

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.

VLADO HORVAT \*, JERZY KRZYŻANOWSKI \*\*, BOGUSŁAW WEIGLE \*\*

Ljubljana\*, Gdańsk\*\*

## **Badania nad wpływem kąta kolizji, zawartego między powierzchnią wirującej próbki a strumieniem wody, na efekty erozji**

### **1. Wstęp**

Jedną z istotnych cech erozji, zachodzącej na powierzchni łopatek wirnikowych parowych turbin kondensacyjnych wskutek kolizji z kroplami wody, jest zależność intensywności efektów erozyjnych od pochylenia powierzchni w rozpatrywanym miejscu profilu. Ten fakt znalazł swoje analityczne odbicie w hipotezach dotyczących procesu erozji, opartych na mechanicznym modelu skutków kolizji. W myśl tych hipotez, parametrem decydującym o skutkach erozyjnych — oprócz wielkości fizykalnych, charakteryzujących oba kolidujące ciała — jest składowa prędkości kolizji, prostopadła do powierzchni przeszkody w miejscu kolizji [1]. Prezentowane tu badania mają na celu dalsze poznanie mechanizmu erozji, powstającej wskutek kolizji cieczy z nachyloną powierzchnią przeszkody.

Przedstawienie tych wyników na sympozjum „Hydroforum” jest, jak się wydaje, uzasadnione z tego powodu, że główną przyczynę erozji kawitacyjnej maszyn wodnych upatruje się także w oddziaływaniach mechanicznych. Implozji pęcherza kawitacyjnego towarzyszy kolizja strumienia cieczy z powierzchnią metalu. W związku z tym, często odporność materiałów na erozję kawitacyjną bada się w urządzeniach z wirującą próbką.

Pracę wykonano w ramach współpracy naukowo-badawczej między Instytutem Maszyn Przepływowych PAN w Gdańsku i Institut za turbinske stroje w Ljubljanie. Program badań [2] i ich interpretację opracowali autorzy z Gdańska, a eksperymenty [3] wykonał inż. V. Horvat z Ljubljany.

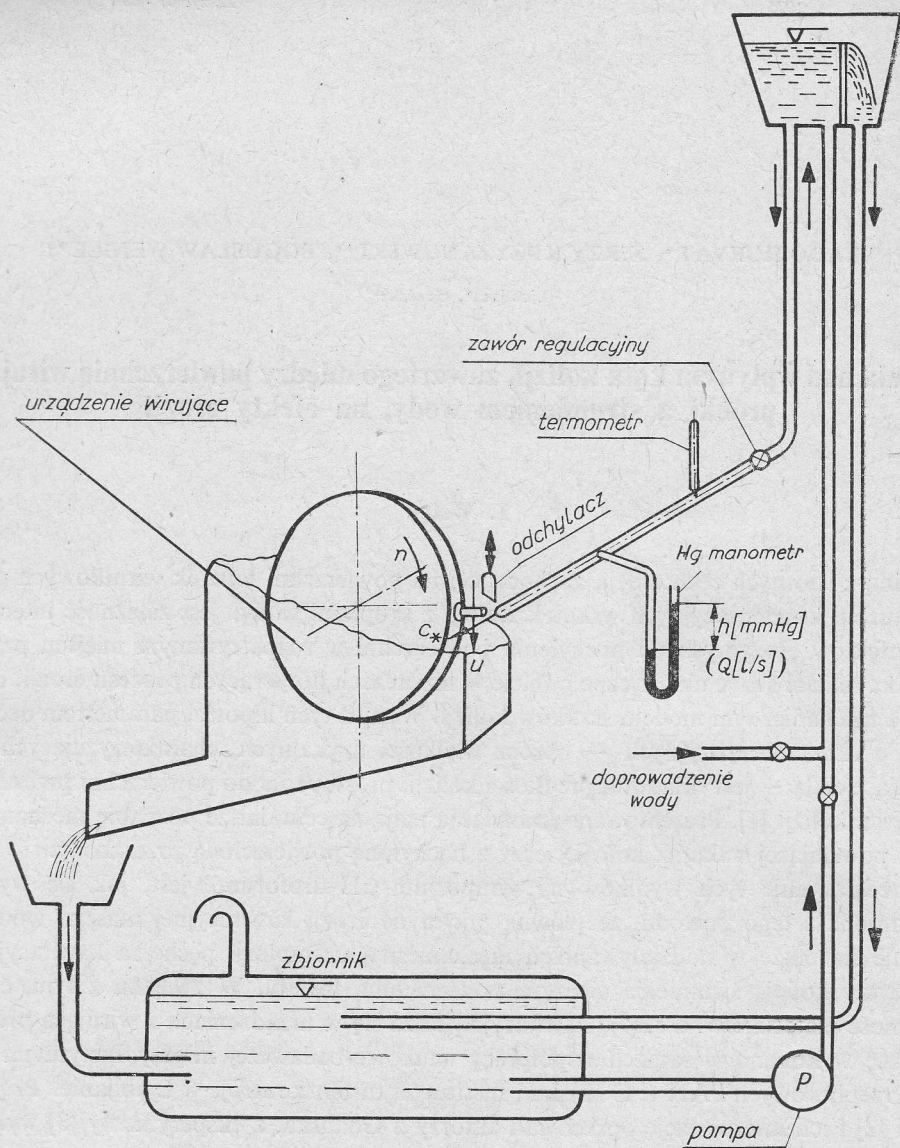
### **2. Stoisko badawcze**

Schemat stoiska badawczego w laboratorium ITS przedstawiono na rys. 1.

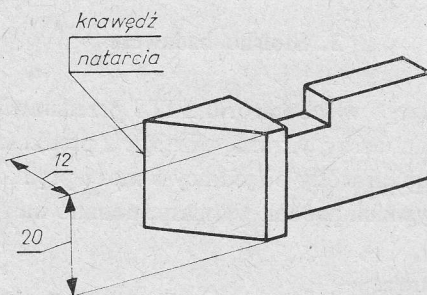
Dwie próbki, osadzone na tarczy wirnika, wirujące z prędkością obwodową  $u = 85$  m/s, przecinały jeden gładki strumień wody o średnicy 6 mm i prędkości  $c_* = 7,3$  m/s. Najważniejsze, niezmiennie dla wszystkich próbek wymiary, podano na rys. 2. W badaniach zmia-

\* Instytut za turbinske stroje.

\*\* Instytut Maszyn Przepływowych PAN.

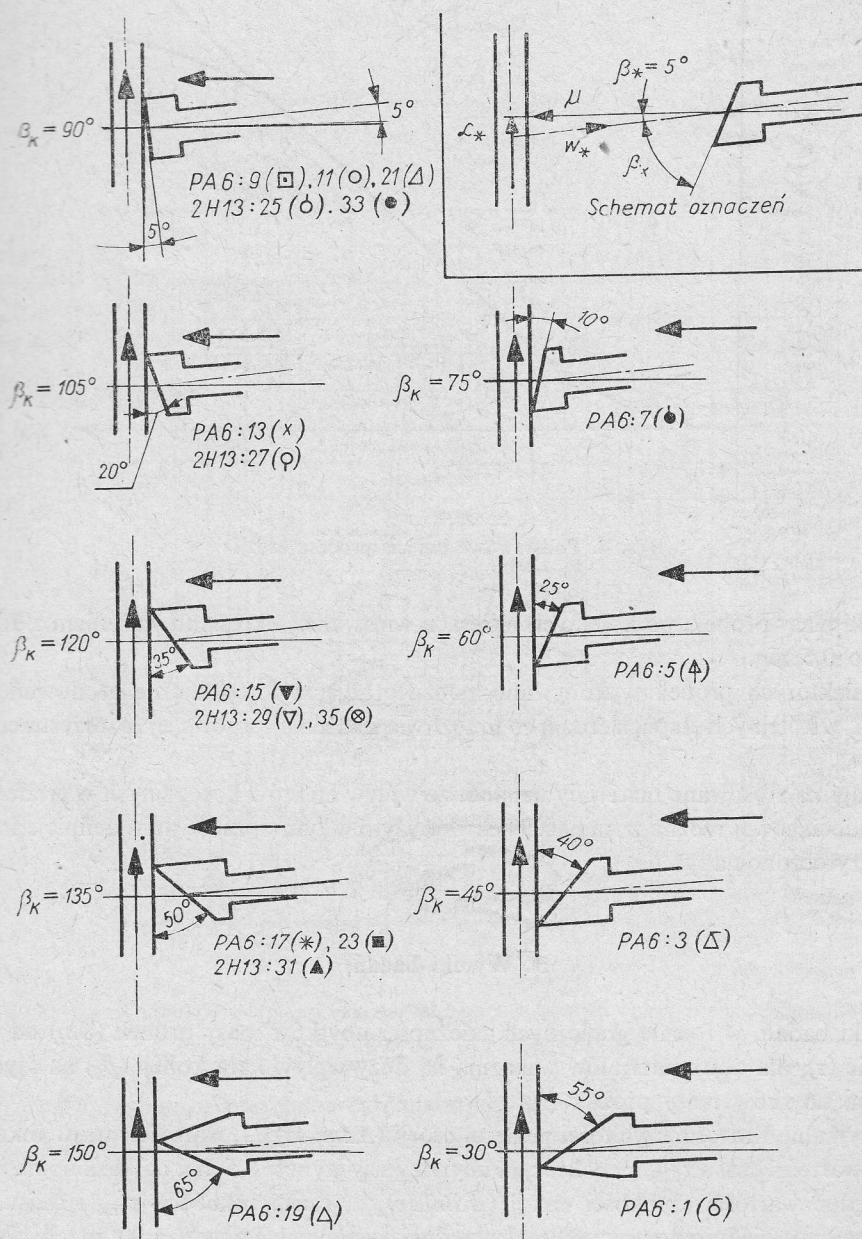


Rys. 1. Schemat stoiska badawczego w ITS, Ljubljana [1]



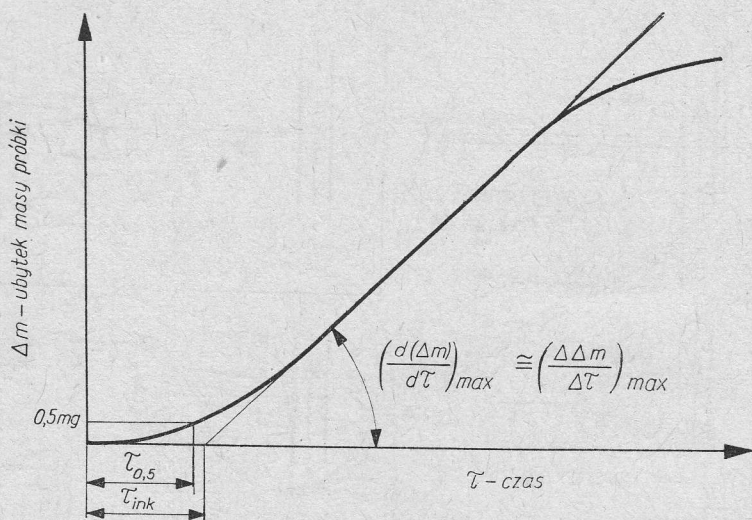
Rys. 2. Próbką

nie ulegał jedynie kąt kolizji  $\beta_k$  w zakresie  $30^\circ \leq \beta_k \leq 150^\circ$ . Odpowiadające tym kątom schematy kolizji przedstawia rys. 3. Pozostałe parametry pracy stoiska były niezmiennie. Próbkę wykonano z dwóch materiałów: ze stopu aluminium PA6 ( $HB \cong 130$ ) i ze stali nierdzewnej 2H13 ( $HB \cong 230$ ). Wybór materiału PA6 był podyktowany jego względnie niską odpornością erozyjną i wynikającym stąd stosunkowo krótkim okresem czasu



Rys. 3. Schemat kolizji próbek z gładkim strumieniem wody

poszczególnych prób. Wyniki badań próbek wykonanych z materiału 2H13, stosowanego przede wszystkim w konstrukcji łopatek wirnikowych ostatnich stopni turbin kondensacyjnych, mogą posłużyć do ustalenia względnej erozyjnej odporności badanych materiałów. Gładkość płaszczyzny kolizji odpowiadała symbolowi obróbki  $\nabla 10$ .



Rys. 4. Podstawowe pojęcia procesu erozji

Ubytki masy próbek, po kolejnych okresach wirowania, określano ważeniem z dokładnością do 0,5 mg.

Dla niektórych próbek wykonywano ponadto zdjęcia fotograficzne erodowanej powierzchni, w kolejnych etapach erozji, co umożliwia śledzenie sposobu jej rozprzestrzeniania się.

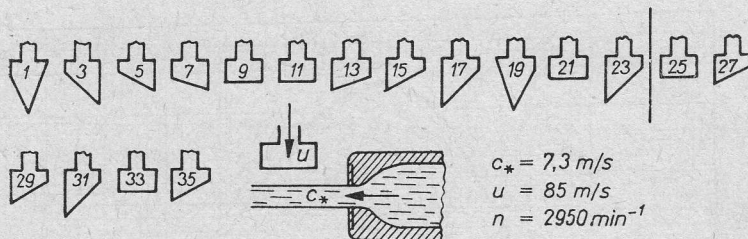
Z uwagi na stosowane materiały uznano, że wpływ efektów korozyjnych w środowisku wody wodociągowej można pominąć. Niektóre użyte w tym opracowaniu definicje i oznaczenia przytoczono na rys. 4.

### 3. Wyniki badań

Wyniki badań, w formie graficznych zależności ubytków masy próbek ( $\Delta m$ ) od czasu wirowania ( $\tau$ ), dla obu materiałów wskazują na duży wpływ kąta kolizji ( $\beta_k$ ) na szybkość narastania ubytków masy próbek (rys. 5).

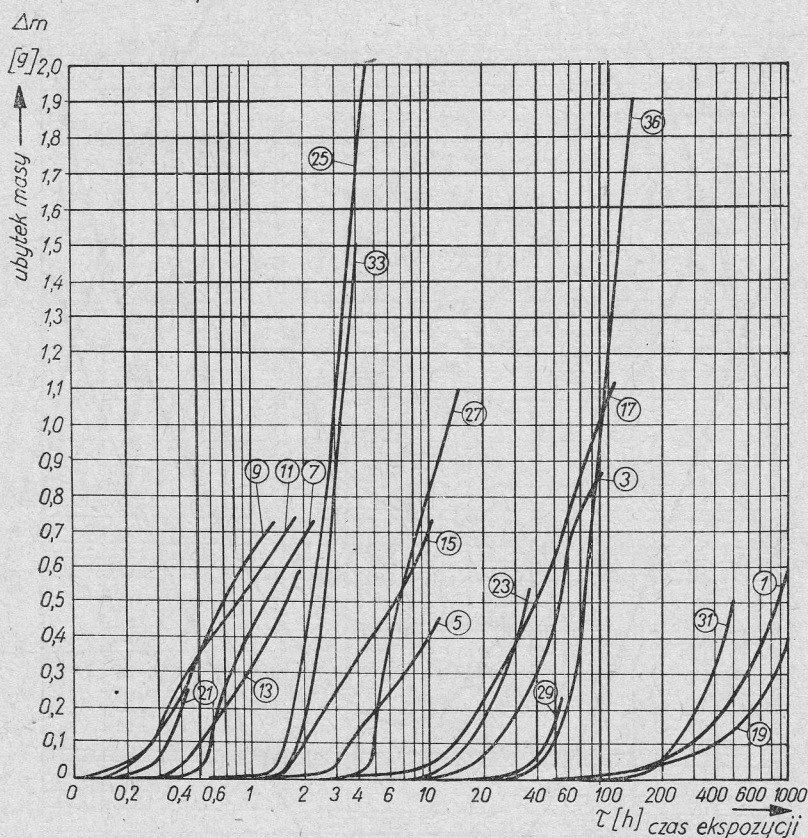
Maksymalne wartości szybkości postępu erozji  $(\Delta \Delta m / \Delta \tau)_{\max}$ , wartości czasu inkubacji  $\tau_{\text{ink}}$  oraz wartości czasu  $\tau_{0,5}$ , przy którym ubytek masy wynosi 0,5 mg, naniesiono na rys. 6.

Względne wartości szybkości erozji  $(\Delta \Delta m / \Delta \tau)_{\max}$ , czasu inkubacji  $\tau_{\text{ink}}$  i czasu  $\tau_{0,5}$ , odniesione odpowiednio do wartości maksymalnej występującej przy  $\beta_k = 90^\circ$  przedstawiono dla obu materiałów na rys. 7.



Materiał: PA6 próbka Nr 1 do 23

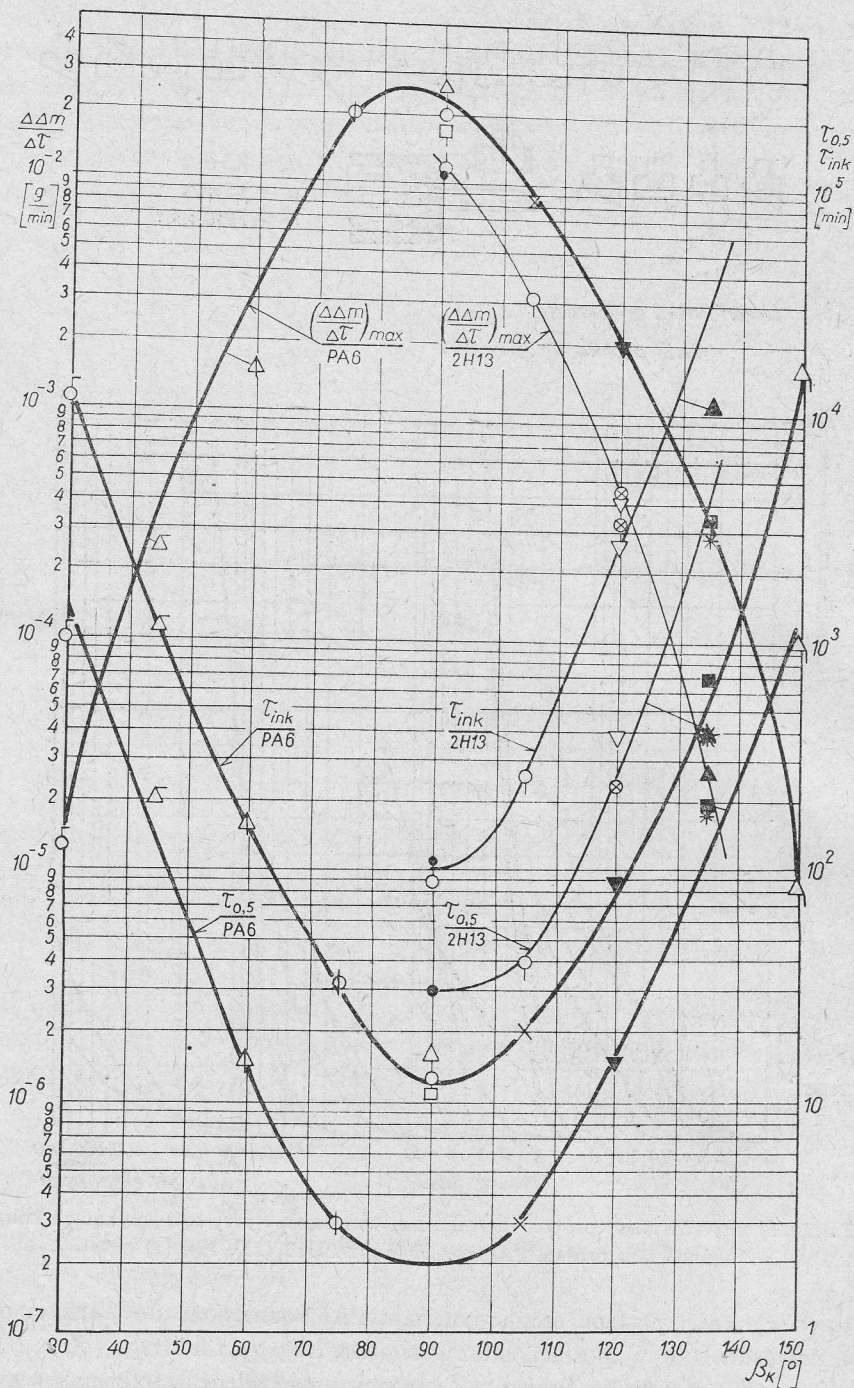
2H13 próbka Nr 25 do 35



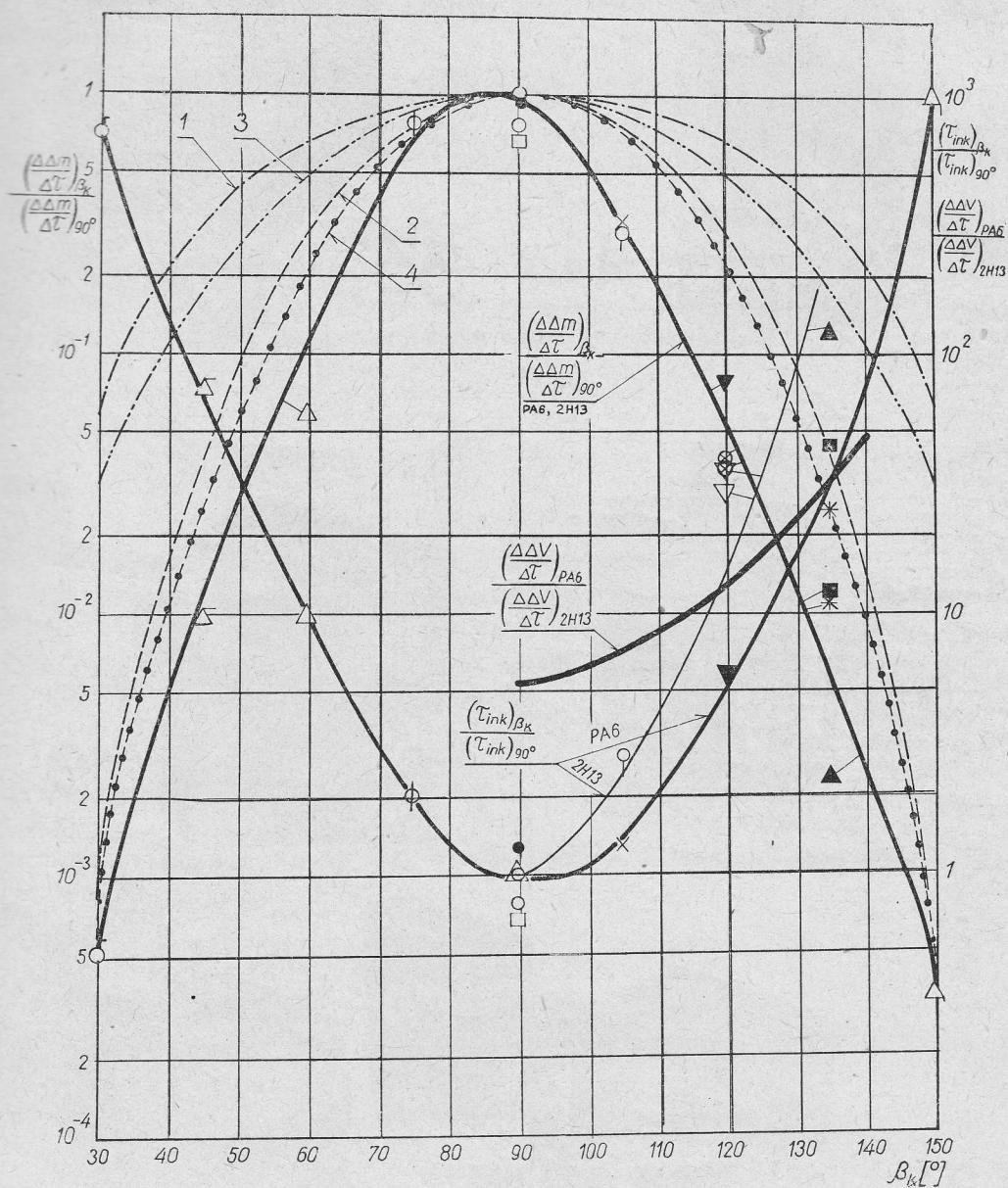
Rys. 5. Zależność ubytków masy próbek  $\Delta m$  od czasu wirowania  $\tau$  przy różnych kątach kolizji  $\beta_k$  dla materiału próbek PA6 (1 ÷ 23) oraz 2H13 (25 ÷ 35), [1]

Wartości szybkości postępu erozji materiału PA6, odniesione do wartości dla stali 2H13, są przedstawione w postaci zależności  $(\Delta \Delta v / \Delta \tau)_{PA6} / (\Delta \Delta v / \Delta \tau)_{2H13}$  (rys. 7), gdzie  $\Delta v$  jest równe  $\Delta m / \rho$  materiału. Takie przedstawienie ma tę zaletę, że informuje o zmianach wymiarów próbki.

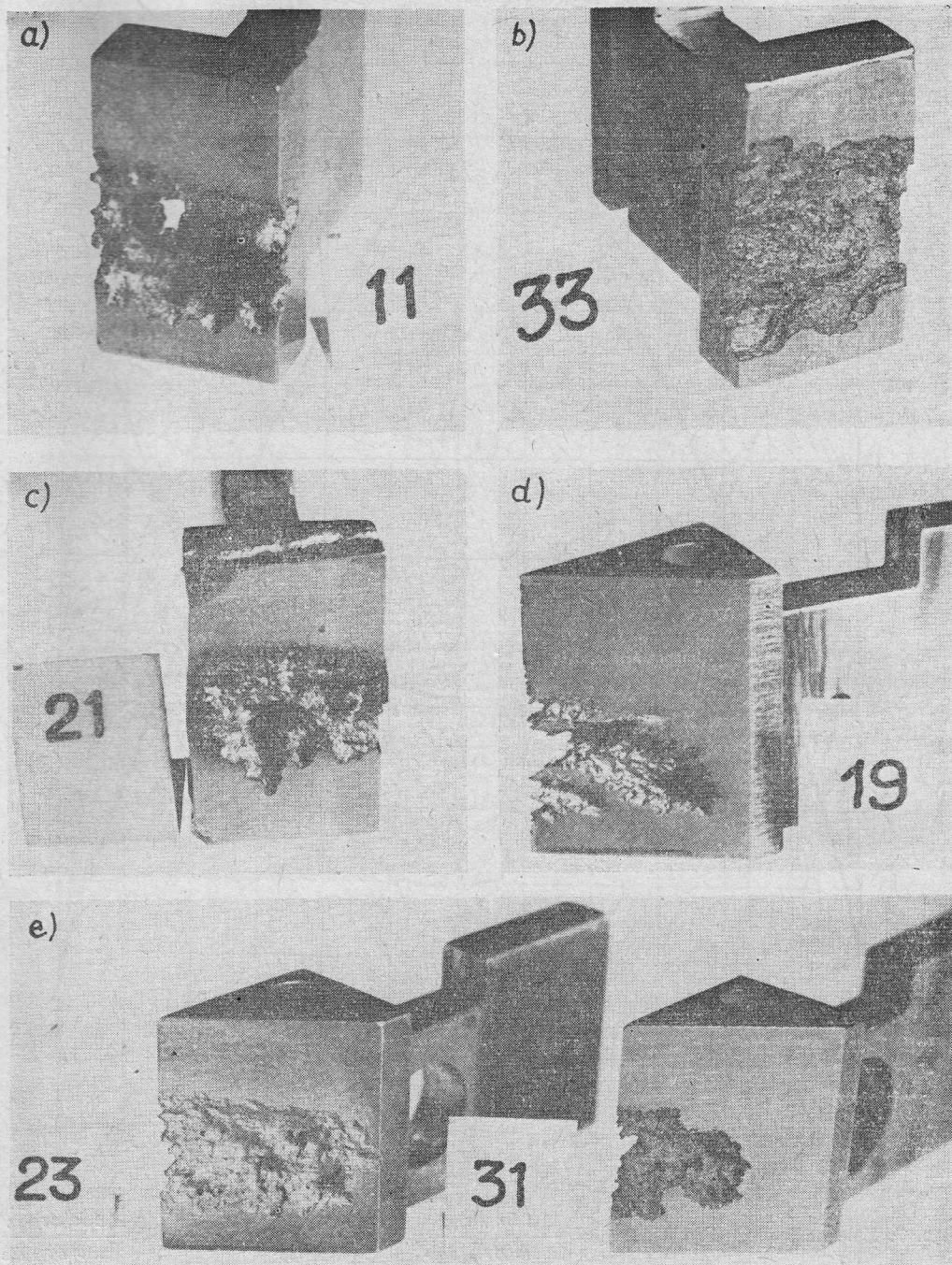
Przeprowadzono porównanie wyników opisywanych tu badań z rezultatami uzyskanymi w innych laboratoriach.



Rys. 6. Zależność szybkości postępu erozji  $(\Delta \Delta m / \Delta t)_{max}$ , czasu inkubacji  $\tau_{ink}$  i czasu  $\tau_{0,5}$  od kąta kolizji  $\beta_k$



Rys. 7. Zależność względnych wartości  $\frac{(\Delta\Delta m/\Delta\tau)_{\beta_k}}{(\Delta\Delta m/\Delta\tau)_{\beta_k=90^\circ}}$ , czasu  $\frac{(\tau_{ink})_{\beta_k}}{(\tau_{ink})_{90^\circ}}$  oraz stosunku  $\frac{(\Delta\Delta v/\Delta\tau)_{PA6}}{(\Delta\Delta v/\Delta\tau)_{2H13}}$  w funkcji kąta kolizji  $\beta_k$ ; względne wartości  $\frac{(\Delta\Delta m/\Delta\tau)_{\beta_k}}{(\Delta\Delta m/\Delta\tau)_{\beta_k=90^\circ}}$  określone z równania (1) dla  $n_1=2,5$  (1) i  $n_1=6$  (2) oraz z równania (2) dla  $n_2=4,37$  (3) i  $n_2=11$  (4)



Rys. 8. Przykłady zniszczeń erozyjnych badanych próbek

| Nr próbki                     | 11   | 19    | 21    | 23    | 31    | 33   |
|-------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| $\beta_k$                     | 90°  | 150°  | 90°   | 135°  | 135°  | 90°  |
| Materiał                      | PA6  | PA6   | PA6   | PA6   | 2H13  | 2H13 |
| $\tau$ [min]                  | 95   | 61280 | 25    | 2105  | 28630 | 240  |
| $\Delta v$ [cm <sup>3</sup> ] | 0,24 | 0,14  | 0,085 | 0,173 | 0,064 | 0,19 |

Wpływ kąta kolizji  $\beta_k$  na szybkość postępu erozji ze strumieniem kropeł przedstawiono w [4] następującym związkiem:

$$\frac{\left(\frac{\Delta \Delta m}{\Delta \tau}\right)_{\beta_k}}{\left(\frac{\Delta \Delta m}{\Delta \tau}\right)_{\beta_k=90^\circ}} = \frac{1}{\sin \beta_k} \left( \frac{w_* \sin \beta_k - w_{*NP}}{w_* - w_{*NP}} \right)^{n_1}, \quad (1)$$

przy czym  $w_{*NP}$  oznacza taką najmniejszą (progową) wartość normalnej składowej prędkości kolizji  $w_{*N}$ , przy której efekty erozyjne są niezauważalne. W pracy [5], wyniki badań erozyjnych przy kolizji strugi z próbką przedstawiono zależnością

$$\frac{\left(\frac{\Delta \Delta m}{\Delta \tau}\right)_{\beta_k}}{\left(\frac{\Delta \Delta m}{\Delta \tau}\right)_{\beta_k=90^\circ}} = (\sin \beta_k)^{n_2}. \quad (2)$$

Wyniki potęg według wymienionych źródeł wynoszą:  $n_1=2,5$  i  $n_2=4,37$ .

Wykorzystanie wzoru (1) wymaga wyznaczenia wartości  $w_{*NP}$ . Wartość tę określono ekstrapolując krzywą szybkości postępu erozji  $(\Delta \Delta m / \Delta \tau)_{\max, PA6}$  na rys. 6 i przyjmując, że erozja nie występuje przy kątach  $\beta_{kP} \cong 20^\circ$  i  $160^\circ$ . Odpowiadająca tym kątom progowa wartość składowej normalnej  $w_{*NP} = w_* \cdot \sin \beta_{kP}$  wynosi 29,2 m/s.

Wyniki obliczeń według wzorów (1) i (2) naniesiono na rys. 7.

Trzeba wyraźnie podkreślić umowność tak określonej wartości progowej. Odbiega ona znacznie od wartości dla PA6 i 2H13 wyznaczonych przez autorów w innych pracach [6, 7] i jest najwyraźniej funkcją kształtu i wymiarów „pocisku” cieczy. Na znaczenie tych parametrów wskazywano też np. w [8, 9]. Świadczy o tym lokalizacja intensywnej erozji w pobliżu krawędzi natarcia próbki. Prawdopodobnie współczynniki  $n_1$  i  $n_2$  są także funkcją tych parametrów.

Otrzymane wyniki wykazują lepszą zgodność z zależnościami (1) i (2), przy odpowiednim doborze współczynników eksperymentalnych.

Na rys. 8 przedstawiono efekty erozji na kilku próbkach. Widać wyraźnie wpływ materiału próbek, czasu ekspozycji i kąta kolizji  $\beta_k$ .

#### 4. Wnioski

1. W przedstawionych badaniach potwierdzono wyraźny i silny wpływ pochylenia płaszczyzny przeszkody na efekty erozji. W zakresie zmienności kątów  $30^\circ \leq \beta_k \leq 150^\circ$ , maksymalna szybkość erozji i czas inkubacji zmieniały się w opisywanych badaniach o trzy rzędy wielkości.

2. Większy wpływ kąta kolizji  $\beta_k$  na szybkość postępu erozji, w porównaniu z wynikami obcych badań oraz inicjowanie erozji od krawędzi natarcia próbek, wskazują na istotne znaczenie hydrodynamiki procesu kolizji.

Różnice w kształcie „pocisku wodnego” i przebiegu kolizji w różnych stoiskach badawczych są zapewne główną przyczyną rozbieżności w ocenie odporności materiału na erozję. Unifikacja metod badawczych wpłynęłaby istotnie na porównywalność wyników różnych laboratoriów.

3. Interpretacja przedstawionych tu wyników będzie zapewne mogła być bardziej szczegółowa po zbadaniu impulsów ciśnienia generowanych przy kolizji w funkcji miejsca na powierzchni próbki, czasu ich trwania (średnia czasowa) i stosunku obszaru zajętego impulsem ciśnienia (średnica strugi) do wielkości ziarna materiałów próbki.

### Literatura

- [1] J. Krzyżanowski, B. Weigle, H. Severin, *Semiempirical Criterion of Erosion Threat in Modern Steam Turbines*. Trans. of the ASME, J. of Eng. f. Power, Vol. 93, Ser. A, No. 1, Jan. 1971.
- [2] H. Severin, B. Weigle, *Program badań nad wpływem kąta kolizji powierzchni próbki ze strumieniem wody na stoisku do badania erozji w ITS, Ljubljana*. IMP PAN, Nr arch. 8/71, Gdańsk, marzec 1971.
- [3] V. Horvat, *Porocilo o erozijskih preizkusih*. 962, Institut za turbinske stroje, Ljubljana, September 1972.
- [4] D. W. C. Baker, K. H. Jolliffe, D. Pearson, *The Resistance of Materials to Impact Erosion Damage*. Philosophical Transactions, Roy. Soc. of London, Series A. Part No. 1110, Vol. 260, 1966.
- [5] F. I. Heymann, *Toward quantitative prediction of erosion damage*. Westinghouse Engineering Report No. E-1463, 1969.
- [6] H. Severin, B. Weigle, *Badania nad wpływem prędkości fazy gazowej na strukturę strumienia kropel i jego oddziaływanie na efekty erozji*. IMP PAN, Nr arch. 273/71, Gdańsk, grudzień 1971.
- [7] J. Krzyżanowski, *Wybrane zagadnienia ruchu fazy ciekłej w stopniu turbiny kondensacyjnej*. PWN, Poznań 1969.
- [8] M. Vater, *Das Verhalten metallischer Werkstoffe bei Beanspruchung durch Flüssigkeitsschlag*. VDI-Zeitschrift, Bd. 81, Nr. 45, 6 Nov. 1937.
- [9] S. P. Kozyriew, *Gidroabrazivnyj iznos metallow pri kawitacii*. Maszinostr., Moskwa 1964.

## Investigations of the Influence of the Collision Angle Included between the Surface of a Rotating Specimen and a Water Jet on Erosive Effects

### Summary

Experimental investigations of the influence of the collision angle included between the surface of a rotating specimen and a laminar water jet on erosive effect were described. The experimental rig used was presented in Fig. 1 [3]. The peripheral speed of the specimens (Fig. 2) was equal to  $u = 85$  m/s, the velocity of water jet, having a diameter of 6 mm, was equal to  $c_* = 7.3$  m/s. The collision angle  $\beta_k$  was varied within the range  $30^\circ \div 150^\circ$  by changing the tilt of the leading surface of the specimens (Fig. 3). The remaining operating parameters of the rig were not changed. Specimens of PA6 aluminium alloy and 2H13 stainless steel were utilized.

The investigation results were presented in Fig. 5 in the form of diagrams of the losses of mass of the specimens  $\Delta m$  versus the time of rotation  $\tau$ . Fig. 6 shows the maximum values of the erosion rate  $(\Delta \Delta m / \Delta \tau)_{\max}$  incubation time  $\tau_{\text{ink}}$  and  $\tau_{0.5}$ , at which the mass loss amounts to 0.5 mg, as a function of the collision angle  $\beta_k$ , Fig. 7 shows the relative values of the erosion rate  $(\Delta \Delta m / \Delta \tau)_{\max}$  as a function

of the collision angle  $\beta_k$ , incubation time  $\tau_{ink}$  and  $\tau_{0.5}$  as functions of  $\beta_k$ , the normalization being against the respective maximum values for  $\beta_k = 90^\circ$ .

The dependencies observed on  $\beta_k$  confirm the significant influence of the collision surface angle on the erosive effect. The comparison made with the results of other investigations [4, 5], based on the relations (formulae (1) and (2)) obtained there, showed that the dependence of the erosive losses  $\Delta m$  on the collision angle  $\beta_k$  is considerably stronger in the experiments reported here. This fact as well as the erosion observed at the leading edge of the specimen point out the importance of hydrodynamics of the collision process.

Fig. 7 also shows the course of the ratio of the rates of volume losses of the specimens made of PA6 alloy and 2H14 steel.

### Исследования влияния угла коллизии, заклученного между поверхностью вращающегося образца и направлением водяной струи, на эффекты эрозии

#### Резюме

Описываются экспериментальные исследования влияния угла коллизии  $\beta_k$ , заключающегося между поверхностью вращающегося образца и цилиндрической водяной струей, на эрозионные эффекты. Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1 [3]. Окружная скорость образцов (рис. 2) равнялась  $u = 85$  м/сек, скорость водяной струи диаметром 6 мм —  $c_* = 7,3$  м/сек. Изменение угла коллизии  $\beta_k$  в пределах  $30^\circ - 150^\circ$  было получено путем изменения наклона плоскости атаки образцов (рис. 3). Остальные рабочие параметры стенда оставались постоянными. Образцы были выполнены из алюминиевого сплава ПА6 и из нержавеющей стали 2Н13.

Результаты исследований в форме зависимостей массовой убыли образцов  $\Delta m$  от времени вращения  $\tau$  представлены на рис. 5. На рис. 6 представлена зависимость максимальных значений скорости эрозии  $(\Delta \Delta m / \Delta \tau)_{\max}$ , времени инкубации  $\tau_{ink}$  и времени  $\tau_{0.5}$ , когда массовая убыль достигает значения 0,5 мг от угла коллизии  $\beta_k$ . На рис. 7 представлены в функции угла  $\beta_k$  относительные значения скорости эрозионного процесса  $(\Delta \Delta m / \Delta \tau)_{\max}$ , времени  $\tau_{ink}$  и  $\tau_{0.5}$ , отнесенные к соответствующим максимальным значениям при  $\beta_k = 90^\circ$ .

Полученные зависимости от угла  $\beta_k$  подтверждают существенное влияние наклона плоскости коллизии на эрозионные эффекты. Сравнение этих результатов с другими результатами [4, 5], проведенное с использованием полученных там выражений формулы (1) и (2) показывают, что зависимость эрозионных разрушений  $\Delta m$  в функции угла коллизии  $\beta_k$  в представляемых исследованиях является гораздо сильнее. Этот факт, как и замеченное появление эрозии в районе кромки атаки образца, указывают на значение гидродинамики процесса коллизии.

На рис. 7 представлена также зависимость отношения скорости прогресса объемных убылей массы образцов из сплава ПА6 к убылям образцов из стали 2Н13.