

Badania doświadczalne i analiza przypadków klinicznych kompresyjnych złamań kręgosłupa piersiowo-lędźwiowego

Thoracolumbar Compression Fractures – Experimental Study and Case Presentation

Piotr Cieślik^{1(B,D,E,F)}, Anna Floriańczyk^{2(B,D,E,F)}, Krzysztof Kwiatkowski^{1(A,D,E)},
Anna Dąbrowska-Tkaczyk^{2(A,B,D,E,G)}, Konstanty Skalski^{2(A,D,E)}

¹ Klinika Traumatologii i Ortopedii z Oddziałem Zakażeń Narządu Ruchu Wojskowy Instytut Medyczny, Warszawa

² Instytut Mechaniki i Poligrafii, Politechnika Warszawska, Warszawa

¹ Department of Traumatology and Orthopaedics with Musculoskeletal Infection Ward, Military Institute of Medicine, Warszawa

² Institute of Mechanics and Printing, Warsaw University of Technology, Warszawa

STRESZCZENIE

Wstęp. W złamaniach kompresyjnych kręgosłupa leczonych operacyjnie wykonuje się nastawianie i stabilizację przeznasadową z wykorzystaniem ligamentotaksji. Mechanizm ligamentotaksji nie jest do końca wyjaśniony. Z tego też względu ważna jest analiza różnych danych klinicznych w celu określenia obszaru badawczego istotnego dla wyjaśnienia tego mechanizmu.

Materiał i metody. Opracowano zasady wyboru danych z informacji medycznej pacjentów dla przypadków złamań trzonów kręgów kręgosłupa piersiowo-lędźwiowego do tworzonej bazy danych oraz zasady przyporządkowania przypadków do odpowiedniej grupy wg klasyfikacji medycznej AO/Magerl. W przyjętym postępowaniu włączono do oceny złamania wyniki wizualizacji segmentów kręgosłupa z uszkodzonym trzonem oraz ich modele wirtualne i materialne, dzięki wykorzystaniu danych przedoperacyjnych CT pacjentów i komputerowemu ich przetworzeniu za pomocą specjalistycznego oprogramowania.

Wyniki. Posługując się opracowanymi modelami wirtualnymi 3D-CAD odcinków kręgosłupa i modelami pojedynczych uszkodzonych trzonów oraz modelami materialnymi RP w technologii FDM dokonano klasyfikacji przypadków klinicznych w bazie danych pod kątem biomechanicznym. Wskazano przypadki, w których ligamentotaksja może mieć zastosowanie.

Wnioski. 1. Z analizy badań nad ligamentotaksją wynika, że należy skoncentrować się na przypadkach złamań wieloodłamowych i nieosteoporotycznych. 2. Wspomaganie badań modelami wirtualnymi 3D-CAD i materialnymi RP segmentów struktur kręgosłupa wydaje się być przydatne nie tylko w podjętych badaniach, ale także w praktyce medycznej.

Słowa kluczowe: złamanie kompresyjne, kręgi, segment kręgosłupa lędźwiowego, repozycja trzonu, ligamentotaksja, przetwarzanie danych CT, modele wirtualne i materialne

SUMMARY

Background Epiphyseal stabilisation and reduction with the use of ligamentotaxis are employed in the surgical treatment of compression fractures of the spine. The mechanism of ligamentotaxis has not been fully elucidated. Therefore, it is fundamental to analyse various clinical data to determine the study area relevant to the elucidation of this mechanism.

Material and methods. We developed criteria for data selection from patient medical records for a newly-created database regarding cases of thoracolumbar vertebral body fractures. We also developed rules for assigning cases to a specific group according to the AO/Magerl classification. The methodology of fracture assessment involved the results of visualization of the spinal segment including the injured vertebral bodies and their virtual and material models. To this end, preoperative CT images were processed with specialised computer software.

Results. A biomechanically-oriented classification of clinical cases in the database was carried out based on 3D-CAD virtual models of spinal segments and models of individual injured vertebral bodies and RP material models in FDM technology. We indicated cases in which ligamentotaxis could be of use.

Conclusions. 1. Our analysis of ligamentotaxis research shows that the focus should be on cases of comminuted and nonosteoporotic fractures. 2. Supporting work-up with 3D-CAD virtual and RP material models of spinal structures appears to be useful not only for the purposes of the present study but also in medical practice.

Key words: compression fracture, vertebrae, lumbar spinal segment, vertebral body repositioning, ligamentotaxis, CT data processing, virtual and material models

WSTĘP

Spośród różnych typów złamań kręgosłupa w praktyce klinicznej najczęściej stosuje się klasyfikację według Denisa [1] czy AO [2,12]. Według danych z piśmiennictwa złamania z pogranicza piersiowo-lędźwiowego stanowią ok. 33% przypadków klinicznych [3]. Zazwyczaj są to złamania pojedynczych kręgów, sporadycznie kilku, przy czym nie wszystkie z nich kwalifikują się do leczenia operacyjnego [4]. W złamaniach, które wymagają leczenia operacyjnego wykonuje się nastawienie i stabilizację przeznaczoną z wykorzystaniem ligamentotaksji (tj. nastawienia przez rozciągnięcie więzadeł). Mechanizm nastawiania odłamów uszkodzonego trzonu kręgu nie jest do końca wyjaśniony i opisany, a także nie do końca opracowano parametryzację kliniczną operacji [5-8]. Z tego też względu istotna jest analiza różnych danych klinicznych w celu wydzielenia reprezentatywnej grupy przypadków i określenia obszaru badawczego, w celu wyjaśnienia znaczenia i roli ligamentotaksji w mechanizmie nastawiania złamanego trzonu kręgu.

Głównym celem badań było opracowanie zasad gromadzenia, przetwarzania i analizy informacji medycznej dotyczącej przypadków złamań kompresyjnych kręgosłupa pod kątem jej wykorzystania do badania zjawiska ligamentotaksji występującego podczas procedury nastawiania i stabilizacji. Do klasyfikacji przypadków w tworzonej bazie danych wykorzystano istniejące kryteria medyczne oraz opracowane modele wirtualne 3D-CAD, a także modele materialne segmentów struktur kostnych kręgosłupa oraz pojedynczych uszkodzonych trzonów kręgów wykonane techniką szybkiego prototypowania. W wyniku przeprowadzonej analizy wybrano przypadki kliniczne, dla których mechanizm ligamentotaksji może mieć zastosowanie.

MATERIAŁ I METODY

Realizowane badania skoncentrowane były na biomechanicznych aspektach procedury nastawiania złamanego trzonu kręgu kręgosłupa piersiowo-lędźwiowego z wykorzystaniem ligamentotaksji pod kątem wyjaśnienia tego mechanizmu oraz na zaplanowaniu odpowiednich pomiarów śródoperacyjnych. Badanie zjawisk biomechanicznych w strukturach tkankowych podczas zabiegu nastawiania oraz opracowanie odpowiednich modeli, wymaga zdefiniowania przypadków klinicznych, dla których ligamentotaksja ma zastosowanie, jak również dokładnego poznania kolejnych etapów techniki operacyjnej.

W praktyce medycznej wypracowane zostały metody klasyfikacji przypadków klinicznych złamań krę-

BACKGROUND

The Denis [1] and AO [2,12] classifications are most commonly used to categorize spinal fractures in clinical practice. According to the literature, fractures at the thoracolumbar junction account for about 33% of clinical cases [3]. They are usually fractures of individual vertebrae while fractures of several vertebrae are rare [4]. Surgery is not always necessary. Patients with surgically treated fractures undergo epiphyseal stabilisation and reduction with the use of ligamentotaxis (reduction by ligament stretching). The mechanism of the reduction of fragments of injured vertebral bodies has not been fully elucidated and described and the clinical parameters of this procedure have not been fully determined [5-8]. Therefore it is important to analyse various clinical data in order to distinguish a representative group of cases and to determine the area of research to explain the significance and role of ligamentotaxis in the mechanism of fractured vertebral body reduction.

The main aim of the study was to develop the principles of collecting, processing and analysing medical records concerning cases of compression fractures of the spine with special regard to the use of such data to study ligamentotaxis occurring during reduction and stabilisation procedures. To this end, we developed a database that included cases classified according to existing medical criteria and 3D-CAD virtual models and material models of spinal bony structures and individual injured vertebral bodies generated with the rapid prototyping technique. In the course of analysis, we selected those clinical cases in which ligamentotaxis could be useful.

MATERIAL AND METHODS

The study focused on the biomechanical aspects of reduction of fractured thoracolumbar vertebral bodies using ligamentotaxis in order to explain the mechanism and on planning appropriate intraoperative measurements. The assessment of biomechanical phenomena in tissue structures during a reduction procedure and the development of appropriate models require defining clinical cases where ligamentotaxis could be used and also precisely describing the successive stages of the operative technique.

Systems for classifying clinical cases of spinal fractures (including the thoracolumbar segment [1,2,9-14]) are in use in medical practice. They are based on clinical examination and radiographic work-up.

gosłupa, w tym także w odniesieniu do kręgosłupa piersiowo-lędźwiowego [1,2,9-14] na podstawie badań klinicznych i diagnostyki radiologicznej.

W przyjętej metodzie badań zakłada się włączenie do oceny charakteru złamania wyników wizualizacji segmentów kręgosłupa z uszkodzonym trzonem w postaci geometrycznych modeli wirtualnych (3D-CAD) oraz modeli materialnych wytworzonych na ich podstawie metodą szybkiego prototypowania (ang. rapid prototyping RP) w technologii FDM (ang. fused deposition modeling) [15]. Wykorzystane zostały dane przedoperacyjne z tomografii komputerowej pacjentów po komputerowym przetworzeniu za pomocą specjalistycznego oprogramowania.

Badanie przypadków złamań trzonu kręgu pod kątem kwalifikacji ich do zabiegu z zastosowaniem metody ligamentotaksji zrealizowano poprzez opracowanie biomechanicznej bazy danych złamań trzonów kręgów w obszarze piersiowo-lędźwiowym kręgosłupa. Modele 3D-CAD przedstawione na Ryc. 1. są wybranymi przykładami z tworzonej w ramach projektu bazy danych.

W biomechanicznej bazie danych przypadków klinicznych, uwidocznionej przykładowo na Ryc. 2, znalazły się następujące pozycje:

- dane z karty informacyjnej pacjenta z zachowaniem poufności danych osobowych,
- zestawy obrazów z tomografii komputerowej CT przed operacją i po operacji w postaci plików w formacie DICOM do odtworzenia modeli struktur kostnych,
- zestawy obrazów z rezonansu magnetycznego MR przed operacją i po operacji w postaci plików DICOM do odtworzenia modeli struktur więzadłowych,

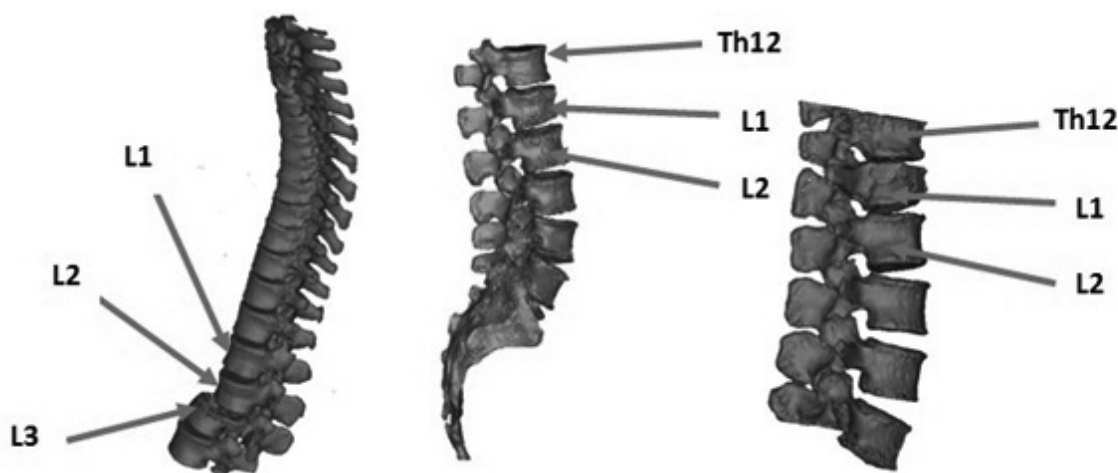
Our methodology of fracture assessment additionally includes the results of visualization of the spinal segment including the injured vertebral body in the form of geometric virtual models (3D-CAD) and material models generated on their basis using the rapid prototyping method (RP) in FDM (Fused Deposition Modeling) technology [15]. Preoperative CT data are processed with specialised computer software.

The assessment of cases of vertebral body fractures with regard to qualifying them for a procedure employing ligamentotaxis was performed via the development of a biomechanical database of vertebral body fractures in the thoracolumbar spine. Figure 1 presents selected examples of 3D-CAD models included in the database created within the framework of our research project.

The biomechanical database of clinical cases, presented in Figure 2, comprises the following data:

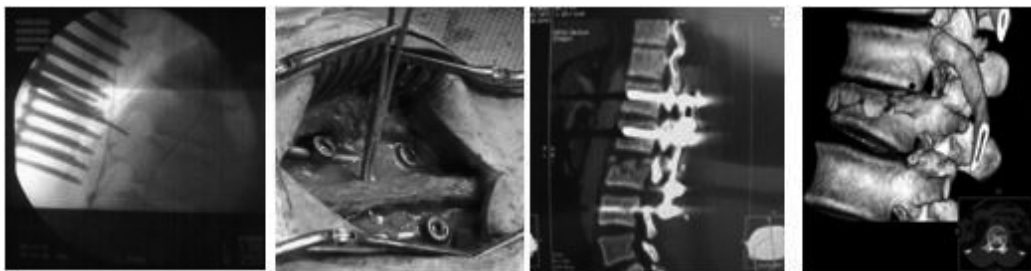
- data obtained from patient medical records (no personal data were revealed),
- sets of pre- and postoperative CT images in the DICOM standard necessary for bony structure modelling;
- sets of pre- and postoperative MRI images in the DICOM standard necessary for ligamentous structure modelling;
- photographic records of the course of surgeries in .jpg files; selected intraoperative radiographs necessary for the assessment of surgery outcomes.

Radiographic imaging reports obtained as part of the medical procedures were added to the database.



Ryc. 1. Modele geometryczne 3D-CAD odcinków kręgosłupa ludzkiego – pacjenci: S.M., S.K., G.T.

Fig. 1. 3D-CAD geometric models of human spine – patients S.M., S.K., G.T.



Ryc. 2 Przykładowe materiały na temat przypadków klinicznych zgromadzone w bazie danych: a – śródoperacyjne zdjęcia rtg; b – zdjęcia śródoperacyjne .jpg; c – pooperacyjne obrazy TK; d) – model 3D wygenerowany na podstawie danych TK

Fig. 2. Sample data related to the clinical cases gathered in the database: a – intraoperative radiographs; b – intraoperative .jpg images; c – postoperative CT images; d – a 3D model generated on the basis of CT data

- dokumentacja fotograficzna z przebiegu operacji w postaci plików w formacie jpg., wybrane zdjęcia śródoperacyjne RTG służące do oceny efektów realizacji procedury operacyjnej.

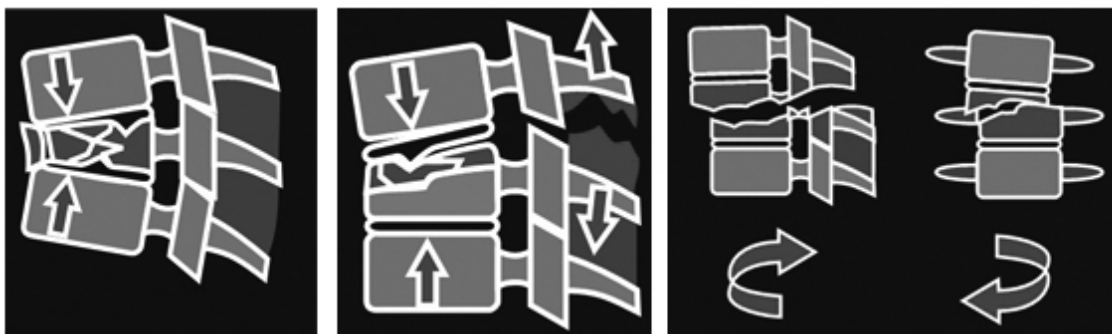
Do bazy danych wprowadzono wyniki badań radiologicznych wykonanych w ramach procedury medycznej.

Analiza przypadków klinicznych

W piśmiennictwie można znaleźć różne klasyfikacje złamań kręgosłupa, jednakże na potrzeby projektu zdecydowano się posłużyć kilkupięciową klasyfikacją AO/Magerl [2,12]. Według tej klasyfikacji na najwyższym, najbardziej ogólnym poziomie występują trzy typy złamań kręgosłupa: A, B i C, Ryc. 3. Do opracowania modeli wirtualnych, a następnie materialnych analizowanego odcinka kręgosłupa po złamaniu urazowym potrzebne są dane z dokumentacji medycznej pacjenta (przede wszystkim dane obrazowe). W ramach tej pracy analizie poddano przetworzone dane z obrazowania medycznego pacjentów leczonych w Klinice Traumatologii i Ortopedii Wojskowego Instytutu Medycznego w Warszawie. Spośród wielu przypadków klinicznych do

Analysis of clinical cases

A variety of classifications of spinal fractures can be found in the literature. For the purposes of our study, we decided to employ the multilevel AO/Magerl classification [2,12]. According to this classification the highest and most general level of division comprises three types of spinal fractures: A, B and C (Figure 3). Patient medical records (especially imaging data) were necessary for the development of virtual, and then material models of the injured spinal segment. This study comprised the analysis of processed images of injuries treated at the Department of Traumatology and Orthopaedics, Military Institute of Medicine in Warsaw. Of a large number of clinical cases, models were generated for 5 patients, whose CT images were stored in the DICOM



Ryc. 3. Schematy złamań według klasyfikacji AO/Magerl : a – kompresyjne (complete burst – A3.3); b – kompresyjno-dystrakcyjne (type A+post ligament – B1.2); c – kompresyjno-rotacyjne (shear slice fracture – C3.1)

Fig. 3. Fractures classified according to AO/Magerl [12]: compression fracture (complete burst fracture – A3.3); b – compression and distraction (type A+post ligament fracture– B1.2); c – compression and rotation fracture (shear slice fracture – C3.1)

odtworzenia modeli wybrano zestawy plików DICOM z tomografii komputerowej dla 5 pacjentów. Kryteriami wyboru określonego przypadku klinicznego były: charakter urazu oraz obszar uszkodzenia. W opisie uwzględniono także okoliczności urazu. Podkreślić należy, że z punktu widzenia badania mechanizmu ligamentotaksji przedmiotem szczególnego zainteresowania były dane pacjentów ze złamaniami niestabilnymi typu zgięciowego trzonów kręgów odcinka piersiowo-lędźwiowego.

Operacyjne nastawianie złamanego trzonu kręgu

Pacjenci, których dane zgromadzono w utworzonej bazie, byli operowani poprzez wykonanie zabiegu spondylodezy (stabilizacji z usztywnieniem) na dwóch, trzech lub czterech poziomach z użyciem różnych typów instrumentarium traspedicularnego, w tym: USS Fracture, systemu Click’X Standard, systemu Omega 21. Dla wspomnianych przypadków klinicznych zgromadzono dane w postaci plików w formacie DICOM, badań radiologicznych, kart informacyjnych leczenia szpitalnego i dla części przypadków – plików z badań MR oraz TK po operacji.

WYNIKI

Na podstawie przyjętych kryteriów przeprowadzono klasyfikację przypadków z utworzonej bazy danych, posługując się opracowanymi modelami wirtualnymi 3D-CAD odcinków kręgosłupa oraz modelami pojedynczych uszkodzonych trzonów, jak również odpowiadającymi im modelami materialnymi wytworzonymi techniką szybkiego prototypowania w technologii FDM [12,15].

Jak pokazała analiza zgromadzonych danych na temat przypadków klinicznych decyzję o kwalifikacji do operacji nastawiania przez repozycję podejmowano po rozpoznaniu klinicznym i przeprowadzeniu badań rentgenowskich oraz TK. Przypadki złamań kręgów można podzielić na dwie grupy:

1. Złamania osteoporotyczne (niskoenergetyczne) [16,17].
2. Złamania kompresyjno-rotacyjne (wg klasyfikacji Sir Franka Holdswortha [11]).

Rozpoznanie i klasyfikacja przypadków medycznych

W wyniku przeprowadzonych analiz dokonano zestawienia danych medycznych zawierających rozpoznanie z klasyfikacją typu złamania oraz odpowiednim modelem 3D-CAD i modelem materialnym (Tab. 1). W Tabeli 1 zestawiono poddane wstępnej analizie dane z tomografii komputerowej dla 5 pacjentów z uszkodzonym w wyniku urazu kręgosłupem

standard. The nature and site of injury were the main criteria for case selection. The circumstances of injury were also described. Importantly, data of patients with unstable flexion-type fractures of thoracolumbar vertebral bodies were a particular focus of analysis from the viewpoint of ligamentotaxis mechanism.

Surgical reduction of a fractured vertebral body

Patients whose data were entered into the database underwent spondylodesis (stabilisation and immobilisation) on two, three or four levels with the use of various transpedicular systems, such as USS Fracture, Click’X Standard system or Omega 21 system. The data collected comprised DICOM files, radiographic imaging reports, discharge summaries and, in some cases, postoperative MRI and CT images.

RESULTS

The criteria were the grounds for the classification of clinical cases based on 3D-CAD virtual models of spinal segments and models of individual injured vertebral bodies as well as corresponding RP material models generated in FDM technology [12,15].

Data analysis revealed that the decision to qualify a patient for reduction surgery via repositioning was made following clinical diagnosis and radiographic and CT imaging. Spinal fractures may be divided into two groups:

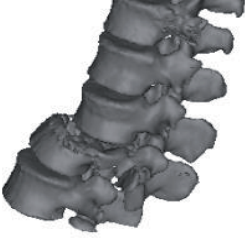
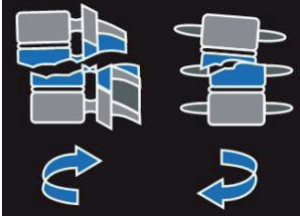
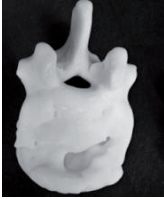

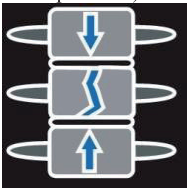



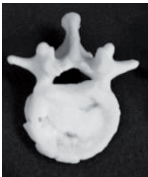






1. Osteoporotic (low-energy) fractures [16,17].
2. Compression and rotation fractures (Holdsworth classification [11]).

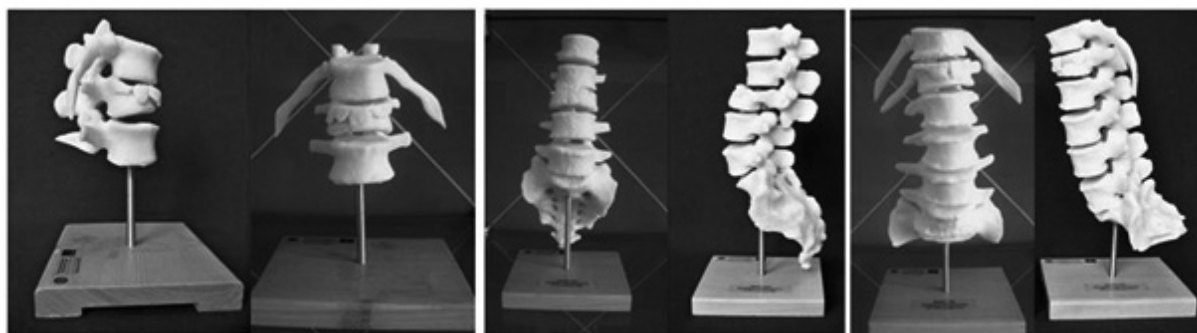
Diagnosis and classification of medical cases

In the course of analysis, we compared medical data including the diagnosis accompanied with fracture type classification to an appropriate 3D-CAD and material model (Table 1). Table 1 presents the results of preliminary analysis of CT data of 5 patients with thoracolumbar injury of the spine. Information collected for each patient was supplemented

Tab. 1. Zestawienie i klasyfikacja wybranych przypadków klinicznych

Tab. 1. Comparison and classification of selected clinical cases

Lp. / No.	Przypadek kliniczny / Clinical case	Model 3D-CAD segmentu / 3D-CAD model of the segment	Klasyfikacja przypadku według AO/Magerl / AO/Magerl classification	Model materialny złamanego trzonu / Material model of the fractured vertebral body
1.	<p>Pacjent S.M, wiek: 37 lat Okoliczności urazu : Upadek z wysokości Rozpoznanie Złamanie trzonów kręgów L1, L2, L3, (L3- wybuchowe); Złamanie wyrostków poprzecznych L1, L2, L3 oraz łuków L3 i L4. Patient S.M., 37 years old Circumstances of injury: Fall from a height Diagnosis: L1, L2, L3 vertebral body fracture (burst fracture of L3); fractures of L1, L2, L3 transverse processes and of L3, L4 arches.</p>	<p>Th12 –L4</p> 	<p>Złamanie kompresyjno-rotacyjne (shear slice fracture – C3.1) / Compression and rotation fracture (shear slice fracture – C3.1)</p> 	<p>Model trzonu L3 / L3 vertebral body model</p> 
2.	<p>Pacjent S.K. – wiek: 76 lat Okoliczności urazu: Wypadek komunikacyjny Rozpoznanie Złamanie trzonu kręgu L1 Patient S.K., 76 years old Circumstances of injury: Road accident Diagnosis: L1 vertebral body fracture</p>	<p>Th12 –L3</p> 	<p>Złamanie kompresyjne, (Sagittal Split A2.1)/ Compression fracture (Sagittal Split A2.1)</p> 	<p>Model trzonu L1 / L1 vertebral body model</p> 
3.	<p>Pacjent O.A – wiek: 33 lat Okoliczności urazu: Upadek z wysokości Rozpoznanie Złamanie trzonu kręgu L1 Patient O.A., 33 years old Circumstances of injury: Fall from a height Diagnosis: L1 vertebral body fracture</p>	<p>Th12 – L2</p> 	<p>Złamanie kompresyjne, wybuchowe, wieloodłamowe Complete burst A3.3 / Compression fracture, burst and comminuted type (Complete burst A3.3)</p> 	<p>Model trzonu L1 / L1 vertebral body model</p> 
4.	<p>Pacjent G.T. – wiek: 60lat Okoliczności urazu: Upadek Rozpoznanie Złamanie trzonu kręgu L1 Patient G.T., 60 years old Circumstances of injury: Fall Diagnosis: L1 vertebral body fracture</p>	<p>Th12 – L3</p> 	<p>Złamanie kompresyjne Pincer fracture A2.3 / Compression fracture (Pincer fracture A2.3)</p> 	<p>Model trzonu L1 / L1 vertebral body model</p> 
5.	<p>Pacjent P.A. – wiek: 45lat Okoliczności urazu: Wypadek komunikacyjny Rozpoznanie Złamanie trzonu kręgu L1 Patient P.A., 45 years old Circumstances of injury: Road accident Diagnosis: L1 vertebral body fracture</p>	<p>Th11 – L3</p> 	<p>Złamanie kompresyjne, wybuchowe, wieloodłamowe Complete burst A3.3 / Compression fracture, burst and comminuted type (Complete burst A3.3)</p> 	<p>Model trzonu L1 / L1 vertebral body model</p> 



Ryc. 4. Przykłady modeli materialnych segmentów kręgosłupa ze złamaniem kompresyjnym w płaszczyźnie strzałkowej i czołowej wykonane techniką RP w technologii FDM, odpowiednio: a) pacjent O.A., b) pacjent S.M., c) pacjent G.T.

Fig. 4. Examples of material models of spinal segments with compression fractures in the sagittal and frontal plane executed with RP technique in FDM technology (a) patient O.A., b) patient S.M., c) patient G.T.)

piersiowo-lędźwiowym. Informacje zgromadzone dla poszczególnych pacjentów uzupełniono o typy złamań oraz modele 3D-CAD i modele materialne pojedynczych uszkodzonych kręgów wykonanych technologią FDM. Dla wybranych pięciu pacjentów na podstawie danych z obrazowania komputerowego (TK) opracowano modele 3D-CAD odcinków kręgosłupa z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania. Przykłady modeli materialnych w płaszczyźnie czołowej i strzałkowej pokazano na Ryc. 4. Wykonano również modele pojedynczych uszkodzonych trzonów, w celu przyporządkowywania wybranych przypadków złamań kręgów do określonych typów według przyjętej klasyfikacji (Tab. 1) oraz oszacowania stopnia stenozы kanału kręgowego i oceny biomechanicznej charakteru złamania kręgu.

DYSKUSJA

Wraz z rozwojem stosowania implantów w praktyce chirurgicznej pojawiły się systemy technicznego wspomaganie operacji związane z monitoringiem implantacji, w tym z technikami obrazowania medycznego, czy z rozwiązaniami technicznymi zapewniającymi właściwą realizację czynności chirurgicznych, jak np. prawidłowe wprowadzenie śrub do trzonu kręgu [22,23]. W tym stanie rzeczy, w piśmiennictwie spotykany jest pogląd, że aktualnie poziom powikłań związanych z niewłaściwą implantacją śrub jest niski i wiąże się głównie z doświadczeniem chirurga [24]. Problemem może być, w dalszej perspektywie, wpływ nastawiania z udziałem ligamentotaksji oraz pourazowej stabilizacji na usztywnienie odcinka kręgosłupa oraz skutki oddziaływania bardziej sztywnej struktury na sąsiadujące kręgi [25]. Stąd też wynika potrzeba prowadzenia badań doświadczalnych i modelowych. Przedstawiane w piśmiennictwie metody i wyniki pomiarów parametrów fizycznych, takich jak np. siły czy przemieszczenia

with data on fracture type and 3D-CAD and material models of individual injured vertebrae generated with FDM technology. Specialised software was used to develop 3D-CAD models of spinal segments basing on CT data of the 5 patients. Sample material models in the frontal and sagittal plane are presented in Figure 4. Models of individual injured vertebral bodies were also generated in order to assign the selected fracture cases to particular classification types (Tab. 1) and assess the degree of spinal canal stenosis and the biomechanical type of fracture.

DISCUSSION

Technical support systems for surgery were introduced in the wake of the development of implant surgery. Their purpose was to facilitate monitoring of implantation procedures, including techniques of medical imaging or technical solutions ensuring proper execution of surgical activities, such as appropriate introduction of screws into vertebral bodies [22,23]. In this situation, some authors have expressed the view that the level of complications associated with inadequate screw implantation is low and depends mainly on the experience of the operator [24]. The immobilisation of a spinal segment and the impact of a more rigid structure on adjacent vertebrae may prove to be adverse effects of reduction by ligamentotaxis and posttraumatic stabilisation in the longer term [25]. Therefore, experimental and model studies appear to be necessary. The techniques and results of measurement of physical parameters, such as the force or displacement, presented in the literature to date have most often been concerned with

najczęściej odnosiły się do badań przedoperacyjnych oraz oceny efektów operacji [19,20,21]. Dane te są potrzebne także w analizie inżynierskiej do określenia warunków nastawiania złamanego trzonu kręgu w modelu numerycznym.

Aktualnym problemem jest nadal badanie i wyjaśnienie roli i znaczenia mechanizmu ligamentotaksji w procedurze nastawiania złamanego kręgu. W tym celu konieczne są dalsze prace nad rozwojem modeli biomechanicznych i numerycznych do symulacji zabiegu nastawiania i stabilizacji dla wybranych przypadków klinicznych [26]. Priorytetem jest również wykonanie stanowiska badawczego do pomiarów sił i przemieszczeń, które występują w układzie chirurg – oprzyrządowanie – struktury kostno-więzadłowe. Ważną podstawę w modelowaniu komputerowym i doświadczalnym stanowią opracowane i wykonane modele wirtualne 3D-CAD struktur kostnych i struktur tkanek miękkich, zwłaszcza więzadeł i krążków międzykręgowych oraz odpowiadające im modele materialne.

Istotnym elementem pracy jest dokonana klasyfikacja przypadków klinicznych pod kątem biomechanicznym, a w szczególności ze wskazaniem, w których przypadkach mechanizm ligamentotaksji będzie miał zastosowanie. Analiza danych, a także wyniki obserwacji zabiegu nastawiania złamanego trzonu, pozwoliły podjąć decyzję o wyborze grupy przypadków do dalszych badań nad ligamentotaksją. W nawiązaniu się do wcześniej przeprowadzonego eksperymentu na kręgosłupie zwierzęcym, podkreślić należy celowość dokładnego prześledzenia procedury operacyjnej zwłaszcza pod kątem określenia punktów pomiarów śródoperacyjnych oraz zebrania danych do budowy modelu numerycznego [18].

WNIOSKI

1. Z przeprowadzonych analiz wynika, że w dalszych badaniach nad mechanizmem ligamentotaksji należy się skoncentrować na przypadkach złamań wieloodłamowych i nieosteoporotycznych.
2. Wspomaganie w obszarze badań modelami wirtualnymi 3D-CAD, modelami materialnymi segmentów struktur kostnych kręgosłupa oraz pojedynczych uszkodzonych trzonów kręgow, wykonanymi w technice szybkiego prototypowania RP, wydaje się być przydatne, nie tylko w badaniach modelowych, ale także w praktyce medycznej.

PIŚMIENNICTWO / REFERENCES

1. Denis F, The three column spine and its significance in the classification of acute thoracolumbar spinal injuries Spine 1983; 8: 817-831.
2. Chapman JR, Dettori JR, Norvell DC. Spine Classifications and Severity Measures, AO Spine International, Thieme 2009.
3. www.nfz.gov.pl/jgp [07.07.2011]
4. Paszek W, Radiologia, Wyd.1, Warszawa, WNT, 1986.

preoperative examinations and the assessment of surgical outcomes [19, 20, 21]. The data were also necessary for engineering analyses aiming to determine the necessary conditions for the reduction of a fractured vertebral body in a numerical model.

The analysis and explanation of the role and significance of the ligamentotaxis mechanism in fractured vertebra reduction remains a problem. In order to resolve it, it is necessary to continue research on the development of biomechanical and numerical models used for the simulation of reduction and stabilization of selected clinical cases [26]. Another priority is to design a workstation for the measurement of forces and displacements occurring in the system comprising the surgeon, instrumentation and osseoligamentous structures. 3D-CAD virtual models of bony and soft tissue structures (particularly ligaments and intervertebral discs) and corresponding material models are the fundamentals of computer-based and experimental modelling.

Biomechanical classification of the clinical cases is a significant element of the work, especially as regards the indication of cases in the treatment of which the ligamentotaxis mechanism would be of use. Data analysis and the results of monitoring of the actual reduction procedure have made possible the decision which cases to select for further studies on ligamentotaxis. With regard to a previous experiment conducted on an animal spine, it needs to be emphasised how important it is to thoroughly examine the surgical procedure, especially in terms of the determination of points used for intraoperative measurements and gathering data for numerical model construction [18].

CONCLUSIONS

1. Our analysis of the ligamentotaxis mechanism shows that the focus in further studies on the subject should be on cases of comminuted and non-osteoporotic fractures.
2. 3D-CAD virtual models, material models of spinal bony segments and models of individual injured vertebral bodies generated via rapid prototyping (RP) appear to be useful not only in modelling studies but also in medical practice.

5. De Castro IJC, Shimano AC, Bellucci AD, Defino HLA. Experimental study of ligamentotaxis maneuvers sequencing in vertebral canal decompression. *Acta Orthopédica Brasileira* 2008; 16 (5): 291-295.
6. Jun-Hong Min, Jee-Soo Jang, Seok-Kang Kim, Dae Hyeon Maeng, Sang-Ho Lee. The ligamentotactic effect on a herniated disc at the level adjacent to the anterior lumbar interbody fusion: report of two cases. *J Korean Neurosurg Soc* 2009; 46: 65-67.
7. Milenković S, Saveski J, Trajkovska N, Vidić G, Radenković M. Transpedicular Screw Fixation of Thoracolumbar Spine Fractures. *Scientific Journal of the Faculty of Medicine in Niš* 2010; 27(2): 63-68.
8. Mueller LA, Mueller LP, Schmidt R, Forst R, Ruding L. The phenomenon and efficiency of ligamentotaxis after dorsal stabilization of thoracolumbar burst fractures. *Arch Orthop Trauma Surg* 2006; 126(6): 364-368.
9. Fergusson RL, Allen BL Jr. A mechanistic classification of thoracolumbar spine fractures. *Clin Orthop* 1984; 189: 77-88.
10. Gertzbein SD. Spine update. Classification of thoracic and lumbar fractures. *Spine* 1994; 19: 626-628.
11. Holdsworth F. Fractures, dislocations, and fractures-dislocations of the Spine. *J Bone Joint Surg* 1970; (52-A) 8: 1534-1551.
12. Magerl F, Aebi M, Gertzbein SD, Harms J, Nazarian S. Comprehensive Classification of Thoracic and Lumbar Injuries. *Eur Spine Journal* 1994; J3: 184-201.
13. Marchesi DG, Thalgot JS, Aebi M. Application and Results of the AO International Fixation System in Non-traumatic Indications *Spine* 1991; 16 (3): 162-169.
14. McAfee PC, Lubicky JP, Werner FW. The use of segmental spinal instrumentation to preserve longitudinal spinal growth. An experimental study. *J Bone Joint Surg (Am.)* 1983; 65: 935-942.
15. Dąbrowska-Tkaczyk A, Floriańczyk A, Grygoruk R, Skalski K, Borkowski P. Virtual and material models of human thoracic-lumbar spine with compressive fracture based on patient CT data and rapid prototyping technique. *The Archive of Mechanical Engineering* 2011; (LVIII): 4: 425-440.
16. Chang Hun Yu, Jung Eun Lee, Jae Jun Yang, Bong-Soon Chang, Choon-Ki Lee, Adjacent Segment Degeneration after Single-Level PLIF: Comparison between Spondylolytic Spondylolisthesis, Degenerative Spondylolisthesis and Spinal Stenosis. *Asian Spine Journal*; (5) 2: 82-90.
17. Kyung-Jin Song, Byung-Wan Choi, Taek-Soo Jeon, Kwang-Bok Lee, Han Chang, Adjacent segment degenerative disease: is it due to disease progression or a fusion-associated phenomenon? Comparison between segments adjacent to the fused and non-fused segments, *Eur Spine J*, on-line: June 2011
18. Dąbrowska-Tkaczyk A., Floriańczyk A., Skalski K., Kwiatkowski K, Cejmer W., A surgery simulation of fractured vertebral body relocation on segment of animals spine, *Book of abstract Biomechanics 2010, Warsaw, str. 85-86*
19. Rohlmann A, Gabel U, Graichen F, Bender A, Bergmann G., An instrumented implant for vertebral body replacement that measures loads in the anterior spinal kolumn. *Medical Engineering & Physics* 2007; 29: 580-585.
20. Calisse J, Rohlmann A, Bergmann G. Estimation of trunk muscle forces using the finite element method and in vivo loads measured by telemetrized internal spinal fixation devices. *Journal of Biomechanics* 1999; 32: 727-732.
21. Garrido BJ, Wood KE. Navigated placement of iliac bolts: description of new technique. *The Spine Journal* 2011; 11: 331-335.
22. Kabis MB, Weinstein DO. The history of vertebral screw and pedicle screw fixation. *The Iowa Orthopaedic Journal* 1991; 11: 127-136.
23. Kaelin AJ. The innovative new hand-held pedicle drilling tool – A new help for pedicle screw insertion. *Business briefing: Global surgery – future directions* 2005; 68-70.
24. Lonstein JE, Denis F, Perra JH, Pinto MR, Smith MD, Winter RB. Complications Associated with Pedicle Screws. *J Bone Joint Surg (Am.)* 1999; 81: 1519-28.
25. Hilibrand AS, Robbins M. Adjacent segment degeneration and adjacent segment disease: the consequences of spinal fusion? *The Spine Journal* 2004; 4: 190-194.
26. Zięba Ł., Dąbrowska-Tkaczyk A., Wirtualna stabilizacja kręgosłupa człowieka po złamaniu kompresyjnym na odcinku piersiowo-lędźwiowym, *Aktualne Problemy Biomechaniki, Politechnika Śląska, Zeszyty Naukowe Katedry Mechaniki Stosowanej, z. 5, Gliwice* 2011, 189-194.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009 -2013 jako projekt badawczy NN 518 382 437.

The study was financed as Research Project NN 518 382 437 from funding allocated to science in the years 2009-2013.

Liczba słów/Word count: 4436

Tabele/Tables: 1

Ryciny/Figures: 4

Piśmiennictwo/References: 26

Adres do korespondencji / Address for correspondence

Dr Piotr Cieślak, Klinika Traumatologii i Ortopedii z Oddziałem Zakazań Narządu

Ruchu, Wojskowy Instytut Medyczny

04-141 Warszawa, Szaserów 128, tel./fax: (22) 681-64-76; e-mail:piotr_cieslik@interia.pl

Otrzymano / Received

07.11.2012 r.

Zaakceptowano / Accepted

25.02.2013 r.