

Marta PACZKOWSKA* , Łukasz WOJCIECHOWSKI*

**ANALIZA ZUŻYCIA STALOWYCH PIERŚCIENI
WSPÓLPRACUJĄCYCH Z ŻELIEM
SFEROIDALNYM PODDANYM LASEROWEJ
OBRÓBCE CIEPLNEJ**

**A WEAR ANALYSIS OF STEEL RINGS WORKINGS WITH
NODULAR IRON AFTER LASER HEAT TREATMENT**

Słowa kluczowe:

zużycie przeciwpróbek, laserowa obróbka cieplna

Key words:

counter-samples wear, laser heat treatment

Streszczenie

Celem prezentowanych badań była ocena zużywania przez tarcie stalowych pierścieni współpracujących z żeliem sferoidalnym poddanym laserowej obróbce cieplnej (LOC).

Badania zużycia przez tarcie wykonane zostały na zmodernizowanej maszynie tarciowej Amsler A 135.

* Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, Polska.

Próbkę w zestawie pary ciernej stanowił pierścień z zahartowanej objętościowo średniowęglowej stali C45. Przeciwpróbką był prostopadłościan z żeliwa sferoidalnego EN-GJS-500-7 w stanie wyjściowym, zahartowany objętościowo i obrobiony laserowo w celu umocnienia jego warstwy wierzchniej na trzy różne sposoby: hartowanie ze stanu stałego, przetapianie oraz borowanie.

Na podstawie wykonanych badań stwierdzono, że LOC mikrostruktury warstwy wierzchniej polegająca na przetopieniu i przynajmniej 4-krotnym zwiększeniu mikrotwardości warstwy wierzchniej (w porównaniu z materiałem rodzimym) przeciwpróbek z żeliwa sferoidalnego spowodowała nawet 3-krotne zmniejszenie ubytku masy współpracujących z nimi pierścieni (w porównaniu z pierścieniami współpracującymi z żeliwem nieobrobionym). W przypadku zastosowania żeliwnych przeciwpróbek po laserowej obróbce polegającej na zahartowaniu warstwy wierzchniej jedynie ze stanu stałego i uzyskaniu mikrotwardości ok. 3-krotnie większej w porównaniu z materiałem rodzimym ubytek masy pierścieni okazał się podobny lub większy od ubytku tych pierścieni, które współpracowały z żeliwem nieobrobionym.

WPROWADZENIE

Laserowa obróbka cieplna (LOC) znajduje zastosowanie do modyfikacji warstw wierzchnich elementów wykonanych z różnych materiałów, w tym żeliw. Dotychczasowe badania wykazały, że warstwy wierzchnie żeliw sferoidalnych np. po samym przetapianiu laserowym mogą osiągnąć mikrotwardość od 700 do 1300 HV_{0,1} w zależności od zastosowanych parametrów LOC. Mikrostruktura tych warstw charakteryzuje się dużą drobnoziarnistością i wysokim stopniem ujednorodnienia. Jeszcze wyższą mikrotwardość i dodatkowo podwyższoną odporność na korozję warstwy wierzchnie żeliw mogą uzyskiwać po stopowaniu laserowym (np. borowaniu) [L. 1]. W wyniku borowania laserowego mikrostruktura warstwy wzbogacana jest o twarde i odporne na korozję borki żelaza Fe₂B [L. 1]. Dotychczasowe badania własne [L. 2] wykazały, że przetapianie, a szczególnie borowanie laserowe pozwala także zwiększyć odporność na zużycie przez tarcie. Badania zużycia wykazały, że wartość ubytku masy próbek borowanych laserowo, których średnia mikrotwardość warstwy wierzchniej wyniosła ok. 1300 HV_{0,1} była 3,5-krotnie niższa od wartości ubytku masy próbek zahartowanych objętościowo. Z kolei ubytek masy próbek przetapianych laserowo (bez wprowadzania boru), których średnia mikrotwardość warstwy wierzchniej wyniosła ok. 1150 HV_{0,1} był ok. 2-krotnie niższy od ubytku próbek zahartowanych objętościowo. Przetapianie laserowe pozwala uzyskać wzrost odporności również na zużycie erozyjne i korozyjne, a w konsekwencji zwiększenie trwałości tak obrobionego elementu [L. 3, 4].

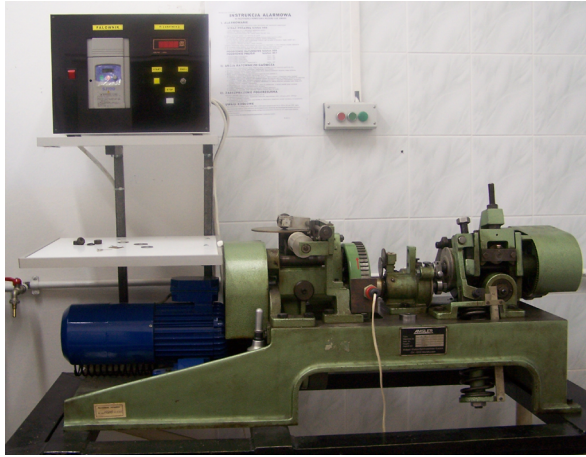
Z żeliwa sferoidalnego są wykonywane przede wszystkim odlewy dla przemysłu motoryzacyjnego na części, np. korbowody, wały korbowe, wałki rozrządu, koła zębate, tuleje, pierścienie tłokowe tłoki, cylindry [L. 5–7]. Umocnione warstwy wierzchnie tych elementów powodują ich mniejsze zużywanie przez tarcie. Niestety nie zawsze powoduje to mniejsze zużywanie przez tarcie warstw wierzchnich elementów z nimi współpracujących. Stanowi to często ograniczenie stosowania tych metod obróbek powierzchni. W związku z tym celem prezentowanych badań była ocena zużywania przez tarcie stalowych pierścieni współpracujących z żeliwem sferoidalnym poddanym LOC. Badania te miały na celu również określenie wpływu rodzaju obróbki laserowej warstwy wierzchniej żeliwa sferoidalnego na zużywanie się przez tarcie stalowego pierścienia.

METODYKA BADAŃ

Badania zużycia przez tarcie wykonane zostały na zmodernizowanej maszynie tarciowej Amsler A 135 (**Rys. 1**) wyposażonej w zespół napędowy składający się z przetwornicy częstotliwości Hitachi SJ 1000 oraz silnika klatkowego typu STg90-2L z wymuszonym chłodzeniem. Maszyna ta znajduje się w Zakładzie Maszyn Spożywczych i Transportu Żywności w Instytucie Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodów na Wydziale Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej.

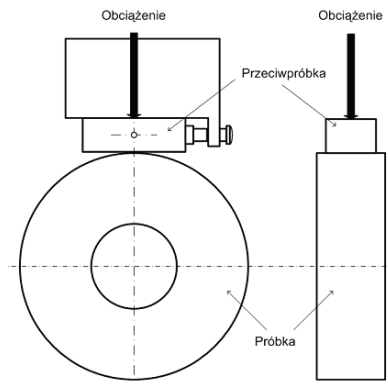
Na omawianej maszynie realizowane jest tarcie ślizgowe między współpracującymi próbkami. Schemat pary ciernej przedstawiono na **Rys. 2**. W badaniach zastosowano maksymalne obciążenie $P = 981 \text{ N}$ (100 kG). Badania wstępne wykluczyły większe obciążenie. Obciążenie 1500 N powodowało pojawienie się efektów początku zacierania. W celu uniknięcia przerwania filmu smarowego obciążenie podczas testu było zwiększane stopniowo. W pierwszym etapie od początku próby do 90 s obciążenie wynosiło 245 N, w drugim do 180 s: 491 N, w trzecim 270 s: 736 N, a w ostatnim trwającym od 270 s do 900 s 981 N. Stopniowe zwiększanie obciążenia zabezpieczało parę trącą przed ewentualnym nierównomiernym rozmieszczeniem oleju pomiędzy współpracującymi powierzchniami, co mogłoby powodować ich niestabilną pracę.

Wykluczono także przeprowadzenie badań na sucho, które również prowadziło do powstania efektów początku procesu zacierania. Proces początku zacierania stwierdzano na podstawie zaobserwowanego niestabilnego momentu tarcia. Zastosowany czas 900 s w badaniach wstępnych okazał się wystarczający do uzyskania istotnych różnic pomiędzy ubytkami masy poszczególnych wariantów. Badania wstępne wykazały również, że zastosowanie oleju parafinowego jako medium smarowego zapewniało stabilne wskazania momentu tarcia. Parametry stosowane podczas badań zużycia przedstawiono w **Tabeli 1**.



Rys. 1. Maszyna tarciowa Amsler A 135

Fig. 1. Amsler A 135 friction wear tester



Rys. 2. Schemat pary ciernej

Fig. 2. The scheme of the friction couple

Próbkę w zestawie pary ciernej (**Rys. 2**) stanowił pierścień o średnicy $d = 42$ mm z zahartowanej objętościowo średniowęglowej stali C45. Średnia mikrotwardość martenzytycznej struktury wynosiła ok. 550 HV0,1.

Tabela 1. Parametry stosowane podczas badań zużycia

Table 1. Conditions of the wear test

Parametr	Prędkość obrotowa	Droga tarcia	Liczba powtórzeń dla każdego wariantu	Medium smarowe	Obciążenie	
					początkowe	końcowe
Wartość	200 obr./min (0,4m/s)	396 m	6	Olej parafinowy	245 N	981 N

Przeciwpróbkę stanowił prostopadłościan o wymiarach: 16x10x5 mm wykonany z żeliwa sferoidalnego EN-GJS-500-7:

- nieobrobionego o mikrostrukturze wyjściowej perlityczno-ferrytycznej z grafitem kulkowym (o mikrotwardości osnowy ok. 300HV_{0,1});
- zahartowanego objętościowo w wodzie po austenitacji w czasie $t = 30$ [min] i przy temperaturze $T = 850^{\circ}\text{C}$ o mikrostrukturze martenzytu z nierozpuszczonym grafitem kulkowym i mikrotwardości osnowy 600HV_{0,1};
- zahartowanego laserowo bez przetopienia o mikrostrukturze drobnoziarnistej osnowy martenzytyczno-ferrytycznej z nierozpuszczonym grafitem kulkowym (o mikrotwardości osnowy ok. 600HV_{0,1});
- zahartowanego laserowo z przetopieniem o drobnoziarnistej mikrostrukturze, o charakterze zahartowanego ledeburytu przemienionego (z częściowo rozpuszczonymi kulkami grafitu), o mikrotwardości ok. 1150HV_{0,1};
- stopowanego laserowo borem o drobnoziarnistej mikrostrukturze z borkami żelaza (z częściowo rozpuszczonymi kulkami grafitu), o mikrotwardości ok. 1300HV_{0,1}.

W celu określenia efektu zużycia prowadzono pomiar masy pierścieni przed i po wykonanej próbie zużyciowej na wadze laboratoryjnej o dokładności 0,0001 g.

WYNIKI I ANALIZA BADAŃ

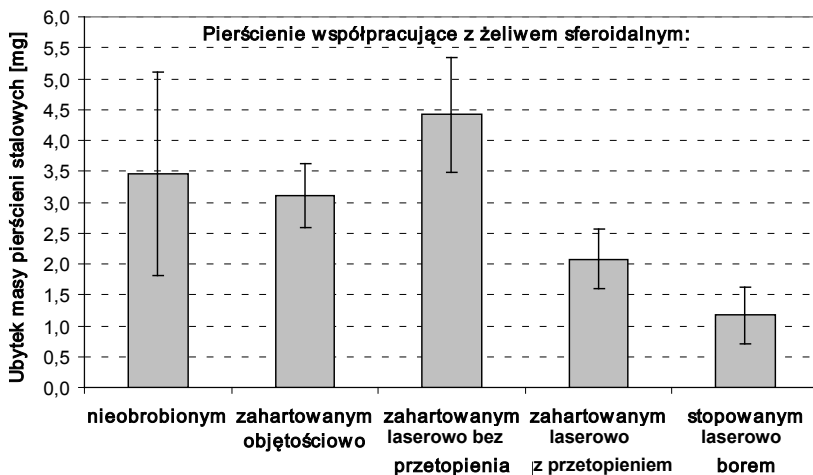
Przeprowadzone badania zużycia przez tarcie wykazały, że ubytek masy badanych pierścieni współpracujących z obrobionym laserowo żeliwem sferoidalnym w przypadku stopowania jego warstwy wierzchniej jest prawie 3-krotnie mniejszy niż w przypadku tych samych stalowych pierścieni współpracujących z nieobrobionym żeliwem sferoidalnym oraz ponad 2,5-krotnie mniejszy od stalowych pierścieni współpracujących ze sferoidalnym żeliwem zahartowanym objętościowo (**Rys. 3**).

Odnotowano dość duży rozrzut wyników ($>1,5 \frac{1}{2} L_{0,9}$) dla pierścieni współpracujących z żeliwem nieobrobionym. Rozrzut taki ($\sim 1 \frac{1}{2} L_{0,9}$) zaobserwowano również w przypadku ubytku masy samych nieobrobionych próbek żeliwnych [**L. 2**].

Wyraźnie mniejszy ubytek masy odnotowano również dla stalowych pierścieni współpracujących z żeliwem przetapianym laserowo: ponad 1,5-krotny w porównaniu z ubytkiem pierścieni współpracujących z żeliwem nieobrobionym (choć aby jednoznacznie to stwierdzić, należałoby przeprowadzić większą liczbę powtórzeń tego badania ze względu na wspomniany duży rozrzut wyników dla pierścienia współpracującego z żeliwem nieobrobionym).

Natomiast podobną wartością ubytku masy do ubytku masy stalowych pierścieni współpracujących z żeliwem nieobrobionym (ale o wiele mniejszym rozrzucie wyników) charakteryzowały się pierścienie, które współpracowały

z żeliwem hartowanym objętościowo. Wartość ubytku masy pierścieni, które współpracowały z żeliwem hartowanym laserowo bez przetopienia jego warstwy wierzchniej mieściła się w zakresie rozrzutu wyników ubytku masy stalowych pierścieni współpracujących z żeliwem nieobrobionym.



Rys. 3. Ubytek masy pierścieni stalowych współpracujących z żeliwem sferoidalnym nieobrobionym, zahartowanym objętościowo i obrobionym laserowo

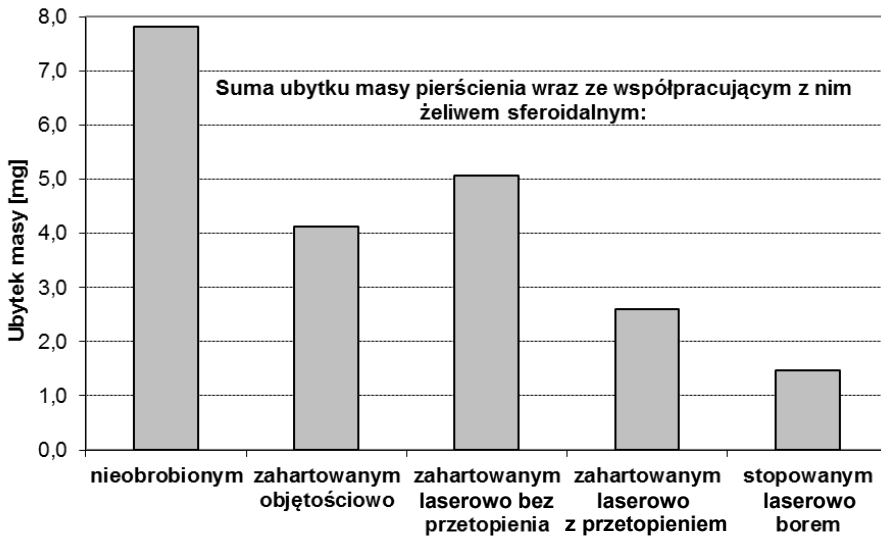
Fig. 3. The mass loss of steel rings working with: untreated, thoroughly hardened and laser treated nodular iron

W związku z tym można zauważyć, że uzyskaniu drobnej mikrostruktury (jaka jest charakterystyczna dla laserowej obróbki cieplnej z przetopieniem) i mikrotwardości powyżej 1000HV_{0,1} warstwy wierzchniej żeliwnych przeciwpróbek za pomocą laserowej obróbki cieplnej towarzyszy zmniejszenie ubytku masy współpracujących z nimi stalowych pierścieni.

Natomiast ubytek masy stalowych pierścieni współpracujących z przeciwpróbkami o warstwie wierzchniej zahartowanej laserowo jedynie ze stanu stałego (czyli o mikrostrukturze charakteryzującej się większymi ziarnami i o mniejszym stopniu umocnienia roztworowego niż mikrostrukturze, jaką pozwala uzyskać obróbka polegająca na przetapianiu laserowym) i o mikrotwardości ok. 600HV_{0,1} okazał się podobny lub większy od ubytku tych pierścieni, które współpracowały z żeliwem nieobrobionym.

Sumaryczny ubytek masy pary czarnej pochodzący z uzyskanych wyników badań żeliwnych przeciwpróbek [L. 2] wraz z wynikami ubytku masy pierścieni stalowych przedstawiono na **Rysunku 4**. W każdym przypadku zaobserwowano mniejsze zużycie pary czarnej składającej się z pierścienia stalowego i przeciwpróbki z żeliwa sferoidalnego poddanego jakiegokolwiek obróbce (na-

wet jeżeli polegała ona na klasycznej obróbce hartowania objętościowego czy też obróbce powierzchniowej polegającej na laserowym hartowaniu warstwy wierzchniej ze stanu stałego) od zużycia pary ciernej składającej się z pierścienia stalowego i przeciwpróbki z żeliwa sferoidalnego w stanie wyjściowym.



Rys. 4. Sumaryczny ubytek masy pary ciernej składającej się z pierścienia stalowego oraz przeciwpróbki z żeliwa sferoidalnego

Fig. 4. The mass loss of friction couple: sample (steel ring) and counter-sample (nodular iron)

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie wykonanych badań można stwierdzić, że laserowa modyfikacja mikrostruktury warstwy wierzchniej polegająca na przetopieniu i przynajmniej 4-krotnym zwiększeniu mikrotwardości warstwy wierzchniej (w porównaniu z materiałem rodzimym) przeciwpróbek z żeliwa sferoidalnego powoduje nawet 3-krotne zmniejszenie ubytku masy współpracujących z nimi pierścieni (w porównaniu z pierścieniami współpracującymi z żeliwem nieobrobionym). W przypadku zastosowania żeliwnych przeciwpróbek po laserowej obróbce polegającej na zahartowaniu warstwy wierzchniej jedynie ze stanu stałego i uzyskaniu mikrotwardości ok. 3-krotnie większej w porównaniu z materiałem rodzimym ubytek masy pierścieni okazał się podobny lub większy od ubytku tych pierścieni, które współpracowały z żeliwem nieobrobionym.

Laserowa obróbka żeliw sferoidalnych polegająca na przetopieniu ich warstw wierzchnich nie tylko pozwala na znaczące zmniejszenie ubytku masy

samych obrobionych w ten sposób żeliw, ale i zmniejsza ubytek masy współpracujących z nimi elementów. Fakt ten uzasadnia stosowanie tego rodzaju obróbki do modyfikacji różnych części elementów narażonych na zużycie przez tarcie, w szczególności o dominującym charakterze adhezyjnym. Słuszne jest także dalsze prowadzenie badań nad tego rodzaju obróbką w przypadku par, które narażone są na zużycie przez tarcie, np.: krzywka wałka rozrządu – popychacz; dźwigienka – zawór; czop – panewka w wałach korbowych i rozrządu; tłok – cylinder; pierścień – cylinder itp.

LITERATURA

1. Paczkowska M., Ratuszek W., Waligóra W.: Microstructure of laser boronized nodular iron, *Surface & Coatings Technology* 205, 2010, 2542–2545.
2. Paczkowska M., Wojciechowski Ł.: Modelowe badania zużycia adhezyjnego elementów z żeliwa sferoidalnego borowanego laserowo, *SIMP, Tribologia*, 3/2007, s. 71.
3. Martynek P., Kusiński J., Suliga, I., Siwek A.: Zmiany struktury i odporności na ścieranie żeliwa sferoidalnego po obróbce laserowej, III Ogólnopolska Konferencja Obróbka powierzchniowa, Częstochowa – Kule, 1996.
4. Kusiński J.: Metalurgiczne podstawy kształtowania struktury i własności warstwy wierzchniej materiałów podczas obróbki laserowej, V Sympozjum Techniki Laserowej, Szczecin – Świnoujście 1996, s. 275–287.
5. Praca zbiorowa pod redakcją Barbackiego A.: *Metaloznawstwo dla mechaników*, WPP, Poznań 1995.
6. Binczyk F., Śmieszny G., Bzymek J., Sitko J.: Wpływ rodzaju osnowy i grafitu na własności tribologiczne żeliwa szarego, *Archiwum Odlewnictwa, Rocznik* 4, nr 14, PAN Katowice 2004, s. 52–57.
7. Gadag S.P., Srinivasan M.N., Mordike B.L.: Effect of laser processing parameters on the structure of ductile iron, *Materials Science and Engineering A* 196, 1995, s. 15–155.

Summary

The aim of the presented research was the evaluation of the wear of steel rings working with nodular iron after laser heat treatment (LHT). The wear tests were performed using a modernized friction wear tester Amsler A 135. The sample in the friction couple was thoroughly hardened C45 steel.

The counter-sample was a cuboid made of EN-GJS-500-7 nodular iron without any treatment, after thoroughly hardening and after laser treatment in three different ways (to generate a hard surface layer). The three laser treatments were hardening from a solid state, remelting, and

boronizing. The research indicated that the laser remelting of the counter-samples' surface layer causing an increase in hardness (at least 4-times in comparison to the core material) resulted in decreasing the mass loss of the steel rings. This decrease was at least 3-times higher in comparison to steel rings working with counter-samples without any treatment. The mass loss of steel rings working with counter-samples after laser hardening from the solid state (resulting in 300% hardness increase of the surface layer) was similar or higher than the mass loss of rings working with counter-samples without any treatment.