

Mariusz LISZEWSKI*, Bazyli KRUPICZ**

BADANIA ODPORNOŚCI EROZYJNEJ WYBRANYCH MATERIAŁÓW

EROSIVE RESISTANCE TESTING OF SELECTED MATERIALS

Słowa kluczowe:

erozja, stal 51CrV4, stal 42 CrMo4

Key-words:

erosion, steel 51CrV4, steel 42 CrMo4

Streszczenie

W pracy analizowano wpływ właściwości mechanicznych R_e , R_m , i KC stali 51CrV4 i 42 CrMo4 stosowanych w młynach wirnikowych na odporność erozyjną κ przy kątach padania strumienia ścierniwa 30°, 60° i 90°. Badania potwierdziły, że przy kącie padania ścierniwa 30° wzrasta odporność erozyjna wraz ze wzrostem granicy plastyczności R_e i wytrzymałości na rozciąganie R_m . Przy kącie padania strumienia ścier-

* Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, e-mail: m.liszewski@interia.pl, tel. 505 134 033.

** Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, e-mail: b.krupicz@pb.edu.pl, tel. (085) 746-93-05.

niwa $\alpha = 90^\circ$ wysoką odporność erozyjną uzyskują materiały posiadające wysoką udarność KC i wytrzymałość R_m .

WPROWADZENIE

Kontakt stałej cząstki z elementami maszyn przepływowych wywołuje ich erozję. Zjawisko to z dużą intensywnością występuje np. w urządzeniach transportu pneumatycznego, w młynach wirnikowych, w wentylatorach, a więc tam, gdzie występuje duże stężenie cząstek stałych. Postępujący na skutek erozji ubytek masy elementów urządzeń nie zapewnia stabilności procesu technologicznego. Problemem kluczowym jest więc dobór materiałów na elementy konstrukcyjne maszyn narażonych na zużycie erozyjne w warunkach rzeczywistego procesu.

Mechanizm erozji jest odmienny dla materiałów plastycznych i kruchych. Zużycie erozyjne danego materiału zależy od energii kinetycznej cząstek, ich kąta padania, wpływu środowiska na stan badanych materiałów. Materiały plastyczne podlegają erozji w dwóch kolejnych stadiach, tj. 1 – brzdowanie – obejmujące odkształcenie i przemieszczenie materiału tworząc fałdy wokół krateru, 2 – oderwanie materiału z fałdy wywołujące efekt erozji [L. 1, 2]. Wynika stąd, że odporność na erozję materiałów plastycznych będzie rosła wraz ze wzrostem ich granicy plastyczności R_e , a więc i twardości H .

Erozja materiałów kruchych następuje głównie na skutek propagacji szczelin wywołanej mikropęknięciami prowadzącymi do wrywania cząstek materiału. Odporność na kruche pękanie charakteryzuje współczynnik intensywności naprężeń K_c . Pożądanym jest, aby materiał przeznaczony do pracy w warunkach erozji posiadał wysoką twardość i dużą odporność na pękanie. Zazwyczaj gdy wzrasta twardość materiału, to spada jego odporność na pękanie i tym samym maleje odporność na erozję. Efektywną drogą do podwyższenia odporności na erozję jest więc poszukiwanie materiału o odpowiednim składzie chemicznym i mikrostrukturze. Takimi materiałami są np. stale martenzytyczne.

Przegląd zagadnień związanych z erozją materiałów w strumieniu zapyłanego gazu zawiera praca Chmielniaka [L. 3]. W pracy Finnie [L. 4] i Kaczmarka [L. 5] ubytki erozyjne określone są na podstawie zależności ustalonych dla mechanicznej obróbki metali narzędziami tnącymi. Bitter [L. 6] czyni założenie liniowej zależności powstającego ubytku od energii kinetycznej padającego strumienia cząstek. Dla tego modelu Neilson

i Gilchrist [L. 7] traktują objętościowy ubytek erozyjny W jako sumę ubytków: W_D – tak jak dla materiału kruchego, na którego powierzchnię pada cząstka z prędkością odpowiadającej składowej normalnej, W_C – tak jak dla materiału plastycznego, po którym cząstka ślizga się z prędkością odpowiadającej składowej stycznej. Z kolei Beckman [L. 8] model zużycia erozyjnego opiera na dwóch założeniach:

- usunięta objętość materiału w procesie zużycia erozyjnego jest proporcjonalna do pracy mechanicznej wykonanej przez siłę ścinającą,
- właściwa energia ścinania jest stałą materiałową, którą jest stosunek pracy sił ścinania do usuniętej objętości materiału.

Inny model zużycia erozyjnego opiera się na założeniu zmęczenia warstwy wierzchniej materiału, które jest skutkiem następujących po sobie uderzeń cząstek. Przykładem stosowania tego modelu jest praca Markarowa [L. 9]. W każdym z ww. modeli ubytek erozyjny jest efektem kontaktu poruszającej się cząstki z napotkaną przeszkodą [L. 10]. Siłę dynamicznego oddziaływania padającej cząstki prostopadle do podłoża można wyrazić zależnością (1) [L. 6]:

$$F_n = \left[\frac{5mV^2}{4} \left(\frac{16R^* E^{*2}}{9} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{\frac{3}{5}} = 3,029 R^2 \rho^{\frac{3}{5}} V^{\frac{6}{5}} E^{*\frac{2}{5}} \quad (1)$$

gdzie: m – masa cząstki, V – prędkość cząstki, $\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}$,

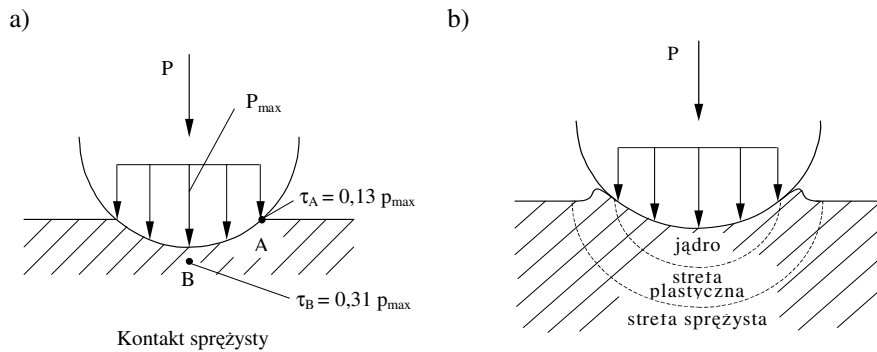
$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$, ν_1 , ν_2 , E_1 , E_2 – odpowiednio współczynniki Poissona

i moduły Younga cząstki i materiału łopatki.

Dla tak obliczonej siły maksymalne naprężenia stykowe p_{max} dla kulistej cząstki i sprężystej półprzestrzeni wynosi (2)

$$p_{max} = \frac{1}{\pi} = \sqrt[3]{\frac{6F_n E^{*2}}{R^2}} = 0,837 \rho^{\frac{1}{5}} V^{\frac{2}{5}} E^{*\frac{4}{5}} \quad (2)$$

O wartości maksymalnych naprężeń decyduje więc energia kinetyczna padającej cząstki (ρ , V), jej właściwości (E_1 , ν_1) i właściwości materiału węzła konstrukcyjnego (E_2 , ν_2). Przy pewnej krytycznej prędkości cząstki uderzającej w materiał naprężenie kontaktowe osiąga wartość krytyczną, odpowiadającą wytrzymałości lub granicy plastyczności [L. 11]. Pierwsze odkształcenia plastyczne powstają w miejscu maksymalnych naprężeń stycznych τ_B , tj. na głębokości zbliżonej do promienia kolistej powierzchni styku (Rys. 1a, punkt B).



Rys. 1. Schemat odkształceń półprzestrzeni wywołanych uderzeniem cząstki: a) odkształcenie sprężyste ($v < v_1$), b) odkształcenie plastyczne ($v > v_2$) [L. 14]

Fig. 1. Diagram of half-space deformations caused by particle impact: a) elastic deformation ($v < v_1$) b) plastic deformation ($v > v_2$) [L. 14]

Przy $\nu = 0,3$, $\tau_B = \tau_{1max} = 0,31 \sigma_{H1}$, gdzie $\tau_{1max} = \frac{1}{2} \sigma_{pl}$. Plastyczne płynięcie materiału w tym punkcie występuje po spełnieniu warunku (3) [L. 14]

$$\sigma_{H1} = \frac{\sigma_{pl}}{0,62} = 1,61 \sigma_{pl} \quad (3)$$

który jest osiągniany przy krytycznej prędkości (4)

$$v_1 = \frac{(\sigma_{H1})^{5/2}}{(0,837)^{5/2} E^2 \rho^{1/2}} \quad (4)$$

W miarę zwiększania prędkości uderzenia obszar uplastycznionego materiału powiększa się [L. 12, 13] i wychodzi na powierzchnię (Rys. 3 b). Na powierzchni łopatki, na kołowym brzegu pola zetknięcia (Rys. 3a w punkcie A) i przy $v = 0,3$ naprężenia styczne wynoszą $\tau_{2max} = 0,133 \sigma_H$. W tym punkcie naprężenia radialne są rozciągające i równe naprężeniom obwodowym ściskającym. Naprężenie to może być niebezpieczne dla materiałów kruchych. Wzdłuż brzegu pola zetknięcia, gdzie nacisk cząstki na powierzchnię łopatki jest równy zeru, występuje czyste ścinanie o wartości $\sigma_H (1-2v)/3$ [L. 14]. Wyjście strefy plastycznych odkształceń na powierzchnię występuje przy naprężeniu (5)

$$\sigma_{H2} = \frac{\sigma_{pl}}{0.266} = 3,7\sigma_{pl} \quad (5)$$

wywołanych podczas uderzenia cząstek z prędkością

$$v_2 = \frac{(\sigma_{H2})^{5/2}}{(0,837)^{5/2} E^2 \rho^{1/2}} \quad (6)$$

Dalszy wzrost prędkości cząstek wywołuje powiększenie obszaru uplastycznienia poprzez zagłębianie się cząstki (Rys. 1b).

Osiągnięcie stanu uplastycznienia w pewnym obszarze materiału wcale nie oznacza powstawania ubytków, tj. odrywania cząstek materiału. Zjawisku erozji zawsze towarzyszy ruch względny materiałów pozostających w kontakcie. Analiza naprężeń kontaktowych z uwzględnieniem sił tarcia została przeprowadzona w pracy [L. 12, 13], gdzie wykazano, że dla tych samych nacisków p_0 normalnych do powierzchni, lecz dla różnych współczynników tarcia f , położenie maksymalnego naprężenia stycznego przemieszcza się ku powierzchni, na brzeg styku kontaktujących się ciał. Granica plastyczności zostaje osiągnięta, gdy współczynnik tarcia $f \geq 0,27$. Wówczas iloczyn drugiego niezmiennika dewiatora naprężenia J_2 i nacisku p_0 , wynosi $J_2^{1/2}/p_0 = \varphi \approx 0,38$. Wówczas naprężenie zredukowane według hipotezy Hubera wynosi

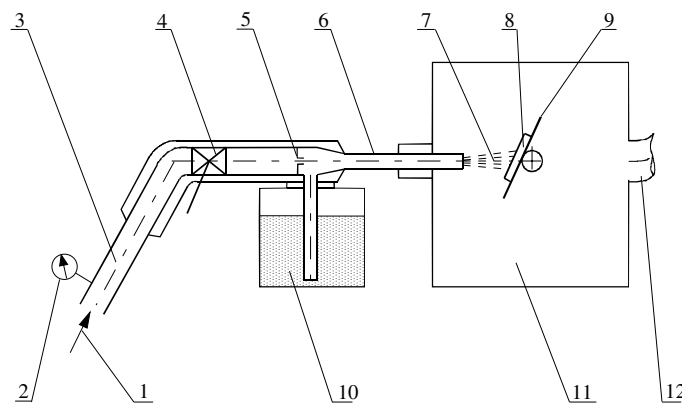
$$\sigma_{red} = 3^{1/2} J^{1/2} = 3^{1/2} \varphi p_0 \approx 0,658 p_0. \quad (7)$$

Jest ono umiejscowione na obrzeżu kontaktujących się ciał, po stronie przeciwnej do kierunku ruchu. Bez uwzględnienia siły tarcia w tym miej-

scu $\sigma_{red} = 0,2 p_0$. Jest to naprężenie 3 razy mniejsze od uzyskiwanego w warunkach tarcia ($f \geq 0,27$). Przekroczenie naprężeń σ_{red} podczas przemieszczania się cząstek stałych po powierzchni materiału z udziałem sił tarcia stwarza warunki do odkształceń plastycznych, mikroskrawania, powstawania szczelin, odrywania cząstek materiału. Procesy te są przyczyną powstawania ubytków erozyjnych. Proces zużycia erozyjnego można prześledzić badając wpływ strumienia cząstek uderzających w materiał pod różnymi kątami.

METODA BADAŃ

Badania zużycia erozyjnego przeprowadzono na stanowisku, którego schemat pokazano na **Rys. 2**. Erozyję wywoływał piasek kwarcowy unoszony strumieniem powietrza pod ciśnieniem 0,5 MPa przy kącie padania strumienia 30°, 60°, 90° w czasie 5 min. Próbki ważono po 1 min oddziaływania strumienia cząstek. Udział wagowy poszczególnych średnic ziarn w masie ścierniwa przedstawiono w **Tabeli 1**.



Rys. 2. Schemat stanowiska do badań zużycia erozyjnego: 1 – sprężone powietrze, 2 – manometr, 3 – przewód ciśnieniowy, 4 – zawór zamykający, 5 – dysza powietrzna, 6 – kierownica, 7 – strumień piasku, 8 – próbka, 9 – uchwyt mocujący, 10 – pojemnik z piaskiem, 11 – komora robocza, 12 – przewód wentylacyjny

Fig. 2. Diagram of stand for erosion wear testing: 1 – compressed air, 2 – pressure gauge, 3 – pressure pipe, 4 – cut-off valve, 5 – air nozzle, 6 – steering wheel, 7 – sand stream, 8 – sample, 9 – mounting grip, 10 – sand container, 11 – working chamber, 12 – ventilation duct

Tabela 1. Zawartość poszczególnych frakcji ziaren w piasku kwarcowym

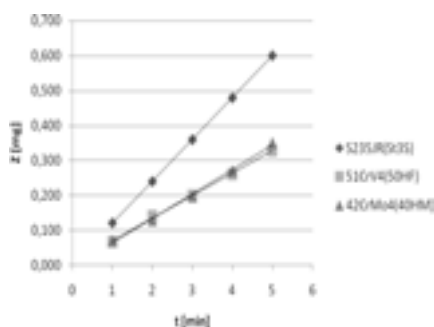
Table 1. Content of specific grain fractions in sand quartz

Zawartość poszczególnych frakcji w 1 kg piasku kwarcowego użytego do badań						
Średnica ziaren piasku kwarcowego [mm]		0,6–0,4	0,4–0,315	0,315–0,2	0,2–0,102	< 0,102
Zawartość poszczególnych frakcji	[mg]	28	140	528	288	16
	[%]	2,8	14	52,8	28,8	1,6

Do badań wytypowano następujące materiały:

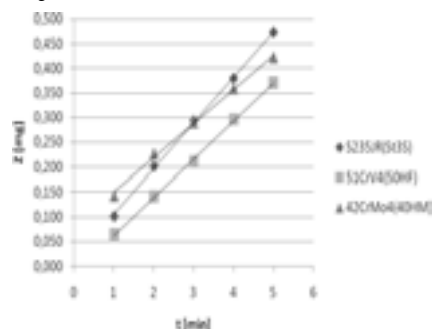
- stal konstrukcyjną zwykłej jakości jako materiał wzorcowy
 - S235JR (St3S), ($R_e = 235$ MPa, $R_m = 340$ MPa, udarność $KC = 27$ J/cm²);
- materiały stosowane w młynach wirnikowych:
 - 51CrV4 (50 HF), ($R_e = 1080$ MPa, $R_m = 1280$ MPa, udarność $KC = 30$ J/cm²),
 - 42CrMo4 (40 HM), ($R_e = 880$ MPa, $R_m = 1080$ MPa, udarność $KC = 68$ J/cm²).

Wyniki badań ubytków masy (Z) próbek przedstawiono na **Rys. 3, 4, 5**. Punkty na wykresach odpowiadają wartościom średnim ubytków masy z badań pięciu próbek. Odchylenie standardowe zużycia dla poszczególnych czasów trwania próby erozji nie przekraczały 0,01 mg. Z przedstawionych danych wynika, że układają się one wokół linii prostych, co oznacza że prędkość zużycia w badanym przedziale czasu jest wartością stałą [**L. 14**].



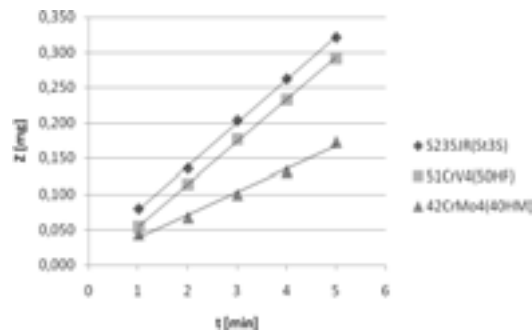
Rys. 3. Ubytek masy Z próbek stali: S235JR, 51CrV4, 42CrMo4; kąt padania cząstek 30°

Fig. 3. Mass loss Z from steel samples S235JR, 51CrV4, 42CrMo4; angle of incidence 30°



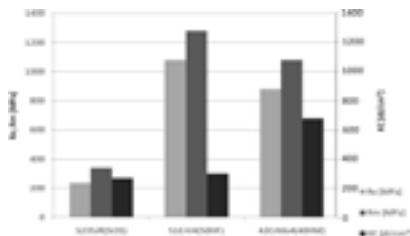
Rys. 4. Ubytek masy Z próbek stali: S235JR, 51CrV4, 42CrMo4; kąt padania cząstek 60°

Fig. 4. Mass loss Z from steel samples S235JR, 51CrV4, 42CrMo4; angle of incidence 60°



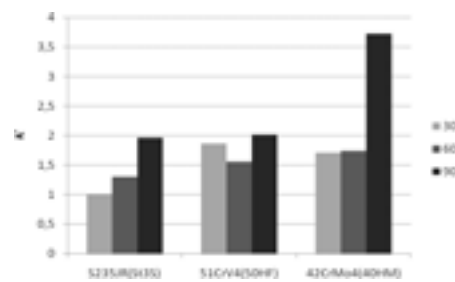
Rys. 5. Ubytek masy Z próbek stali: S235JR, 51CrV4, 42CrMo4; kąt padania cząstek 90°

Fig. 5. Mass loss Z from steel samples S235JR, 51CrV4, 42CrMo4; angle of incidence 90°



Rys. 6. Właściwości mechaniczne R_e , R_m , KC materiałów S235JR, 51CrV4, 42CrMo4

Fig. 6. Mechanical properties R_e , R_m , KC of materials S235JR, 51CrV4, 42CrMo4



Rys. 7. Względna odporność erozyjna materiałów S235JR, 51CrV4, 42CrMo4; kąty padania cząstek 30°, 60°, 90°

Fig. 7. Relative erosive resistance of materials S235JR, 51CrV4, 42CrMo4; angles of incidence 30 °60°, 90°

Na **Rys. 7** przedstawiono względną odporność erozyjną κ [L. 15], będącą stosunkiem intensywności zużycia stali konstrukcyjnej zwykłej jakości S235JR (przy kącie padania strumienia ścierniwa $\alpha = 30^\circ$), do intensywności zużywania pozostałych badanych materiałów. Na **Rys. 6** zestawiono właściwości badanych materiałów, tj. granicę plastyczności R_e , wytrzymałość na rozciąganie R_m i udarność KC .

Z analizy danych względnej odporności erozyjnej κ badanych materiałów (**Rys. 7**) z uwzględnieniem ich właściwości (**Rys. 6**) wynika, że

przy kącie padania ścierniwa $\alpha = 30^\circ$ odporność erozyjna rośnie wraz ze wzrostem R_e i R_m . Stal 42CrMo4 posiada mniejszą wytrzymałość na rozciąganie R_m i większą udarność KC w stosunku do stali 51CrV4, natomiast odporność erozyjna κ jest nieznacznie większa dla stali 42CrMo4. Wraz ze wzrostem kąta padania strumienia cząstek ($\alpha = 60^\circ$ i 90°) pogłębia się wpływ udarności na odporność erozyjną materiału.

WNIOSKI

- Względna odporność erozyjna stali 51CrV4 i 42CrMo4 przy kątach padania strumienia cząstek 30° wzrasta wraz ze wzrostem granicy plastyczności R_e i wytrzymałości na rozciąganie R_m . O wielkości wzrostu κ danego materiału decyduje jego udarność.
- Wraz ze wzrostem kąta padania strumienia ścierniwa zaznacza się wpływ udarności materiału na jego odporność erozyjną i staje się dominującą przyczyną wzrostu odporności przy kącie $\alpha = 90^\circ$.
- Mechanizm zużycia materiałów przy zmianie kątów padania strumienia ścierniwa zmienia się od ściernego (tak jak dla materiałów plastycznych), odpowiadającego kątowi padania 30° , do erozyjnego (tak jak dla materiałów kruchych) przy kącie padania $\alpha = 90^\circ$. Wskazywać to może na możliwość interpretacji uzyskanych wyników badań za pomocą modelu Neilsona–Gilchrista [L. 7].

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego W/WM/6/2010.

LITERATURA

1. Stachowiak G.W., Batchelor A.W.: Engineering Tribology, (2005), 551–552.
2. Fukahori Y., Liang H., Busfield J.J.C.: Criteria for crack initiation during rubber abrasion, Wear, 265 (2008), 387–395.
3. Chmielniak T.: Erozja pyłowa w maszynach przepływowych. Przegląd zagadnień. Zag. Eksp. Maszyn, 76 (1988), 339–458.
4. Finnie J.: Erosion of Surface by Solid Particles, Wear, 3, 1960, 87–103.
5. Kaczmarek J.: Podstawy obróbki wiórowej ścierniej i erozyjnej, WNT, Warszawa 1970.
6. Bitter J.G.A.: A study of erosion phenomena, Wear, 6, 1963, 5–21 Part 1, 169–190 Part 2.
7. Neilson J.H., Gilchrist A.: Erosion by stream of solid particles, Wear, 11, 1968, 123–143.

8. Beckman G.: A Theory of Abrasive Wear Based on Shear Effects in Metall Surface, *Wear*, 33, 1980, 421–432.
9. Макаров В.Н.: Расчет эрозионного износа элементов энергетического оборудования, *Машиностроение*, 1976, 18–21.
10. Барсуков В. В., Крупич Б., Свириденко А. И.: Особенности ударного взаимодействия твердых частиц с лопастью вентилятора. *Трение и износ*, 25, 2004, № 1, 41–47.
11. Krupicz B.: Naprężenia stykowe w łopacie wirnika wentylatora wywołane siłą Coriolisa, *Zeszyty Naukowe PB Mechanika*, 2000, Z. 22, 179–188.
12. Hamilton G.M., Goodman L.E.: The Stress Field Created by a Circular Sliding Contact, *Journal of Applied Mechanics*, 1966, 371–376.
13. Крупич Б.: Проблемы обеспечения износостойкости деталей систем пневмотранспорта. *Трение и износ*, 23, 2002, № 5, 477–482.
14. Мышкин Н.К., Петпоковец М.И.: *Трибология*, ИММЦ НАНБ Гомель (2002).
15. Hejwowski T.: Studium procesów zużywania erozyjnego, ściernego i zmęczenia cieplnego elementów maszyn oraz kształtowanie struktur o korzystnych właściwościach eksploatacyjnych, *Wydawnictwa Uczelniane Politechnika Lubelska*, 2003.

Recenzent:
Danuta KOTNAROWSKA

Summary

This paper presents an analysis of the influence of mechanical properties R_e , R_m and KC of materials used in rotating mills on relative erosive resistance κ for different angles of incidence of the abrasive stream. The conducted research has confirmed that, for small angles of incidence, the erosive resistance increases with an accompanying rise of yield point R_e , tensile resistance R_m . At an incidence angle of the abrasive stream $\alpha = 90^\circ$ materials possessing high impact resistance KC and strength R_m show high erosive resistance.