

Stefan BUĆKO, Krzysztof FORMA, Maciej HERDZINA, Katedra Mechaniki Doświadczalnej i Biomechaniki, Politechnika Krakowska, Kraków

SYSTEM SZYBKIEJ NUMERYCZNEJ ANALIZY PODATNOŚCI WYBRANYCH UKŁADÓW APARATU ILIZAROWA

Streszczenie. W pracy przedstawiono nakładkę do programu ANSYS umożliwiającą prowadzenie szybkich obliczeń jak również optymalizację wybranych układów aparatu Ilizarowa. Praca przedstawia praktyczną realizację idei budowy pakietu obliczeniowego pozwalającego na szybki montaż modelu obliczeniowego układu aparatu Ilizarowa z zespołu przygotowanych, szeroko stosowanych elementów, bazując na dwóch pierścieniach. Aplikacja prowadzi użytkownika przy tworzeniu modelu obliczeniowego aparatu, pozwalając wybrać oczekiwaną opcję oraz zapewnia uzyskanie wyniku – podatności układu w czasie kilku sekund.

1. WPROWADZENIE

Metoda Ilizarowa wykorzystuje odkrytą przez niego zasadę, tzw. „prawo naprężeń-nacisków” rządzące gotowością żywych tkanek do tworzenia regeneratu kostnego w procesie wydłużania kończyn, leczenia skomplikowanych złamań oraz pozornych stawów. Stymulacja procesu osteogenezy wymaga stabilizacji kierunku przemieszczeń odłamów kostnych oraz ich powolnego rozciągania przy zapewnieniu mikroruchów w określonym przedziale wartości. Leczenie metodą Ilizarowa wymaga stosowania specjalnego aparatu zwanego aparatem bądź stabilizatorem Ilizarowa zakładanego na zewnątrz kończyny, który przejmuje ciężar pacjenta, a równocześnie zapewnia spełnienie wymienionych wyżej optymalnych warunków leczenia. Aparat Ilizarowa budowany jest z elementów konstrukcyjnych, takich jak pierścienie, teleskopy, wsporniki i uchwyty oraz druty Kirschnera i grotowkręty Schanza.

Konstrukcja stabilizatora jest przygotowywana dla każdego pacjenta indywidualnie, z uwzględnieniem budowy mięśni, przebiegu ścięgien, nerwów, naczyń krwionośnych oraz innych anatomicznych czynników. Dla prawidłowego przebiegu procesu osteogenezy konieczne jest zapewnienie odpowiedniej dla danego pacjenta podatności aparatu Ilizarowa.

Popularność oraz efektywność metody wiąże się z zapotrzebowaniem na narzędzie do kontroli oraz prognozowania zarówno wstępnych naprężeń, jak i podatności układu. Intuicyjna obsługa takiego narzędzia powinna umożliwić szerokie stosowanie w praktyce klinicznej, a niezbędny czas modelowania aparatu oraz wykonania obliczeń powinien być możliwie najkrótszy.

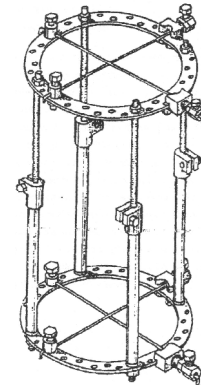
Celem prezentowanej pracy jest wykazanie możliwości stworzenia aplikacji zapewniającej analizę podatności dowolnej konfiguracji aparatu Ilizarowa bazującej na „bibliotece” modeli elementów wchodzących w skład struktury aparatu. Powyższą ideę zrealizowano przykładowo dla konfiguracji bazującej na dwóch pełnych pierścieniach i dowolnym, zadanym przez użytkownika schemacie rozłożenia drutów Kirschnera oraz grotowkrętów Schanza. Opracowany program pozwala, dla dowolnego układu aparatu Ilizarowa w przytoczonym schemacie, oszacować w bardzo krótkim czasie podatność i osiowe przemieszczenia w zależności od masy pacjenta. Uproszczony tryb tworzenia modelu

obliczeniowego MES i zaledwie kilkusekundowy czas obliczeń zapewniają możliwość stosowania programu do uzyskania wyników, a także ich optymalizacji nawet w trakcie zabiegu operacyjnego.

2. SCHEMAT KONSTRUKCYJNY APARATU ILIZAROWA

Stabilizator Ilizarowa składa się z minimum dwóch pierścieni, które łączą się z teleskopami za pomocą złącz śrubowych. Do połączenia pierścieni z odłamami kostnymi stosuje się druty Kirschnera lub grotowkręty Schanza, które mocuje się do pierścieni za pomocą specjalnych wsporników oraz śrub. W niektórych przypadkach, ze względu na skomplikowaną topologię nerwów, ścięgien lub naczyń krwionośnych stosuje się półpierścienie oraz łuki.

Pierścienie montuje się powyżej i poniżej miejsca złamania lub przecięcia. Umożliwiają one korekcję osi mechanicznej kończyny poprzez współosiowe ustawienie dwóch odłamów kostnych. Wielkość pierścienia dobiera się indywidualnie do potrzeb i wymiarów kończyn pacjenta. Podstawowymi materiałami, z których wykonuje się elementy pierścieniowe, są stal, aluminium, duraluminium, żywica epoksydowa oraz włókna węglowe. Elementy łączeniowe, czyli druty Kirschnera i grotowkręty Schanza wykonuje się głównie ze stali austenitycznej, a ich grubość waha się w przedziałach $1,5 \div 2,0$ [mm] dla drutów oraz $5 \div 6$ [mm] dla grotowkrętów. Dzięki zastosowaniu teleskopów możliwe jest precyzyjne sterowanie procesem wydłużania kończyny.



Rys. 1. Schemat konstrukcyjny aparatu Ilizarowa

3. PRZYJĘTY MODEL OBLICZENIOWY

Pokazany na rysunku 1 prosty schemat aparatu Ilizarowa wskazuje na występowanie w nim kilku rodzajów elementów konstrukcyjnych, których modelowanie, a szczególnie łączenia w modelu MES jest zadaniem dość czasochłonnym. W schemacie konstrukcyjnym występują elementy płytowe – pierścienie i uchwyty z otworami – oraz elementy belkowe – teleskopy, druty Kirschnera i grotowkręty Schanza. Różnorodność elementów oraz sposoby ich połączeń znacznie utrudniają zastosowanie automatycznego generatora siatki elementów. W niniejszej pracy zdecydowano się na budowę modelu obliczeniowego MES bazującego wyłącznie na elementach belkowych. Elementami aparatu odbiegającymi od modelu belki są uchwyty, których wpływ na podatność jest niewielki, oraz pierścienie stanowiące ważny element konstrukcji aparatu i jego podatności. Konieczne jest zatem opracowanie metody modelowania pierścienia za pomocą elementów belkowych tak, aby uzyskać możliwie dokładne odwzorowanie jego sztywności giętej i skrętnej.

3.1. Modelowanie pierścienia

Przyjęty do analizy pierścień wykonany jest ze stali austenitycznej (rys.2). Średnica zewnętrzna pierścienia wynosi $D=190$ [mm], a przekrój ma wymiary 15 [mm] x 5 [mm]. Pierścień posiada 44 otwory o średnicy 7 [mm] każdy.

Zgodnie z przytoczoną wyżej koncepcją modelowania elementów stabilizatora Ilizarowa pierścień rzeczywisty jest modelowany w systemie ANSYS przy użyciu elementów belkowych BEAM4. rozłożonych na średnicy 175 [mm]. Punktami bazowymi elementów belkowych są środki otworów, czyli miejsca, w których możliwe jest mocowanie teleskopów, drutów Kirschnera lub grotowkrętów Schanza.

Przekrój elementów belkowych dobrano tak, aby zapewnić równość sztywności rozciągania, sztywności zginania w dwóch płaszczyznach i sztywności skręcania pierścienia rzeczywistego oraz belkowego modelu obliczeniowego.

3.2. Weryfikacja modelu

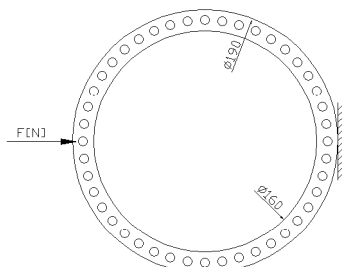
W ramach weryfikacji zastępczego modelu pierścienia wykonano obliczenia MES dla trójwymiarowego modelu pierścienia (program SolidWorks) oraz dla zastępczego modelu belkowego według dwóch schematów obciążenia. Schematy obciążenia oznaczone jako 1 i 2 dobrano tak, aby sprawdzić zgodność sztywności giętych w dwóch płaszczyznach oraz sztywności skrętnej; w obu modelach zachowano równość pola przekroju. Oba schematy obciążenia modeli przedstawiono na rysunku 2, gdzie pokazano również konstrukcję i wymiary pierścienia rzeczywistego. Obliczenia wykonano dla czterech wartości siły obciążającej F , a wyniki obliczeń w postaci przemieszczeń odpowiadających sobie punktów obu modeli zestawiono w tabelicy I, gdzie pod hasłem ANSYS podano wyniki dla modelu belkowego, a pod hasłem SolidWorks wyniki dla pierścienia rzeczywistego (dla modelu 3D podano średnią wartość przemieszczenia na obwodzie otworu).

Tabela 1 Zestawienie przemieszczeń obu modeli dla schematów obciążenia 1 i 2

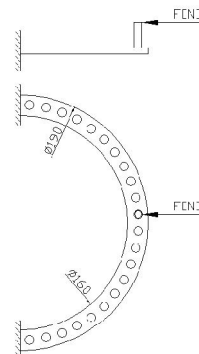
| Siła [N] | Schemat 1 | | | Schemat 2 | | |
|----------|--------------------|------------------------|--------------|--------------------|-------------------------|--------------|
| | ANSYS: $uz[mm]$ | SolidWorks $uz[mm]$ | Stosunek [%] | ANSYS: $uz[mm]$ | SolidWorks: $uz[mm]$ | Stosunek [%] |
| 500 | 0,21 | 0,22 | 95,5 | 1,62 | 1,70 | 105,1 |
| 750 | 0,32 | 0,33 | 95,6 | 1,74 | 1,75 | 100,7 |
| 1000 | 0,42 | 0,44 | 95,6 | 2,60 | 2,55 | 97,9 |
| 1250 | 0,53 | 0,55 | 95,7 | 3,35 | 3,18 | 94,9 |

Różnice wartości przemieszczeń obu analizowanych modeli nie przekraczają 5%, co uzasadnia uznanie modelu zastępczego za wystarczająco poprawny dla szacowania podatności aparatu Ilizarowa.

Weryfikacja obliczeniowa wykazała, że zmiana momentu bezwładności przekroju modelu zastępczego o 5% wywołuje zmianę podatności rozpatrywanego układu aparatu Ilizarowa o ok. 1%, co uzasadnia akceptację zastępczego modelu obliczeniowego pierścienia.

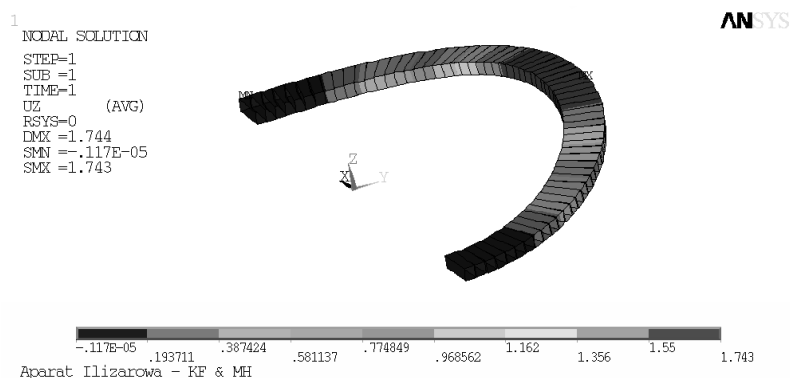


Rys. 2. Sposób przyłożenia obciążenia wg schematu 1

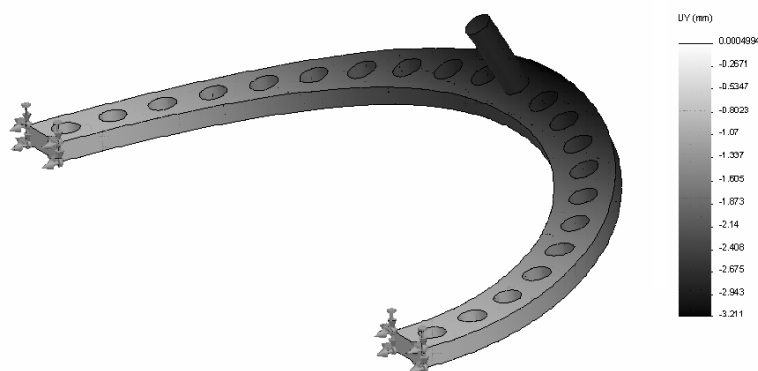


Rys. 3. Sposób przyłożenia obciążenia wg schematu 2

Na rysunkach 4 i 5 pokazano mapy przemieszczeń dla schamtu obciążenia 2 w modelu belkowym (ANSYS) i modelu 3D (SolidWorks).



Rys. 4. Przemieszczenia pod wpływem obciążenia wg schematu 2 wyznaczone w programie ANSYS



Rys. 5. Przemieszczenia pod wpływem obciążenia wg schematu 2 wyznaczone w programie SolidWorks

3.3. Napięcie wstępne drutów Kirschnera

Ważnym czynnikiem, wpływającym na podatność aparatu Ilizarowa, jest naprężenie wstępne w drutach Kirschnera. W ten sposób można uzyskać optymalną, ze względu na przebieg leczenia, podatność aparatu. Napięcia wstępne w prezentowanej aplikacji realizowane są przez odpowiednią zmianę temperatury drutów zapewniającą uzyskanie założonej siły. Zadanie naprężeń wstępnych za pomocą temperatury nie ma wpływu na wynik analizy układu tak długo, jak nie jest ona analizą termiczną.

4. APLIKACJA

Korzystając z faktu, że ANSYS posiada możliwość wczytania gotowych modeli z plików wsadowych napisanych w języku skryptowym APDL (ANSYS Parametric Design Language), stworzona została aplikacja „Aparat Ilizarowa”, generująca skrypt dla dowolnego przypadku, graficznie zaprojektowanego przez użytkownika. Program w założeniu miałby być pomocnym narzędziem dla chirurgów ortopedów, którzy poprzez czytelny i prosty interfejs graficzny mogliby rozważać dowolną konfigurację aparatu Ilizarowa bez znajomości metody elementów skończonych oraz pakietu obliczeniowego ANSYS. Istotą aplikacji jest też to, że wartości podatności aparatu otrzymywane są bardzo szybko, co umożliwia korektę konstrukcji w trakcie zabiegu operacyjnego. Efektem działania aplikacji jest plik tekstowy

z kodem APDL, który należy wczytać i wykonać w programie ANSYS. Wyniki obliczeń prezentuje postprocesor ANSYSa.

Aplikacja stworzona została w języku C#. Program posiada przejrzysty interfejs graficzny, w którym użytkownik, w sposób intuicyjny, może zamodelować dowolne rozmieszczenie na pierścieniu drutów Kirschnera i grotowkrętów Schanza. Łączna liczba elementów mocowanych na pierścieniu (zarówno drutów, jak i grotowkrętów) ustalona została na 3. Dodatkowo założono, że elementy powinny być względem siebie obrócone o kąt $> 30^\circ$.

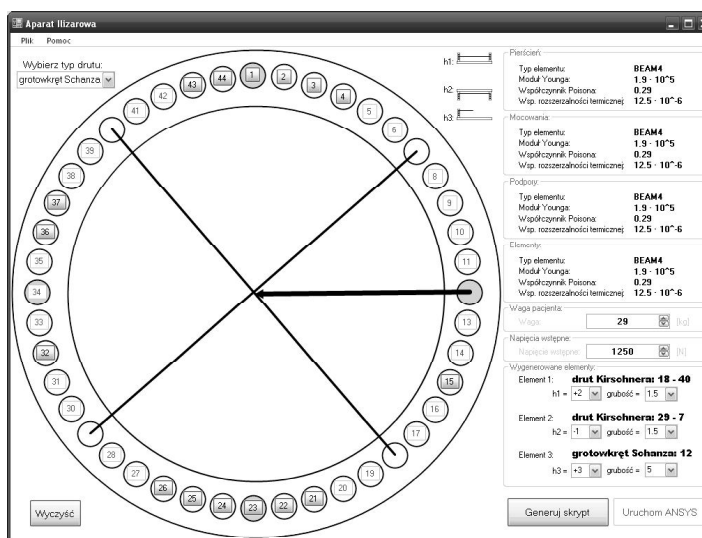
Aby zamodelować układ, użytkownik powinien w pierwszym kroku wybrać typ drutu z odpowiedniego pola wyboru, znajdującego się w lewym górnym rogu okna aplikacji. W przypadku wybrania drutu Kirschnera, należy wskazać, poprzez kliknięcie, pierwszy otwór, w którym będzie mocowany drut. Później aplikacja pokaże tylko 3 otwory, w których istnieje możliwość mocowania drugiego końca drutu, leżące po przeciwnej stronie pierścienia. Po wskazaniu drugiego otworu zostanie narysowana linia łącząca dwa wybrane otwory, symbolizująca drut Kirschnera.

W przypadku wybrania przez użytkownika grotowkrętu Schanza, należy wskazać tylko jeden otwór. Aplikacja narysuje grubszą linię, łączącą wybrany otwór ze środkiem pierścienia, zakończoną grotom, symbolizującą modelowany grotowkręt.

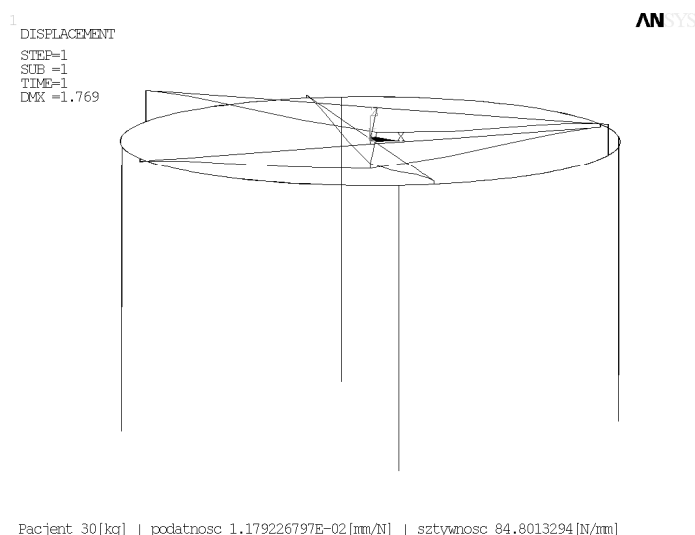
Dla każdego elementu, po prawej stronie u dołu ekranu, wyświetla się informacja o jego typie i numerach otworu/otworów, w których jest mocowany. Ponadto pojawiają się pola wyboru wysokości mocowania oraz grubości elementu. Po wybraniu wysokości, na ekranie aplikacji w prawym górnym rogu, pojawia się wizualizacja mocowania deklarowanej części.

W przypadku pomyłki użytkownik przyciskiem „Wyczyść”, znajdującym się w lewym dolnym rogu okna aplikacji, usunie wszystkie utworzone elementy na pierścieniu.

Zaprojektowany interfejs poprzez odpowiedni panel pozwala użytkownikowi wybrać również masę pacjenta z zakresu $15 \div 35$ kg ze skokiem 1kg. Wartość ta przeliczana będzie



Rys. 5. Przykładowe okno aplikacji



Rys. 6. Przykładowy otrzymany wynik

na siłę obciążającą układ aparatu Ilizarowa. Poprzez podobny panel deklarowane jest napięcie wstępne, którego wartość wybierać można w przedziale $0 \div 1500$ N ze skokiem 250 N.

Po utworzeniu gotowego modelu i ustawieniu wszystkich zmiennych użytkownik powinien kliknąć w przycisk 'Generuj skrypt'. Utworzony zostaje plik tekstowego o nazwie '*_skrypt.txt*' w katalogu aplikacji, z kodem APDL. Dodatkowo odblokowany zostanie przycisk 'Uruchom ANSYS', po kliknięciu którego uruchomiony zostanie pakiet ANSYS, w którym będzie można załadować wygenerowany plik wsadowy. Po załadowaniu pliku wsadowego zostanie wykonany blok *solution* pakietu obliczeniowego, dokonujący stosownych obliczeń, a wyniki zostaną zaprezentowane w postprocesorze ANSYSa.

5. WNIOSKI I KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

Zaprojektowana aplikacja umożliwia wykonywanie szybkich obliczeń przemieszczeń kości oraz podatności stabilizatora Ilizarowa. Prosty interfejs graficzny pozwala w łatwy sposób zaprojektować dowolny układ aparatu. Wyniki otrzymywane przy tak uproszczonym modelu, jaki został przyjęty w niniejszej pracy, nieznacznie różnią się od wyników dla modeli znacznie bardziej rozbudowanych.

W dalszych pracach aplikację tego typu można rozbudować, uwzględniając bardziej złożone schematy aparatu Ilizarowa – większą ilość pierścieni, możliwość wprowadzenia półpierścieni czy łuków, dowolny rozstaw teleskopów, itp. Idealnym rozwiązaniem byłoby wprowadzenie własnego modułu obliczeniowego metody elementów skończonych. Samodzielna aplikacja mogłaby być z powodzeniem wykorzystywana przez lekarzy ortopedów oraz inżynierów wspomagających.

Przedstawiony projekt to zaledwie prezentacja możliwości wykorzystania współczesnych technik programowania do współpracy z pakietami obliczeniowymi. Wskazane kierunki dalszego rozwoju mogą posłużyć do stworzenia w pełni funkcjonalnego oprogramowania, dającego szansę na szybkie projektowanie i analizę podatności dowolnych konfiguracji aparatów Ilizarowa, a tym samym na zwiększenie skuteczności procesu leczenia tą metodą.

LITERATURA

- [1] Bućko S., Mazurkiewicz S.: Teoretyczna i doświadczalna analiza podatności aparatu Ilizarowa, Materiały XVIII Sympozjum Mechaniki Doświadczalnej Ciała Stałego Jachranka 1998.
- [2] Sieńko J.: Dobór uproszczonego modelu obliczeniowego MES dla określenia sztywności aparatu Ilizarowa, praca dyplomowa, Politechnika Krakowska, 2001
- [3] Forma K., Herdzina M.: System szybkiej numerycznej analizy podatności wybranych układów aparatu Ilizarowa, praca dyplomowa, Politechnika Krakowska, 2009

SYSTEM FOR FAST NUMERICAL ANALYSIS OF COMPLIANCE IN CHOSEN CONFIGURATIONS OF THE ILIZAROV APPARATUS.

Summary. This paper treats about a cooperating with ANSYS application, which enables fast analysis and optimization of chosen configurations of Ilizarov apparatus. Idea of an engineering software providing fast modeling, using common elements and basing on two rings is presented. User is carried through designing a model, choosing options and in the end getting results – compliance of the chosen configuration of Ilizarov apparatus in just a few seconds.