

Jerzy TARNOWSKI*, Waław GAWĘDZKI**, Marcin KOT*

BADANIE MODUŁU SPRĘŻYSTOŚCI I MIKROTWARDOŚCI WARSTW WIERZCHNICH TŁOKA SAMOCHODOWEGO W ASPEKCIE JEGO ZUŻYCIA

ANALYSIS OF ELASTICITY MODULUS AND MICROHARDNESS OF ENGINE PISTON SURFACE LAYERS IN THE ASPECT OF ITS WEAR

Słowa kluczowe:

tłok samochodowy, mikrotwardość, moduł Younga, tarcie, zużycie

Key words:

engine piston, microhardness, elasticity modulus, friction, wear

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań mikrotwardości i modułu Younga warstw wierzchnich wybranych powierzchni tłoka samochodowego. Pomiarów dokonywano w płaszczu, denku oraz piascie tłoka w aspekcie określenia stopnia

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: tarnow@agh.edu.pl, kotmarc@imir.agh.edu.pl.

** AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Metrologii i Elektroniki, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: waga@agh.edu.pl.

zużycia. Przedstawiono metodykę przeprowadzonych badań oraz scharakteryzowano obiekt badawczy w postaci tłoka Φ 80,0 mm, wykonanego ze stopu aluminiowego. Przedstawiono przebiegi czasowe zadawanego obciążenia P oraz wartości zagłębienia h wgłębniaka w powierzchnię próbki piasty, płaszczka oraz denka tłoka. Zamieszczono charakterystyki wartości średnich oraz odchyłeń standardowych modułu Younga E w funkcji siły obciążającej P_{max} dla wybranych warstw wierzchnich. Dokonano analizy uzyskanych wyników badań oraz sformułowano wnioski końcowe.

WPROWADZENIE

Pośród wielu skojarzeń tribologicznych w budowie maszyn i urządzeń jednym z najpowszechniej występujących jest para trąca tłok–cylinder. Bardzo trudne warunki pracy tych skojarzeń, na które składają się wysokie zmienne wartości cyklicznego ciśnienia i temperatury powodują znaczące zmiany w zużywaniu się tych elementów. W warstwach wierzchnich tłoka można wyróżnić wiele rodzajów zużycia (ściernie, adhezyjne, cieplne, zatarcie), które ze względu na złożony mechanizm ich powstawania powodują trudności w ocenie całkowitej jego trwałości [L. 6, 9].

Z uwagi na zmienność rodzajów zużycia tłok musi charakteryzować się wysoką odpornością na ścieranie w wysokich temperaturach i podwyższonych ciśnieniach, a zarazem wykazywać wysoką sztywność konstrukcji płaszczka. Gwarancją bezawaryjnej i długotrwałej pracy tłoka są optymalne wartości luzów założone we współpracy z cylindrem. Dla minimalizacji zużycia mechanicznego, w budowie tłoka przewidziano miejsca o zwielokrotnionej grubości jego denka i piasty. Mając na uwadze występujące w tłoku zużycie cieplne, wprowadza się różne systemy chłodzenia i smarowania. Ze względu na występujące różne postacie zużycia warstw wierzchnich miarą do określania jego wartości mogą być następujące parametry: mikrotwardość i moduł Younga [L. 3, 4, 10]. Precyzyjny pomiar tych parametrów może pozwolić na określenie stopnia zużycia części składowych tłoka: denka, płaszczka i piasty. Określenie tych parametrów względem ich wartości początkowej może dawać pogląd o stanie rezerwu eksploatacyjnego ukonstytuowanych wcześniej warstw wierzchnich tłoka. Określenie stanu zużywania następuje zazwyczaj przez pomiar utraty masy w jednostce czasu, jednak parametry μHV oraz E mogą określać zmiany w strukturze składników strukturalnych warstw wierzchnich, występujące podczas procesów tarcia [L. 6, 9]. Pozwala to na prognozowanie okresu eksploatacji i ocenę trwałości skojarzeń tribologicznych.

W artykule [L. 10] przeprowadzono podobne badania dotyczące zmian mikrotwardości warstwy wierzchniej tulei cylindrowej w okresie od rozpoczęcia procesu tarcia do wystąpienia zatarcia.

CEL PRACY

Głównym celem pracy było określenie stopnia zużycia warstw wierzchnich tłoka samochodowego podczas jego eksploatacji. Jako wskaźniki zużycia wzięto pod uwagę wartości zmieniającej się mikrotwardości i modułu Younga w badanych wycinkach powierzchni tłoka. Pomiarów dokonywano w strefie prowadzącej płaszcz tłoka narażonej głównie na zużycie ściernie, a także na denku obciążonym głównie dynamicznymi uderzeniami cieplnymi oraz porównawczo w okolicach piasty narażonej na impulsy mechaniczne.

CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU BADAŃ

Obiekt badań stanowił tłok silnika samochodowego, o średnicy nominalnej 80,0 mm, wykonany w technologii kucia matrycowego. Jako materiału do jego produkcji użyto stopu aluminium, którego składniki objęte są patentem 4032-T6. Tłoki wykonane w technologii kucia charakteryzują się zwiększoną wytrzymałością oraz są trwalsze od tłoków odlewanych. Badania parametrów μHV oraz E przeprowadzono dla najbardziej reprezentatywnych wycinków powierzchni tłoka: denka, płaszcz i piasty.

OPIS STANOWISKA POMIAROWEGO

Właściwości mikromechaniczne analizowano z użyciem urządzenia Micro-Combi-Tester produkowanego przez CSM Instruments ze Szwajcarii.

Przeprowadzono testy indentacyjne z wykorzystaniem węgelnika o geometrii Vickersa. Pomiar mikrotwardości i modułu sprężystości możliwy jest przy zapewnieniu ciągłego pomiaru siły i głębokości penetracji. Dokładność pomiarowa wynosiła odpowiednio 0,15 mN i 0,3 nm. Precyzyjny wybór miejsca pomiarowego zapewnia sprzężony z układem obciążania węgelnika układ mikroskopu świetlnego, a dzięki precyzyjnemu układowi przemieszczania próbki z użyciem silników krokowych dokładność pozycjonowania wynosi 1 μm .

POMIARY MIKROTWARDOŚCI I MODUŁU SPRĘŻYSTOŚCI

W przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych wyznaczone zostały wartości mikrotwardości μHV oraz współczynnika sprężystości Younga E wierzchniej warstwy tłoka w obszarach: płaszcz, piasty oraz denka, w aspekcie określania zużycia oraz możliwości zastosowania mierzonych wartości w procesie diagnostyki procesów tarciovych. Jako wskaźniki wielkości zużycia przyjęto zmiany wartości mikrotwardości i modułu Younga warstw wierzchnich tłoka. Zastosowano metodę Vickersa wyznaczania mikrotwardości powierzchni dla wybranych wycinków powierzchni tłoka samochodowego [L. 5]. Przyjęto stałą pręd-

kość narastania siły obciążającej (siła narasta liniowo w funkcji czasu). Po uzyskaniu maksymalnej wartości siły jest ona zmniejszana z taką samą prędkością, jak siła narastająca, aż do całkowitego wyjścia węgelnika ponad powierzchnię próbki. Dla cyklu obciążenie – odciążenie tworzony jest wykres obciążenia węgelnika w funkcji jego przemieszczenia (głębokości penetracji) [L. 8].

Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów i utworzonej tzw. krzywej węgelnikowania wyznaczone zostały wartości parametrów (h_f – zagłębienie pozostające, h_i – zagłębienie obliczane ze sztywności systemu, h_{max} – maksymalne zagłębienie, S – sztywność kontaktowa) niezbędnych do obliczenia mikrotwardości oraz modułu sprężystości Younga.

Analiza właściwości odkształceniowych oparta jest o metodę Olivera i Pharra [L. 3, 4], zgodnie z którą moduł sprężystości E badanego materiału jest obliczany bezpośrednio z uzyskiwanej krzywej odciążenia na podstawie zależności [L. 8]:

$$E = \frac{E_i(1-\nu^2)}{\frac{2 \cdot \sqrt{A}}{\sqrt{\pi} \cdot S} \cdot E_i - (1-\nu_i^2)} \quad (1)$$

gdzie:

- E, ν – moduł Younga i współczynnik Poissona badanego materiału,
- E_i, ν_i – moduł Younga i współczynnik Poissona materiału węgelnika,
- S – sztywność kontaktowa (tangens kąta nachylenia krzywej odciążania),
- A – powierzchnia kontaktu obliczana z głębokości kontaktu i kalibracji geometrii węgelnika.

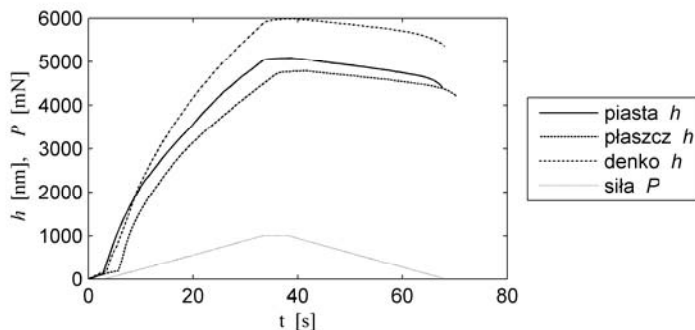
Mikrotwardość μHV określana jest jako stosunek nominalnej wartości siły obciążającej węgelnik P_{max} do powierzchni odcisku po odciążeniu A , określanej z głębokości pozostającej $h_{max}-h_f$:

$$\mu\text{HV} = \frac{P_{max}}{A} \quad (2)$$

Wartość mikrotwardości oraz moduł Younga badanego materiału są automatycznie obliczane przez oprogramowanie zastosowanego do badań przyrządu MCT.

Eksperyment pomiarowy obejmował badanie mikrotwardości wierzchniej warstwy tłoka w obszarach: piasty, płaszcz oraz denka w aspekcie odporności na zużycie oraz możliwości wykorzystania jej w procesie diagnostyki zachodzących procesów tarcia. Nominalne wartości zadawanych w trakcie badań sił P_{max} , wynosiły odpowiednio 50 mN, 100 mN oraz 1000 mN. Wyniki pomiarów umożliwiły wyznaczenie mikrotwardości HV oznaczonych, zgodnie z normą [L. 5], odpowiednio symbolami HV 0,005, HV 0,01 oraz HV 0,1.

Na **Rys. 1** przedstawiono charakterystyki ilustrujące przebiegi czasowe zadawanego obciążenia siłą P oraz mierzonego zagłębienia h ostrza przyrządu w badanych próbkach tłoka [L. 2].



Rys. 1. Przebiegi czasowe zadawanego obciążenia P oraz wartości zagłębienia h wgłębnika w powierzchnię próbki piasty, płaszczu oraz denka tłoka

Fig. 1. The time dependent changes of applied load P and penetration depth h of indenter into hub, side and bottom of the piston

Siła obciążająca zadawana była liniowo od zera do wartości nominalnej (na **Rys. 1** $P_{max} = 1000$ mN, a prędkość narastania 2000 mN/min), następnie utrzymywana była przez czas 5 s, po czym liniowo malała do wartości zerowej. Jednocześnie rejestrowany był przebieg zmian zagłębienia h . Eksperyment przeprowadzany był wielokrotnie dla badanych próbek: piasty, płaszczu oraz denka tłoka oraz dla różnych wartości siły obciążającej. Wartości prędkości narastania siły obciążającej i zmniejszania odciążającej były ustalone w taki sposób, aby czasy narastania i zmniejszania sił wynosiły 30 s. W **Tabelach 1–3** zestawiono średnie wartości mierzonych zagłębień h_{max} dla badanych próbek tłoka przy zastosowaniu sił obciążających 50 mN, 100 mN oraz 1000 mN. Na ich podstawie można stwierdzić, że wraz ze wzrostem wartości zadawanej siły obciążającej rosną wartości zagłębień ostrza, co jest spowodowane stopniowym przekraczaniem przez wgłębnik warstwy utwardzającej powierzchnię tłoka, jak również nierównościami pokrytej bruzdami, częściowo zatartej powierzchni bocznej oraz przegrzanej denka tłoka.

Tabela 1. Zestawienie średnich wartości mierzonych wielkości μHV i E oraz odchyłeń standardowych $\sigma_{\mu HV}$ i σ_E dla warstwy wierzchniej piasty tłoka

Table 1. Summary of average values μHV and E as well as standard deviations $\sigma_{\mu HV}$ and σ_E of measured parameters for piston hub

P_{max} [mN]	h_{max} [nm]	μHV [MPa]	$\sigma_{\mu HV}$ [MPa]	E [MPa]	σ_E [MPa]
50	975	216	25	106	11
100	1436	205	17	96	7
1000	5306	153	15	83	9

Tabela 2. Zestawienie średnich wartości mierzonych wielkości μHV i E oraz odchyłeń standardowych $\sigma_{\mu\text{HV}}$ i σ_E dla płaszczka tłoka

Table 2. Summary of average values μHV and E as well as standard deviations $\sigma_{\mu\text{HV}}$ and σ_E of measured parameters for the side of piston

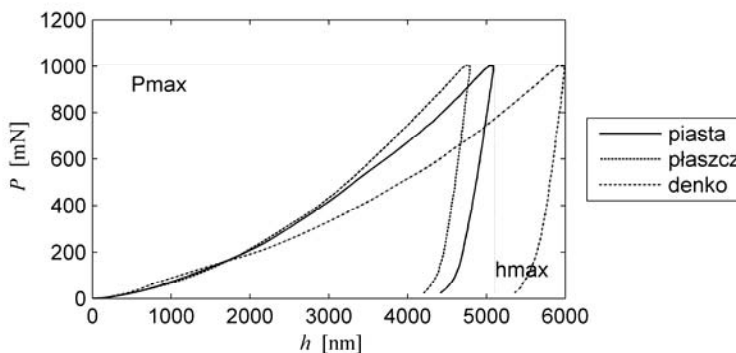
P_{max} [mN]	h_{max} [nm]	μHV [MPa]	$\sigma_{\mu\text{HV}}$ [MPa]	E [MPa]	σ_E [MPa]
50	1031	211	42	106	10
100	1503	195	46	103	9
1000	4926	173	13	96	5

Tabela 3. Zestawienie średnich wartości mierzonych wielkości μHV i E oraz odchyłeń standardowych $\sigma_{\mu\text{HV}}$ i σ_E dla denka tłoka

Table 3. Summary of average values μHV and E as well as standard deviations $\sigma_{\mu\text{HV}}$ and σ_E of measured parameters for the bottom of piston

P_{max} [mN]	h_{max} [nm]	μHV [MPa]	$\sigma_{\mu\text{HV}}$ [MPa]	E [MPa]	σ_E [MPa]
50	1295	119	14	84	8
100	1921	113	13	86	6
1000	6003	115	3	89	2

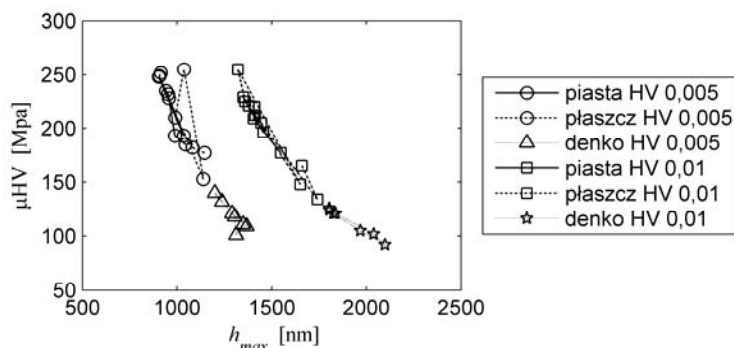
Na **Rys. 2** przedstawiono zarejestrowaną podczas jednej z prób krzywą wgłębnikowania dla sworznia, pobocznicy oraz denka tłoka przy zadawaniu nominalnej siły obciążającej 1000 mN. Na rysunku zaznaczono maksymalną wartość zadawanej siły, dla której określana jest wartość maksymalnego zagłębienia h_{max} . Na podstawie wykresów można stwierdzić, że największe zagłębienia występują dla próbek pobranych z dna tłoka, a najmniejsze z płaszczka tłoka (zgodnie z **Tab. 1–3**).



Rys. 2. Zarejestrowana krzywa wgłębnikowania dla warstwy wierzchniej piasty, płaszczka oraz denka tłoka i nominalnej siły obciążającej 1000 mN

Fig. 2. Recorded indentation curves for the hub, side and bottom of the piston at 1000 mN normal load

W celu analizy możliwości zastosowania wyników pomiarów mikrotwardości, jako diagnostycznego kryterium stopnia zużycia powierzchni tłoka, zestawiono na **Rys. 3 i 4** wyznaczone metodą Vickersa mikrotwardości w funkcji zagłębienia maksymalnego h_{max} dla badanych powierzchni tłoka.

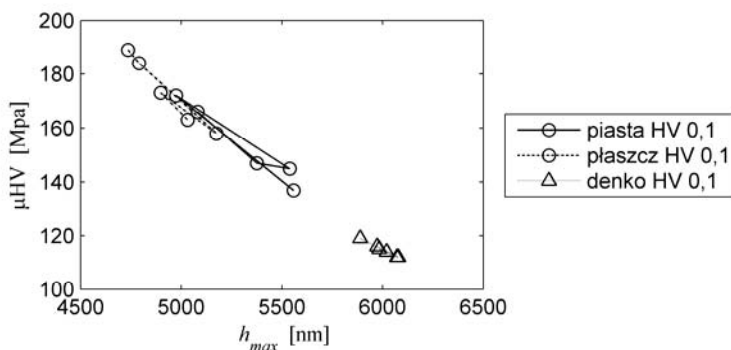


Rys. 3. Mikrotwardość μHV wg metody Vickersa w funkcji zagłębienia maksymalnego h_{max} dla piasty, płaszczu oraz denka tłoka – dla sił obciążających 50 mN i 100 mN

Fig. 3. Vickers microhardness μHV vs. maximal penetration depth h_{max} for the hub, side and bottom of piston – for 50 mN and 100 mN applied loads

Na **Rys. 3** przedstawiono charakterystyki dla sił obciążających 50 mN i 100 mN określonych przez normę [L. 5] dla pomiarów mikrotwardości, a na **Rys. 4** dla siły 1000 mN.

Zgodnie z legendą do rysunków wszystkie punkty pomiarowe charakterystyk dla badanych powierzchni piasty, płaszczu i denka tłoka oznaczono symbolami i połączono różnymi liniami. Dodatkowo różnymi symbolami oznaczono stopnie mikrotwardości zgodnie ze stosowaną skalą.



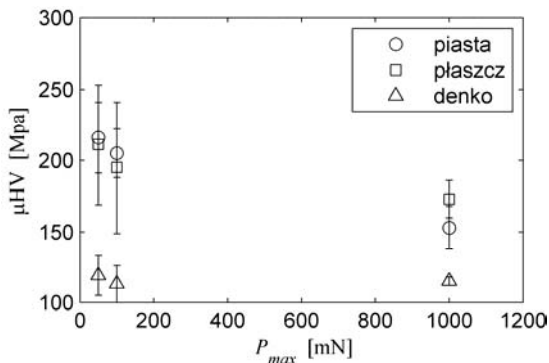
Rys. 4. Mikrotwardość μHV wg metody Vickersa w funkcji zagłębienia maksymalnego h_{max} dla powierzchni piasty, płaszczu, oraz denka tłoka – dla siły obciążającej 1000 mN

Fig. 4. Vickers microhardness μHV vs. maxima penetration depth h_{max} for the hub, side and bottom of piston – for 1000 mN applied load

Charakterystyki mikrotwardości przedstawione na **Rys. 3 i 4**, dla takich samych wartości sił obciążeń, są rozłączne dla denka tłoka oraz pozostałych powierzchni: płaszczka i piasty. Natomiast charakterystyki dla powierzchni płaszczka i piasty tłoka pokrywają się.

Dodatkowo w celu uwzględnienia naturalnego rozrzutu mierzonych wartości mikrotwardości oraz błędów pomiarów sporządzone zostały na podstawie **Tab. 1–3** i przedstawione na **Rys. 5** charakterystyki wartości średnich mikrotwardości μHV oraz odchyłeń standardowych $\sigma_{\mu\text{HV}}$ wyników pomiarów w funkcji siły obciążającej P_{max} .

Przedstawione na **Rys. 5** charakterystyki średnich wartości mikrotwardości z uwzględnieniem odchyłeń standardowych wyników pomiarów są również rozłączne dla denka tłoka oraz pozostałych powierzchni: poboczniczy, płaszczka i piasty tłoka dla wszystkich zastosowanych wartości sił obciążających.

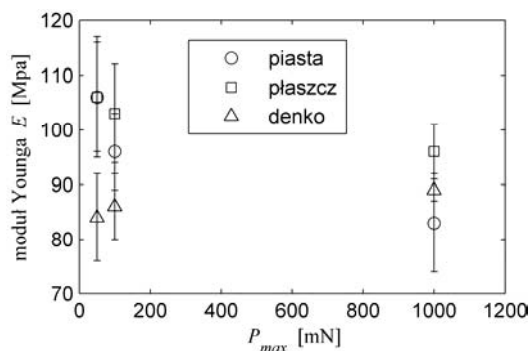


Rys. 5. Charakterystyki wartości średnich mikrotwardości μHV oraz odchyłeń standardowych $\sigma_{\mu\text{HV}}$ w funkcji siły obciążającej P_{max} dla powierzchni piasty, płaszczka oraz denka tłoka

Fig. 5. Changes of average values of microhardness μHV and standard deviation $\sigma_{\mu\text{HV}}$ as a function of applied normal load P_{max} for the hub, side and bottom of piston

Na **Rys. 6** przedstawiono charakterystyki średnich wartości modułu Younga E w funkcji siły obciążającej P_{max} dla warstwy wierzchniej piasty, płaszczka oraz denka tłoka z uwzględnieniem odchyłeń standardowych σ_E wyników pomiarów.

Jedynie dla niskiej wartości siły obciążającej 50 mN charakterystyki modułu Younga wyznaczonych dla denka tłoka oraz pozostałych badanych obszarów: piasty oraz płaszczka tłoka są rozłączne. Dla większych wartości siły obciążającej, zarówno 100 mN, jak i 1000 mN charakterystyki dla wszystkich badanych obszarów tłoka pokrywają się. Powoduje to, że wartość modułu Younga, która zmienia się wraz ze zużyciem powierzchni tłoka jako kryterium do diagnozowania stopnia zużycia tłoka jest mniej przydatne od parametru mikrotwardości. Dobrym kryterium określania zużycia tłoka, podobnie jak w przypadku cylindra [L. 10], pozostaje natomiast zmiana wartości mikrotwardości.



Rys. 6. Charakterystyki wartości średnich modułu Younga E oraz odchyłeń standardowych σ_E w funkcji siły obciążającej P_{max} dla powierzchni piasty, płaszcza oraz denka tłoka

Fig. 6. Changes of average values of Young's modulus E and standard deviation σ_E as a function of applied normal load P_{max} for the hub, side and bottom of piston

WNIOSKI

Na podstawie przedstawionych wyników badań można sformułować następujące wnioski:

- W badanych próbkach powierzchni tłoka stwierdzono zużycie warstwy wierzchniej denka tłoka, na co wskazują zmiany w wartościach mikrotwardości i modułu Younga w odniesieniu do okolic piasty, która w procesie eksploatacji nie jest poddawana procesom tarciovym i może stanowić punkt odniesienia dla diagnostyki zachodzących procesów tarcia.
- Zróżnicowanie wartości mierzonych parametrów μHV oraz E w przypadku denka tłoka, który podczas eksploatacji silnika nie bierze udziału we współpracy z cylindrem, może być wynikiem jego zużycia wywołanego oddziaływaniem bardzo wysokiej temperatury i nierównomiernie nagromadzonego na nim nagaru.
- W badanych próbkach poboczniczy tłoka nie stwierdzono istotnych różnic w wartościach mikrotwardości i modułu Younga względem powierzchni piasty, co może być spowodowane względnie niskim zużyciem ciernym próbki płaszczka tłoka.
- Stopień zużycia powierzchni denka tłoka można diagnozować na podstawie pomiaru mikrotwardości zarówno dla niskich, jak i wysokich wartości sił obciążających zadawanych podczas pomiarów (**Rys. 3, 4 i 5** – występuje bowiem istotna różnica pomiędzy wartościami mikrotwardości dla piasty i denka tłoka).
- Podobnie stopień zużycia powierzchni denka tłoka można diagnozować na podstawie pomiaru modułu sprężystości Younga, jednak tylko dla najniższych wartości sił obciążających (**Rys. 6**) zadawanych podczas pomiarów.

- Na podstawie otrzymanych wyników badań można stwierdzić, iż zmiany mikrotwardości oraz w ograniczonym zakresie modułu sprężystości Younga dają podstawę do określania głębokości h_{max} zmian mikrostruktury warstwy wierzchniej badanego materiału tłoka w procesie tarcia (**Tabele 1, 2 i 3**).
- Wyniki uzyskane podczas badań mogą stanowić podstawę do projektowania oraz doboru materiałów i warunków współpracy ślizgowych par ciernych typu tłok–cylinder.

LITERATURA

1. Ertuğrul D., Fazlı D.: Tribological and fatigue failure properties of porous P/M bearing. *International Journal of Fatigue*, Volume 30, Issue 4, April 2008.
2. Gawędzki W.: *Pomiary elektryczne wielkości nieelektrycznych*. Wyd. AGH, Kraków 2010.
3. Kot M., Lacki P.: Contact mechanics of coating-substrate systems: I – Methods of analysis and FEM modeling of nanoindentation tests. *Journal of the Balkan Tribological Association*, vol. 18, 2012, pp. 598–614.
4. Oliver W.C., Pharr G.M.: An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*, vol.7, no.6, 1992, pp.1564.
5. PN-EN ISO 14577-1:2005P – *Metale – Instrumentalna próba wciskania węglownika do określania twardości i innych własności materiałów – część 1: Metoda badania*.
6. Pytko S., Pytko P., Furmanik K.: *Processes of the friction in the conditions of boundary lubrication W: Scientific basis of modern technologies: experience and prospects / eds. Y.I. Shalapko, L.A. Dobrzanski. – Jaremche: Department of Principles of Engineering Mechanics of Khmelnytsky National University, 2011, pp. 376–389.*
7. Skrzypek S.J., Przybyłowicz K.: *Inżynieria metali i ich stopów*. Wydawnictwa AGH, Kraków 2012.
8. Sneddon I.N.: The relation between load and penetration in the axisymmetric Boussinesq problem for a punch of arbitrary profile. *International Journal of Engineering Science*, vol. 3, 1965, pp. 47.
9. Marian Szczerek, Marek Wiśniewski, Jadwiga Bajer: *Tribologia i tribotechnika*. Radom: Wyd. Instytutu Technologii Eksploatacji, 2000.
10. Tarnowski J., Gawędzki W., Kot M.: Badanie mikrotwardości warstwy wierzchniej cylindra w aspekcie odporności na zacieranie. *Tribologia*, nr 4, 2013, pp. 115–124.

Summary

The paper presents the results of micro-hardness and Young's modulus measurements of the surface layers of selected surfaces of engine piston. Indentations were performed in the side, bottom, and the hub of the piston, in the aspect of the wear determination. The methodology of testing and studied objects, a piston made of aluminium alloy, 80,0 mm diameter, were characterized. The indentation results, as characteristic load P vs. penetration depth h curves, which were done into the selected piston surfaces were given. The mean values and standard deviations of Young's modulus E and microhardness as a function of normal force P_{max} were compared.