

**Wojciech NAPADŁEK, Czesław PAKOWSKI\***

**BADANIA ODPORNOŚCI NA ZUŻYCIĘ WARSTWY  
WIERZCHNIEJ MATERIAŁÓW STOSOWANYCH  
NA ELEMENTY SILNIKA SPALINOWEGO  
PO TEKSTUROWANIU LASEROWYM**

**THE INVESTIGATION RESISTANCE TO WEAR THE  
SURFACE LAYER OF MATERIALS APPLIED ON THE  
ELEMENTS OF THE ENGINE OF COMBUSTION AFTER  
LASER TEXTURING**

**Słowa kluczowe:**

żeliwo szare niskostopowe, stal 54SiCr6, warstwa wierzchnia, teksturo-  
wanie laserowe, odporność na zużycie w warunkach tarcia

**Key words:**

grey cast iron, steel 54 SiCr6, top layer, laser texturing, resistance on  
waste in the conditions of the friction

---

\* Zakład Tribologii Inżynierii Powierzchni i Logistyki Płynów Eksploatacyjnych, Instytut Pojazdów Mechanicznych i Transportu, Wydział Mechaniczny, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa tel.: (22) 683-73-57, 664494297, e-mail: wnapadlek@wat.edu.pl, czpakowski@wat.edu.pl

## Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych w zakresie pomiaru siły tarcia oraz odporności na zużycie w warunkach tarcia warstwy wierzchniej żeliwa szarego niskostopowego stosowanego w produkcji tulei cylindrowych oraz stali 54SiCr6 przeznaczonej do azotowania, stosowanej w produkcji pierścieni tłokowych. Warstwę wierzchnią modelowych elementów węzła tribologicznego poddano modyfikacji, wykorzystując ablacyjną mikroobróbkę laserową, tj. teksturowanie laserowe, mające na celu poprawę jej makro- i mikrogeometrii. Do wytworzenia regularnych mikrozasobników olejowych w kształcie półczasz kulistych ora mikrokanalów stosowano laser Nd: YAG ze specjalnym systemem ogniskowania. Badaniom porównawczym poddana została topografia powierzchni ukształtowana na drodze tradycyjnej obróbki mechanicznej oraz zmodyfikowana w wyniku mikroobróbki laserowej. W laboratoryjnych badaniach tribologicznych zastosowano metodę badawczą „pin on disk” wykorzystującą tribometr T-11. Najlepsze efekty w zakresie zmniejszenia siły tarcia oraz zwiększenia odporności na zużycie uzyskano w przypadku modelowego skojarzenia, w którym elementy węzła tarcia poddane były teksturowaniu laserowemu przy dobranych parametrach obróbki laserowej w układzie geometrycznym ze stopniem przykrycia ok. 25%.

## WPROWADZENIE

Właściwości użytkowe elementów silników spalinowych zależą nie tylko od możliwości przeniesienia obciążeń mechanicznych przez całe czynne przekroje elementów, zwykle wykonanych z tworzyw kompozytowych, metali oraz ich stopów, najczęściej obrobionych cieplnie, lecz także od struktury i właściwości warstwy wierzchniej (WW).

Aby zapobiec przedwczesnym procesom zużywania się elementów w skojarzeniu tłok – pierścień – cylinder (T–P–C), zachodzi konieczność modyfikacji warstwy wierzchniej tego zespołu. Spowodowane jest to względami ekonomicznymi, ekologicznymi i, co najistotniejsze, użytkowymi i eksploatacyjnymi. Rozwój konstrukcji zespołu T–P–C i doskonalenie ich jakości są możliwe pod warunkiem właściwego poznania zjawisk smarowania i zużycia, występujących podczas współpracy elementów zespołu, a także pod warunkiem umiejętnego modelowania i prognozowania zużycia eksploatacyjnego ww. elementów. Istotne znaczenie

w skojarzeniu powierzchni roboczej (gładzi) tulei cylindrowej z pierścieniem i tłokiem odgrywa warstwa wierzchnia, rozumiana jako „system areologiczny”, w którym ważną rolę mają właściwości materiałowe, topografia powierzchni oraz dokładność wykonania. Kształtowanie topografii powierzchni opisywanych elementów silnika spalinowego realizowane jest przez różnego rodzaju obróbki mechaniczne gładkościowe (np. szlifowanie, honowanie, dogładzanie), stosowanie nowoczesnych powłok przeciwzużyciowych oraz stosowanie w ostatnim czasie bardzo nowoczesnych i precyzyjnych technologii wiązkowych [L. 1–3].

Jedną z najnowocześniejszych i perspektywicznych technologii modyfikacji warstwy wierzchniej elementów maszyn jest ablacyjna mikroobróbka laserowa, stosowana m.in. w zakresie tzw. teksturowania laserowego w materiałach konstrukcyjnych (stopy Fe-C, kompozyty, ceramika itp.) w celu świadomego i zaplanowanego uzyskania optymalnej topografii powierzchni, która odgrywa bardzo istotne znaczenie w węzłach tribologicznych.

Dzięki specyficznym własnościom fizycznym, bardzo krótkim czasom oddziaływania promieniowania laserowego, wysokiej precyzji, powtarzalności procesu, możliwości płynnego sterowania parametrami procesu możliwe jest wytworzenie wielu wzorów tekstur powierzchni, które znacząco poprawiają warunki smarowania oraz zmniejszają intensywność procesów zużycia tribologicznego w wielu węzłach tribologicznych, m.in. w skojarzeniu T-P-C [L. 2–5].

## CEL, ZAKRES I METODYKA BADAŃ

Głównym celem pracy było określenie wpływu teksturowania laserowego warstwy wierzchniej żeliwa szarego niskostopowego (**Tabela 1**) stosowanego w produkcji tulei cylindrowych oraz stali 54SiCr6 stosowanej w produkcji pierścieni tłokowych na ich wybrane właściwości tribologiczne, tj. współczynnik tarcia oraz zużycie w modelowym węźle tarcia.

Modelowe badania tribologiczne przeprowadzono na ww. materiałach w ich stanie wyjściowym oraz po teksturowaniu laserowych przy wcześniej dobranych parametrach technologicznych. Przeprowadzone zostały pomiary zużycia mierzone metodą liniową i wagową, pomiar siły tarcia oraz temperatury. Zdecydowano się na zastosowanie jednej metody badawczej, tj. „pin on disk”. Badania tribologiczne przeprowadzono na stanowisku badawczym Tester T-11. Stanowisko zostało uzupełnione o układy umożliwiające rejestrację wskaźników przebiegu procesu tribo-

logicznego o charakterze ciągłym: siły tarcia, temperatury w strefie współpracy oraz zmiany wymiarów. Przyjęto warunki badania (**Tabela 2**) na maszynie tarciowej T-11.

**Tabela 1. Skład chemicznego żeliwa szarego zastosowanego w procesie produkcyjnym tulei**

Table 1. Chemical composition of the gray cast iron applied in the brush manufacturing proces

Skład chemiczny w [%]									
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Sn	Mo
3,36	0,61	2,46	0,275	0,067	0,26	0,12	0,22	0,068	0,095

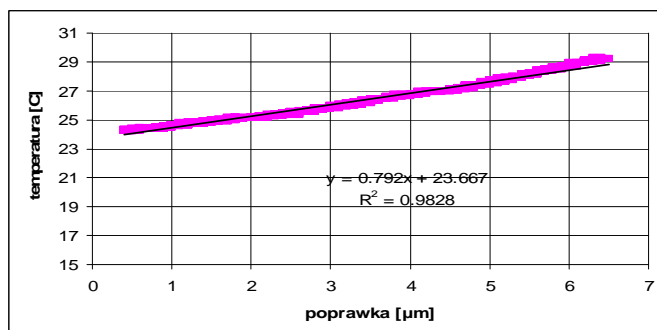
**Tabela 2. Parametry badania odporności na zużycie w warunkach tarcia na testerze T-11**

Table 2. The parameters of the investigation of resistance on waste in the conditions of the friction on tester T -11

Materiał	Żeliwo szare niskostopowe, stal 54SiCr6 azotowana jarzeniowo
czas docierania wstępnego	120 s
prędkość ślizgania	0,26 m/s
sposób smarowania	syntetyczny olej silnikowy
obciążenie styku	157 N
droga tarcia	3000 m

Pomiarami objęto próbki w kształcie walca o średnicy  $\varnothing = 4$  mm i długości  $l = 16$  mm, odpowiednio przygotowane do uchwytu i wstępnie dotarte na testerze.

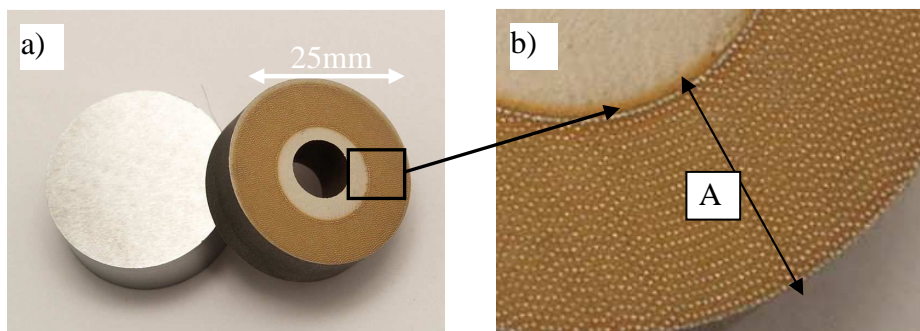
Wielkość zużycia próbek określono metodą wagową przez porównanie masy próbek przed i po współpracy. Pomiar przeprowadzono z użyciem wagi analitycznej WA-32 z dokładnością  $1 \cdot 10^{-4}$  g. W czasie pomiarów w sposób ciągły rejestrowano siłę tarcia, temperaturę w obszarze węzła tarcia oraz liniową zmianę wymiarów skojarzenia. Pozwoliło to na wyznaczenie liniowego zużycia skojarzenia przy uwzględnieniu rozszerzalności cieplnej wywołanej zmianą temperatury współpracujących materiałów. Poprawkę na zmianę wymiarów wyznaczano dla każdego biegu badawczego podczas chłodzenia badanego skojarzenia po zakończeniu procesu tarcia. Poprawkę wyznaczano, stosując przybliżenie liniowe (**Rys. 1**).



**Rys. 1. Sposób wyznaczania poprawki na rozszerzalność termiczną**

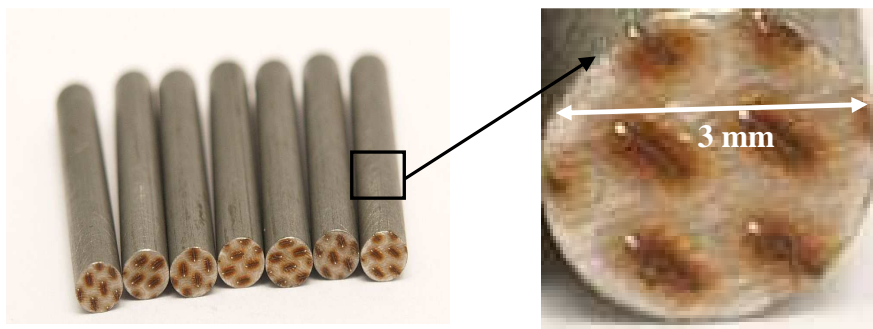
Fig. 1. The way of marking the correction on thermal expansibility

Do badań tribologicznych wykorzystano próbkę wykonaną z żeliwa szarego niskostopowego (**Rys. 2**), współpracującą ze stalową przeciwpróbką wykonaną ze stali 54SiCr6 azotowaną jarzeniowo oraz wariantowo teksturowaną laserowo w celu wytworzenia mikrozasobników olejowych w kształcie półczasz kulistych oraz mikrokanalów (**Rys. 3**). Próbka odwzorowywała tuleję cylindrową, a przeciwpróbka uszczelniający pierścień tłokowy. Modyfikacja laserowa przygotowanych próbek i przeciwpróbek wykonana została na stanowisku laserowym wyposażonym w laser Nd: YAG firmy Allprint DN (**Rys. 4**).



**Rys. 2. Żeliwna próbka z mikrozaszami olejowymi wytworzonymi metodą ablacyjnej mikroobróbki laserowej: a) widok ogólny żeliwnej próbki zmodyfikowanej laserowo, b) regularny układ mikrozasz olejowych w strefie po modyfikacji laserowej: A – strefa mikrozasobników olejowych, pow. 12×**

Fig. 2. The cast-iron oil microbowls sample with produced the method ablacyjnej mikroobróbki laser: a) general view of the cast-iron sample modified by laser, b) the regular arrangement oil microbowls in the zone after the laser modification: A – zone oil microbowls, area 12×



**Rys. 3. Przewidywane w kształcie trzpieni wykonane ze stali 54SiCr6, azotowane jarzeniowo, poddane modyfikacji laserowej poprzez wytworzenie na powierzchni współpracy mikrokanalów olejowych (pow. 12×)**

Fig. 3. Counterspecimen in the shape of pins made from steel 54 SiCr6, nitrogenized glow subjected the laser modification through producing on the surface of the co-operation oil microchanel (area 12×)

Ocena procesów modyfikacji laserowej (teksturowania) powierzchni została wykonana za pomocą mikroskopu optycznego stereoskopowego – Zeiss Discovery.V12 SteREO oraz mikroskopu optycznego metalograficznego – XJP – 6A współpracującego z oprogramowaniem Motic.



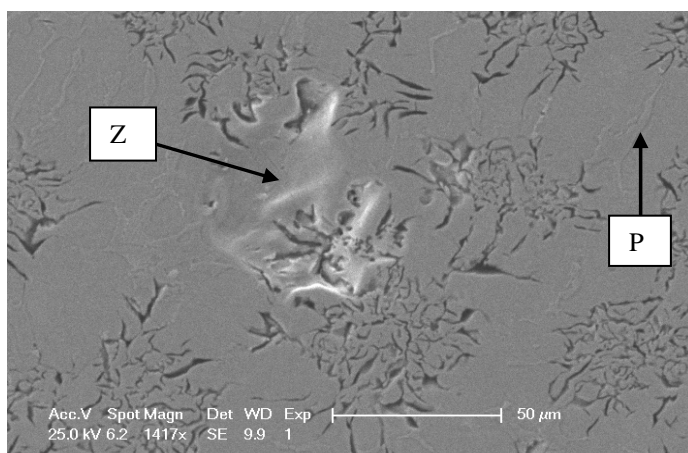
**Rys. 4. Laser Nd: YAG Allprint DN ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ,  $f = 100 \div 65 \text{ k Hz}$ ,  $E = 50 \text{ J}$ ,  $P = 50 \text{ W}$ )**

Fig. 4. Laser Nd: YAG Allprint DN ( $\lambda = 1064 \text{ nm}$ ,  $f = 100 \div 65 \text{ k Hz}$ ,  $E = 50 \text{ J}$ ,  $P = 50 \text{ W}$ )

Do badań użyto także bardzo nowoczesnego mikroskopu optycznego z cyfrową transmisją danych VH-S5 firmy Keyence. Analizę topografii powierzchni zmodyfikowanych laserowo próbek i przeciwpróbek wykonano za pomocą mikroskopu konfokalnego VK-4820 firmy Keyence oraz profilometru skanującego Form Talysurf Series 2 firmy Taylor Hobson. Badania mikrotwardości wykonano z użyciem mikrotwardościomierza PMT-3 umożliwiającego badanie mikrotwardości metodą Vickersa.

## WYNIKI BADAŃ

Przedstawiona na **Rys. 5** topografia powierzchni wypolerowanej warstwy wierzchniej żeliwa niskostopowego uwidacznia charakterystyczny układ rozetkowy grafitu. W wyniku mikroobróbki laserowej wytworzono zasobniki olejowe w kształcie półczasz.

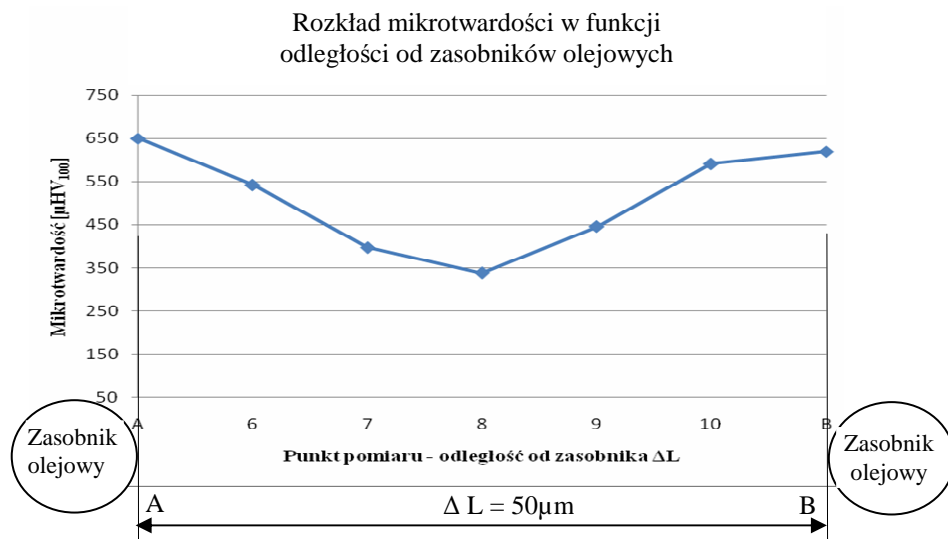


**Rys. 5.** Topografia powierzchni wypolerowanej warstwy wierzchniej żeliwa szarego niskostopowego z charakterystycznym układem rozetkowym grafitu po modyfikacji laserowej, tj. po ablacyjnej mikroobróbce, efektem której są wytworzone zasobniki olejowe w kształcie półczasz: Z – zasobnik, P – eutektyka fosforowa

Fig. 5. The topography of the surface of the polished top layer of grey cast iron niskostopowego with the characteristic arrangement of graphite after the laser modification, tj. after ablation micromachining the effect which they are produced oil containers in the shape halfbowls: Z – the container, P – phosphorous eutectical

Przeprowadzona analiza mikrostruktury wykazała, że badane żeliwo szare ma strukturę perlityczną. Grafit płatkowy rozmieszczony jest równo-

miernie w układach rozetkowych, niekiedy międzydendrytycznych o orientacji uporządkowanej. Długość płatków grafitu wynosi od 20 do 250  $\mu\text{m}$ . Na granicach komórek eutektycznych występuje duża ilość wydzieli eutektyki fosforowej tworzących, w związku z segregacją fosforu, formę budowy szkieletowej. Rozkład mikrotwardości przedstawiono na **Rys. 6**.



**Rys. 6.** Schemat poglądowy metodyki pomiaru oraz charakterystyczny rozkład mikrotwardości na powierzchni warstwy wierzchniej pierścienia tłokowego w strefie między zasobnikami

Fig. 6. The demonstrative pattern of the methodology of the measurement and the characteristic schedule of microhardnes on the surface of the top coset of the piston collar in the zone between containers

W eksperymentach laboratoryjnych zastosowano dwa warianty teksturowania laserowego dla elementów modelowego układu tribologicznego próbka–przeciwpróbka:

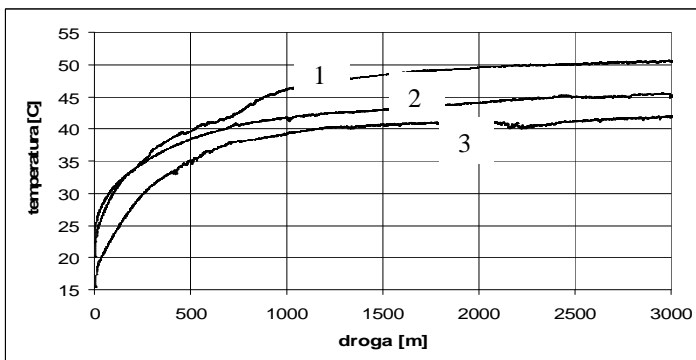
- powierzchnia próbki pokryta teksturą mikrozasobników olejowych w kształcie półczasz kulistych przy stopniu przykrycia powierzchni ok. 25% (**Rys. 2**),
- powierzchnia przeciwpróbki pokryta teksturą mikrokanalów olejowych przedstawionych na **Rys. 3** przy stopniu przykrycia powierzchni współpracy ok. 10%.

Przed wytworzeniem ww. zasobników olejowych przeprowadzono cykl badań laboratoryjnych mających na celu dobór optymalnych paramet-



trów mikroobróbki (rodzaj lasera i promieniowania, gęstość mocy promieniowania, częstotliwość repetycji, układ geometryczny zasobników). Do badań zastosowano laser Nd: YAG Allprint DN ( $\lambda = 1064$  nm,  $f = 100 \div 65$  kHz,  $E = 50$  J,  $P = 50$  W) z głowicą Galvo, gęstość mocy promieniowania zmieniano w przedziale od  $q = 05 \div 3,55 \cdot 10^7$  W/cm<sup>2</sup>, czas ekspozycji  $\tau = 30$  ns częstotliwość repetycji zmieniano w przedziale  $1 \div 10$  kHz, prędkość skanowania  $200 \div 800$  mm/s. Na powierzchni elementów poddanych mikroobróbce laserowej wytworzono mikrozasze olejowe o średnicy  $70\text{--}100$   $\mu\text{m}$  oraz głębokości ok.  $50$   $\mu\text{m}$ . Współczynnik wypełnienia powierzchni żeliwnej próbki mikrozasobnikami olejowymi wynosił ok. 25%, a stalowej przeciwpróbki ok. 10%.

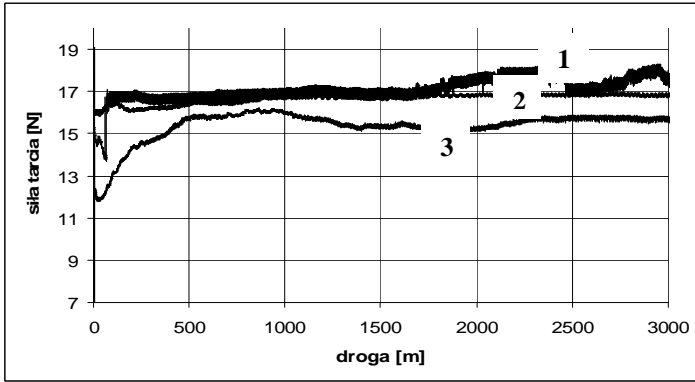
Wszystkie próby (po 3 próby dla każdego wariantu stanu warstwy wierzchniej, współpracujących układów próbka–przeciwpróbka) przeprowadzone zostały w takich samych warunkach laboratoryjnych: czas trwania próby  $t = 8$  godzin, temperatura otoczenia  $T = 20^\circ\text{C}$ , jednokrotne pokrycie próbki i przeciwpróbki czynnikiem smarującym – olej silnikowy syntetyczny Mobil 1 5W50, obciążenie elementu wykonawczego testera – 16 kg, prędkość obrotowa próbki – 200 obr./min. Maksymalna temperatura układu żeliwna próbka – stalowa przeciwpróbka w stanie wyjściowym po mechanicznej obróbce wykańczającej podczas próby osiągnęła  $51^\circ\text{C}$  (Rys. 7), również siła tarcia dla tego skojarzenia była najwyższa 18,1 N (Rys. 8).



Rys. 7. Zmiany temperatury podczas próby tribologicznej dla różnych węzłów: 1 – żeliwna próbka – stalowa przeciwpróbka w stanie wyjściowym, 2 – żeliwna próbka z mikrozaszami – stalowa przeciwpróbka z mikrokanalami, 3 – żeliwna próbka z mikrozaszami – stalowa przeciwpróbka z mikrozaszami

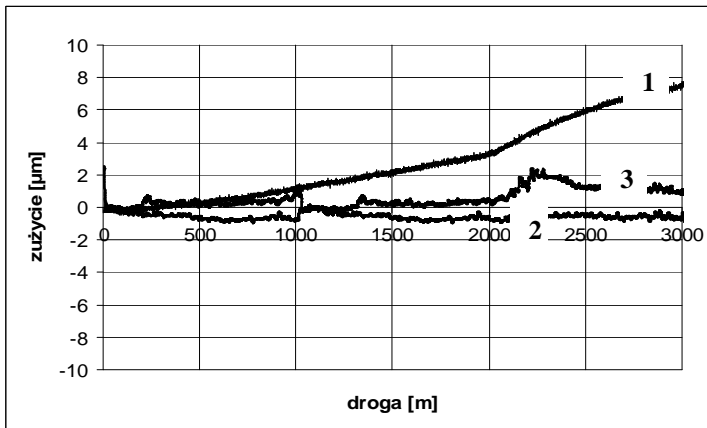
Fig. 7. The change of the temperature during the test tribologicznej for various knots: 1 – the cast-iron sample – steel in exit state, 2 – the cast-iron sample from microbowls – steel from microchanel, 3 – the cast-iron sample from microbowls – from microchannels

Najniższą temperaturą współpracy, tj.  $42^{\circ}\text{C}$  (**Rys. 7**) oraz najniższą siłą tarcia, tj.  $15,8\text{ N}$  (**Rys. 8**), charakteryzowało się skojarzenie żeliwna próbka z mikrozaszami – stalowa przeciwpółka z mikrozaszami. Świadczy to o korzystnym wpływie mikrozasobników olejowych na warunki współpracy i o wykonaniu przez układ mniejszej pracy, z uwagi na mniejsze opory ruchu w trakcie współpracy układu próbka–przeciwpółka.



**Rys. 8.** Zmiany siły tarcia podczas próby tribologicznej (oznakowanie węzłów tribologicznych jak na Rys. 7)

Fig. 8. The change of the strength of the friction during the test tribology (the marking the knots tribology as on Fig. 7)



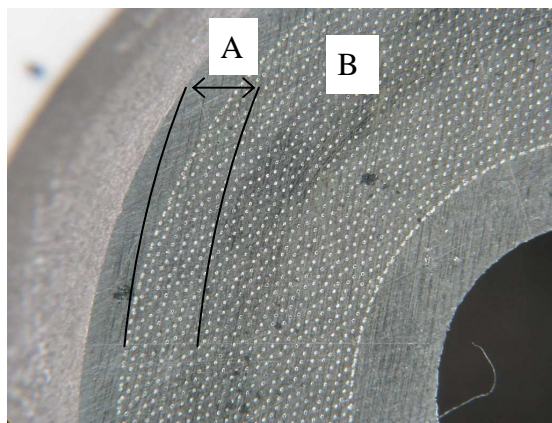
**Rys. 9.** Zmiany sumarycznego zużycia tribologicznego badanych węzłów w funkcji drogi tarcia wyznaczone metodą liniową (oznakowanie węzłów jak na Rys. 7)

Fig. 9. The change of the total waste tribology of studied knots in the function of the road frictions appointed the linear method (the marking the knots as on Fig. 7)

Pomiaru sumarycznego zużycia elementów pary tribologicznej dokonywano w trakcie trwania testu tzw. metodą liniową, mierząc zużycie układów: żeliwna próbka–stalowa przeciwpróbka z uwzględnieniem rozszerzalności cieplnej, dla badanych wariantów stanu warstwy wierzchniej.

Średnie zużycie mierzone metodą liniową skojarzeń żeliwna próbka–stalowa przeciwpróbka teksturowane laserowo okazało się mniejsze o ok. 6  $\mu\text{m}$  w porównaniu ze zużyciem układu żeliwna próbka–stalowa przeciwpróbka w stanie wyjściowym (**Rys. 9**).

Na powierzchni żeliwnych próbek zaobserwowano wyraźną strefę współpracy ze stalowymi przeciwpróbkami (trzcieniami) – **Rys. 10**.



**Rys. 10.** Żeliwna próbka z wytworzonymi metodą ablacyjnej mikroobróbki laserowej mikroczaszami olejowymi po próbie tribologicznej: A – powierzchnia próbki po współpracy z przeciwpróbką (trzcieniem), B – powierzchnia próbki niepoddana badaniu tribologicznemu (pow. 12 $\times$ )

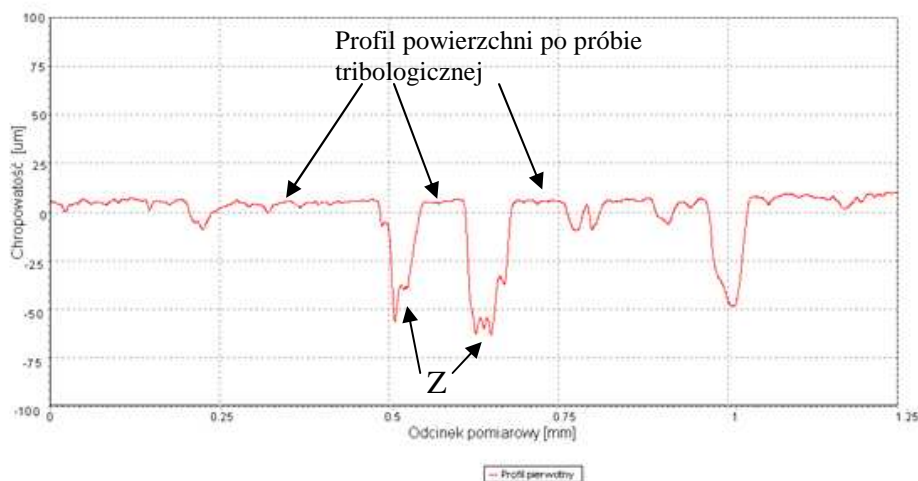
Fig. 10. The cast-iron sample with produced the method ablation micromachining laser oil microbowls after the tribology test : A – the surface of the sample after the co-operation from (pin), B – the surface of the sample not subjected the investigation tribologicznemu (area 12 $\times$ )

Przed przystąpieniem do badania tribologicznego powierzchnie współpracujące próbki i przeciwpróbki wcześniej zmodyfikowane laserowo poddane zostały obróbce mechanicznej wykańczającej w celu usunięcia mikrowypływek materiału powstałych podczas impulsowej mikroobróbki laserowej. Wysokość nierówności materiału wyjściowego po obróbce mechanicznej wykańczającej nie przekraczała 15  $\mu\text{m}$ . Przykładowy profil chropowatości powierzchni materiału próbki żeliwnej po

badaniu tribologicznym przedstawia **Rys. 11**. Głębokość mikroczasz olejowych na powierzchni próbki przeznaczony do badania tribologicznego wynosiła 40–50  $\mu\text{m}$ . Przeprowadzone badania topografii powierzchni próbki żeliwnej współpracującej ze stalową przeciwpróbką po próbie tribologicznej wykazały zmniejszenie chropowatości powierzchni strefy współpracy. W wyniku tarcia zużyciu uległy wierzchołki nierówności pozostałych po mechanicznej mikroobróbce wykańczającej (szlifowanie).

Analizując wartości parametrów chropowatości, stwierdzono około 3-krotne zmniejszenie wysokości nierówności w strefie mikroczasz  $R_p = 16,64 \mu\text{m}$  w porównaniu ze strefą współpracy  $R_p = 5,84 \mu\text{m}$  po próbie tribologicznej (**Tab. 3**).

Wraz ze spadkiem wysokości nierówności wzrósł profil nośności powierzchni, co miało istotny wpływ na zmniejszenie nacisków jednostkowych w strefie współpracy pary tribologicznej. W efekcie spowodowało to mniejsze zużycie warstwy wierzchniej próbki i przeciwpróbki. Podobnie jak w przypadku tulei honowanych mechanicznie, w pierwszej fazie współpracy występuje docieranie powierzchni, któremu towarzyszy bardzo intensywny ubytek masy elementów skojarzenia tribologicznego.



**Rys. 11. Profil chropowatości powierzchni materiału próbki poddanej modyfikacji laserowej po próbie tribologicznej: Z – zasobnik olejowy**

Fig. 11. The profile of the roughness of the surface of the material of the sample of the subjected laser modification after the test tribologicznej: Z – the oil container

**Tabela 3. Parametry chropowości powierzchni próbek żeliwnych**

Table 3. The parameters of the roughness of the surface of cast-iron samples

Parametr chropowości	Stan wyjściowy	Powierzchnia z mikroczaszami	Powierzchnia z mikroczaszami po badaniu tribologicznym
Wysokość najwyższego wzniesienia $R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	6,38	16,64	5,84
Największe wgłębienie profilu nierówności $R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	11,25	37,27	35,28
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	17,63	53,91	42,71
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	3,30	7,86	6,89

Wraz ze spadkiem wysokości nierówności wzrósł profil nośności powierzchni, co miało istotny wpływ na zmniejszenie nacisków jednostkowych w strefie współpracy pary tribologicznej. W efekcie końcowym spowodowało to mniejsze zużycie warstwy wierzchniej próbki i przeciwpróbki. Podobnie jak w przypadku tulei honowanych mechanicznie, w pierwszej fazie współpracy występuje docieranie powierzchni, któremu towarzyszy bardzo intensywny ubytek masy elementów skojarzenia tribologicznego.

## WNIOSKI

1. Przeprowadzone badania laboratoryjne tekstuowania laserowego warstwy wierzchniej żeliwa szarego niskostopowego (materiał tulei cylindrowej) oraz stali 54SiCr6 azotowanej jarzeniowo (materiał pierścienia tłokowego) wskazują na możliwości zastosowania tej technologii do podnoszenia odporności na zużycie elementów pracujących w warunkach tarcia ze smarowaniem. Wytworzone laserowo mikroczasze oraz mikrokanaty poprawiają warunki współpracy, co skutkuje obniżeniem zużycia energii włożonej na pokonanie tarcia w modelowym węźle tribologicznym.
2. W wyniku przeprowadzonych modelowych badań tribologicznych stwierdzono najniższą temperaturę współpracy ( $42^\circ\text{C}$ ) oraz najniższą siłą tarcia (15,8 N) w skojarzeniu: żeliwna próbka z mikroczaszami – stalowa przeciwpróbka z mikroczaszami. Świadczy to o korzystnym wpływie mikrozasobników olejowych na warunki współpracy i o wykonaniu przez elementy układu tribologicznego mniejszej pra-

cy, z uwagi na mniejsze opory ruchu w trakcie współpracy układu próbka – przeciwpróbka.

3. Średnie sumaryczne zużycie elementów modelowego węzła tarcia dla skojarzenia żeliwna próbka–stalowa przeciwpróbka teksturowane laserowo, mierzone metodą liniową, okazało się mniejsze o ok. 6  $\mu\text{m}$  w porównaniu ze zużyciem układu żeliwna próbka–stalowa przeciwpróbka w stanie wyjściowym.
4. Najlepsze efekty w zakresie zmniejszenia siły tarcia oraz zwiększenia odporności na zużycie uzyskano w przypadku modelowego skojarzenia, w którym elementy węzła tarcia poddane były teksturowaniu laserowemu przy dobranych parametrach obróbki laserowej w układzie geometrycznym ze stopniem przykrycia ok. 25%.
5. Proponowane warianty obróbki laserowej mogą stanowić alternatywę dla klasycznej obróbki mechanicznej. Konieczny jest jednak precyzyjny dobór warunków procesu teksturowania laserowego oraz wykonanie dodatkowej wykańczającej obróbki mechanicznej, usuwającej powstałe na modyfikowanej laserowo powierzchni twarde wyłytki. Proces obróbki laserowej powinien zapewniać uzyskanie mikrozasobników o powtarzalnych wymiarach geometrycznych: średnicy 70–100  $\mu\text{m}$  i głębokości ok. 15  $\mu\text{m}$ , mikrokanałów o szerokości i głębokości jak wyżej oraz długości ok. 1÷2 mm, rozmieszczonych równomiernie na modyfikowanej powierzchni współpracy elementów układu T-P-C.

## LITERATURA

1. Włodarski J.K.: Tłokowe silniki spalinowe – procesy tribologiczne, WKŁ, Warszawa 1982.
2. Kozaczewski W.: Nowe metody obróbki gładzi cylindrów, Mechanika, z. 6-m/2004, Czasopismo Techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, KONMOT-AUTOPROGRES 2004, Silniki Spalinowe t.1., Kraków 2004, s. 383–394.
3. MAHLE Recommendation for the Specification of Cast Iron Cylinder Bore Surface, Informacja Techniczna MAHLE GmbH.
4. [www.gehring.de](http://www.gehring.de)
5. Klink U.: Laserowe honowanie gładzi cylindrów, Sympozjum Naukowo-Techniczne pt. „Technika laserowa w inżynierii powierzchni materiałów”, WAT, Warszawa 1997, s. 55–59.

6. Napadłek W., Bogdanowicz Z., Kowalczyk S.: Kształtowanie technologicznej warstwy wierzchniej tulei cylindrowych stosowanych w silnikach spalinowych, Czasopismo Techniczne Mechanika, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, z. 6-m/2004, KONMOT-AUTOPROGRES 2004, Silniki Spalinowe T.2, s. 582–592.

*Praca naukowa finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2007–2010 jako projekt badawczy rozwojowy R15-0025-04/2008*

**Recenzent:**  
**Stanisław LABER**

## Summary

The results of laboratory investigations were introduced in the work in the range of the measurement of the coefficient of friction and resistance on waste in the conditions of the friction of the top layer of grey cast iron applied in the production of cylindrical funnels and solid 54 SiCr6 designed to nitrogenizing, applied in the production of piston collars. The top layer of the model units of the knot tribological was subjected the modification, using laser micromachining ablation: laser texturing, having on the aim of the improvement her macro- and microgeometry. The laser was applied to producing regular oil microcontainers in the shape halfbowl spherical and microchannels Nd: YAG with the special system of focussing. The topography of the surface shaped on the of the traditional processing mechanical road was subjected comparative audits and modified in the result laser micromachining. The investigative method was applied in laboratory audits tribological „pin on disk” in the support about T-11. The best effects in the range of decrease of the coefficient of the friction and the enlargement of the resistance on the waste was got in the case of model associating, in which the elements of the knot laser texturing near the well-chosen parameters of laser processing in geometrical arrangement with the degree of the cover the friction were subjected 25 % approx.

