

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

64

WARSZAWA—POZNAŃ 1974

P A Ń S T W O W E W Y D A W N I C T W O N A U K O W E

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPLYWOWYCH

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

*

**THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW
MACHINERY**

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

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

REDAKCJA — EDITORIAL OFFICE
Instytut Maszyn Przepływowych PAN
ul. Gen. Józefa Fiszera 14, 80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, tel. 41-02-13

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1974

Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE — ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 400+90 egz.

Oddano do składania 10 X 1973 r.

Ark. wyd. 11,75. Ark. druk. 9,125

Podpisano do druku 18 V 1974 r.

Papier druk. sat. kl. V, 70 g

Druk ukończono w maju 1974 r.

Nr zam. 689/226.

D-4/448. Cena zł 36,—

DRUKARNIA UNIWERSYTETU IM. A. MICKIEWICZA W POZNANIU

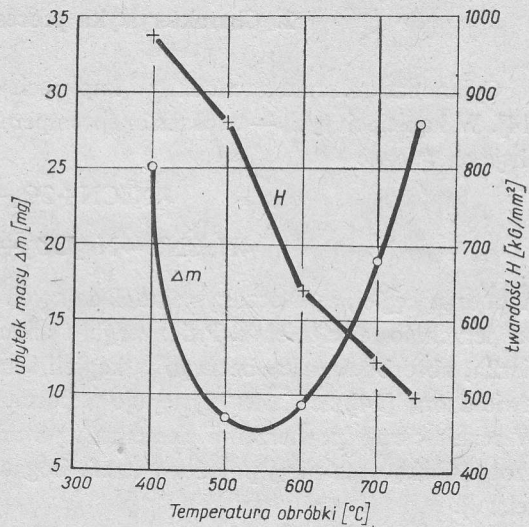
TADEUSZ KRZYSZTOFOWICZ, KAZIMIERZ STELLER

Gdańsk

Odporność cyjanonasiarczanych stali niskowęglowych na działanie kawitacji

1. Wstęp

W celu zwiększenia trwałości maszyn i urządzeń hydraulicznych narażonych na działanie kawitacji stosuje się różne sposoby i środki zmierzające do ochrony elementów tych maszyn przed erozją kawitacyjną [2, 3, 6, 9, 10]. Między innymi stosuje się pokrycia*) — metaliczne i niemetaliczne — nakładane na materiał konstrukcyjny za pomocą natrysku, łuku elektrycznego, procesów cieplnych, chemicznych, elektrolitycznych itd.



Rys. 1. Wpływ temperatury obróbki warstwy niklowej na jej twardość i odporność na działanie kawitacji według [1]

Odporność elementów stalowych na działanie kawitacji można podwyższyć stosując np. powłoki chromowe i niklowe. Na ten fakt wskazują m. in. wyniki badań A. Riabczenkowa i innych [11]. Autorzy ustalili, że próbki ze stali 20 wykazują po 3 godzinach

*) Naprawę elementów uszkodzonych wskutek kawitacji przeprowadza się na ogół za pomocą napawania (stalą nierdzewną lub brązem aluminiumowym) oraz platerowania. Na uwagę zasługują jednak tendencje [2, 5, 6] zmierzające do szerszego niż dotąd stosowania tworzyw elastomerycznych i proszków metali.

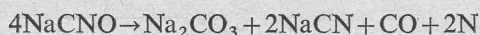
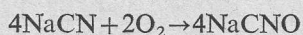
badań ubytek masy 128,7 mg, zaś pokryte niklem (grubość powłoki 50 μm) i obrabiane ciepłnie zaledwie 6 mg. Stwierdzono również, że wygrzewanie próbek zmniejsza wprawdzie twardość powłok niklowych, lecz jednocześnie polepsza ich odporność na działanie kawitacji (rys. 1). Skutek ten przypisuje się przede wszystkim korzystnym zmianom strukturalnym i wytrzymałościowym zachodzącym w warstwie niklu podczas obróbki cieplnej w temperaturze od 500 do 600°C.

Do nowych metod wytwarzania powłok ochronnych należy zaliczyć metalizację dyfuzyjną metodą elektrolityczną [2]. Dyfuzja pożądanego metalu, np. chromu do stali konstrukcyjnej, odbywa się pod wpływem elektrolizy przeprowadzanej w wysokiej temperaturze. W ogniwie elektrolitycznym, zawierającym roztwór roztopionych soli fluorkowych, obrabiany materiał jest katodą, zaś materiał z którego ma być utworzona powłoka — anodą. Odpowiednio dobrany materiał anody dyfundując do katody wytwarza na niej warstwę o żądanych własnościach.

W niniejszej pracy określono wpływ cyjanonasiarczania niskowęglowych stali konstrukcyjnych na ich odporność przeciw kawitacji. Jak wiadomo [4, 8, 13], siarkoazotowanie polepsza odporność stali węglowych na zużycie i zacieranie powierzchniowe, powoduje wzrost jej twardości oraz wytrzymałości zmęczeniowej, a także zwiększa odporność stali na korozję cierną. Z tych względów przypuszcza się, że proces cyjanonasiarczania (Sulfiniz*), może być brany pod uwagę jako jeden ze sposobów ochrony elementów maszyn przed erozją kawitacyjną.

2. Charakterystyka procesu cyjanonasiarczania

Cyjanonasiarczanie zachodzi w kąpielach cyjankowych z dodatkiem siarczku sodu [14]. W kąpielach tych — w określonej temperaturze — przebiegają m. in. następujące reakcje chemiczne



Azot oraz węgiel, wytworzony wskutek dalszych reakcji chemicznych, dyfundują do warstwy powierzchniowej elementu. Prócz węgla i azotu do warstwy wierzchniej dyfunduje także siarka, absorbowana z obecnego w kąpeli siarczku sodu. Na podstawie analizy fazowej stwierdzono [14], że siarka występuje w postaci siarczków manganu MnS i żelaza Fe_2S_3 . W rezultacie na powierzchni elementu wytwarza się cienka warstewka bogata w węgiel, azot i siarkę oraz niżej położona strefa bogata w azot (występujący w postaci azotków żelaza).

Proces cyjanonasiarczania stosowany w Zakładach Urządzeń Okrętowych „Hydroster” w Gdańsku składa się z następujących operacji:

— podgrzewanie elementu w piecu elektrycznym do temperatury 300 - 400°C,

*) Proces technologiczny cyjanonasiarczania został opracowany i opatentowany po II wojnie światowej we Francji przez Société d'Application des Traitements de Surface. Patent francuski zakupił brytyjski koncern Imperial Chemical Industrie i uzyskał dla tego procesu ochronę patentową pod nazwą Cassel i Sulfiniz. Proces ten jest stosowany w Polsce — na prawach podlicencji — w Zakładach Urządzeń Okrętowych „Hydroster” w Gdańsku od połowy 1970 r. [8].

- wygrzewanie w kąpieli solnej (cyjankowej z siarczkiem sodu) w temperaturze $570 \pm 10^\circ\text{C}$.
- chłodzenie elementu na powietrzu lub w gorącej wodzie,
- usuwanie soli z elementu przez płukanie w wodzie o temperaturze 90°C .

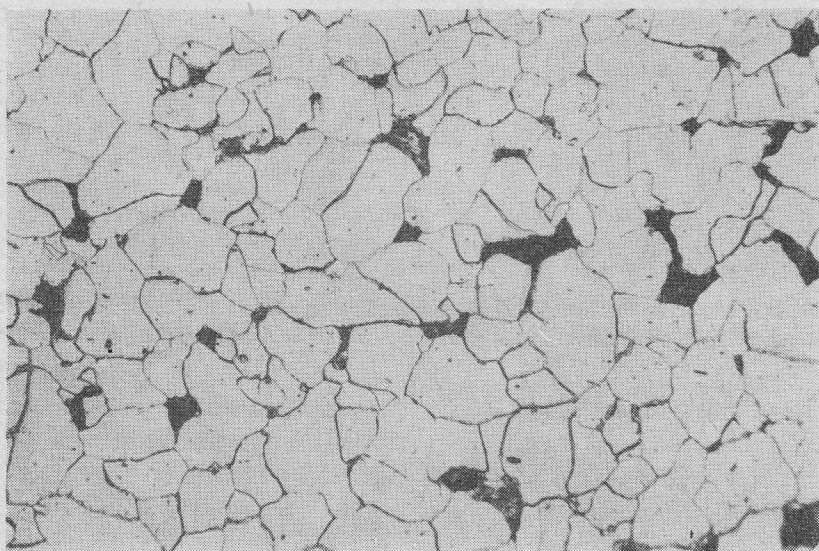
W celu polepszenia jakości powierzchni, obrabiany element poddaje się trawieniu w 10%-owym roztworze kwasu solnego (przez okres $6 \div 10$ s). Zabieg ten pociąga za sobą konieczność ponownego płukania elementu (w zimnej wodzie) oraz zobojętniania kwasu pozostałego na elemencie.

W wyniku cyjanonasiarczania powierzchni elementu następuje wzrost odporności na zacieranie powierzchniowe i zużycie oraz zwiększenie wytrzymałości na zmęczenie.

3. Badania doświadczalne

Odporność cyjanonasiarczanych stali niskowęglowych na działanie kawitacji określa się za pomocą badań próbek na stanowisku magnetostrykcyjnym. Miarą odporności był ubytek masy próbek po określonym czasie ich ekspozycji na stanowisku badawczym.

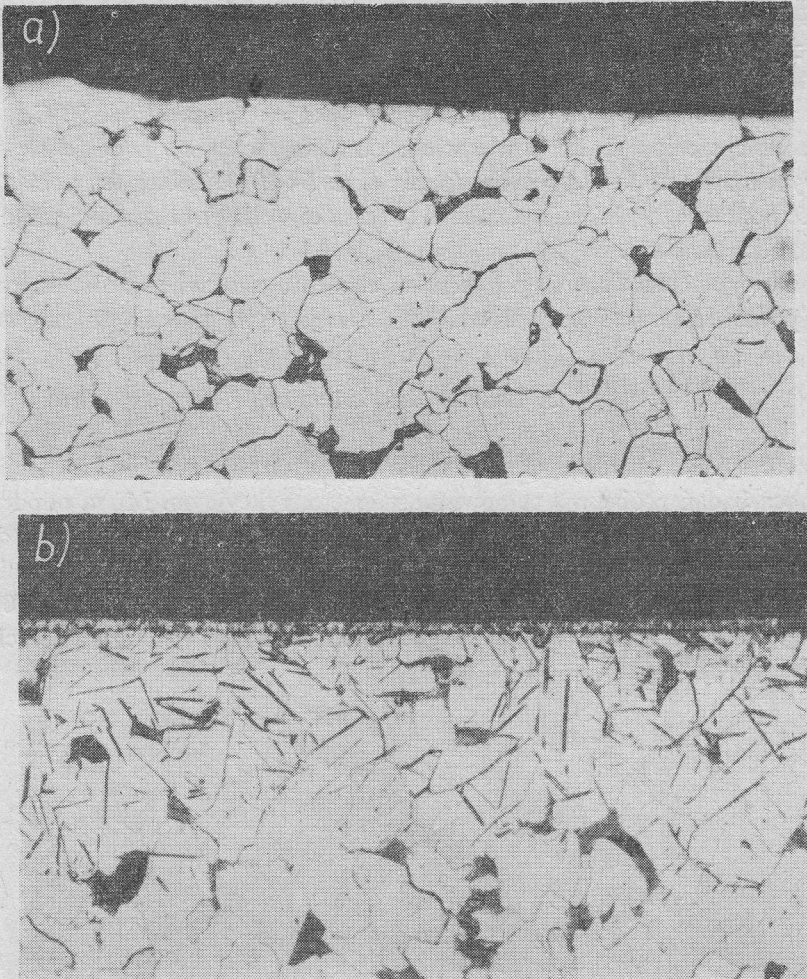
Próbki użyte do badań wykonano ze stali St 3 (rys. 2). Część z nich była w stanie normalizowanym, część po cyjanonasiarczaniu, w kąpieli solnej o temperaturze 570°C . Czas wygrzewania próbek w kąpieli wynosił 1,6 godziny. Próbki po wyjęciu z kąpieli chłodzono na powietrzu.



Rys. 2. Stal St 3. trawiona roztworem HNO_3 w alkoholu, struktura rdzenia próbki, powiększenie $250 \times$

Pod wpływem tego procesu w mikrostrukturze warstw wierzchnich próbek zaszły wyraźne zmiany. Zakres tych zmian jest widoczny jeśli porówna się zgłady trawione próbek — przed (rys. 3a) i po cyjanonasiarczaniu (rys. 3b).

W pierwszym przypadku widoczne są w całym przekroju ziarna ferrytu i perlitu, w dru-



Rys. 3. Stal St 3, trawiona roztworem NH_3OH w alkoholu, powiększenie $250\times$; a) warstwa powierzchniowa próbki normalizowanej, b) warstwa powierzchniowa próbki cyjanonasiarczanej

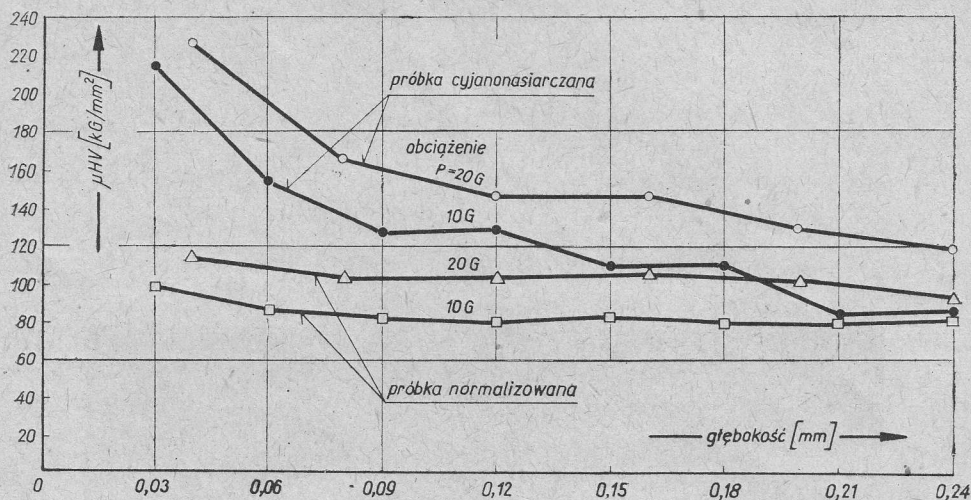
gim natomiast widoczna jest cienka warstwa wierzchnia, znacznie grubsza warstwa przypowierzchniowa zawierająca azotki, a następnie niezmienniona struktura ferrytyczno-perlityczna. Igły azotków sięgają na głębokość około 0,15 mm.

Proces cyjanonasiarczania wpłynął na utwardzenie warstw wierzchnich, co ujawniono za pomocą pomiaru mikrotwardości. Mikrotwardość mierzona na głębokości 0,05 mm była dla próbek po cyjanonasiarczaniu o około 100% większa od mikrotwardości próbek normalizowanych (rys. 4).

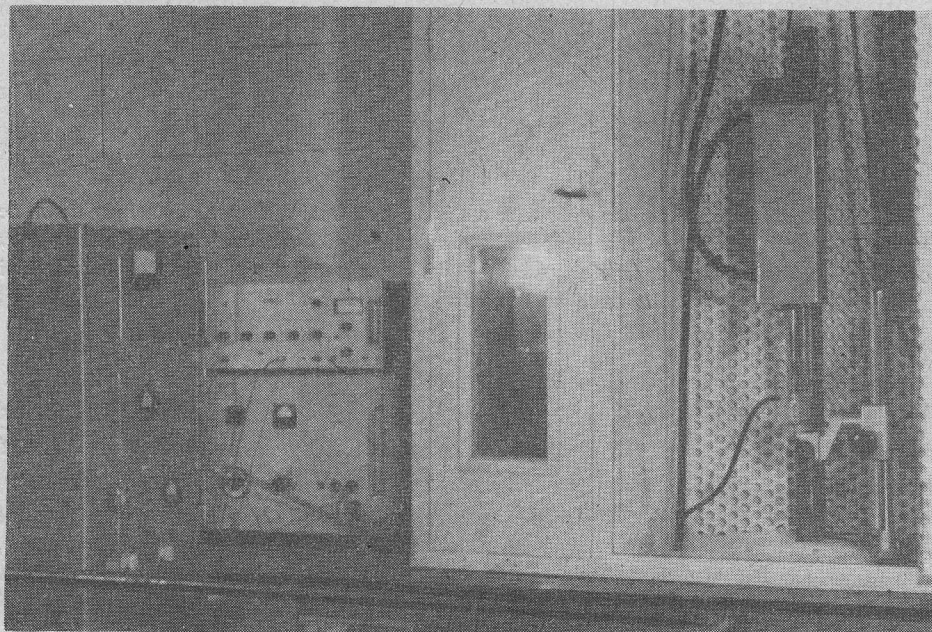
Badania niszczące przeprowadzono za pomocą przetwornika magnetostrykcyjnego (rys. 5) o częstotliwości drgań $f \approx 6000$ Hz. Mocowane na końcu koncentratora próbki miały średnicę 16 mm i były zanurzone w wodzie wodociągowej na głębokość 3 mm. Amplituda drgań próbek wynosiła 55 μm . Czas trwania pojedynczej próby wahał się przeważnie w granicach od 5 do 15 min, a całkowity czas ekspozycji wyniósł 180 min.

Po każdej próbie ustalano masę próbki z dokładnością do 0,2 mg. Na tej podstawie określano zależność między ubytkiem masy próbek a czasem ich ekspozycji na stanowisku badawczym. W celu uzyskania możliwie wiernego obrazu zmian występujących między odpornością stali normalizowanej i cyjanonasiarczanej, próby powtarzano trzykrotnie.

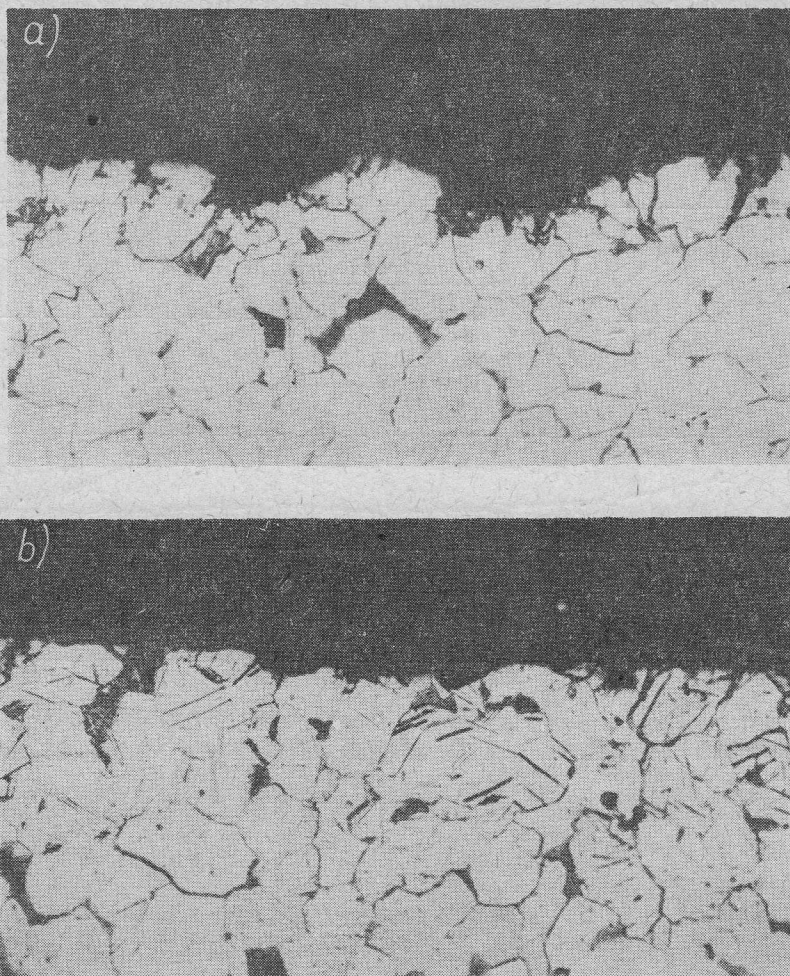
Na niektórych przebadanych próbkach wykonano zglądy, które po trawieniu ujawniły



Rys. 4. Mikrotwardość warstw powierzchniowych próbek ze stali St 3 (w stanie normalizowanym i po cyjanonasiarczaniu) mierzona na różnych głębokościach i przy różnym obciążeniu



Rys. 5. Stanowisko magnetostrykcyjne, na którym przeprowadzono badania odporności próbek na działanie kawitacji



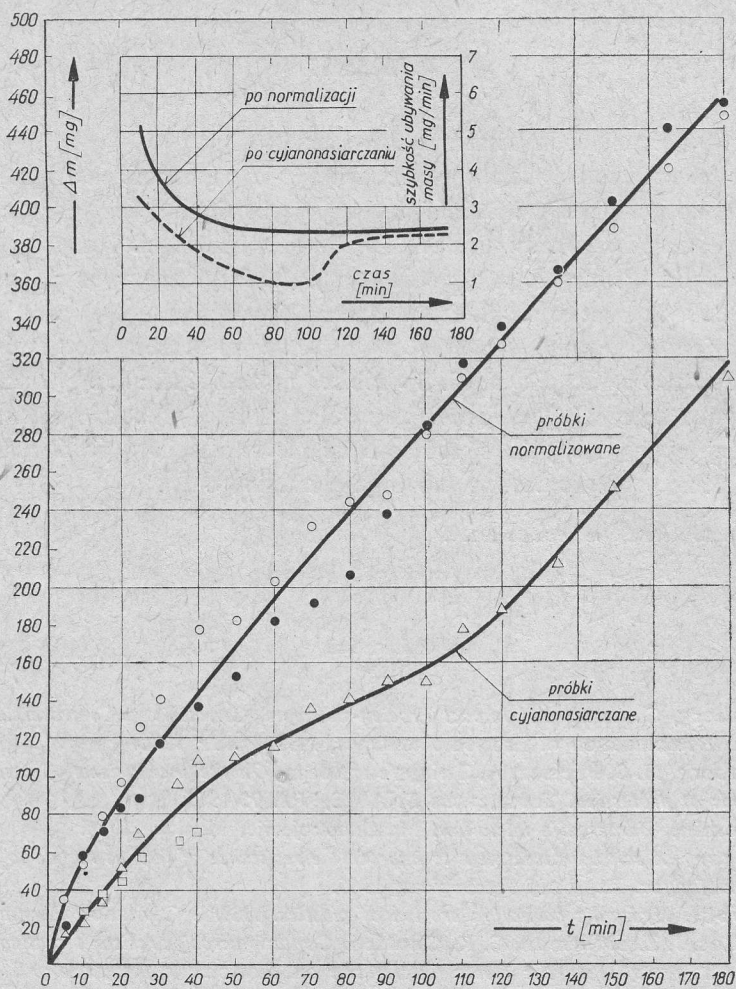
Rys. 6. Skutki działania kawitacji na próbki ze stali St 3 po 90 min. ekspozycji (złoty trawiony, powiększenie $250\times$); a) próbka w stanie normalizowanym – widoczne zniszczenie warstwy powierzchniowej, b) próbka po cyjanonasiarczaniu – widoczne zniszczenie warstwy wierzchniej i nieznaczne warstwy przypowierzchniowej

strukturę ich warstw wierzchnich w miejscach zniszczonych. Na rys. 6a i b przedstawiono fotografie mikrostruktur dwóch próbek (normalizowanej i cyjanonasiarczanej) po tym samym czasie działania zjawiska kawitacji. Ze zdjęć mikroskopowych widać, że ślady zniszczeń próbki normalizowanej (rys. 6a) są większe od śladów występujących na próbce cyjanonasiarczanej (rys. 6b). Stwierdza się więc korzystny wpływ warstwy dyfuzyjnej na proces niszczenia stali.

Wniosek ten potwierdzają w pełni wyniki pomiarów przedstawione wykreślnie na rys. 7. W okresie początkowym (do 100 min.) szybkość niszczenia próbek normalizowanych była większa, w porównaniu z próbkami cyjanonasiarczany. Po zniszczeniu warstwy dyfuzyjnej, dalszy przebieg niszczenia był w obu przypadkach podobny. Zjawisko to wskazuje

jednoznacznie na możliwość zwiększenia odporności materiału na erozję kawitacyjną przez wzbogacenie warstwy powierzchniowej w azot, węgiel i siarkę*).

Przypuszcza się, że wzrost odporności próbek cyjanonasiarczanych na działanie kawitacji nastąpił wskutek zwiększenia ich wytrzymałości zmęczeniowej.



Rys. 7. Ubytek masy i szybkość niszczenia próbek ze stali St 3 (w stanie normalizowanym i po cyjanonasiarczeniu) w funkcji czasu, pod wpływem kawitacji wytwarzanej za pomocą urządzenia magnetostrykcyjnego

*) Jeden z Recenzentów zwraca uwagę na to, że pozytywne wyniki uzyskane przez cyjanonasiarczenie zawdzięcza się przede wszystkim wzbogaceniu warstwy powierzchniowej w azot. Wprowadzenie dodatkowe siarki do warstwy powierzchniowej nie poprawia, a osłabia odporność materiału na kawitację. Dlatego też, celowe byłoby zbadanie zachowanie się materiału wzbogaconego w azot drogą azotowania lub cyjanowania niskotemperaturowego. Recenzent sugeruje, że tą drogą można uzyskać wyraźnie korzystniejsze wyniki od tych, które przedstawiono w pracy (przyp. Red.).

To przypuszczenie wynika z hipotezy [1, 7] dotyczącej zależności między erozją kawitacyjną i wytrzymałością zmęczeniową, a także stąd, że natężenie niszczenia I zależy [2, 12] od energii odkształcenia $S_e = (R_m + R_e) \cdot \epsilon / 2$ (gdzie R_m — granica wytrzymałości na rozciąganie, R_e — granica plastyczności, ϵ — maksymalne wydłużenie), a więc od własności wytrzymałościowych danego elementu.

4. Wnioski

Z przeprowadzonych doświadczeń wynika, że:

- a. Cyjanonasiarczanie stali niskowęglowej zwiększa jej odporność na działanie kawitacji.
- b. W początkowym okresie działania kawitacji szybkość niszczenia stali cyjanonasiarczanej jest mniejsza od szybkości niszczenia stali normalizowanej. Ten początkowy okres trwa dopóty, dopóki nie ulegnie zniszczeniu warstwa dyfuzyjna wytworzona przez cyjanonasiarczanie. Po tym okresie szybkości niszczenia wyrównują się.
- c. Proces cyjanonasiarczania może być zastosowany do ochrony elementów stalowych przed niszczącym działaniem kawitacji. Sposób ten może być skuteczny w przypadku kawitacji o małym natężeniu. Ograniczenie to wynika z małej grubości warstwy ochronnej oraz niewielkiej jej trwałości, na niszczące działanie kawitacji, w porównaniu z takimi materiałami jak np. stal nierdzewna lub brąz aluminiowy.

Praca wpłynęła do Redakcji we wrześniu 1972 r.

Literatura

- [1] Ph. Eisenberg, *Cavitation and Impact Erosion-Concepts, Correlations, Controversies*. Characterization and Determination of Erosion Resistance, ASTM STP 1970.
- [2] Ph. Eisenberg, H. S. Preiser, A. Thiruvengadam, *On the mechanisms of cavitation damage and methods of protection*. Transactions SNAME, Vol. 73/1965.
- [3] W. W. Fomin, *Gidroerozija mietallow*. Maszynostrojenije, Moskwa 1966.
- [4] J. C. Gregory, *A salt bath treatment to improve the resistance of ferrous metals to scuffing, wear, fretting and fatigue*. Reprinted from Wear, 1965.
- [5] J. M. Hobbs, *Hydraulic cavitation erosion of plastics*. ASME Cavitation Forum, 1967.
- [6] 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.
- [7] S. P. Kozyrjew, *Analogy between erosion damage and pitting of machine component surfaces*. Characterization and Determination of Erosion Resistance, ASTM STP 474, 1970.
- [8] T. Kucharski, J. Gudowski, *Siarkoazotowanie elementów maszyn*. Przegląd Mechaniczny, z. 8/1971.
- [9] J. Z. Lichtman, D. H. Kallas, C. K. Chatten, E. P. Cochran, *Cavitation erosion of structural materials and coatings*. Corrosion, Vol. 17/1961.
- [10] J. Noskiewiĉ, *Kavitace*, Akademia Praha, 1969.
- [11] A. Riabczenkow i in., *Primienienije nikielfosfornych pokrytij dla powyszenija kawitacjonnoj stojkosti uglerodistoj stali*. Wiestnik Maszynostrojenija, nr 9/71.
- [12] A. Thiruvengadam, *The Concept of Erosion Strength*. Erosion by Cavitation or Impingement ASTM STP 408, 1967.

- [13] Z. Wendorff, Z. Haś, *Nasiarczanie stali*. Przegląd Mechaniczny, z. 12/1957.
[14] *The "Cassel", "Sulfinuz" process for resistance to scuffing wear, fretting and fatigue*. Imperial Chemical Industri-Mond Devision.

Стойкость сероазотированных низкоуглеродистых сталей против действия кавитации

Резюме

Одним из способов охраны элементов машин против кавитационной эрозии является применение предохранительных пленок.

В работе рассматривается влияние диффузионной пленки, образованной путем сероазотирования на поведение низкоуглеродистой конструкционной стали в условиях акустической кавитации. С этой целью часть образцов из стали St 3 была подвергнута нормализующему отжигу, а часть сероазотированию. Структура поверхностного и приповерхностного слоев образцов, не подвергнутых тепхимической обработке, представлена на рис. 3а, а подвергнутых обработке — на рис. 3б. Разрушительные исследования проводились на магнестрикционном стенде (рис. 5).

Результаты исследований представлены в виде фотоснимков микроструктур образцов после экспозиции в течение 90 мин. (рис. 6а и 6б) и графика (рис. 7), иллюстрирующего зависимость между скоростью разрушения исследуемых материалов и временем их экспозиции.

Из проведенных опытов следует, что:

- сероазотирование низкоуглеродистой стали усиливает ее стойкость против действия кавитации;
- в начале скорость разрушения сероазотированной стали меньше скорости разрушения нормализированной стали, а затем эти скорости выравниваются;
- из-за малой толщины предохранительной пленки и ее ограниченной эффективности защиты родимого материала от кавитационной эрозии, процесс сероазотирования приходится рекомендовать в условиях низкой интенсивности кавитации.

Cavitation Resistance of Cyanide-Sulphur Treated Low-Carbon Steels

Summary

Use of protection cases is one of the methods of protecting machine parts against cavitation erosion.

Investigations of the influence of the diffusion case produced by cyanide-sulphur treatment on the behaviour of low-carbon constructional steel exposed to acoustical cavitation are reported in the paper. Specimens of the St 3 type steel were tested, part of them being tested after normalizing and part after cyanide-sulphur treatment. Upper and near-surface layers of the test specimens which were not given heat-chemical treatment are presented in Fig. 3a whereas those of the specimens after such a treatment are shown in Fig. 3b. Destructive tests were carried out on a magnetostriction rig (Fig. 5).

Photographs of specimen microstructures after 90 minutes of exposition (Fig. 6a and b) and a diagram showing erosion rate versus exposition time for materials tested are presented.

The experiments carried out have led to the following conclusions:

- cyanide-sulphur treatment of low-carbon steel increases its cavitation resistance;
- initial rate of the erosion of the cyanide-sulphur treated steel is lower than that of the normalized steel; afterwards the rates become equal;
- cyanide-sulphur treatment can be recommended for elements to be exposed to small intensity cavitation, as the protection case is thin and its capacity of protecting the native material against cavitation erosion is limited.