

XI OGÓLNOPOLSKA KONFERENCJA TEORII MASZYN
I MECHANIZMÓW11th POLISH CONFERENCE ON THE THEORY OF MACHINES
AND MECHANISMS

27—30. 04. 1987 ZAKOPANE

Antoni JAKUBOWICZ, Jan RZYTKA, Gabriel WRÓBEL
Instytut Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn
Politechnika ŚląskaMieczysław BARYLUK
Szpital Miejski Gliwice

ZESPÓŁ KOŚCI UDOWEJ I MIEDNICY JAKO UKŁAD MECHANICZNY

Streszczenie. W pracy rozpatrzono układ miednicy i kości udowej wraz z systemem mięśni jako układ mechaniczny. Utworzono model miednicy jako system elementów skończonych, którego zasadniczym przeznaczeniem jest badanie wpływu zmian operacyjnych na stan obciążenia w zespole stawu biodrowego.

Wprowadzenie w drogę zabiegów operacyjnych zmian anatomicznych kości miednicy powoduje, że znaczna część aktonów tych mięśni ulega deformacji. Z analizy tego modelu ustala się warunki obciążenia miednicy.

1. Geneza problemu mechanicznej reprezentacji zespołu
stawu biodrowego

Budowa oraz istotne własności zespołu stawu biodrowego związane są z funkcjami kończyny dolnej jako narządu ruchu. Funkcje w aspekcie mechanicznym można sprowadzić do kinematycznych, wynikających z miejsca i roli stawu biodrowego w układzie ruchowym człowieka oraz nośnych związanych z potrzebą przenoszenia sił obciążających układ. Właściwe spełnianie funkcji kinematycznych uwarunkowane jest prawidłową budową elementu układu. Stąd też wynika prawidłowy stan obciążeń wewnętrznych w szczególności w elementach kostnych zespołu - kości miednicy wraz z panewką stawu biodrowego oraz kości udowej z osadzoną w panewce stawu głową udową (czop kulisty). Stan obciążeń wewnętrznych chrząstko-kostnej tkanki zależy od jej struktury i formy zewnętrznej. Stan obciążenia całego układu kostnego stawu biodrowego (kość udowa, kość miednicy) wynika z wzajemnego oddziaływania głowy i panewki stawu oraz układu mięśniowego w miejscach zaczepu mięśni. W przypadku anomalii w budowie elementów stawu uniemożliwiających

właściwe [spełnienie jego funkcji jedyne drogą rokującą poprawę sytuacji] bywa ingerencja w drodze zabiegu operacyjnego. Przykładem tego typu metody operacyjnej mającej na uwadze poprawę funkcjonowania oraz rozwoju zespołu stawu biodrowego jest metoda R.B. Soltera tzw. metoda osteotomii bezimiennej - "innominate osteotomy", polegająca na zmianie położenia panewki stawu biodrowego w układzie miednicy [1]. Tę zmianę położenia panewki a przez to i warunków współpracy z głową kości udowej osiąga się drogą nadpanewkowego przecięcia kości miednicy, odpowiedniego przemieszczenia ruchomego odcinka miednicy wraz z panewką stawową wokół spójnienia łonowego oraz ustalenia jego nowego położenia względem pozostałej części miednicy wraz z lędźwiową częścią kręgosłupa za pomocą wprowadzonego w miejscu rozcięcia klina kostnego o odpowiednim kącie rozwarcia. Rozważając przemieszczenie ruchomego odcinka miednicy w układzie ortogonalnych płaszczyzn - czołowej, strzałkowej i horyzontalnej - związanych z pozostałą częścią miednicy wynikowe przemieszczenie panewki stawu biodrowego można opisać jako jednoczesne:

- przemieszczenie ku przodowi - w płaszczyźnie strzałkowej, powodując zwiększenie krycia głowy udowej w jej części przedniej oraz do boku (w płaszczyźnie czołowej) powodujące poszerzenie strefy nośnej w jej części zewnętrznej,
- przemieszczenie obwodowe względem płaszczyzny horyzontalnej.

Temu, poprawiającemu warunki współpracy elementów stawu, przemieszczeniu panewki towarzyszą jednak zmiany odległości zaczepów mięśni wchodzących w zespół stawu biodrowego. Te zmiany odległości w wyniku zabiegu powodują zmiany obciążeń i stan naprężeń wewnętrznych w elementach chrzęstno-kostnych oraz w całym systemie kostnym. Przedstawione okoliczności uzasadniają potrzebę dokonania analizy w kategoriach biomechaniki.

Prezentowana praca stanowi wstępny etap tak sformułowanego zadania. Efekty wieloletnich doświadczeń klinicznych zostały wykorzystane przy konstruowaniu modelu układu, umożliwiającego przeprowadzenie pomiarów i dalsze badania parametrów geometrycznych. Wyniki pomiarów zostały wykorzystane do budowy modelu numerycznego pozwalającego na symulację zjawisk towarzyszących opisanemu zabiegowi przeprowadzonym na zespole stawu biodrowego.

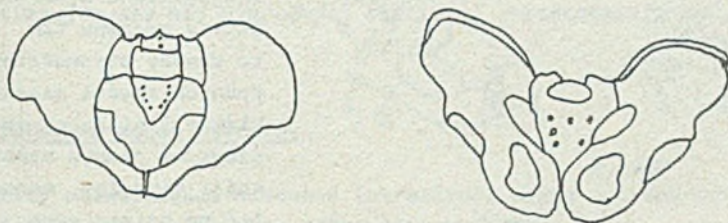
2. Opis kończyny dolnej jako układu mechanicznego

2.1. Układ kostny kończyny

Kończyna dolna człowieka - w związku z pionową postawą człowieka - zbudowana jest z kości dużych, silnych, połączonych ze szkieletem za pośrednictwem obręczy biodrowej. Szkielet kończyny dolnej tworzą:

- kości obręczy kończyny dolnej,
- kości kończyny dolnej wolnej.

Obręcz kończyny dolnej tworzą kości miednicy (lewa i prawa) połączone od przodu spojeniem łonowym. Od tyłu każda przylega do kości krzyżowej, tworząc staw ściśły, wzmocniony silnymi więzadłami. Tak utworzony masywny pierścień kostny, zwany miednicą łączy kończynę dolną wolną ze szkieletem osiowym (rys. 1).



Rys. 1

Na kończynę dolną wolną składają się: kość udowa, dwie kości podudzia (piszczelowa i strzałkowa) i kości stopy (rys. 2). Kończyna dolna połączona jest z miednicą w stawie biodrowym, który tworzy głowa kości udowej i panewka kości miednicznej. W stawie tym możliwy jest względny ruch kulisty członów - para kinematyczna kl. III [4]. Szerokie rozstawienie panewek stawu biodrowego oraz osadzenie główek kości udowych na długich, skośnych szybkach powodują, że uda człowieka ustawione są skośnie ku dołowi, kolana stykają się w pozycji wyprostowanej - co pozwala na chód bez kołysania się na boki. Dolny koniec kości udowej łączy się w stawie kolanowym z kością piszczelową i rzepką.

Dolne nasady kości podudzia z kością skokową stopy tworzą staw skokowo-goleniowy.

Wszystkie ruchy można rozpatrywać w odniesieniu do trzech wzajemnie ortogonalnych płaszczyzn i określić je za pomocą wartości tzw. kątów stawowych:

- w płaszczyźnie strzałkowej - zginanie i prostowanie,
- w płaszczyźnie czołowej - odwodzenie i przywodzenie,
- w płaszczyźnie horyzontalnej - obrót uda do wewnątrz i na zewnątrz.

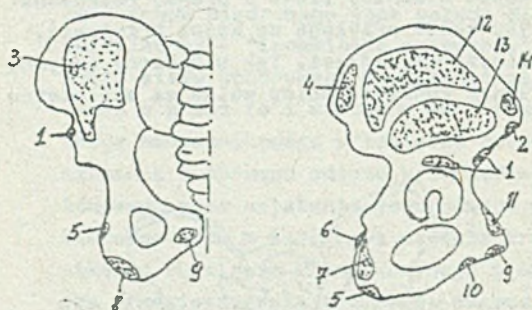
2.2. Układ mięśniowy wiążący kończynę dolną z miednicą a stan obciążeń elementów kostnych

Układ kostny kończyny dolnej człowieka połączony jest systemem mięśni. Interesujące nas mięśnie zaczepione jednym końcem do miednicy, drugim końcem stykają się z kością udową lub kośćmi podudzia.



Rys. 2

Inna grupa tych mięśni wiąże miednicę z górną częścią ciała. Miejsca przyczepu mięśni do kości miednicy pokazano na rys. 3 [5]. Wobec różno-



Rys. 3

kierunkowego przebiegu poszczególnych części mięśni, wielomiejscowych przyczepów oraz czynnościowej niejednorodności poszczególnych części w modelu obciążenia uwzględniono wyodrębnione punkty zaczepu tzw. aktonów, to znaczy czynnościowo jednorodnych części mięśni. Liczne i silne mięśnie, przyczepione jednym końcem do kości miednicy, można podzielić na cztery grupy:

1) mięśnie zginające staw biodrowy, do których należą:

- prosty uda (rectus femoris) (1)
- krawiecki (sartorius) (2)
- biodrowy (iliacus) (3)

2) mięśnie prostujące staw biodrowy:

- pośladkowy wielki (gluteus maximus) (4)
- półściągnięty (semitendinosus) (5)
- półbłoniasty (semimembranosus) (6)
- dwugłowy uda (biceps femoris) (7)

3) mięśnie przywodzące:

- przywodziciel wielki (adductor magnus) (8)
- przywodziciel długi (adductor longus) (9)
- przywodziciel krótki (adductor brevis) (10)
- grzbietowy (pectineus) (11)

4) mięśnie odwodzące:

- pośladkowy średni (gluteus medius) (12)
- pośladkowy mały (gluteus minimus) (13)
- naprężacz powięzi szerokiej (tensor fasciae latae) (14).

Uwzględniając symetrię, równowagę miednicy opisuję trzy równania równowagi. A więc układ jest statycznie niewyznaczalny. Należy zwrócić uwagę, że przykładowo w postawie wyprostowanej w utrzymaniu równowagi ciała nie wszystkie mięśnie biorą równocześnie aktywny udział.

Praca [6] zawiera uproszczone schematy równowagi kończyny dolnej przy chodzeniu, przy nieprawidłowej postawie (skrzywienia) oraz graficzną analizę grawitacyjnych i mięśniowych sił działających na kości i stawy.

W pracy [6] dla układu kostnego kończyny dolnej człowieka połączonego systemem 29 mięśni wyznaczono reakcje w stawach oraz wartości sił mięśniowych niezbędne do utrzymania równowagi ciała przy obciążeniu statycznym - w pozycji stojącej wyprostowanej oraz przy pochyleniu w przód i w tył. Średnie wartości sił mięśniowych w określonych zakresach ruchu w danej płaszczyźnie (strzałkowej - zgięcie i prostowanie, oraz czołowej - odwodzenie i przywodzenie) zamieszczono w pracy [7].

Rozpatrując równowagę ciała mięśnie modelowano odcinkami prostych, których końce znajdowały się w środkach ciężkości powierzchni zrostu mięśni - kość.

3. Komputerowy model miednicy

Do analizy układu kości miednicy (określenia stanu naprężenia i deformacji) wybrano metodę elementów skończonych (MES).

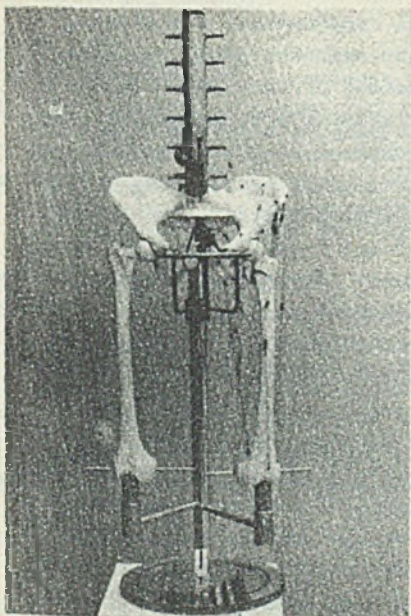
Metoda ta pozwala na wykorzystanie różnego typu elementów [9], przy czym wybór modelu zależy w tym przypadku od anatomicznej budowy rozpatrywanego fragmentu układu kostnego, od wymaganej zgodności wyników obliczeń z rzeczywistością oraz od dopuszczalnych kosztów obliczeń (od czasu pracy maszyny cyfrowej).

Komputerowy model miednicy utworzono na podstawie pomiarów geometrycznych kości miednicy człowieka przeprowadzonych na odpowiednio przygotowanym stanowisku pomiarowym (rys. 4). Stanowisko to wykorzystano również do pomiaru odkształceń aktonów mięśniowych w wyniku zmian operacyjnych kości miednicy. Zasadniczym przeznaczeniem modelu jest badanie wpływu zmian operacyjnych na stan obciążenia w zespole stawu biodrowego.

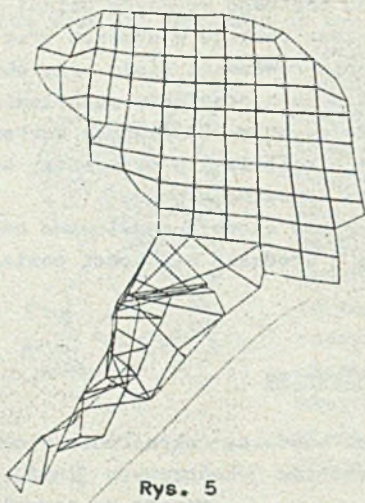
Geometrię miednicy opisano za pomocą 283 węzłów i 126 elementów płytowo-powłokowych o sześciu stopniach

swobody w węzle. Na rysunku 5 przedstawiono sposób podziału miednicy.

Z uwagi na duży rozrzut własności materiałowych tkanki kostnej miednicy w obliczeniach przyjęto średnie wartości stałych materiałowych podanych w [2, 3] dla kości udowej. W ten sposób w obliczeniach nie uwzględniono niejednorodności tkanki kostnej miednicy w różnych obszarach.



Rys. 4



Rys. 5

Przedstawiany model reprezentuje nie poddaną zabiegowi kość miednicy osobnika dorosłego. Dla tego modelu przeprowadzono przykładowe obliczenia stanu naprężenia i deformacji przy prostowaniu stawu biodrowego. Model obciążono siłami pochodzącymi od ciężaru górnej części ciała oraz siłami mięśni, które biorą aktywny udział w procesie prostowania stawu biodrowego. Wartości tych sił przyjęto na podstawie [7]. Otrzymany rozkład naprężeń zredukowanych w [MPa] przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6

Operacyjne efekty w budowie modelu obliczeniowego można uwzględnić przez odpowiednie zmiany współrzędnych węzłów odłamu, podlegającego przemieszczeniu w trakcie zabiegu, oraz zadanie odpowiednich kierunków i wartości sił - napięć aktonów.

Nowe współrzędne węzłów możliwe są do określenia na podstawie wartości przed przemieszczeniem oraz pomierzonych na stanowisku pomiarowym parametrów przemieszczenia, w roli których przyjęto układ kątów Eulera. Kierunki sił określone są na podstawie położenia punktów zaczepów poszczególnych aktonów, zaś wartości przyjmowane są stosownie do określonej deformacji aktonu oraz jego przekroju czynnego.

4. Zakończenie

Przedstawiony w pracy opis elementów zespołu stawu biodrowego zmierza do umożliwienia komputerowej reprezentacji tego układu, czego przykład zawarto w punkcie 3.

Dalszy, będący w przygotowaniu etap badań obejmuje między innymi analizę numeryczną mechanicznych efektów zabiegów operacyjnych na układzie kostnym zespołu stawu biodrowego. Wyniki analizowane z punktu widzenia medycznego mają stać się pomocą w prowadzonych operacjach wspomagając empiryczną metodologię zabiegów.

Formułowanie w języku mechaniki problemów uważanych jak dotąd za wyłącznie medyczne oraz zastosowanie metod teorii ciał odkształcalnych czy teorii mechanizmów z wykorzystaniem techniki numerycznej stanowi nową jakość w podejściu do problemów współczesnej medycyny. Niezależnie od spodziewanych efektów w chwili obecnej należy dopatrywać się w tym zapowiedzi nowych możliwości medycyny, której zbiór doświadczeń zostanie wsparty szybko rozwijającą się metodologią nauk ścisłych i techniką komputerową.

LITERATURA

- [1] M. BARYLUK: Analiza odkształceń liniowych aktonów stawu biodrowego pod wpływem zmian orientacji panewki.
- [2] M.A. DOBIELIS, J.Z. SAUŁGOSZIS: Wlihanie funkcjonalnej adaptacji na nieodnorodnost mechaniczeskich swojstw bolszebiercowej kosti. *Mechanika Kompozytnych Materiałow* 1982, 2, s. 322-329.
- [3] J.Z. SAUŁGOSZIS, L.I. SŁUCKIJ, I.W. KNIETS, C.A. JANSON: Issljedowanie zawisimostiej między rozlicznymi mechaniczieskimi swojstwami i biochimiszeskim sostawom kostnoj tkani czjełowieka. *Mechanika Polimerow*, 1973, 1, s. 138-145.
- [4] A. MORECKI, J. EKIEL, K. FIDELUS: *Bionika ruchu*, Warszawa 1971.
- [5] P.D. SINIELNIKOW: *Atlas anatomii czjełowieka*, Moskwa 1963.
- [6] A. SEIREG, R.J. ARVIKAR: A mathematical model for evaluation of forces in lower extremities of the musculo-skeletal system. *J. Biomechanics*, 1973, vol. 6, pp. 313-26.
- [7] G. THOMAS: *Die displastische Huftgelenkpfanne*, Stuttgart 1969.
- [8] C.A. JANSON: *Biomechanika niźnjej koniecznosti czjełowieka*, Riga, 1975.
- [9] O.C. ZIENKIEWICZ: *Metoda elementów skończonych*, Arkady, Warszawa 1976.

БЕДРЕННАЯ КОСТЬ ТАЗ КАК МЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Р е з ю м е

В работе рассмотрены таз и бедренная кость вместе с мышечной системой в качестве механической системы. Разработана модель таза как системы конечных элементов, главным назначением которой является исследование влияния операционных изменений на состояние нагрузки в комплексе бедренного сустава.

Введение операционных путём анатомических изменений тазовой кости приводит к тому, что главная часть актонов этих мышц подвергается деформации. На основе анализа этой модели можно определить условия нагрузки таза.

THE COMPLEX OF TIGHBONE AND PELVIS AS THE MECHANICAL SET

S u m m a r y

The paper considers the complex of fighbone and pelvis along with the muscle system as the mechanical set.

The model of pelvis was created being the system of finite elements. Its task is to examine the influence of operational changes on the state of load of the hip-joint.

Because of the anatomical changes in pelvis after surgery great many actons of these muscles are deformed. Analysing hus model the conditions of loading the pelvis are established.