

## NANORURKI WĘGLOWE JAKO SUBSTANCJA USZLACHETNIAJĄCA PROWADZĄCA DO POPRAWY PARAMETRÓW TRYBOLOGICZNYCH ZESPOŁU TŁOK-CYLINDER SILNIKA SPALINOWEGO

*Aktualne tendencje rozwoju silników spalinowych kładą szczególny nacisk na ciągłe zmniejszanie zużycia paliwa i emisji toksycznych składników spalin. Jednym ze sposobów spełnienia tych założeń jest redukcja tarcia w grupie tłok-cylinder.*

*W artykule przedstawione zostały wyniki badań oporów ruchu tłoków pokrytych warstwą nanorurek węglowych oraz dodatku nanorurek węglowych do oleju silnikowego jako substancji uszlachetniającej. Pokrycie powierzchni nośnej tłoków nanorurkami węglowymi wykazały znaczną redukcję strat tarcia w grupie tłokowo-cylindrowej. Doprowadziło to także do redukcji zużycia paliwa. Również przez uszlachetnianie oleju smarującego, obszaru współpracy tłoka z gładzią cylindrową, poprzez tworzenie struktur nanorurek może prowadzić do dalszego obniżenia oporów tarcia.*

### WSTĘP

Trwałość silnika spalinowego uzależniona jest od niezmienności wymiarowej i geometrycznej powierzchni współpracujących elementów grupy tłok-cylinder [6]. W zasadzie wszystkie powierzchnie wzajemnie współpracujące są w jakimś stopniu uszlachetniane [1]. Najczęściej uszlachetnianie powierzchni polega na hartowaniu lub nanoszeniu warstwy chromu albo innych materiałów, które charakteryzują się dobrymi właściwościami tarciovymi [2]. Od kilku lat bardzo szybko rozwijają się metody uszlachetniania powierzchni przez nanoszenie warstw nanomateriałów takich jak nanorurki węglowe (CNT) [3,5]. Wykorzystywanie pokryć nanorurkami węglowymi powierzchni nośnej tłoka prowadzi do trzech zasadniczych efektów:

- redukcji tarcia,
- zwiększenia odporności powierzchni na zużycie ściernie,
- redukcji drgań wywołanych cyklicznością pracy tłokowego silnika spalinowego,

jednak efekty te nie muszą występować jednocześnie, lecz mogą się wręcz wzajemnie wykluczać.

Redukcja strat tarcia grupie tłok-cylinder ma także wpływ na zmniejszenie zużycia paliwa. Jedną z metod redukcji strat tarcia jest stosowanie olejów smarujących o zmniejszonej lepkości lub z dodatkami uszlachetniającymi. Takie rozwiązanie ma jednak pewne ograniczenia. Stosowanie olejów o zbyt małej lepkości może spowodować pogorszenie właściwości smarnych, co w efekcie mogłoby doprowadzić do zbyt szybkiego zużywania się współpracujących elementów, a także w skrajnym przypadku do zatarcia silnika.

W artykule przedstawione zostaną wyniki badań oporów strat tarcia dla tłoków pokrytych warstwą nanorurek węglowych na powierzchni nośnej tłoka oraz olejów silnikowych z dodatkami uszlachetniającymi w postaci nanorurek węglowych.

### 1. OPORY TARCIA DLA TŁOKÓW Z NANIESIONĄ WARSTWĄ NANORUREK WĘGLOWYCH

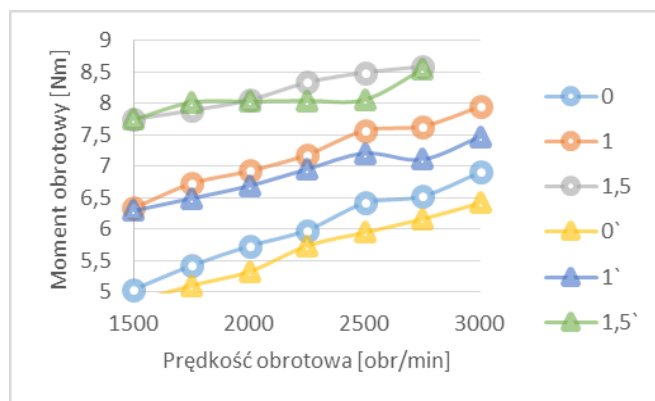
Wyniki przeprowadzonych badań dowodzą, że naniesienie na powierzchnię nośną tłoka warstwy nanorurek węglowych, prowadzi do istotnego zmniejszenia strat tarcia w silniku spalinowym, a więc także redukcji zużycia paliwa. Redukcja strat tarcia następuje niezależnie od temperatury silnika, obciążenia oraz prędkości obrotowej.

Na rysunkach 1-3 zestawione zostały wyniki strat tarcia wyrażone w wartości momentu napędu zewnętrznego silnika spalinowego wyposażonego w tłoki fabryczne oraz w przypadku pokrycia tych tłoków warstwą nanorurek węglowych.

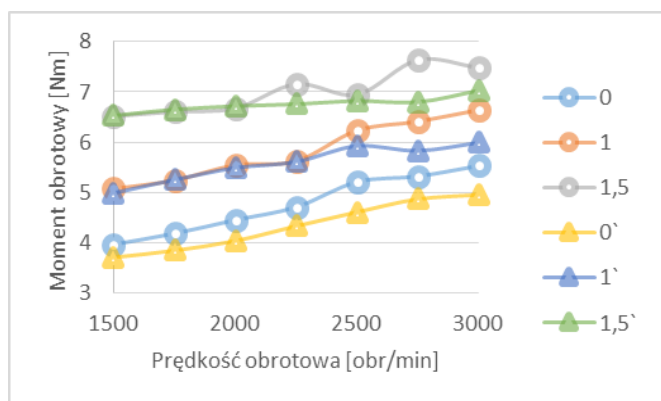
Badania przeprowadzone były w następujących warunkach:

- temperatura oleju silnikowego: 50; 80 i 110 °C,
- średni opór sprężania czynnika roboczego w komorze spalania silnika: 0; 1 i 1,5 bar,
- prędkość obrotowa silnika w zakresie 1500-3000 obr/min.

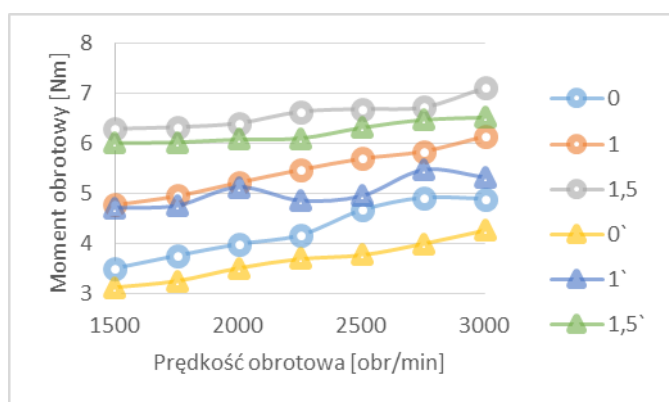
Zmiany procentowe oporów tarcia w wyniku pokrycia powierzchni nośnej tłoków warstwą nanorurek węglowych we wszystkich punktach pomiarowych przedstawione zostały na rysunku 4-6.



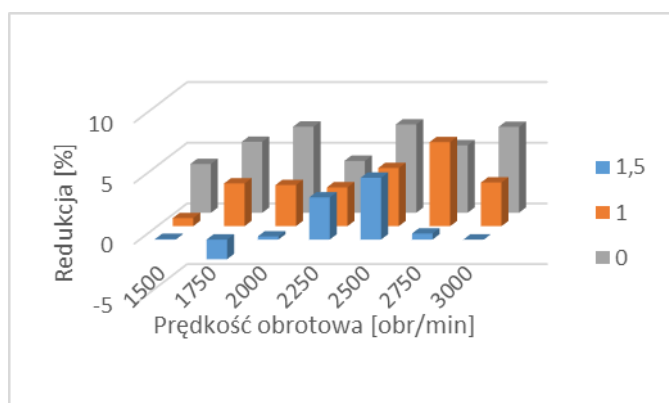
**Rys. 1.** Przebieg momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej silnika dla tłoków fabrycznych (seria 0;1;1,5) oraz tłoków z warstwą nanorurek węglowych na powierzchni nośnej (seria 0'; 1'; 1,5') dla temperatury oleju 50 °C



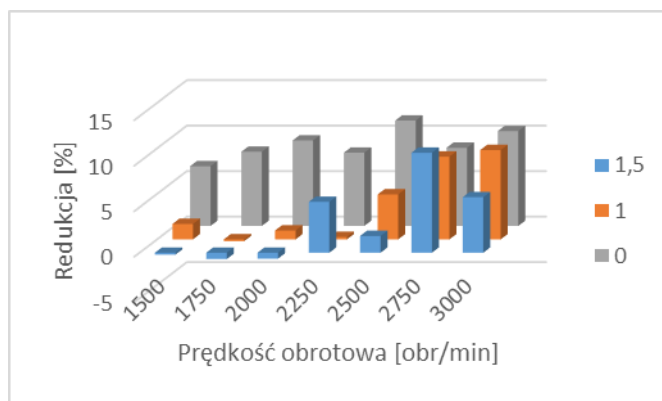
**Rys. 2.** Przebieg momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej silnika dla tłoków fabrycznych (seria 0;1;1,5) oraz tłoków z warstwą nanorurek węglowych na powierzchni nośnej (seria 0'; 1'; 1,5') dla temperatury oleju 80 °C



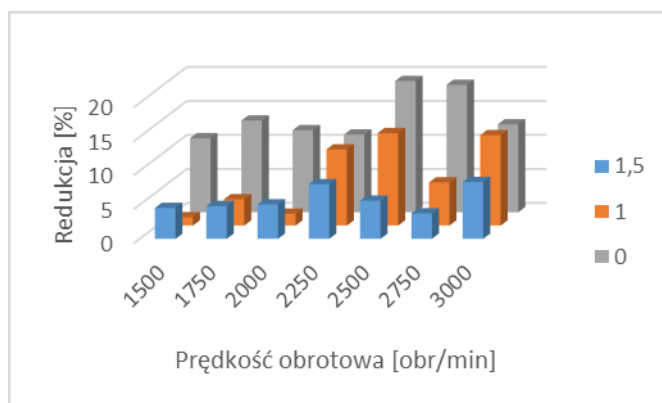
**Rys. 3.** Przebieg momentu obrotowego w funkcji prędkości obrotowej silnika dla tłoków fabrycznych (seria 0;1;1,5) oraz tłoków z warstwą nanorurek węglowych na powierzchni nośnej (seria 0'; 1'; 1,5') dla temperatury oleju 110 °C



**Rys. 4.** Redukcja procentowa strat tarcia w funkcji prędkości obrotowej silnika dla sprężania czynnika roboczego w komorze spalania silnika: 0, 1 i 1,5 bar oraz temperatury oleju 50 °C



**Rys. 5.** Redukcja procentowa strat tarcia w funkcji prędkości obrotowej silnika dla sprężania czynnika roboczego w komorze spalania silnika: 0, 1 i 1,5 bar oraz temperatury oleju 80 °C



**Rys. 6.** Redukcja procentowa strat tarcia w funkcji prędkości obrotowej silnika dla sprężania czynnika roboczego w komorze spalania silnika: 0, 1 i 1,5 bar oraz temperatury oleju 110 °C

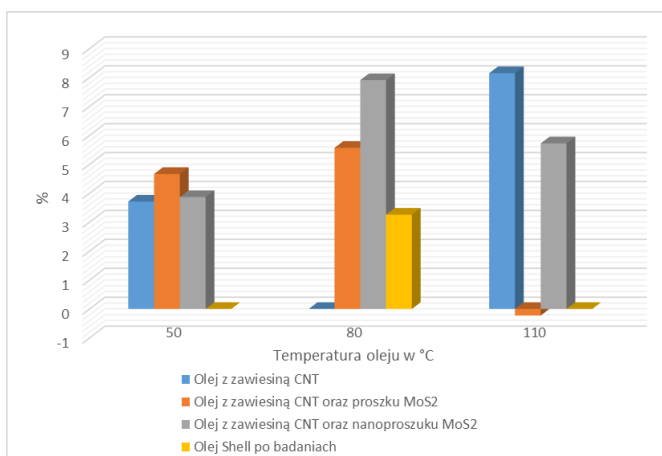
Wykresy na rysunku 4-6 przedstawiają tendencję procentowej zmiany momentu oporowego w wyniku pokrycia powierzchni nośnej tłoków warstwą nanorurek węglowych. Z otrzymanych wyników można zauważyć, że w wyższych prędkościach obrotowych redukcja oporów tarcia jest bardziej intensywna. Jest to ważne spostrzeżenie, gdyż wraz ze wzrostem prędkości obrotowej straty tarcia wewnętrznego w silniku spalinowym również rosną, a więc oszczędności w postaci niezużytego paliwa są bardziej spektakularne.

Analiza redukcji procentowej oporów tarcia wewnętrznego w silniku spalinowym wskazuje większą średnią redukcję oporów tarcia w wyższych temperaturach, czyli przy niższych wartościach lepkości oleju smarującego. Przyjęty w badaniu zakres temperatur, obejmuje temperatury niższe niż temperatura oleju na gładzi cylindrowej, można więc przypuszczać, że opory wewnętrzne w warunkach przeciętnego użytkowania silnika spalinowego ulegną jeszcze bardziej znaczącej redukcji niż wynosi średnia arytmetyczna wartości z powyższych wykresów.

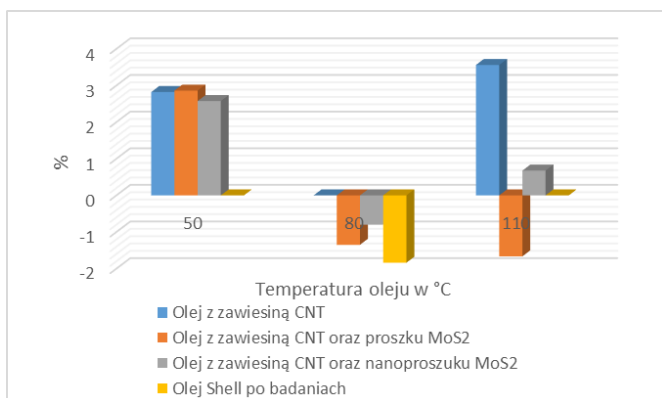
## 2. OPORY TARCIA DLA OLEJU USZLACHTNIANEGO NANORURKAMI WĘGLOWYMI Z DODATKAMI DLA SILNIKA ZI I ZS

Uszlachetnianie obszaru współpracy tłoka z gładzią cylindrową poprzez tworzenie struktur nanorurek z naniesionymi cząsteczkami dwusiarczku molibdenu MoS<sub>2</sub> może prowadzić do dalszego obniżenia oporów tarcia. Przeprowadzone badanie zarówno na silniku o zapłonie iskrowym i samoczynnym wykazały jednak nieoptyczalność stosowania związku MoS<sub>2</sub>, w celu redukcji strat tarcia oraz redukcji zużycia paliwa.

Analiza momentów tarcia wewnętrznych silnika o zapłonie iskrowym wykazuje, że uszlachetnienie środowiska tworzenia filmu olejowego za pomocą tradycyjnych dodatków nie wywołuje oczekiwanej redukcji oporów ruchu silnika. Jak wynika z przeprowadzonego badania, zaobserwować można nieznaczny wzrost oporów tarcia wewnętrznego przy prędkości 2500 obr/min, a jest to prędkość, przy której najczęściej jest eksploatowany silnik spalinowy samochodu osobowego. Jak wynika z wykresu na rysunku 8 można zauważyć, że stosowanie dodatku MoS<sub>2</sub> w różnej konfiguracji z CNT w temperaturze 80 °C, prowadzi każdorazowo do niewielkiego wzrostu tarcia wewnętrznego. W przyjętym zakresie temperatur 50-110 °C uzyskuje się zarówno dodatnie jak i ujemne zmiany oporów tarcia. Można zatem wywnioskować, że zmiany oporów tarcia mieszczą się w granicach błędów. Znacznie bardziej jednak prawdopodobne jest oddziaływanie dodatków zarówno CNT, jak i MoS<sub>2</sub> na strukturę konglomeratu nie poddającym się prawom ruchu cieczy newtonowskiej, dla której jedyną siłą oporu wewnętrznego jest lepkość.



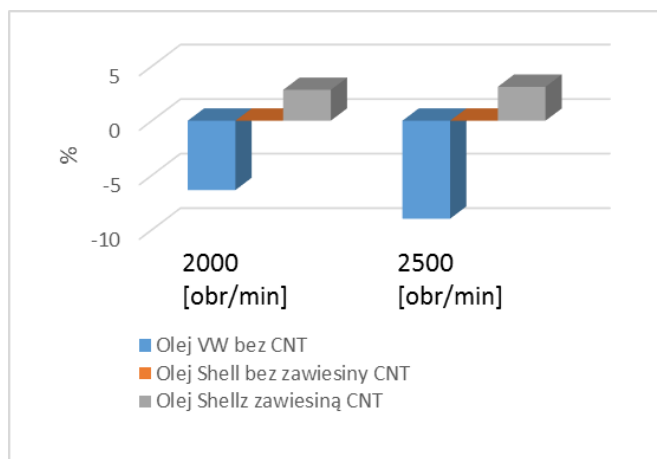
**Rys. 7.** Procentowy moment tarcia wewnętrznego w silniku ZI dla prędkości obrotowej 2000 obr/min



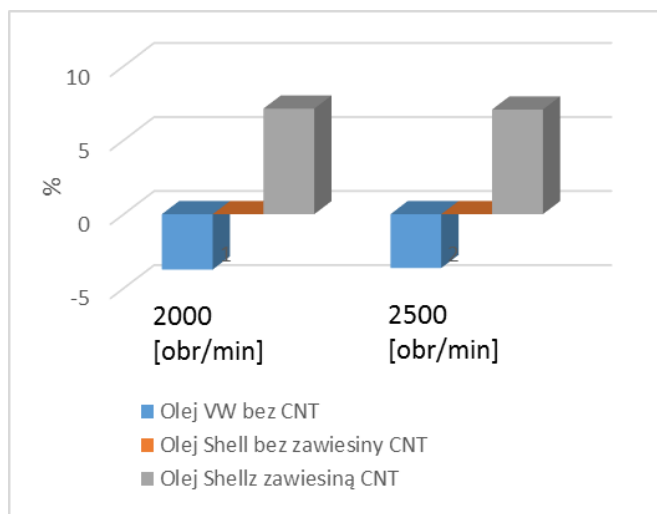
**Rys. 8.** Procentowy moment tarcia wewnętrznego w silniku ZI dla prędkości obrotowej 2500 obr/min

Analiza wyników pomiarów oporów tarcia wykazała, że jedyną skuteczną metodą zmniejszania strat tarcia wewnętrznego jest pokrywanie powierzchni nośnej tłoka warstwą CNT. Wyniki przeprowadzone na silniku o zapłonie iskrowym nie można jednak przenieść na silnik o zapłonie samoczynnym.

Film olejowy w silnikach wysokoprężnych poddawany jest wyższemu temperaturą i obciążeniem. W związku z tym przeprowadzone zostały badania na silniku o zapłonie samoczynnym. Na rysunku 9-10 przedstawione zostały wyniki przeprowadzonych badań. Prędkość obrotowa tych silników wynosi 2000 i 2500 obr/min i taką wartość przyjęto w badaniach.



**Rys. 9.** Procentowy moment tarcia wewnętrznego w silniku ZS dla prędkości obrotowej 2000 i 2500 obr/min (seria pomiarowa A)



**Rys. 10.** Procentowy moment tarcia wewnętrznego w silniku ZS dla prędkości obrotowej 2000 i 2500 obr/min (seria pomiarowa B)

Ze względu na niejednoznaczne oddziaływanie dodatków do oleju smarującego na opory ruchu wielokrotnie pomiary dla niezmiennych warunków eksploatacyjnych. Dokonano analizy wyników uzyskanych w odstępie czasowym, kilku dni i poprzez wybieranie punktów pomiarowych z jednego cyklu badawczego. Badania przeprowadzono dla ustalonej temperatury silnika równej 90 °C. Aby zapewnić niezmienność temperatury fabryczny obieg czynnika chłodzącego zmodyfikowano poprzez zastosowanie oddzielnego układu chłodzenia, pozwalającego kontrolować zarówno temperaturę czynnika chłodzącego w wybranych punktach, jak również i temperaturę oleju.

## PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonych badań można zauważyć, że procentowe zmiany oporów wewnętrznych są zarówno dodatnie, jak i ujemne, dowodzi to niejednoznaczność oddziaływania dodatków CNT na zmianę oporów ruchu wewnętrznego. Podsumowując, należy stwierdzić, że dodatki CNT do oleju według dotychczas opracowanych kryteriów nie jest zasadna. Jednak trzeba stwierdzić, że uszlachetnianie olejów smarujących poprzez tworzenie zawiesin CNT w nie wyczerpuje możliwości uzyskiwania oleju smarującego o modyfikowanych właściwościach. Nanorurki w środowisku oleju smarującego tworzą struktury całkowicie zmieniające właściwości oleju, przy czym procesy tworzenia zawiesin są diametralnie różne

w stosunku do dotychczasowych metod uzyskiwania zmian ich właściwości.

### BIBLIOGRAFIA

1. Deuss T., Ehnis H., Rose R., Künzel R., Reibleistungsmessungen am Befeueren Dieselmotor-Einfluss von Kolbenschaftbeschichtungen, MTZ 4/2011.
2. Fahr M., Hanke W., Klimesch Ch., Rehl A., Reibungsreduzierung bei Kolbensystemen im Ottomotor, MTZ 07-08.
3. Iskra A., Babiak M., Kałużny J., Giersig M., Kempa K., Comparing the resistance to motion of piston coated with a layer of nanotubes with standard piston. Journal of KONES 2012, Paper ID: 095. European Science Society of Powertrain and Transport, Warsaw 2012, s. 225-233.
4. Kałużny J., Eksperymentalne zastosowanie nanorurek węglowych w konstrukcji tłokowego silnika spalinowego, WPP, seria Rozprawy, nr 503, Poznań 2013.
5. Kim Y., Kim S. J., Lee J., Lim D., Nanodiamantverstärkte PTFE-Verbundstoffbeschichtungen, MTZ, 02/2015.
6. Zima S., Kurbeltriebe, Vieweg Verlag, Braunschweig-Wiesbaden, 1999.

### Carbon nanotubes as ennobling substance leading to the improvement of the tribological movements piston-cylinder of internal combustion engine

*This article presents the results of motion resistance measurements of an engine equipped with pistons coated with carbon nanotubes and using carbon nanotube additions to the engine's oil as the active additive. Covering the side surface of the piston with carbon nanotubes results in significant reduction in friction loss of the piston-cylinder system, and reduction in fuel consumption. Supplementing the lubricating oil working in the piston-cylinder liner area with nanotubes could also result in a further reduction of frictional resistance. Nanotubes in the lubricating oil can create structures able to significantly change oil properties, however, suspension creation processes are radically different.*

Autorzy:

**prof. dr hab. inż. Antoni Iskra** – Instytut Silników Spalinowych i Transportu, Politechnika Poznańska, antoni.iskra@put.poznan.pl

**dr inż. Maciej Babiak** – Instytut Silników Spalinowych i Transportu, Politechnika Poznańska, maciej.babiak@put.poznan.pl

**mgr inż. Emil Wróblewski** – Instytut Silników Spalinowych i Transportu, Politechnika Poznańska, emil.z.wroblewski@doctorate.put.poznan.pl