

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

PRACE  
INSTYTUTU MASZYN  
PRZEPLYWOWYCH

TRANSACTIONS  
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

61

WARSZAWA—POZNAN 1973

---

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

---

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych  
w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględ-  
nieniem 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  
JÓZEF ŚMIGIELSKI · ANDRZEJ ŻABICKI

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

Copyright  
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe  
Warszawa 1973

Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE - ODDZIAŁ W POZNANIU

|                               |                                     |
|-------------------------------|-------------------------------------|
| Nakład 410+90 egz.            | Oddano do składania 22 VIII 1972 r. |
| Ark. wyd. 9,0. Ark. druk. 7,5 | Podpisano do druku 14 III 1973 r.   |
| Pap. druk. sat. kl. V, 62 g   | Druk ukończono w marcu 1973 r.      |
| Nr zam. 554/128               | D-4/155. Cena zł 27,-               |

DRUKARNIA UNIwersytetu IM. A. MICKIEWICZA W POZNANIU

KAZIMIERZ STELLER

Gdańsk

## **Wstępne wyniki badań nad odpornością tworzyw sztucznych na działanie kawitacji**

W pracy omówiono przydatność tworzyw sztucznych do ochrony i naprawy elementów maszyn przepływowych niszczonych przez kawitację oraz przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych nad zachowaniem się niektórych tworzyw produkcji krajowej w ośrodku kawitacyjnym. Opisane doświadczenia poprzedzają planowane badania statystyczno-eksploatacyjne zmierzające do ustalenia odporności różnych powłok ochronnych na działanie kawitacji.

### **1. Wstęp**

#### **1.1. Sformułowanie zagadnienia**

Maszyny hydrauliczne można zabezpieczyć całkowicie lub częściowo przed erozją kawitacyjną przez:

- usunięcie przyczyn wpływających na powstawanie i istnienie kawitacji (środkami konstrukcyjnymi i instalacyjno-ruchowymi),
- ograniczenie zakresu pracy, względnie sztuczną zmianę warunków pracy (np. przez podwyższenie ciśnienia w obszarze niskiego ciśnienia),
- użycie materiałów względnie powłok ochronnych odpornych na erozję kawitacyjną,
- stosowanie ochrony katodowej i inhibitorów oraz innych środków zmniejszających skuteczność oddziaływania kawitacji na materiał (np. napowietrzanie).

Oprócz zapobiegania i zmniejszania szkodliwych działań kawitacji, sprawą nie mniej ważną są zabiegi zmierzające do naprawy uszkodzeń spowodowanych erozją kawitacyjną. Sposoby naprawy mogą polegać na:

- wymianie elementów uszkodzonych,
- usuwaniu (wycinaniu) fragmentów uszkodzonych i zastępowaniu ich częściami nowymi (np. płytkami stalowymi o określonych kształtach i wymiarach),
- napawaniu powierzchni uszkodzonych za pomocą elektrod np. ze stali nierdzewnej lub z brązu glinowego,
- metalizacji natryskowej lub dyfuzyjnej,
- wypełnianiu ubytków materiałowych tworzywami sztucznymi (naprawa przez klejenie, kitowanie, powlekanie).

Celem niniejszej pracy jest zwrócenie uwagi na możliwość zastosowania tworzyw sztucznych do ochrony i usuwania uszkodzeń elementów maszyn przepływowych narażonych na działanie kawitacji.

Na wstępie podano kilka informacji ogólnych na temat przydatności użytkowej tworzyw sztucznych oraz niektóre wyniki badań obcych nad zastosowaniem tych materiałów w naprawie pomp wirowych i turbin wodnych. Z kolei przedstawiono wyniki badań własnych nad odpornością kawitacyjną wybranych tworzyw produkcji krajowej. Opisane doświadczenia zapoczątkowują cykl badań technologiczno-eksploatacyjnych zmierzających do wykorzystania tworzyw sztucznych w naprawie maszyn hydraulicznych (w przypadku ubytków materiałowych spowodowanych kawitacją).

### 1.2. Uwagi ogólne dotyczące zastosowania tworzyw sztucznych w budowie i naprawie maszyn

Pod pojęciem tworzyw sztucznych rozumiemy ogólnie wielocząsteczkowe związki organiczne pochodzące z syntezy chemicznej lub otrzymane w wyniku przemian (modyfikacji) produktów naturalnych. Jako substancje organiczne, tworzywa sztuczne są przeważnie odporne na korozję, a wiele z nich odznacza się bardzo dobrymi własnościami mechanicznymi, dobrą przyczepnością do metali, małym skurczem. Dobre własności techniczne szeregu tworzyw sprawiły, że w budowie maszyn przestały być materiałem zastępczym i są obecnie pełnowartościowym materiałem konstrukcyjnym o coraz szerszym zastosowaniu.

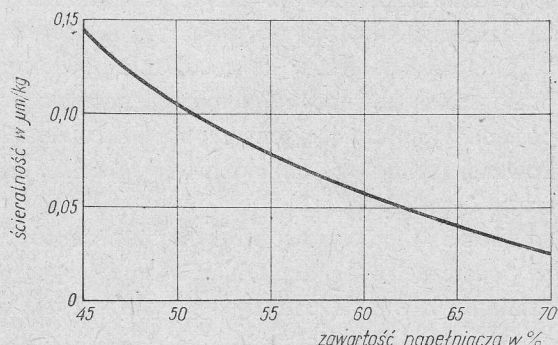
W budowie maszyn hydraulicznych stosowane są [2, 17] zarówno tworzywa termoplastyczne (polietylen, polichlorek winylu, poliamidy) jak i duroplastyczne (przede wszystkim żywice techniczne — głównie epoksydowe) oraz kauczuki syntetyczne (silikonowe, fluorowęglowodorowe, polisiarczkowe, kopolimery butadienu ze styrenem, polimery chloroprenu). Tworzywa są używane przeważnie do nakładania powłok ochronnych na wirniki, kierownice i korpusy pomp metodą natryskiwania płomieniowego i bezpłomieniowego, fluidyzacji oraz platerowania.

Do naprawy maszyn wykorzystuje się na ogół żywice fenolowe, poliestrowe, epoksydowe, poliamidowe i silikonowe. Najszerwsze zastosowanie znajdują żywice epoksydowe [14, 16], a to dzięki swym szczególnym własnościom wytrzymałościowym, dużej adhezji do innych materiałów, łatwej modyfikacji i prostej technologii. Naprawa uszkodzeń za pomocą klejów i kitów epoksydowych z powodzeniem zastępuje sposoby tradycyjne, tj. spawanie, napawanie, kołkowanie itp.

Uzupełnianie lub wypełnianie ubytków materiału za pomocą kleju lub kitu (pasty) wymaga oczywiście odpowiednich receptur technologicznych. Jakość naprawy (wytrzymałość statyczna i dynamiczna użytego tworzywa, jego odporność chemiczna i cieplna oraz trwałość) zależy bowiem od własności i wzajemnych proporcji reagentów mieszaniny: żywicy, utwardzacza, rozcieńczalnika i napełniacza oraz od warunków utwardzania i sposobu powlekania (w tym przygotowania podłoża). Na rys. 1 przedstawiono przykładowo ścieralność kitu epoksydowego w zależności od zawartości proszku korundowego, z którego wynika, że ze wzrostem ilości korundu zmniejsza się ścieralność kitu.

W kraju wytwarza się żywice epoksydowe o nazwie handlowej „Epidian”. Prócz żywic podstawowych (E1, E2, E3, E4 i E5) produkuje się żywice modyfikowane, np.

„Epidian 51”. Informacje na temat własności i zastosowań epidianów można znaleźć m. in. w informatorach „Chemiplastu” lub Zakładów Chemicznych „Sarzyna” oraz w pracach należących do serii wydawniczej „Tworzywa sztuczne” realizowanej przez Wydawnictwa Naukowo-Techniczne (np. [13]).



Rys. 1. Ścieralność utwardzonego kitu YES/Z-1 z napełniaczem w postaci proszku korundu w zależności od zawartości napełniacza (wg [14])

W Polsce żywice epoksydowe są stosowane zarówno w produkcji nowych urządzeń jak i w ich naprawie, m. in. w produkcji pomp przez Toruńskie Zakłady Budowy Urządzeń Chemicznych [17]. Prócz powłok z żywic epoksydowych (nakładanych metodą natrysku bezpłomieniowego) TZBUCh stosują na niektóre części pomp gumę o różnych twardościach oraz powłoki polietylenowe nakładane za pomocą natrysku płomieniowego i fluidyzacji.

## 2. Przegląd literatury

Stan literatury, dotyczącej zastosowań tworzyw sztucznych do ochrony maszyn hydraulicznych przed działaniem kawitacji oraz do naprawy uszkodzeń wywołanych erozją kawitacyjną, jest dość ubogi. W literaturze krajowej\* zagadnienie to nie było dotąd omawiane, a w literaturze zagranicznej można spotkać tylko nieliczne publikacje na ten temat.

Przedmiotem badań w ośrodkach zagranicznych [1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 11] były produkty polimeryzacji o łańcuchu węglowym, produkty o mieszanej strukturze cząsteczki (duropłasty i termopłasty) oraz kauczuki (elastomery).

Na uwagę zasługują tu prace Kallasa, Lichtmana, Chattena i Cochran [5, 8] nad zastosowaniem pokryw elastomerycznych do naprawy elementów statków uszkodzonych przez kawitację. W wyniku badań autorzy stwierdzili, że elastomery charakteryzujące się dużą wytrzymałością na rozciąganie, dużym wydłużeniem oraz małą histerezą napięciową, są odporne na erozję kawitacyjną. Zadowalające wyniki uzyskano podczas naprawy zniszczonej śruby okrętowej z brązu manganowo-niklowego ciekłym neoprenem (polimer chloroprenu). Neopren nakładano warstwami (21 warstw), przy czym czas

\* Nad zastosowaniem tworzyw sztucznych w produkcji nowych maszyn oraz w ich naprawie prowadzi się w kraju prace naukowe i wdrożeniowe w różnych instytutach naukowo-badawczych i przemysłowych, zakładach doświadczalnych, biurach konstrukcyjno-technologicznych i laboratoriach fabrycznych. Nie dotyczą one jednak badań nad odpornością tworzyw sztucznych na zjawisko kawitacji.

utwardzania każdej warstwy wynosił 60 min. Łączna grubość wszystkich warstw wynosiła 35 mm, a czas sezonowania naprawionej śruby — 7 dni.

Z późniejszych badań Lichtmana [10] wynika, że neopren ustępuje innym produktom polimeryzacji. Na podstawie doświadczeń z 25-oma rodzajami pokryw autor stwierdził, że polimery o nazwie „Polyurethane PET i PNI” wykazują lepszą odporność na działanie kawitacji od polimerów „Neoprene NS i NL”.

Odnośnie do celowości stosowania powłok gumowych do ochrony elementów maszyn przed erozją kawitacyjną zdania są podzielone. Na ogół przeważa pogląd, że guma nie posiada wystarczającej przyczepności do materiałów chronionych [9, 12], wymaga skomplikowanej technologii nakładania [6] oraz nie należy do tworzyw o dużej odporności na erozję kawitacyjną [12].

Hobbs [2], oceniając względną odporność kawitacyjną niektórych tworzyw sztucznych na podstawie obserwacji zmian występujących w warstwie wierzchniej próbek poddanych działaniu kawitacji, uszeregował badane przez siebie materiały w następującej kolejności:

| Lp. | Tworzywo                    | Względna odporność na erozję kawitacyjną |
|-----|-----------------------------|------------------------------------------|
| 1   | Poliamid „Nylon”            | doskonała                                |
| 2   | Polietylen wysokoudarowy    | doskonała                                |
| 3   | Polietylen „Alkathene”      | bardzo dobra                             |
| 4   | Polipropylen „Propathene”   | bardzo dobra                             |
| 5   | Poliamid „Nylatron”         | dobra                                    |
| 6   | Policzterofluoroetylen PTFE | dostateczna                              |
| 7   | PCW „Darvic”                | dostateczna                              |
| 8   | Kopolimery chlorku winylu   | zła                                      |

Dla porównania autor podaje, że według przyjętej skali ocen należałoby brąz aluminiowy zakwalifikować do materiałów bardzo dobrych, stal nierdzewną do dobrych, mosiądz do dostatecznych, a stop aluminiowy do złych.

Kriweczenko i inni [6], przedstawiając w roku 1968 na sympozjum w Lozannie wyniki kilkuletnich badań radzieckich\*, poinformowali o wyselekcjonowaniu spośród szeregu tworzyw poddawanych niszcącemu działaniu kawitacji kompozycji opartej na elastomerze GEN-150 z dodatkiem proszku korundowego (napelniacz w ilości 30÷40 cz. wag.) oraz kompozycji E-4020 opartej na żywicy epoksydowej. Autorzy wskazują, że powłoki z tych tworzyw charakteryzują się dobrymi własnościami fizycznymi, prostą technologią nakładania na elementy o skomplikowanych kształtach oraz że chronią materiał rodzimy przed uszkodzeniem przez okres nie krótszy od okresu międzyremontowego (określonego planem remontów).

O doświadczeniach z zakresu naprawy uszkodzeń kawitacyjnych w maszynach hydraulicznych informuje również Malamet [11]. Autor ten przez szereg lat badał skuteczność różnych metod renowacji pompy o mocy 32 MW i turbiny o mocy 43 MW zainstalowa-

\* Badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych i w naturze — w zakładach hydroenergetycznych i stacjach pomp. Tworzywami sztucznymi pokrywano zarówno łopatki wirników jak i kierownic turbin wodnych Francisa oraz pomp śmigłowych.

nych w elektrowni szczytowej Geesthacht na rzece Łabie. Na tej podstawie doszedł do wniosku, że zabiegiem efektywnym i ekonomicznie uzasadnionym jest powlekanie uszkodzonych elementów tworzywami sztucznymi w odstępach rocznych lub dwuletnich. Autor zaleca następujący tok postępowania podczas naprawy:

- dokładne oczyszczenie powierzchni uszkodzonej,
- elektryczne szorstkowanie powierzchni gładkich przylegających do obszarów zniszczonych,
- nałożenie pierwszej powłoki podkładowej (minia + ciekła żywica epoksydowa),
- wdmuchiwanie w nieutwardzoną jeszcze powłokę gruntową korundu o średnicy ziaren od 0,3 do 0,5 mm,
- nałożenie lepiszcza otrzymanego przez zmieszanie kleju poliamidowego z napelniaczem mineralnym,
- nałożenie trzech warstw substancji składającej się ze smoły węglowej, żywicy epoksydowej i utwardzacza z dodatkiem nieaktywnych napelnaczy.

W literaturze przedmiotu można też spotkać opinie krytyczne na temat stosowania tworzyw sztucznych dla zabezpieczenia elementów maszyn przed erozją kawitacyjną [7, 15]. Poglądy te są jednak odosobnione. Na ogół panuje zgodność co do tego, że ochrona elementów i usuwanie uszkodzeń za pomocą substancji organicznych jest rozwiązaniem lepszym od rozwiązań tradycyjnych – metody spawania i napawania. Najczęściej wskazuje się na celowość stosowania substancji organicznych tam, gdzie obok kawitacji o małym natężeniu występuje korozja, a szczególnie tam, gdzie udział korozji w procesie niszczenia materiału konstrukcyjnego jest bardzo znaczny. Zwraca się też uwagę na pilną potrzebę systematycznych badań i gromadzenia doświadczeń z różnymi tworzywami oraz na opracowywanie syntez coraz to nowszych tworzyw, które będą wymagały oceny również ze względu na odporność kawitacyjną.

### 3. Przedmiot i sposób przeprowadzania badań

Przedmiotem badań były powłoki z żywicy sztucznych o grubości od 1,5 do 2 mm nakładane na próbki ze stali węglowej konstrukcyjnej zwykłej jakości. Badania dotyczyły następujących tworzyw:

- żywicy epoksydowej E5, składającej się z żywicy podstawowej Epidian 5 i utwardzacza w postaci trójetylenoczteroaminy,
- kompozycji epoksydowej E51, otrzymanej z modyfikacji żywicy epoksydowej E5 przez dodanie rozcieńczalnika w postaci ftalanu dwubutyłowego,
- kleju epoksydowego E100, składającego się z żywicy podstawowej Epidian 1 i utwardzacza dwucyjanodwuamidu,
- pasty epoksydowej E410, składającej się z żywicy Epidian 4, ciekłych środków modyfikujących w postaci ftalanu dwubutyłowego i alkoholu benzyłowego oraz proszku aluminium jako napelnacza,
- kitu epoksydowego E433, złożonego z dwóch podstawowych składników: żywicy Epidian 4, ciekłych środków modyfikujących i proszku kwarcytowego jako napelnacza oraz z modyfikowanego utwardzacza aminowego o nazwie handlowej „Utwardzac T”,

- żywicy poliestrowej „Polimal” (w oparciu o Polimal 109), tj. roztworu poliestru maleinowego w styrenie, utwardzanego za pomocą nadtlenu heksanonu oraz przyspieszacza naftenianu kobaltu,
- miękkiego polichlorku winylu.

Powierzchnie próbek przeznaczone do pokrycia były toczone zgrubnie (chropowatość powierzchni odpowiadała V4), a niektóre z nich dodatkowo szorstkowano przez nawiercanie wgłębień względnie nacinanie rys. Obrobione w ten sposób powierzchnie zmywano trójchloreoetylenem. Kompozycje przeznaczone do nakładania przygotowywano zgodnie z zaleceniami producentów żywic. Również pozostałe zabiegi technologiczne, takie jak powlekanie, utwardzanie i dotwardzanie, były przeprowadzone według wskazówek zawartych w instrukcjach fabrycznych.

Badania przeprowadzono na stanowiskach laboratoryjnych Zakładu Dynamiki Cieczy Instytutu Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku, a mianowicie na urządzeniu magnetostrykcyjnym i z wirującą tarczą. Parametry charakteryzujące pracę stanowisk są następujące:

Urządzenie magnetostrykcyjne:

|                             |                                                   |
|-----------------------------|---------------------------------------------------|
| częstość drgań              | $\approx 6000$ c/s                                |
| amplituda drgań             | $\approx 55$ $\mu\text{m}$                        |
| moc wejściowa (nominalna)   | 250 W                                             |
| średnica próbek             | 16 mm                                             |
| głębokość zanurzenia próbki | 3 mm                                              |
| ciecz                       | woda wodociągowa o temp. $18 \pm 1^\circ\text{C}$ |

Urządzenie z wirującą tarczą:

|                                               | wykonanie A              | wykonanie B             |
|-----------------------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| średnica osadzenia wzbudników i próbek        | 240 mm                   | 240 mm                  |
| rodzaje wzbudników i ich wymiary              | sworznie o średnicy      |                         |
|                                               | 16 mm                    | 8 mm                    |
| średnica i ilość próbek jednocześnie badanych | 24 mm, 8 $\times$        | 15 mm, 6 $\times$       |
| prędkość obrotowa tarczy                      | 2100 obr/min             | 2930 obr/min            |
| moc silnika napędowego                        | 7,5 kW                   | 10 kW                   |
| temperatura wody                              | $20 \pm 1^\circ\text{C}$ | max. $40^\circ\text{C}$ |

Na stanowisku magnetostrykcyjnym badano próbki z powłokami epoksydowymi E51 i E433 nakładanymi na powierzchnie gładkie i szorstkowane. Poddawano je działaniu kawitacji przez okres 150 min. Przebieg zniszczeń rejestrowano za pomocą pomiaru ubytków masy próbek w czasie (próbki ważono po każdych 30 min ekspozycji) oraz za pomocą obserwacji wizualnych.

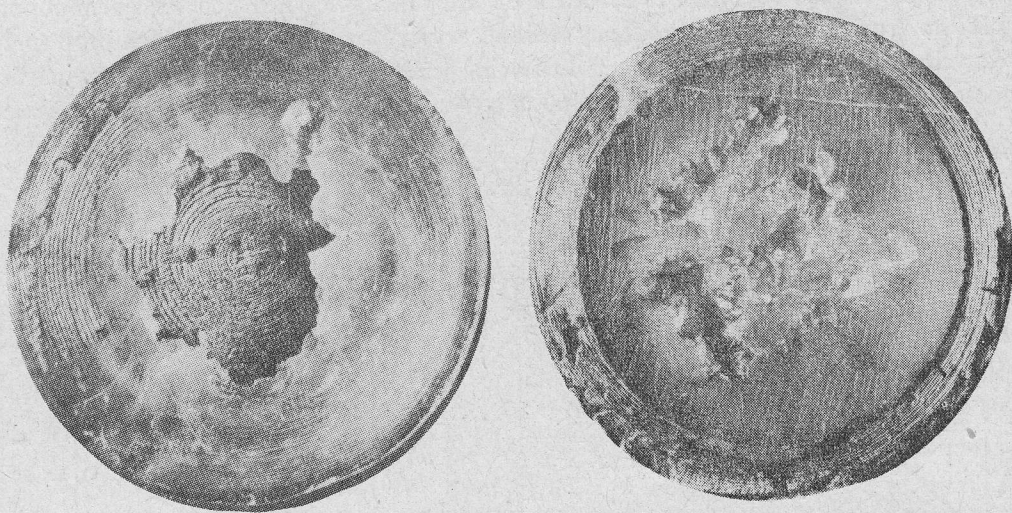
Tworzywa epoksydowe E51 badano również na stanowisku z wirującą tarczą (w wykonaniu A). Powlekano nimi gładkie i chropowate powierzchnie płaskich zagłębień w próbkach stalowych. Czas badań próbek wynosił 30 godzin. Efekty oddziaływania kawitacji na tworzywo nie były wymierne. W związku z tym, zrezygnowano z ilościowego określania zniszczeń, ograniczając się do obserwacji wizualnych procesu erozji.

Pozostałe żywice sztuczne badano na stanowisku z wirującą tarczą w wykonaniu B. Wszystkie powierzchnie powlekane były gładkie; próbki stalowe nie miały wgłębień i obrzeży zapewniających lepszą przyczepność powłok do metalu. Czas ekspozycji na

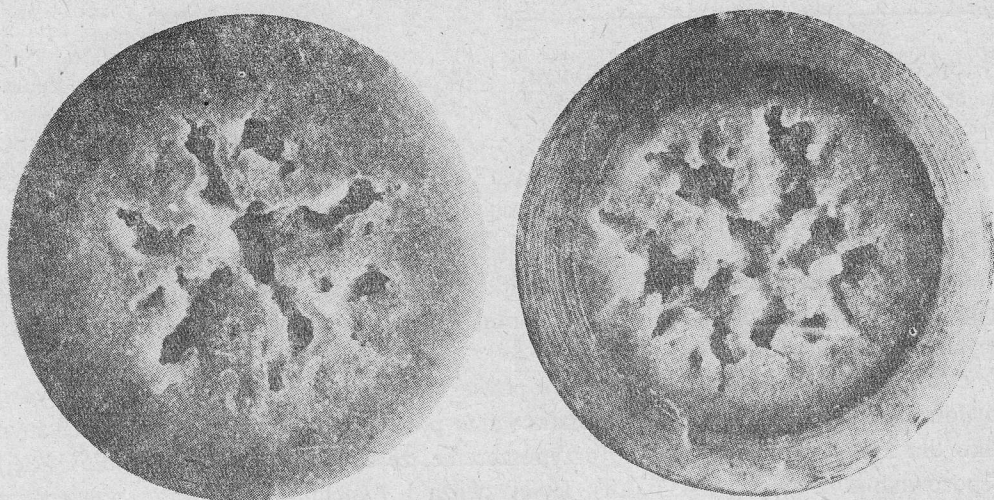
stanowisku zależał od przebiegu erozji kawitacyjnej i nie przekraczał 8 godzin. Zachowanie się badanych tworzyw podczas działania kawitacji oceniano na podstawie obserwacji wizualnych.

#### 4. Wyniki badań

Wyniki badań przedstawiono w formie zdjęć wskazujących na sposób niszczenia badanych tworzyw, wykresów ilustrujących wpływ czasu działania kawitacji na ubytki objęściowe żywic epoksydowych E51 i E433 oraz spostrzeżeń z obserwacji wizualnych.



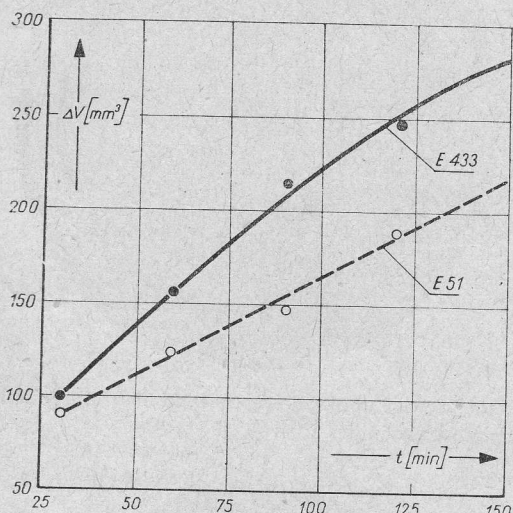
Rys. 2. Obrazy uszkodzonych powłok z modyfikowanej żywicy epoksydowej E51 po 150 min badań na stanowisku magnetostrykcyjnym



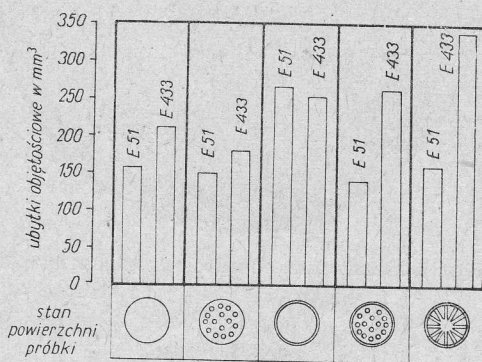
Rys. 3. Obrazy uszkodzonych powłok z kitu epoksydowego E433 po 150 min badań na stanowisku magnetostrykcyjnym

Na rys. 2 i 3 przedstawiono kilka zdjęć próbek z powłokami epoksydowymi E51 i E433 po 150 min badań na stanowisku magnetostrykcyjnym. Jak łatwo zauważyć obrazy zniszczeń obydwu żywic nie są jednakowe. W powłokach z E433 wystąpiły wżery głębokie, charakterystyczne dla materiałów miękkich i ciągliwych, natomiast w powłokach z E51 odpryski, charakterystyczne dla materiałów twardych i kruchych. Te wrażenia wzrokowe, wskazujące na łatwiejszą penetrację uszkodzeń kawitacyjnych w głąb tworzywa podatniejszego na odkształcenia plastyczne, nie stanowią oczywiście wystarczającej podstawy do porównywania odporności obu żywic.

Porównania takie umożliwiają ubytki objętościowe badanych tworzyw. I tak np. z rysunku 4 można odczytać, że żywica E433 ustępuje żywicy E51 pod względem odporności na erozję kawitacyjną. Podobny wniosek wypływa z analizy wszystkich prób (przy różnych strukturach powierzchni zwilżanych), jeśli za miarę odporności przyjmujemy początkowe okresy niszczenia, np.  $t < 100$  min (rys. 5). Wówczas ocena wypadnie również



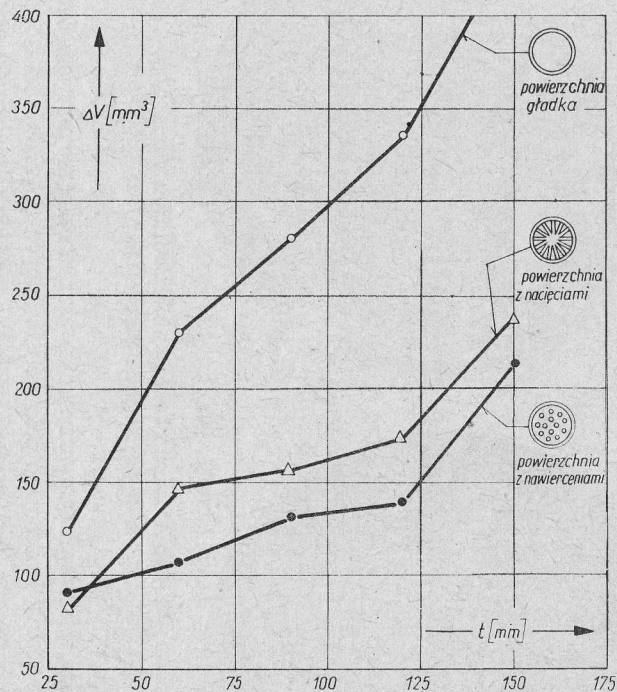
Rys. 4. Wpływ czasu ekspozycji na stanowisku magnetostrykcyjnym na ubytki objętościowe tworzyw epoksydowych E51 i E433, nałożonych na gładką powierzchnię próbki stalowej



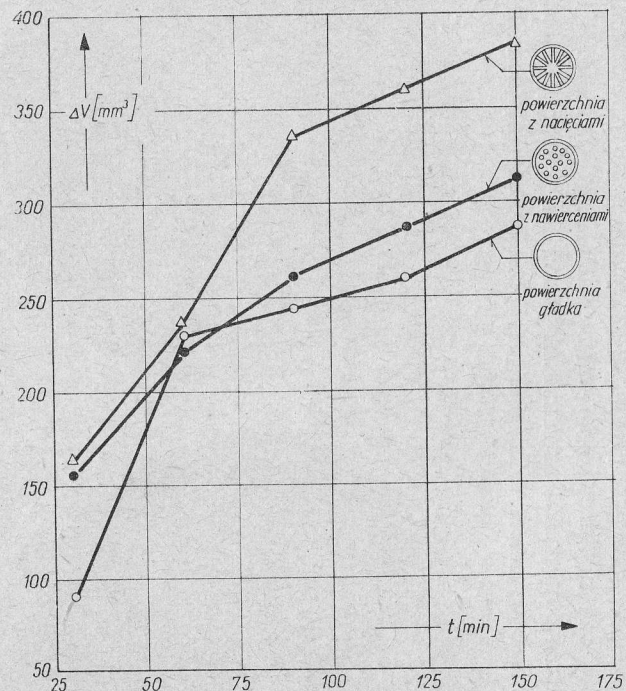
Rys. 5. Ubytki objętościowe tworzyw epoksydowych E51 i E433 (nałożonych na różne przygotowane powierzchnie), zarejestrowane po 90 min badań na stanowisku magnetostrykcyjnym

na korzyść żywicy E51. Ten fakt skłania do przypuszczeń, że powłoki z tworzyw o dobrych właściwościach mechanicznych, takich jak np. wytrzymałość na rozciąganie i uderzenie, będą skuteczniej przeciwstawiały się działaniu kawitacji od powłok z tworzyw wykazujących własności mierne.

Z kolei przy ocenie wpływu struktury powierzchni zwilżanych na odporność obydwu powłok okazuje się (rys. 6 i 7), że szorstkowanie powierzchni jest zabiegiem skutecznym tylko dla żywicy E51. Nasuwa się przypuszczenie, że żywica nieutwardzana E51 (klej), w porównaniu z żywica E433 (kit), lepiej zwilża i wypełnia nierówności powierzchni próbki, a więc tworzy warunki sprzyjające wzrostowi adhezji mechanicznej. Należy dodać i to, że przy powlekaniu kitem istnieje zawsze obawa, że nie wypełni on ostrych zagłębień



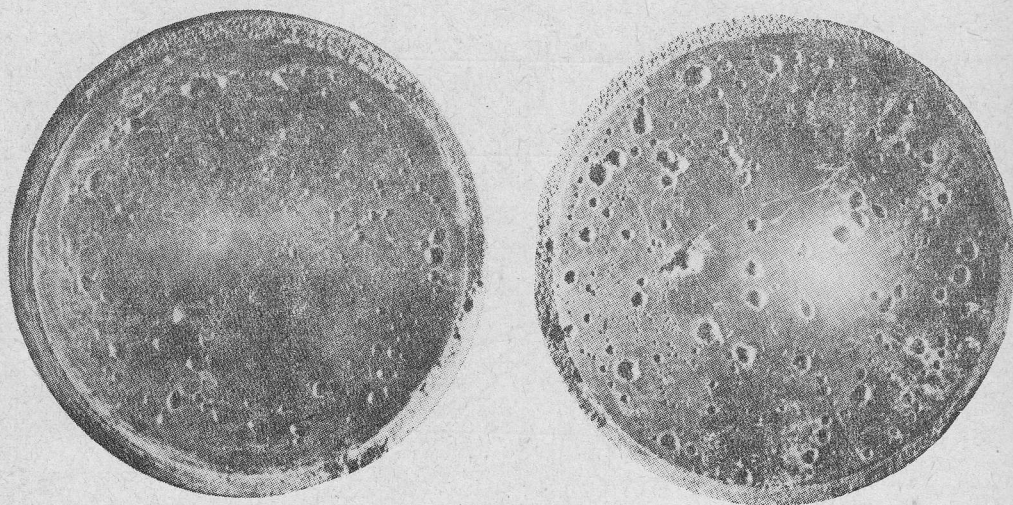
Rys. 6. Wpływ stanu powierzchni próbki przygotowanej do łączenia z modyfikowaną żywicą epoksydową E51 na zmianę ubytków objętościowych tej żywicy badanej na stanowisku magnetystrycyjnym



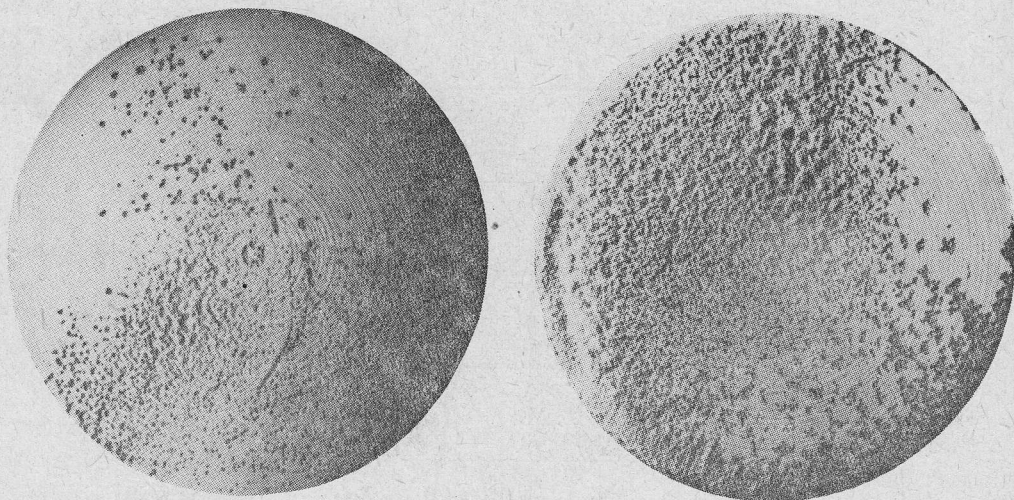
Rys. 7. Wpływ stanu powierzchni próbki przygotowanej do łączenia z kitem epoksydowym E433 na zmianę ubytków objętościowych tego tworzywa badanego na stanowisku magnetystrycyjnym

i nie wyprze zawartego tam powietrza. Wówczas maleje nie tylko współczynnik zwilżalności, lecz część powietrza zamkniętego we wgłębieniach ulega sprężaniu.

Inny obraz zniszczeń powłok E51 uzyskano na stanowisku z wirującą tarczą (rys. 8). Ten stan jest oczywiście wynikiem różnicy między przebiegiem i natężeniem kawitacji



Rys. 8. Przykłady uszkodzonych powłok z modyfikowanej żywicy epoksydowej E51 po badaniach na stanowisku z wirującą tarczą (w wykonaniu A)



Rys. 9. Próbką z aluminium (PA3) po badaniach na stanowisku z wirującą tarczą; a) po 6 godz. ekspozycji, b) po 30 godz. ekspozycji

na obu stanowiskach. W omawianym przypadku uszkodzenia nie przyjęły formy „odprysków” i dużych wżerów, lecz postać pęknięć i lokalnych ubytków rozłożonych mniej lub bardziej równomiernie na powierzchni czołowej próbki. Obraz uszkodzeń jest też inny od obrazu jaki uzyskano w tych samych warunkach na próbkach metalowych (rys. 9).

Różnica polega na tym, że na próbkach metalowych wżery kawitacyjne leżały blisko siebie i w miarę upływu czasu ekspozycji łączyły się ze sobą, powodując dość równomierne niszczenie warstwy wierzchniej, natomiast w przypadku powłok epoksydowych poszczególne wżery są wyodrębnione.

Jak wiadomo, żywice epoksydowe należą do grupy wielocząsteczkowych związków organicznych i składają się z cząsteczek przestrzennie usieciowanych. Podczas przerobu tworzywa i powstawania makrocząsteczek mogą oczywiście wystąpić nieprawidłowości w samym procesie wiązań chemicznych uzasadniające pojawienie się miejsc „słabych”, a więc miejsc o mniejszej adhezji specyficznej i bardziej podatnych na niszczenie [4]. Powstawanie miejsc „słabych” może być spowodowane także skurczem tworzywa, jego kruchością oraz istnieniem pod warstwą wierzchnią powłoki drobnych pęcherzyków powietrza. Podstawą tych przypuszczeń jest zarówno rozkład wżerów na powierzchni powłoki — wzdłuż widocznych „gołym” okiem skaz powierzchniowych — jak i ich kształt sferyczny. Na uwagę zasługuje i to, że nie wszystkie spośród badanych próbek (z powłokami nakładanymi na powierzchnie gładkie i szorstkowane) zachowywały się podobnie. Część z nich (około 20%) traciła swe powłoki po upływie kilku względnie kilkunastu godzin pracy. Wśród tych próbek nie było jednak takich, których powierzchnie poddawano szorstkowaniu. Odrzwanie żywicy od podłoża mogło nastąpić m. in. wskutek niestannego powlekania próbek (gorsza przyczepność) oraz wskutek penetracji wody i załączków kawitacji w głąb tworzywa, między powłoką a materiałem chroniony.

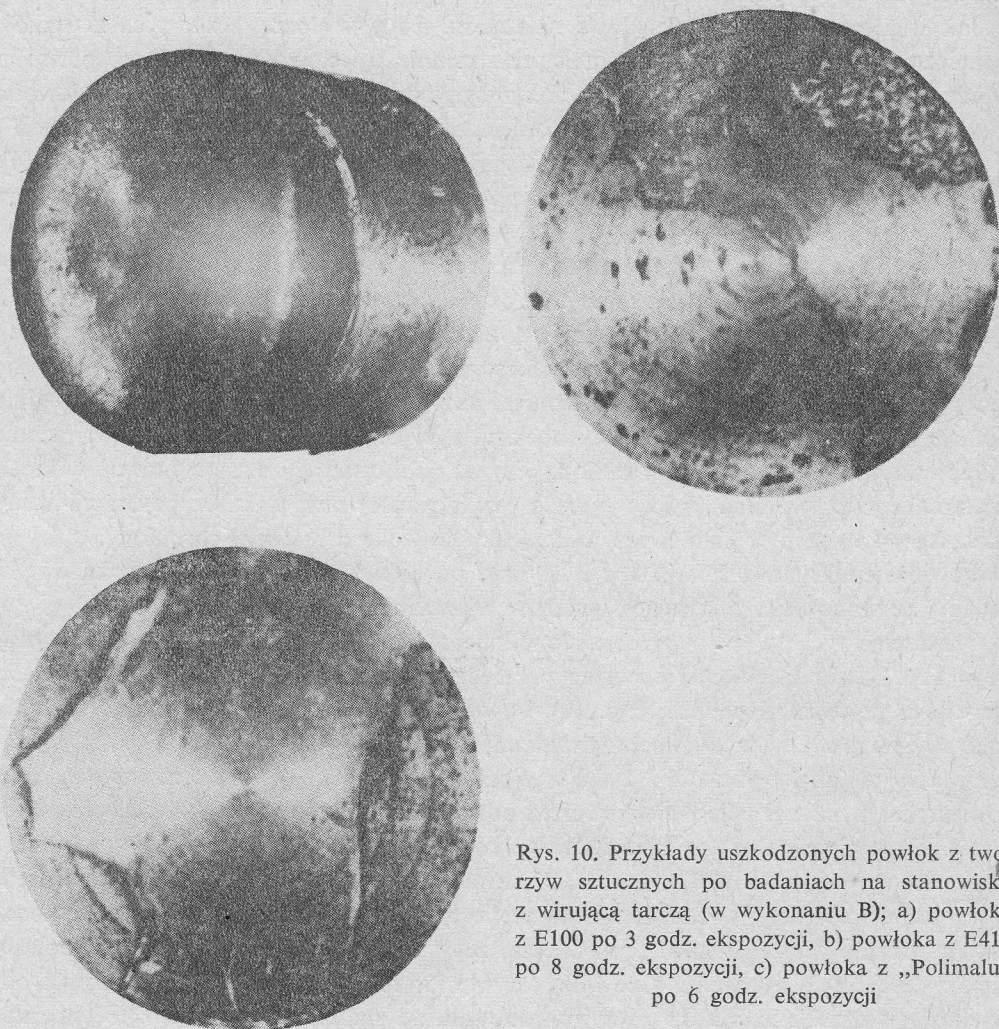
Powłoki epoksydowe E5, E100 i E410 oraz powłoki z poliestru i polichlorku winylu badano na stanowisku z wirującą tarczą w wykonaniu B.

Niszczenie tych tworzyw przebiegało odmiennie niż niszczenie tworzywa epoksydowego E51. Uszkodzenia miały postać pęknięć i odprysków względnie oderwań części lub całych powłok od podłoża (rys. 10). Powodem tego był m. in. brak zabezpieczenia strefy przejściowej tworzywo-metal przed uderzeniami kawitacyjnymi (próbki z powłokami E51 posiadały obrzeża i żywica wypełniała wgłębienia) oraz niekorzystny stan powierzchni zwilżanych (niektóre próbki z powłokami E51 miały powierzchnie szorstkowane). Oczywiście na proces niszczenia wpływały również parametry pracy stanowiska. Stanowisko w wykonaniu B wytwarzało kawitację o większym natężeniu (większa prędkość obrotowa tarczy i wyższa temperatura cieczy obiegowej) od stanowiska w wykonaniu A. Wzrost natężenia kawitacji oznacza, że w omawianym przypadku występowały większe obciążenia dynamiczne powłok\*, a więc warunki sprzyjające pęknięciom i odpryskom. Wyższa temperatura cieczy powodowała też zmniejszenie sił międzycząsteczkowych w tworzywie, a więc spadek wytrzymałości tworzywa na ścinanie i rozrywanie.

Częściowym uzasadnieniem dla opisanego sposobu niszczenia powłok może być mechanizm łączenia tworzywa z próbką stalową. Chodzi tu zarówno o adsorpcję makrocząsteczek na powierzchni materiału jak i o różnice między własnościami fizykochemicznymi i strukturalnymi poszczególnych stref złącza, a mianowicie: kohezijnej strefy utwardzonego tworzywa, przypowierzchniowej strefy utwardzonego tworzywa, strefy granicznej, przypowierzchniowej strefy materiału próbki i kohezijnej strefy próbki. O wytrzymałości

\* Jak wiadomo produkty epoksydowe zaleca się stosować do pracy przy obciążeniach statycznych lub prawie statycznych, wywołujących bardzo małe odkształcenia.

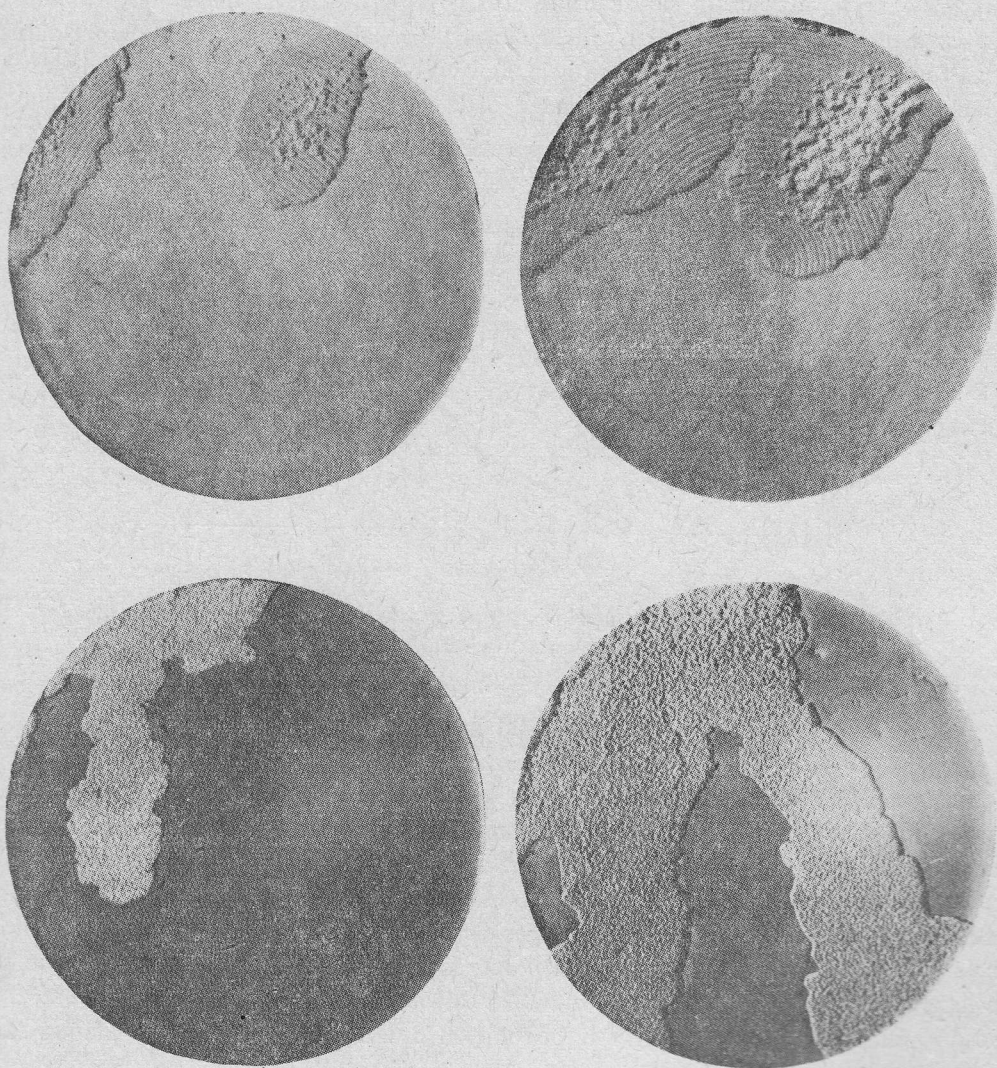
złącza decyduje oczywiście najsłabsza strefa. Gdy istnieje możliwość atakowania przez pęcherzyki kawitacyjne takiej strefy oraz warstewki adsorpcyjnej, wówczas należy liczyć się z uszkodzeniem powłoki w formie odprysku, względnie oderwania.



Rys. 10. Przykłady uszkodzonych powłok z tworzyw sztucznych po badaniach na stanowisku z wirującą tarczą (w wykonaniu B); a) powłoka z E100 po 3 godz. ekspozycji, b) powłoka z E410 po 8 godz. ekspozycji, c) powłoka z „Polimalu” po 6 godz. ekspozycji

Warto nadmienić, że przedstawione i opisane tu uszkodzenia nie należą do wyjątków. Prowadzone w Zakładzie Dynamiki Ciecży IMP prace nad odpornością kawitacyjną żywic lakierniczych wykazały, że dla wszystkich badanych przypadków\* przebieg uszkodzeń był podobny — niszczenie następowało wskutek oddzielania się warstw ochronnych od metalu. Kilka obrazów takich uszkodzeń (próbki po badaniach na stanowisku z wirującą tarczą) przedstawiono na rys. 11.

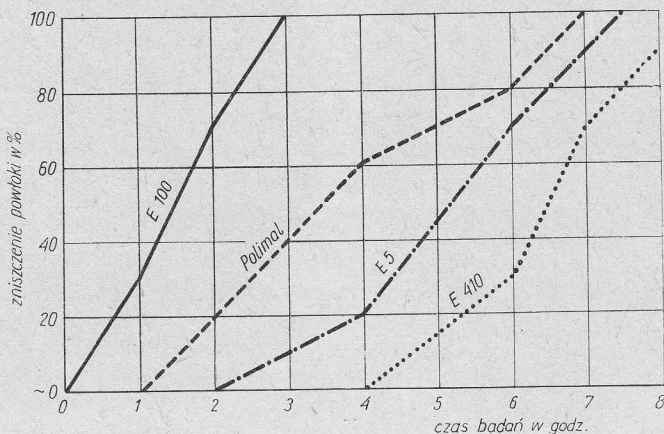
\* Zbadano kilkadziesiąt próbek aluminiowych pokrytych różnymi żywicami lakierniczymi. Powłoki te nakładano na powierzchnie po toczeniu, stosując różne technologie powlekania.



Rys. 11. Obrazy niektórych próbek pokrytych żywicami lakierniczymi po badaniach na stanowisku z wirującą tarczą

Względną odporność omawianych tworzyw na działanie kawitacji oceniano na podstawie zmian na powierzchniach próbek zachodzących podczas badań na stanowisku doświadczalnym. Za miarę zniszczenia przyjmowano pole powierzchni materiału odsłonięte przez odprysk powłoki. Stan próbek kontrolowano w odstępach jednogodzinnych. Do oceny przyjmowano uszkodzenia średnie, określone na podstawie badań trzech podobnych próbek w tych samych warunkach. Wyniki tej przybliżonej oceny przedstawiono wykreślić na rys. 12. Widać stąd, że spośród badanych tworzyw na wyróżnienie zasługuje kompozycja epoksydowa E410 oraz z pewnym zastrzeżeniem żywica E5. Powłoki z pozo-

stałych tworzyw odznaczały się znacznie gorszą odpornością na działanie kawitacji\*, przy czym powłoka z polichlorku winylu okazała się najgorszą i zupełnie nieprzydatną do zastosowania w przepływie z kawitacją. Powłoki z PCW (zbadano sześć podobnych próbek) już po kilkunastu minutach badań oddzielały się od podłoża.



Rys. 12. Zniszczenia niektórych powłok z tworzyw sztucznych pod wpływem kawitacji na podstawie badań na stanowisku z wirującą tarczą w wykonaniu B

## 5. Wnioski końcowe

Już wstępne rozeznanie zachowania się krajowych tworzyw sztucznych w ośrodku kawitacyjnym wskazuje, że niektóre z nich mogą być wykorzystane do ochrony elementów przed szkodliwym działaniem kawitacji oraz do naprawy uszkodzeń spowodowanych erozją kawitacyjną. O wyborze tworzywa powinna decydować, prócz wytrzymałości mechanicznej i adhezji (mechanicznej i specyficznej), jego odporność na szybkozmienne obciążenia dynamiczne charakteryzujące proces kawitacji. Ta ostatnia cecha musi jednak nawiązywać do rodzaju i natężenia zjawiska kawitacji. Świadczy o tym choćby różny sposób uszkodzeń tych samych lub podobnych żywic epoksydowych na stanowisku magnetostrykcyjnym i z wirującą tarczą.

Szczególną rolę należy też przypisać procesowi technologicznemu — w tym przygotowaniu powierzchni pod tworzywo. W ostatnim przypadku chodzi zarówno o stan podłoża jak i o strefę brzegową między tworzywem a materiałem elementu konstrukcyjnego.

Z zebranego materiału doświadczalnego wynika, że spośród zbadanych tworzyw sztucznych żywice epoksydowe E51 i E410 wyróżniają się dość dobrą odpornością na działanie kawitacji. To stwierdzenie nie określa jednak (przynajmniej w stopniu wystarczającym) przydatności technicznej tych tworzyw. Należy pamiętać bowiem o tym, że nie istnieją bezwzględne wskaźniki odporności kawitacyjnej. Już niewielkie odchylenia od obranych warunków

\* Jeden z recenzentów tej pracy zwraca uwagę, że „może zmiana cech geometrycznych podłoża dostarczyłaby nowych informacji na temat przydatności tych tworzyw” (przyp. Red.).

ków badań dotyczące czasu, szybkości, temperatury cieczy czy kształtu badanej próbki, mogą prowadzić do różniących się znacznie wyników. W związku z tym, tylko w nielicznych przypadkach można określić z całą pewnością, że własności „kawitacyjne” danego tworzywa stwierdzone w laboratorium będą adekwatne do jego zachowania się w warunkach naturalnych. W większości przypadków decydujące znaczenie będzie miało próbne zastosowanie i obserwacja zachowywania się tworzywa podczas eksploatacji maszyny hydraulicznej — w razie potrzeby przez dłuższy okres czasu.

Dlatego też w planie dalszych prac nad odpornością tworzyw sztucznych na działanie kawitacji przewiduje się zarówno badania laboratoryjne jak i badania statystyczno-eksploatacyjne. Równoległe prowadzenie badań dwiema metodami, a przede wszystkim możliwość weryfikacji wyników badań laboratoryjnych, stwarza podstawę dla lepszego poznania mechanizmu niszczenia tworzyw w różnych warunkach kawitacyjnych, ustalenia optymalnych dla danych warunków zaleceń technologicznych oraz opracowania zasad dla szerszego niż dotąd stosowania tworzyw sztucznych w maszynach hydraulicznych.

Praca wpłynęła do Redakcji w kwietniu 1972 r.

#### Literatura

- [1] Ph. Eisenberg, H. S. Preiser, A. Thiruvengadam, *On the mechanism of cavitation damage and methods of protection*. Transactions SNAME, vol. 73, 1965.
- [2] J. M. Hobbs, *Hydraulic cavitation erosion of plastics*. ASME Cavitation Forum — 1967.
- [3] G. Hoff, G. Langbein, H. Rieger, *Material Destruction due to Liquid Impact. Erosion by Cavitation or Impingement*. ASTM Special Technical Publication No. 408, 1967.
- [4] R. Houwink, *Elastizität, Plastizität und Struktur der Materie*. 2 Aufl. T. Steinkopf, Dresden 1957.
- [5] D. H. Kallas, J. Z. Lichtman, C. K. Chatten, *Cavitation erosion resistant coatings*. Proceedings Seventh Joint Army-Navy-Air Force. Conference on Elastomeric Research and Development. ONR-13, vol. 2, 1962.
- [6] G. I. Kriwczenko, V. Y. Karelin, A. I. Danisow, Y. I. Warskoj, *Study on cavitation in hydraulic machine elements and some methods of their protection against cavitation damage*. IAHR Symposium Lausanne, 8 - 11 Octobre, 1968.
- [7] W. Lechner, Discussion — Paper H 1/1, IAHR Symposium Lausanne, 1968.
- [8] J. Z. Lichtman, D. H. Kallas, C. K. Chatten, E. P. Cochran, *Cavitation Erosion of Structural Materials and Coatings*. Corrosion, vol. 17, 1961.
- [9] J. Z. Lichtman, E. R. Weingram, *Cavitation Damage Design Handbook*. U.S. Naval Applied Science Laboratory, Laboratory Project 9300-17, Final Report, September 30, 1964, AD 460 - 524.
- [10] J. Z. Lichtman, *Cavitation Damage Resistance and Adhesion of Polymeric Overlay Materials*. Characterization and Determination of Erosion Resistance. ASTM STP474, 1970.
- [11] A. Malamet, *Cavitation damages on impellers of large turbines and storage pumps and their removal*. IAHR Symposium Lausanne, 8 - 11 Octobre, 1968.
- [12] J. Noskiewiç, *Kavitace*. Akademia, Praha 1969.
- [13] H. Saechtling, W. Zebrowski, *Tworzywa sztuczne*. Poradnik. WNT, Warszawa 1966.
- [14] R. Sikora, *Tworzywa epoksydowe w naprawie maszyn*. WNT, Warszawa 1971.
- [15] W. Thuss, Discussion — Paper H 1/1. IAHR Symposium Lausanne, 1968.
- [16] H. Winiecki, M. Kukliński, *Regeneracja pomp masami szpachlowymi opartymi na żywicach epoksydowych*. Ochrona przed korozją, z. 4, 1966.
- [17] *Tworzywa niemetalowe w budowie pomp*. Biuletyn Informacyjny Centralnego Ośrodka Badawczo-Koordynacyjnego Pomp, Nr 1, Warszawa 1968.

## Предварительные результаты исследования сопротивляемости искусственных материалов действию кавитации

### Резюме

В работе обсуждается пригодность искусственных материалов для предохранения и ремонта элементов гидравлических машин, повреждаемых кавитацией, а также представляются результаты собственных исследований поведения некоторых материалов отечественного производства в кавитационной среде.

Описанным опытам предшествуют планируемые статистическо-эксплуатационные исследования, которые будут основой для проверки результатов лабораторных исследований и позволят разработать соответствующие технологические указания.

Во вступлении указывается на труды Калласа, Лихтмана, Хоббса, Кривченки, Маламета и других, посвященные применению искусственных материалов для предохранения элементов, подвергаемых действию кавитационной эрозии.

Затем дается информация о результатах лабораторных исследований, проведенных в Отделе гидродинамики Института проточных машин ПАН в г. Гданьске. Исследования проводились на магнитоэрикторном стенде и на стенде с вращающимся диском (в двух вариантах). При помощи магнитоэрикторного устройства исследовались эпоксидные оболочки E51 и E433, наложенные на углеродистую конструкционную сталь обычного качества. Процесс кавитационных повреждений регистрировался методом замера убыли материала во времени (рис. 4, 5, 6 и 7), а также наблюдения изменений происходящих на поверхностях образцов (рис. 2 и 3).

На стенде с вращающимся диском исследовались оболочки из эпоксидной смолы E5, эпоксидной композиции E51 (рис. 8), E100 и E410 (рис. 10а и 10б), а также из полиэфирной смолы „Полималь” (рис. 10с) и из мягкого полихлорвинила. Оценка этих оболочек, с точки зрения их сопротивления действию кавитации, проводилась на основе наблюдения развития повреждений во времени (рис. 12).

Из полученных результатов сделан вывод, между прочими, о механизме разрушения материалов различной прочности, о неодинаковой прочности оболочек, подвергаемых быстропеременным динамическим нагрузкам, о зависимости между интенсивностью разрушения образцов и интенсивностью явления кавитации (на очередных экспериментальных стендах), о влиянии структуры смазываемых поверхностей на адгезию оболочек и их поведение в похожих кавитационных условиях.

Результаты экспериментальных исследований указывают на возможность использования некоторых из исследуемых материалов для предохранения элементов, подвергаемых действию кавитации, а также для устранения повреждений, вызванных этим действием. В частности, доказано, что эпоксидные смолы E51, E433, и E410, характеризуясь высшей „кавитационной” прочностью, чем остальные, могут применяться для восстановления элементов гидромашин. Одновременно подчеркивается, однако, что этот вывод не определяет технической пригодности перечисленных материалов, так как небольшие даже отклонения от определенных экспериментальных условий, касающиеся времени, скорости, температуры жидкости или формы исследуемого образца, могут привести к значительно отличающимся результатам. В связи с этим обращается внимание на факт, что в большинстве случаев решительный вывод о „кавитационных свойствах” данного материала можно будет сделать после испытания в натуральных условиях, даже, в случае необходимости в течение более длительного периода времени.

## Primary Results of Tests on Resistance of Plastics to Cavitation

### Summary

The applicability of plastics for protection and repairs of the elements of hydraulic machines exposed to cavitation damage is discussed. Some results of the tests on the behaviour of materials manufactured in this country in the cavitation environment are quoted. These tests are a prelude

to planned statistical and field examination, to be a base for the verification of the laboratory experiments as well as for outlining the appropriate technological recommendations.

In the introduction, works by Kallas, Lichtman, Hobbs, Kriwczenko, Malamet and others are indicated as those devoted to the application of plastics as a protection against the cavitation erosion.

Next, the results of laboratory tests made in the Hydrodynamic Department of the Institute of Fluid-Flow Machines in Gdańsk are described. The tests have been carried out on a magnetostriction and rotating-disc test rigs (two modifications of the latter were used). Coatings made of E51 and E433 epoxy resins deposited on ordinary carbon steel have been examined on the magnetostriction rig. The development of cavitation damage was recorded by measuring the time loss of plastic (figs. 4, 5, 6 and 7) as well as by observing the changes occurring on the surfaces of the testpieces (figs. 2 and 3). The rotating disc test-rig was used to test the coatings of epoxy resin E5, epoxy composition E51 (fig. 8), E100 and E410 (figs. 10a and b), those of polyester resin „Polimal” (fig. 10c) and soft P.C.V.

The applicability of the coating for protection against cavitation was evaluated from the recorded time variation of damage (fig. 12).

The observations collected have allowed to draw conclusions relative to the mechanism of damage to materials of different strength properties, the uneven resistance of the tested coatings to dynamic load varying rapidly, the relation between the rate of damage and the cavitation intensity (on individual test rigs), the influence of wetted surface structure on the adhesion of coatings and their behaviour under different conditions of cavitation.

As indicated by the experimental data, some of the tested materials may be used for anti-cavitation protection and for repairing the damages caused by the phenomenon. It has been stated, among others, that E51, E433 and E410 epoxy resins manifest higher „anti-cavitation” properties than the others. Consequently, these materials may be taken into consideration as those applicable for repairs of the elements of hydraulic machines. At the same time it has been emphasized that the above statement is not sufficient for general applicability of the named materials. Small deviations in the testing conditions (concerning the test duration, velocity and temperature of the liquid, shape of the test-piece) may lead up to considerable differences in the test results. Consequently, the determination of the „cavitation properties” should in most cases be based on the tests made under natural conditions and, if necessary, over a longer time period.