

## VISUALIZATION OF INTERNAL STRESS PATTERN IN GEARS IN POWER TRANSMISSION SYSTEMS USING RAPID PROTOTYPING (RP)

**Mariusz Sobolak**

*Rzeszow University of Technology  
Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics Powstańców  
Warszawy Street 8, 35-959 Rzeszów, Poland  
tel.: +48 17 8651638, fax: +48 17 8651150  
e-mail: msobolak@prz.edu.pl*

**Grzegorz Budzik**

*tel.: +48 17 8651642, fax: +48 17 8651150  
e-mail: gbudzik@prz.edu.p*

### **Abstract**

*The paper contains description of an experimental method of stress pattern visualization. Mainly analytical methods and a Finite Element Method are used to determine internal stress pattern. Sometimes photo-elasticity is used. Model are made by copying real objects by casting from special optical-active resins. There is possible to put into use Rapid Prototyping methods. Some materials used in RP processes are optically active.*

*In proposed solution of stress pattern visualization special models of gears are used. Models are made directly from optically active resin by Rapid Prototyping method - stereolitography. A transparent fotohardening optically active resin SI5170 has been used to observe stress pattern in polarized light. Prototypes of gear are assembled in a special device and loaded by torque. The principle of a mechanical similarity was applied.*

*In relation to the classic photo-elasticity method novelty is the use of the LCD monitor as a source of light and a camera with polarisation filter for observation and recording the distribution of internal stress pattern.*

*The use of simulation of gear generating in CAD system and stereolitography method to produce a prototype allows you to eliminate the classic machining of gear at lower cost.*

**Keywords:** *Rapid Prototyping, gears, photo-elasticity*

## WIZUALIZACJA NAPRĘŻEŃ W KOŁACH ZĘBATYCH UKŁADÓW NAPĘDOWYCH Z WYKORZYSTANIEM METOD RP

### **Streszczenie**

*W artykule przedstawiono eksperymentalną metodę wyznaczania rozkładu naprężeń. W celu określenia rozkładu naprężeń używane są metody analityczne i komputerowe wykorzystujące metodę elementów skończonych. W niektórych przypadkach użyte znajduje elastooptyka. Modele do elastooptyki są kopiami rzeczywistych obiektów, wykonanymi z materiału czynnego optycznie. Możliwe jest zastosowanie techniki szybkiego prototypowania w celu wykonania takiego modelu. Niektóre z materiałów używanych w szybkim prototypowaniu są czynne optycznie.*

*W proponowanym rozwiązaniu w wizualizacji naprężeń w kołach zębatych układów napędowych używane są specjalne modele kół. Modele są wykonane bezpośrednio z żywicy czynnej optycznie metodą stereolitografii. Użyto przezroczystej, fotoutwardzalnej żywicy SI5170 w celu wyznaczenia rozkładu naprężeń. Modele kół obserwowano w świetle spolaryzowanym. Koła zestawiono w specjalnym przyrządzie i obciążono momentem skręcającym. Zastosowano zasadę podobieństwa modelowego. W stosunku do klasycznej metody elastooptyki nowością jest zastosowanie monitora LCD jako źródła światła oraz aparatu fotograficznego z filtrem polaryzacyjnym do obserwacji i rejestracji rozkładu naprężeń.*

*Zastosowanie symulacji obróbki obwodniowej w systemie CAD oraz wytworzenie kół za pomocą stereolitografii eliminuje klasyczną obróbkę skrawaniem i przyczynia się do obniżenia kosztów badań.*

**Słowa kluczowe:** *Szybkie prototypowanie, koła zębate, elastooptyka*

## 1. Wprowadzenie

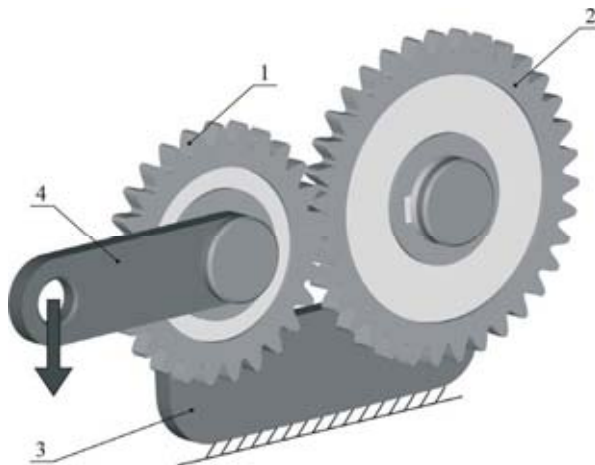
Przekładnie zębate są nadal powszechnie stosowane w wielu układach napędowych. O ich zastosowaniu decyduje wiele czynników, z których najważniejsze to zdolność przenoszenia dużych obciążeń przy dużej prędkości obrotowej, niezawodność a także co niezmiernie ważne wysoka sprawność. W kołach zębatych spotykanych w układach napędowych występuje głównie zarys ewolwentowy, chociaż prowadzone są badania nad innymi różnego typu zarysami, mające na celu poprawę właściwości eksploatacyjnych przekładni. Spotykane są zarysy takie jak wklęsło wypukłe (typu Wildhabera-Nowikowa, BBW), sinusoidalne, line-point. W przypadku badania zarysów nietypowych, ale także i ewolwentowego występuje problem zachowania się zębów pod wpływem obciążenia. Chodzi tu głównie o rozkład naprężeń i odkształceń. Rozkład naprężeń i odkształceń można wyznaczyć z pomocą Metody Elementów Skończonych. Możliwe jest także zastosowanie metody elastoptyki. Wiąże się to jednak z przygotowaniem fizycznego modelu z materiału o odpowiednich właściwościach. W artykule przedstawiono sposób wyznaczania rozkładu naprężeń w zębie koła zębatego wykorzystujący model koła wytworzony techniką szybkiego prototypowania.

## 2. Metoda Elastoptyki

Elastoptyka to metoda doświadczalna do określania rozkładu naprężeń i odkształceń w modelach przedmiotów. Modele badanego przedmiotu wykonuje się z materiału o właściwościach elastoptycznych i poddaje obciążeniom analogicznym do rzeczywistych. Wykorzystuje się tu zasadę podobieństwa modelowego. Materiał, z którego wykonuje się badany model jest ciałem bezpostaciowym, normalnie izotropowym (m.in. szkliwa, celuloid, poliwęglan), wykazującym pod obciążeniem właściwości anizotropowe, przejawiające się m.in. dwójłomnością optyczną. Pod wpływem obciążenia i powstających naprężeń materiał taki nabiera cech optycznych kryształu jednoosiowego o osi optycznej skierowanej równoległe do kierunku rozciągania lub ściskania. Przy oświetleniu światłem spolaryzowanym, w wyniku zjawiska dwójłomności następuje rozszczepienie światła na dwie składowe i pojawienie się prążków interferencyjnych, tworzących dwa charakterystyczne rodzaje linii: izokliny i izochromy [4]. Na podstawie tych linii możliwe jest wyznaczenie naprężeń w dowolnym punkcie badanego modelu.

## 3. Model przekładni zębatej

Model przekładni został przygotowany w systemie AutoCAD (Rys. 1). Zęby kół zębatych kształtowano metodą bezpośredniej symulacji obróbki obwodniowej narzędziem zębatkowym [3, 5]. Przyjęto sinusoidalny zarys odniesienia kół. Zarys sinusoidalny jest zarysem nietypowym. W przekładniach zębatych najczęściej spotykany jest zarys ewolwentowy [5].



Rys. 1. Model przekładni utworzony w systemie CAD  
Fig. 1. CAD model of gear transmission

W systemie CAD wygenerowano model w formacie STL. W modelu takim każda bryła opisana jest za pomocą trójkątów przybliżających powierzchnię [2, 7]. Na podstawie tak przygotowanego modelu w programie Lightyear przygotowano technologię wytworzenia modelu w aparaturze stereolitograficznej SLA250 firmy 3D Systems. Po przygotowaniu technologii model wytworzono z żywicy S15170 (Rys. 2) [1, 9]. Żywica ta jest przezroczysta i wykazuje efekt optyczny. Dokładność wymiarowa modelu po zastosowaniu techniki podwyższania dokładności modelu stereolitograficznego wyniosła  $\pm 0,02$  mm [6].



*Rys. 2. Stereolitograficzne modele kół zębatych przekładni*  
*Fig. 2. Stereolithography models of gears*

### **3. Określenie rozkładu naprężeń**

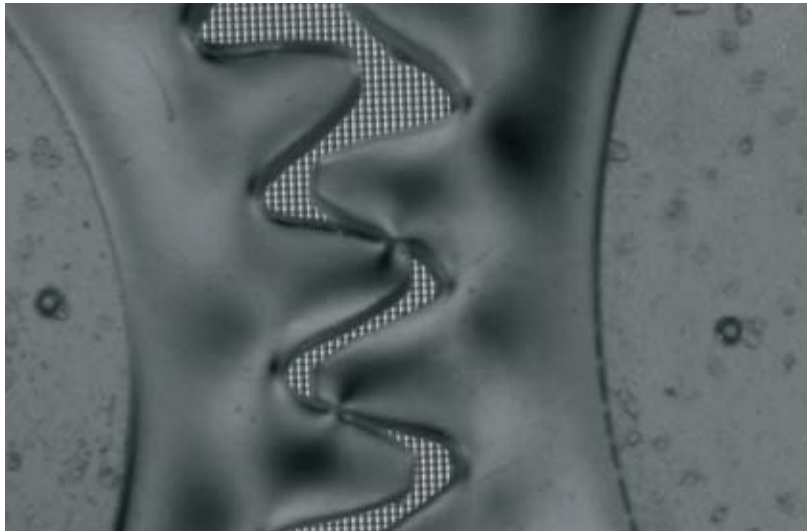
Do określenia rozkładu naprężeń wykorzystano metodę elastoptyki. Jako źródło światła spolaryzowanego wykorzystano, co jest nowością, monitor ciekłokrystaliczny LCD. Koła zębate zestawiono w przyrządzie. Jedno z kół zablokowano a drugie obciążono momentem skręcającym poprzez ciężarek zawieszony na dźwigni.

Rozkład naprężeń obserwowano poprzez kołowy filtr polaryzacyjny firmy HAMA zamontowany na obiektywie cyfrowego aparatu fotograficznego CANON EOS 400D. Zestawienie takie pozwala wprost na rejestrację wyników obserwacji. Na Rys. 3 i 4 pokazano przykładowe rozkłady naprężeń. Na Rys. 3. widać, iż w zazębieniu znajduje się jedna para zębów (tzw. styk jednoparowy).

Na Rys. 4. widoczny jest styk dwuparowy, w tym samym położeniu w kontakcie znajdują się dwie pary zębów.



*Rys. 3. Rozkład naprężeń przy styku jednoparowym*  
*Fig. 3. Internal stress pattern for a single contact*



Rys. 4. Rozkład naprężeń przy styku dwuparowym  
Fig. 4. Internal stress pattern for double contact

W badanej przekładni o nietypowym zazębieniu (zarys odniesienia sinusoidalny) wykazano doświadczalnie, iż dla przyjętych liczb zębów kół 27 i 35 w trakcie pracy przekładni pod obciążeniem występuje kontakt jednoparowy (Rys. 3). Kontakt jednoparowy, gdy w przyporze znajduje się jedna para zębów jest zjawiskiem niekorzystnym.

Dla przezroczystych modeli stereolitograficznych możliwe jest także określenie śladu styku zębów w przekładni [8]. Znając ślad styku oraz rozkład naprężeń można wysuwać wnioski co do poprawności konstrukcji zarysu uzębienia oraz poprawności pracy przekładni pod obciążeniem.

#### 4. Podsumowanie

Do analizy rozkładu naprężeń w kole zębatym będącym elementem układu napędowego można wykorzystać modyfikowaną metodę elastoptyki. Modyfikacja polega na wprowadzeniu źródła światła spolaryzowanego w postaci monitora LCD oraz zastosowaniu fotograficznego filtra polaryzacyjnego.

Model CAD przekładni wytworzony został na drodze symulacji obróbki, bez potrzeby rzeczywistego kształtowania koła zębatego.

Na podstawie modelu CAD wytworzono modele kół techniką szybkiego prototypowania bezpośrednio z żywicy wykazującej właściwości optyczne.

Wykorzystanie powszechnie dostępnego źródła światła spolaryzowanego jakim jest monitor LCD oraz sprzętu do fotografii cyfrowej do obserwacji rozkładu naprężeń w świetle przechodzącym znacznie upraszcza procedurę tradycyjnych badań elastoptycznych przyczyniając się do znacznego obniżenia kosztów badań.

#### Literatura

- [1] 3D Lightyear SLA File Preparation Software, User's Guide 2001.
- [2] Budzik, G., Markowski, T., Sobolak, M., *Prototyping of Bevel Gears of Aircraft Power Transmission*, Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 14, No. 2, pp. 61-66, Warszawa 2007.
- [3] Budzik, G., Sobolak, M., *Simulation of Two-Dimensional Tool Geometry Mapping in Gear Machining in CAD Environment*, Progressive Technologies and Materials, No. 2, Edited by Stachowicz, F., pp. 115-121, Rzeszów 2007.
- [4] Kopkowicz, M., *Metody doświadczalne badań konstrukcji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2003.

- [5] Sobolak, M., *Analiza i synteza współpracy powierzchni kół zębatych metodami dyskretnymi*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2006.
- [6] Sobolak, M., Budzik, G., *Dokładność geometryczna metody stereolitografii*, Western Scientific Centre of Ukrainian Transport Academy, s. 158-159, Lwów 2005.
- [7] Sobolak, M., Budzik, G., *Prototypowanie kół zębatych z wykorzystaniem stereolitografii i odlewania próżniowego*, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej Nr 217, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, s. 264-270, Rzeszów 2004.
- [8] Sobolak, M., *Experimental method of tooth contact analysis (TCA) under load using Rapid Prototyping (RP)*, Journal of KONES, Vol. 14, No. 4., pp. 441-446, Warszawa 2007.
- [9] Stereolithography Buildstation, 3D Systems Publications, 2001.

