ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1982
Seria: ENERGETYKA z.80 Nr kol. 715

Andrzej DUBROWSKI,
Andrzej MISIEWICZ

# WSTĘPNE BADANIA ODPORNOŚCI MATERIAŁÓW KONSTRUKCYJNYCH NA EROZJĘ PYŁOWĄ

Streszczenie: Przedstawiono metodę pomiaru oraz wyniki badań zużycia wybranych materiałów konstrukcyjnych poddanych działaniu zapylonego czynnika gazowego. W oparciu o uzyskane dane obliczono charakterystyczne wielkości materiałowe decydujące o odporności erozyjnej.

## 1. WSTĘP

Jedynie niewielką ilość pracujących w przemyśle wentylatorów traktować można jako maszyny przetłaczające czysty czynnik gazowy. W większości przypadków czynnik roboczy zanieczyszczony jest pyłami powstającymi w wyniku określonych procesów technologicznych, przy czym zapylenie zmienia się w szerokich granicach dochodząc np. w hutnictwie metali kolorowych do 50 $g/m^3$ [1]. Obecność fazy stałej o różnych właściwościach mechanicznych, różnej granulacji i własnościach chemicznych wchodzącej w kontakt z elementami układu przepływowego wentylatorów, jest powodem nieraz bardzo znacznego skrócenia okresu pracy wentylatora. W ramach prowadzonej w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej pracy naukowo-badawczej dotyczącej erozji wentylatorów wynikła konieczność doświadczalnej weryfikacji wybranej teorii zużycia erozyjnego, a w przypadku jej potwierdzenia zbadanie odporności erozyjnej wybranych materiałów konstrukcyjnych stosowanych powszechnie w budowie wentylatorów. W pracy przedstawiono wybrany model procesu zużycia, opis stanowiska badawczego oraz systematykę i wyniki badań doświadczalnych.

## 2. MODEL ZUŻYCIA

W wyniku szerokiej analizy danych literaturowych [1, 4, 5] przyjęte do obliczeń praktycznych energetyczny model skutków zużycia opracowany przez J.G.A.Bittera w pracy [2], a zaproponowany wcześniej przez K.Wellingera i Uetza. W przyjętym modelu zużycie całkowite rozpatruje się jako sumę dwu rodzajów zużycia:

- deformacyjnego (kruchego),
- za pośrednictwem skrawania (plastycznego).

Erozja deformacyjna odgrywa zasadniczą role w przypadku erozji materiałów kruchych przy występowaniu dużych kątów napływu strumienia zapylonego cząstkami erodującymi materiał. Erozja plastyczna jest wynikiem "obróbki" powierzchni przez ziarno pyłu padającego pod małym kątem na materiał i wycieranie to (w postaci żłobienia-skrawania) rośnie wraz ze wzrostem własności plastycznych materiału. Teoria Bittera zakłada zdolność materiału wycieranego do kumulowania energii kinetycznej (zawartej w cząstkach zapylonego strumienia) i gromadzenia jej w warstwie powierzchniowej. Przewiduje się istnienie granicznej wartości gęstości tej energii wewnętrznej, po przekroczeniu (lub osiągnięciu) której następuje niszczenie warstwy powierzchniowej materiału. Dla uzyskania zależności określających wartość oceniająca skutki erozji autor [2] wykorzystał teorię St Venanta propagacji fal dźwiękowych przy zderzeniu oraz teorię naprężeń stycznych Hertza, występujących umownie przy zderzeniu sprężystym idealnie kulistej cząstki o sprężystą, a następnie sprężasto-plastyczną płaską powierzchnię. Na tej podstawie wyprowadzono zależności określające wielkości erozji objętościowej:

a) erozja deformująca

$$W_D = \frac{1}{2}\frac{M\,(V\sin\alpha - K)^2}{\varepsilon} \quad \left[m^3\right], \tag{1}$$

b) erozja plastyczna przy sprężystym zderzeniu cząstek $W_{C1}$

$$W_{c1} = \frac{1}{2}\frac{M\,(V\sin\alpha - K)^2}{\sqrt{V_{\sin\alpha}}}\left[V\cos\alpha - \frac{C(V\sin\alpha - K)^2}{\sqrt{V\sin\alpha}}\right] \quad \left[m^3\right], \tag{2}$$

c) erozja plastyczna przy sprężysto-plastycznym zderzeniu cząsteczek $W_{C2}$

$$W_{c2} = \frac{1}{2}\frac{M\left[V^2\cos^2\alpha - K_1\,(V\sin\alpha - K)^2\right]}{\varphi} \quad \left[m^3\right] \tag{3}$$

W przedstawionej pracy oparto się na późniejszych pracach J.H.Neilsona i A.Gilchrista [3], którzy otrzymali zależności podobne do zależności (1) - (3) i na ich podstawie opracowali sposób wyznaczenia jednostkowych energii zużycia i w oparciu o wyniki eksperymentu.

Wielkość zużycia całkowitego wyraża się zależnościami:

1. Dla $\alpha \leqslant \alpha_o$

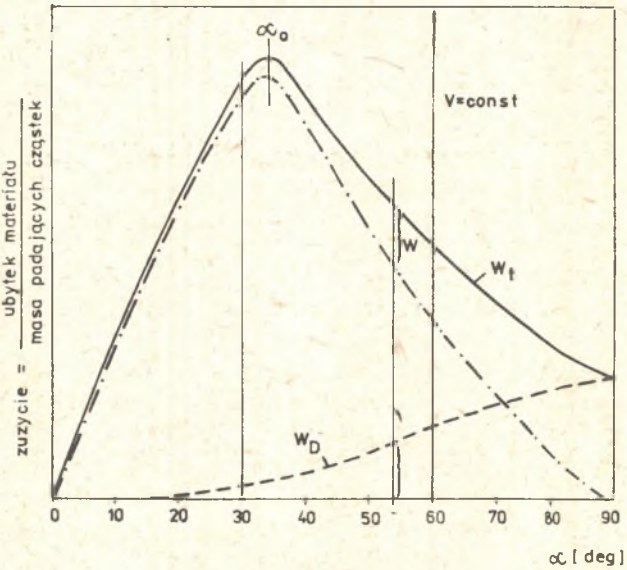
$$W_t = \frac{1}{2}\frac{M\,(V\sin\alpha - K)^2}{\varepsilon} + \frac{1}{2}\frac{M\,(V^2\cos^2\alpha - V_p^{\,2})}{\varphi} \quad \left[m^3\right] \tag{4}$$

2. Dla $\alpha > \alpha_o$

$$W_t = \frac{1}{2}\frac{M\,(V\sin\alpha - K)^2}{\varepsilon} + \frac{1}{2}\frac{M\,V^2\cos^2\alpha}{\varphi} \quad \left[m^3\right] \tag{5}$$

## 2.1. Sposób wyznaczenia jednostkowych energii zużycia $\varepsilon$ i $\psi$ dla materiałów plastycznych

Sposób obliczania wielkości $\varepsilon$ i $\psi$ na podstawie wyników eksperymentu określono na podstawie [3], przyjmując szerszy zakres kątów podania cząstek.
Opisany poniżej tok postępowania zilustrowano na rys. 1.




Rys. 1. Przykład wpływu kąta napływu strumienia ($\alpha$) na wartość wielkości erozji

Na drodze eksperymentu wyznacza się krzywą całkowitego zużycia $W_t=F(\alpha)$ dla ustalonej wartości prędkości V.
Jeżeli krzywa wykazuje lokalne maksimum, wówczas znając wartość erozji dla kąta $\alpha = 90^o$ obliczany jednostkową energią zużycia kruchego ze wzoru:

$$\varepsilon = \frac{1}{2}\,\frac{MV^2}{W_{90^o}} \qquad \left[\frac{kJ}{m^3}\right] \tag{6}$$

Znając wartość $\varepsilon$ na podstawie wzoru określającego wielkość zużycia plastycznego:

$$W_D = \frac{1}{2}\,\frac{M\,(V\sin\alpha - K)^2}{\varepsilon} \tag{7}$$

zakładając wartość wielkości $K \approx 0$, wyznaczamy krzywą erozji deformującej $W_D = f(\alpha)$ i nanosimy ją na wykres krzywej $W_t = f(\alpha)$.

Odejmując od siebie obie krzywe otrzymujemy krzywą zużycia plastycznego oraz kąt maksymalnej erozji plastycznej $\alpha_{c\,max}$. Korzystając ze wzoru (2) uzyskano zależność:

$$\frac{\cos\alpha_o}{\sin^{\frac{1}{2}}\alpha_o} = \frac{\cos\alpha_{c\,max}}{\sin^{\frac{1}{2}}\alpha_{c\,max}} = \frac{4}{3}\,\frac{\sin\frac{1}{2}\alpha_{c\,max}}{\cos\alpha_{c\,max}}, \tag{8}$$

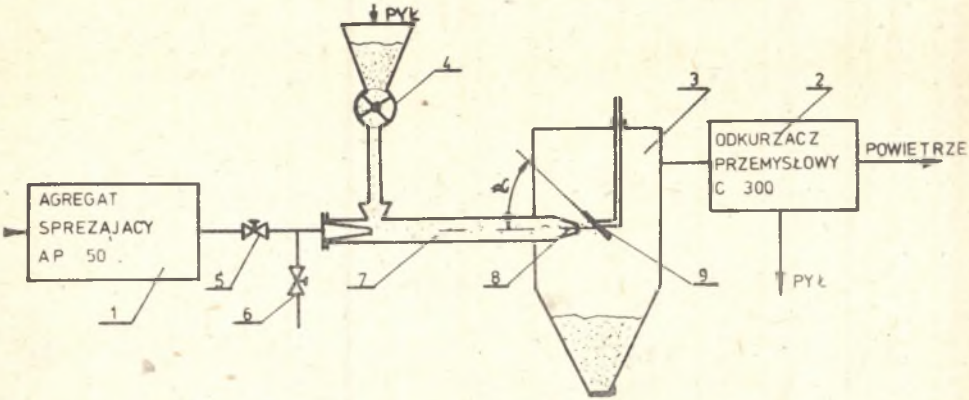
pozwalającą określić kąt graniczny $\alpha_o$, tj. kąt, przy którym składowa pozioma prędkości cząstki przy uderzeniu staje się równa zeru. Dysponując wielkością kąta $\alpha_o$ można na podstawie przebiegu krzywej $W_{c1} = f(\alpha)$ - dla $\alpha > \alpha_o$ ustalić $\psi$ na podstawie zależności:

$$\psi = \frac{\frac{1}{2}MV^2\cos^2\alpha}{W_{c1}} \qquad \left[J/m^3\right] \tag{9}$$

Powtarzając pomiary dla różnych prędkości pyłu uzyskuje się zależności $\varepsilon = f(V)$ i $\psi = f(V)$, które po określeniu wielkości kinematycznych zapylonej strugi stanowią podstawę do określenia wielkości zużycia erozyjnego rozpatrywanych elementów układu przepływowego wentylatorów. W dalszym ciągu artykułu przedstawiano sposób wyznaczania krzywych zużycia całkowitego $W_t = f(\alpha)$ oraz $W_t = f(V)$ oraz wartość jednostkowych energii zużycia $\varepsilon$ i $\psi$ otrzymane na podstawie przedstawianego powyżej schematu obliczeń.

## 3. METODYKA BADAŃ

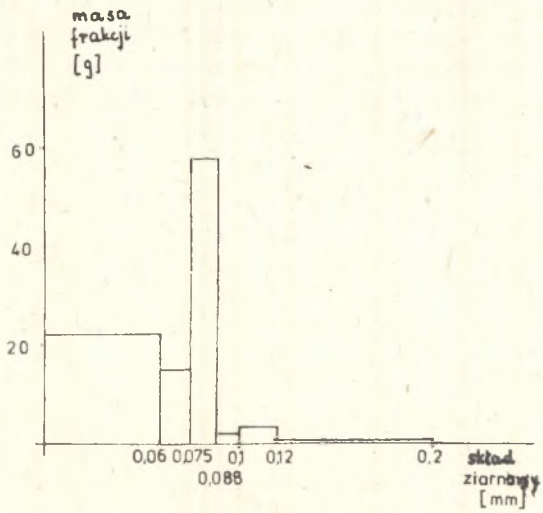
Badania przeprowadzano na stanowisku skonstruowanym w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych. Schemat stanowiska pokazano na rysunku 2.




Rys. 2. Schemat stoiska pomiarowego

Stanowisko pracuje w układzie ssąco-tłoczącym (odkurzacz przemysłowy C/300-(2), agregat sprężający AP-50-1). Takie rozwiązanie zapewnia uzyskanie podciśnienia w komorze pomiarowej 3 celem hermetyzacji układu, a także zmianę prędkości powietrza zapylonego w dużym zakresie 50-150 m/s. Regulacja prędkości dokonywana jest zaworami 5 i 6.
Pył podawany jest podajnikiem skrzydełkowym 4.
W układzie eżektorowym 7 pył ulega wymieszaniu z powietrzem i przyspieszeniu do prędkości $V_{cząst.} = V_{pow.}$
Zastosowanie takiego układu pozwala określić prędkość cząstki na podstawie pomiaru ciśnienia całkowitego na wylocie z dyszy 8 i ciśnienia statycznego przy ściance komory, gdzie $V_{pow.} = 0$. Przed wsypaniem pyłu do zbiornika podajnika, rurką spiętrzającą wyznaczano ciśnienie dynamiczne powietrza wypływającego z dyszy, analogiczny pomiar wykonywano po opróżnieniu zbiornika. Równocześnie mierzono ciśnienie statyczne w komorze. W czasie pomiaru na skutek zwiększenia się oporów przepływu w odkurzaczu prędkość uległa zmianie średnio o 6 m/s (na wykresach podawana jest wartość średnia).

Do pomiaru użyto pyłu energetycznego z elektrowni Rybnik o składzie ziarnowym przedstawionym na rysunku 3.



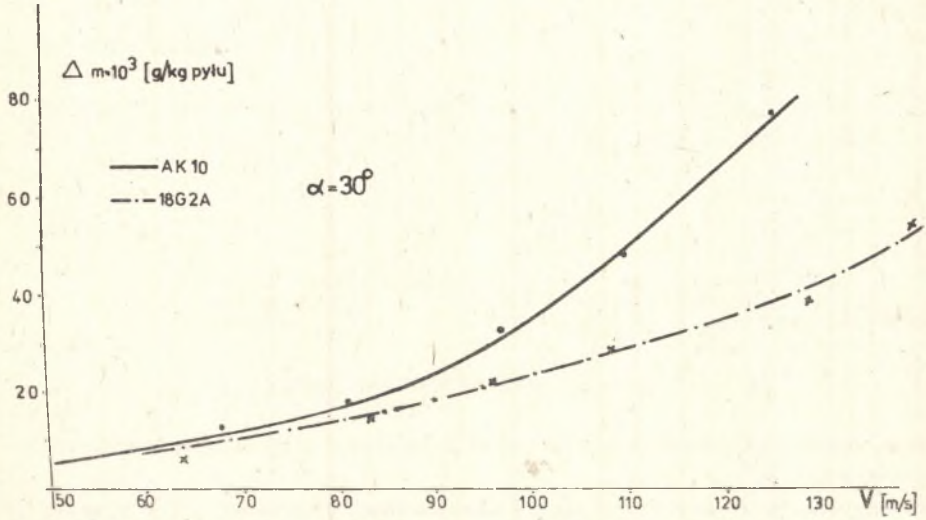

Rys. 3. Analiza ziarnowa pyłu

Celem wymuszenia przed przystąpieniem do pomiaru był podgrzewany do temperatury ok. 60°C.
Temperatura ta zapewniła podczas pomiaru stałą wilgotność pyłu, a zatem i równomierny wydatek podajnika. Do pomiaru brano zawsze stałą ilość pyłu - 250 g.

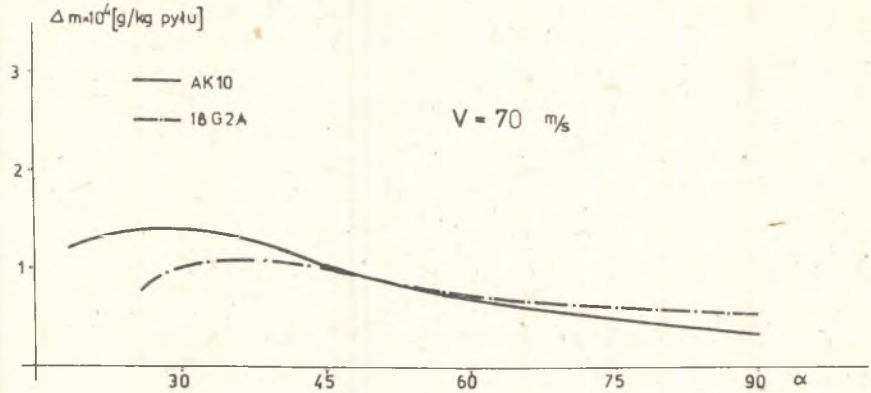
Wielkość zużycia erozyjnego próbki określano na podstawie dwukrotnego ważenia, na wadze analitycznej, przed i po pomiarze.

## 4. WNIOSKI POMIARÓW I WNIOSKI KOŃCOWE

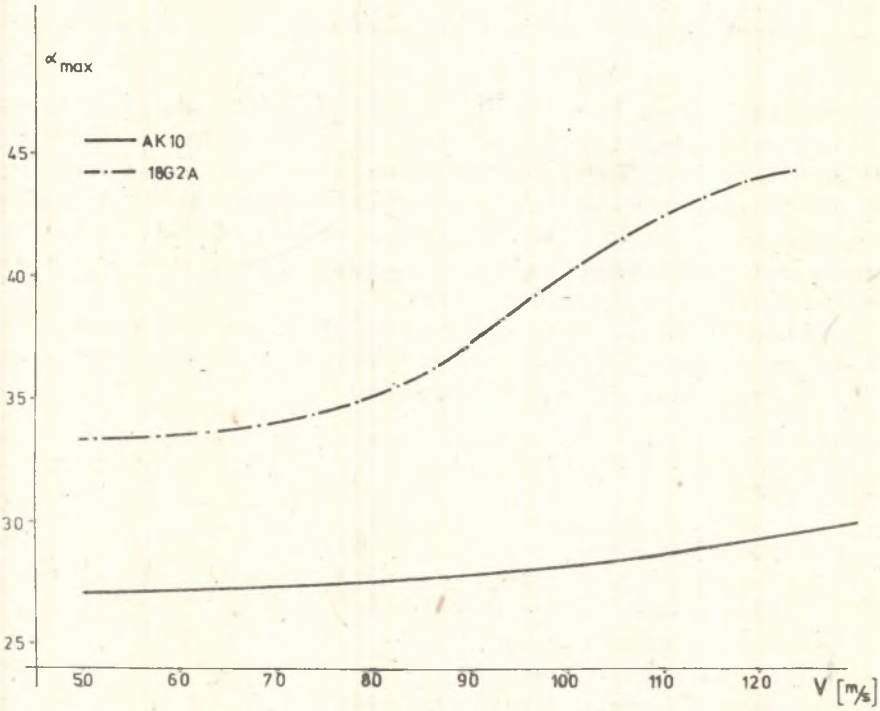
Badania przeprowadzono w zakresie kątów $\alpha = 20^{\circ} - 90^{\circ}$ oraz w zakresie prędkości V = 50 - 130 m/s na próbkach ze stali 18 G 2A i stopu aluminium AK 10. W wyniku pomiarów otrzymano rodzinę krzywych $W_t = [f(V)]$, $\alpha$ = const, z których jedną przedstawiono na rysunku 4. Na podstawie tych charakterystyk sporządzono wykres zależności $W_t = [f(\alpha)]$, V = const (rysunek 5) celem wyznaczenia $\alpha_{max}$. Korzystając z tych wykresów posługując się algorytmem przedstawionym w rozdziale 2, określano zależność jednostkowej energii zużycia $\mathcal{E}$ i $\psi$ od prędkości cząstek (rys. 7). Celem wyznaczenia zakresu zmiany maksymalnego kąta zużycia sporządzono rys. 7, na podstawie zależności $W = [f(\alpha)]$ ; V = const.
Wszystkie przedstawione wykresy zostały przedstawione w sposób porównawczy dla obu materiałów erodujących, pozwala to określić względne własności erozyjne obu materiałów. Tak na przykład w zakresie mniejszych prędkości zużycie erozyjne obu materiałów jest dla danego kąta prawie równe, natomiast przy kątach zbliżonych do wartości maksymalnej zużycie erozyjne stopu aluminium jest wyraźnie większe. Analizując rys. 6 można zauważyć, że dla AK 10 maksymalny kąt zużycia jest prawie stały i wynosi 28°C, natomiast w przypadku stali 18 G 2A zmienia on się w zakresie od 32°C do 45°C.



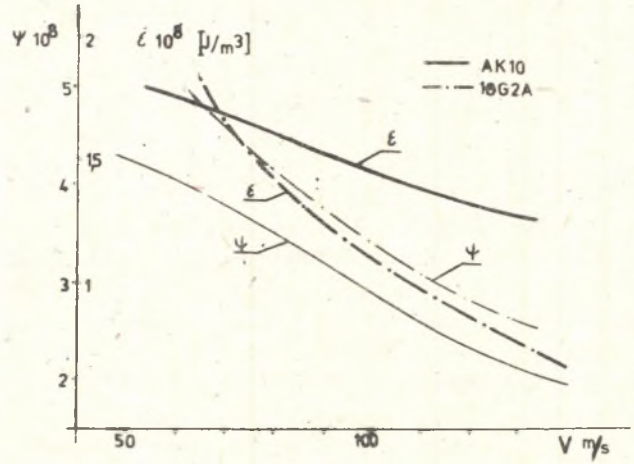

Rys. 4. Zależność skutków erozji w funkcji prędkości zapylonego strumienia




Rys. 5. Zależność skutków erozji w funkcji kąta napływu strumienia




Rys. 6. Zmiana maksymalnego kąta erozji w funkcji prędkości zapylanego strumienia




Rys. 7. Wpływ prędkości zapylonego strumienia na wartość wielkości energii $\varepsilon$ i $\psi$

Porównując krzywe $\varepsilon$ i $\psi$ na rys. 7 widać, że stop aluminium w zakresie dużych prędkości wykazuje większą odporność na erozję kruchą, natomiast stal w zakresie mniejszych prędkości większą odporność na erozję plastyczną. Na podstawie przeprowadzonego porównania wyników badań z wynikami zamieszczonymi w pracy [2] stwierdzono ich zgodność zarówno pod względem jakościowym i ilościowym. Przeprowadzona analiza wyników potwierdza słuszność przyjętego modelu zużycia erozyjnego.

Wyniki prowadzonych badań mogą stanowić przesłankę do lepszego doboru właściwych materiałów konstrukcyjnych elementów układu przepływowego wentylatorów pracujących w czynniku zapylonym.

OZNACZENIA

$\varepsilon$ - stała materiałowa $[kg^{-1}s^{3/2}m^{1/2}]$,
K - maksymalna wartość składowej normalnej prędkości, przy której materiał podlega deformacji sprężystej [m/s],
$K_1$ - stała materiałowa $[(m/s)^{1/2}]$,
M - masa padających cząstek [kg],
V - prędkość cząstek w momencie kolizji [m/s],
$V_{pow}$ - prędkość strumienia powietrza [m/s],
$W_c$ - erozja plastyczna [g],
$W_D$ - erozja deformująca [g],
$\alpha$ - kąt napływu zapylonego strumienia [deg],

$\varepsilon$ - wartość energii potrzebnej do wytarcia jednostki objętości materiału na drodze deformacji sprężystej $[KJ/m^3]$,

$\Psi$ - wartość energii potrzebnej do wytarcia jednostki objętości materiału na drodze deformacji plastycznej (mikrocięć) $[KJ/m^3]$.

LITERATURA

[1] Chmielniak T. i inni: Badanie erozji wentylatorów. Praca naukowo-badawcza (niepublikowana) 1980 rok.

[2] Bitter J.G.A.: A study of erosion phenomena. Part I and II WEAR. 6/1963, 5-21, 6/1963, 169-190.

[3] Neilson J.H., Gilchrist A.: Erosion by stream of solid particles. WEAR. 11/1968.

[4] Świrski J.: Badania erozji popiołowej i ocena zużycia rur wskutek jej działania. Prace Instytutu Energetyki z.1, 1975.

[5] Kragelski I.V.:Trenije i iznos. Izd. Maszinostrojenie, Moskwa 1968.

Wpłynęło do Redakcji w kwietniu 1981

Recenzent: Doc dr inż. Jan Kędzierzawski

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЫЛЕВОЙ ЭРОЗИЕСТОЙКОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Р а з ю м е

В работе представлен метод измерения и результаты исследований износа выбранных конструкционных материалов подверженных влиянию запыленного газа. Опираясь на полученных данных были расчитаны характеристические признаки материалов решающие о эрозиестойкости.

THE INTRODUCTORY INVESTIGATION OF CONSTRUCTION MATERIALS RESISTANCE TO DUST EROSION

S u m m a r y

The paper presents a method of measurement and the results of investigation on wear of selected construction materials remaining under the influence of a dusty gasous agent. The material characteristic magnitudes which are decisive in erosion resistance have been calculated basing on the data obtained.