

**Jacek RYSIŃSKI, Ireneusz WRÓBEL**

AKADEMIA TECHNICZNO-HUMANISTYCZNA W BIELSKU-BIAŁEJ, KATEDRA PODSTAW BUDOWY MASZYN

## Oszacowanie rozmiaru pittingu w przekładni zębatej przy wykorzystaniu skanera 3D

Dr inż. Jacek RYSIŃSKI

Absolwent Wydziału Budowy Maszyn Filii Politechniki Łódzkiej w Bielsku-Białej. Od 1995 roku zatrudniony w Katedrze Podstaw Budowy Maszyn. Pracę doktorską obronił na Wydziale Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej w 2003 r. W swej pracy zajmuje się zagadnieniami związanymi z diagnostyką przekładni zębatych oraz analizą pęknięć zmęczeniowych kół zębatych. Interesuje się również analizą wymiany danych w sieciach Ethernet oraz zastosowaniem tych sieci do zadań monitoringu.

e-mail: jrynsinski@ath.bielsko.pl



Dr inż. Ireneusz WRÓBEL

Absolwent Wydziału Budowy Maszyn Filii Politechniki Łódzkiej w Bielsku-Białej. Od 1995 roku zatrudniony w Katedrze Podstaw Budowy Maszyn. Pracę doktorską obronił na Wydziale Budowy Maszyn Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej w 2002 roku. W swojej pracy zawodowej zajmuje się modelowaniem Metodą Elementów Skończonych, systemami komputerowego wspomagania CAD oraz technikami inżynierii odwrotnej.

e-mail: iwrobel@ath.bielsko.pl



### Streszczenie

W pracy przedstawiono doświadczalną metody wyznaczania rozmiaru jamek pittingowych powstałych na powierzchni bocznej zęba koła walcowego. Badania przeprowadzono na stanowisku mocy zamkniętej przy wykorzystaniu skanera 3D.

**Słowa kluczowe:** pitting, tarcie, skaner 3D, koło zębate, inżynieria odwrotna

### Evaluation of pitting in gears using 3D scanner

#### Abstract

In the paper the experimental method for evaluation of pitting on flank cylindrical gear is presented. The experimental investigations were performed on the power-close-loop test stand using 3D scanner.

**Keywords:** pitting, friction, 3D scanner, toothed wheel, Reverse Engineering

## 1. Wstęp

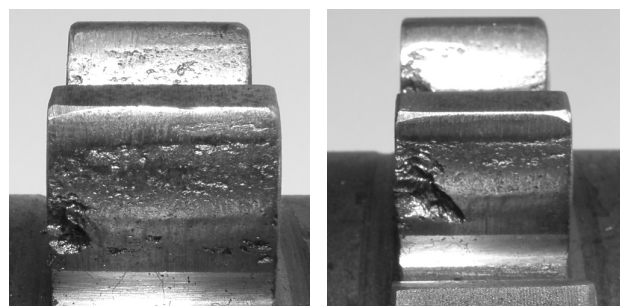
Jednym z podstawowych czynników decydujących o nośności i trwałości przekładni jest wytrzymałość boku zęba na naciski. Degradacja powierzchni bocznej może być spowodowana przez:

- cykliczne obciążenia przekraczające wytrzymałość zmęczeniową materiału, z którego wykonane są koła,
- siły tarcia związane z przetwarzaniem i wzajemnym poślizgiem zębów kół,
- przekroczenie granicy plastyczności materiału koła,
- ubytek materiału w wyniku zwiększonego tarcia spowodowanego przez zanieczyszczony olej,
- zatarcie powierzchni bocznej zębów kół,
- itp.

Jednym z najczęściej występujących zjawisk podczas pracy przekładni jest pitting. Objawia się on w postaci jamki na powierzchni bocznej koła, powstałych w wyniku wykruszania się materiału (rys. 1.)

Jamki pittingowe mogą występować na jednym lub w drastycznym przypadku na wszystkich zębach koła. Charakteryzują się różną wielkością i głębokością ale posiadają dość regularny kształt. Pitting występuje w strefie poślizgów ujemnych i dzielimy go na ograniczony i niszczący. Pitting ograniczony, wywołany niewielkimi odchyłkami zarysu oraz zbyt dużym parametrem chropowatości, uważa się w pewnym zakresie za dopuszczalny. W ustalonych warunkach pracy w wyniku dotarcia się współpracujących powierzchni kół przestaje się rozwijać lub wręcz zanika.

Pitting niszczący może rozwinąć się bez wcześniejszych symptomów lub może powstać z pittingu ograniczonego. Powstałe jamki pittingowe zmniejszają czynną powierzchnię roboczą zębów kół. W zależności od zastosowanego materiału na koła mogą powodować wzrost odkształceń plastycznych lub powstanie pęknięć zmęczeniowych w głąb zęba.



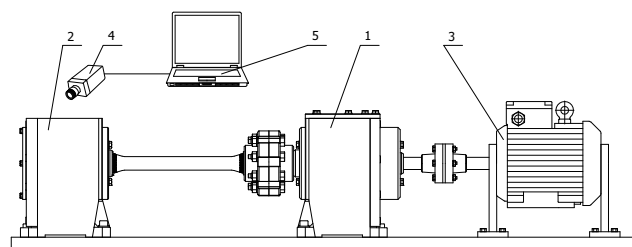
Rys. 1. Pittingu na powierzchni bocznej koła zębatego  
Fig. 1. Pitting on flank cylindrical gear

## 2. Stanowisko badawcze

Norma ISO 6336-3 przewiduje cztery metody wyznaczania wytrzymałości boku zęba, są to metody: A, B, C i D. Oznaczono je wg malejącej dokładności. Metoda A i B uzależnia wyznaczenie nieograniczonej bazowej wytrzymałości zmęczeniowej boku zęba od przeprowadzenia badań doświadczalnych. Jako kryteria badań przyjmuje się:

- wyznaczenie największego naprężenia w biegunie zazębienia nie wywołującego wzrostu pittingu po upływie bazowej liczby cykli,
- określenie % udziału powierzchni zdegradowanej do całkowitej powierzchni boku zęba koła.

Badania przeprowadzono na stanowisku mocy zamkniętej własnej konstrukcji (rys. 2).



Rys. 2. Stanowisko badawcze  
Fig. 2. Functional scheme of the test stand

Umożliwia ono przeprowadzenie szeregu badań zmęczeniowych kół walcowych o zębach prostych na kołach próbkach, w tych samych warunkach. W skład stanowiska wchodziła przekładnia badana 2 oraz zamykająca 1, silnik 3, skaner 3D – 4 oraz rejestrator komputerowy 5.

Koła-próbki wykonane ze stali 17HMN, poddane następującej obróbce cieplno-chemicznej i cieplnej:

- nawęglanie w temperaturze 930 °C w czasie czterech godzin,
- hartowanie – tj. wygrzewanie w temperaturze 830 °C w czasie 15 minut i oziębianie do temperatury 130 °C w oleju,
- odpuszczanie w temperaturze 170 °C w czasie dwóch godzin.

Moment obciążający zadawany był poprzez sprzęgło napinające oraz wałki skrotne.

W niniejszej pracy zajęto się tylko próbą oszacowania udziału procentowego jamek pittingowych na powierzchni bocznej do całkowitej powierzchni biorącej udział we współpracy kół.

Zdecydowano się na zastosowanie skanera Optix 400S firmy 3D Digital Corporation (rys. 3.) jako narzędzia umożliwiającego wykonanie szybkiego pomiaru bez konieczności rozbierania całego stanowiska.



Rys. 3. Skaner Optix 400S [3]  
Fig. 3. Scanner Optix 400S

Skanowanie przestrzenne stosuje się do rozwiązań z dziedziny inżynierii odwrotnej. Sama nazwa pochodzi od angielskiego zwrotu „Reverse Engineering” określającego techniki skanowania trójwymiarowego jak i metody obróbki powstałej w trakcie skanowania chmury punktów. Skanowanie trójwymiarowe jest to odwzorowanie kształtu elementu rzeczywistego i przetworzenie go do postaci cyfrowego modelu akceptowanego przez systemy typu CAD. Zastosowany skaner wykorzystuje do pomiaru pojedynczą wiązkę światła lasera. Skanowany przedmiot oświetlany jest przesuwającą się w poziomie wiązką laserową, która ulega zniekształceniu w zależności od geometrii obiektu. Zniekształcenie to rejestruje matryca CCD a oprogramowanie odpowiednio przekształca obraz w chmurę punktów która odwzorowuje skanowaną powierzchnię. Każdy pomiar może być realizowany w odpowiedniej rozdzielczości. Skaner Optix 400S potrafi skanować w maksymalnej rozdzielczości 1000x1000 punktów. Skanowanie jest dość szybkim procesem – jedno obrazowanie w rozdzielczości 1000x1000 punktów trwa około 8 sekund. Wynik skanowania może być dalej obrabiany w systemach CAD lub specjalistycznych programach do obróbki chmury punktów. Dokładność pomiaru skanerem Optix 400S wynosi 15 mikronów tj. 0,0006”.

### 3. Metodyka pomiaru

Można stwierdzić, że miarą uszkodzenia zmęczeniowego będzie suma uszkodzeń powierzchni bocznych współpracujących kół walcowych [1] tj. zębniaka  $A_1$  oraz koła  $A_2$ :

$$A = A_1 + A_2 \quad (1)$$

gdzie:

$$A_1 = \sum_{i=1}^{z_1} \frac{A_{1i}}{z_1 \cdot b \cdot l_1} \cdot 100\% \quad (2)$$

$$A_2 = \left( \frac{z_2}{z_1} \right) \cdot \sum_{i=1}^{z_2} \frac{A_{2i}}{z_2 \cdot b \cdot l_2} \cdot 100\% \quad (3)$$

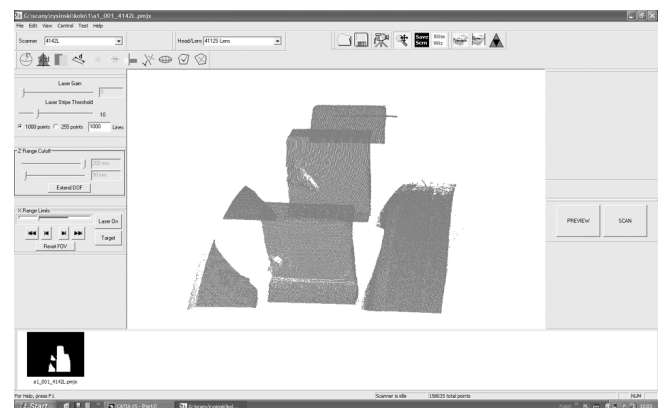
gdzie:  $1, 2$  - zębniak, koło;  $z$  - liczba zębów;  $l$  - długość rozwinięcia czynnego zarysu;  $b$  - szerokość koła.

Przyjmując jako kryterium zużycie powierzchni bocznej wywołane pittingiem, zakłada się że nie powinno ono przekroczyć:

- 2% czynnej powierzchni boków wszystkich nie hartowanych zębów, lub
- 0.5% czynnej powierzchni boków wszystkich hartowanych zębów, lub
- 4% powierzchni boku jednego zęba hartowanego, lub
- 8% powierzchni boku jednego zęba nie hartowanego.

Dla poprawnego przeprowadzenia skanowania powierzchni konieczna jest kalibracja urządzenia. Dokonuje się go poprzez odpowiednie ustawienie odległości skanera od mierzonego przedmiotu, wiązka lasera oświetla obserwowaną powierzchnię a uproszczony obraz wyświetlany jest na ekranie komputera. Skaner laserowy źle odwzorowuje powierzchnie błyszczące, przezroczyste i w kolorze czarnym. Powierzchnia skanowanego zęba była powierzchnią błyszczącą. Aby poprawie odwzorować powierzchnię należało nanieść cienką warstwę talku w sprayu eliminującego refleks podczas pomiaru. Grubości tej warstwy wynosi około 1-2 mikrometrów.

W przypadku koła zębatego konieczne jest wykonanie skanu powierzchni z kilku ujęć (wystarczają trzy). Celem nadrzędnym było przedstawienie wszystkich zdegradowanych powierzchni. W zależności od kierunku obrotów, zęby koła pracują tylko na jednej powierzchni i na niej pojawia się uszkodzenie. Dlatego chcąc uzyskać model trójwymiarowy skanowanego koła konieczne jest wykonanie pomiarów dookoła zęba. Wszystkie modele 3D zapisywane są w oknie programu przedstawionego na rys. 4. W niniejszej pracy autorzy ograniczyli się do skanowania powierzchni jednego zęba. Na rysunku 4 przedstawiono okno programu obsługującego skaner.

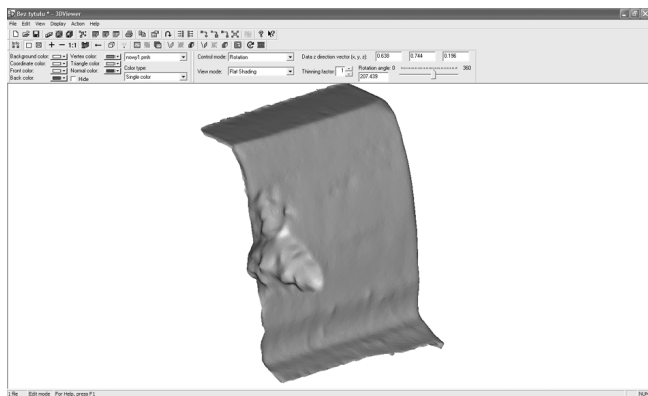


Rys. 4. Okno programu do obsługi skanera  
Fig. 4. Scanner control program window

W kolejnym kroku należy dokonać połączenia uzyskanych chmur punktów w jeden model. Można tego dokonać za pomocą automatycznych procedur zamieszczonych w programie lub wykonać złożenia ręcznie poprzez połączenie kolejnych zobrazowań za pomocą punktów charakterystycznych. Efekt końcowy wyświetlany jest przy pomocy aplikacji przedstawionej na rys. 5.

W oknie programu przedstawiono zarys najbardziej zdegradowanej powierzchni bocznej zęba koła.

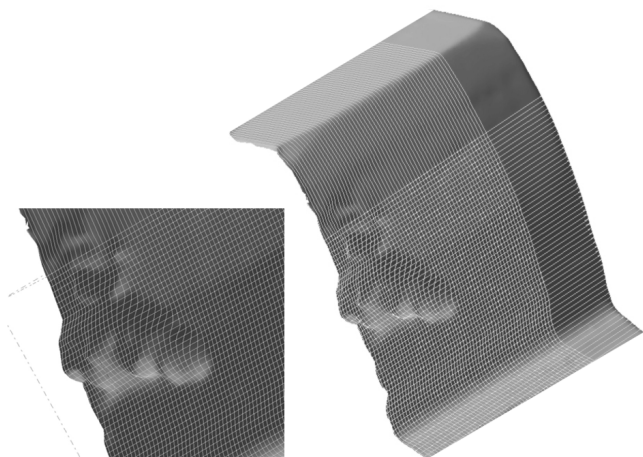
Wszystkie czynności wykonane do tej pory odnoszą się do zadania opisanego w inżynierii odwrotnej. Czyli na podstawie rzeczywistego elementu otrzymano model przestrzenny powierzchni zęba. Oczywiście jest iż w przypadku prezentowanego koła zębatego model 3D zawiera wszystkie uszkodzenia powstałe podczas współpracy. Dlatego, jak wspomniano wcześniej, naszym zadaniem nie jest odtworzenie geometrii tego koła a pomiar powstałych uszkodzeń.



Rys. 5. Model 3D zęba  
Fig. 5. Toothed wheel 3D model

Niestety brak jest narzędzi umożliwiających automatyczną analizę np. uszkodzenia powierzchni bocznej zęba koła. Zdecydowano się na zapisanie modelu przestrzennego do formatu możliwego do odczytania w programie CATIA. Jest to uniwersalny system CAD który oferuje odpowiednie moduły które służą do obróbki chmury punktów otrzymanej ze skanera. W systemie CATIA można z chmurą punktów przekształcić w zbiór krzywych opisujących kształt skanowanej powierzchni. A bazując na tych krzywych można zbudować model powierzchniowy. Niestety program nie posiada odpowiednich specjalistycznych narzędzi które pozwoliłyby na prostą i automatyczną analizę uszkodzonych powierzchni.

Nie ma możliwości automatycznego zaznaczenia obszaru uszkodzenia. Operacje te można wykonać ręcznie poprzez zaznaczenie wierzchołków na krawędziach uszkodzenia. Co ciekawe program CATIA umożliwia dokonanie dowolnego podziału powierzchni i wyznaczenia np. głębokości jamek pittingowych (rys. 6). Oczywiście metoda pomiaru wymaga zweryfikowania.



Rys. 6. Pomiar głębokości jamek pittingowych  
Fig. 6. Measurement of pit depth

Dokonując pomiaru stwierdzono iż powierzchnia uszkodzenia wynosiła 11,5 % w stosunku do całkowitej czynnej powierzchni bocznej zęba koła. Reasumując ze względu na rozmiar powstałe uszkodzenie dyskwalifikowało koło do dalszej pracy. Ponadto degradacja powierzchni powstała w okolicy przelomu zmęczeniowego czyli podstawy zęba, co także jest czynnikiem dyskwalifikującym ząb.

#### 4. Podsumowanie

W wyniku przekroczenia naprężeń dopuszczalnych na powierzchni zęba powstają pęknięcia zmęczeniowe. Najczęściej

tworzą się one w wyniku oderwania się cząstek materiału części bocznej zęba wchodzącej w przypór. Ich cechą charakterystyczną są nieregularne plamy lub wgłębienia powstające w okolicy okręgów tocznych lub przy podstawie. Analizując zjawisko pittingu należy zwrócić uwagę na fakt, iż niedopuszczalny jest przyrost liniowy lub progresywny wgłębień w funkcji czasu. Podczas pracy uszkodzonych elementów mogą powstać niekontrolowane drgania lub siły dynamiczne, powodujące uszkodzenie całego urządzenia. W warunkach eksploatacyjnych pomiar pittingu przeprowadza się zazwyczaj trzykrotnie. Zakładając wytrzymałość boku zęba na nacisk rzędu  $3 \times 10^6$  cykli obciążenia pierwszy pomiar przeprowadza się co najmniej po  $10^6$  cykli.

Nie wszystkie znane z tribologii metody pomiaru zużycia można wprost zastosować do kół zębatych. Do pomiaru ubytku masy powszechnie stosuje się metody wagowe, mikrometryczne, wykorzystuje się profilografy itp. Niejednokrotnie w przypadku kół walcowych metody te są trudne do zastosowania. Ponadto problemem jest unieruchomienie stanowiska (przekładni) na dłuższy czas i wyłączenie jej z ruchu. Oczywiście jest fakt iż taki postój musi być wcześniej zaplanowany lub wyznaczony po uprzedniej analizie symptomów uszkodzenia na badanym stanowisku. Badanie zjawiska zużycia powierzchni bocznych przeprowadza się w warunkach laboratoryjnych na specjalnych maszynach lub w warunkach rzeczywistych na wybranych stanowiskach roboczych. W pierwszym przypadku próbka o prostych kształtach poddawana jest stałemu obciążeniu, w wyniku tarcia współpracujące powierzchnie ulegną zdegradowaniu. Otrzymane i obrabione wyniki badań mogą posłużyć np. konstruktorowi do wstępnych obliczeń inżynierskich. W przypadku badań eksploatacyjnych otrzymane wyniki odpowiadają rzeczywistym warunkom pracy. Jednakże badania te są bardzo drogie i nie zawsze możliwe do przeprowadzenia.

Jak wykazują wyniki prób podjętych przez autorów, możliwe jest zastosowanie laserowego skanera trójwymiarowego do oszacowania pittingu w przekładni zębatej. Zaletą tej metody jest szybkość obrazowania powierzchni zęba. Skanowanie powierzchni jednego w trzech ujęciach trwa około 24 sek. Bardzo dużą zaletą tej metody jest możliwość wykonywania inspekcji na obiekcie, bez konieczności pracochłonnego demontażu kół. Wadą tej metody jest brak specjalistycznego oprogramowania które analizowałoby uzyskany obraz na potrzeby szacowania pittingu w kołach zębatych. Należałoby zbudować odpowiednie oprogramowanie które ułatwiłoby analizę obrazów uzyskanych ze skanera. Oczywiście opisaną metodę należałoby zweryfikować metodami klasycznymi.

Autorzy dziękują firmie Evatronix S.A. z udostępnienie skanera do badań.

#### 5. Literatura

- [1] J. Drewniak (red.): Laboratorium badania przekładni zębatych, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej Filii w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała 2000.
- [2] Zeszyty Naukowo-Techniczne, Zeszyt 1/1996, OBR Motoreduktorów i Reduktorów Redor, Bielsko-Biała 1996,
- [3] J. Tomaszewski, J. Rysiński: Optymalny model rozwoju pittingu w przekładniach zębatych. Politechnika Koszalińska Katedra Systemów Sterowania, Polioptymalizacja i komputerowe wspomaganie projektowania, Mielno 2004,
- [4] J. Tomaszewski, J. Rysiński, K. Mirola: Diagnostyka zatarcia przekładni zębatych, Transport Przemysłowych 2005 nr 4,
- [5] Strona internetowa, [www.evatronix.eu](http://www.evatronix.eu)