



**POLITECHNIKA ŁÓDZKA**

**INSTYTUT MASZYN PRZEPIYWOWYCH**

**ZAKŁAD AUTOMATYKI I BIOMECHANIKI**

Praca doktorska

*Modelowanie oraz analiza statyczna i dynamiczna  
kręgosłupa ludzkiego z zastosowaniem implantów*

**mgr inż. Tomasz Antosik**

**Promotor**

**Prof. dr hab. inż. Jan Awrejcewicz**

**Łódź 1998**

# **SPIS TREŚCI:**

<b>Wprowadzenie.</b>	1
<b>I. ANATOMIA I FUNKCJE ODCINKA LĘDŹWIOWEGO KRĘGOSŁUPA LUDZKIEGO.</b>	3
I.1. Anatomia kręgosłupa	3
I.2. Charakterystyka budowy części lędźwiowej kręgosłupa	4
I.2.1 Kręgi lędźwiowe.	4
I.2.2 Krążki międzykręgowe	6
I.3. Czynności kręgosłupa	7
I.3.1 Ruchomość między kręgami	7
I.3.2 Ruchomość kręgosłupa	9
<b>II. CHOROBY KRĘGOSŁUPA I ICH LECZENIE PRZY ZASTOSOWANIU STABILIZATORÓW.</b>	14
II.1 Choroby kręgosłupa	14
II.1.1 Przemieszczenie kręgu czyli kręgozmyk.	14
II.1.2 Wypadanie jądra miazdżystego w odcinku lędźwiowym.	15
II.1.3 Złamania kompresyjne trzonów.	16
II.1.4 Utrata stabilności kręgosłupa spowodowana skoliozą.	16
II.1.5 Nowotwory kręgosłupa.	17
II.1.6 Gruźlica kręgosłupa.	18
II.1.7 Klasyfikacja urazów kręgosłupa lędźwiowego w świetle biomechaniki kręgosłupa.	18
II.2 Stabilizatory stosowane w leczeniu kręgosłupa	21
II.2.1 Uniwersalny przedni system stabilizacji kręgosłupa CDH.	24
II.2.2 Horyzontalny system tylnej stabilizacji kręgosłupa CD.	26
II.2.3 System stabilizacji kręgosłupa DYNA-LOK.	27
II.2.4 Przedni system stabilizacji kręgosłupa ZPLATE-ATL.	29
II.2.5 Zrost kostny kręgosłupa.	30
II.2.6 Cechy stabilizatorów.	31
<b>III. BADANIA BIOMECHANICZNE IN-VITRO KRĘGOSŁUPA LUDZKIEGO.</b>	32
III.1 Modele kręgosłupa stosowane w badaniach biomechanicznych.	32
III.2 Badania biomechaniczne stabilizatorów.	33
III.2.1 Badania biomechaniczne krótkiego segmentu kręgosłupa w złamaniach wybuchowych wg Kenneth i in.	35
III.2.2 Badania biomechaniczne ośmiu stabilizatorów kręgosłupa wg Panjabi i in.	37
III.2.3 Badania stabilności kręgosłupa usztywnianego sześcioma różnymi implantami wg Abumi i in.	38
III.2.4 Badania in-vitro ciśnienia międzydyskowego w części lędźwiowej kręgosłupa ludzkiego wg Cunningham i in.	40
III.2.5 Analiza biomechaniczna wielopoziomowych stabilizatorów kręgosłupa lędźwiowego wg Glazer i in.	42

III.2.6	Badania biomechaniczne wewnętrznych systemów stabilizacji wg Nolte i in.	43
<b>IV.</b>	<b>MODELE KRĘGOSŁUPA LUDZKIEGO - PRZEGLĄD LITERATURY.</b>	44
IV.1	Dwuwymiarowe (2D) modele kręgosłupa.	44
IV.1.1	Model 2D dwóch sąsiadujących kręgów wg Miller i in.	44
IV.1.2	Model 2D kręgów lędźwiowych L4-L5 wg Skalli i Lavaste.	45
IV.1.3	Model 2D fragmentu kręgosłupa od potylicy do kręgu Th2 wg Saito i in.	46
IV.1.4	Model MES trzonu kręgu piersiowego Th12 i lędźwiowego L1 wg Shirado i in.	48
IV.2	Modele osiowosymetryczne.	49
IV.2.1	Model osiowosymetryczny dysku międzykręgowego wraz z trzonami kręgowymi wg Kulak i in.	49
IV.2.2	Uproszczony model kręgu wg Spilker.	49
IV.2.3	Uproszczony model wycinka kręgosłupa wg Furlong i in.	50
IV.2.4	Uproszczony model fragmentu kręgosłupa wg Spilker i in.	51
IV.2.5	Model osiowo symetryczny trzonu kręgowego i dysku wg Simon i in.	52
IV.3	Modelowanie trójwymiarowe dysków (3D).	53
IV.3.1	Model 3D dysku wg Lin i in.	53
IV.3.2	Trójwymiarowy model dysku z trzonem kręgowym wg Natali i in.	54
IV.3.3	Trójwymiarowy model dysku wraz z trzonami kręgów części lędźwiowej wg Natarajan i in.	55
IV.4	Modelowanie trójwymiarowe wycinka kręgosłupa (3D).	55
IV.4.1	Model MES kręgu szyjnego C2 wg Teo i in.	55
IV.4.2	Model MES wycinka kręgosłupa lędźwiowego wg Hakim i in.	56
IV.4.3	Model MES kręgu C4 wg Bozic i in.	57
IV.4.4	Model 3D wycinka kręgosłupa lędźwiowego wg Yang i in.	58
IV.4.5	Model fragmentu części lędźwiowej kręgosłupa wg Shirazi i in.	58
IV.4.6	Model wycinka kręgosłupa wg Kleinberger	59
IV.4.7	Trójwymiarowy model fragmentu części lędźwiowej Ueno i in.	61
IV.4.8	Model MES kręgosłupa lędźwiowego L3-L5 wg Goel i in.	62
IV.4.9	Model MES kręgosłupa szyjnego C4, C5, C6 wg Yoganandan i in.	64
IV.4.10	Model 3D części lędźwiowej kręgosłupa wg Lavaste i in. i Robin	66
IV.4.11	Model 3D kręgosłupa szyjnego C3-C7 wg Maurel i in.	68
IV.4.12	Model MES kręgosłupa lędźwiowego Smit i in.	70
IV.4.13	Model kręgu lędźwiowego L2 Silva i in.	71
IV.5	Modele globalne.	72
IV.5.1	Model 3D kręgosłupa piersiowego wraz z żebrami wg Eppinger i in.	72
IV.5.2	Model MES trójwymiarowy kręgosłupa ludzkiego wg Zagrajek i Dietrich	73
IV.6	Podsumowanie.	74
<b>V.</b>	<b>MODELOWANIE CZĘŚCI LĘDŹWIOWEJ KRĘGOSŁUPA ZA POMOCĄ MES.</b>	77
V.1	Modelowanie statyczne.	79
V.1.1	Model wstępny (uproszczony) pięciu kręgów lędźwiowych (L1-L2).	79
V.1.1.1	Geometria.	79

V.1.1.2	Podział kręgosłupa nieuszkodzonego na elementy skończone i przyjęcie warunków brzegowych.	85
V.1.1.3	Podział kręgosłupa, w którym zastosowano implant na elementy skończone i przyjęcie warunków brzegowych.	87
V.1.2	Model trzech kręgów lędźwiowych (L1-L3).	91
V.1.2.1	Geometria.	91
V.1.2.2	Podział kręgosłupa nieuszkodzonego na elementy skończone, przyjęcie warunków brzegowych i analiza statyczna modelu.	102
V.1.2.3	Podział kręgosłupa usztywnionego implantem na elementy skończone, przyjęcie warunków brzegowych i analiza statyczna modelu.	109
V.1.2.3.1	Modelowanie kręgosłupa, w którym zastosowano prostopadłościenny implant.	109
V.1.2.3.2	Modelowanie kręgosłupa z implantem o zbliżonym kształcie do stabilizatora ZPLATE-ATL	113
V.2.	Modelowanie dynamiczne.	117
V.2.1	Modelowanie dynamiczne kręgosłupa zdrowego (L1,L2,L3).	118
V.2.2	Modelowanie dynamiczne kręgosłupa z implantem.	121
<b>VI.</b>	<b>STANOWISKO DO BADAŃ STABILNOŚCI FRAGMENTU KRĘGOSŁUPA.</b>	126
VI.1	Ściskanie.	128
VI.1.1	Tensometryczny czujnik siły.	128
VI.1.2	Tensometryczny czujnik przemieszczenia.	132
VI.1.3	Stanowisko do badań ściskania kręgosłupa lędźwiowego (L1,L2,L3)	133
VI.1.4	Porównanie odkształceń modelu fizycznego i numerycznego.	135
VI.2	Zginanie na bok.	135
VI.3	Zginanie do przodu i do tyłu.	138
VI.4	Skręcanie osiowe.	140
VI.5	Podsumowanie.	142
<b>VII.</b>	<b>WNIOSKI.</b>	143
<b>VIII.</b>	<b>PERSPEKTYWY I MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA.</b>	144
<b>Literatura.</b>		145