

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

## **BADANIE ZMIAN SPRĘŻYSTOŚCI I MIKROTWARDZOŚCI POWŁOK NIKASILOWYCH W ASPEKCIE ZUŻYCIA TULEI SILNIKÓW SPALINOWYCH**

**STUDY OF THE MODULUS OF ELASTICITY AND  
THE MICROHARDNESS CHANGES OF NIKASIL COATINGS  
IN CYLINDER SLEEVES OF COMBUSTION ENGINES DUE  
TO WEAR**

### **Słowa kluczowe:**

tuleja, powłoka Nikasil, moduł Younga, tarcie, zużycie

### **Key words:**

engine sleeve, Nicasil coating, elasticity modulus, friction, wear

### **Streszczenie**

Jedną z powłok ochronnych często używaną szczególnie w tulejach silników motocyklowych jest powłoka wykonana ze stopu Nikasilu. Charakteryzuje się ona dobrymi własnościami tribologicznymi, a w szczególności wysoką odpor-

---

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

nością na zużycie cierne. Poszukiwania optymalnych rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych we współpracy tulei i tłoka ukierunkowane są również na zachowanie sprężystości warstw wierzchnich skojarzonych materiałów. Zmiany modułu Young'a powłok powierzchniowych w czasie eksploatacji silnika pozwalają na ocenę stanu zużycia powierzchni trących.

W pracy przedstawiono badania zmian sprężystości powłoki w aspekcie utraty własności tribologicznych, w tym odporności na zacieranie. Zachowanie własności sprężystych warstw wierzchnich par trących pozwala w procesie eksploatacji na zwiększoną odporność na przenoszenie zmiennych obciążeń dynamicznych oraz występujących w silniku wysokotemperaturowych zmian cieplnych.

W artykule zamieszczono wyniki przeprowadzonych badań zmian modułu sprężystości oraz mikrotwardości powłoki Nikasil dla stanu początkowego i powierzchni zużytej przez zatarcie. W artykule zawarto przebiegi zmian modułu Younga i mikrotwardości oraz opracowano wnioski.

## WPROWADZENIE

Trwające aktualnie poszukiwania optymalnych rozwiązań w dziedzinie powłok tribologicznych idą w kierunku zapewnienia prawidłowej współpracy pomiędzy skojarzonymi elementami. W prowadzonych badaniach nad powłokami [L. 1, 3, 4, 9] dąży się do poszukiwań nowych materiałów do ciernej współpracy oraz ich konstytuowanie w aspekcie wzrostu ich trwałości. Jednym z rozwiązań stosowanych na skalę przemysłową jest dobór powłoki Nikasilu jako warstwy wierzchniej gładzi cylindrowych silników spalinowych.

W zależności od warunków współpracy prowadzone doświadczenia i testy badawcze koncentrują się głównie na zachowaniu wysokiej sprężystości i mikrotwardości na powierzchniach stykowych [L. 3, 4, 7]. Dotyczy to takich powierzchni jak gładź cylindrowa współpracująca ze sprężynującymi i uszczelniającymi pierścieniami tłokowymi. W optymalnych rozwiązaniach konstrukcyjnych tego typu dąży się do uzyskania wysokiego stopnia sprężystości warstw wierzchnich, odporności na zginanie i podwyższonej mikrotwardości, a także odporności na mikroudary i znacznej wytrzymałości zmęczeniowej [L. 6, 7, 9]. Z drugiej strony współpracujące warstwy wierzchnie muszą się odznaczać wysoką jakością czynników tribologicznych, warunkujących poprawną współpracę skojarzonych elementów w aspekcie antyzużyciowym, gwarantującym zmniejszenie strat energetycznych podczas procesu tarcia. Pośród wykluczających się nawzajem własności warstw wierzchnich rozwiązaniem optymalnym mogą być specjalnie ukonstruowane powłoki warstw wierzchnich [L. 6, 8, 9]. Do takich należy powłoka ze stopu Nikasil (nikiel, kadm, krzem) użytkowana w budowie struktur warstw wierzchnich cylindra w silnikach spalinowych.

## CEL PRACY

Głównym celem pracy była charakterystyka procesu zużycia powłok Nikasilu stosowanych w silnikach motocyklowych od początku ukonstytuowania powłoki do całkowitego zużycia (zatarcia). Jako parametr charakteryzujący stopień zużycia powłoki przyjęto zmiany wartości modułu Younga i mikrotwardości gładzi cylindra.

## CHARAKTERYSTYKA OBIEKTU BADAŃ

Badania przeprowadzono na rzeczywistym cylindrze silnika motocyklowego Ducati S2R, o średnicy nominalnej  $\Phi = 97,5$  mm oraz szerokości warstwy Nikasilu pokrywającej cylinder  $L = 112,2$  mm. Silnik uległ awarii i na części powierzchni (około 30%) wykazywał wyraźne ślady powierzchni zatartej w postaci bruzd, zarysowań oraz przegrzania. Cylinder wykonany był ze stopu aluminiowego, w którego składzie zgodnie z obowiązującą normą PN-EN 1706:2001 można wyróżnić następujące składniki przedstawione w **Tab.1**.

**Tabela1. Skład chemiczny oraz udział procentowy składników w materiale cylindra wg PN-EN 1706:2001 [L. 8]**

Table 1. Chemical composition and components amount in the cylinder material according to PN-EN 1706:2001 standard [L. 8]

Lp.	Składnik chemiczny materiału cylindra	Przybliżony udział procentowy [%]
1	Aluminium (Al)	85
2	Krzem (Si)	10,5 ÷ 12,5
3	Nikiel (Ni)	≤ 0,3
4	Miedź (Cu)	≤ 1%
5	Cyna (Sn)	≤ 0,1
6	Tytan (Ti)	≤ 0,2
7	Chrom (Cr)	≤ 0,1
8	Żelazo (Fe)	≤ 0,8
9	Cynk (Zn)	≤ 0,55
10	Ołów (Pb)	≤ 0,2

Próbki do badań stanowiły wycinki cylindra z powierzchnią niezatartą oraz z powierzchnią wykazującą ślady po procesie zacierania. Cylinder motocykla Ducati S2R z wyciętą próbką do badań przedstawiono na **Rys. 1**.



**Rys. 1. Cylinder silnika motocyklowego Ducati S2R po wycięciu próbki do badań zużycia powłoki Nikasil**

Fig. 1. Motorcycle Ducati S2R engine cylinder with a cut off sample for wear tests of Nikasil coating

### **OPIS STANOWISKA POMIAROWEGO**

Badania zużycia wybranych warstw wierzchnich przeprowadzono z użyciem urządzenia Micro-Combi-Tester produkowanego przez CSM Instruments ze Szwajcarii (**Rys. 2**).



**Rys. 2. Urządzenie zastosowane do badania właściwości mechanicznych powłok Nikasil**

Fig. 2. Equipment used in mechanical testing of Nikasil coatings

Opis urządzenia badawczego oraz przyjęta metodyka przeprowadzonych badań znajdują się w pracy [L.10]. Przeprowadzono testy indentacyjne z wyko-

rzystaniem węgelnika o geometrii Vickersa zgodnie z obowiązującą normą PN-EN ISO 14577-1. Pomiaru modułu sprężystości oraz mikrotwardości powłok Nikasilu dokonywano przy zapewnieniu ciągłego pomiaru siły i głębokości penetracji [L. 2].

### METODYKA BADAŃ

Badania przeprowadzono przy obciążeniach: 50, 100, 200, 500 i 1000 mN. Obciążeniu temu odpowiadały prędkości narastania oraz opadania siły 100, 200, 400, 1000 i 2000 mN/s. Po osiągnięciu maksymalnej siły w czasie ok. 30 sekund czas utrzymania siły przy maksymalnym obciążeniu wynosił 5 sekund. Liczba powtórzeń pomiarów wynosiła 4÷5 dla ww. obciążeń. Testy prowadzono w miejscach oddalonych od siebie o kilkaset mikrometrów, wykluczając w ten sposób możliwość wpływu pomiarów wcześniejszych. Pomiarów dokonano na powierzchni roboczej cylindra aluminiowego z nałożoną powłoką Nikasil (Nikiel, Kadm z cząstkami SiC) – najczęściej wykorzystywana jest do tego technika galwanicznego osadzania powłok). Na zatartej powierzchni powłoka ta przestaje istnieć, natomiast w obszarze prawidłowej współpracy wyniki badań potwierdzają obecność powłoki.

### WYNIKI BADAŃ POWŁOKI NIKASILU

Zestawienie średnich wartości mierzonych wielkości modułu Younga  $E$  i mikrotwardości  $\mu\text{HV}$  dla wybranych obciążeń oraz odchyłeń standardowych dla powłoki niezatartej przedstawiono w **Tab. 2**.

**Tabela 2. Zestawienie średnich wartości mierzonych wielkości oraz odchyłeń standardowych dla powłoki niezatartej**

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	484	801	98	250	18
100	688	844	124	254	8
200	2024	822	90	241	14
500	1732	755	71	221	6
1000	2497	735	63	228	8

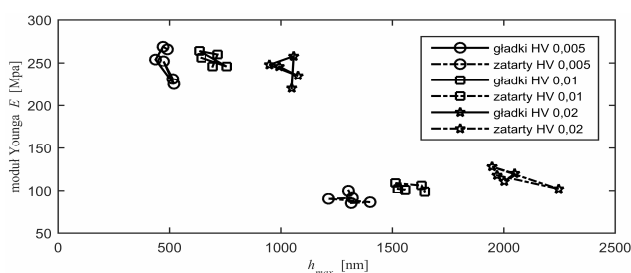
W **Tab. 3** zestawiono średnie wartości mierzonych wielkości oraz odchylenia standardowe dla powłoki po zatarciu.

**Tabela 3. Zestawienie średnich wartości mierzonych wielkości oraz odchyłeń standardowych dla powłoki po zatarciu**

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

$P_{max}$ [mN]	$h_{max}$ [nm]	$\mu HV$ [MPa]	$\sigma_{\mu HV}$ [MPa]	E [MPa]	$\sigma_E$ [MPa]
50	1310	107	12	91	6
100	1575	154	9	103	4
200	2043	184	21	116	10
500	2602	315	27	124	3
1000	3569	354	38	127	7

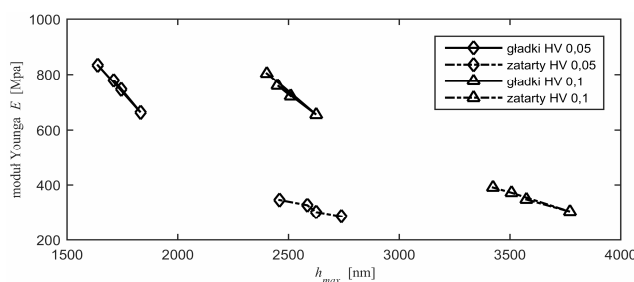
Zmiany wartości modułu sprężystości powłoki Nikasilu E w funkcji zagłębienia maksymalnego  $h_{max}$  dla dolnego zakresu sił obciążających oraz dla gładkiej i zatartej powierzchni cylindra przedstawiono na **Rys. 3**.



**Rys. 3. Zmiany modułu sprężystości powłoki Nikasilu E w funkcji zagłębienia maksymalnego  $h_{max}$  dla gładkiej i zatartej powierzchni cylindra – dolny zakres sił obciążających**

Fig. 3. Elasticity modulus of Nicasil coating vs. maxima penetration depth  $h_{max}$  for smooth and seized Nicasil coating – lower range of applied loads

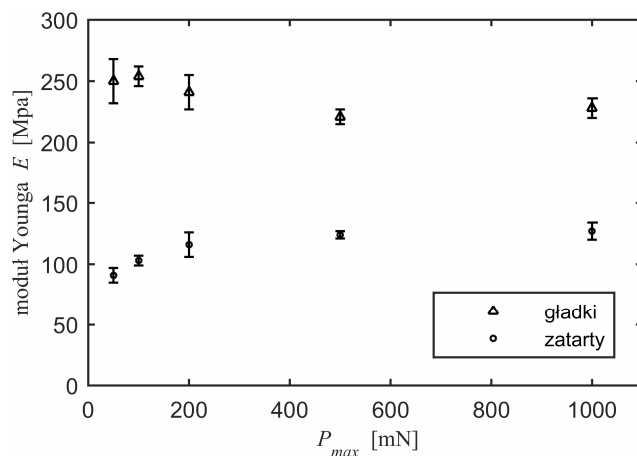
Zmiany modułu sprężystości powłoki Nikasilu E w funkcji zagłębienia maksymalnego  $h_{max}$  dla górnej części zakresu sił obciążających, dla gładkiej i zatartej powierzchni cylindra przedstawiono na **Rys. 4**.



**Rys. 4. Moduł sprężystości powłoki Nikasilu E w funkcji zagłębienia maksymalnego  $h_{max}$  dla gładkiej i zatartej powierzchni cylindra – górna część zakresu sił obciążających**

Fig. 4. Elasticity modulus of Nicasil coating vs. maxima penetration depth  $h_{max}$  for smooth and seized Nicasil coating – upper range of applied loads

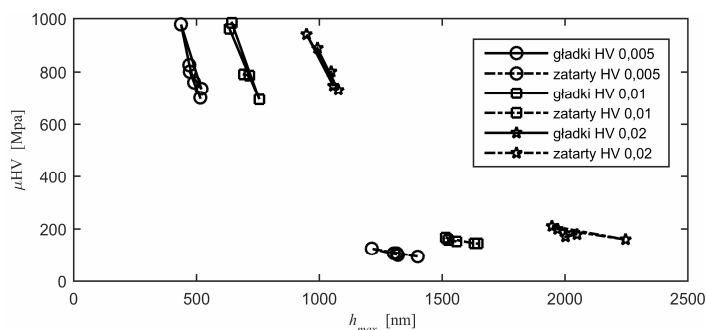
Charakterystyki wartości średnich modułu Younga  $E$  oraz odchyłeń standardowych  $\sigma_E$  w funkcji siły obciążającej  $P_{max}$  dla gładkiej i zatartej powierzchni cylindra przedstawiono na **Rys. 5**.



**Rys. 5.** Charakterystyki wartości średnich modułu Younga  $E$  oraz odchyłeń standardowych  $\sigma_E$  w funkcji siły obciążającej  $P_{max}$  dla gładkiej i zatartej powierzchni cylindra

Fig. 5. Changes of average values of Young's modulus  $E$  and standard deviation  $\sigma_E$  as a function of applied normal load  $P_{max}$  for Nicasil coating

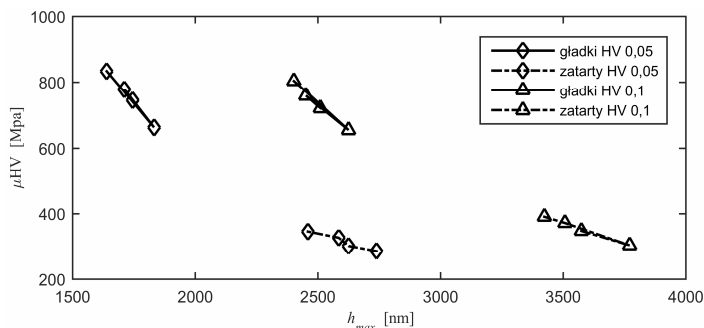
Zmiany mikrotwardości  $\mu HV$  wg metody Vickersa w funkcji zagłębienia maksymalnego  $h_{max}$  dla dolnej części zakresu sił obciążających, dla gładkiej i zatartej powłoki Nikasilu zamieszczono na **Rys. 6**.



**Rys. 6.** Mikrotwardość  $\mu HV$  wg metody Vickersa w funkcji zagłębienia maksymalnego  $h_{max}$  dla gładkiej i zatartej powłoki nikasilowej – dolna część zakresu sił obciążających

Fig. 6. Vickers microhardness  $\mu HV$  vs. maxima penetration depth  $h_{max}$  for smooth and seized Nicasil coating – lower range of applied loads

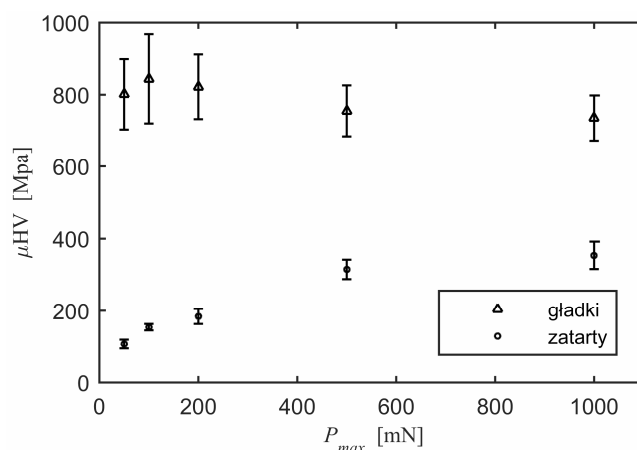
Charakterystykę zmian mikrotwardości  $\mu\text{HV}$  wg metody Vickersa w funkcji zagłębienia maksymalnego  $h_{\text{max}}$  dla gładkiej i zatartej powłoki Nikasilu, dla górnej części zakresu sił obciążających zamieszczono na **Rys. 7**.



**Rys. 7.** Mikrotwardość  $\mu\text{HV}$  wg metody Vickersa w funkcji zagłębienia maksymalnego  $h_{\text{max}}$  dla gładkiej i zatartej powłoki Nikasilu – górna część zakresu sił obciążających

Fig. 7. Vickers microhardness  $\mu\text{HV}$  vs. maxima penetration depth  $h_{\text{max}}$  for smooth and seized Nicasil coating – upper range of applied loads

Charakterystyki wartości średnich oraz odchyłeń standardowych mikrotwardości  $\mu\text{HV}$  w funkcji siły obciążającej  $P$  dla gładkiej i zatartej powłoki Nikasilu w cylindrze silnika przedstawiono na **Rys. 8**.



**Rys. 8.** Charakterystyki wartości średnich oraz odchyłeń standardowych mikrotwardości  $\mu\text{HV}$  w funkcji siły obciążającej  $P$  dla gładkiej i zatartej powłoki Nikasilu

Fig. 8. Changes of average values and standard deviation of microhardness  $\mu\text{HV}$  as a function of applied normal load  $P$  for smooth and seized Nicasil coating



## PODSUMOWANIE

Wyniki przeprowadzonych badań oraz ich analiza pozwalają na wprowadzenie zastosowanej w pracy metody diagnozowania zużycia powłok w cylindrach silników spalinowych. Uzyskane wyniki badań potwierdziły, że dla minimalnej siły 50 mN mikrotwardość w skali Vickersa jest prawie 8-krotnie większa dla warstwy wierzchniej z obecnością Nikasilu w porównaniu z powłoką, która uległa zatarciu. Podobnie przebiega charakterystyka zmian modułu sprężystości, przy czym dla tej samej wartości siły moduł sprężystości  $E$  wzrastał około pięciokrotnie.

Z testów prowadzonych przy większych obciążeniach i wzroście głębokości penetracji obydwie parametry rejestrowane  $E$  i  $\mu\text{HV}$  wykazywały tendencję spadkową w odniesieniu do niezatartej powłoki nikasilowej. Odwrotną charakterystykę dla tych samych warunków testowania (większe wartości obciążeń i wzrost głębokości penetracji) przejawiały moduł sprężystości  $E$  oraz mikrotwardość  $\mu\text{HV}$  – wykazywały się wzrostem. Dla przyjętego zakresu obciążeń można w sposób orientacyjny oszacować grubości naniesionych powłok, jakie powstają w strukturze warstwy wierzchniej w procesie eksploatacji silników.

## 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 wgłębnika 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. Jasiński D.: *Praca dyplomowa – Współpraca pary ciernej tłok-cylinder ze szczególnym uwzględnieniem powłoki typu nikasil*. Kraków 2014.
9. Szczerek M., Wiśniewski M., Bajer J.: *Tribologia i tribotechnika*. Wydaw. Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 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.
11. Kaźmierczak A.: Tarcie i zużycie zespołu tłok–pierścień–cylinder, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.
12. PN-EN ISO 14577-1:2005P- Metale – Instrumentalna próba wciskania wglębniaka do określania twardości i innych własności materiałów – Część 1: Metoda badania.

### Summary

**Coatings on surfaces of internal combustion engine elements are commonly used to protect against excessive wear. One of them, frequently applied on sleeve surface of motorcycle engines, is made of Nicasil alloy. As presented by producers, these coatings are characterized by good tribological properties, in particular, high abrasive wear resistance. The design and optimization of the best technical solution and materials in a sleeve-piston friction pair are focused on the appropriate modulus of elasticity of the materials in contact. The changes in the Young's modulus of coatings during engine operation allow an assessment of its state of wear. The paper presents the study of elasticity changes of Nicasil coatings in terms of the loss in tribological properties, including scuffing resistance. The steady value of surface coatings elastic properties during the operation of friction pairs allows one to transfer variable and dynamic loads and to provide high resistance to high temperatures and heat flux changes. This article also presents the results of micromechanical tests: elasticity modulus and microhardness of Nicasil coatings in the initial state, worn, and seized surfaces.**