

Stanisław **JURA**
Roman **BOGUCKI**

ODPORNOŚĆ STALIWA NA ZUŻYCIE EROZYJNE CZĘŚĆ I: METODYKA BADAŃ

Streszczenie. W części I w oparciu o teorię Bittera określono metodykę badania parametrów energetycznych i materiałowych staliwa L20HGSNM. W części II dla optymalizacji stosowania staliwa L20HGSNM wyznaczono związki pomiędzy parametrami energetycznymi i materiałowymi a jego składem chemicznym, obróbką cieplną i twardością.

Wykaz oznaczeń:

α	- kąt uderzenia cząstki (cząstek) na powierzchnię próbki, deg; rad
α_k	- kąt zakończenia zużycia przez skrawanie, deg; rad
α_o	- graniczny kąt zużycia erozyjnego, deg; rad
α_p	- kąt rozpoczęcia zużycia erozyjnego, deg; rad
B0	- obciążenie, przy którym powstaje jednostkowe odkształcenie w próbie badania twardości, N
B1	- intensywność zmian odkształceń od obciążenia, N/m
C	- procentowa zawartość węgla, %
ch	- symbol pierwiastka składu chemicznego
C_m	- parametr materiałowy, $m^{3/2} \cdot s^{1/2} \cdot N^{-1}$
Cr	- procentowa zawartość chromu, %
D	- gęstość ścierniwa, kg/m^3
E	- energia jednostkowa zużycia przez wykruszanie, J/m^3
E_1, E_2	- moduł sprężystości podłużnej dla cząstek ścierających i ciała ścieranego, MPa
H	- współczynnik maksymalnych naprężeń kontaktowych, m^2/N
HV(30)	- twardość Vickersa
K	- prędkość cząstki dla początkowego kąta α_p zużycia erozyjnego, m/s
K_1	- parametr materiałowy, $(m/s)^{1/2}$
M	- masa cząstek ścierających, kg
Mo	- procentowa zawartość molibdenu, %
Mn	- procentowa zawartość manganu, %
Ni	- procentowa zawartość niklu, %
R	- energia jednostkowa zużycia przez skrawanie, J/m^3
Si	- procentowa zawartość krzemu, %
T_H	- temperatura hartowania, °C

T_N	- temperatura normalizowania, °C
T_O	- temperatura odpuszczania, °C
$V, V_{\text{cząst}}$	- prędkość uderzenia cząstki (cząstek), cm/s; m/s
V_N	- składowa normalna prędkości cząstki
V_T	- składowa styczna prędkości cząstki
W	- test adekwatności (wiarygodności)
W_1	- zużycie podczas skrawania w II zakresie kątów od α_p do α_o , m ³
W_2	- zużycie podczas skrawania w III zakresie kątów od α_o do α_k , m ³
W_D	- zużycie przez wykruszanie, cm ³ ; m ³
Y	- dynamiczna granica sprężystości materiału ścieranego, MPa
Z	- objętość całkowita usuniętego przez erozję, cm ³ ; m ³
μ_1, μ_2	- liczba Poissona dla cząstek ścierających i ciała ścieranego

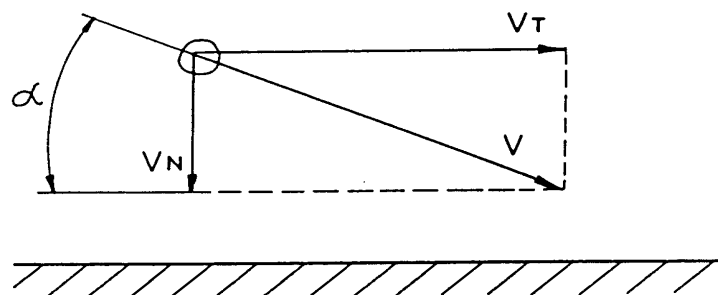
1. WPROWADZENIE

Warunki ekonomiczne oraz eksploatacyjne maszyn i urządzeń narzucają niejednokrotnie stosowanie staliw zachowujących jednocześnie dobre własności plastyczne w temperaturach podzerowych i wysoką odporność na ścieranie. Większość źródeł literaturowych zaleca uzyskiwanie takich własności przez wprowadzenie niklu, chromu i molibdenu jako dodatków stopowych i zastosowanie ulepszania cieplnego odlewów. Utrzymanie dodatków stopowych w pewnych zakresach powinno zabezpieczać korzystne właściwości staliwa odnośnie zużycia. Dotychczasowy dorobek nauki w zakresie badania odporności materiałów na ścieranie jest głównie analityczny. Bada się konkretne urządzenia i dobiera się dla nich najlepsze materiały przyjmując rozmaite kryteria ich doboru. Z faktu tego wynika olbrzymia liczba prac dotyczących doboru materiałów na elementy maszyn i urządzeń. Najczęściej okazuje się, że wyników badań nie można adaptować do nowych warunków [1, 2, 3].

2. WYBÓR METODY BADAŃ

Zużyciu materiału towarzyszą różne zjawiska i procesy. Do obliczeń zużycia ściernego stosuje się około 180 wzorów, z których 28 dotyczy zużycia erozyjnego [3]. Zużycie erozyjne występuje w przypadku, gdy ścieranie powierzchni następuje przez luźne cząstki mineralne o dużej twardości w strumieniu gazu (powietrza) lub cieczy (wody) [4]. Wtedy zużyciu towarzyszą następujące zjawiska:

- bruzdowanie
- omywanie erozyjne
- mielenie
- mikroskrawanie



Rys. 1 Składowe prędkości atakującej cząstki

Na rys. 1 przedstawiono składowe prędkości atakującej cząstki. Podczas zużycia erozyjnego prędkość V i kąt α padania cząstki atakującej powierzchnię ciała ścieranego ma decydujący wpływ na typ i wielkość zużycia. Aby wystąpiło ścieranie powierzchni muszą być spełnione dynamiczne i energetyczne warunki powodujące zużycie. Zużycie zawsze poprzedzone jest deformacją powierzchni ścieranej. Składowa normalna V_N prędkości powoduje deformację, a składowa styczna V_T skrawanie powierzchni ścieranej.

W tabeli 1 przedstawiono parametry jakie należy wyznaczyć, aby określić zużycie erozyjne. W wierszu nagłówkowym tabeli pod numerami od 1 do 28 ujęte są wyrażenia stosowane do obliczeń zużycia erozyjnego w kolejności pojawienia się w literaturze światowej. W tych wyrażeniach występują łącznie 33 parametry ujęte w trzech grupach. Są to parametry dotyczące:

- materiału ścierającego
- materiału ścieranego,
- warunków i procesu zużycia.

Tak duża liczba parametrów świadczy o nie rozwiązanych wielu problemach zużycia erozyjnego. Analizując wyrażenia na zużycie erozyjne można stwierdzić, że są one wynikiem wpływu bardzo wielu czynników, a także ośrodków prowadzących badania zużycia. Kryterium doboru metody badania była możliwość obliczeń parametrów zużycia erozyjnego materiału. Tylko wyrażenia wyprowadzone przez Bittera [5] i Neilsona [6], których parametry ujęte są odpowiednio w kolumnach 2. i 4. uwzględniają w obliczeniach własności materiału. Do obliczeń parametrów zużycia erozyjnego przyjęto wyrażenia określone przez Bittera.

Parametrami w wyrażeniach Bittera są:

- prędkość cząstek ścierających
- moduł Younga cząstek ścierających i ciała ścieranego
- liczba Poissona cząstek ścierających i ciała ścieranego
- gęstość ciała ścieranego
- energia skrawania
- energia wykruszania
- kąt uderzenia cząstek na powierzchnię ścieraną.

Tabela 1. Parametry w wyrażeniach na zużycie erozyjne [1]

NAZWA PARAMETRU NR KOLEJNY WZORU	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28										
Gęstość																																						
Twardość																																						
Liczba Poissona																																						
Kołowość																																						
Masa																																						
Wymiary																																						
Prędkość																																						
Moduł Younga																																						
Energia kinetyczna (EK) cząstek																																						
Gęstość																																						
Twardość																																						
Napięcie uplastyczniające																																						
Moduł Younga																																						
Odporność na kruche pęknięcie																																						
Krytyczny stopień odkształcenia																																						
Głębokość deformacji																																						
Przyrost odkształcenia przy uderzeniu																																						
Liczba Poissona																																						
Temperatura topnienia																																						
Entalpia topnienia																																						
Energia skrawania																																						
Energia wykruszenia																																						
Odporność na zużycie erozyjne																																						
Pojemność ciepła																																						
Masa cząsteczki																																						
Parametr zdefektowania Weibulla																																						
Stala Lamé																																						
Średnica ziarna																																						
Kąt uderzenia																																						
Kąt uderzenia przy maksymalnym zużyciu																																						
EK przekazywana przez cząsteczkę do tarczy																																						
Temperatura																																						
Liczba stałych																																						

3. METODA BADANIA ZUŻYCIA EROZYJNEGO WEDŁUG BITTERA

Teoria Bittera określa ilościowy ubytek materiału poddanego erozji i oparta jest na teorii sprężystości i plastyczności ciał wzajemnie na siebie oddziaływujących [5]. Zużycie erozyjne staliwa według Bittera oblicza się z następujących zależności:

$$W_1 = \frac{2M \cdot C_m (V \cdot \sin \alpha - K)^2}{\sqrt{V \cdot \sin \alpha}} \left[V \cdot \cos \alpha - \frac{C_m \cdot R (V \cdot \sin \alpha - K)^2}{\sqrt{V \cdot \sin \alpha}} \right] \quad (1)$$

$$W_2 = \frac{M}{2R} \left[V^2 \cdot \cos^2 \alpha - K_1 (V \cdot \sin \alpha - K)^{3/2} \right] \quad (2)$$

$$W_D = \frac{M}{2E} (V \cdot \sin \alpha - K)^2 \quad (3)$$

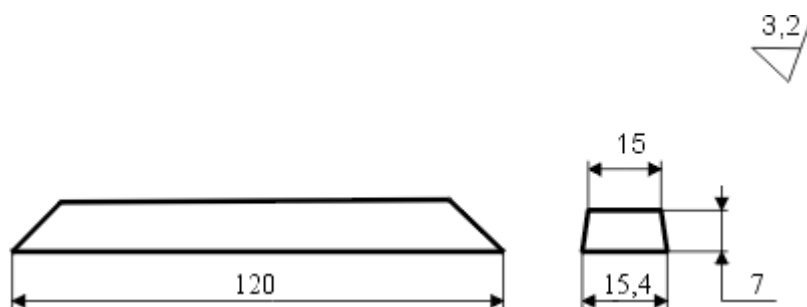
$$C_m = \frac{0,288}{Y} \left[\frac{D}{Y} \right]^{0,25} \quad (4)$$

$$K = 1,56Y^{2,5} \cdot D^{-0,5} \cdot H^2 \quad (5)$$

$$K_1 = 0,82 \cdot Y^2 \left[\frac{Y}{D} \right]^{0,25} \cdot H^2 \quad (6)$$

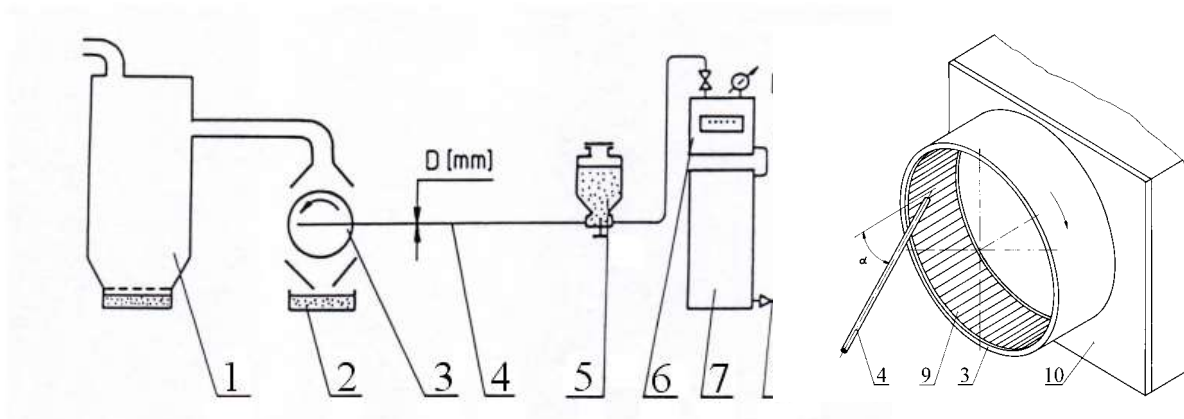
$$H = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \quad (7)$$

W bezpośrednich badaniach nie można wyznaczyć energii jednostkowej zużycia przez wykruszanie E, energii jednostkowej zużycia przez skrawanie R, współczynnika maksymalnych naprężeń kontaktowych H i dynamicznej granicy sprężystości materiału ścieranego Y. Dopiero wprowadzenie nowoczesnych technik obliczeniowych do analizy wyników badań umożliwiło wyznaczenie tych parametrów przez zastosowanie metody komputerowej aproksymacji funkcji zużycia do wyników badań [7]. Jeżeli istniałaby możliwość powiązania tak obliczonych parametrów z innymi własnościami staliwa, np.: ze składem chemicznym, obróbką cieplną to byłoby to istotne dla projektowania konstrukcji i wyznaczenia granic jego stosowalności. Opracowano schemat blokowy pomiarów i obliczeń parametrów energetycznych i materiałowych staliwa, który obejmuje wykonanie czynności związanych z przygotowaniem i przeprowadzeniem prób ścierania na stanowisku badawczym, wykonaniem pomiarów zużycia próbek oraz komputerowych obliczeń parametrów energetycznych i materiałowych z wykreśleniem krzywych zużycia erozyjnego [1].



Rys. 2. Próbka do badania ścieralności erozyjnej

Wykonuje się badania składu chemicznego podstawowych pierwiastków staliwa oraz badania właściwości mechanicznych w celu wyznaczenia granicy plastyczności i wytrzymałości. Po obróbce mechanicznej na wymiar jak na rys. 2., próbki poddaje się obróbce cieplnej według przyjętego programu badań. Dla każdej próbki wykonuje się badania twardości sposobem Vickersa pod trzema różnymi obciążeniami.



Rys. 3 Stanowisko do badania ścieralności erozyjnej tworzyw

1. urządzenie odpylające, 2. pojemnik zużytego ścierniwa, 3. bęben obrotowy z kompletem próbek,
4. lanca, 5. zbiornik ścierniwa, 6. komora pomiarowa, 7. zbiornik filtracyjny,
8. doprowadzenie sprężonego powietrza, 9. próbka, 10. osłona przekładni

Ścieranie dokonuje się na stanowisku doświadczalnym, którego schemat przedstawiono na rys. 3. Próbki do badań montuje się na wewnętrznej powierzchni bębna obrotowego (3) za pomocą specjalnych uchwytów mocujących wzdłuż jego pobocznic. Podczas prób bęben 3 obraca się ze stałą prędkością 66 obr./min. Jednorazowo na urządzeniu można badać maksymalnie 70 próbek. W trakcie prowadzenia eksperymentu wylot z lancy (4) jest usytuowany w bliskiej odległości od powierzchni badanej próbki. Odległość ta powinna być mniejsza od $4,44d_w$ średnicy wewnętrznej lancy, dla których to warunków przyjmuje się, że prędkość strumienia cząstek przy wylocie z lancy jeszcze nie ulega zmianie [8]. Powierzchnia próbek poddawana jest zużyciu przez strumień cząstek stałych o określonym uziarnieniu i wilgotności, przy czym strumień kierowany jest na tą powierzchnię pod różnymi kątami α , w zakresie od 15 do 75[deg], z określoną stałą prędkością od 30 do 90 [m/s] nadawaną ścierniwu przez nośnik, jakim jest sprężone powietrze. Prędkość cząstek określa się na podstawie prędkości wypływu powietrza z lancy przyspieszającej (4). Pomiar masy

powietrza dokonuje się za pomocą licznika objętościowego oraz precyzyjnego manometru umieszczonych w komorze pomiarowej (7). Z przeliczeń termodynamicznych wynika, że dla uzyskania prędkości cząstki piasku o średnicy 1 mm o wartości 95% szybkości powietrza potrzebna jest lanka o długości 1200 mm. Dla zmniejszenia błędów w ocenie tej prędkości długość lanki zwiększono do 2500 mm. Na każdą próbkę, dla zadanego kąta α przewiduje się działanie stałej masy ścierniwa w ilości 1 kg. Piasek wykorzystany w badaniach zostaje skierowany specjalnym zsysem na zewnątrz zespołu. Próbki po każdym badaniu myje się, suszy i następnie waży na wadze w celu określenia ubytku masy z dokładnością 0,001[G]. Po wykonaniu części doświadczalnej dany jest zbiór określający ubytki masowe próbek przy kolejnych kątach α i danej prędkości V strumienia ścierniwa.

4. PARAMETRY ENERGETYCZNE I MATERIAŁOWE STALIWA

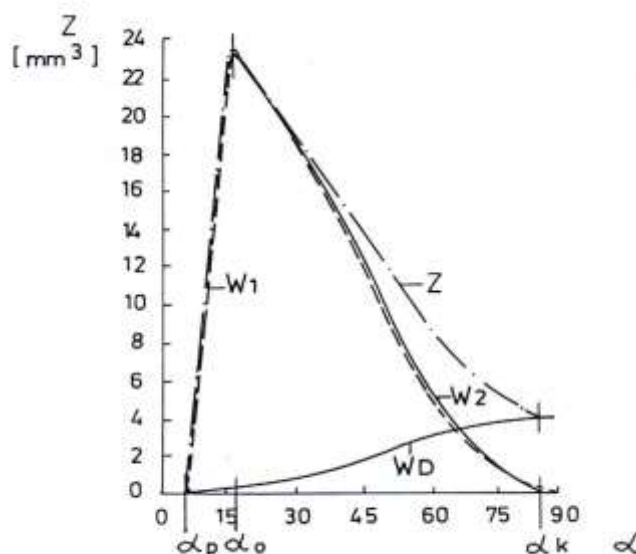
Przy użyciu odpowiednich programów i techniki komputerowej [7] oblicza się parametry zużycia erozyjnego próbek, które opisują proces erozji materiału zgodnie z teorią Bittera. W tabeli 2. przedstawiono te parametry dla staliwa L20HGSNM [9].

Tabela 2. Parametry energetyczne i materiałowe staliwa L20HGSNM (próbka nr 36211)[1]

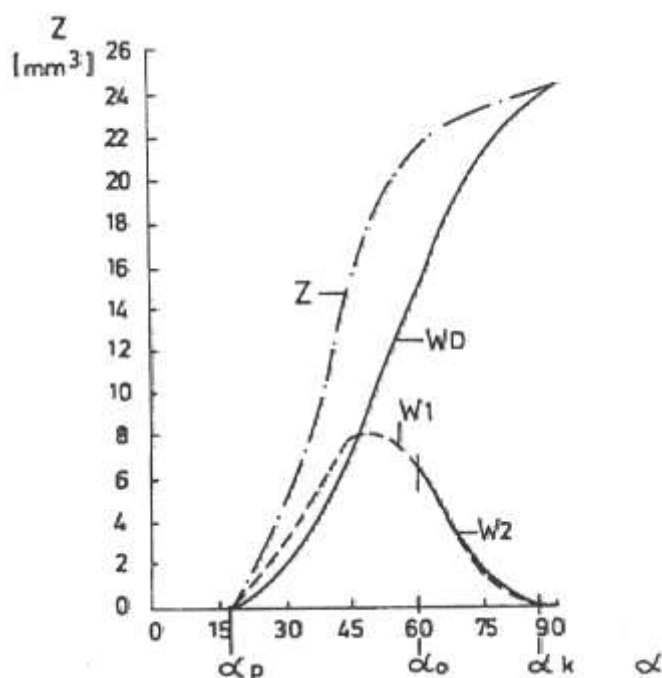
Parametr	Wartość parametru	Jednostka
E	9,164 * E+11	J/m ³
R	3,063 * E+11	J/m ³
Y	1,899 * E+03	Mpa
H	2,770 * E - 11	1/MPa

Wyznaczenie parametrów energetycznych E, R i materiałowych Y, H umożliwia graficzne przedstawienie wyników badań ścierania oraz umożliwia dalszą analizę odporności erozyjnej badanego tworzywa w zależności od innych jego właściwości. Na rys. 4 przedstawiono typowe wykresy zużycia erozyjnego, jakie uzyskuje się dla różnych materiałów miękkich i ciągliwych oraz twardych i kruchych.

MATERIAŁY MIĘKKIE I CIĄGLIWE



MATERIAŁY TWARDE I KRUCHE



Rys.4. Wykresy zużycia erozyjnego według Bittera.

Wykresy zużycia prezentowane są w funkcji kąta padania cząstek ściernych na powierzchnię ścieraną w pełnym zakresie kątów od 0 do 90 stopni. Wyniki badań pomiędzy parametrami energetycznymi i materiałowymi staliwa L20HGSNM a jego składem chemicznym, obróbką cieplną i twardością dla optymalizacji stosowania przedstawiono w części II artykułu.

5. LITERATURA:

- [1] BOGUCKI R.: Zużycie erozyjne staliwa L20HGSNM, Politechnika Śląska, rozprawa doktorska, Gliwice 1999.
- [2] JURA S., BOGUCKI R.: Czy tylko twardość decyduje o zużyciu ściernym, V Konferencja Naukowo-Techniczna, Trwałość elementów i węzłów konstrukcyjnych maszyn górniczych, Ustroń, 1996.
- [3] MENG H.C., LUDEMA K.C.: Wears models and predictive equations: their form and content, Wear 181-183 (1995) 443-457.
- [4] Zum Gahr K.H.: Abrasiver Verschleiss metallischer Werkstoffe, Fortschritts-Berichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 5, No 57, Dusseldorf: VDI-Verlag GmbH 1981.
- [5] BITTER J.G.A.; A study of erosion phenomena, Parts I and II, Wear, 6 (1963) 5-21, 169-190.
- [6] NEILSON J.H., GILCHRIST A. Erosion by a stream of solid particles, (1968) 111.
- [7] JURA S. i inni: Dokumentacja eksploatacyjna programu „Erozja F”. Politechnika Śląska, Gliwice, 1991.
- [8] JURA S.: Prace własne Katedry Odlewnictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice, 1989.
- [9] Staliwo odporne na ścieranie. Gatunki, Polska Norma PN-88/H-83160.

EROSIVE WEAR RESISTANCE OF CAST STEEL PART I. METHODOLOGY STUDY

Abstract. In the first part investigation method of material and energetic parameters of L20HGSNM cast steel are defined basing on Bitter's theory. In the second part relations between material and energetic parameters of cast steel and its chemical constitution, heat treatment and hardness are determined for purposes of application optimisation.

Recenzent: prof. dr. inż. Józef GAWROŃSKI