

# ANALIZA NAPRĘŻEŃ W KOŚCIACH OCZODOŁU METODĄ TENSOMETRYCZNA I METODĄ ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

Jan Awrejcewicz<sup>1)</sup>, Jerzy Mrozowski<sup>1)</sup>, Anna Dąbrowska-Wosiak<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Katedra Automatyki i Biomechaniki, Politechnika Łódzka, Łódź.

**Słowa kluczowe:** oczodoły, naprężenia, odkształcenia, MES, tensometry.

## STRESZCZENIE

W pracy przedstawiony został numeryczny model oczodołu oraz opisane doświadczenie na rzeczywistym modelu oczodołu. Za pomocą Metody Elementów Skończonych w programie Ansys Workbench został stworzony model oczodołu, który następnie przebadano pod kątem występujących naprężeń zarówno przy danych materiałowych kości jak i żywicy. Doświadczenie na rzeczywistym modelu oczodołu pozwoliło zweryfikować poprawność obliczeń numerycznych.

## 1. WPROWADZENIE

Modelowanie metodą elementów skończonych całej czaszki lub bardziej dokładnie mniejszych jej fragmentów to bardzo złożony proces. Jest ono jednym z podstawowych narzędzi używanych do badań mechanicznych czaszki, oczodołów oraz przy rekonstrukcji twarzoczaszki z wadami wrodzonymi lub powypadkowymi. Przy jej użyciu modelowano na przykład czaszkę przy rozszczepie górnej szczęki [1], badano powstawanie urazów przy uderzeniu w głowę noworodka [2] oraz badano dystozę twarzowo-czaszkową dziecka [3]. Za pomocą MES analizowano radiologicznie i matematycznie skrzywienie twarzy w wyniku krzywej osi środkowej czaszki [4], metody tej użyto do zamodelowania deformacji oczodołu w następstwie tępego urazu [5] a także do badania właściwości biomechanicznych oczodołu [6]. W niniejszej pracy za pomocą Metody Elementów Skończonych, w programie Ansys Workbench, został stworzony model oczodołu, który następnie przebadano pod kątem występujących naprężeń zarówno dla danych materiałowych kości jak i żywicy. Metoda tensometryczna stanowi jeden z bardziej wiarygodnych sposobów określania naprężeń, umożliwiając zarazem weryfikację wyników uzyskanych na drodze obliczeń numerycznych, np. w programie Ansys Workbench.

## 2. METODYKA BADAŃ

Metoda elementów skończonych jest jedną z najdokładniejszych i najczęściej używanych w analizie wytrzymałościowej [7]. Metoda ta zaimplementowana w programie Ansys Workbench, została wykorzystana do zamodelowania oczodołu dla różnych typów materiału, tj. kości (Tabela 1) oraz materiału żywicznego (Tabela 2), z którego wykonano w technologii 3D PolyJet model rzeczywisty oczodołu. Tabela 3 prezentuje główne etapy analizy numerycznej modelu oczodołów w programie Ansys Workbench.

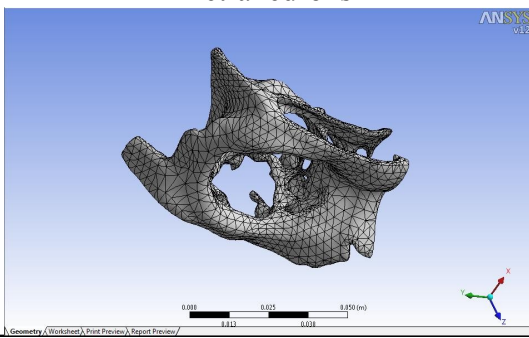
Tabela 1. Własności materiałowe kości czaszki

Autor	Kość korowa		
	E [MPa]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\nu$
Al-Bsharat [8]	12,2	2,12	0.22
Willinger [9]	15	1,8	0.21
Furusu[10]	11,5	2	0.3

Tabela 2. Własności materiałowe żywicy

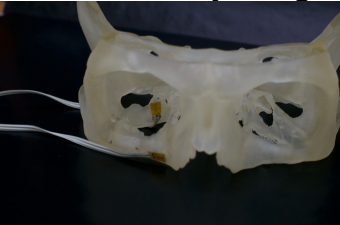

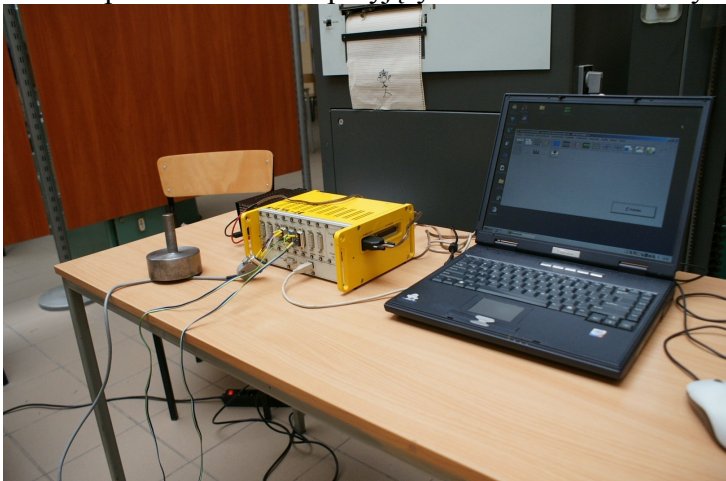
Parametr	ASTM	Jednostka	Wartość
Wytrzymałość na rozciąganie	D-638-03	MPa	60.3
Współczynnik sprężystości	D-638-04	MPa	2870
Wydłużenie po zerwaniu	D-638-05	%	20
Wytrzymałość na zginanie	D-790-03	MPa	75.8
Współczynnik zgięcia	D-790-04	MPa	1718
Wytrzymałość na ściskanie	D-695-02	MPa	84.3
Gęstość w stanie ciekłym		g/l	1.094
Gęstość w stanie stałym		g/cm <sup>3</sup>	1.189

Tabela 3. Główne etapy analizy numerycznej

Etap	Wykonane czynności
CAD	Przygotowanie CAD'owskiego modelu oczodołów za pomocą programu Solid Edge
Materiały	Zdefiniowanie materiałów: „Kość” i „Żywica” wg parametrów z tabel 1. i 2.
Siatka	<p>Utworzenie siatki elementów skończonych. Nałożono na cały badany obiekt siatkę elementów skończonych Tetrahedrons</p> 
Siła	Przyłożenie siły (pierwsza wartość „Force” = 100 N)
Pomiary	Wykonanie symulacji numerycznej

Druga część badań polegała na wykonaniu fizycznego modelu oczodołu metodą Rapid Prototyping i przyklejeniu do niego tensometrów w celu zbadania naprężeń metodą tensometryczną (Tabela 4).

Tabela 4. Główne etapy pomiarów tensometrycznych

Etap	Wykonane czynności
Model	Przygotowanie modelu oczodołów metodą Rapid Prototyping
Tensometry	Przyklejenie tensometrów do rzeczywistego modelu oczodołów 
Maszyna wytrzymałościowa	
Pomiary	Dokonanie pomiarów dla sił przyjętych w analizie numerycznej 

## 2.1. Podstawowe informacje o Rapid Prototyping

Metoda *Rapid Prototyping* (po polsku: szybkie wykonywanie prototypów) służy do szybkiej, precyzyjnej i powtarzalnej produkcji elementów w technologii addytywnej. Polega ona na budowaniu wyrobu warstwa po warstwie ze specjalnych materiałów umożliwiających wykorzystanie drukarek 3D. Coraz powszechniej stosowana jest nie tylko w przemyśle, ale

również jako pomoc przy operacjach rekonstrukcji fragmentów szkieletu, np. twarzoczaszki. Można wyróżnić kilka sposobów prototypowania, ze względu na: rodzaj techniki, którą prototypowanie jest wykonywane, grubość osiągniętych warstw w wydruku, rodzaju materiału wykorzystywanego do tworzenia prototypu i wiele innych. Jest to stosunkowo nowa dziedzina, dynamicznie rozwijająca się i stąd funkcjonuje kilka systematyk, uwzględniających coraz to nowsze metody szybkiego prototypowania. Technika ta zapewnia wysoką precyzję odwzorowania kształtu oraz dobrą jakość powierzchni. Dzięki tym cechom możliwe jest odtworzenie elementów o bardzo złożonej budowie, co jest niezwykle istotne przy tak skomplikowanej strukturze, jaką stanowi oczodoł.

### 3. WYNIKI BADAŃ

W pracy przedstawiono dwa modele oczodołu, numeryczny i fizyczny (wykonany w technologii Rapid Prototyping), pozwalające na analizę naprężeń w kościach oczodołu. Dla pierwszego modelu wyniki obliczeń przedstawiono w postaci mapy naprężeń zredukowanych według hipotezy Hubera-Misesa-Hencky'ego opartej na kryterium energii odkształcenia postaciowego. Naprężenia te w ogólnym stanie naprężenia wyraża zależność:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \sigma_y - \sigma_y \sigma_z - \sigma_z \sigma_x + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (1)$$

Tabela 4. Wyniki analizy numerycznej

„Kość”				„Żywica”			
	Siła [N]	Naprężenie MAX [MPa]	Naprężenie MIN [MPa]		Siła [N]	Naprężenie MAX [MPa]	Naprężenie MIN [MPa]
	100	29,87	1,07		100	35,48	5,85
	150	44,80	1,60		150	53,22	8,78
	180	63,87	5,65		180	63,87	1,05

3D-Modelowanie kości  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Units: MPa  
Time: 1  
2011-03-23 11:37

29.868 Max  
19.547  
22.229  
18.81  
16.592  
13.274  
9.852  
6.6388  
3.3184  
1.0079e-10 Min

3D-Modelowanie żywicy  
Equivalent Stress  
Type: Equivalent (von-Mises) Stress  
Units: MPa  
Time: 1  
2011-03-23 15:48

35.483 Max  
15.541  
22.208  
20.958  
18.713  
12.217  
11.829  
7.8852  
3.3628  
5.8543e-12 Min

Wyniki badań metodą tensometryczną potwierdzają poprawność określenia rozkładu naprężeń występujących w oczodole zamodelowanym w programie Ansys. Z uwagi na dużą objętość plików z wynikami pomiarów tensometrycznych, dane te nie są tutaj prezentowane.

### PODZIĘKOWANIE

Artykuł ten powstał przy wsparciu programu „MISTRZ” Fundacji Nauki Polskiej.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Boryor A., Geiger M., Homann A., Wunderlich A., Sander Ch., Sander F.M., Sander F.G. (2008) Stress distribution and displacement analysis during an intermaxillary disjunction-A three-dimensional FEM study of a human skull. *Journal of Biomechanics* **41** (2008) 376-382
- [2] Roth S., Raul J-S., Willinger R. (2009) Finite element modelling of paediatric head impact: Global validation against experimental data. *Computer methods and programs in biomedicine* (2009).[www.intl.elsevierhealth.com/journals/cmpb](http://www.intl.elsevierhealth.com/journals/cmpb)
- [3] Gautam P., Valianthan A., Adhikari R. (2007) Stress and displacement patterns in the craniofacial skeleton with rapid maxillary expansion: A finite element method study. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, July (2007).
- [4] Iannetti G., Fadda M.t., Indrizzi E., Gennaro P., Spuntarelli G. (2004) Scoliosis of the cranial base: radiological and mathematical analysis using finite elements system analysis (FESA) of a case. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery* (2004) **32**, 220-227.
- [5] **Jehad Al-Sukhun, Risto Kontio, Christian Lindqvist (2006) Orbital Stress Analysis—Part I: Simulation of Orbital Deformation Following Blunt Injury by Finite Element Analysis Method**, available online 16 February 2006. <http://www.sciencedirect.com/>
- [6] Schutte Sander, Sven P.W. van den Bedem, Fred van Keulen, Frans C.T. van Helm, Huibert J. Simonsz (2006) A finite-element analysis model of orbital biomechanics. *Vision Research* **46** (2006) 1724-1731
- [7] Rakowski G., Kacprzyk Z. (2005) Metoda Elementów Skończonych w Mechanice konstrukcji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- [8] Al-Bsharat, A. and et.al. Intercranial Pressure in the Human Head Due to Frontal Impact Based on a Finite Element Model. Detroit, Michigan, Wayne State University.
- [9] Willinger, R., Sung, H., and Diaw, B. (1999) Development and Validation of a Human Head Mechanical Model. *Biomechanics* vol. **327**[I**ib**], 125-131. Paris, France, Academiedes Sciences/Elsevier.
- [10] Furusu, K. and et.al. (2001) Fundamental Study of Side Impact Analysis using the Finite Element Model of the Human Thorax. *Japan Society of Automobile Engineers Review* vol. **22**, 195-199. Elsevier Science BV.