

Zbigniew PAWELSKI, Marek WOŹNIAK, Sergiusz ZAKRZEWSKI, Piotr JÓŹWIAK,  
Gustavo OZUNA, Pablo DE LA FUENTE

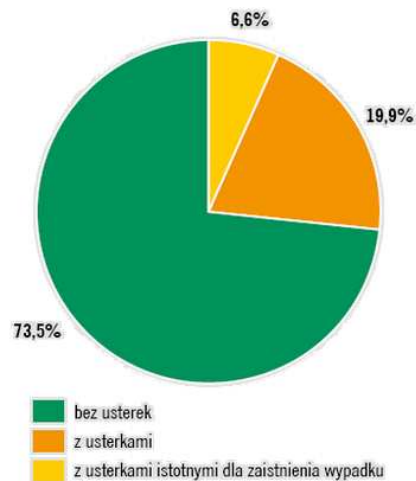
## **BADANIA STANOWISKOWE PRZEGUBÓW KULISTYCH Z WYKORZYSTANIEM MIKROSKOPU SKANINGOWEGO**

### *Streszczenie*

*Celem artykułu jest przedstawienie stanowiska wyposażonego w skaningowy mikroskop wyposażony w dwie głowice skanujące, STM i AFM. Mikroskop pozwala na obrazowanie powierzchni roboczych w skali nano. Dodatkowo pozwala on na określenie stopnia zużycia warstwy wierzchniej oraz wykreślenie ich profili. Badaniom poddane zostały przeguby kulowe zawieszania pojazdów osobowych. Stopień zużycia został określony na podstawie uprzedniego zbadania stanu powierzchni nowego sworznia a następnie wykonaniu serii pomiarów dla wyeksploatowanych elementów.*

### **1. WSTĘP**

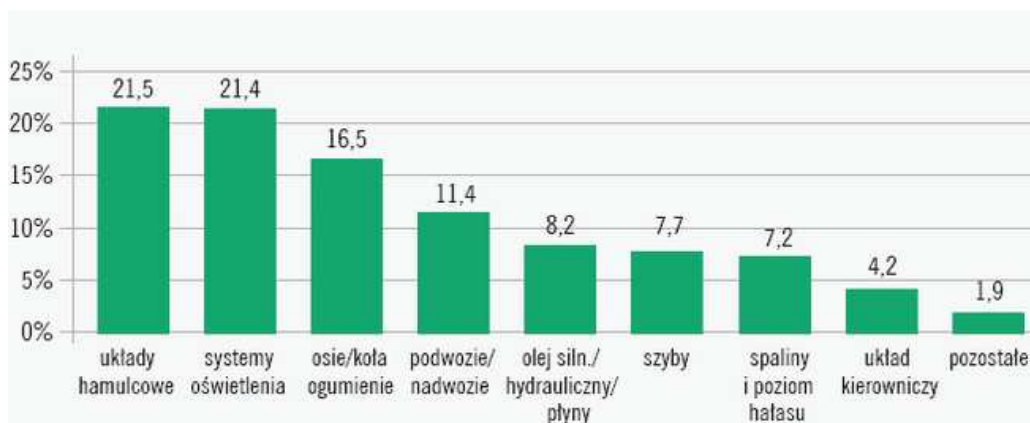
Co roku w wypadkach samochodowych giną setki a nawet tysiące osób. Jak pokazują statystyki jedną z przyczyn wypadku jest nieodpowiedni stan techniczny pojazdu. W raporcie Dyrektora Departamentu Analiz i Nadzoru MSWiA w roku 2007 zarejestrowano 114 wypadków spowodowanych przez wadliwe pojazdy, w których śmierć poniosło 21 osób a 114 zostało rannych. W roku 2008 zarejestrowano 143 wypadki spowodowane przez niesprawne samochody, w których śmierć poniosło 13 osób a 185 zostało rannych, natomiast w roku 2009 śmierć poniosły 2 osoby w 71 wypadkach (są to tylko dane dla miesiący od stycznia do sierpnia).



**Rys.1.** Stan samochodów uczestniczących w wypadkach [1]

Według badań przeprowadzonych przez grupę DEKRA prawie 27% samochodów uczestniczących w kolizjach posiadało usterki (rysunek 1). Warto wspomnieć, że badania te przeprowadzono w Niemczech, gdzie średni wiek samochodów jest zdecydowanie niższy od notowanego w Polsce, stacje kontroli pojazdów działają bardziej rygorystycznie i znacznie mniej jest wypadków drogowych w stosunku do liczby zarejestrowanych pojazdów.[1]

Jedną z grup usterek pokazanych na powyższym diagramie są uszkodzenia zawieszenia (11,4%), które biorą się głównie od stanu dróg po których poruszają się pojazdy (rysunek 2).



Rys.2. Rodzaj stwierdzonych usterek [1]

Jednym z ważniejszych elementów przedniego zawieszenia każdego pojazdu są przeguby kuliste potocznie nazywane sworzniami wahaczy. Sworzniem kulistym wahacza nazywamy złącze ruchowe (para kinematyczna) umożliwiająca ruch obrotowy oscylacyjny jednego z elementów łączonych względem drugiego. Przez sworzień przechodzi oś, wokół której odbywa się obrót koła, w chwili skrętu pojazdu przez kierowcę. Dodatkowo umożliwia wychylenie kątowe oraz przenosi siły poprzeczne oraz wzdłużne (wzdłuż osi sworznia). Ponieważ w czasie pracy przeguby kuliste wykonują ruch obrotowo-wahający, są one smarowane smarem stałym przez smarowniczkę, bądź smarem grafitowym jeżeli konstrukcja sworznia nie zawiera smarownicy, tzn. gdy przegub kulisty jest zagniatany maszynowo w obudowie. Budowę sworznia oraz opis jego najważniejszych elementów składowych przedstawia poniższy rysunek (rysunek 3).



Rys.3. Budowa oraz opis wybranych elementów przegubu kulistego wahacza [2,3]

W budowie przegubów kulistych dąży się do zminimalizowania tarcia poprzez wypolerowanie szpilki przegubów kulowych. Użyty wewnątrz sworzni smar oraz szpilka dodatkowo pokryta PTFE (teflon) również przyczyniają się do płynnego działania przegubu oraz jego szybkiego czasu reakcji. Osłonę przeciw-pyłową wykonuje się głównie z neoprenu (CR), który charakteryzuje się ochroną przed zmianami temperatury, działaniem olejów, paliw oraz zapewnia skuteczną ochronę przed zmiennymi warunkami atmosferycznymi. Nylonowa wkładka wewnątrz nakrętki zapobiega powstawaniu korozji pomiędzy szpilką a nakrętką, oraz uniemożliwia odkręcanie się nakrętki [2].

Do najczęstszych usterek sworzni należą: rozerwana osłona gumowa na skutek czego do środka dostaje się woda, piasek, sól oraz inne niepożądane ciała obce które powodują szybsze zużycie się elementów współpracujących z sobą. Dodatkowo woda powoduje korozję trzpienia kulistego. Najważniejszym skutkiem rozerwanej osłony gumowej jest wydostanie się smaru na zewnątrz co powoduje niedostateczne smarowanie lub jego brak co przeważnie kończy się zapieczeniem sworzni. Kolejnym często spotykanym przypadkiem jest skrzywienia trzpienia na skutek uderzenia kołem w przeszkodę np. krawężnik lub wjechania w większą nierówność na drodze. Rzadziej spotykanym przypadkiem jest wyrobienia się elementów współpracujących ze sobą nie prawidłowy montaż sworzni, tzn. poprzez niedokręcenie nie odpowiednim momentem śruby mocującej przegub kulisty w zwrotnicy. Dodatkowo może to spowodować wybitcie gniazda zwrotnicy i podczas przejazdu pojazdu po nierównościach sworzeń może wysunąć się z gniazda.

Najczęstszymi objawami uszkodzonych sworzni są: stukanie oraz skrzypienie podczas jazdy bo nie równej nawierzchni np. przejazd przez spowalniacze na osiedlach a nawet podczas wsiadania do auta, pukanie podczas pokonywania zakrętów oraz podczas hamowania i przyspieszania, profil zużycia opony jest nierównomierny. Ponadto jazda z wybitymi przegubami kulistymi przyspiesza zużycie innych podzespołów zawieszenia. Należy niezwłocznie zlecić w warsztacie wymianę niesprawnych elementów.

## 2. STANOWISKO POMIAROWE [4]

Badania zostały przeprowadzone na stanowisku wyposażonym w skaningowy mikroskop tunelowy.

Skaningowy mikroskop tunelowy (STM od ang. *Scanning Tunneling Microscope*) – rodzaj SPM, mikroskopu ze skanującą sondą (ang. *Scanning Probe Microscope*) – umożliwia uzyskanie obrazu powierzchni materiałów przewodzących ze zdolnością rozdzielczą rzędu pojedynczego atomu. Uzyskanie obrazu powierzchni jest możliwe dzięki wykorzystaniu zjawiska tunelowego, od którego przyrząd ten wzięł swoją nazwę. W rzeczywistości STM nie rejestruje fizycznej topografii próbki, ale dokonuje pomiaru obsadzonych i nieobsadzonych stanów elektronowych blisko powierzchni Fermiego.

Nad powierzchnią próbki, która może być wykonana tylko z materiału przewodzącego prąd elektryczny lub być pokryta atomami metalu (tzw. napyłanie), umieszczona jest sonda (igła), którą można poruszać w sposób kontrolowany. Ramię trzymające igłę mocowane jest do aparatury poprzez skaner piezoelektryczny, który pod wpływem napięcia elektrycznego, w wyniku zjawiska piezoelektrycznego zmienia w niewielkim stopniu swe wymiary, a tym samym zmienia położenie igły przesuwając ją nad próbką. W innych rozwiązaniach układ piezoelektryczny porusza próbką, a sama sonda pozostaje nieruchoma. Przemiatanie (skanowanie) kolejnych linii i punktów obrazu próbki odbywa się według z góry zadanego programu.

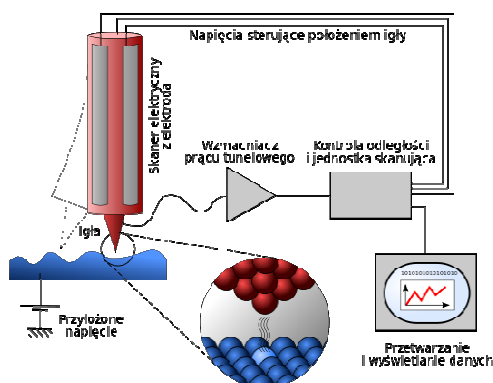
## 2.1. Konstrukcja mikroskopu i zasada działania [4]

W prostszych rozwiązaniach zwanych metodą stałej wysokości (ang. constant height method, CHM) igła porusza się na stałej wysokości nad próbką a aparatura rejestruje wyłącznie zmiany prądu tunelowego. Rozwiązanie to można stosować tylko w przypadku próbek o równej powierzchni. W tym rozwiązaniu jeżeli próbka zawiera wypukłości może dojść do kolizji igły z materiałem, a w wklęsłościach próbki obraz jest słaby a nawet całkowicie zanika.

W rozwiniętych konstrukcjach zwanych metodą stałego prądu lub metodą stałej odległości (ang. constant current method, CCM, constant gap width mode, CGM) igła może oddalać się i przybliżać do próbki. Ustalanie odległości igła-próbka jest przeprowadzane przez odpowiednio szybki układ ujemnego sprzężenia zwrotnego w układzie odległość – prąd tunelowy – napięcie sterujące wysokością. Prąd tunelowy, po odfiltrowaniu dużych częstotliwości, jest sygnałem wejściowym układu zapewniającego przepływ stałego prądu tunelowego. W układach tych do obrazowania powierzchni próbki wykorzystuje się wielkość prądu tunelowego oraz napięcie sterujące wysokością igły.

Najbardziej rozwiniętą metodą jest spektroskopia mikroskopu skaningowego (ang. scanning tunneling spectroscopy, STS) w mikroskopie tym, dla danego położenia igły, wyznacza się zależność natężenia prądu od przyłożonego napięcia. Metoda ta umożliwia określenie gęstości stanów elektronów w badanej substancji. Działanie tej metody opiera się na teoretycznej prawidłowości mówiącej, że pochodna natężenia prądu tunelowego po napięciu jest proporcjonalna do gęstości stanów elektronów.

Sonda (drut wolframowy lub Pt/Ir o średnicy 0,2–0,5 mm) zawiera na końcu kryształ ustawiony wierzchołkiem w stronę ostrza – dzięki temu zakończeniem sondy jest dokładnie jeden atom. Odległość sondy od powierzchni próbki jest rzędu kilku angstromów (do 1 nm). Przyłożone napięcie pomiędzy sondą a próbką (od ułamków do kilku woltów). Tak małe napięcie nie jest wystarczające do tego, by elektron pokonał przyciąganie jonów metalu i oderwał się od ostrza igły, ale dzięki temu, że próbka jest w niewielkiej odległości od ostrza igły, elektron przeskakuje przez zabroniony obszar (barierę potencjału) do badanej próbki w wyniku emisji polowej, istnienie której tłumaczy się kwantowym zjawiskiem tunelowym, dlatego też nazywany jest prądem tunelowym.



Rys.4. Schemat działania mikroskopu STM [4]

Elektrony tunelują z ostrza przez powietrze (lub próżnię) do próbki lub odwrotnie w zależności od kierunku przyłożonego napięcia. Wartość prądu tunelowego zależy silnie (wykładniczo) od szerokości bariery potencjału, w tym przypadku jest to odległość ostrza od najbliższych atomów (a nawet powłok atomowych) próbki. Typowe wartości prądu są rzędu 0,1–10 nA a analiza tak małych prądów wymaga dokładnej i niskoszumnej aparatury.

Komputer analizuje i zapamiętuje mapę prądów tunelowych dla każdego punktu próbki i na tej podstawie tworzony jest później obraz próbki.

W przypadku badania substancji zbudowanych z różnych atomów (nie pierwiastków) wartość prądu zależy od siły wiązania elektronu przez atom (praca wyjścia). Pomiar tego prądu pozwala obrazować strukturę atomową powierzchni próbki. Wartość prądu tunelowego dostarcza informacji o wartości potencjału jaki czuje elektron opuszczający powierzchnię próbki.

Wykonanie sondy do mikroskopu STM wbrew pozorom jest stosunkowo łatwe, znacznie trudniejsze jest wykonanie ostrza do mikroskopu AFM. Najprostszą metodą otrzymania sondy do mikroskopu STM jest ucięcie drutu nożyczkami bądź przecinakiem pod kątem  $45^\circ$  – nożyce i drut wcześniej muszą być oczyszczone. Najczęściej sondy STM otrzymuje się poprzez elektrochemiczne trawienie (np. w 30% roztworze KOH), trawienie odsłania strukturę kryształu, a po selekcji można wybrać odpowiednie ostrze .

Zdolność rozdzielcza mikroskopu pozwala dostrzec poszczególne atomy. Wadą mikroskopu STM jest ograniczenie możliwości obserwacji tylko do próbek wykonanych z przewodników. Aby badać materiały nieprzewodzące należy posłużyć się mikroskopem sił atomowych.



Rys.5. Stanowisko pomiarowe mikroskopu STM

### 3. WYNIKI BADAŃ

Pomiarom poddane zostały sworznie nowe (rysunek 6a) oraz ich wyeksploatowane odpowiedniki (rysunek 6b).

a)



b)



Rys.6. Nowy oraz zużyty przegub kulisty

#### 3.1. Warunki pomiarów

Warunki przeprowadzania badań:

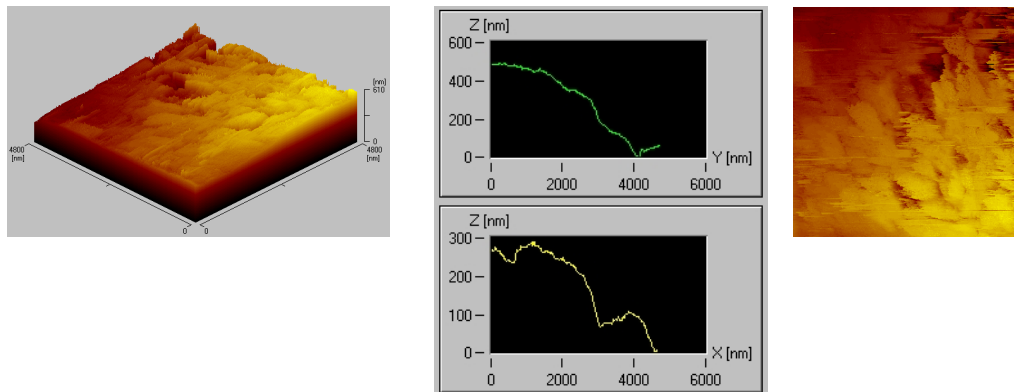
- STM: tryb stałego prądu, igły preparowane z drutu Ir-Pt (10% irydu, 90% platyny) o średnicy 0,25mm obcięte cęgami o ostrych ostrzach.



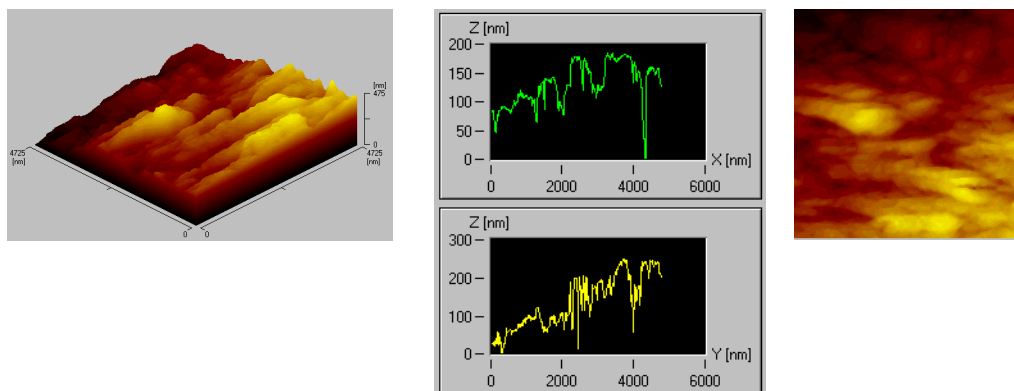
- skanowanie przeprowadzono w powietrzu, przy ciśnieniu atmosferycznym, temperaturze pokojowej.

### 3.2. Określenie stanu powierzchni

Otrzymane zdjęcia z STM umożliwiły określenie wysokości wierzchołków chropowatości badanych elementów. Poniżej przedstawiono przykładowe zdjęcia oraz wykresy topografii powierzchni (rysunek 6, 7).



**Rys. 6.** Zdjęcia wykonane przy pomocy STM dla nowego przegubu kulistego (wysokość wierzchołków chropowatości powierzchni określona wzdłuż osi z)



**Rys. 7.** Zdjęcia wykonane przy pomocy STM dla wyeksploatowanego przegubu kulistego

### PODSUMOWANIE

Obrazy uzyskane na mikroskopie STM wykonano po pewnej ilości cykli pracy tzn. po określonej ilości przejechanych kilometrów (jazda w mieście, poza miastem i cykl jazdy mieszanej) dla przegubów wykonanych ze stali. Porównując otrzymane wyniki badań stanowiskowych, można stwierdzić, że:

1. Badania sworzni na mikroskopie tunelowym dają dokładne obrazy powierzchni roboczych, które pozwalają na wykreślenie charakterystyk parametru  $R_a$  w funkcji ilości przejechanych kilometrów.
2. Wykonane badania są wstępem do dalszej analizy procesu zużycia sworzni kulistych, tak aby wybrać jak najkorzystniejsze warunki eksploatacji (cykl jazdy miejskiej oraz cykl jazdy pozamiejskiej) oraz pozwolą na dobór właściwych (lepszyc) materiałów.

3. Porównując ślady po 75000 km cyklu jazdy mieszanej (miasto i trasa) zauważono duże różnice kształtu powierzchni dla tych śladów. Głębokość śladu zużycia wzrosła z 180 nm do 400 nm. Na zdjęciu widać rozmazywanie powierzchni czopa i panewki sworznia kulistego.
4. Dla przegubu zużytego widać wyraźne wyrwania materiału z powierzchni kulistej, czego nie obserwuje się dla sworznie z przebiegiem pojazdu do 45000 km, zarówno dla przejazdów miejskich i poza miejskich.
5. Wyraźnie widać, że najintensywniejsze zużycie występuje w zakresie 68000 km do 80000 km. Można sądzić, że właśnie w tym zakresie następuje wycieranie się powierzchni roboczych przegubu kulistego.
6. Kolejnym etapem badań będzie określenie procentowego współczynnika zużycia sworznia wyznaczonego na podstawie badań teoretycznych wykonanych na stanowisku do badania zawiesznień pojazdów, które zostało opracowane w Katedrze Pojazdów, z wynikami uzyskanymi metodą mikroskopową.

## BENCH TESTING OF BALL JOINTS USING SCANNING MICROSCOPE

### *Abstract*

*The purpose of this article is to present the position of the scanning microscope equipped with two scan heads, STM and AFM. Microscope allows imaging of working surfaces at the nano scale. Additionally, it allows you to determine the degree of wear of the surface layer and deleting their profiles. Investigations were subjected to vehicle suspension ball joints personal. consumption level was determined on the basis of prior examination of the surface of the new pin and then performed a series of measurements for worn parts.*

### BIBLIOGRAFIA

1. Gębiś P.: *Stan techniczny pojazdów a wypadki drogowe*.  
<http://ptim.simp.pl/ptim/content/view/236/56/>.
2. <http://www.allproducts.com/search2/search.php?q=Steering%20Linkage>.
3. Naprężenia i odkształcenia. Wiadomości Inter Cars, Sierpień 2010, numer 36, strona 54.
4. Lorenc A, Sławińska A., Józwiak P.: *Trials of defining selected parameters of surface layer of inserts covered with titanium nitride and titanium carbide by the use of STM and AFM microscope*. Szkoła obróbki skrawaniem nr 5, Wydawnictwo Sutoris, Opole 2011, pp. 427-434.
5. Józwiak P, Siczek K.: *Research of the influence of carbon deposits upon valve wear*. Scientific Publishing House of PIMOT, The Archives of Automotive Engineering, 1/2011, pp 175-194.

### *Autorzy:*

**Prof. dr hab. inż. Zbigniew Pawelski** – Politechnika Łódzka

**dr inż. Marek Woźniak** – Politechnika Łódzka

**dr inż. Sergiusz Zakrzewski** – Politechnika Łódzka

**mgr inż. Piotr Józwiak** – Politechnika Łódzka

**Prof. Gustavo Ozuna** – University of Sonora

**dr inż. Pablo De La Fuente** – Ruhr University Bochum