



VII Young Scientists Academy

POLISH SCIENTIFIC SOCIETY OF COMBUSTION ENGINES

13th – 15th November 2023 Zamek Czocha, POLAND



OCENA EFEKTÓW ZASTOSOWANIA POWŁOK DLC TI-C:H UZYSKANYCH ZA POMOCĄ TECHNIK PVD W PARACH KINEMATYCZNYCH SILNIKÓW SPALINOWYCH I ZESPOŁÓW UKŁADU PRZENIESIENIA NAPĘDU

dr inż. Dawid Murzyński
Katedra Inżynierii Transportu
Wydział Mechaniczny
Politechnika Koszalińska

E-mail:
dawid.murzynski@tu.koszalin.pl



VII Young Scientists Academy

POLISH SCIENTIFIC SOCIETY OF COMBUSTION ENGINES

13th – 15th November 2023 Zamek Czocha, POLAND



1. Wprowadzenie,
2. Technologie osadzania powłok,
3. Powłoki DLC,
4. Przygotowanie próbek do badań i wytwarzanie powłok,
5. Badania wstępne uzyskanych powłok,
6. Badania morfologii powierzchni, analiza składu,
7. Analiza chropowatości powierzchni,
8. Mikrotwardość,
9. Badania tribologiczne,
10. Analiza wyników,
11. Wnioski.

Wprowadzenie

Wartości emisji spalin dla samochodów osobowych z silnikiem z zapłonem iskrowym

| Norma | Homologacja nowych modeli | Pierwsza rejestracja na terenie UE | Tlenek węgla CO (g/km) | Węglowodory HC (g/km) | Tlenki azotu NOx (g/km) | Węglowodory + tlenki azotu HC+NOx (g/km) |
|--------------|---------------------------|------------------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|--|
| Euro 1 | 1.07.1992 | 1.01.1993 | 2,72 (3,16) | - | - | 0,97 (1,13) |
| Euro 2 | 1.01.1996 | 1.01.1997 | 2,2 | - | - | 0,5 |
| Euro 3 | 1.01.2000 | 1.01.2001 | 2,3 | 0,2 | 0,15 | - |
| Euro 4 | 1.01.2005 | 1.01.2006 | 1,0 | 0,1 | 0,08 | - |
| Euro 5 | 1.09.2009 | 1.01.2011 | 1,0 | 0,1 | 0,06 | - |
| Euro 6 | 1.09.2014 | 1.09.2015 | 1,0 | 0,1 | 0,06 | - |
| Euro 6c | 1.09.2017 | 1.09.2018 | 1,0 | 0,1 | 0,06 | - |
| Euro 6d TEMP | 1.09.2017 | 1.09.2019 | 1,0 | 0,1 | 0,06 | - |
| Euro 6d | 1.01.2020 | 1.09.2021 | 1,0 | 0,1 | 0,06 | - |

Wartości emisji spalin dla samochodów osobowych z silnikiem z zapłonem samoczynnym

| Norma | Homologacja nowych modeli | Pierwsza rejestracja na terenie UE | Tlenek węgla CO (g/km) | Węglowodory HC (g/km) | Tlenki azotu NOx (g/km) | Węglowodory + tlenki azotu HC+NOx (g/km) |
|--------------|---------------------------|------------------------------------|------------------------|-----------------------|-------------------------|--|
| Euro 1 | 1.07.1992 | 1.01.1993 | 2,72 (3,16) | - | - | 0,97 (1,13) |
| Euro 2 | 1.01.1996 | 1.01.1997 | 1,0 | - | - | 0,7 |
| Euro 3 | 1.01.2000 | 1.01.2001 | 0,66 | - | 0,5 | 0,56 |
| Euro 4 | 1.01.2005 | 1.01.2006 | 0,5 | - | 0,25 | 0,3 |
| Euro 5 | 1.09.2009 | 1.01.2011 | 0,5 | - | 0,18 | 0,23 |
| Euro 6 | 1.09.2014 | 1.09.2015 | 0,5 | - | 0,08 | 0,17 |
| Euro 6c | 1.09.2017 | 1.09.2018 | 0,5 | - | 0,08 | 0,17 |
| Euro 6d TEMP | 1.09.2017 | 1.09.2019 | 0,5 | - | 0,08 | 0,17 |
| Euro 6d | 1.01.2020 | 1.09.2021 | 0,5 | - | 0,08 | 0,17 |

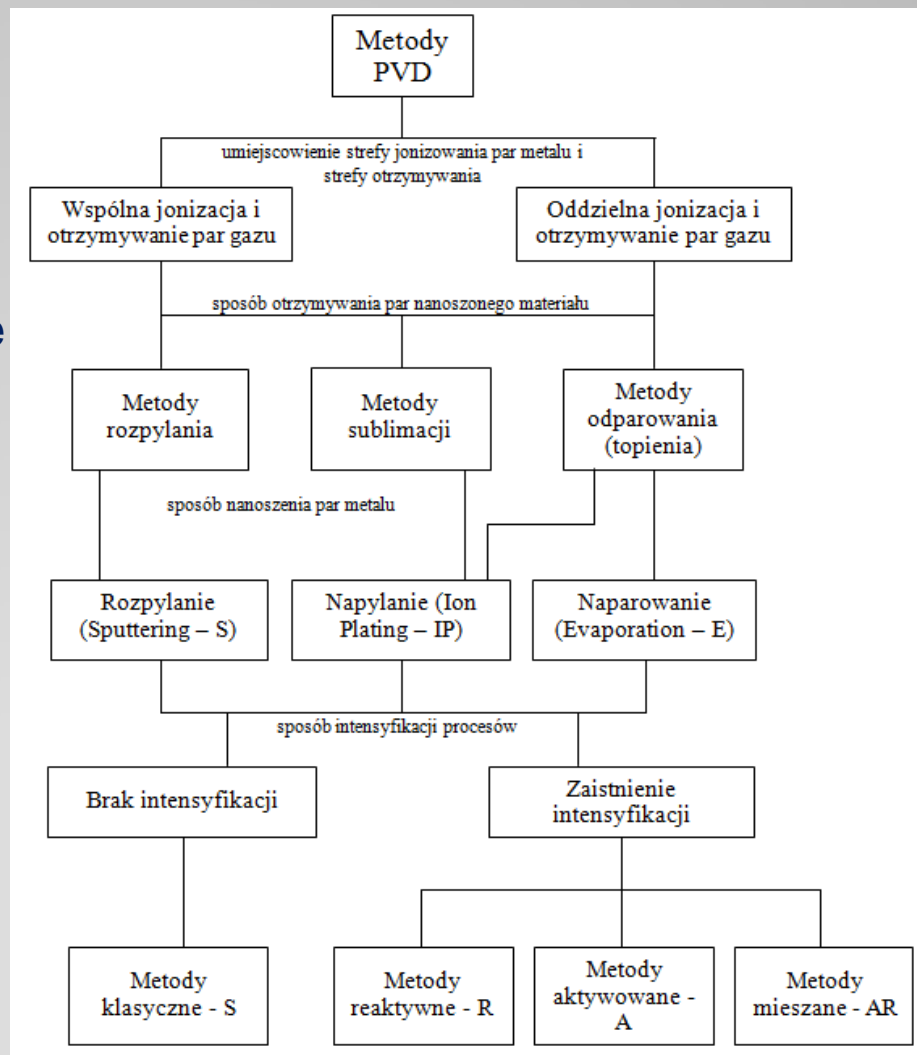
Technologie osadzania powłok.

PVD (ang. Physical Vapour

Deposition) - fizyczne osadzanie z fazy gazowej,

CVD (ang. Chemical Vapour

Deposition) - chemiczne osadzanie z fazy gazowej





VII Young Scientists Academy

POLISH SCIENTIFIC SOCIETY OF COMBUSTION ENGINES

13th – 15th November 2023 Zamek Czocha, POLAND



Technologie osadzania powłok.

Zalety technologii PVD:

- możliwość osadzania metali, stopów, związków trudno topliwych lub międzymetalicznych,
- możliwość sterowania mikrostrukturą i wytwarzania nowych modyfikacji krystalicznych (np. powłoki o budowie amorficznej);
- Wysoka czystość osadzanych warstw,
- dobra adhezja warstw do podłoża

Ograniczenia metod PVD to:

- niewielka szybkość wzrostu powłoki,
- wysoki koszt urządzeń produkcyjnych, i konieczność zachowania dużej czystości i dokładnego przestrzegania reżimu technologicznego.

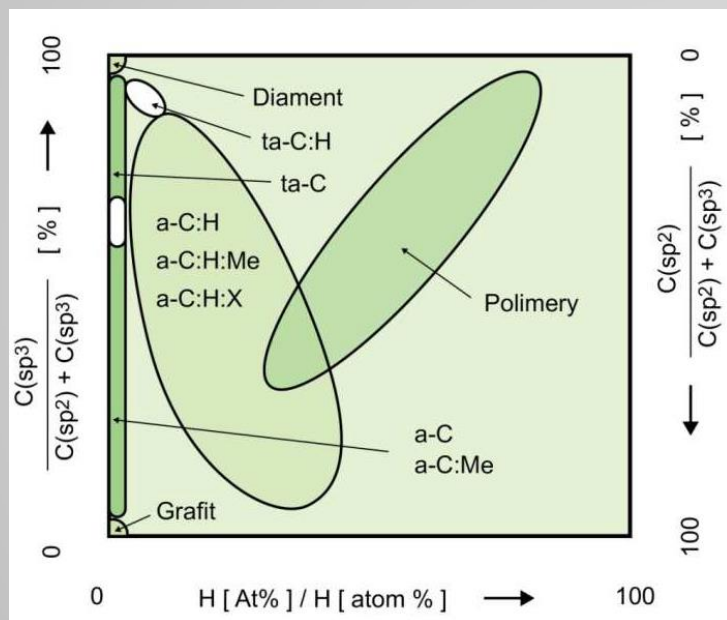
Powłoki DLC

Powłoki DLC można klasyfikować pod względem zawartości wiązań sp^3 oraz wodoru jako:

- ta-C (tetraedyczny amorficzny węgiel) – maksymalna zawartość wiązań sp^3 , brak obecności wodoru, charakteryzuje się stabilną i gładką formą, jest najtwardsza spośród powłok;
- ta-C:H – posiada około 70% wiązań sp^3 , zawartość wodoru 25–35%
- a-C – posiada do 30% wiązań sp^3 , brak obecności wodoru;
- a-C:H – posiada 20–40% wodoru.

Powłoki DLC

Oprócz tego powłoki a-C można poddawać modyfikacji metalami (powłoki a-C:Me), a powłoki a-C:H zarówno metalami (powłoki a-C:H:Me modyfikowane Ti, Nb, W, V, Cr, Co, Mo), jak i niemetalami (powłoki a-C:H:X modyfikowane Si, F, H, N, O, B, P).



Typy węgla amorficznego w zależności od zawartości wodoru oraz wiązań sp³ i sp² [German VDI 2840 Standards Report, 2006]

Przygotowanie próbek i wytwarzanie powłok.

Parametry procesu napyłania:

Próżnia wstępna: 0,002 [Pa]

Wyrzewanie wstępne: 150°C przez 30 min.

Próżnia robocza: 0,3 [Pa], przepływ argonu: 50 SCCM

Czyszczenie jonowe:

Napięcie polaryzacji podłoża: -600 [V]

Prąd łuku: 85 [A]

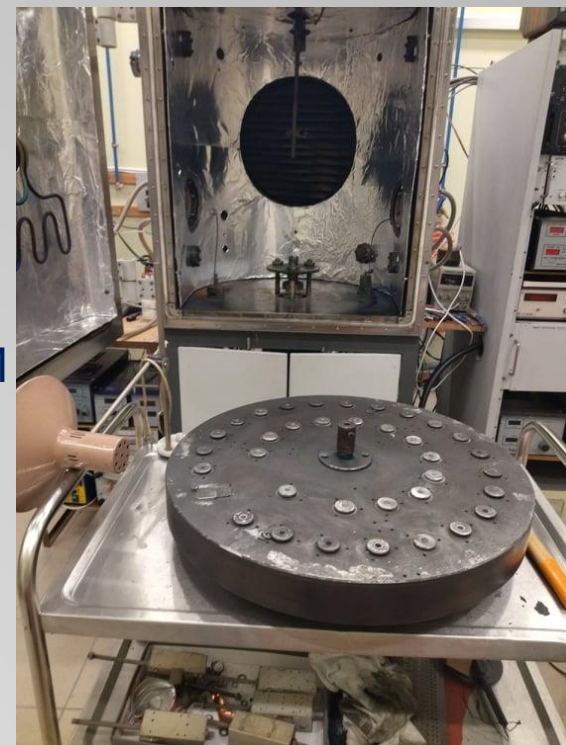
Nanoszenie powłoki:

Napięcie polaryzacji podłoża: -90 [V]

Moc rozpylania na tarczcie tytanowej: 1500 [W]

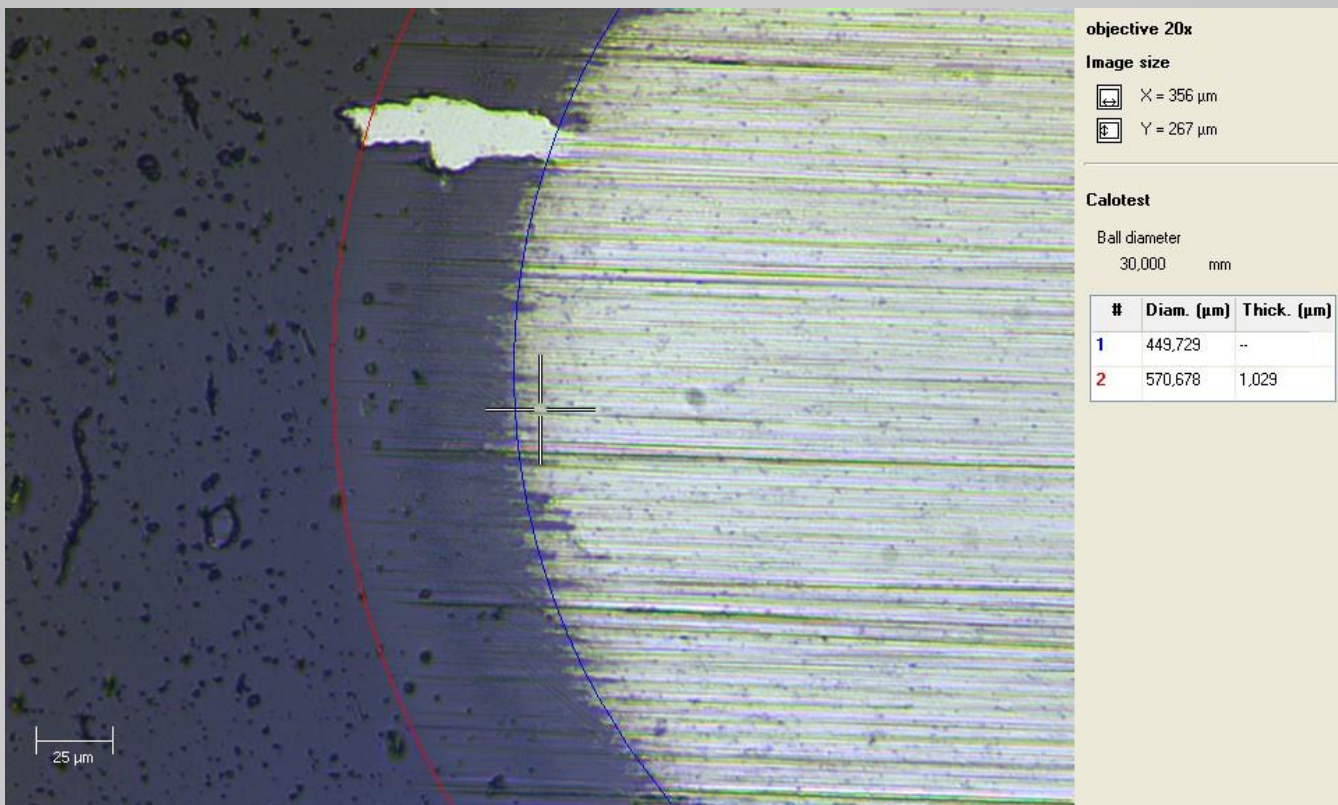
Przepływ acetylenu: 17 SCCM

Czas trwania procesu: 75 min.



Badania wstępne uzyskanych powłok.

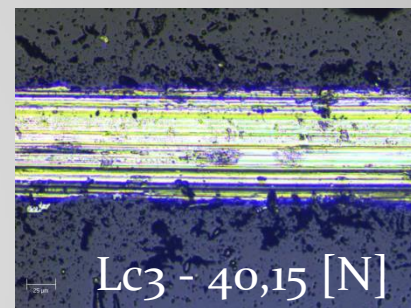
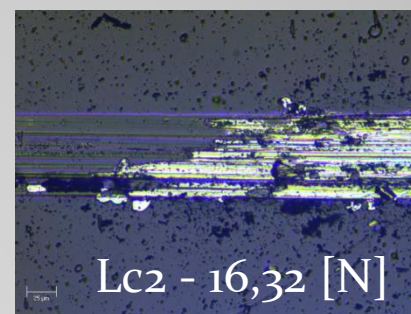
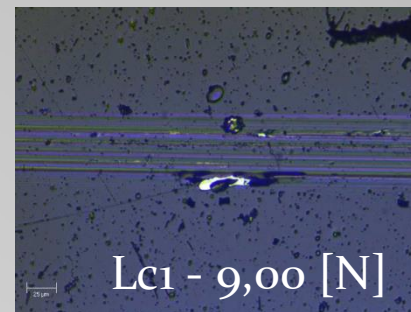
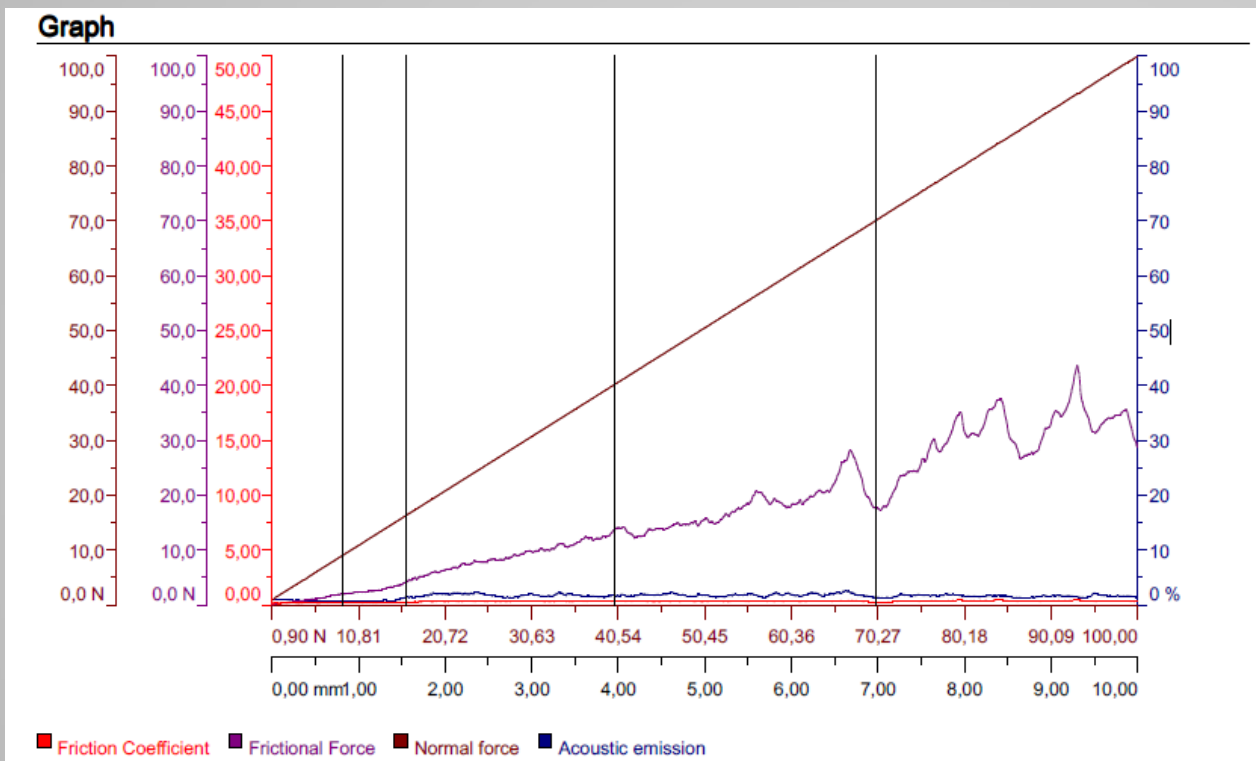
Calotest, czyli metoda szlifowania sferycznego wg normy PN-EN 1071-2:2004



Grubość powłoki $1,035 \pm 0,021$ [μm]

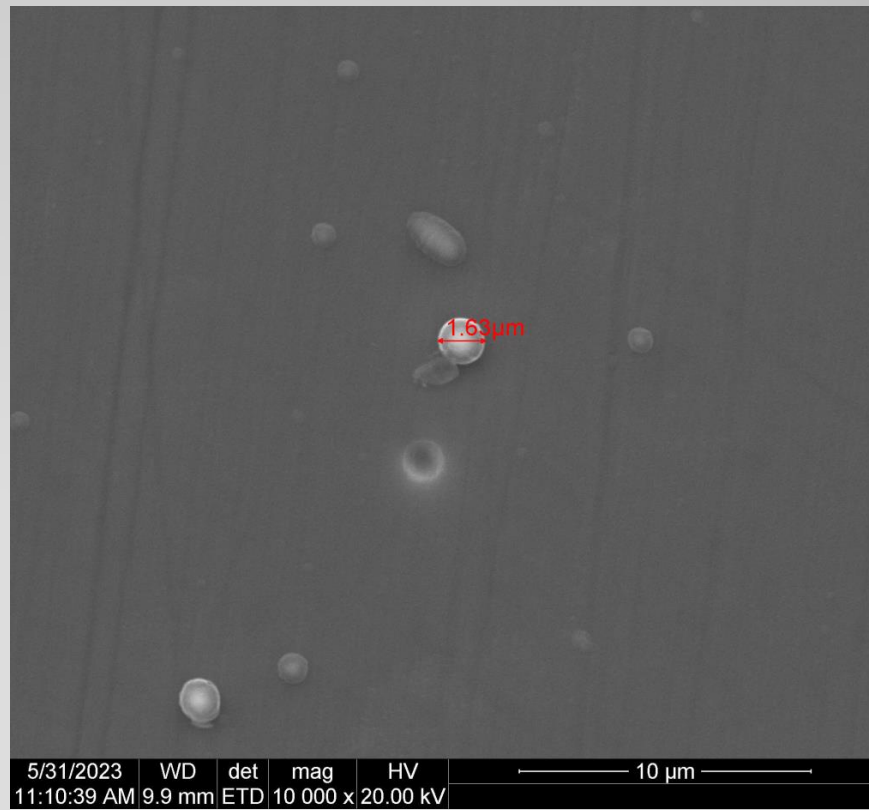
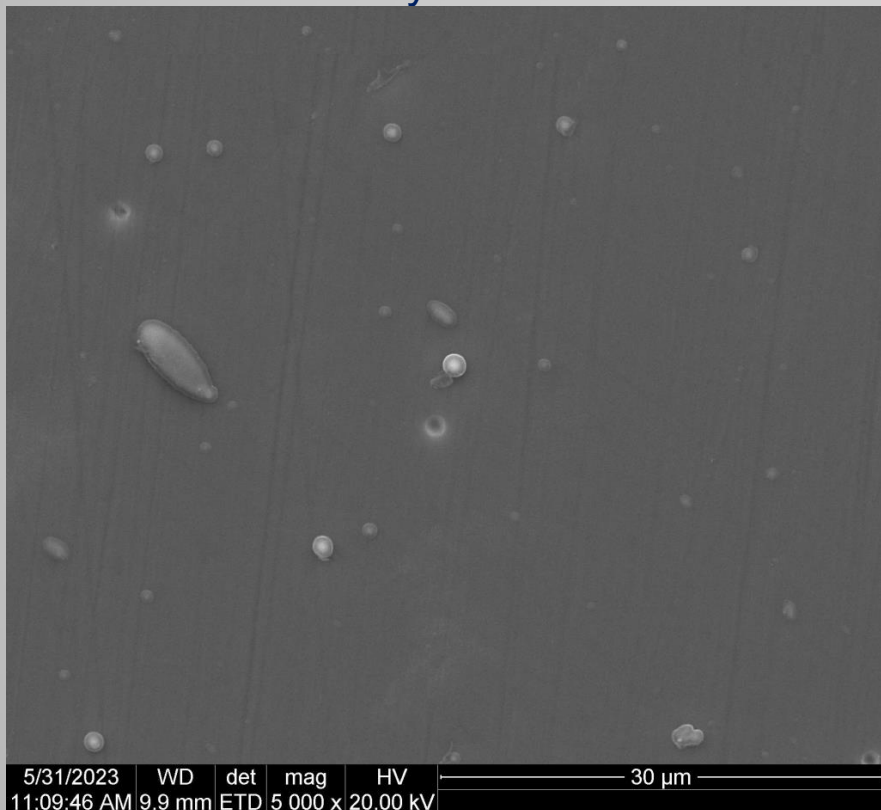
Badania wstępne uzyskanych powłok.

Revetest Scratch Tester, badanie adhezji metodą rysy



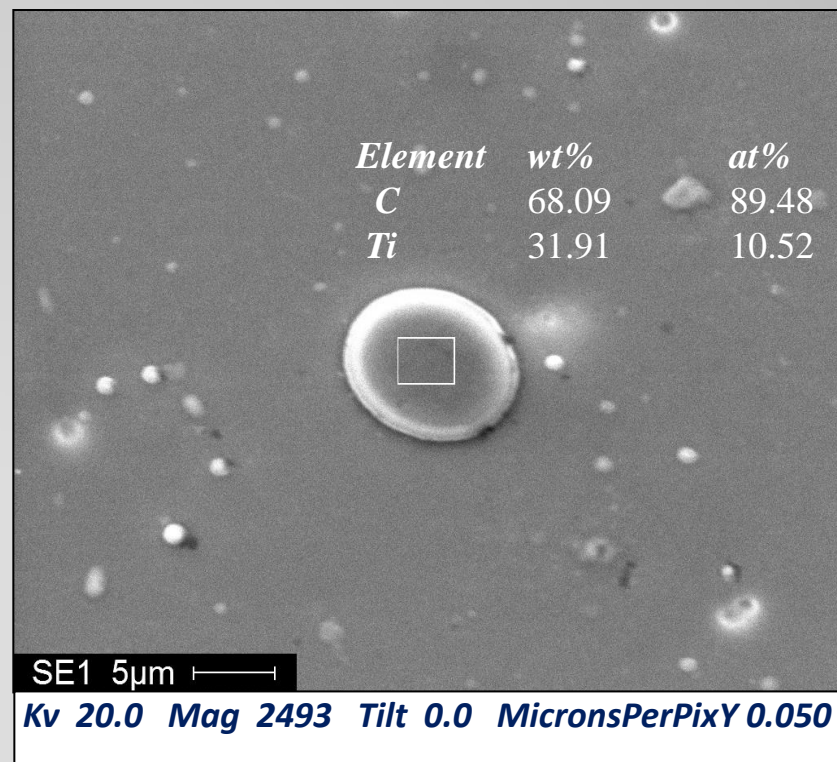
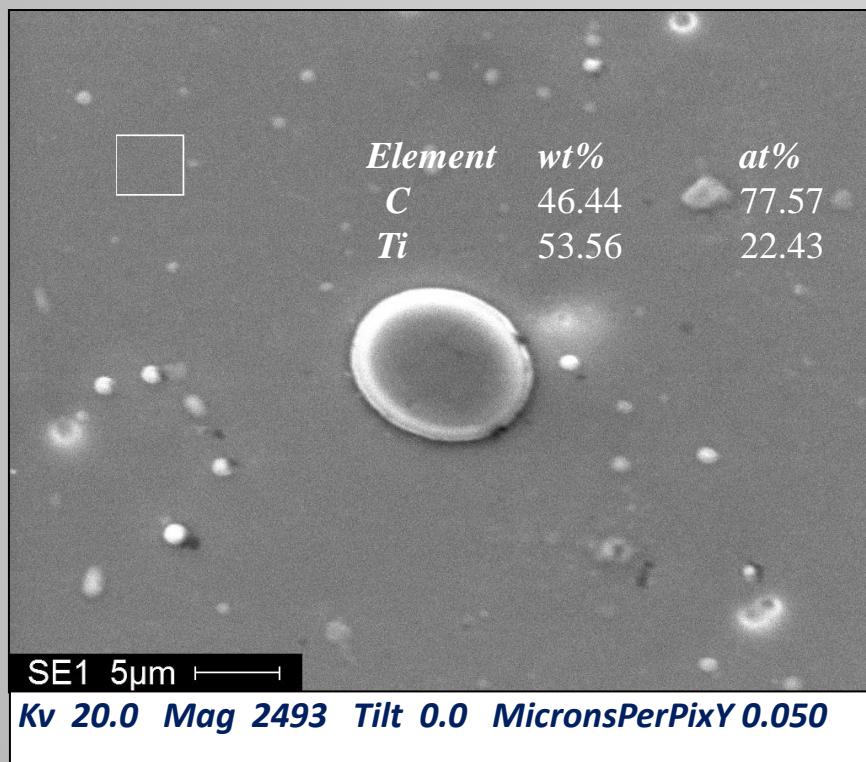
Badania morfologii powierzchni i analiza składu.

Skaningowy mikroskop elektronowy FEI Quanta 200 Mark II z analizatorem chemicznym EDS EDAX Genesis XM 2i



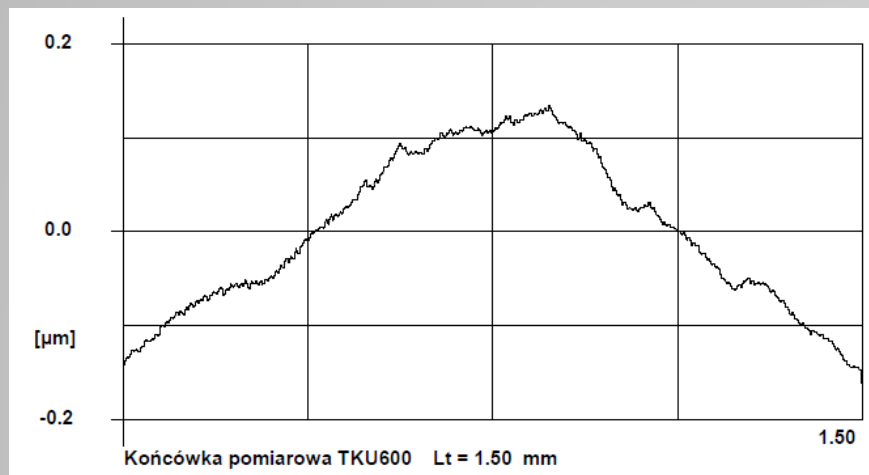
Badania morfologii powierzchni i analiza składu.

Skaningowy mikroskop elektronowy FEI Quanta 200 Mark II z analizatorem chemicznym EDS EDAX Genesis XM 2i



Analiza chropowości powierzchni.

Profilograf Hommel Werke T8000



Próbki przed procesem napylania

Ra 0,0053 ± 0,00057 [µm]

Rz 0,029 ± 0,0065 [µm]

R max 0,048 ± 0,029 [µm]

Próbki po procesie nanoszenia powłoki DLC

Ra 0,0063 ± 0,00057 [µm]

Rz 0,07 ± 0,011 [µm]

R max 0,085 ± 0,017 [µm]

Badania mikrotwardości.

Fischerscope HM 2000 - pomiar twardości wg normy ISO 14577

| HV 0,01 [zgiębnienie 0,25 μm] |
|----------------------------------|
| 783 |
| 762 |
| 707 |
| 794 |
| 812 |
| 785 |
| 755 |
| 704 |
| 783 |
| 883 |
| 777 |



Twardość Powłoki DLC Ti-C:H – $776,82 \pm 48,81$ HV

Twardość podłoża ze stali 100Cr6 – $57,93 \pm 0,6$ HRC (~650 HV)

Badania tribologiczne.

Urządzenie T-01M ze skojarzeniem trzpień-tarcza (lub kula-tarcza) do badań tribologicznych wg norm ASTM G 99 oraz DIN 50324

Parametry testu:

Obciążenie: 20 [N]

Prędkość : 0,2 [m/s]

Droga: 1000 [m]

Promień wytarcia: 0,01 ÷ 0,013 [m]

Liczba obrotów: 12243 ÷ 15915

Czas trwania badania: 5000 [s]

Skojarzenie: kula – tarcza

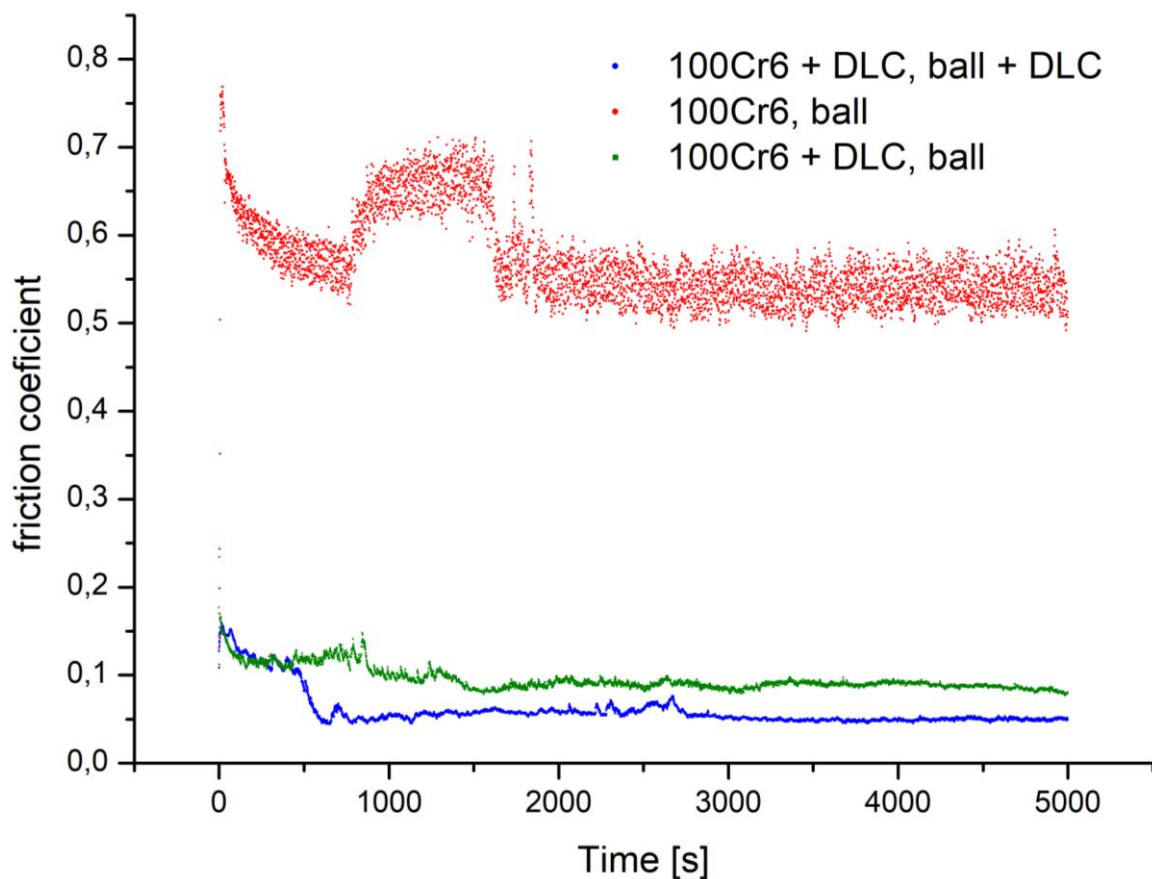
Średnica kuli: 0,01 [m]

Temperatura otoczenia

Tarcie suche



Badania tribologiczne.



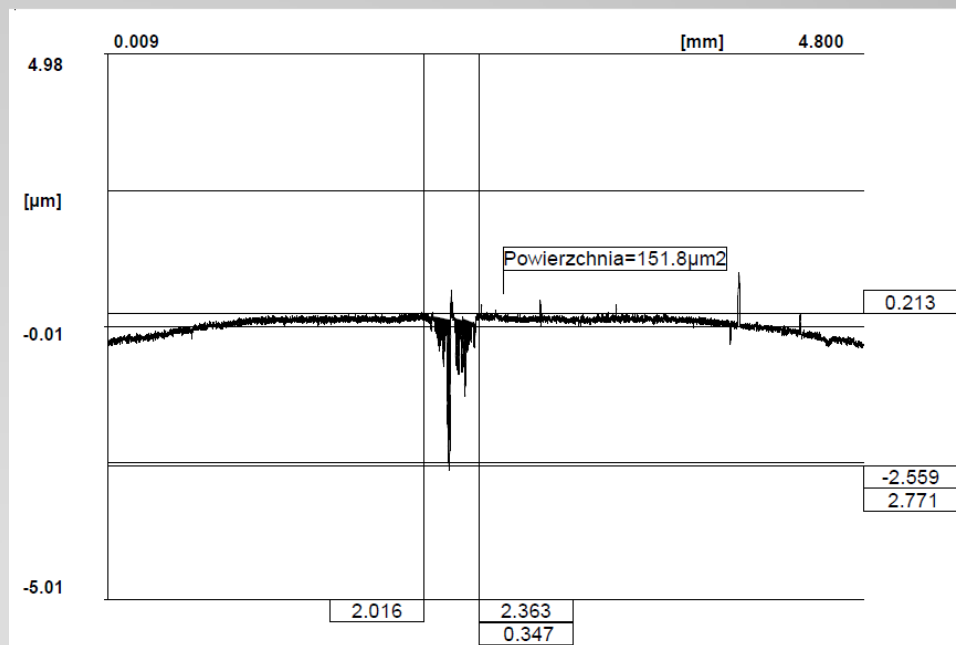
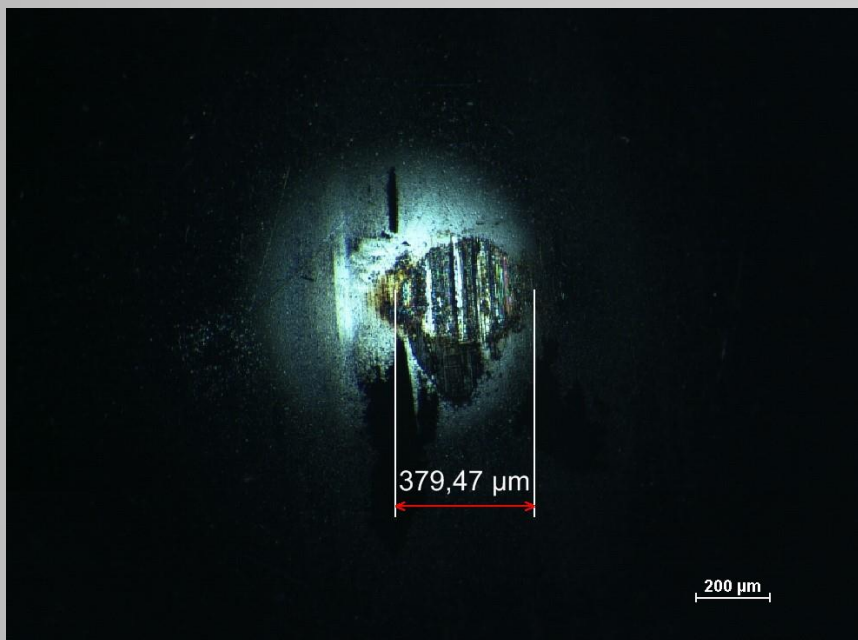
Współczynnik tarcia rejestrowany
po 3000 [s]

100Cr6 +DLC, ball + DLC **0,049 ± 0,0014**

100Cr6 +DLC, ball **0,088 ± 0,0035**

100Cr6, ball **0,540 ± 0,0196**

Badania tribologiczne.



100Cr6 + DLC, ball + DLC

$45,6 \pm 15,4 \text{ } [\mu\text{m}^2]$

100Cr6 + DLC, ball

$139,76 \pm 13,7 \text{ } [\mu\text{m}^2]$

100Cr6, ball

$2641,8 \pm 265,9 \text{ } [\mu\text{m}^2]$

Badania tribologiczne.

Współczynniki zużycia próbki i przeciwpróbki (kulki)

| Próbka | k_{vc} [mm ³ /N·m] | k_{vb} [mm ³ /N·m] |
|--------------------------|---|--|
| 100Cr6 + DLC, ball + DLC | $1,86 \cdot 10^{-7} \pm 6,29 \cdot 10^{-8}$ | $3,03 \cdot 10^{-11} \pm 7,3 \cdot 10^{-12}$ |
| 100Cr6 + DLC, ball | $5,26 \cdot 10^{-7} \pm 5,16 \cdot 10^{-8}$ | $8,25 \cdot 10^{-9} \pm 2,7 \cdot 10^{-9}$ |
| 100Cr6, ball | $1,08 \cdot 10^{-5} \pm 1,09 \cdot 10^{-6}$ | $1,11 \cdot 10^{-5} \pm 1,1 \cdot 10^{-7}$ |

Wnioski:

1. Grubość uzyskanych powłok Ti-C:H metodą reaktywnego rozpylania magnetronowego na podłożu ze stali łożyskowej 100Cr6 to $1,035 \pm 0,021$ [μm],
2. Przeprowadzone badania adhezji wykazały, że całkowita wartość siły przy której oderwano powłokę od podłoża to 40,15 [N],
3. Badania morfologii powierzchni wykonane na skaningowym mikroskopie elektronowym wykazały, że powłoki naniesione na podłożę stalowe nie wykazują żadnych defektów (rys, delaminacji, nieciągłości), jedynie co zaobserwowano to występowanie mikrokropel o wielkości do 2 [μm],

Wnioski:

4. Badania chropowatości przeprowadzone na próbkach ze stali 100Cr6 oraz próbkach ze stali 100Cr6 z naniesionymi powłokami Ti-C:H wykazały pogorszenie parametrów chropowatości, co najprawdopodobniej jest spowodowane występowaniem zdefektowań powierzchni w postaci mikrokropel,
5. Naniesiona powłoka Ti-C:H wykazuje większą twardość (776,82 HV) niż podłoże ze stali 100Cr6 (650 HV),
6. Badanie tribologiczne wykazało, że powłoki naniesione zarówno na próbkę, jak i przeciwpróbkę zmniejszają współczynnik tarcia jedenastokrotnie w stosunku do próbek bez powłok w warunkach tarcia suchego (0,049 vs 0,540),

Wnioski:

7. Analiza współczynników zużycia (k_{vc} , k_{vb}) próbki i przeciwpróbki wykazała, że powłoki DLC Ti-C:H zmniejszają zużycie o 58 razy w stosunku do próbek bez powłoki (k_{vc}), zaś w przypadku przeciwpróbki (kulka stalowa) współczynnik zużycia jest mniejszy o kilka rzędów wielkości.
8. Badania tribologiczne wykonane na próbce wykonanej ze stali 100Cr6 z powłoką Ti-C:H i przeciwpróbce (kulka) ze stali 100Cr6, wykazują 6 krotnie mniejszy współczynnik tarcia niż w badaniu na próbkach bez powłok, i 2 krotnie większy niż w przypadku próby dla próbek i przeciwpróbek z powłokami DLC.



VII Young Scientists Academy

POLISH SCIENTIFIC SOCIETY OF COMBUSTION ENGINES

13th – 15th November 2023 Zamek Czocha, POLAND



Wnioski:

9. Na podstawie przeprowadzonych badań można wnioskować, że zastosowanie powłok Ti-C:H w parach kinematycznych stosowanych w silnikach spalinowych i układach napędowych może pozwolić na zmniejszenie tarcia, a więc na zmniejszenie strat, co jest istotne w dobie poszukiwania rozwiązań zmniejszających emisje szkodliwych związków do atmosfery, jak również zmniejszenie zużycia paliwa.

The logo for PTNSS (Polish Scientific Society of Combustion Engines) features the letters 'PTNSS' in a bold, blue, outlined font. Above the letters is a stylized grey silhouette of a combustion engine cylinder with a piston and a spark plug.

VII Young Scientists Academy

POLISH SCIENTIFIC SOCIETY OF COMBUSTION ENGINES

13th – 15th November 2023 Zamek Czocho, POLAND



Dziękuję Państwu za uwagę.