

Jerzy TARNOWSKI\*, Waclaw GAWĘDZKI\*\*, Marcin KOT\*

## **BADANIE MIKROTWARDOŚCI WARSTWY WIERZCHNIEJ CYLINDRA W ASPEKCIE ODPORNOŚCI NA ZACIERANIE**

### **MICROHARDNESS ANALYSIS OF SURFACE LAYERS OF ENGINE CYLINDERS IN THE ASPECT OF SCUFFING RESISTANCE**

#### **Słowa kluczowe:**

mikrotwardość, zacieranie, diagnostyka, cylinder

#### **Key words:**

microhardness, scuffing, diagnostics, cylinder

#### **Streszczenie**

W artykule przedstawiono wyniki badań tulei silnika tłokowego w aspekcie odporności na zacieranie. Jako parametry porównawcze dla początkowego procesu tarcia tłoka i cylindra oraz powierzchni zatartej przyjęto mikrotwardość i moduł Younga. Scharakteryzowano metodę badawczą oraz obiekt badań. Przedstawiono charakterystykę przebiegów czasowych zadawanego obciążenia próbki cylindra oraz wartości zagłębienia. Sporządzono wykres zarejestrowanej

---

\* 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.

krzywej wgłębnikowania dla gładkiej i zatartej powierzchni cylindra przy nominalnej sile obciążającej 50 mN. Z przeprowadzonych badań sformułowano wnioski końcowe.

## WPROWADZENIE

Badania procesu zacierania wciąż pozostają otwarte i są kontynuowane ze względu na znaczną złożoność tego zjawiska. Wiele publikacji w dalszym ciągu rozpatruje problem zacierania w sferze hipotetycznej i nie wyjaśnia do końca wszystkich jego aspektów [L. 1, 4, 9]. Szczególnych trudności dostarcza wyjaśnienie przyczyn występowania zacierania, którego pochodzenia autorzy dopatrują się w sferze oddziaływań molekularnych, mechaniczno-wytrzymałościowych, energetycznych, temperaturowych, rekrytalizacyjnych itp. [L. 1, 7, 9].

Jednak w większości analizowanych przypadków wystąpienia zacierania autorzy zgodni są co do skutków przebiegu procesu. W wyniku zatarcia następuje katastroficzne zużycie warstw wierzchnich elementów ciernych. Objawia się ono zmianami chropowatości współpracujących powierzchni, uzyskanej wcześniej w procesie technologicznym wytwarzania i docierania oraz podczas trwania eksploatacji współpracujących powierzchni. Wytworzone znaczne ilości ciepła, towarzyszące procesowi zacierania, powodują niekiedy całkowite zablokowanie ruchu elementów pary ciernej. Do zatrzymania względnego ruchu elementów trących dochodzi w przypadku miejscowego zgrzania występujących na powierzchniach mikronierówności. Określa się, że na wierzchołkach występow chropowatych powierzchni temperatura może przekraczać nawet 1000°C. Wartości osiągniętych temperatur na kontakcie współpracujących powierzchni powodują nieodwracalne zmiany zachodzące w strukturze obu współpracujących materiałów [L. 1, 6, 9]. Zmieniające się podczas procesu tarcia parametry warstw wierzchnich mogą służyć jako wskaźniki charakteryzujące stan i „miarę” w przebiegu procesu tarcia od docierania do początków zatarcia. Do takich parametrów charakteryzujących poszczególne okresy procesu zużycia można zaliczyć zmieniającą się mikrotwardość i moduł Younga współpracujących ze sobą warstw wierzchnich elementów maszyn.

## CEL PRACY

Głównym celem pracy było wykazanie zmian mikrotwardości i modułu Younga warstw wierzchnich tulei cylindrowej w okresie od rozpoczęcia procesu tarcia do wystąpienia zatarcia. Poprzez badanie zmian tych parametrów podjęto próbę znalezienia wskaźnika charakteryzującego skojarzone materiały, współpracujące w parach ślizgowych. Określanie mikrotwardości i modułu Younga współ-

pracujących powierzchni elementów w kolejnych fazach od rozpoczęcia procesu tarcia aż do zacierania może mieć wpływ na dobór kojarzonych materiałów, a także na proces konstytuowania ich charakterystyk powierzchni i warunków eksploatacyjnych.

## CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU BADAŃ

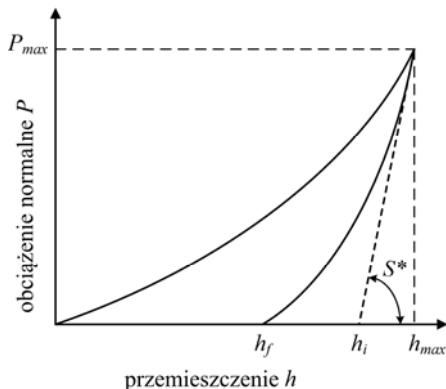
Obiektem badań była tuleja cylindrowa eksploatowana w silniku ciągnika samochodowego. Wewnętrzna średnica znamionowa wynosiła  $\Phi = 107,21$  mm, a jej długość  $L = 240$  mm. Tuleja była wykonana z żeliwa stopowego o grubości ścianki wynoszącej 2,04 mm. Badania eksperymentalne zmian mikrotwardości i modułu Younga przeprowadzono dla początkowej i zatartej powierzchni tulei, zgodnie z procedurą objętą normą [L. 5].

## OPIS STANOWISKA POMIAROWEGO

Testy indentacyjne przeprowadzano przy użyciu urządzenia Micro-Combi-Tester produkowanego przez CSM Instruments ze Szwajcarii. Podczas pomiaru mierzono głębokość penetracji z dokładnością 0,3 nm, podczas gdy obciążenie zadawano i mierzono z dokładnością 0,15 mN. Mikroskop optyczny wraz z precyzyjną kalibracją pozycjonowania próbki umożliwia wykonywanie testów w wybranych miejscach z dokładnością do 1  $\mu\text{m}$ . Podczas testów stosowane mogą być wgłębniki o różnej geometrii od ostrych wgłębników Berkovicha i Vickersa do wgłębników Rockwella i wgłębników sferycznych o różnych promieniach zaokrąglenia.

## METODA POMIARU MIKROTWARDOŚCI I MODUŁU SPRĘŻYSTOŚCI

W badaniach zastosowano metodę wyznaczania mikrotwardości Vickersa [L. 5]. Podczas pomiaru mikrotwardości wgłębnik o znanej geometrii jest wprowadzany w powierzchnię próbki w wyniku przyłożonego obciążenia  $P$ , które wzrasta do nominalnej wartości  $P_{max}$  (Rys. 1). Prędkość narastania siły obciążającej jest stała (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 wgłębnika ponad powierzchnię próbki. Dla każdego cyklu obciążenie–odciążenie tworzony jest wykres obciążenia wgłębnika w funkcji jego przemieszczenia (głębokości penetracji – Rys. 1) [L. 8].



**Rys. 1. Typowa krzywa wglębnikowania, obciążenie  $P$  w funkcji przemieszczenia  $h$  z zaznaczonymi parametrami:  $h_f$  – zagłębienie pozostające,  $h_i$  – zagłębienie obliczane ze sztywności systemu,  $h_{max}$  – maksymalne zagłębienie,  $S^*$  – całkowita sztywność systemu.**

Fig. 1. Typical indentation curve, load  $P$  - penetration depth  $h$ , where:  $h_f$  – residual impression depth,  $h_i$  – depth calculated from stiffness of the system,  $h_{max}$  – maximal penetration depth,  $S^*$  – total contact stiffness

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:

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1-\nu^2}{E} + \frac{1-\nu_i^2}{E_i} \quad (1)$$

gdzie:  $E_r$  – zredukowany moduł sprężystości jest równy [L. 8]:

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi} \cdot S}{2 \cdot \sqrt{A}} \quad (2)$$

- $E, \nu$  – moduł Younga i współczynnik Poissona badanego materiału,
- $E_i, \nu_i$  – moduł Younga i współczynnik Poissona materiału wglębniaka,
- $S$  – sztywność kontaktowa (tangens kąta nachylenia krzywej odciążania),
- $A$  – powierzchnia kontaktu obliczana z głębokości kontaktu i kalibracji geometrii wglębniaka.

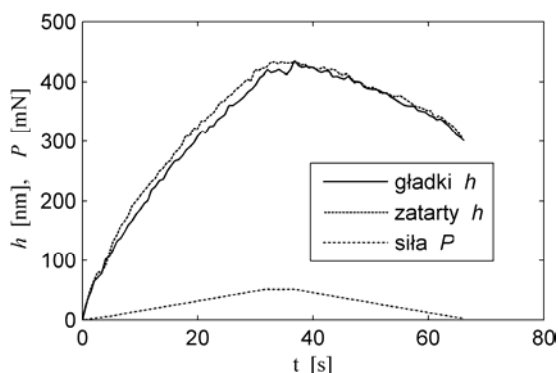
Mikrotwardość  $\mu HV$  określana jest jako stosunek nominalnej wartości siły obciążającej wglębniak  $P_{max}$  do powierzchni odcisku po odciążeniu  $A$ , określonej z głębokości pozostającej  $h_{max}-h_f$  (**Rys. 1**):

$$\mu\text{HV} = \frac{P_{max}}{A} \quad (3)$$

Wartości mikrotwardości oraz moduł Younga badanego materiału są automatycznie obliczane przez oprogramowanie przyrządu MCT.

## POMIARY TWARDOŚCI I INTERPRETACJA WYNIKÓW

Eksperyment pomiarowy obejmował badanie mikrotwardości wierzchniej warstwy wewnętrznej części cylindra w aspekcie odporności na zacieranie oraz możliwości wykorzystania jej w procesie diagnostyki zacierania. Przebieg pomiarów zobrazowany został na **Rys. 2** ilustrującym przykładową charakterystykę przebiegu zadawanego obciążenia siłą  $P$  oraz mierzonego zagłębienia  $h$  ostrza przyrządu w próbce cylindra gładkiego (przed badaniami zatarcia) i zatartego [L. 2].



**Rys. 2.** Przebiegi czasowe zadawanego obciążenia  $P$  próbki cylindra oraz wartości zagłębienia  $h$  wgłębnika w powierzchnię cylindra

Fig. 2. The time dependent changes of applied load  $P$  and penetration depth  $h$  of indenter into cylinder surface

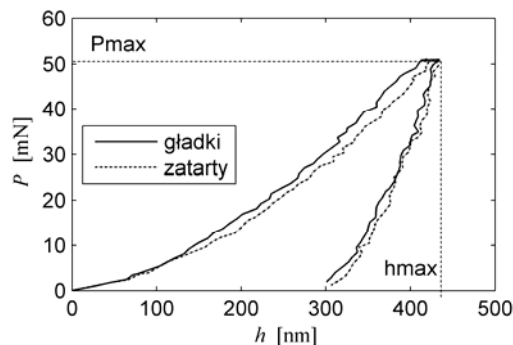
Siła obciążająca zadawana była liniowo od zera do wartości nominalnej (na **Rys. 2**  $P_{max} = 500$  mN, a prędkość narastania 100 mN/min), następnie utrzymywana była przez czas 5 s, po czym liniowo malała do wartości zerowej. Dla wyższych wartości sił prędkość ich narastania ustalana była w taki sposób, że zachowany był czas narastania 30 s. Jednocześnie rejestrowany był przebieg zmian zagłębienia  $h$ . Eksperyment przeprowadzany był wielokrotnie dla cylindra gładkiego i zatartego. Przyjęto zalecane w normie [L. 5] nominalne wartości zadawanych sił, które zestawiono w **Tab. 1** wraz z odpowiadającymi im symbolami mikrotwardości.

**Tabela 1.** Nominalne wartości zadawanych w trakcie badań sił  $P_{max}$ , wraz z odpowiadającymi im symbolami mikrotwardości HV [L. 5]

Table 1. Nominal values of load  $P_{max}$  applied in research program with corresponding microhardness HV symbols [L. 5]

$P_{max}$ [mN]	Symbol twardości
50	HV 0,005
100	HV 0,01
200	HV 0,02
500	HV 0,05
1000	HV 0,1

Na **Rys. 3** przedstawiono zarejestrowaną podczas jednej z prób krzywą wgłębnikowania próbki dla gładkiej i zatartej powierzchni cylindra i nominalnej siły obciążającej 50 Nm.



**Rys. 3.** Zarejestrowana krzywa wgłębnikowania dla gładkiej i zatartej powierzchni cylindra i nominalnej siły obciążającej 50 Nm

Fig. 3. Recorded indentation curves for smooth and seized surfaces of the cylinder under 50 mN nominal load

W **Tabelach 2 i 3** zestawiono średnie wartości mierzonych zagłębień  $h_{max}$  dla cylindrów gładkiego oraz zatartego przy zastosowaniu różnych wartości sił obciążających, zgodnie z **Tab. 1**. Na ich podstawie można stwierdzić, że wraz ze wzrostem wartości zadawanej siły obciążającej rosną wartości zagłębień ostrza, co jest spowodowane stopniowym przekraczaniem przez zagłębnik warstwy utwardzającej powierzchnię cylindra, jak również nierównościami pokrytej brzdami zatartej powierzchni cylindra.

W celu analizy możliwości zastosowania wyników pomiarów mikrotwardości jako diagnostycznego kryterium stopnia zużycia powierzchni cylindra, zestawiono na **Rys. 4 i 5** wyznaczone metodą Vickersa mikrotwardości w funkcji zagłębienia maksymalnego  $h_{max}$  dla gładkiej i zatartej powierzchni cylindra.

**Tabela 2. Zestawienie średnich wartości mierzonych wielkości oraz odchyłeń standardowych dla cylindra gładkiego**

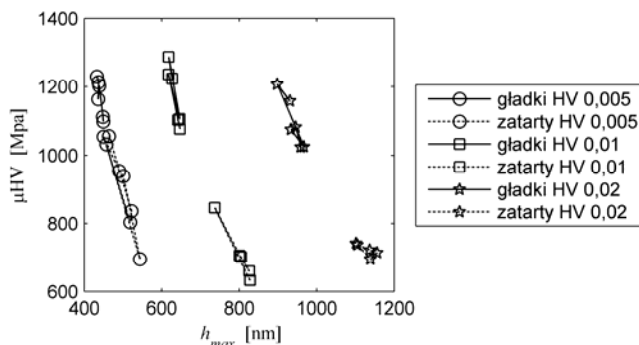
Table 2. Summary of average values and standard deviations of measured parameters for the smooth cylinder

$P_{max}$ [mN]	$h_{max}$ [nm]	$\mu\text{HV}$ [MPa]	$\sigma_{\mu\text{HV}}$ [MPa]	E [MPa]	$\sigma_E$ [MPa]
50	440	1170	55	268	5
100	633	1172	87	266	8
200	939	1095	74	251	7
500	1590	975	82	230	11
1000	2331	910	62	216	9

**Tabela 3. Zestawienie średnich wartości mierzonych wielkości oraz odchyłeń standardowych dla cylindra zatartego**

Table 3. Summary of average values and standard deviations of measured parameters for the seized cylinder

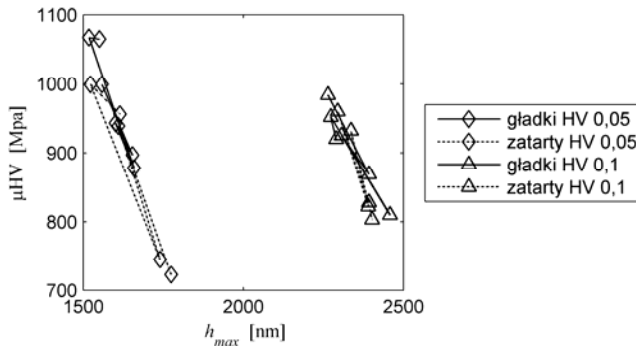
$P_{max}$ [mN]	$h_{max}$ [nm]	$\mu\text{HV}$ [MPa]	$\sigma_{\mu\text{HV}}$ [MPa]	E [MPa]	$\sigma_E$ [MPa]
50	493	921	132	257	12
100	799	709	82	221	8
200	1128	722	19	222	6
500	1653	872	128	232	7
1000	2363	869	72	223	14



**Rys. 4. Mikrotwardość  $\mu\text{HV}$  wg metody Vickersa w funkcji zagłębienia maksymalnego  $h_{max}$  dla gładkiej i zatartej powierzchni cylindra – dolna część zakresu sił obciążających**

Fig. 4. Vickers microhardness  $\mu\text{HV}$  vs. maxima penetration depth  $h_{max}$  for smooth and seized cylinders – Lower range of applied loads

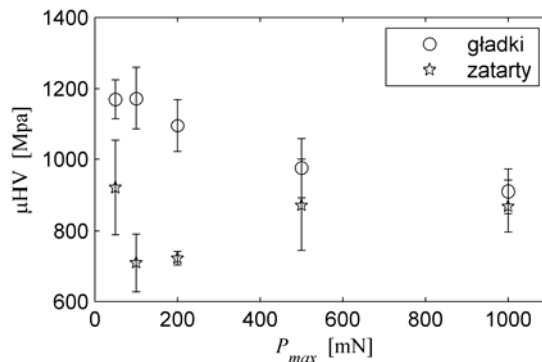
Na **Rys. 4** przedstawiono charakterystyki dla sił obciążających z dolnej części zakresu określonego przez normę [5] dla pomiarów mikrotwardości (**Tab. 1**), a na **Rys. 5** dla sił z górnej części tego zakresu. Zgodnie z legendą do



**Rys. 5. Mikrotwardość  $\mu\text{HV}$  wg metody Vickersa w funkcji zagłębienia maksymalnego  $h_{max}$  dla gładkiej i zartej powierzchni cylindra - górna część zakresu sił obciążających**

Fig. 5. Vickers microhardness  $\mu\text{HV}$  vs. maxima penetration depth  $h_{max}$  for smooth and seized cylinders – Upper range of applied loads

rysunków, wszystkie punkty pomiarowe charakterystyki dla gładkiej powierzchni cylindra połączono linią ciągłą, a dla zartej przerywaną. Dodatkowo różnymi symbolami oznaczono stopnie twardości zgodnie ze stosowaną skalą. Charakterystyki mikrotwardości przedstawione na **Rys. 4**, dla takich samych wartości sił obciążeń z dolnego zakresu, dla cylindra gładkiego i zartej są rozłączne. Natomiast charakterystyki wyznaczone dla sił obciążeń z górnego zakresu sił obciążeń pokrywają się. Dodatkowo w celu uwzględnienia naturalnego rozrzutu mierzonych wartości twardości oraz błędów pomiarów sporządzone zostały na podstawie **Tab. 2 i 3** i przedstawione na **Rys. 6** charakterystyki wartości średnich oraz odchyłeń standardowych mikrotwardości  $\mu\text{HV}$  w funkcji siły obciążającej  $P$ .



**Rys. 6. Charakterystyki wartości średnich oraz odchyłeń standardowych mikrotwardości  $\mu\text{HV}$  w funkcji siły obciążającej  $P$  dla cylindra gładkiego i zartej**

Fig. 6. Changes of average values and standard deviation of microhardness  $\mu\text{HV}$  as a function of applied normal load  $P$  for smooth and seized cylinders



Przedstawione na **Rys. 6** charakterystyki średnich wartości mikrotwardości z uwzględnieniem odchyłeń standardowych wyników pomiarów są również rozłączne w dolnej części zakresu sił obciążających, a pokrywają się w górnej.

Analiza wyników pomiarów modułu sprężystości Younga zamieszczonych w **Tabelach 2 i 3** prowadzi do podobnych wniosków jak w przypadku wyników pomiarów mikrotwardości.

## WNIOSKI

Na podstawie przedstawionych charakterystyk można sformułować następujące wnioski:

- Stopień zużycia cylindrów można diagnozować na podstawie pomiaru mikrotwardości dla dolnej części zakresu sił obciążających (**Rys. 6**).
- Dla górnej części zakresu sił charakterystyki mikrotwardości w funkcji głębokości  $h_{max}$  dla powierzchni gładkiej i zatartej cylindra pokrywają się i nie dają podstawy do diagnozowania zużycia cylindrów (**Rys. 6**).
- Podobnie stopień zużycia cylindrów można diagnozować na podstawie pomiaru modułu sprężystości Younga dla dolnej części zakresu sił obciążających, co wynika z wyników pomiarów zestawionych w **Tabelach 2 i 3**.
- Dla górnej części zakresu sił wartości modułu sprężystości Younga w funkcji głębokości  $h_{max}$  dla powierzchni gładkiej i zatartej cylindra pokrywają się i nie dają podstawy do diagnozowania zużycia cylindrów, zgodnie z danymi przedstawionymi w **Tabelach 2 i 3** przy uwzględnieniu odchyłeń standardowych wyników pomiarów.
- Na podstawie otrzymanych wyników badań można stwierdzić, iż zmiany mikrotwardości i modułu sprężystości Younga dają podstawę do określania głębokości  $h_{max}$  zmian mikrostruktury warstwy wierzchniej badanego materiału w procesie zacierania (**Tabele 2 i 3**).
- Wyniki uzyskane podczas badań mogą stanowić podstawę do projektowania oraz doboru parametrów i warunków współpracy ślizgowych par ciernych przed ich projektowaniem.

## 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 węgelnika 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 Bousinesq problem for a punch of arbitrary profile. *International Journal of Engineering Science*, vol. 3, 1965, pp. 47.
9. Szczerek M., Wiśniewski M.: *Tribologia i Tribotechnika*. Wydawnictwo: Zakład Poligrafii Instytutu Technologii i Eksploatacji. Radom 2000.

## Summary

**The paper presents test results of engine cylinder in a term of scuffing resistance. The microhardness and Young's modulus were used to analysis of mechanical properties of new and seized surface of cylinders.**

**The method and a object of tests were also characterized. The typical indentation curves as time dependent load and penetration depth changes were given. To analyze changes of microhardness vs penetration depth tests were carried out at wide load range 50-1000mN. Indentation results allow to formulate conclusions and determined seizure effect on mechanical properties of surface layers of tested steel, engine cylinders.**