

Sławomir MIECHOWICZ, Tomasz KUDASIK, Olimpia MARKOWSKAPOLITECHNIKA RZESZOWSKA, WYDZIAŁ BUDOWY MASZYN, KATEDRA KONSTRUKCJI MASZYN,
Al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów**Modele medyczne do badań doświadczalnych****Dr hab. inż. Sławomir MIECHOWICZ**

Pracownik Katedry Konstrukcji Maszyn Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. Prowadzone badania i zainteresowania naukowe: techniki obrazowania CT, MRI dla potrzeb Reverse Engineering, techniki Reverse Engineering i Rapid Prototyping w produkcji elementów o złożonych kształtach, techniki wspomagania komputerowego CAD/CAM/CAE oraz RP w modelowaniu medycznym, analiza numeryczna i doświadczalna w zastosowaniach medycznych.

e-mail: smiechowicz@prz.edu.pl

**Dr inż. Tomasz KUDASIK**

Pracownik Katedry Konstrukcji Maszyn Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. Zajmuje się zagadnieniami dotyczącymi poprawy konstrukcji zębatych przekładni falowych. Zajmuje się również analiza numeryczna i doświadczalna w zastosowaniach medycznych. Specjalizuje się głównie w prowadzeniu badań elastoptycznych zarówno w elementach konstrukcji maszyn jak i elementach medycznych.

e-mail: tkudasik@prz.edu.pl

**Dr inż. Olimpia MARKOWSKA**

Absolwentka Politechniki Rzeszowskiej. Ukończyła studia na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn. Obecnie zatrudniona jest na stanowisku adiunkta w Katedrze Odlewnictwa i Spawalnictwa PRZ. W dniu 21 grudnia 2012 roku uzyskała stopień naukowy doktora nauk technicznych w dyscyplinie mechanika nadany przez Radę Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

e-mail: Olimpia@prz.edu.pl

**1. Wprowadzenie**

Do analizy złożonych zagadnień medycznych oprócz metod numerycznych równolegle wykorzystywane są badania doświadczalne służące do weryfikacji uzyskanych wyników [1]. W tym przypadku konieczne jest wykonanie modeli fizycznych, na których można bezpośrednio przeprowadzić badania weryfikacyjne. Punktem wyjściowym całego procesu jest stworzenie modelu wirtualnego 3D-CAD, który następnie, z wykorzystaniem technik przyrostowych RP (ang. Rapid Prototyping), jest używany do wykonania modelu fizycznego RP [2]. Model taki może być podstawą do wykonania form odlewniczych z wykorzystaniem metody VC (ang. Vacuum Casting) [3,5]. Metoda ta umożliwia wykonanie większej liczby gotowych modeli z materiałów tańszych, co ma szczególne znaczenie w przypadku badań doświadczalnych gdzie istnieje duże prawdopodobieństwo zniszczenia modelu. Przykładem takich badań może być elastoptyka gdzie niezależnie od wykorzystanej metody badany model podlega trwałemu uszkodzeniu. Umożliwia ona dokonanie analizy rozkładu naprężeń zarówno na obiektach rzeczywistych jak i na ich modelach, gdy bezpośrednia ocena wyników jest niemożliwa [4]. Obiekty takie można badać zarówno w przypadku gdy zamocowane są w układzie rzeczywistym gdzie poddawane są obciążeniom wynikającym z ich charakteru pracy jak i obciążeniom w specjalnie do tego celu przygotowanym przyrządzie (rys. 1).

Streszczenie

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z wykorzystaniem modeli medycznych wykonanych technikami szybkiego prototypowania do badań doświadczalnych metodą elastoptyczną. Przeprowadzono analizę porównawczą przydatności wybranych materiałów w badaniach elastoptycznych metodą światła przechodzącego. Przedstawiono przykładowe wyniki analizy doświadczalnej wybranych modeli struktur anatomicznych. Potwierdzono przydatność wybranych metod modelowania medycznego w zastosowaniach eksperymentalnych.

Słowa kluczowe: modelowanie medyczne, elastoptyka, badania eksperymentalne.

Medical modelling for experimental tests**Abstract**

For the analysis of complex medical issues, besides numerical methods, one can simultaneously make use of experimental tests to verify the obtained results. In the case of an experimental test it is necessary to make physical models and to carry out verifying tests on them. The physical model of the examined object can be fabricated with Rapid Prototyping technology from 3D-CAD virtual model. The Physical Rapid Prototyping model enables identifying the medical problem more efficiently and reconstructing the pathological changes clearly for experimental tests. Based on the medical model of real anatomical structures it is possible to manufacture experimental models that reconstruct complex inner structures very precisely. It allows avoiding simplified assumptions to experimental analysis. The photoelastic method can be used to verify the numerical analysis of the stress distribution in spatial models. The experimental research can be performed on real objects or their models. The photoelastic method is mainly used in cases where the stress distribution needs to be tested in those object areas that are difficult to access or the inner areas of structures. Some aspects of application of Rapid Prototyping (RP) methods to photoelastic tests are presented in this paper. The comparative analysis of the usefulness of available RP resin models applied to photoelastic experiment is performed. The process of preparation of an experimental model for the photoelastic method is described. The usefulness of the chosen RP resins for experimental tests is confirmed.

Keywords: medical modelling, photoelastic examinations, experimental tests.



Rys. 1. Przyrząd do obciążania modeli wraz z polaryskopem firmy Vishay na światło odbite

Fig. 1. The test stand used to apply the load with a Vishay polariscope - optically sensitive layer method

- Wyniki badań elastoptycznych można ocenić w dwojaki sposób:
- jako badania ilościowe, stanowiące podstawę do określenia stanu naprężenia,
 - jako badania jakościowe, obrazujące lokalizacje stref niewralgicznych oraz poziomy gradientów wyteżenia.

Wyniki badań doświadczalnych mogą również stanowić podstawę korekty analiz numerycznych, a w konsekwencji akceptacji modelu numerycznego jako adekwatnego do rozważanego problemu.

W artykule przedstawiono własne doświadczenia w wytwarzaniu modeli medycznych do badań doświadczalnych. Model geometryczny czaszki został opracowany na podstawie danych tomo-

graficznych uzyskanych w wyniku skanowania rzeczywistej czaszki 44 letniego pacjenta. Akwizycja danych została przeprowadzona przy użyciu mikrotomografu stożkowego X-tek Benchtop CT 160Xi. Na podstawie danych CT został wygenerowany model wektorowy fragmentów czaszki, który była bazą do wykonania modeli fizycznych wybranymi technikami szybkiego prototypowania. Zastosowanie mikrotomografii przemysłowej umożliwiło odwzorowanie struktur wewnętrznych więzozrostu oraz tkanki gąbczastej kości.

Analiza dokładności wygenerowanego modelu więzozrostu oraz jego odwzorowanie na modelu fizycznym została opisana w [9].

2. Dobór materiału do badań – analiza porównawcza

Oprócz dotychczas wykorzystywanych żywic epoksydowych np. Epidian powstała możliwość zastosowania materiałów używanych w najnowszych metodach szybkiego prototypowania (Stereolitografia, PolyJet) [6]. Metody te umożliwiają bowiem wykonanie modeli medycznych dokładnie odwzorowujących strukturę wewnętrzną co pozwala na uzyskanie wyników analizy dotąd nieosiągalnych. Koniecznym zatem jest sprawdzenie właściwości nowych materiałów i stwierdzenie ich przydatności do badań elastoptycznych.

Zanim poddano analizie fragmenty więzozrostu przeprowadzono wstępne badanie na specjalnych próbkach wykonanych z następujących materiałów:

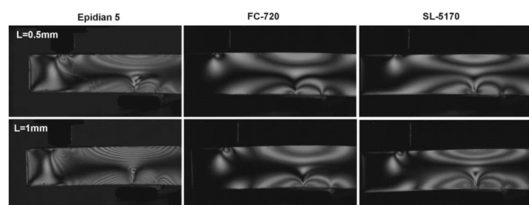
1. Żywica Epidian 51 – najczęściej wykorzystywana w badaniach elastoptycznych, posiada dobre i sprawdzone właściwości elastoptyczne,
2. Żywica SL-5170 – stosowana w stereolitografii,
3. Żywica FC-720 – stosowane w metodzie PolyJet.

Do analizy wykorzystano jednakowe próbki w postaci płytek o wymiarach 10x70x5mm. Próbki z żywic SL-5170 i FC-720 wykonano bezpośrednio z wykorzystaniem metod szybkiego prototypowania. Na ich podstawie wykonano próbkę z żywicy Epidian 51 wykorzystując technikę odlewania próżniowego w formie silikonowej. Wszystkie próbki poddano jednakowemu obciążaniu. Zastosowano wymuszenie w postaci przesunięcia liniowego L , którego wartość odmierzano na mikrometrze pomiarowym. Do obserwacji naprężeń w postaci izochrom został zastosowany polaryskop transmisyjny (na światło przechodzące).

Zadane obciążenia oraz uzyskane rzędy izochrom dla poszczególnych materiałów przedstawia poniższa tabela 1 oraz rys. 2.

Tab. 1. Wartości rzędu izochrom w zależności od obciążenia
Tab. 1. Values of the isochromatics order in relations to the applied load

		$L=0,25\text{mm}$	$L=0,5\text{mm}$	$L=0,75\text{mm}$	$L=1\text{mm}$
Epidian 51	m	3	5	7	10
FC-720	m	1	1.5	2.5	3.0
SL-5170	m	1.5	2	3	3.5



Rys. 2. Rozkład izochrom w badanych próbkach
Fig. 2. Distribution of isochromatics lines distribution in the tested samples

Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, że najlepsze właściwości elastoptyczne posiada żywica Epidian 51, która osiągnęła rząd izochromy większy od pozostałych materiałów. Żywice SL-5170 i FC-720 charakteryzują się, w porównaniu

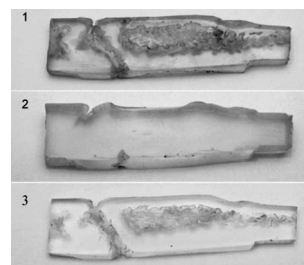
z Epidianem 51, słabszymi właściwościami lecz stopień zaobserwowanego zjawiska dwójłomności wymuszonej jest zadawalający i dopuszcza możliwość stosowania tych materiałów w badaniach elastoptycznych.

Żywica Epidian 51 posiada najlepsze właściwości elastoptyczne, jednak modele do badań są wykonywane metodą odlewania próżniowego, a co za tym idzie zalecana jest jedynie do modeli o pełnej strukturze. Pozostałe żywice wykorzystywane są w technikach szybkiego prototypowania, które umożliwiają wykonanie modeli dokładnie odwzorowujących strukturę wewnętrzną badanego elementu. Mogą więc być wykorzystane do analizy rozkładu naprężeń m.in. w modelach medycznych gdzie konieczne jest dokładne odwzorowanie struktur tkanek z pustymi przestrzeniami zamkniętymi wewnątrz. Stosowane dotąd materiały nie umożliwiały uwzględnienia struktury wewnętrznej kości. Opracowane modele były więc w znacznym stopniu uproszczonym obrazem obiektów rzeczywistych.

3. Model wycinka fragmentu więzozrostu czaszkowego

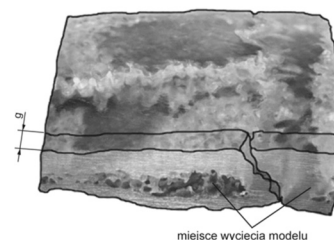
W celu uzyskania modelu wykonanego metodą odlewania z żywicy Epidian 51 odwzorowującego strukturę wewnętrzną zastosowano metodę odlewania z wykorzystaniem metody wytapiania modelu woskowego.

Analizie porównawczej poddano następnie wycinki wyodrębnione z fragmentów więzozrostu czaszkowego wykonanego różnymi technikami (rys. 3): PolyJet (model 1), odlewania z żywicy Epidian 51 (model 2 - pełny) jak i metodą odlewania z żywicy Epidian 51 z wykorzystaniem wytapianego modelu woskowego (model 3 – ze strukturą wewnętrzną).



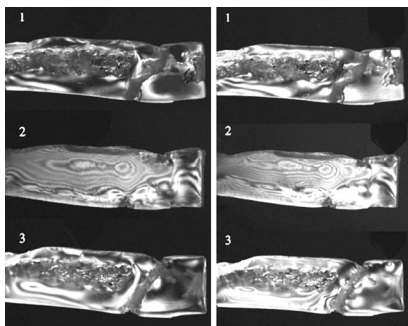
Rys. 3. Modele fragmentu więzozrostu do analizy metodą światła przechodzącego wykonane: 1) techniką JS PolyJet-FC-720, 2 – metodą odlewania, 3 – odlewania z wykorzystaniem metody wytapiania modelu woskowego
Fig. 3. Models of slices of syndesmosis cranii fabricated for photoelastic tests with: 1 – PolyJet-FC-720, 2 – vacuum casting method with silicone mould-Epidian 51, 3 – investment casting - Epidian 51 (lost wax casting)

Miejsce, z którego zostały wycięte płaskie modele o grubości $g=10\text{mm}$ przedstawiono na rysunku 4. Ponieważ do analizy została wykorzystana metoda światła przechodzącego wycinek więzozrostu jest płytką o jednakowej grubości. Płytki poddano obróbce polerskiej tak aby uzyskać właściwy stopień przezroczystości konieczny w badaniach elastoptycznych na światło przechodzące.



Rys. 4. Miejsce, z którego zostały wycięte płaskie modele o grubości $g=10\text{mm}$ do badań elastoptycznych na światło przechodzące
Fig. 4. Region of syndesmosis cranii, 10mm „slices” cut out models for photoelastic tests

Modele podano obciążeniu siłą skupioną po obu stronach więzozrostu w obszarze kości ciemieniowej oraz czołowej (rys. 6). Rozkłady izochrom w badanych wycinkach więzozrostu zostały pokazane na (rys. 5).



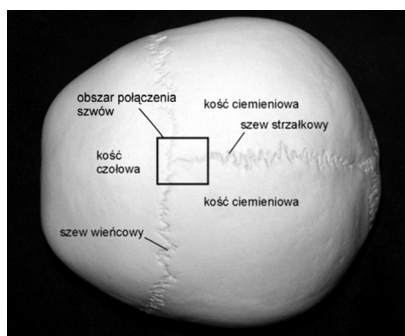
Rys. 5. Rozkład izochrom w modelu wycinka fragmentu więzozrostu czaszkowego wykonanego: 1 – techniką PolyJet – FC-720, 2 – metodą odlewania z żywicy Epidian 51, 3 – odlewania z żywicy Epidian 51 z wykorzystaniem metody wytapianego wosku

Fig. 5. Distribution of isochromatic lines in the tested samples of syndesmosis cranii fabricated with: 1 – PolyJet – FC-720, 2 – casting method with silicone mould- Epidian 51, 3 – investment casting - Epidian 51 (lost wax casting)

Model wykonany techniką odlewania (Epidian 51) wykazuje lepsze właściwości elastoptyczne od modelu wykonanego techniką PolyJet (żywica FC 720). Różnica ta jest widoczna w postaci osiągniętych wartości rzędu izochromy. Dla żywicy Epidian 51 osiągnięto rząd izochromy $m=5$ a dla materiału FC 720 około $m=2$.

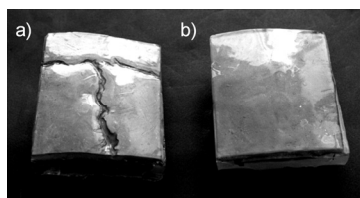
4. Model fragmentu więzozrostu czaszkowego

Do analizy wykorzystano model fragmentu więzozrostu czaszkowego na połączeniu szwu strzałkowego i szwu wieńcowego (rys. 6).



Rys. 6. Obszar połączenia szwu strzałkowego i wieńcowego na podstawie, którego wykonany został model JS PolyJet

Fig. 6. Region of syndesmosis cranii chosen for JS PolyJet model fabrication



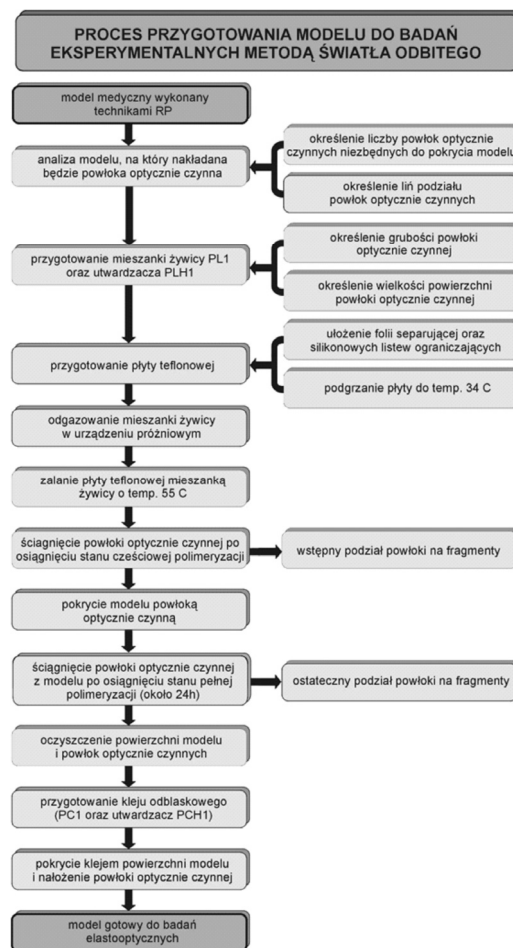
Rys. 7. Modele fragmentów kości czaszki do badań elastoptycznych na światło odbite (Epidian 51): a) z więzozrostem b) bez więzozrostu

Fig. 7. The models of the cranial bones with the optically sensitive coating (Epidian 51): a) with syndesmosis structure, b) without syndesmosis structure

Dla lepszego zobrazowania rozkładu izochrom w wybranym fragmencie czaszki wykonano modele w podziale 4:1. Model wyjściowy wykonany został techniką PolyJet, a następnie z wyko-

rzystaniem metody odlewania w formach silikonowych wykonano modele z żywicy tańszej, jakim jest przykładowo Epidian 51. Do celów porównawczych wykonano modele z więzozrostem jak i bez więzozrostu. Gotowe modele wraz z naklejoną powłoką optycznie czynną przedstawia rys. 7.

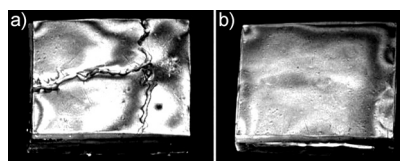
Etapy przygotowania modelu do badań elastoptycznych na światło odbite zostały pokazane na rysunku 8.



Rys. 8. Etapy przygotowania modelu do badań elastoptycznych metodą światła odbitego

Fig. 8. Optically sensitive layer method –preparation of the test model for experimental analysis

Przeprowadzenie badań eksperymentalnych na modelach fragmentu czaszki z więzozrostem i bez miało na celu ukazanie wpływu geometrii na rozkład naprężeń w interesujących nas obszarach kostnych. Analizując rozkład izochrom i kierunki ich rozchodzenia można stwierdzić, że w przypadku modelu z więzozrostem kość czołowa była najmniej obciążona. Isochromy rozchodziły się od kości ciemieniowych w stronę kości czołowej, a więzozrost wieńcowy stanowił barierę dla dalszej propagacji naprężeń. W przypadku modelu bez więzozrostu izochromy pojawiły się na całej powierzchni fragmentu czaszki już w pierwszej fazie obciążania (rys. 9).



Rys. 9. Rozkład izochrom w modelu fragmentu kości czaszki: a) z więzozrostem b) bez więzozrostu, obciążonego wzdłuż kości czołowej i kości ciemieniowych prostopadle do szwu wieńcowego

Fig. 9. Distribution of isochromatic lines in the tested samples of syndesmosis cranii: a) with syndesmosis structure, b) without syndesmosis structure

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że używane jak dotąd do badań uproszczone modele czaszki, nie uwzględniające tak ważnego elementu struktury kostnej jakim jest więzozrost, nie mogły przedstawiać obrazu dokładnego. Wykorzystanie modeli dokładniejszych z więzozrostem czaszkowym pozwala na uzyskanie wyników bardziej zbliżonych do rzeczywistości.

5. Model kości sklepienia czaszki

Do badań wykorzystano model sklepienia czaszki wykonany techniką SLS (rys. 10). Na jego podstawie zostały stworzone formy silikonowe, a następnie techniką odlewania próżniowego modele z żywicy epoksydowej Epidian 51.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że modele wykonane techniką SLS charakteryzują się lepszymi właściwościami wytrzymałościowymi w porównaniu do modeli odlanych z żywicy epoksydowej Epidian 51, co umożliwia przeprowadzenie wielokrotnych prób przy mniejszym ryzyku ich uszkodzenia. Dodatkowo technika ta umożliwia odwzorowanie struktury wewnętrznej (w przeciwieństwie do modeli wykonanych metodą odlewania próżniowego), co wpływa na uzyskanie wyników bardziej zbliżonych do rzeczywistości. Jedynym poważnym problemem tej techniki jest uzyskanie powierzchni modelu trudnej do obróbki wykańczającej. Mikroporowatość powierzchni przyczynia się bowiem do uzyskania powłoki optycznie czynnej o niewielkim stopniu przezroczystości. Koniecznym staje się przeprowadzenie dokładnej obróbki polerskiej powłoki.

Badane modele poddano różnym przypadkom obciążenia używając rozkłady izochrom na powierzchni sklepienia czaszki. W przypadku modelu z więzozrostem w trakcie zmiany obciążenia zaobserwowano pojawienie się dodatkowych punktów koncentracji naprężeń w obszarze więzozrostu, co znacznie wpłynęło na końcowy obraz rozkładu izochrom (rys. 10).



Rys. 10. Model SLS sklepienia czaszki z naklejoną powłoką
Fig. 10. The SLS model of the cranial syndesmosis with the optically sensitive coating

6. Podsumowanie

Zastosowanie fizycznych modeli medycznych może wprowadzić nową jakość w badaniach eksperymentalnych. W przypadkach trudnych do zdiagnozowania, ze względu na skomplikowaną strukturę wewnętrzną, standardowy obraz medyczny może nie być wystarczająco czytelny i jednoznaczny do celów badawczych [7]. Model fizyczny umożliwi lepsze odwzorowanie zmian patologicznych problemu medycznego analizowanego doświadczalnie. Na przykładzie modelu medycznego rzeczywistego układu anatomicznego można wykonać model odwzorowujący złożone struktury wewnętrzne. Pozwala to na uniknięcie uproszczeń modelowych w badaniach doświadczalnych [8].

Praca wykazała dużą przydatność zastosowanych materiałów i metod do odtwarzania skomplikowanych struktur geometrycznych. Modele wykonane w skali 2:1 i 4:1 okazały się bardzo pomocne w analizie doświadczalnej problemu medycznego.

Dobór odpowiedniego materiału do wykonania modelu fizycznego przeznaczonego do badań doświadczalnych zależy w głów-

nej mierze od charakteru badań. Aby rozszerzyć zakres stosowanych materiałów autorzy opracowali metodę: „Sposób odwzorowania modeli medycznych ze strukturą wewnętrzną i z wykorzystaniem materiałów o odmiennych właściwościach” (zgłoszenie patentowe P.398644) [10].

7. Wnioski

- Od dokładności danych uzyskanych na podstawie badania CT zależy jakość wykonanego modelu fizycznego wykorzystywanego następnie w badaniach doświadczalnych.
- Techniki szybkiego prototypowania mogą być efektywnym narzędziem do wytwarzania skomplikowanych, trójwymiarowych modeli fizycznych, do badań eksperymentalnych.
- Nie istnieje jedna, uniwersalna technika RP do wykonywania modeli medycznych. W każdej technologii RP występują odmienne uwarunkowania, które należy uwzględnić w procesie modelowania. Należą do nich między innymi dokładność wybranej metody, stosowane materiały, ograniczenia wymiarowe oraz technologiczne.
- Wybór odpowiedniej metody prototypowania pozwala na znaczną redukcję kosztów wykonania modelu do badań eksperymentalnych.

8. Literatura

- [1] Bandak F., Vandervorst M., Chilton W., Stuhmiller J., Stuhmiller L.: An imaging-based computational and experimental study of skull fracture: Finite element model development. *J. Neurotrauma*, 12(4), 679–688, 1995.
- [2] Curtis J.D., Hanna S.D., Patterson E.A., Taroni M.: On the Use of Stereolithography for the Manufacture of Photoelastic Models, *Society for Experimental Mechanics*, 43, 2, 2003.
- [3] Fan L., Huang QF, Zhang FQ, Xia YP.: A new method of fabricating photoelastic model by rapid prototyping. *Shanghai Kou Qiang Yi Xue*. 20(5):470-3, 2011.
- [4] Iliescu N., Dan Pastrama S., Gruionu L, Jiga G.: Biomechanical changes of hip joint following different types of corrective osteotomy – photoelastic studies, *Acta of Bioengineering and Biomechanics* Vol. 10, No. 3, 2008.
- [5] Kapkowski J., Kujawińska M.: A New hybrid technique for photoelastic investigation, proceeding of 10th, International Conference on Experimental Mechanics, Lisbon, 1994.
- [6] Karalekas D.E, Agelopoulos A.: On the use of stereolithography built photoelastic models for stress analysis investigations *Materials & Design*, Volume 27, Issue 2, 100-106, 2006.
- [7] Kopecki H.: Problemy analizy stanów naprężenia ustrojów w świetle badań eksperymentalnych metodami mechaniki modelowej. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, nr 78, *Mechanika*, z. 26, Rzeszów 1992.
- [8] Kopkiewicz M.: *Metody doświadczalne badań konstrukcji*. Oficyna Wyd. Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2003.
- [9] Kudasik T., Miechowicz S., Chrzan R., Urbanik A. : 3D reconstruction of complex surfaces of syndesmoses crania based on the spiral CT and CBCT data. Springer - Verlag, *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, t.6, s.265-266, Berlin 2011.
- [10] Markowski T., Miechowicz S., Kudasik T., Markowska O.: Methods of Design and Manufacturing of Inner Bone Structures of Medical Test Models with Rapid Prototyping Techniques. 7th International Conference Production Engineering 2011 "Innovations and Technologies of the Future", s.255-258, Wrocław 2011.

otrzymano / received: 07.02.2014

przyjęto do druku / accepted: 03.03.2014

artykuł recenzowany / revised paper