

**Jacek RYSIŃSKI, Ireneusz WRÓBEL**KATEDRA PODSTAW BUDOWY MASZYN, AKADEMIA TECHNICZNO-HUMANISTYCZNA,  
ul. Willowa 2, 43-300 Bielsko-Biała**Nowoczesne metody oceny stanu powierzchni części maszyn****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 swojej pracy zajmuje się zagadnieniami związanymi z diagnostyką przekładni zębatych oraz analizą pęknięć zmęczeniowych kół zębatych. Interesuje się również komputerowym wspomaganie projektowania części maszyn.

e-mail: jrynski@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 wspomaganie CAD oraz technikami inżynierii odwrotnej.

e-mail: jrynski@ath.bielsko.pl

**Streszczenie**

W niniejszym referacie autorzy podjęli próbę wykorzystania nowego układu firmy ARM oraz skanera 3D do budowy układu diagnostycznego. Ze względu na posiadane laboratorium badania były wykonywane na przekładniach walcowych. Model 3D otrzymany z badań diagnostycznych porównano z wzorcem. Analiza wyników prowadzona była przy wykorzystaniu systemu Inventor oraz Catia. Ponadto podjęto próbę zastosowania metody magnetycznej pamięci materiału do oceny stanu powierzchni.

**Słowa kluczowe:** diagnostyka, model 3D, skaner 3D, koła zębate, MPM.

**Modern methods for assessment of machine part surface****Abstract**

The paper presents an attempt at using ARM units and 3D scanner to build a diagnostic model. The studies were performed on cylindrical gears due to the existing laboratory conditions. As shown in [1, 2, 3], possible damages which may occur during the element cooperation are fatigue crack propagation, pitting, scoring, etc. As long as the break and scoring immediately exclude the machine from further work at once, its further use will depend on the assessment of pitting. What should be taken into account is the fact that the main aim is to obtain a digital/numerical surface model of the real object as close to the original one as possible. This was achieved by scanning the product surface. The next step resulted in obtaining a discrete object representation in the form of a point cloud (Fig. 3a). By connecting the points with lines, the triangle mesh commonly referred to as a polygonal surface was obtained (Fig. 3b). The method is laden with errors resulting mainly from the measurement precision and adjustment correctness. The wheel model obtained is compared with the model generated by means of the own processor [4]. The material magnetic memory method is used as a new tool for fast diagnosis of machine elements. The method is widely used in industry, e.g. thermal-electric industry. The authors made an attempt at applying the method to determining the surface condition of the cooperating toothed wheels.

**Keywords:** diagnostic model, 3D model, 3D scanner, toothed wheel, Magnetic Memory Method.

**1. Wstęp**

Dynamiczny rozwój przemysłu maszynowego wymusił na projektantach stosowanie nowych technik związanych z prototypowaniem, projektowaniem, wytwarzaniem oraz diagnostyką części maszyn. Celem nadrzędnym stało się szybkie, a zarazem ekonomiczne wdrożenie nowego wyrobu do produkcji kosztem np. zmniejszenia jego gabarytów w stosunku do przenoszonej mocy. Ponadto na etapie projektowania zakłada się maksymalny czas pracy urządzenia bez remontu, eliminując tym samym koszty związane z ewentualnymi postojami. Rozwój systemów komputerowych umożliwił zastosowanie nowych technik w dziedzinie projektowania, badania oraz pomiarów parametrów układów mechanicznych. W mniejszym referacie autorzy podjęli próbę przedstawienia nowych narzędzi w dziedzinie diagnostyki oraz prototypowania części oraz maszyn.

**2. Układ diagnostyczny do oceny stanu podzespołów oraz elementów maszyn**

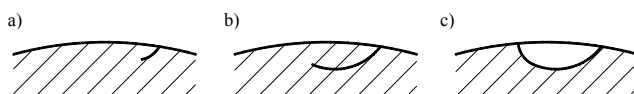
Jedną z najtrudniejszych czynności stawianych przed działem utrzymania ruchu jest zaplanowanie okresowych remontów oraz diagnozowanie stanu maszyny. Konieczny jest ciągły monitoring poszczególnych parametrów tj. temperatury, drgań, generowanego hałasu w celu oszacowania czasu wystąpienia awarii. Autorzy wykorzystali układ firmy ARM – STM32 oraz skaner 3D do budowy układu diagnostycznego. Ze względu na posiadane laboratorium badania były wykonywane na przekładniach walcowych.

STM32 to rodzina najnowszych 32-bitowych mikrokontrolerów (producent STMicroelectronics) wyposażonych w nowoczesny rdzeń Cortex-M3, opracowany przez firmę ARM. Charakteryzują się one bogatym wyposażeniem wewnętrznym tj. wbudowanymi interfejsami SPI, I<sup>2</sup>C, Ethernet MAC, USB-OTG, SDIO, UART, ADC, DAC, EMI, RTC, PVD, DMA, CAN, LIN, I2S, timery itp., wbudowanymi pamięciami Flash (do 1 MB) i SRAM (do 128 kB), a także łatwością uruchamiania programów (dzięki wbudowanemu sprzętowemu debuggerowi dostępnemu poprzez JTAG). Mikrokontrolery STM32 wyposażono także w dwa wewnętrzne generatory sygnałów zegarowych (32 kHz i 8 MHz), liczniki RTC i 7-kanałowy kontroler DMA oraz możliwość zapisu danych w czasie rzeczywistym na pamięci typu SD [8].

Na bazie tego układu zbudowano układ diagnostyczny rejestrujący temperaturę w punktach charakterystycznych przekładni oraz rejestrujący drgania na jej obudowie. Aplikacja zainstalowana na komputerze (autorskie rozwiązanie) przeprowadza analizę sygnałów w czasie rzeczywistym, informując obsługę o możliwości wystąpienia uszkodzenia.

Jak wykazano w [1, 2, 3] możliwymi uszkodzeniami jakie mogą wystąpić podczas współpracy elementów są: propagacja pęknięcia zmęczeniowego, pitting, zatarcie itp. O ile złamanie i zatarcie od razu eliminuje maszynę z dalszej pracy, o tyle od oceny zjawiska pittingu zależeć będzie dalsze dopuszczenie jej do pracy.

W jakim stopniu tego rodzaju uszkodzenia mogą być tolerowane zależeć będzie od dziedziny zastosowania. W niektórych przypadkach może być zaakceptowany intensywny pitting, w innych należy unikać każdego widocznego wykruszenia [9].



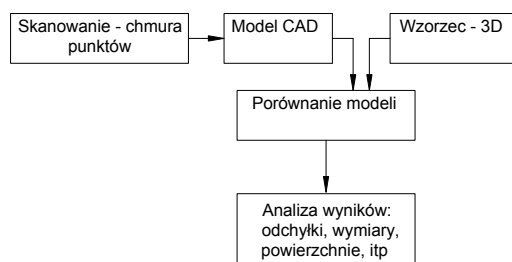
Rys. 1. Rozwój pittingu: a) pęknięcie, b) rozwój pęknięcia, c) jamka pittingowa [1]  
Fig. 1. Pitting development: a) crack, b) crack development, c) pitting hole [1]

Pitting jest uszkodzeniem zmęczeniowym. Degradacja powierzchni powstała w wyniku tego zjawiska przejawia się na powierzchni w postaci dołków o dość nieregularnych kształtach. Początkiem powstania pittingu jest pęknięcie, które rozwija się pod wpływem działających sił zewnętrznych (rys. 1a). Olej wci-

skany jest do wewnątrz powstałego pęknięcia i powoduje propagację szczeliny (rys. 1b).

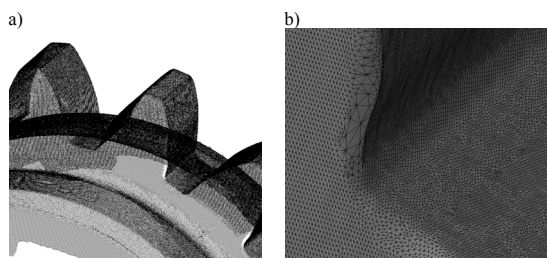
Prezentowana metoda polega na szybkim sprawdzeniu oraz ocenie stanu powierzchni poprzez porównanie jej z wzorcem – w naszym przypadku modelem CAD (rys. 2). Do oceny tego zjawiska wykorzystano skaner 3D.

W przypadku wystąpienia symptomów mówiących o uszkodzeniu powierzchni bocznej koła zębatego jest ono skanowane, tworzony jest model CAD i porównywany jest on z wcześniej przygotowanym wzorcem. Analiza wyników daje wprost odpowiedź, czy dany element może być dopuszczony do dalszej pracy, czy należy go wymienić. Najlepszym rozwiązaniem jest takie, które umożliwia dostęp skanerowi wprost do zdegradowanej powierzchni, w innym przypadku należy element zdemontować i wykonać pomiary na wcześniej przygotowanym stanowisku.



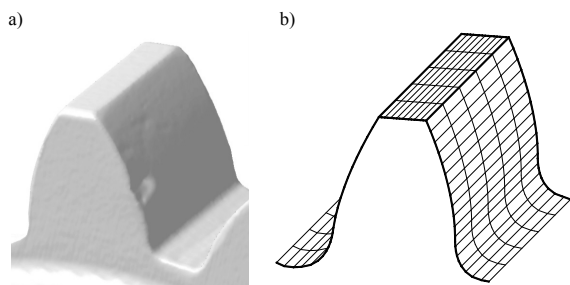
Rys. 2. Schemat blokowy procesu tworzenia modeli 3D  
Fig. 2. Block diagram of the process of creating 3D models

Do oceny zjawiska pittingu należy pozyskać cyfrowy model zużytego koła zębatego [3]. Otrzymamy go poprzez trójwymiarowe skanowanie powierzchni przedmiotu (koła). W wyniku otrzymujemy się cyfrową reprezentację obiektu (koła zębatego) w postaci chmury punktów (rys. 3a). Łącząc sąsiednie punkty liniami (triangulacja) otrzymuje się siatkę trójkątów zwaną powszechnie powierzchnią poligonalną (rys. 3b).



Rys. 3. Model koła: a) chmura punktów, b) powierzchnia poligonalna,  
Fig. 3. Wheel model: a) point cloud, b) polygonal surface

Należy podkreślić, że metoda ta obciążona jest błędami wynikającymi głównie z precyzji pomiaru. Do najtrudniejszych zadań podczas oceny stanu powierzchni zalicza się dokładne wyznaczenie obszaru pomiarowego. W przypadku kół podział odbył się na średnicy stóp zębów w środku pomiędzy nimi (rys. 4).

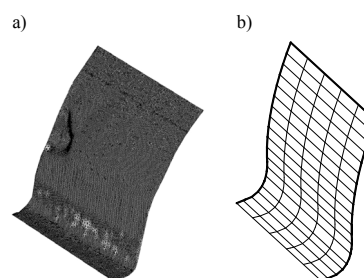


Rys. 4. Model zęba koła 3D: a) otrzymany w wyniku skanowania,  
b) z preprocesora generującego wzorec 3D  
Fig. 4. Tooth 3D model: a) obtained as a result of scanning, b) from the preprocessor generating 3D model

Pierwszą metodą oceny będzie porównanie objętości koła wygenerowanego na podstawie skanu 3D z wzorcem, przy wykorzystaniu Autodesk Inventor. Koło „idealne” zostało wygenerowane przy pomocy własnego preprocesora, napisanego w języku Delphi [10]. Wynikiem będzie różnica pomiędzy zmierzonymi wartościami - w procentach. Jak wykazano w [2, 3] za dobre uznaje się koła w których ubytek materiału - powierzchni bocznej współpracujących kół nie przekracza:

- 8 % czynnej powierzchni jednego zęba koła,
- 2 % czynnej powierzchni wszystkich zębów kół.

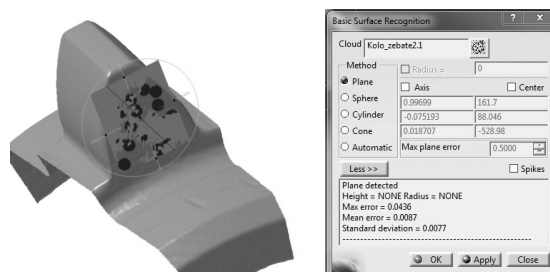
W naszym przypadku dla najbardziej uszkodzonego zęba koła różnica objętości wynosiła: 10,51%. W kolejnym kroku wyznaczono procentowy udział zdegradowanej powierzchni bocznej w stosunku do wzorca (rys. 5).



Rys. 5. Wycinek powierzchni bocznej zęba koła: a) otrzymany w wyniku skanowania, b) z preprocesora generującego wzorec 3D  
Fig. 5. Sector of the tooth active flank: a) obtained as a result of scanning, b) from the preprocessor generating 3D mo

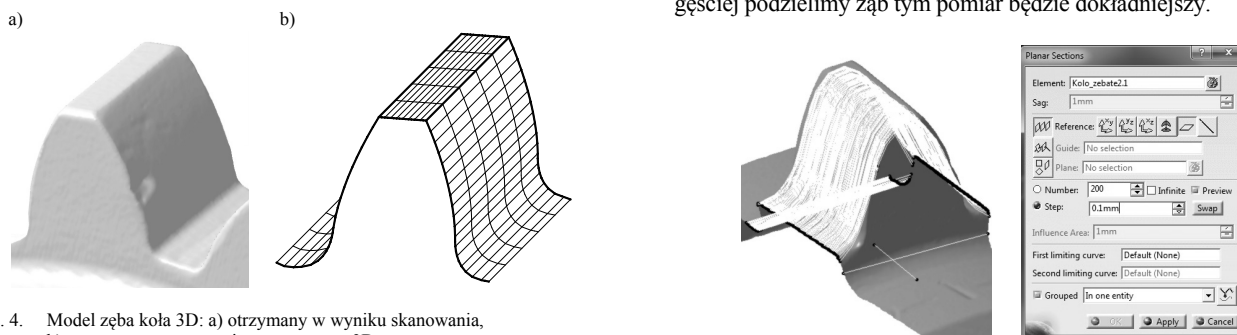
Używając odpowiednich narzędzi pomiarowych w systemie CATIA wyznaczono pole powierzchni bocznej, które następnie porównano z wzorcem. Okazało się, iż degradacja powierzchni bocznej jest większa niż 8% - koło nie nadawało się do dalszej pracy.

Kolejnym etapem było wykorzystanie systemu CATIA do wyznaczenia i porównania objętości kół.



Rys. 6. Definicja powierzchni podziału w systemie Catia  
Fig. 6. The definition of reference surface in the Catia system

W tym celu należy na samym początku zdefiniować powierzchnię boczną zęba koła, wyznaczyć kierunek podziału oraz wartość o jaką będzie wykonywany podział. Jest to najbardziej czasochłonna metoda jednak daje najbardziej dokładne wyniki. Oczywiście im gęściej podzielimy ząb tym pomiar będzie dokładniejszy.

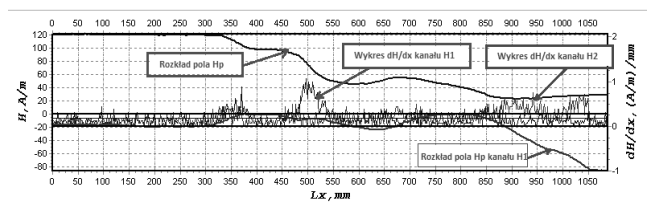


Rys. 7. Określenie kierunku podziału powierzchni bocznej zęba koła w Catia  
Fig. 7. Determining the direction of the active flank of tooth division in Catia

W wyniku podziału otrzymano szereg krzywych wzdłuż przekroju bocznego zęba. Są one bazą do określenia objętości zęba. W rezultacie przeprowadzonych obliczeń uzyskano wynik: 6,67%. Widoczna jest różnica w wynikach dla prezentowanych systemów. Wynika ona z dokładności wyznaczenia objętości badanych kół.

### 3. Metoda magnetycznej pamięci materiału (MPM)

Przeprowadzając zaplanowane remonty maszyn często można zadać sobie pytanie: czy dana część może być dopuszczona do dalszej pracy? Odpowiedzią może być zastosowanie metody MPM do oszacowania stanu powierzchni. Wykorzystuje ona zjawisko rozproszenia pola magnetycznego na skutek występowania strukturalnych i mechanicznych niejednorodności w warunkach naturalnego namagnesowania się metalu spowodowanego obciążeniami. Jest to szybka metoda analizy stanu naprężeń i odkształceń stosowana w diagnostyce. Pozwala odróżnić obszary deformacji plastycznej od sprężystej. Ponadto możliwe jest wykrywanie mikro i makro pęknięć na powierzchni i głębszych warstwach materiału. Jeżeli w materiale następuje propagacja pęknięcia zmęczeniowego metoda MPM pokazuje kierunek jego rozwoju. Oczywiście aby dokładnie oszacować poziom degradacji-uszkodzenia elementu konieczne jest porównanie sygnału otrzymanego z badań z wzorcem. Metoda MPM opiera się na znanym zjawisku rozproszenia strumienia magnetycznego w obszarach materiału o odmiennej przenikalności magnetycznej [6, 7]. Jeżeli w namagnesowanym jednorodnie elemencie wystąpią zakłócenia, to na skutek zmiany przenikalności magnetycznej powstaną lokalne anomalie stopnia namagnesowania materiału, pozostającego w magnetycznym polu Ziemi.



Rys. 8. Przykładowy magnetogram [10]

Fig. 8. An exemplary magnetogram

Planuje się przeprowadzenie szeregu badań na kołach zębatych walcowych w celu zastosowania w/w metody do diagnostyki pęknięć. Do tej pory autorzy wykorzystywali metody numeryczne (Metodę Elementów Brzegowych – pakiet Beasy) oraz badania stanowiskowe (stanowisko mocy zamkniętej) do określenia propagacji pęknięć zmęczeniowych [4].



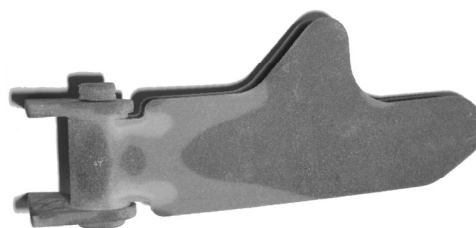
Rys. 9. Miernik TSC-3M-12 [10]

Fig. 9. Tester of Stress Concentration TSC-3M-12

### 4. Wnioski

Już na etapie projektowania lub podczas eksploatacji stajemy przed trudnym zadaniem – określenia kryteriów dopuszczenia maszyny do dalszej pracy. W większości przypadków wiedza pozyskiwana jest z różnych pozycji literatury. Jednakże nie zawsze jesteśmy w stanie dopasować zastosowane tam metody badań do naszego rozwiązania. Z pomocą przychodzą nowe urządzenia

oraz metody stosowane w diagnostyce maszyn. O ile budowa samego układu pomiarowego nie przysparza już większych problemów, o tyle ocena zjawiska kumulacji uszkodzeń nie jest do końca jeszcze opracowana. Urządzenia do skanowania 3D powszechnie wykorzystywane są na etapie prototypowania lub odzwierciedlenia geometrii wyrobu. W tym przypadku skaner został wykorzystany do diagnostyki kół zębatych. Otrzymany model zdegradowanej powierzchni można porównać z wzorem 3D lub wyznaczyć np. rozkład naprężeń wykorzystując metodę elementów skończonych. Jest to może dosyć pracochłonna czynność jednak daje nam bardzo dobre wyniki mówiące co dzieje się z elementem po przepracowaniu określonej liczby godzin, jak następuje degradacja powierzchni, czy podczas tej pracy występują jakieś karby. Uzupełnieniem symulacji komputerowej może być wydruk 3D zespołu z rozkładem naprężeń na powierzchni. W sposób wizualny można więc przedstawić zespołowi projektantów miejsca, w których występują niekorzystne rozkłady naprężeń.



Rys. 10. Przykładowy wydruk 3D z zaznaczonym rozkładem naprężeń  
Fig. 10. Sample 3D printout with selected stress distribution

Kolejną metodą zastosowaną do szybkiej diagnostyki było wykorzystanie metody magnetycznej pamięci materiału. W przemyśle elektroenergetycznym jest ona powszechnie stosowana do określenia uszkodzeń rurociągów ciepłowniczych lub wad połączeń spawanych. Nowym zastosowaniem metody będzie wykorzystanie jej do badania stanu powierzchni kół zębatych. Na pewno głównym kryterium determinującym zastosowanie w/w metody będzie wysokość zębów kół.

### 5. Literatura

- [1] Dietrych J., Korewa W.: Podstawy Konstrukcji Maszyn cz. III, WNT, Warszawa 1973.
- [2] Drewniak J.: Model obliczeniowy trwałości zmęczeniowej elementów maszyn. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej Nr 79, Rzeszów 1991.
- [3] Rysiński J., Wróbel I.: Oszacowanie rozmiaru pittingu w przekładni zębatej przy wykorzystaniu skanera 3D, PAR : Pomiary, Automatyka, Robotyka 2008 nr 12.
- [4] Rysiński J.: Preprocesor wspomagający obliczanie i modelowanie 3D kół zębatych metodą elementów brzegowych, Zeszyty Naukowe. Budowa i Eksploatacja Maszyn / Akademia Techniczno-Humanistyczna Ser.6 Publikacje z.15 Przekładnie zębate - obliczanie, projektowanie, badania, Bielsko-Biała 2004.
- [5] Oczko K., Cena I.: Rapid Inspection – metody pomiarowo-kontrolne adekwatne do rapid-technologii, Mechanik 2008 nr 3.
- [6] Łukaszewicz J., Łapiński Z.: Badania metodą pamięci magnetycznej próbek stalowych poddanych naprężeniom zewnętrznym, www.witu.mil.pl/www/biuletyn/zeszyty/20060099p/155.pdf, 01.04.2011.
- [7] Nowy kierunek w diagnostyce technicznej – metoda Magnetycznej Pamięci Metalu, www.seo.org.pl/pliki/firmy, 01.04.2011.
- [8] Mikrokontrolery STM32, www.stm32.eu, 01.04.2011.
- [9] Norma PN ISO 6336-2:2000, Przekładnie zębate walcowe - Obliczanie nośności kół - Wytrzymałość zęba na zmęczenie stykowe (pitting)
- [10] Ciesielski Ł.: Analiza zawiesi wyciągowych za pomocą metody magnetycznej pamięci materiału – praca dyplomowa, Akademia Techniczno - Humanistyczna, 2011.