

**Wojciech NAPADŁEK\***

## **MODELE TRIBOLOGICZNE WSPÓŁPRACY SKOJARZENIA TŁOK–PIERŚCIENIE TŁOKOWE– –TULEJA CYLINDROWA SILNIKA SPALINOWEGO**

### **TRIBOLOGICAL MODELS OF INTERACTION IN PISTON– –PISTON RINGS–CYLINDER BRUSH ASSOCIATION IN CUMBUSTION ENGINE**

#### **Słowa kluczowe:**

modele tribologiczne, tłok, pierścienie tłokowe, tuleja cylindrowa, warstwa wierzchnia, tribologia

#### **Key-words:**

tribological model, piston, ring, cylinder brush, surface layer, tribology

#### **Streszczenie**

Przedstawiono modele tribologiczne współpracy skojarzenia tłok–tuleja–pierścienie tłokowe silnika spalinowego w aspekcie poprawy współpracy elementów silnika oraz zmniejszenia ich zużycia. Wykorzystując ablacyjną mikroobróbkę laserową wytworzono mikrozasobniki olejowe, po-

---

\* Katedra Pojazdów Mechanicznych i Transportu, Wydział Mechaniczny, Wojskowa Akademia Techniczna, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa 49, tel.: (0-22) 683-73-57, 683-70-46, kom. 664494297, e-mail: wnapadlek@wat.edu.pl

zwalające na utrzymanie mikrofilmu olejowego. Przedstawiono wybrane wyniki badań własnych w zakresie kształtowania topografii powierzchni z wykorzystaniem mikroobróbki laserowej.

## WPROWADZENIE

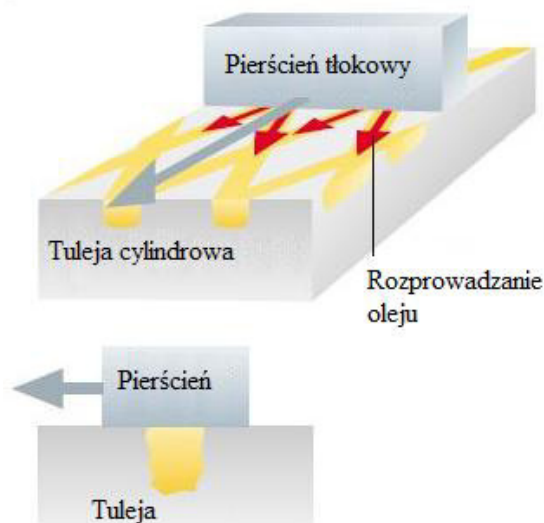
Z punktu widzenia funkcjonowania i trwałości silników spalinowych warstwa powierzchniowa (gładź) cylindrów monobloków oraz tulei cylindrowych jest najistotniejszą strefą i dlatego poświęca się jej najwięcej uwagi [L. 1–9, 10–13, 14, 16]. Stan jej ma bardzo istotny wpływ na straty tarcia silnika, a więc zarówno na jego osiągi, jak i na zużycie paliwa, tj. pośrednio również na emisję składników toksycznych emitowanych w spalinach. Około 50% strat tarcia w silniku spalinowym pochodzi od tarcia w układzie tłokowo-cylindrowym, z czego około 70÷80% są to straty tarcia pierścieni o gładź cylindrów. Istotę współpracy skojarzenia tłok–pierścień–tuleja cylindrowa (T-P-C), podejmuje wielu autorów prac w kraju i na świecie [L. 1–16].

Aby znacząco ograniczyć procesy zużycia gładzi tulei cylindrowych doskonali się ich konstrukcję, stosuje się nowe materiały, wprowadza się nowoczesne metody obróbki mechanicznej, a także stosuje się systemy warstw wierzchnich nowej generacji [L. 1, 3–16].

## METODY OBRÓBKI TULEI CYLINDROWYCH

### Metody tradycyjne

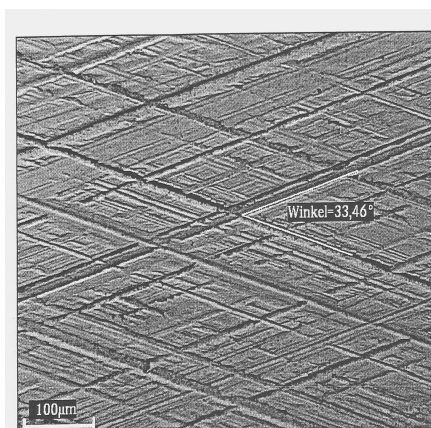
Do metod tradycyjnych obróbki powierzchniowej cylindrów monobloków i tulei cylindrowych silnika spalinowego zaliczana jest obróbka mechaniczna. Polega ona na wytaczaniu (lub wytaczaniu i szlifowaniu) oraz dwustopniowym honowaniu wstępnym oraz wykańczającym. Powszechnie stosowany jest także system trzystopniowy. Polega on na honowaniu wstępnym i wykańczającym oraz następującym po nich honowaniu metodą na Plateau – inaczej zwanym honowaniem gładkościowym. Dzięki temu uzyskuje się charakterystyczną topografię powierzchni tworzącą siatkę wzajemnie przecinających się mikrorys, stanowiących zasobniki dla filmu olejowego rozdzielającego elementy skojarzenia tłok–pierścień–tuleja cylindrowa silnika spalinowego (Rys. 1, 2).



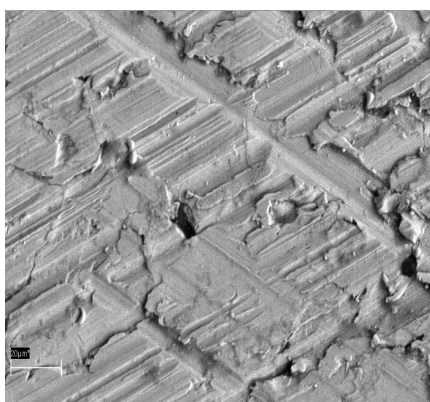
**Rys. 1. Schemat modelowy współpracy skojarzenia pierścienia tłokowego–tuleja cylindrowa – przekrój poprzeczny z widokiem regularnych mikrokanalów olejowych wytworzonych tradycyjną obróbką mechaniczną (wytaczanie i dwukrotne honowanie) [L. 4]**

Fig. 1. Model scheme of association piston ring–cylinder brush interaction – cross sectional view with noticeable regular oil micro-channels manufactured with classical mechanical treatment (turning and honing) [L. 4]

a)



b)



**Rys. 2. Charakterystyczna topografia powierzchni po tradycyjnej obróbce mechanicznej wykańczającej (honowanie wstępne i gładkościowe)**

Fig. 2. Characteristic topography of the surface after classical mechanical finishing treatment (initial honing and smoothing honing)

Prowadzone badania wykazują, że ta struktura powierzchni cylindra nie jest najkorzystniejsza. Topografia powierzchni powinna posiadać mikrozasobniki olejowe. Pozwala to na skuteczniejsze oddzielanie od siebie tłoka z pierścieniami i tulei cylindrowej, co zmniejszy opory tarcia skojarzenia, jak również zmniejszy jego zużycie [L. 2–10, 12–16].

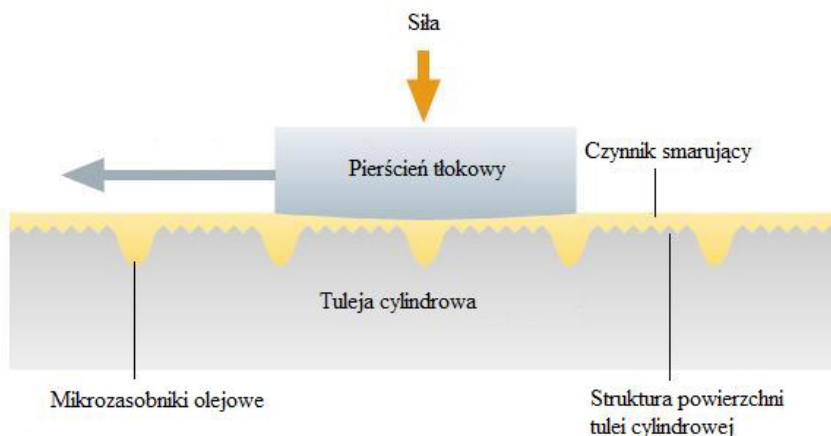
### Metody nowoczesne

Prawidłowo ukonstruowana topografia warstwy powierzchniowej gładzi cylindrów współpracującej z pierścieniami tłokowymi i tłokami powinna posiadać zupełnie inną makro- i mikrogeometrię niż uzyskiwana w tradycyjnie stosowanej technologii. Zamiast charakterystycznej siatki rys wytworzonych na drodze kilkusetapowego honowania mechanicznego, topografia powierzchni powinna posiadać charakterystyczne mikrozasobniki olejowe o kształcie mikrokanalów (Rys. 3) lub wklęsłych czasz (Rys. 4). Pozwoli to na wytworzenie charakterystycznych mikrokomór ciśnieniowych (zasobników olejowych), zdolnych do gromadzenia mikrofilmów olejowych skutecznie rozdzielających pierścieni tłokowy i tłok od tulei cylindrowej. Zmniejszy to zdecydowanie opory tarcia elementów tego skojarzenia tribologicznego (T-P-C), jak również zużycie warstw powierzchniowych. Ze względu na korzystne istnienie filmu olejowego zaletą tego układu będzie również znacznie podwyższona odporność na zacieranie elementów zespołu T-P-C, zwłaszcza w górnej strefie gładzi cylindra, w której występują najgorsze warunki pracy (m.in. smarowanie graniczne, a nawet brak smarowania, wysoka temperatura i ciśnienie, oddziaływanie gazów spalinowych).

Nowoczesną, precyzyjnie sterowaną metodą stosowaną do kształtowania topografii, głównie warstwy powierzchniowej (gładzi) cylindrów monobloków i tulei cylindrowych, jest ablacyjna mikroobróbka laserowa (ubytkowa), w tym mikrodrażenie, oczyszczanie i rozwijanie warstwy powierzchniowej. Jest to jednak proces czasochłonny i stosunkowo kosztowny, gdyż wymaga nowoczesnego oprzyrządowania (laser, odpowiednia optyka, precyzyjne sterowanie) [L. 4–7, 10–16].

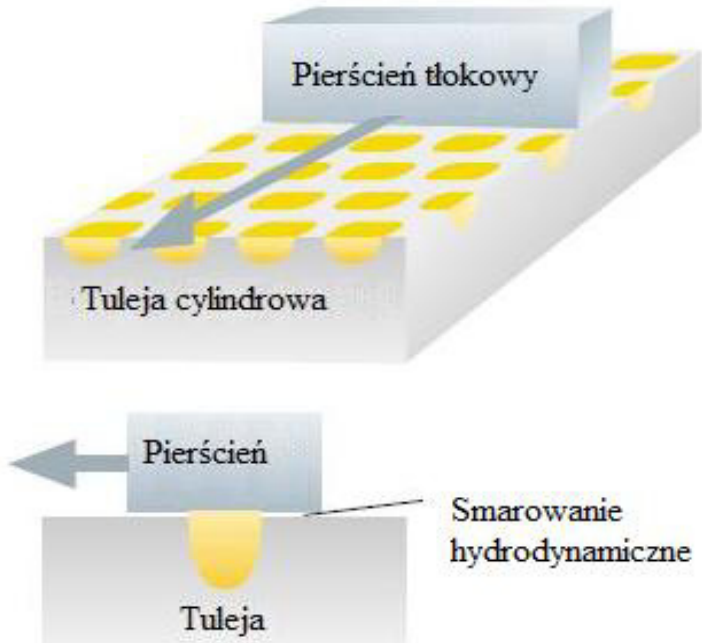
Nowa metoda hybrydowa charakteryzuje się kombinacją honowania i techniki laserowej [L. 4, 7, 8, 9]. Ta końcowa obróbka składa się z trzech operacji: konwencjonalnego honowania wstępnego, obróbki laserowej i honowania wykańczającego. Przy honowaniu wstępnym uzyskuje się formę w skali makro i bazę obróbkową dla obróbki laserowej otworu. Bazę obróbkową określamy w zależności od żądanej obróbki

laserowej. Na powierzchni gładzi cylindrowej, uzyskanej na drodze honowania wykańczającego z „plateau”, wykonuje się zogniskowaną wiązką promienia laserowego systemy zagłębień (zasobniki olejowe nazywane również mikrokomorami ciśnieniowymi – **Rys. 3, 4**), tworzące układy linii przecinających się pod odpowiednim kątem (analogia do honowania standardowego  $30^{\circ}$ – $60^{\circ}$ ) lub charakterystyczną regularną teksturę mikrokieszeni (**Rys. 5**). Zaawansowane badania w tym zakresie prowadzi niemiecka firma GEHRING, posiadająca wiele patentów m.in. na honownice laserowe oraz wytwarzanie mikrozasobników w gładzi cylindra [**L. 4, 7–9**]. Taką obróbkę wykonuje się przeważnie w odniesieniu jedynie do pewnych stref gładzi cylindra, tj. współpracującej z górnym pierścieniem uszczelniającym lub najczęściej ze strefą współpracy segmentów pierścieni uszczelniających i zgarniających w ich górnym martwym położeniu (GMP). Po naniesieniu systemu mikrokomór ciśnieniowych przy użyciu lasera, warstwa powierzchniowa (gładź) cylindra podlega honowaniu (superfinish) bardzo drobnosiarnistymi ośłkami w celu usunięcia wszelkich szczytów nierówności spowodowanych obróbką laserową [**L. 4, 7–9**].



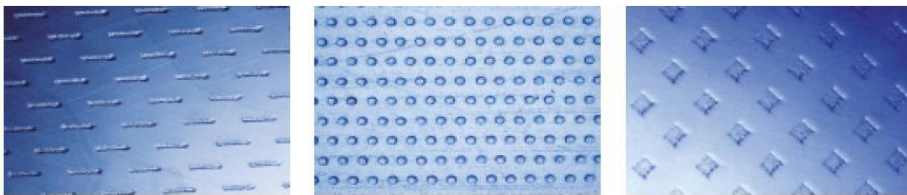
**Rys. 3. Schemat modelowy współpracy skojarzenia pierścień tłokowy–tuleja cylindrowa – przekrój poprzeczny z widokiem regularnych mikrokanalów olejowych wytworzonych technologią hybrydową – połączenie ablacyjnej mikroobróbki laserowej oraz tradycyjnej obróbki mechanicznej (wytaczanie i dwukrotne honowanie) [L. 4]**

Fig. 3. Model scheme of association piston ring–cylinder bore interactions – cross sectional view with noticeable regular oil micro-channels manufactured with hybrid technology – combination of laser micro-treatment and classical, mechanical treatment (turning and honing (twice) [**L. 4**]



**Rys. 4. Schemat modelowy tekstury powierzchni (gładź z mikrozasobnikami olejowymi) tulei cylindrowej, wytworzonej w procesie technologicznym mikroobróbki laserowej [L. 4]**

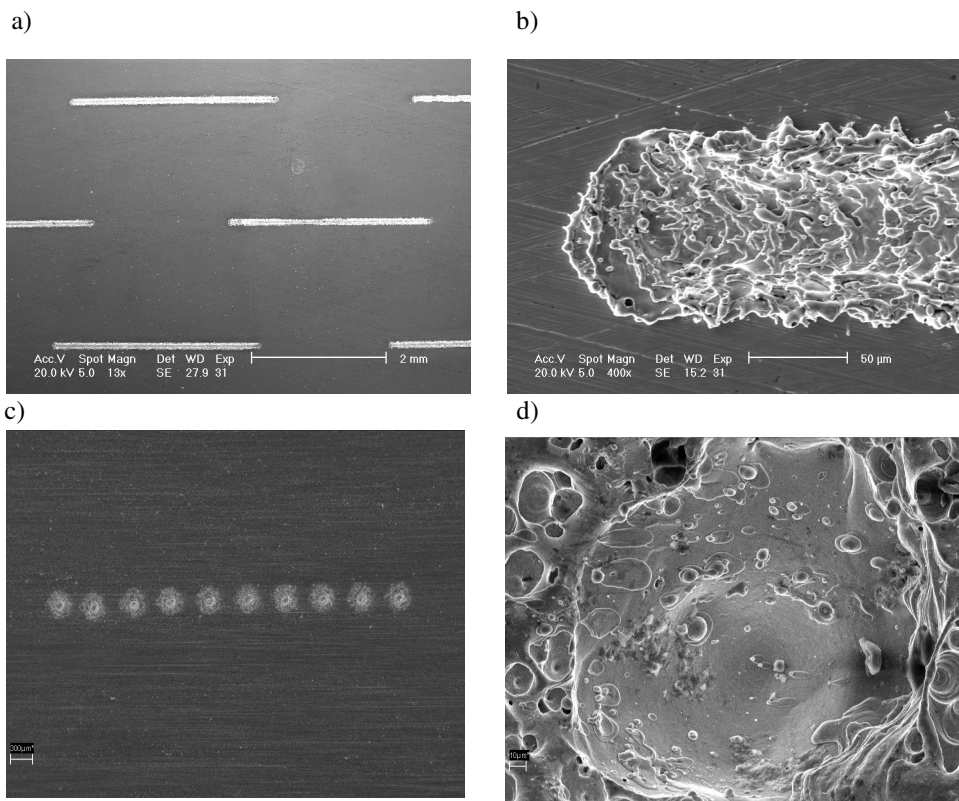
Fig. 4. Model scheme of surface texture (anvil face with oil micro-containers) of cylinder brush, manufactured during laser micro-treatment [L. 3]



**Rys. 5. Tekstury warstwy powierzchniowej wytwarzane na gładzi tulei cylindrowej przez firmę GEHRING [L. 4]**

Fig. 5. Surface layer textures manufactured in the anvil face of cylinder brush applied by GEHRING Company [L. 4]

Promieniowanie lasera można również wykorzystywać do oczyszczania warstwy powierzchniowej żeliwa szarego (skorodowane, zatłuszczone, pokryte pyłem oraz innymi związkami organicznymi). Powierzchnię o wysokiej czystości, wolną od zanieczyszczeń, tłuszczów i tlenków uzyskuje się w wyniku skoncentrowania wiązki laserowej na małej powierzchni o małej gęstości energii  $0,5\text{--}5\text{ J/cm}^2$ . Dzięki grafitowi występującemu w budowie żeliwa, absorpcyjność promieniowania laserowego jest duża, co zwiększa sprawność procesu. Promieniowanie laserowe oddziałuje na mikroobszary z wbudowanymi płatkami grafitu (często zawalcowanego w wyniku procesu wytaczania i honowania mechanicznego).



**Rys. 6. Charakterystyczne topografie warstwy powierzchniowej (gładzi) tulei cylindrowej uzyskane po modyfikacji ablacyjną mikroobróbką laserową – mikrozasobniki olejowe wytworzone w procesie ablacji laserowej**

**Fig. 6. Characteristic topography of the surface layer (anvil face) of cylinder brush after laser ablation micro-treatment – oil micro-containers manufactured by laser ablation process**

## PODSUMOWANIE

Przedstawione modele tribologiczne współpracy skojarzenia pierścieni tłokowy–tłok–tuleja cylindrowa obrazują zróżnicowane warunki współpracy ww. elementów skojarzenia silnika spalinowego. Tradycyjna obróbka mechaniczna, tj. wytaczanie oraz dwustopniowe honowanie (wstępne i wykańczające na plateau) nie zabezpiecza właściwej współpracy opisywanego skojarzenia tribologicznego. W newralgicznej górnej strefie pierścieniowej tulei cylindrowej występuje smarowanie graniczne z bardzo częstym przerywaniem filmu olejowego, powodując tym samym przyspieszone procesy zużycia elementów silnika spalinowego. Tradycyjna obróbka mechaniczna nie pozwala na wytworzenie modelowej topografii warstwy powierzchniowej ze względu na ograniczenia technologiczne (nieregularne mikrorysy z ostrymi krawędziami słabo utrzymujące film olejowy).

Wykorzystując nowoczesne technologie ablacyjnej mikroobróbki laserowej konstruktor oraz technolog są w stanie bardzo precyzyjnie zaprojektować odpowiednią topografię warstwy powierzchniowej tulei cylindrowej oraz pozostałych elementów skojarzenia. Wytworzenie regularnych mikrozasobników olejowych w formie mikrokanalów oraz cylindrycznych mikrokieszeni pozwala na utrzymanie mikrofilmu olejowego rozdzielającego współpracujące elementy skojarzenia.

Ablacyjna mikroobróbka laserowa daje bardzo duże możliwości w zakresie wytworzenia w newralgicznej strefie (górną strefa tulei cylindrowej) zmodyfikowanych mikro- i nanostruktur w warstwie powierzchniowej, poprzez oddziaływania plazmy laserowej i wysokiego ciśnienia. Szybkozmiennie impulsy laserowe o częstotliwości repetycji od kilku do kilkudziesięciu kHz wymuszają proces ablacji laserowej, rozdrobnienie struktury oraz ultraszybkie przemiany fazowe, nieosiągalne innymi technologiami. Wyniki badań wstępnych wskazują, że w warstwie wierzchniej mogą zostać wytworzone cienkie mikrowarstwy amorficzne (szkliste) – o bardzo wysokich walorach technologicznych, bardzo konkurencyjne dla innych nowoczesnych technologii stosowanych w inżynierii powierzchni. Procesy modyfikacji laserowej wpływają nie tylko jakościowo na strukturę, ale także pozwalają na precyzyjne kształtowanie mikrozasobników olejowych w newralgicznych strefach.

Duże możliwości technologiczne stwarza również technologia hybrydowa, tj. połączenie obróbki mechanicznej i laserowej. Na pierwszym etapie procesu wykonuje się honowanie wstępne, a na drugim wytworze-



nie mikrozasobników olejowych oraz honowanie wykańczające (plateau). Obróbkę mechaniczną stosuje w celu usunięcia mikrowypływek powstałych w procesie technologicznym ablacyjnej mikroobróbki laserowej.

Istotną zaletą tej nowatorskiej technologii jest bardzo mała strefa wpływu ciepła, co zapewne w minimalnym stopniu wpłynie na stan deformacji tulei, a zarazem na naprężenia własne. Z technologicznego punktu widzenia równie istotny jest układ mikrozasobników olejowych wytworzonych na gładzi tulei cylindrowej, który wpływa decydująco na procesy tribologiczne.

Przedstawione modele zostały już pozytywnie zweryfikowane przez firm GEHRING na rzeczywistym obiekcie – gładzi kadłuba silnika spalinowego w próbie trwałościowej na hamowni silnikowej. Zastosowanie tej technologii, zwłaszcza w silnikach spalinowych mocno obciążonych ciepłnie, pozwoli na zwiększenie ich trwałości i niezawodności, a także przyczyni się do zmniejszenia emisji toksycznych związków chemicznych do atmosfery. Może również nastąpić wzrost sprawności silnika spalinowego. Ma to szczególnie duże znaczenie technologiczne zwłaszcza w produkcji newralgicznych elementów silników trakcyjnych dużej mocy pracujących przy ich dużym wyężeniu, w bardzo trudnych warunkach klimatycznych (np. stosowanych w silnikach spalinowych pojazdów samochodowych, pojazdów specjalnych oraz lotniczych silnikach tłokowych).

Prace w tym kierunku realizowane są również w Instytucie Pojazdów Mechanicznych i Transportu Wojskowej Akademii Technicznej. Wyniki eksperymentów laboratoryjnych realizowanych w WAT zostały praktycznie wykorzystane do ustalenia przydatności i opracowania podstaw nowoczesnej technologii mikroobróbki laserowej, mającej zastosowanie w wytwarzaniu nowej generacji systemów areologicznych w górnej strefie warstwy powierzchniowej gładzi tulei cylindrowych.

Poprawność zastosowanych modeli w inżynierii powierzchni procesów produkcyjnych potwierdzono w badaniach trwałościowych na rzeczywistych tulejach stalowych tłokowego silnika lotniczego. Obecnie trwają badania na silniku zamontowanym do samolotu.

## LITERATURA

1. Burakowski T., Wierzchoń T., Inżynieria powierzchni metali, WNT, Warszawa 1995.

2. Włodarski J.K., Tłokowe silniki spalinowe – procesy tribologiczne, WKŁ, Warszawa 1982.
3. Niewczas A., Trwałość zespołu tłok–pierścienie tłokowe–cylinder silnika spalinowego, WNT, Warszawa 1998.
4. [www.gehring.de](http://www.gehring.de)
5. Fujimoto H., Furuhami S., Goto T., Measurement of Cylinder Bore Deformation by means a Turning Piston with a Gap Sensor during Engine Operation, ISME International Journal, Series II, 1991, Vol. 34, No. 3.
6. Halsband M., Messung und Optimierung der Reibungsverluste der Kolben-gruppe, Teil 1 und 2. MTZ 1994, 55, 11, MTZ 1995, 56,
7. Klink U., Laserowe honowanie gładzi cylindrów, Sympozjum Naukowo-Techniczne pt. „Technika laserowa w inżynierii powierzchni materiałów”, WAT, Warszawa 1997, s. 55–59.
8. Kozaczewski W., Konstrukcja złożeń tłok- cylinder silników spalinowych, WKiŁ, Warszawa 1987.
9. 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.
10. MAHLE Recommendation for the Specification of Cast Iron Cylinder Bore Surface, Informacja Techniczna MAHLE GmbH.
11. Marczak J., Analiza i usuwanie nawarstwień obcych z różnych materiałów metodą ablacji laserowej, Wydawnictwo BEL Studio Sp. z o.o., 2004.
12. Napadłek W., Przetakiewicz W., Bojar Z., Raczkowski D., Kalita W., Hartowanie laserowe wybranych części silnika wykonanych z żeliwa, Przegląd Mechaniczny 7–8, 1995, s. 15–20.
13. Napadłek W., Przetakiewicz W., Wpływ obróbki laserowej na właściwości wybranych elementów silnika spalinowego, Inżynieria Materiałowa nr 5(130)/2002, s. 547–553.
14. 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.
15. Napadłek W., Marczak R., Kubicki, Ostrowski W., Szudrowicz M., Czyszczenie i umacnianie warstwy powierzchniowej materiałów konstrukcyjnych falą uderzeniową generowaną laserem impulsowym, Materiały VII Międzynarodowego Sympozjum IPM pt.: „Doskonalenie konstrukcji oraz metod eksploatacji pojazdów mechanicznych”, Warszawa – Rynia, 11–13 grudnia 2002, s. 194–203.
16. Przetakiewicz W., Napadłek W., Bogdanowicz Z., Laserowe hartowanie tulei cylindrowych silnika spalinowego, XX Jesienna Szkoła Tribologiczna

pt. „Tribologia a inżynieria powierzchni”, Spała 12÷15 września 1995 r., s. 9÷18.

*Praca naukowa finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2006–2010 jako projekt badawczy Nr 3T08C 057 30.*

**Recenzent:**  
**Bogdan ANTOSZEWSKI**

### **Summary**

**A tribological model of the piston–brush–piston rings association interaction in combustion engines were presented in the aspect of engine element interaction improvements and usage decrease. Laser ablation micro-treatment was applied in oil micro-containers manufacturing, allowing the conserving of oil micro-film. Chosen experimental results in the field of surface topography shaping with laser ablation treatment were presented.**