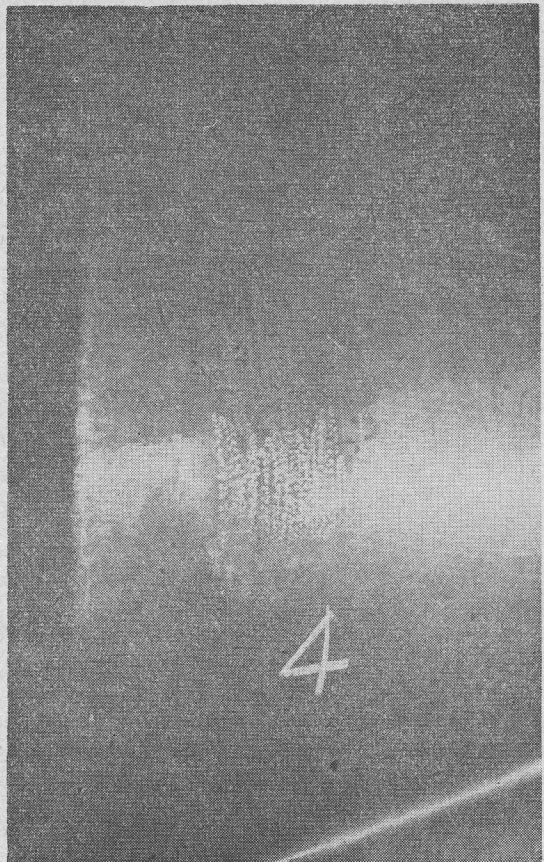


Rys. 9. Rozwinięcie powierzchni osłony wirnika i elementu stożkowego rury ssącej turbiny H2 (E. W. Koronowo) po regeneracji

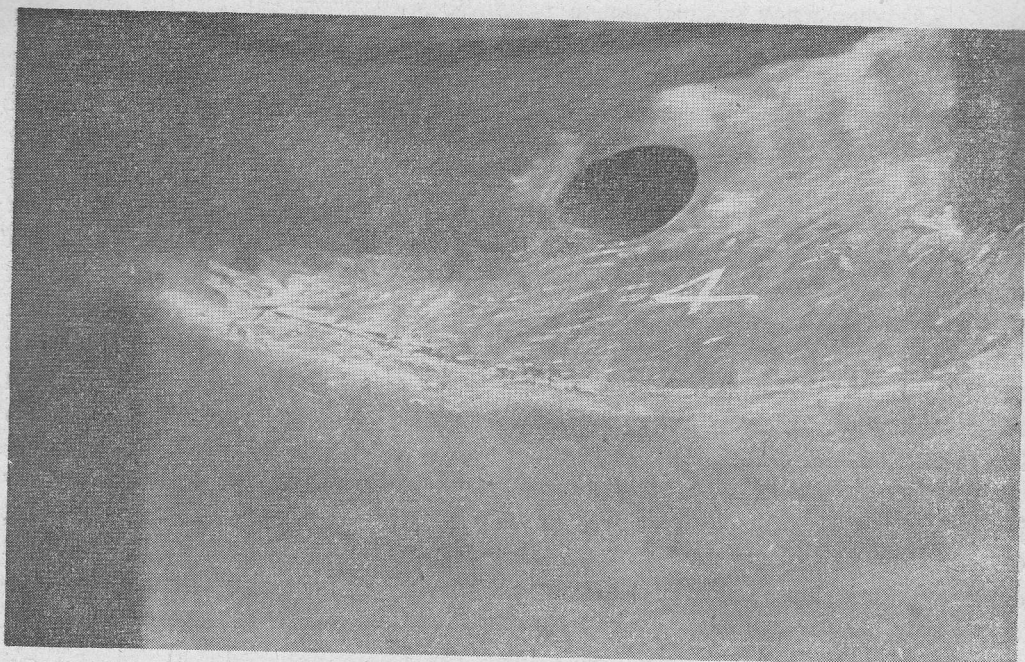
trody. Każdy następny ścieg powinien pokrywać ścieg poprzedni na $1/3$ jego szerokości.

W Instytucie Maszyn Przepływowych PAN opracowano szereg technologii regeneracji zniszczeń kawitacyjnych za pomocą napawania łukiem elektrycznym. Między innymi opracowano doświadczalną technologię naprawy zniszczeń, osłony wirników turbin w E. W. Koronowo [8, 9] oraz powierzchni łopatek i piasty wirników maszyn odwracalnych w E. P. Żydowo [9]. W pierwszym wypadku powierzchnie osłony regenerowano przy użyciu sześciu różnych typów elektrod (rys. 9), w celu sprawdzenia przydatności poszczególnych typów w warunkach eksploatacyjnych. Wybór elektrod do napawania poprzedzony był odpowiednimi badaniami, prowadzonymi zarówno na laboratoryjnych stanowiskach kawitacyjnych, jak również w warunkach kawitacji naturalnej. Badania te wykazały, że z krajowych elektrod dla potrzeb tej siłowni najlepsze własności antykawitacyjne oraz dobrą technologiczność wykazują następujące elektrody: ES-24-18R,* ES18-8-2B, ES18-8-6B, ES13CrB, ES18-8R i ES18-8B.

Przegląd stanu regenerowanej powierzchni (rys. 10), wykonany po 1821 godz. pracy jednostki, wykazał trafność doboru elektrod oraz przyjęcie właściwej technologii napawania. Ostatecznie wyselekcjonowanie (z użytych do naprawy elektrod) najodpowiedniejszego typu elektrody wymaga prowadzenia dalszej kontroli stanu napawanej powierzchni.



Rys. 11. Powierzchnia łopatki wirnika maszyny odwracalnej po naprawie za pomocą napawania łukiem elektrycznym



Rys. 12. Powierzchnia piasty wirnika maszyny odwracalnej po naprawie za pomocą napawania łukiem elektrycznym

Technologia naprawy zniszczeń kawitacyjnych łopatek wirnika turbiny w E. P. Żydowo przewidywała zastosowanie elektrod typu ES18-8B oraz ESCr-MoVB. Ze względu na wysokostopowy materiał (staliwo chromowo-niklowe) łopatek zalecono przed napawaniem podgrzew regenerowanej powierzchni. Napawanie prowadzono strefowo na polach o powierzchni nie przekraczającej 50 cm^2 . Spoinę nakładano warstwowo, ścięciem nitkowym przy czym grubość jednej warstwy nie przekraczała $2,5 \div 3 \text{ mm}$. Po napawaniu powierzchnie regenerowane szlifowano i polerowano. Na rys. 11 pokazano fragment powierzchni łopatki po wykonanej naprawie zniszczeń kawitacyjnych. Regeneracja zniszczeń na piście wirnika wymagała dodatkowego napawania warstwy podkładowej elektrodą EB146, na którą nałożono warstwę powierzchniową z elektrody ES18-8-6B. Przeprowadzenie tej naprawy wymagało zachowania szczególnej ostrożności i precyzji, ponieważ obszar zerodowany i spaw łączący łopatkę z piastą wirnika znajdowały się blisko siebie. Na rys. 12 przedstawiono wybrany fragment piasty wirnika po regeneracji zniszczeń kawitacyjnych.

3.4.2. Pokrywanie blachami stalowymi

W praktyce remontowej turbin do napraw zniszczeń kawitacyjnych (regeneracji powierzchniowej) coraz częściej stosuje się pokrywanie obszarów zerodowanych blachami stalowymi. Arkusze blachy o wysokich własnościach antykawitacyjnych przyspawywane są do podłoża spoiną obwodową oraz punktowo nitami spawanymi. Badania oraz doświadczenia eksploatacyjne [4] wykazały, że do pokrywania należy stosować blachy o stosunkowo



Rys. 13. Stan powierzchni osłony wirnika regenerowanej za pomocą pokrywania blachami, po 1821 godz. pracy jednostki

małych powierzchniach. Na przykład szerokość ich nie powinna przekraczać $50 \div 100$ mm, natomiast grubość 3 mm. Przekroczenie tych wymiarów nie gwarantuje właściwego przylegania do podłoża, co w konsekwencji powoduje odstawanie i odrywanie ich już po kilku tysiącach godzin pracy jednostki. Pokrywanie blachami znalazło zastosowanie zarówno przy naprawach łopatek, jak również osłon wirnikowych. W ramach opracowanej przez IMP PAN eksperymentalnej technologii naprawy osłony wirników turbin w E. W. Koronowo przeprowadzono regenerację m. in. za pomocą pokrywania blachami. Do pokrycia zastosowano blachy ze stali 1H18N9T oraz H17N13M2T o grubości 3 mm. Wymiary blach oraz sposób ich mocowania do podłoża pokazano na rys. 9. Przegląd stanu tej powierzchni po 1821 godz. pracy turbozespołu wykazał brak jakichkolwiek zniszczeń kawitacyjnych (rys. 13).

Należy nadmienić, że pokrywanie blachami powierzchni zniszczonych przez kawitację nie jest całkowicie opanowane. Dotyczy to przede wszystkim doboru najwłaściwszego sposobu umocowania blach do podłoża, likwidacji niekorzystnych stanów naprężeń po spawaniu, jak również znalezienia materiałów o wysokich własnościach antykawitacyjnych. W IMP PAN prowadzone są obecnie prace z tego zakresu.

3.4.3. Płomieniowe nakładanie proszków metalowych

Regeneracja powierzchniowa wykonywana za pomocą płomieniowego nakładania proszków metalowych jest mało znanym zabiegiem remontowym w turbinach wodnych. Napawanie proszkami w płomieniu acetylenowo-tlenowym umożliwia pokrywanie warstwy

podkładowej powłokami metalowymi o żądanych właściwościach mechanicznych. Mechanizm połączenia warstwy napawanej z podkładem ma charakter dyfuzyjny. Proces ten może być powierzchniowy (wymiana atomów w sieci krystalicznej warstwy granicznej) względnie w głąb materiału podkładu (wzdłuż granic ziaren lub poprzez ziarna). Głębokość tego procesu uzależniona jest od stanu materiału napawanego i podkładu, jego struktury, rodzaju występujących faz oraz od temperatury i czasu wygrzania.

Nakładanie proszków wykonywane jest zazwyczaj w temperaturach, przy których warstwa podkładowa nie przechodzi w stan płynny. Proces nakładania jest dwuetapowy. W pierwszym etapie powierzchnię podkładu pokrywa się bardzo cienką warstwą proszku przy temperaturach podkładu nie przekraczających z reguły 550°C. W etapie drugim następuje przetapianie nałożonej warstwy na żadaną głębokość. Do napawania stosowane są proszki stopów eutektycznych, które umożliwiają napawanie w temperaturach niższych od stosowanych podczas spawania. Dzięki temu można uniknąć niepożądanych odkształceń spawalniczych. Poza tym napawanie można prowadzić bez konieczności topienia podłoża, a tym samym unika się procesu mieszania metalu stopionego podłoża z metalem napawanym. Z szeregu proszków stosowanych do napawania najszerze zastosowanie znalazły proszki wykonane ze stopów niklowo-chromowych zawierających dodatki boru, krzemu i węgla. Nikiel daje wysoką odporność na korozję, bor i węgiel — dużą twardość i odporność na ścieranie, chrom powiększa odporność na utlenianie w wysokich temperaturach, bor i krzem obniżają temperaturę topnienia podłoża oraz nadają stopowi własności samozęglujące [10].

W ramach uprzednio już omawianej eksperymentalnej technologii naprawy zniszczeń kawitacyjnych w E. W. Koronowo wykonano napawanie proszkami niklowo-chromowymi powierzchni osłony wirnika turbiny H2 (rys. 9). Do napawania użyto proszków typu HA austriackiej firmy Universal Tief Punkt (tab. 5). Po oczyszczeniu i odtłuszczeniu podkładu (napawanego elektrodą EP52-2B) powierzchnie osłony nagrzewano miejscowo tradycyjnym palnikiem do temperatury około 500°C. Miejsca nagrzane pokrywano następnie cienką powłoką proszku HA3 stanowiącą warstwę pierwszą. Warstwę drugą położono na oddzielnych strefach osłony stosując do tego proszki HA3, HA5 i HA6. Grubość całkowita obu warstw proszku nie przekraczała 1 mm. Pokrywanie powierzchni proszkami wykonano

Tabela 5

Nazwa proszku	Skład chemiczny	Twardość HB/HRC	Temperatura topnienia [°C]
HA 3	B — 1,5%, Si — 2,5% Ni — reszta	201 ÷ 210	1100
HA 5	B — 2,4%, Si — 4,6% Ni — reszta	38 ÷ 45	1100
HA 6	Cr — 9,0%, Fe — 4,0%, B — 2,9%, Si — 4,6%, Ni — reszta	46 ÷ 49	1065



Rys. 14. Stan powierzchni osłony wirnika regenerowanej za pomocą napawania proszkami, po 1821 godz. pracy jednostki

specjalnym palnikiem acetylenowo-tlenowym (firmy Castolin) wyposażonym w urządzenie podające proszek.

Przegląd stanu osłony, regenerowanej proszkami, po 1821 godz. pracy turbiny wstępnie wykazał wysoką odporność kawitacyjną pokrycia wykonanego z proszku HA6 (rys. 14). Na pozostałych powierzchniach pokrytych proszkami HA3 i HA5 wystąpiły odpryski i łuszczenie. Zniszczenia te spowodowane były niedotrzymaniem reżimu technologicznego przez spawaczy wykonujących warstwę podkładową. W trakcie nakładania powłok ujawniły się niedolania podkładu w postaci lokalnych pęcherzy, co zdecydowanie pogorszyło jakość pokryć z proszków. Dalsze przeglądy stanu osłony pozwolą na dokonanie ostatecznej oceny przydatności tego rodzaju regeneracji do napraw zniszczeń kawitacyjnych.

3.4.4. Nakładanie powłok z tworzyw sztucznych

Metoda regeneracji powierzchniowej za pomocą powłok z tworzyw sztucznych została wprowadzona eksperymentalnie do praktyki remontowej turbin w ostatnim 15-leciu. Z szeregu tworzyw, które poddano próbom pod kątem ich zastosowania do napraw, na największą uwagę zasługują tworzywa:

- termoplastyczne (polietylen, polichlorek winylu, poliamidy),
- duroplastyczne (żywice epoksydowe),

– kauczuki syntetyczne (silikonowe, fluorowęglowodorowe, polisiarczkowe, kopolimery butadienu ze styrenem, polimery chloroprenu).

Spośród nich, do regeneracji elementów zniszczonych przez kawitację, najczęściej stosowane są żywice epoksydowe [3, 7]. Charakteryzują się one dużą adhezją, łatwością modyfikacji oraz nieskomplikowanym procesem technologicznym nakładania. Żywice epoksydowe jako materiał regeneracyjny znalazły zastosowanie do naprawy elementów przepływowych o skomplikowanych ukształtowaniach powierzchni, niszczonych niezbyt intensywną erozją kawitacyjną przy równocześnie silnie występującym zjawisku korozji. Naprawę uszkodzeń wykonuje się zazwyczaj odpowiednimi kompozycjami reagentów: żywicy, utwardzacza, rozcieńczalnika z dodatkiem napelniaczy. O jakości naprawy (wytrzymałości statycznej i dynamicznej tworzywa, jego odporności chemicznej i cieplnej oraz trwałości) decydują wzajemne proporcje składników, warunki utwardzania oraz technika powlekania. Istotną rolę odgrywa również konfiguracja podłoża (rozwiniecie powierzchni) oraz sposób jego przygotowania.

W IMP PAN wykonano szereg badań laboratoryjnych krajowych tworzyw epoksydowych, mających na celu określenie ich odporności na oddziaływanie erozji kawitacyjnej oraz przyczepności do podłoża. Badaniami objęto następujące tworzywa: żywice epoksydowe E5 i E51, klej epoksydowy E100, pastę epoksydową E410, kit epoksydowy E433 i żywicę poliestrową „Polimal” [6]. Poza tym przeprowadzono podobne badania mieszanin żywic E5, E4 i E52 oraz kitów epoksydowych Polikit 1 i Polikit 5 z napelniaczami w postaci proszków kwarcowych (SiO_2), elektrokorundowych (Al_2O_3), korundowych (SiC), niklowych (Ni) i żelazowych (Fe) [1]. Badaniu poddano również powłoki wykonane z mieszanin żywic epoksydowych z proszkami oraz wzmocnieniami w postaci tkaniny szklanej i siatki fosforobrazowej. Wyniki badań (wykonane na stanowiskach kawitacyjnych z wirującą tarczą oraz na urządzeniu magnetostrykcyjnym) wykazały, że tworzywa epoksydowe bez napelniaczy są mało wytrzymałe na erozję kawitacyjną. Dodatek napelniaczy w ilości $50 \div 70\%$ kilkakrotnie zwiększa wytrzymałość tworzywa. Spośród przebadanych napelniaczy, najlepszymi okazały się SiC , Al_2O_3 i SiO_2 . Zastosowanie wzmocnień w postaci kilku warstw tkaniny szklanej względnie siatki fosforobrazowej dodatkowo podwyższa odporność kawitacyjną oraz zwiększa udurowienie powłok. Badania wykazały również, że najlepszą trwałość wiązania tworzyw z podłożem uzyskuje się przy ich nakładaniu na powierzchnię silnie rozwinietą i oczyszczoną z pyłów i tłuszczu.

W oparciu o wnioski z badań, wykonanych na stanowiskach laboratoryjnych i w warunkach kawitacji naturalnej [6, 9], opracowano eksperymentalną technologię naprawy uszkodzeń kawitacyjnych, przy zastosowaniu tworzyw sztucznych, elementów przepływowych turbozespołów w E. W. Koronowo i E. P. Żydowo.

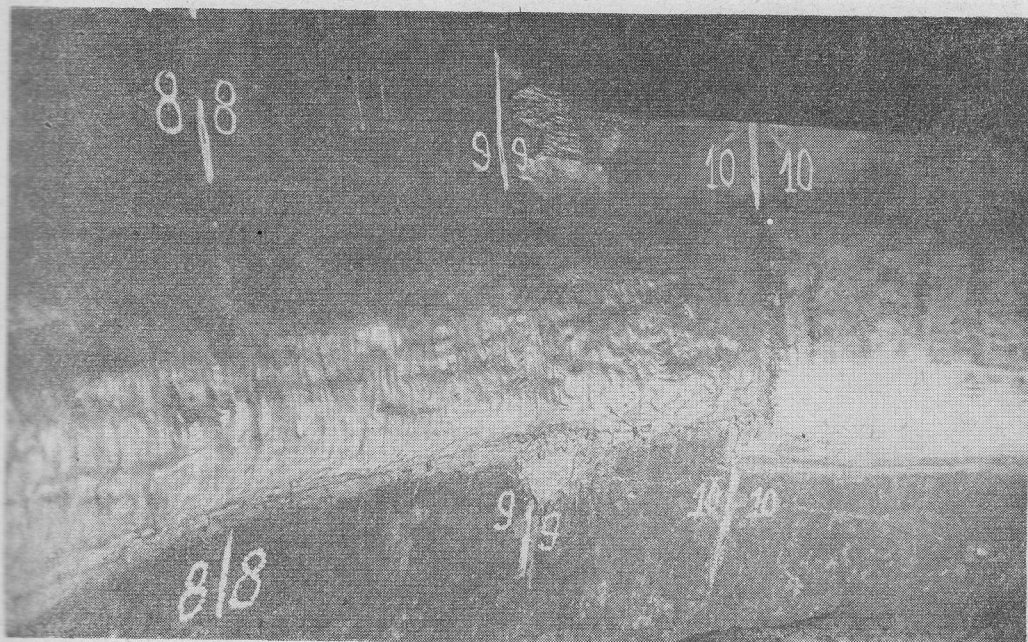
Naprawa uszkodzeń w E. W. Koronowo dotyczyła regeneracji części osłony (strefa $6 \div 10$ – rys. 9) wirnika turbiny H2. Po wypaleniu zerodowanego materiału, na osłonę nałożono warstwę podkładową z napoiny za pomocą napawania łukiem elektrycznym elektrodami ES18-8R. Przy napawaniu powierzchni osłony pozostawiono zagłębienie ($h=3$ mm) dla powłoki z tworzyw sztucznych. Przed nałożeniem tworzyw powierzchnię podkładu wyrównano zgrubnie poprzez szlifowanie oraz dokładnie odtłuszczono przy użyciu trójchloroetylenu.

Strefę regenerowaną osłony podzielono na cztery sektory (tab. 6). W poszczególnych

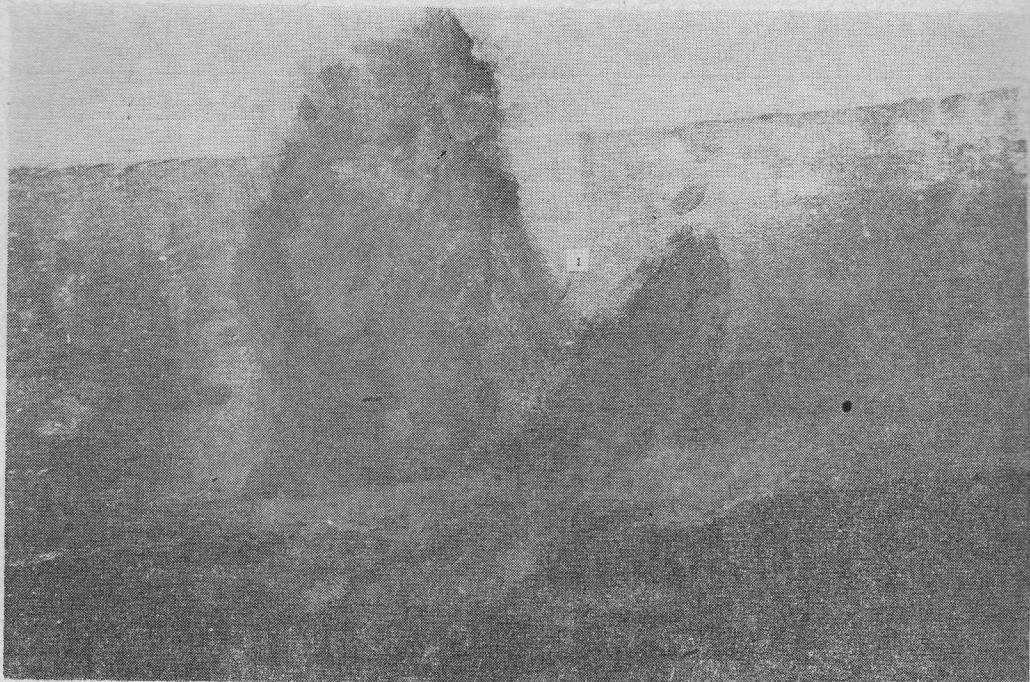
Tabela 6

Strefa 6÷10

Sektor 1	Sektor 2	Sektor 3	Sektor 4
Warstwa 1 – E5(Z-1)100 : 12,8 + + 50 % SiC – tkanina z włókna szklan.	Warstwa 1 – E52(Z-1)100 : 12,8 + + 50 % SiC – tkanina z włókna szklan.	Warstwa 1 – E52(Z-1)100 : 12,8 + + 50 % SiC – tkanina z włókna szklan.	Warstwa 1 – E5(PAC)1 : 1 + 50 % SiO ₂ – tkanina z włókna szklan.
Warstwa 2 – E5(Z-1)100 : 12,8 + + 60 % SiC – tkanina z włókna szklan.	Warstwa 2 – E52(Z-1)100 : 12,8 + + 60 % SiO ₂ – tkanina z włókna szklan.	Warstwa 2 – E52(Z-1)100 : 12,8 + + 60 % SiO ₂ – tkanina z włókna szklan.	Warstwa 2 – E5(PAC)1 : 1 + 50 % SiO ₂ – tkanina z włókna szklan.
Warstwa 3 – E52(Z-1)100 : 12,8 + + 60 % SiC	Warstwa 3 – E52(Z-1)100 : 12,8 + + 50 % SiO ₂	Warstwa 3 – E52(Z-1)100 : 12,8 + + 50 % SiO ₂ – tkanina z włókna szklan.	Warstwa 3 – E5(PAC)1 : 1 + 40 % SiO ₂ – tkanina z włókna szklan.
Warstwa 4 – E52(Z-1)100 : 12,8	Warstwa 4 – E52(Z-1)100 : 12,8	Warstwa 4 – E52(Z-1)100 : 12,8	Warstwa 4 – E52(Z-1)100 : 12,8



Rys. 15. Powierzchnia osłony wirnika regenerowana za pomocą żywic epoksydowych



Rys. 16. Powierzchnia łopatki wirnika maszyny odwracalnej po wykonanej naprawie uszkodzeń kawitacyjnych za pomocą żywic epoksydowych



Rys. 17. Powierzchnia płyty wirnika maszyny odwracalnej po wykonanej naprawie uszkodzeń kawitacyjnych za pomocą żywic epoksydowych

w turbinach wykonywano wielowarstwowe nakładanie powłok żywicami epoksydowymi E5 i E52 utwardzanymi utwardzaczem trójetylenoczteroaminowym Z1 i poliamidowym PAC. Jako napełniaczy użyto proszku korundowego i kwarcowego. Poszczególne warstwy żywicy przekładano tkaniną z włókna szklanego. Po nałożeniu poszczególnych warstw żywicy dotwardzano (stosując nagrzewanie strumieniem gorącego powietrza) i sezonowano (przez okres 4 dni). Na rys. 15 pokazano powierzchnie wirnika po wykonanej regeneracji żywicami epoksydowymi.

Próby zastosowania kompozycji żywicy epoksydowych (E5, E433, E410 i E51) z proszkami (kwarcowym, korundowym i elektrokorundowym) do naprawy uszkodzeń kawitacyjnych wykonano również w E. P. Żydowo [9]. Naprawom poddano łopatki wirnika turbiny TG-3 oraz piastę i łopatki wirnika maszyny odwracalnej TG-1. Na rys. 16 i 17 przedstawiono powierzchnię łopatki i piasty po wykonanej regeneracji uszkodzeń kawitacyjnych.

Ogłędziny nałożonych powłok z tworzyw epoksydowych, po określonych czasach pracy jednostek [8, 9], wykazały, że większość z nich uległa zniszczeniu. W przypadku napraw w E.P. Żydowo niepowodzenie można tłumaczyć niedotrzymaniem warunków założonej technologii. Żywice po nałożeniu nie poddano dotwardzeniu i sezonowaniu, że względu na brak czasu, wynikły z konieczności szybszego oddania turbozespołów do ruchu. W E.W. Koronowo na powierzchni osłony wirnika pozostały fragmenty powłok w sektorze 4 (tab. 6), gdzie do nałożenia zasadniczych warstw użyto kompozycji żywicy E5 z utwardzaczem PAC i napełniaczem proszkowym SiC. Zasadniczą przyczynę niekorzystnego wyniku eksperymentu należy upatrywać w niedostatecznej przyczepności tworzywa epoksydowego do podłoża. Zastosowana technologia napraw w E.P. Żydowo i E.W. Koronowo wymaga dalszego doskonalenia poprzez prowadzenie systematycznych badań laboratoryjnych i na obiektach hydroenergetycznych.

3.5. Odbiór prac regeneracyjnych

Po zakończeniu całości naprawy uszkodzeń kawitacyjnych należy dokonać szczegółowego odbioru wykonanych prac. Na wstępie, odbierający (względnie komisje odbioru) powinien zapoznać się z przebiegiem naprawy czerpiąc informacje z protokołów (notatek służbowych) spisanych po zakończeniu poszczególnych etapów naprawy. Protokoły te sporządza osoba nadzorująca remont z przedstawicielem bezpośredniego wykonawcy. W protokołach tych powinny być odnotowywane bieżące uwagi z przebiegu naprawy oraz dane dotyczące ewentualnych rozbieżności od zaplanowanego procesu technologicznego. W dalszym toku odbioru dokonuje się pomiarów i oględzin stanu powierzchni regenerowanej, w celu jej sprawdzenia pod względem:

- a) poprawności ukształtowania,
- b) gładkości,
- c) defektów (nieszczelność połączeń, pęknięcia i mikropełnięcia).

Poprawność ukształtowania sprawdza się drogą pomiarów geometrycznych elementów regenerowanych, porównując wyniki z dokumentacją techniczną tych elementów, względnie poprzez sprawdzanie kształtów za pomocą odpowiednich szablonów. W przypadku naprawy zewnętrznych krawędzi łopatek (kawitacja szczelinowa), jak również regeneracji

osłony wirnika, należy zwrócić szczególną uwagę na sprawdzenie wielkości luzów między tymi elementami.

Gładkość powierzchni w trakcie oględzin sprawdza się zgodnie z PN-71/M-01146.

Wymagane sprawdzenie szczelności połączeń oraz wykrycie ewentualnych pęknięć i mikropęknięć oraz innych ukrytych wad naprawianej powierzchni wykonuje się zazwyczaj za pomocą ultradźwiękowych defektoskopów.

Wszystkie uwagi dotyczące stanu regenerowanej powierzchni odnotowywane są w protokole końcowym, spisywanym w obecności przedstawicieli wykonawcy, nadzoru i zlecającego. Załącznikami do protokołu są notatki służbowe, spisywane po zakończeniu poszczególnych etapów naprawy oraz protokoły z badań defektoskopowych.

Do starannego przeprowadzenia i udokumentowania odbioru prac przykładać należy dużą uwagę. Zebranie bowiem obszernych materiałów dotyczących napraw uszkodzeń kawitacyjnych, pozwoli na wybranie najwłaściwszych technologii i metod postępowania, przyczyniając się do zwiększenia dyspozycyjności wodnych maszyn energetycznych.

Literatura

- [1] Antropik E., *Opracowanie procesu technologicznego na eksperymentalną naprawę pierścienia stalowego w E. W. Koronowo przy zastosowaniu tworzyw sztucznych, przeprowadzenie próbnej naprawy oraz ocena prób w E. P. Żydowo i E. W. Koronowo*. Opracowanie zewnętrzne IMP PAN, Gdańsk 1972.
- [2] Fiterman J., *Montaż i remont turbin wodnych*. PWN, Warszawa 1956.
- [3] Malmst A., *Cavitation damages on impellers of large turbines and storage pumps and their removal*. IAHR Symposium Lausanne, 8 - 11 Octobre, 1968.
- [4] Miliczenko S. L., *Riemont kawitacyjnych razruszenij gidroturbin*. „Energiya”, Moskwa 1971.
- [5] Reymann Z., Litorowicz J., Steller K., *Ocena zniszczeń kawitacyjnych maszyn hydraulicznych w EPS Żydowo*. Opracowanie zewnętrzne IMP PAN, Gdańsk 1973.
- [6] Steller K., *Badania nad odpornością tworzyw sztucznych na działanie kawitacji oraz uwagi na temat możliwości wykorzystania tworzyw sztucznych do zabezpieczenia i naprawy maszyn hydraulicznych uszkodzonych wskutek kawitacji*. Opracowanie zewnętrzne IMP PAN, Gdańsk 1972.
- [7] Steller K., *Wstępne wyniki badań nad odpornością tworzyw sztucznych na działanie kawitacji*. Prace IMP, z. 61, 1973.
- [8] Steller K., Reymann Z., *Badania nad technologią napraw elementów maszyn hydraulicznych uszkodzonych wskutek kawitacji. Sprawozdanie z przeglądu regenerowanej osłony wirnika turbiny H2 E. W. Koronowo po 1821 godz. pracy*. Opracowanie zewnętrzne IMP PAN, Gdańsk 1973.
- [9] Steller K., Reymann Z., Antropik E., Litorowicz J., *Sprawozdanie z I części badań nad technologią napraw elementów maszyn hydraulicznych uszkodzonych wskutek kawitacji*. Opracowanie zewnętrzne IMP-PAN, Gdańsk 1972.
- [10] Winnicki J., *Praca doświadczalno-badawcza w zakresie uruchomienia krajowej produkcji proszków do napawania (cz. II i III)*. PROREM, Gdańsk 1971.

Repairing Cavitational Damages to Water Turbines

Summary

Factors affecting the reliability of water turbines were discussed in the first part of the report. One of them is the resistance of flow parts to cavitation erosion. It was mentioned that the specific situation (water turbines are not built in this country) requires, among others, that modern methods

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.