

Mariusz LISZEWSKI*, Bazyli KRUPICZ**, Wojciech TARASIUK***

WPLYW OBRÓBKI CIEPLNEJ NA ZUŻYCIE EROZYJNE STALI 40Cr4

THE EFFECT OF HEAT TREATMENT ON THE EROSIIVE WEAR OF STEEL 40Cr4

Słowa kluczowe:

zużycie erozyjne, obróbka cieplna

Key words:

erosive wear, heat treatment

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań doświadczalnych dotyczące wpływu obróbki cieplnej stali 40Cr4 na zużycie erozyjne. Badaniu poddano stal w stanie dostarczonym, zahartowaną oraz zahartowaną i odpuszczoną. Odporność na zużycie strumieniowo-ściernie określono przy różnych kątach padania ścierniwa. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że najwyższą odpornością na zużycie strumieniowo-ściernie charakteryzowały się próbki stali poddanej tylko hartowaniu. Posiadały one najwyższą twardość i wytrzymałość na rozciąganie.

* Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, e-mail: mliszewski@nanofix.pl, tel. 535-620-033.

** Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, e-mail: b.krupicz@pb.edu.pl, tel. (85) 746-93-05.

*** Politechnika Białostocka, Wydział Mechaniczny, e-mail: w.tarasiuk@pb.edu.pl, tel. (85) 746-93-12.

WPROWADZENIE

Zużycie elementów maszyn, charakteryzujące się ubytkiem masy lub trwałym odkształceniem powierzchni materiału, jest procesem powszechnym w ich eksploatacji. Przyjmuje się, że w warunkach przemysłowych udział poszczególnych procesów zużycia wynosi procentowo: ścieranie 50%, adhezja 15%, erozja 8%, zacieranie 8% i inne 19%, np. fretting, korozja, zmęczenie [L. 4]. Stal 40Cr4 aktualnie stosowana jest między innymi na płytki młynów wirnikowych [L. 2]. Po obróbce cieplnej (np. hartowanie + odpuszczanie) odznacza się dobrymi właściwościami wytrzymałościowymi [L. 1].

W niniejszej pracy analizowano zużycie erozyjne stali 40Cr4 w strumieniu cząstek ciała stałego (piasek kwarcowy). Zużycie to jest wywołane oddziaływaniem mieszaniny luźnych ziaren zawieszonych w cieczy lub gazie, uderzających z dużą prędkością o powierzchnię materiału. Skutki uderzenia zależą od energii kinetycznej ziaren i dotyczą zarówno ziaren ścierniwa, jak i materiału uderzanego [L. 6].

Zużycie erozyjne materiałów w ustalonych warunkach eksploatacji w dużej mierze zależy od ich właściwości mechanicznych [L. 3, 7]. Do nich należą parametry wytrzymałościowe, twardość, zdolność materiału do odkształceń plastycznych. Dominującymi mechanizmami powstawania ubytków są mikro-skrwanie i bruzdowanie. Zależą one od kształtu krawędzi ziaren i ich energii kinetycznej. W procesie bruzdowania powierzchni materiału następuje odkształcenie plastyczne w postaci wydłużonej bruzdy z charakterystycznymi fałdami. Oderwanie materiału z bruzdy jest oznaką erozji.

Omawiany proces przysparza dużo problemów w praktyce przemysłowej, wywołując nadmierne zużycie elementów maszyn i urządzeń transportujących materiał ziarnisty. Najczęściej dotyczy to łopatek wirników pomp, młynów wirnikowych, wentylatorów, turbin oraz łuków rurociągów. Przykład zużycia łopatek młyna wirnikowego przedstawiono na **Rys. 1**.



Miejsce maksymalnego zużycia erozyjnego łopatki młyna wirnikowego

Rys. 1. Zdjęcie zużytej erozyjnie łopatki młyna wirnikowego

Fig. 1. Photo of the wear erosion of mill rotor blade

O wyborze materiału przeznaczonego do eksploatacji w warunkach erozji strumieniowo-ścierniej decydują jego parametry wytrzymałościowe i twardość.

Istnieje jednak przeświadczenie, że odporność materiału na erozję wzrasta wraz ze zwiększeniem jego twardości. Na podstawie prac [L. 4, 5] stwierdzenie to odnosi się do zużycia ściernego. W przypadku erozji materiałów kruchych pod wpływem strumienia cząstek stałych zachodzi zjawisko odwrotne. Stal 40Cr4 po różnych zabiegach obróbki cieplnej może uzyskać różną twardość. Należy się spodziewać zróżnicowanej odporności na zużycie erozyjne. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki wpływu wybranych zabiegów obróbki cieplnej stali 40Cr4 na zużycie wywołane strumieniem cząstek piasku kwarcowego. Wnioski z badań mogą być pomocne w doborze materiałów na elementy maszyn narażonych na oddziaływanie strumienia cząstek stałych.

BADANIA DOŚWIADCZALNE

Materiał badany. Do badań zużycia strumieniowo-ściernego wybrano stal do ulepszania cieplnego wg normy PN-89/H-84030/04 gatunku 40Cr4:

- bez obróbki cieplnej (oznaczone literą S),
- poddaną obróbce cieplnej:
 - hartowane 850° i odpuszczanie 500° (oznaczone – U1),
 - hartowane 850° (oznaczone – U2) – proces hartowania miał na celu uzyskanie najwyższej twardości badanej stali i ocenę wpływu twardości na zużycie strumieniowo-ściernie.

Dla każdego rodzaju próbek zbadano twardość i wytrzymałość na rozciąganie. Próbki miały kształt walcowy o średnicy 5 mm i długości pomiarowej 100 mm zgodnie z normą EN 10002-1:2001 (poprzednio PN-91/H 04310). Próby rozciągania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron 8502. Wyniki prób zawiera **Tabela 1**.

Tabela 1. Wyniki pomiarów twardości i wytrzymałości na rozciąganie stali 40Cr4

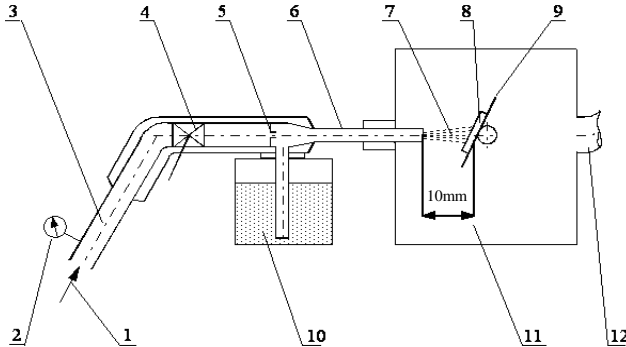
Table 1. The results of measurements of hardness and tensile strength of steel 40Cr4

Oznaczenie próbki	S	U1	U2
Twardość [HV10]	205	317	487
R _m [MPa]	400	1173	1837

Badanie zużycia strumieniowo-ściernego – stanowisko badawcze

Próby zużycia strumieniowo-ściernego przeprowadzono na stanowisku, którego schemat pokazano na **Rys. 2** [L. 2]. Długość strumienia to odległość mierzona w osi strumienia, między wylotem z dyszy a próbką, i wynosiła $l = 10$ mm, średnica dyszy $d = 6$ mm. Po każdej minucie oddziaływania strumienia ścierniwa określano ubytek masowy próbki. Łączny czas badania zużycia wynosił 5 min, a ciśnienie powietrza doprowadzonego do dyszy – 5 MPa. Kąt natrysku

ścierniwa $\alpha = 20, 25, 30, 60$ i 90° . Uzyskano stałą szybkość procesu erozji, dlatego uznano, że przyjęty w danych warunkach eksperymentu czas jego trwania jest wystarczający do określenia intensywności zużycia. Do testów przemysłowych erozji wybranych materiałów wskazany jest wydłużony czas prób.

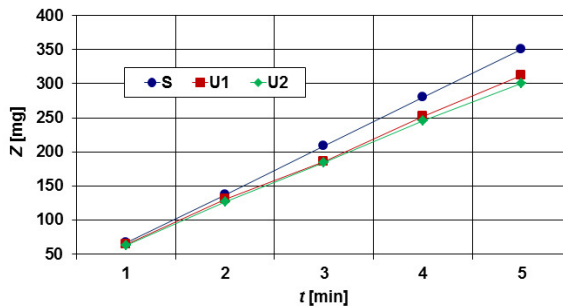


Rys. 2. Schemat stanowiska pomiarowego [L. 3]: 1 – sprężone powietrze, 2 – manometr, 3 – przewód ciśnieniowy, 4 – zawór zamykający, 5 – dysza powietrzna, 6 – dysza, 7 – strumień piasku, 8 – próbka, 9 – obrotowy uchwyt mocujący, 10 – pojemnik z piaskiem, 11 – komora robocza, 12 – przewód wentylacyjny

Fig. 2. Scheme of measurement [L. 3]: 1 – compressed air, 2 – pressure gauge, 3 – pressure line, 4 – valve closing, 5 – air nozzle, 6 – nozzle, 7 – jet of sand, 8 – sample, 9 – swivel bracket, 10 – bin of sand, 11 – working chamber, 12 – ventilation duct

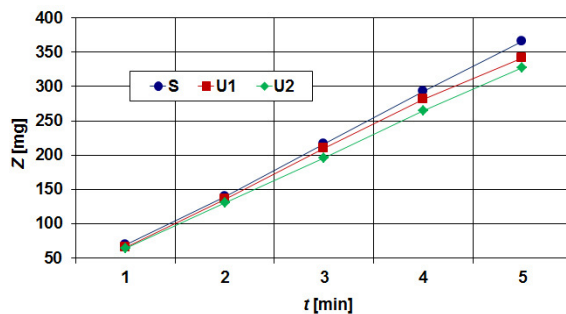
WYNIKI BADAŃ

Na Rys. 3–6 przedstawiono zależność ubytków masy próbek stali 40Cr4 w czasie przy różnych kątach padania ścierniwa. Na Rys. 7 przedstawiono zestawienie ubytku masy w funkcji kąta padania strumienia ścierniwa stali 40Cr4 dla ww. próbek.



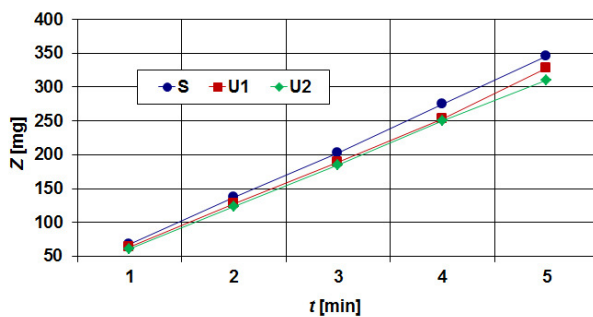
Rys. 3. Wykres ubytku masy próbek ze stali 40Cr4 w funkcji czasu, kąta padania ścierniwa 20°

Fig. 3. The graph of the weight loss of steel samples 40Cr4 at/as function of time, the angle of the abrasive 20°



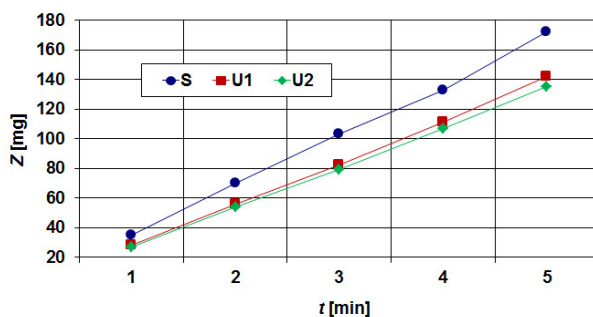
Rys. 4. Wykres ubytku masy próbek ze stali 40Cr4 w funkcji czasu, kąt padania strumienia 25°

Fig. 4. The graph of the weight loss of steel samples 40Cr4 at/as function of time, the angle of the abrasive 25°



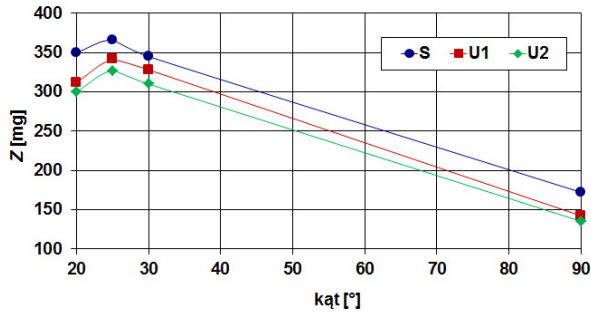
Rys. 5. Wykres ubytku masy próbek ze stali 40Cr4 w funkcji czasu, kąt padania strumienia 30°

Fig. 5. The graph of the weight loss of steel samples 40Cr4 at/as function of time, the angle of the abrasive 30°



Rys. 6. Wykres ubytku masy próbek ze stali 40Cr4 w funkcji czasu, kąt padania strumienia 90°

Fig. 6. The graph of the weight loss of steel samples 40Cr4 at/as function of time, the angle of the abrasive 90°

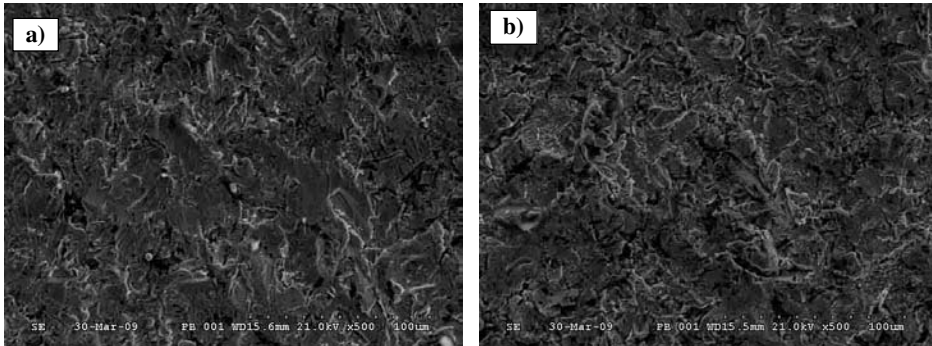


Rys. 7. Wykres ubytku masy próbek ze stali 40Cr4 w funkcji kąta padania strumienia, czas badania 5 min

Fig. 7. The graph weight loss of steel samples 40Cr4 a function of angle of incidence of the stream after 5 min of erosion

Z analizy danych uzyskanych w próbach (Rys. 3–7) wynika, że zużycie badanych próbek można uszeregować następująco, poczynając od wartości największych, tj.: stal 40Cr4 w stanie dostarczonym, hartowana i odpuszczona, hartowana. Dotyczy to zarówno maksymalnych prędkości erozji uzyskiwanych dla kąta 25°, jak i najmniejszych prędkości erozji dla kąta 90°.

Stan powierzchni próbek stali zahartowanej poddanych erozji o krańcowo odmiennych kątach padania ścierniwa, tj. dla kątów 30° i 90° przedstawiono na Rys. 8a i b.

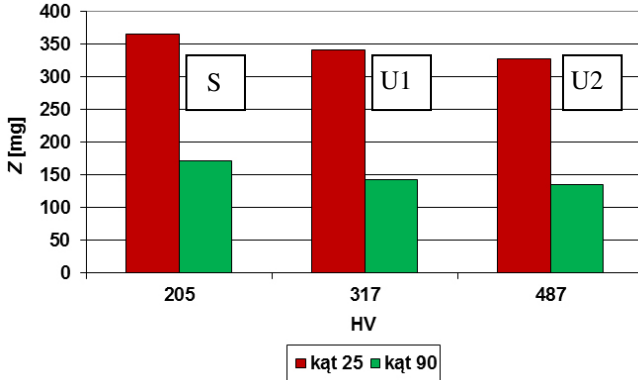


Rys. 8. Widok powierzchni stali 40Cr4 poddanej erozji strumieniowo-ścierniej pod kątem padania ziaren: a) 30°, b) 90°

Fig. 8. View 40Cr4 steel surfaces subjected to erosion, blasting angle of incidence of the grains: a) 30°, b) 90°

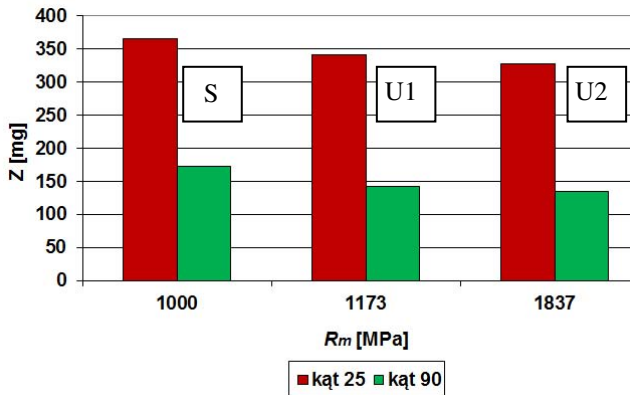
Z analizy powierzchni przedstawionej na Rys. 8a wynika, że przy kącie padania 30° widoczne są ślady ukierunkowanych odkształceń charakterystycznych dla procesu bruzdowania oraz poprzeczne pęknięcia powstające po wyczerpaniu możliwości powstawania odkształceń plastycznych. Przy kącie padania 90° widoczne są głębokie wgłębienia. Oddzielanie cząstek materiału nastę-

puje również na skutek utraty zdolności materiału do odkształceń plastycznych oraz utraty wytrzymałości na zmęczenie.



Rys. 9. Wpływ twardości na zużycie strumieniowo-ściernie stali 40Cr4: a) stal w stanie dostarczonym (S), b) hartowana i odpuszczana (U1), c) hartowana (U2)

Fig. 9. Effect of hardness at Abrasive Blast Wear 40Cr4 steel: a) based steel (S), b) quenched and tempered U1, c) hardened U2



Rys. 10. Wpływ wytrzymałości na rozciąganie stali 40Cr4 na jej zużycie strumieniowo-ściernie: a) stal w stanie dostarczonym (S), b) hartowana i odpuszczana U1, c) hartowana U2

Fig. 10. Impact tensile strength of steel on its wear 40Cr4 Blast: a) based steel (S), b) quenched and tempered (U1), c) hardened (U2)

Analizie poddano również intensywność zużycia w zależności od twardości materiału oraz jego wytrzymałości na rozciąganie. Różne wartości wymienionych parametrów uzyskano, stosując obróbkę cieplną (hartowanie oraz hartowanie połączone z odpuszczaniem). Badanie intensywności zużycia trwało 5 min. Zestawienie danych przedstawiono na **Rys. 9** i **10**. Obróbka cieplna stali spowodowała wzrost jej twardości i wytrzymałości na rozciąganie. Efektem

użytkowym tego zabiegu jest obniżenie prędkości erozji. Jak można było się spodziewać, największą twardość i wytrzymałość na rozciąganie posiadała stal 40Cr4 zahartowana, a tym samym najmniejszą prędkość erozji strumieniowo-ścierniej. Stal poddana tylko zabiegowi hartowania nie jest stosowana w budowie maszyn. Jej badanie miało na celu ocenę wpływu twardości na zużycie strumieniowo-ściernie.

WNIOSKI

Zużycie strumieniowo-ściernie materiałów istotnie zależy od kąta padania strumienia cząstek ścierniwa. Dla stali 40Cr4 maksymalne ubytki stwierdzono przy kącie padania strumienia 25° i minimalne przy kącie 90° . A więc kąt natarcia łopatek np. młyna wirnikowego powinien być zbliżony do 25° .

Stal 40Cr4 zahartowana (U1) wykazała większą odporność na zużycie erozyjne w porównaniu ze stalą w stanie dostarczonym (S) oraz zahartowaną i odpuszczoną (U2). Próbkki (U1) posiadały największą twardość i wytrzymałość na rozciąganie. Jednak stal poddana tylko hartowaniu nie powinna być stosowana w budowie maszyn. Należy więc rozszerzyć badania o próbki poddane hartowaniu i odpuszczaniu niskim lub odprężaniu.

Różnice w intensywności zużycia przy kącie padania cząstki 25° pomiędzy próbką o najwyższej i najniższej twardości sięgały 10%, a przy kącie 90° przekroczyły 20%.

LITERATURA

1. Dobrzański L.A.: Metalowe materiały inżynierskie, WNT, Warszawa 2004, s. 286.
2. Krupicz B., Liszewski M.: Problemy zużycia łopatek młyna wirnikowego, III Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji, Augustów 2005, s. 179–182.
3. Hejwowski T., Weroński A.: Studies on the extensin of the service life of large industrial fans, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 54, 1995, s. 144–148
4. Hejwowski T., Weroński A.: Problematyka doboru materiałów na elementy pracujące w warunkach zużycia erozyjno-ściernego, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn t. 121, nr 1, 2000, 30–49.
5. Hejwowski T.: Studium procesów zużywania erozyjnego i zmęczenia cieplnego elementów maszyn oraz kształtowanie struktur o korzystnych właściwościach eksploatacyjnych, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2003, s. 28–37.
6. Sugiyama K., Harada K., Hattori S.: Influence of impact of solid particles on erosion by slurry jet, Wear, Vol. 265, s. 2008, 713–720.
7. Morozov N.F., Petrov Yu.V., Smirnov V.I.: Between Brittle and Ductile Erosional Fracture, Dokl. Akad. Nauk, Vol. 47, No. 7, 2002, 525–527.

Badania wykonano w ramach pracy statutowej S/WM/2/08.

Summary

The results of studies on the effect of heat treatment on working steel 40Cr4 on erosion wear and tear were presented. The study involved raw, hardened, and hardened and tempered steels. Wear resistance were tested using abrasive blast set at different angles of incidence of the abrasive. The obtained results showed that the highest resistance to wear blast is characterised by samples of heat-treated steel (quenching). They were the hardest and the highest tensile strength.