

Jan RADWAŃSKI

O.B.R. "BAROWENT"

Katowice

EROZJA PYŁOWA WIRNIKÓW WENTYLATORÓW PRZEMYSŁOWYCH

Streszczenie. W opracowaniu podano opis mechanizmu erozji pyłowej z uwzględnieniem własności ruchowych stosowanych typów wentylatorów w przemyśle. Omówiono sposoby badań zjawiska erozji pyłowej na stanowisku modelowym oraz podano wyniki badań efektu erozji łopatek wirników modelowych typu promieniowego. Poruszono także zagadnienie materiałowe mające istotny wpływ na trwałość wirników w warunkach transportu ozyznika znacznie zapyłonego.

1. Wstęp

Poważna część awarii wentylatorów zainstalowanych w przemyśle jest spowodowana działaniem erozyjnym pyłów zawartych w przetłaczanych przez wentylatory gazach. Najbardziej na działanie erozji strumieniowej jest narażony wirnik wentylatora oraz układ łopatkowy statora i kierownicy aparatu regulacyjnego. Według statystycznych danych, np. w energetyce zawodowej [10] straty mocy siłowni dużej mocy ($> 200\text{MW}$) na skutek awaryjnego postoju wentylatorów powietrza, spalin i młynowych sięgają 3,5%, z tego przypadku prawie połowa na awarie spowodowane erozyjnym działaniem pyłów zawartych w gazach spalinowych i powietrzu na elementy układu łopatkowego wentylatorów. Oprócz wysokiej sprawności i dobrej regulacyjności wentylatory a zwłaszcza wentylatory spalin i młynowe, stosowane w energetyce cieplnej oraz wentylatory w instalacjach przemysłowych o znacznym zapyleniu ozyznika powinny posiadać dużą odporność na erozję pyłową. Sprawność odpylania współczesnych urządzeń odpylających jest obecnie bardzo wysoka. Zależy ona w znacznym stopniu od stanu technicznego oraz od sprawności obsługi tych urządzeń. Istnieją jednak technologie przemysłowe, które z natury rzeczy wymagają przetłaczania ozyznika o dużym zapyleniu. W przypadkach awaryjnych w instalacjach kotłowych koncentracja pyłów w gazach spalinowych może wynosić od $1\div 3\text{ g/m}^3$, podczas gdy za normalną uważa się $0,2\div 0,5\text{ g/m}^3$. W przemyśle metali nieżelaznych przy produkcji pyłu cynkowego spotyka się koncentrację pyłów do 40 g/m^3 . Oprócz koncentracji ważny jest: kształt pyłów, ich skład chemiczny, własności fizykochemiczne oraz udział wielkości cząstek w jednostce objętościowej przetłaczanego gazu.

Dla pyłów w tablicy 1 przedstawiono wielkość pyłów powstałych z procesów spalania [1]

Tablica 1

Pył z procesów spalania i wypalania	Wielkość ziaren i zawartość wagowa		
	0 ÷ 1 μm	0 - 5 μm %	0 - 10 μm
Pył z kotłów pyłowych	1	25	50
Popiół z kotłów o palenisku oykłonowym	6	60	85
Pył klinkierów	1	20	40
Pył z wielkich pieców za odpylaczem	5	30	60
Pył z pieców martenowskich	90	98	99

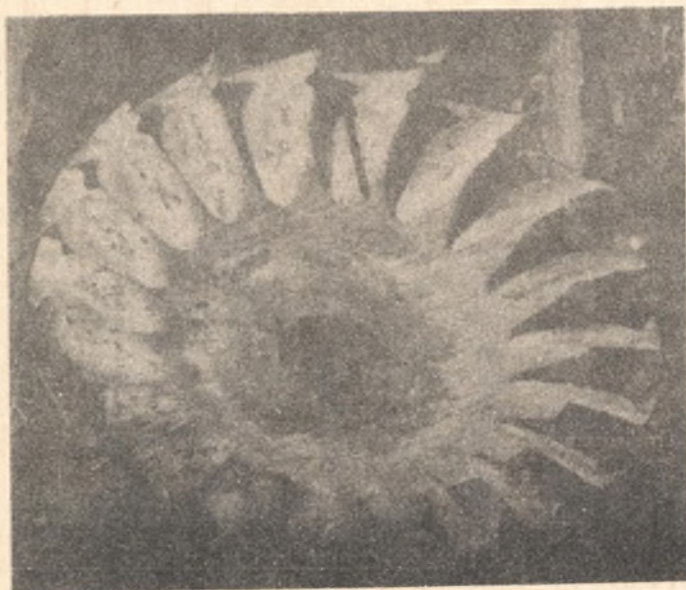


Rys. 1. Wirnik wentylatora promieniowego uszkodzony działaniem erozyjnym pyłu kotłowego

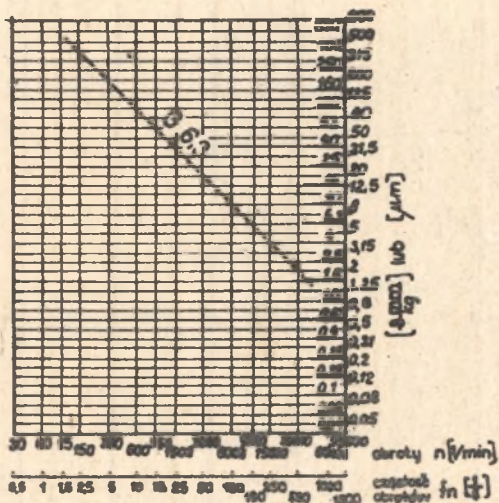
Na rysunkach 1 i 2 pokazano typowe uszkodzenia wirników wentylatora promieniowego i osiowego, spowodowane erozją pyłową. Ubytkowi masy wirnika towarzyszy naruszenie równowagi dynamicznej i statycznej wirnika, co objawia się zwiększeniem się amplitudy drgań głównych węzłów konstrukcyjnych wentylatora ponad dopuszczalny poziom, co z kolei może spowodować uszkodzenie łożysk, przegięcie wału lub ścięcie śrub fundamentowych itp.

Drgania zespołu wirującego mogą być spowodowane zjawiskiem zaklejania się kanałów międzyłopatkowych, tworzeniem się narostów pyłu na łopatkach, tarczy nośnej i nakrywającej. Skrajnym przypadkiem awaryjnym może być osłabienie przekrojów nośnych łopatek co w konsekwencji prowadzić może do tzw. eksplozji wirnika, spowodowanej

przekroczeniem dopuszczalnych naprężeń w materiale łopatkki, tarozoy nośnej lub na wale głównym.



Rys. 2. Wirnik wentylatora osiowego uszkodzony działaniem erozyjnym pyłu kotłowego



Rys. 3. Dopuszczalne resztkowe niewyważenie w zależności od obrotów wentylato-

Ogólnie można podać, że wielkość dodanej lub odjętej masy na skutek erozji pyłowej lub zaklejenie się wirnika może być tym większa im większa będzie masa zespołu wirującego wentylatora. Praktyczne doświadczenia zdobyte na wykorzystaniu danych z eksploatacji wskazują, że reszkowe dopuszczalne niewyważenie oraz amplituda drgań zmieniają się odwrotnie proporcjonalnie do obrotów wirnika [2]

$$e_{dop} \cdot \omega = const$$

dla wentylatorów można posłużyć się zależnością

$$e_{dop} = \frac{6,3}{\omega} \quad e_{dop} \sim \frac{1000}{n}$$

gdzie:

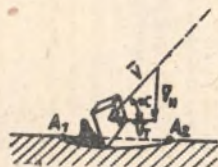
ω - prędkość kątowna zespołu wirującego,

n_s - obroty wirnika.

Na rysunku 3 pokazano zmianę dopuszczalnego resztkowego niewyważenia, w zależności od obrotów, zakładając prędkość obwodową mimośrodowo masy wirującej $u_o = 6,3$ mm/s przyjętej dla wentylatorów.

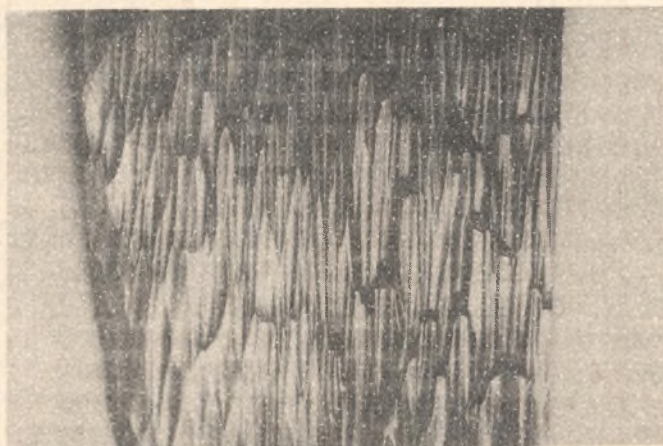
2. Mechanizm erozji

Od samego początku styku ziarna pyłu z powierzchnią podlegającą procesowi erozji pyłowej zaczyna się praca odkształcenia plastycznego i proces skrawania materiału. Od momentu styku ziarna pyłu z atakowanym materiałem posuwa się ono ruchem opóźnionym przez opory skrawania. Energia kinetyczna ziarna wystarczy do wykonania pracy skrawania wzdłuż toru A_1-A_2 lub nie wystarcza i wtedy ziarno grzęźnie w materiale (rys. 4).



Rys. 4. Styk ziarna pyłu z materiałem

Przekroczenie granicy odkształcenia plastycznego materiału prowadzi do powstawania wyżłobień w materiale (rys. 5). Cechą charakterystyczną tych wyżłobień jest to, że nie są one wypełnione produktami korozji a kierunek ich jest zgodny z kierunkiem przepływającej strugi gazu.



Rys. 5. Wyżłobienie w materiale łopatkę wentylatora podlegającej procesowi erozji pyłowej

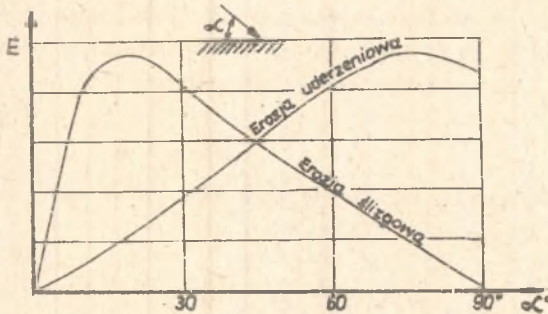
Ubytek materiału następuje w przypadku przekroczenia granicy wytrzymałości doraźnej lub w przypadku dostatecznej twardości cząstek pyłu, które działają jako ostrze skrawające na obrabiany materiał.

Na podstawie doświadczeń przeprowadzonych przez różnych badaczy stwierdzono, że intensywność ubytku materiału zależy od szeregu czynników a przede wszystkim zależy od:

- kształtu i masy ziarna pyłu,
- prędkości uderzenia o powierzchnię,
- kąta uderzenia o powierzchnię,
- własności fizykochemicznych płynu przenoszącego pył,
- własności mechanicznych materiału i stanu jego powierzchni.

W efekcie całkowitej erozji na podstawie dotychczasowych rozważań można wyróżnić tzw. erozję strumieniową uderzeniową, wynikającą z normalnych sił uderzenia cząstek pyłu na powierzchnię materiału oraz erozję strumieniową ślizgową, wynikającą z sił stycznych działających na cząstkę pyłu w stosunku do powierzchni podlegającej erozji^{x)}

$$E_o = E_u + E_s.$$



Rys. 6. Składowe erozji strumieniowej

Na rys. 6 pokazano zmianę intensywności składowych erozji E_u , E_s w zależności od kąta uderzenia α . Zużycie erozyjne materiału polega zatem w rzeczywistości na szlifowaniu i rozciąganiu materiału oraz na wywoływaniu szeregu pęknięć wywołanych uderzeniem cząstek pyłu i przekroczeniu krytycznych naprężeń w materiale. Miarą erozji może być ubytek masy Δm_E elementu urządzenia podlegającego działaniu erozji strumieniowej lub ubytek objętości materiału ΔV_E .

Miarą erozji strumieniowej może być stosunek ubytku masy Δm_E do ilości pyłu, która ten ubytek wywołała w określonym czasie mp.

$$K_E = \frac{\Delta m_E}{m_P}$$

^{x)} W literaturze francuskiej Erosion fragile i Erosion ductile, w literaturze niemieckiej Prallstrahlverschleiss, Gleitstrahlverschleiss.

ponieważ $\Delta m_E = \rho_E \cdot \Delta V_E$ otrzymamy wskaźnik erozji w postaci

$$E_o = \frac{KE}{\rho E} = \frac{\Delta VE}{mp},$$

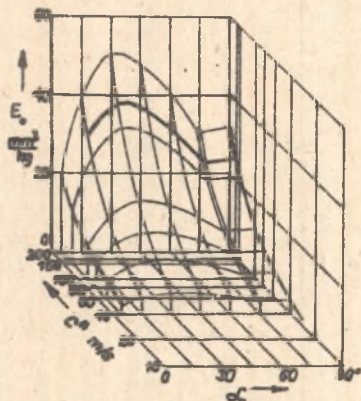
gdzie:

ΔV_E - ubytek objętości materiału podlegającego erozji strumieniowej,

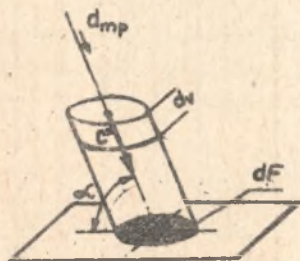
ρE - gęstość materiału,

mp - masa pyłu wywołującego erozję materiału [kg].

Dla określonych kombinacji pyłu i materiału konstrukcyjnego dla różnych prędkości strumienia mieszanki pyłowo-gazowej m^x oraz kąta uderzenia α , drogą doświadczeń otrzymujemy różne wartości wskaźnika erozji E_o .



Rys. 7. Wskaźnik erozji w zależności od α i α^x wg badań Wellingera i Netza



Rys. 8. Rurka strumieniowa pyłowo - powietrzna

Na rys. 7 pokazano wyniki badań erozji płyty stalowej St37 atakowanej strumieniem powietrza zawierającego piasek kwarcowy. Wyniki przedstawione na rys. 7 z wyjątkiem krzywej przerywanej uzyskano drogą ekstrapolacji. Zmiana ubytku masy materiału na skutek erozji strumieniowej w określonym przedziale czasu Δt może być nazwana prędkością erozji. W elementarnej objętości strumienia ΔV zawarta jest pewna masa pyłu dmp . Koncentracja pyłu w czynniku wyraża się zatem zależnością:

$$k = \frac{dmp}{dV},$$

zaś intensywność napylenia określonej powierzchni dF wynosi

$$\dot{q} = \frac{dmp}{dt \cdot dF} = \frac{dmp}{dF} = k \cdot \alpha^x.$$

Uwzględniając wyżej podane definicje otrzymamy miarę liniowej prędkości erozji w postaci:

$$\bar{v}_E = 10^{-3} \cdot E_o \cdot \dot{q}$$

gdzie:

E_o - stała erozji wskaźnik erozji,

\dot{q} - intensywność napylenia.

Zależność powyższa umożliwia obliczenie czasu zużycia erozyjnego elementu konstrukcyjnego, podlegającego procesowi ero-

zji strumieniowej przy założeniu intensywności napyłania badanej powierzchni F i znanym wskaźniku erozji E_0 .

3. Kształt i własności wirników wentylatorów

W wentylatorach promieniowych znajdują zastosowanie następujące główne typy wirników:

1. Wirniki o łopatkach zakończonych promieniowo $\beta_2 = 90^\circ$.
2. Wirniki o łopatkach zagiętych do tyłu $\beta_2 < 90^\circ$.
3. Wirniki o łopatkach zagiętych do przodu $\beta_2 > 90^\circ$.

Dla przyjętej zewnętrznej średnicy koła łopatkowego stosunek średnic $\frac{D_2}{D_1}$ i obrotów parametry przepływowe oraz odporność na erozję będą różne:

1. Wirnik o łopatkach promieniowych $\beta_1 = \beta_2 = 90^\circ$ stosowany jest do transportu czynnika zapyłonego oraz do transportu trocin, paździerzy, wełny itp. Posiada bardzo dobrą odporność na zaklejanie, tj. odkładanie się części stałych zawartych w czymniku na łopatkach. Sprawność całkowita niska $\eta \leq 0,6$.

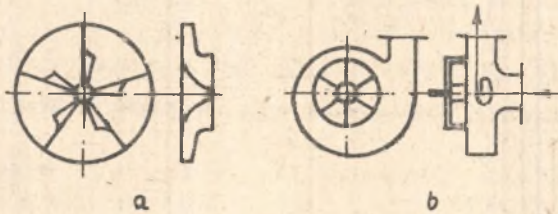


Rys. 9a,b,c. Wirniki wentylatorów promieniowych

2. Wirnik o łopatkach zagiętych do tyłu $\beta_1 < 90^\circ$ bez zawirowania wstępnego kąt wylotu łopatki wynosi $\beta_2 = 20^\circ \div 75^\circ$ w przeważających typach wentylatorów spotykanych w praktyce $\beta_2 \sim 45^\circ$. Wirniki tego typu są wrażliwe na działanie erozyjne pyłów w obszarze krawędzi natarcia łopatek w pobliżu tarczy nośnej. W praktyce ruchowej stwierdzono dla pewnego zakresu kątów β_2 wrażliwość na zaklejanie się kanałów międzyłopatkowych. Sprawność całkowita $\eta > 0,8$.

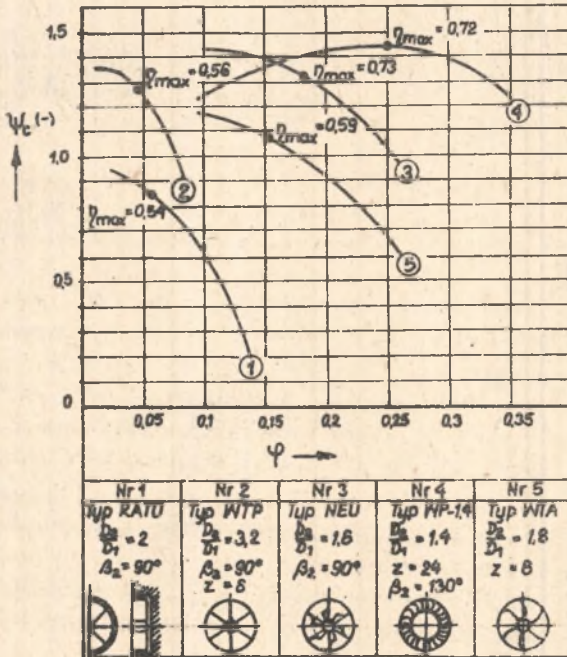
3. Wirniki o łopatkach pochylonych do tyłu wygiętych do przodu $\beta_2 = 75^\circ \div 80^\circ$. Erozja materiału łopatki następuje w okolicy krawędzi natarcia w pobliżu tarczy nośnej jak w przypadku [2], lecz zagięcie łopatek do przodu nadaje im dobrą odporność na zatkanie. Sprawność całkowita $\eta_0 = 0,75 \div 0,8$.

4. Wirniki łopatkach o promieniowych $\beta_2 = 90^\circ$ z wlotem osiowym z dyfuzorem pierścieniowym lub bez. Wirniki te cechuje dobra odporność na zaklejanie oraz stosunkowo mniejsza wrażliwość na erozję pyłem zawartym w ożynniku. Wirniki te są szczególnie wytrzymałe i nadają się do wentylatorów wysokoobrotowych. Możliwe jest korzystne z punktu widzenia przepływowego rozwiązanie z wirującym dyfuzorem oraz zastosowanie łopatek pochylnych do tyłu. Wirnik nadaje się do regeneracji powierzchni zużytych szczególnie w strefie promieniowej łopatki. Sprawność całkowita $\eta \geq 0,75$.



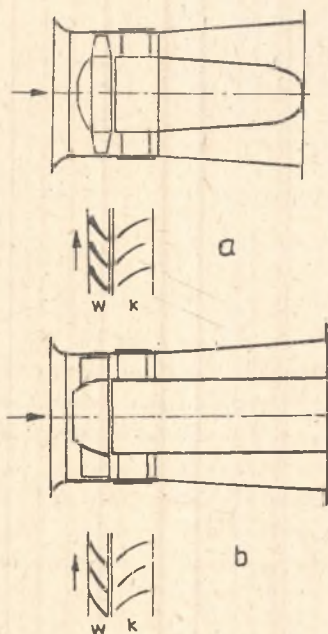
Rys. 10a,b. Wirniki wentylatorów promieniowych

5. Wentylator promieniowy ze swobodnym wirnikiem $\beta_1 = \beta_2 = 90^\circ$ pracujący w obudowie cylindrycznej. Układ ten cechuje duża odporność na za-



Rys. 11. Charakterystyka przepływowa wybranych wirników wentylatorów promieniowych przystosowanych do transportu gazów silnie zapylnych

klejanie oraz erozję. Wadą układu jest stosunkowo niska sprawność $\eta \leq 0,5$. Może być zastosowany do specjalnych technologii o ruchu ciągłym, np. pyły cynkowe sproszkowane metale i minerały oraz tworzywa itp. Na rys. 11 przedstawiono charakterystykę przepływową $\psi = f(\varphi)$ dla wybranych wirników wentylatorów promieniowych, przystosowanych ze względu na swój kształt geometrii układu łopatkowego do przetłaczania gazów silnie zapylnych. Wirniki te, oprócz własności samooczyszczających, posiadają wysokie wskaźniki ciśnienia ψ , co umożliwia stosowanie niższych obrotów w porównaniu do normalnych wysokosprawnych wentylatorów.



Rys. 12. a, b. Wentylator osiowy reakcyjny i akcyjny

6. Wentylator osiowy reakcyjny z łopatkami profilowanymi kierownicami tylnymi jednopowłokowymi. Nie nadaje się do transportu mieszaniny pyłowo-gazowej. Konieczność stosowania dużych prędkości obwodowych prowadzi do szybkiego zużycia się łopatek wirnika oraz kierownic. Najczęściej w pierwszym rzędzie ulega erozji krawędź natarcia łopatki. Zmiana profilu na czole i spływie łopatki powoduje obniżanie się parametrów przepływowych oraz sprawności.

Stosowanie specjalnych metali na łopatkę z uwagi na zwiększenie sił odśrodkowych jest ograniczone. Łopatki wykonywane są ze stopu aluminiowego elektronu lub tworzywa. Możliwe jest stosowanie jedynie nakładek odpornych na erozję. Łopatki kierownicze mogą być przystosowane do indywidualnej wymiany. Sprawność całkowita $\eta_c \geq 0,8$.

7. Wentylator osiowy akcyjny z południkowym przyspieszeniem strumienia z łopatkami jednopowłokowymi oraz kierownicami tylnymi jednopowłokowymi. Z uwagi na duże wskaźniki ścierania $\psi = 0,7 - 0,9$ i wydajności $\varphi > 0,3$ wentylator ten nadaje się doskonale do przetłaczania gazów spalinowych, np. w kotłach parowych. Pod względem przepływowym równoważny jest

wentylatorowi dwustrumieniowemu typu promieniowego (przy tych samych obrotach). Nadaje się do łatwej naprawy bez konieczności demontażu wirnika. Łopatki kierownicze podlegają okresowej wymianie (od 1/3 ilości łopat jest wymienna). Sprawność całkowita $\eta > 0,8$.



Rys. 120. Łopátka wentylatora reakcyjnego uszkodzona pyłami w okolicy krawędzi natarcia

4. Badania erozji wirników wentylatorów

Badanie zjawisk erozji może odbywać się na modelach zbliżonych do warunków rzeczywistych lub w warunkach eksploatacji wentylatora. Badania te prowadzi się w stosunkowo dużym przedziale czasowym, ponieważ zjawisko degradacji ujawnia się dopiero po upływie dłuższego czasu. W przypadku badań na próbkach metalu lub tworzywa stanowisko prób powinno odtwarzać dobrze zjawiska naturalne i odtwarzać je w czasie stosunkowo krótkim. Mogą być zastosowane różne metody pomiaru ubytków masy elementu wentylatora, podlegającemu procesowi erozji.

1. Ubytek masy Δm_E

Metoda pomiaru ubytku masy jest najbardziej rozpowszechniona, daje dobre wyniki, jeżeli ubytek masy próbki jest odpowiednio duży w stosunku do masy całej próbki. W metodzie tej wymaga się, aby próbka była dobrze oczyszczona a do pomiaru masy używa się precyzyjnej wagi.

2. Zmiana objętości ΔV_E

Pomiar ubytku objętości musi być przeprowadzony dokładnymi metodami, wymagane jest stosowanie płynu dobrze penetrującego o płaskim menisku.

3. Głębokość erozji S_E

Zdziiera się powierzchnię aerodynamiczną aż do całkowitego zaniku śladów wywołanych erozją - grubość warstwy materiału daje wyobrażenie o głębokości zasięgu erozji.

4. Pomiar profilu chropowatości

Można tutaj stosować pomiar metodą mechaniczną lub optyczną morfologii powierzchni zarodowanej. Stosuje się mierniki chropowatości z czujnikiem mechanicznym lub mikroskopy polaryzujące albo mikroskopy pomiaru głębokości.

5. Metoda oporowa

Erozji poddana jest próbka, która jest włączona jako ramiona układu pomiarowego mostka oporowego. Możliwy jest pomiar ciągły ubytku masy w próbkach nieruhotomych.

6. Metoda oceny wzrokowej (jakościowa)

O ile zachodzi potrzeba porównywania różnych materiałów o różnym stopniu i formie skutków erozji można opierać się na klasyfikacji opartej na ocenie wzrokowej, co dla wstępnych badań jest wystarczające.

Do oceny wzrokowej można wykorzystać kategorie określające stan powierzchni podlegającej procesowi erozji przy określonej intensywności naplycia badanej powierzchni [4].

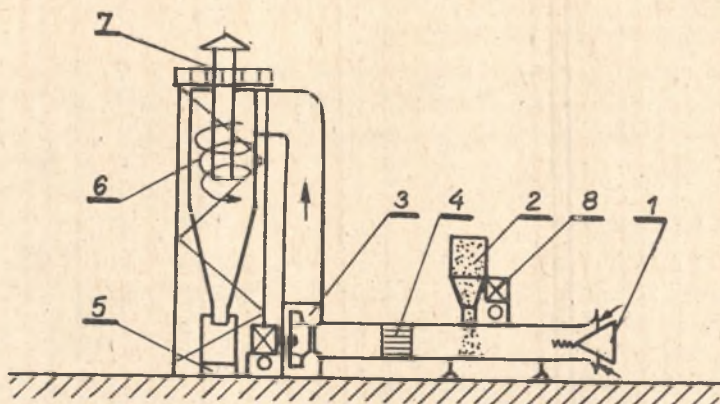
Kategoria 1 - doskonała	żadnych widocznych śladów
Kategoria 2 - dobra	powierzchnia zmatowiała
Kategoria 3 - średnia	widoczne bruzdy
Kategoria 4 - niska	znaczna erozja rzędu mm
Kategoria 5 - zerowa	znaczne zniszczenia i przecięcia próbki.

7. Metoda modelowa

Na rys. 13 pokazano stanowisko prób do badań erozji wirników wentylatorów modelowych. Na stanowisku tym można obserwować krytyczne miejsca działania erozyjnego pyłu, stosując metodę wizualną oraz określić degradację (ubytek masy $\Delta m_p I$) łopatek wirnika. Stanowisko to należy do stanowisk typu otwartego, pozwalające na obserwację zużycia erozyjnego elementów wentylatora przy różnym stopniu koncentracji pyłu "k" rodzaju pyłu oraz stopnia zadławienia przepływu.

Przeprowadzenie doświadczeń na modelach celem studiowania zjawisk erozji w wyniku przepływu czynnika zapyłonego wymaga przestrzegania zasad pełnego podobieństwa torów cząstek pyłu w podobnych pod względem hydrodynamicznym przepływach. Zakładając dostateczne małe rozmiary cząstek pyłu w stosunku do promienia zakrzywienia toru cząstki z pominięciem sił ciężenia w geometrycznie podobnych kanałach spełnione będą następujące warunki:

- przepływ wzdłuż ścian kanału będzie podobny,
- przepływ wokół cząstki pyłu będzie podobny,
- tory cząstek będą geometrycznie podobne.



1. regulacja wlotu powietrza 2. dozownik pyłu 3. wentylator doświadczalny
 4. kanał z prostownicą 5. zasobnik pyłu 6. cyklon
 7. wylot odpylanego powietrza 8. silnik dozownika

Rys. 13. Stanowisko prób modelowych

Warunkiem podobieństwa przepływu dwufazowego jest równość następujących liczb podobieństwa.

Liczba Reynoldsa odniesiona do wybranego wymiaru liniowego

$$Re_a = \frac{\bar{c} \cdot a}{\nu}$$

Liczba Bartha

$$Ba = \frac{3}{4} c_A m \frac{\rho_g}{\rho_p} \cdot \frac{a}{d}$$

Liczba Reynoldsa odniesiona do średnicy równoważnej cząstki pyłu

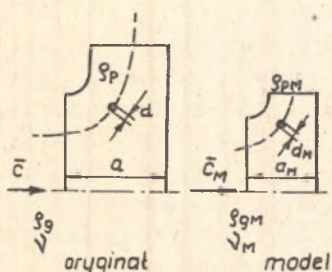
$$Re_d = \frac{\bar{w} \cdot d}{\nu}$$

Liczba Froude'a

$$Fr = \frac{\bar{c}}{\sqrt{g \cdot a}}$$

gdzie:

- c_A - współczynnik oporu aerodynamicznego (-),
 \bar{c} - prędkość bezwzględna m/s,
 \bar{w} - prędkość względna cząstki pyłu m/s,
 ρ_g - gęstość czynnika podstawowego (gazu) kg/m^3 ,
 ρ_p - gęstość pyłu kg/m^3 ,
 ν - lepkość,
 a - wybrany wymiar liniowy m,
 d - średnica równoważna cząstki pyłu m.



Rys. 14. Oryginał i model kanału przepływowego

Podane zależności pozwalają na określenie parametrów czynnika oraz dobrą skalę modelu celem zapewnienia pełnego podobieństwa zjawisk przepływowych w oryginale i modelu. Przy założeniu warunku równości podanych liczb podobieństwa otrzymamy związki pozwalające wyznaczyć parametry czynnika zapyłonego modelowego (tabl. 2).

Tablica 2

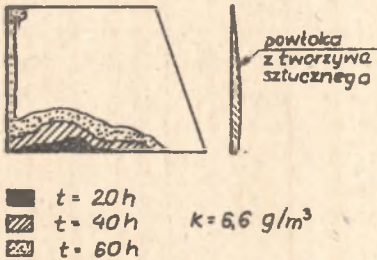
Lp.	Warunek równości liczb podobieństwa	Zależność dla modelu	Oznaczenie
1	$Fr = Fr_M$	$c_M = c \cdot \sqrt{s}$	prędkość w umownym przekroju
2	$Re_a = Re_{aM}$ $Fr = Fr_M$	$\nu_M = \nu \sqrt[2]{s^3}$	Lepkość czynnika nośnego
3	$Re_d = Red_M$ $Re_a = Re_{aM}$ $Fr = Fr_M$	$d_M = d \cdot s$	średnica równoważna cząstki pyłu
4	$Ba = Ba_M$ $Red = Red_M$ $Re_a = Re_{aM}$ $Fr = Fr_M$	$\frac{\rho_{pM} \cdot \rho_g}{\rho_{gM} \cdot \rho_p} = 1 \cdot \frac{a_M \cdot d}{a \cdot d_M} = 1$	gęstość pyłu i czynnika modelowego
5	$Re_a = Re_{aM}$ $Fr = Fr_M$ $\nu = \nu \rho$	$s = \sqrt[3]{\left(\frac{\eta_M \cdot R_M \cdot p \cdot T}{\eta \cdot R \cdot p_M \cdot T_M}\right)^2}$	skala geometrycznego podobieństwa modelu

Niektóre wyniki doświadczeń

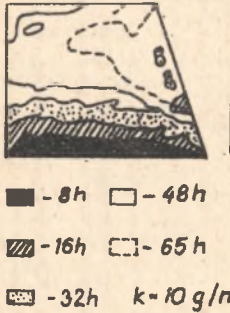
W celu przeprowadzenia badań jakościowych i ilościowych na modelowych wirnikach wentylatorów promieniowych wykorzystano stanowisko doświadczalne uwidocznione na rys. 13.

Do badań użyto piasek kwarcowy, który dozowano do strumienia powietrza na wlocie do wentylatora. W doświadczeniu tym w pierwszym etapie badań otrzymano jakościowe obrazy zużycia się erozyjnego łopatek wirnika wentylatora. Podczas badań zachowano stałą wydajność oraz stałą koncentrację piasku. Stosunkowo duża koncentracja $k = 6,6 \text{ g/m}^3$ i $k = 10 \text{ g/m}^3$ większa niż normalnie spotykana w praktyce pozwoliła na otrzymanie morfologii zjawi-

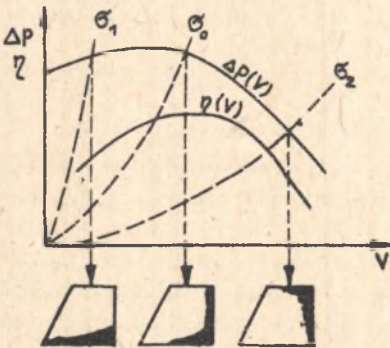
ska erozji łopatek wirnika w stosunkowo krótkim czasie. Po upływie 5 godzin stwierdzono pierwsze oznaki erozji.



Rys. 15. Degradacja łopatki wentylatora promieniowego WPW - 1,4 (łopatka profilowa)



Rys. 16. Degradacja łopatki wentylatora promieniowego WPW - 1,4 (łopatka płaska)



Rys. 17. Erozja łopatek wirnika promieniowego w zależności od stopnia zadławienia

Proces erozji rozpoczął się na powierzchni noska łopatki w części bliższej tarczy nośnej wirnika. Z upływem czasu pracy wentylatora ścieranie łopatek następowało na powierzchni zewnętrznej (podośnieniowej) wzdłuż krawędzi natarcia łopatki bliżej tarczy nośnej. Obraz przebiegu erozji pokazany na rys. 15 i 16 otrzymano przy stałej wydajności wentylatora, odpowiadającej maksymalnej sprawności wentylatora. Według Klingenberga [5] oraz badań własnych [6] fotografia zużycia się powierzchni łopatek zależna jest w dużym stopniu od punktu pracy wentylatora i tak rys. 17

σ_2

dla wydajności większych od nominalnych następuje erozja łopatki w części zbliżonej do krawędzi spływu

σ_1

dla wydajności mniejszych od nominalnych następuje erozja łopatki w części zbliżonej do krawędzi natarcia

σ_0

dla wydajności nominalnych następuje erozja łopatki w części zbliżonej do tarczy nośnej wirnika.

W badaniach eksploatacyjnych posłużyć się można metodą pomiaru grubości łopatek w maksymalnej ilości punktach powierzchni łopatki narażonej na ubytki... Średnie grubości obliczone z pomiarów wybranej ilości łopatek [np. 3] można zestawić w tabelicy liczbowej.

Pomiar taki dokonano na wentylatorze promieniowym firmy MARELLI (Włochy), który współpracował z instalacją przemyślową z czynnikiem o znacznym zapy-

leniu. Na rys. 18 pokazano wyniki pomiarowe głębokości erozji łopatek po okresie pracy 2` miesięcy [7].

Wyniki badań wskazują, że najbardziej narażonym obszarem łopatki na erozję pyłową w wentylatorach promieniowych jest obszar zbliżony do tarczy nośnej wirnika. Wirniki z badań praktycznych są bardzo zbliżone do obrazu linii prądowych przed ścianą prostopadłą do kierunku przepływu. Rozpatrując trójparametrowy przepływ przed ścianą jednym z najprostszych wyrażeń dla potencjału prędkości jest:

$$\phi = r^2 - 2x^2.$$

Po przedstawieniu tego wyrażenia do równania Laplace'a

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} = 0.$$

Uwzględniając związki pomiędzy składowymi prędkościami c_x i c_r a potencjałem prędkości ϕ oraz funkcją prądu ψ

$$c_r = \frac{\partial \phi}{\partial r} = \frac{-r}{r} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad c_x = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{r_0}{r} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial r},$$

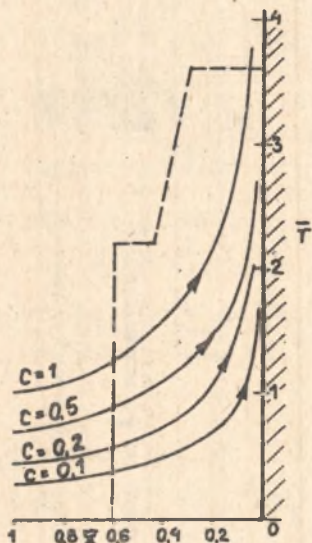
otrzymamy:

$$\psi = \int -\frac{\partial \phi}{\partial x} \cdot \frac{r_0}{r} \cdot dr + c$$

$$x = 0 \quad r = 0 \quad \psi = 0$$

$$\psi = -2 \frac{x}{r_0} \cdot r^2 \quad \text{czyli} \quad x \cdot r^2 = \text{const.}$$

Równanie przedstawiające trójparametrowy przepływ przed ścianą w przepływie ustabilizowanym jest równaniem hiperboli sześciemnej, dla której osie x i r są asymptotami. Według tej zależności można wykreślić przebieg linii prądu pokazanej na rys. 19.



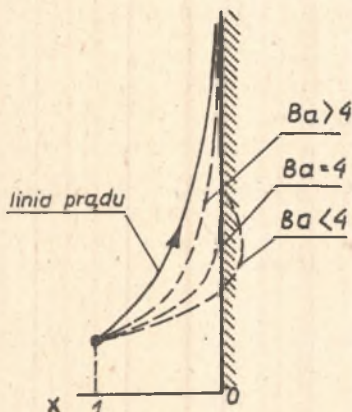
Rys. 19. Linia prądu przed ścianą prostopadłą do kierunku przepływu

W rzeczywistości tor cząstki pyłu będzie inny od linii prądu zależnie od wielkości cząstki i jej gęstości. Cząstki pyłu cięższe będą uderzały o ścianę (tarożę nośną), zaś lżejsze będą się poruszały po torach prawie stycznych do ściany.

Na rys. 20 pokazano tory cząstek przed ścianą prostopadłą do przepływu w zależności od wielkości liczby Bartha Ba lub Frouda Fr , obliczone z równań Oseena dla $Re < 1$ [8].

W zakresie ważności równania NAVIER-STOKE-SA otrzymamy:

$$d_{kr} \geq \frac{3}{16} C_A \cdot \frac{\rho_g}{\rho_p} \cdot L \quad \text{dla } Ba_{kr} = 4.$$



Rys. 20. Tory cząstek pyłu w zależności od liczby Ba

Cząstki pyłu większe od " d_{kr} " będą uderzały o tarzę, pozostałe będą się przemieszczały w kierunku promieniowym po torach zbliżonych do linii prądowych co najwyżej stycznie do tarzy nośnej. Jeżeli gęstość pyłu będzie wzrastała, to coraz to mniejsze cząstki pyłu będą uderzały w tarzę nośną a partie łopatki zbliżone do tarczy nośnej będą wykazywały większe zużycie erozyjne.

Na podstawie dotychczasowych rozważań i doświadczeń eksploatacyjnych z wentylatorami pracującymi w instalacjach o znacznym zapyleniu czynnika można zmniejszyć skutki erozji przez:

- obniżenie koncentracji pyłów przed wentylatorem,
- stosowanie odpowiedniej geometrii części przepływowej wentylatora,
- stosowanie materiałów konstrukcyjnych odpornych na działanie erozji strumieniowej.

Dobór materiału zwozajowy, zależny od trwałości powierzchniowej i charakterystyki mechanicznej, prowadzi do wyboru metali i ich stopów o wysokiej charakterystyce. Ostatnie badania wskazują na możliwość stosowania tworzyw sztucznych o strukturze jednorodnej.

Podstawowe kryteria doboru materiału odpornego na erozję to:

- twardość powierzchniowa warstwy zewnętrznej, wyrażająca się odpornością na udary,
- podwyższona charakterystyka mechaniczna, wyrażająca się odpornością na efekt mechaniczny, wywołany energią falową, zwaną "energiją naprężeń",
- podwyższona granica wytrzymałości zmęczeniowej,
- struktura drobnoziarnista i jednorodna,
- stan powierzchni jak najlepszy.

Posługując się tablicą 2 można sklasyfikować niektóre używane w budowie wentylatorów materiały z punktu widzenia odporności na erozję jak następuje [4]:

Ołów Pb - Kategoria 5 zerowa

materiał nie utwardzony ulega bardzo szybko zniszczeniu.

Stal zwykła St37 - kategoria 5 zerowa

trwałość powierzchniowa słaba, niska charakterystyka mechaniczna, pojawiają się b. szybko formy głębokiej erozji.

Stal uszlachetniona 15CDV-6 - kategoria 4 niska.

Stal utwardzona strukturalnie 17-4-PH - kategoria 3 średnia, utwardzanie za pomocą obróbki plastycznej.

Stal nierdzewna - kategoria 3 średnia, odporność nieco lepsza lecz jeszcze niezadowalająca.

Stop tytanu T-AGV - kategoria 3 średnia, materiał utwardzany w drodze obróbki plastycznej o podwyższonych własnościach mechanicznych.

Nikiel chemiczny - konigen 100u - kategoria 3 średnia, utwardzany przez obróbkę termiczną.

Stellit 6B (CoCr) - kategoria 3 dobra. Materiał bardzo twardy (500 vik).

Stop NiCr13 (80-20-3) - kategoria 2 dobra.

Materiał o dużej twardości powierzchniowej (800 vik) i dobrej charakterystyce mechanicznej.

Poliuretan nieobciążony - kategoria 1 doskonała URALIT, JF6.

Doświadczenia własne na stanowisku do modelowego badania erozji w wirnikach wentylatorów promieniowych wskazują, że na trwałość łopatek wpływa wybitnie rodzaj zastosowanego materiału.

Doświadczalny wirnik posiadał 3 rodzaje nakładek, które pracowały w tych samych warunkach zapylenia [9].

Zastosowano nakładki na aluminium PA-2 stali zwykłej St37s oraz ze stali nierdzewnej 1H18N9T.

Przebiecie nakładki w okolicach krawędzi natarcia nastąpiło w różnym czasie, średnio proporcje czasu pracy wynosiły:

$$PA-2 : St37s : 1H18N9T = 1 : 2,25 : 3.$$

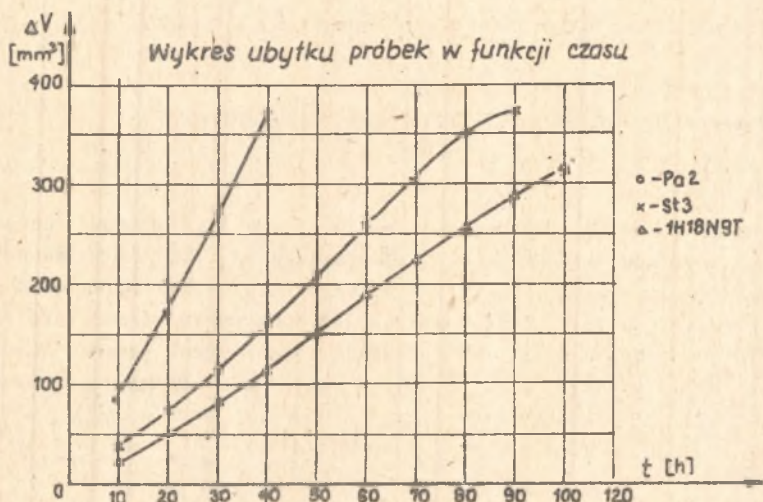
Na rys. 21 pokazano zmianę ubytku średniej objętości nakładki V w zależności od czasu pracy wentylatora t .

Degradacja masy łopatki w czasie zmienia się prawie liniowo przy stałej koncentracji pyłu w przetłaczanym ozywniku.

Wyniki badań nad odpornością różnych materiałów na erozję, które znajdować mogą zastosowanie w konstrukcji wentylatorów przemysłowych, prowadzą do następujących podstawowych wniosków:

Twardość warstwy powierzchniowej powinna być możliwie najwyższa i jednocześnie cechować się dobrym stanem powierzchni.

Odporność materiału na erozję wzrasta wraz z jego twardością, lecz konieczne jest zachowanie równomierności twardości w bardzo wysokim stopniu (np. występowanie płytek grafitowych w żelwie szarym).



Rys. 21. Zmiana ubytku objętościowego ΔV w funkcji czasu

Stal nierdzewna jest odporna na erozję i korozję z uwagi na dużą jednorodność struktury. Niektóre pokrycia elementów mogą skutecznie chronić miejsca i części narażone na działanie erozji, np. chromowanie elektrolityczne, platerowanie stalami nierdzewnymi, napawanie lub lutowanie powłok stali tytanowych lub stali chromowych. Pewne materiały plastyczne nieobciążone, mające własności elastomerów np. poliuretany słabo osiatkowane (sprężone), mają doskonałe własności przeciwoerozyjne i odporność na korozję - niemniej ich zużycie jest ograniczone temperaturą czynnika przyczepnością do metalu oraz niecałkowicie rozpoznanymi problemami starzenia się tych materiałów.

LITERATURA

- [1] Zajączkowski J.: Odpylanie w przemyśle. Wyd. Arkady, 1971.
- [2] Schneider K.: Auswuchtstechnik VDI Verlag Düsseldorf.
- [3] Wellinger, Uetz: VDI Forschungsheft. Nr 449, Düsseldorf 1959.
- [4] Ambuster: Corrosion. Nr 6, 1971.
- [5] Klingenberg: G.: Luft u. Kältetechnik. Nr 5, 1976.
- [6] Praca zbiorowa: Praca ZD FAVENT. Nr 171/III 1973 nie opublikowane.
- [7] Kurpisz Z.: Pomiar zużycia łopatek OBR Barowent 1978 - nie opublikowane.
- [8] Vollheim R.: Pneumatischer Transport - 1971 Leipzig.

- [9] Praca zbiorowa: Badania erozji łopatek OBR Barowent wentylatora promieniow. 1978.
- [10] Praca zbiorowa: Wentylatory dla energetyki - FAWENT. 1972.

ПЫЛЕВАЯ ЭРОЗИЯ РАБОЧИХ КОЛЁС ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ

Р е з ю м е

Представлено описание механизма пылевой эрозии с учётом двигательных свойств вентиляторов, применяемых в промышленности. Обсуждены способы исследования явления пылевой эрозии на моделирующем стенде и сообщены результаты исследования эрозии в лопатках моделируемых колёс радиального типа. Затронуты также проблемы материалов, имеющие существенное влияние на стабильность роторов в условиях транспортировки значительно запылённого фактора.

DUST EROSION OF THE INDUSTRIAL FANS MOTORS

S u m m a r y

The presented description deals with the mechanisms of dust erosion, taking simultaneously into account the motion properties of various types of fans used in the industrial processes. The methods of testing dust erosion effects on a model stand are discussed, and the results pertaining to the radial type model rotor blades are presented. The problems of materials having reasonable influence on the rotor stability in the conditions of the heavy-dusted agents transportation are also mentioned.