

Monika GIERZYŃSKA-DOLNA, Piotr LACKI

Politechnika Częstochowska

Jan MARCINIAK, Zbigniew PASZENDA, Wojciech CHRZANOWSKI

Politechnika Śląska, Gliwice

ANALIZA NUMERYCZNA NARZĘDZI LAPAROSKOPOWYCH

Słowa kluczowe

Metoda elementów skończonych, chirurgia małoinwazyjna, narzędzia laparoskopowe, nożyczki laparoskopowe.

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki analizy numerycznej wytypowanej postaci konstrukcyjnej nożyczek laparoskopowych z wykorzystaniem metody elementów skończonych. W szczególności przedstawiono rozkład naprężeń zredukowanych w poszczególnych elementach nożyczek dla kolejnych etapów ich obciążania. Wyniki analizy stanowią wytyczne do optymalizacji kształtu nożyczek i poprawy ich własności eksploatacyjnych.

Wprowadzenie

Chirurgia małoinwazyjna z zastosowaniem technik endoskopowych jest obecnie najintensywniej rozwijającym się kierunkiem chirurgii. Jeszcze kilkanaście lat temu techniki endoskopowe wykorzystywane były wyłącznie w celach diagnostycznych. Obecnie znajdują zastosowanie w każdej dziedzinie chirurgii. Stosowane są takie techniki endoskopowe, jak laparoscopia, gastroscopia, kolonoskopia, rektoskopia, artroskopia, cystoskopia, bronchoskopia [1–3].

We współczesnej medycynie do najczęściej stosowanych technik endoskopowych zaliczamy laparoskopię. Umożliwia ona m.in. makroskopową ocenę otrzewnej, wątroby, części pęcherzyka żółciowego, śledziony, narządów rodnych, przepony i innych narządów położonych wewnątrzotrzewnowo. Służy również do pobierania materiału biopsyjnego do badania mikroskopowego. Ponadto wykorzystywana jest do zabiegów terapeutycznych (np. laparoskopowego usunięcia pęcherzyka żółciowego, rozbicia złożeń pęcherzyka żółciowego głowicą laserową, tamowania krwawienia) lub zabiegów diagnostycznych (cholangiografii, cholecystografii, pomiaru ciśnienia śledzionowo-wrotnego). Realizacja wymienionych zabiegów możliwa jest dzięki zastosowaniu odpowiednich narzędzi laparoskopowych. Przede wszystkim stosowane są różnego rodzaju narzędzia ułatwiające chwytanie (kleszczyki chwytne – graspery), preparowanie (preparatory) i przecinanie tkanek (nożyczki laparoskopowe) [3].

Obecnie na rynku stosowane są dwa rodzaje instrumentarium: jednorazowego i wielorazowego użytku. Dominującą grupę stanowią narzędzia jednorazowego użytku, które w Polsce ze względów ekonomicznych stosowane są wielokrotnie. Jako że nie są one przystosowane do wielokrotnej sterylizacji, stwarzają ryzyko zakażeń pomimo prawidłowego przeprowadzenia tego procesu [4]. Pomimo niższej ceny jednostkowej poszczególnych narzędzi sprzęt jednorazowego użytku jest drogi w użytkowaniu. Prawidłowo użytkowany powinien być wykorzystany tylko do jednej procedury zabiegowej, a następnie zniszczony. Z tego też względu wykorzystywanie narzędzi jednorazowych do kilku, a nawet kilkunastu zabiegów operacyjnych z uwagi na septykę nie jest wskazane.

W ostatnim okresie na podstawie analizy potrzeb rynkowych, oceny funkcjonalności i jakości stosowanych dotychczasowych rozwiązań autorzy pracy podjęli badania nad opracowaniem nowych rozwiązań konstrukcyjnych narzędzi o perspektywnym znaczeniu dla zabiegów endoskopowych. Niniejsza praca stanowi etap wstępny prowadzonych badań. Jej zakres obejmuje opracowanie metodyki analizy numerycznej narzędzi laparoskopowych z wykorzystaniem metody elementów skończonych.

1. Metodyka badań

Zrealizowana w pracy analiza numeryczna opierała się na metodzie elementów skończonych. Metoda ta została omówiona w pracach [5, 6]. Symulację komputerową wykonano z użyciem programu ADINA System [7].

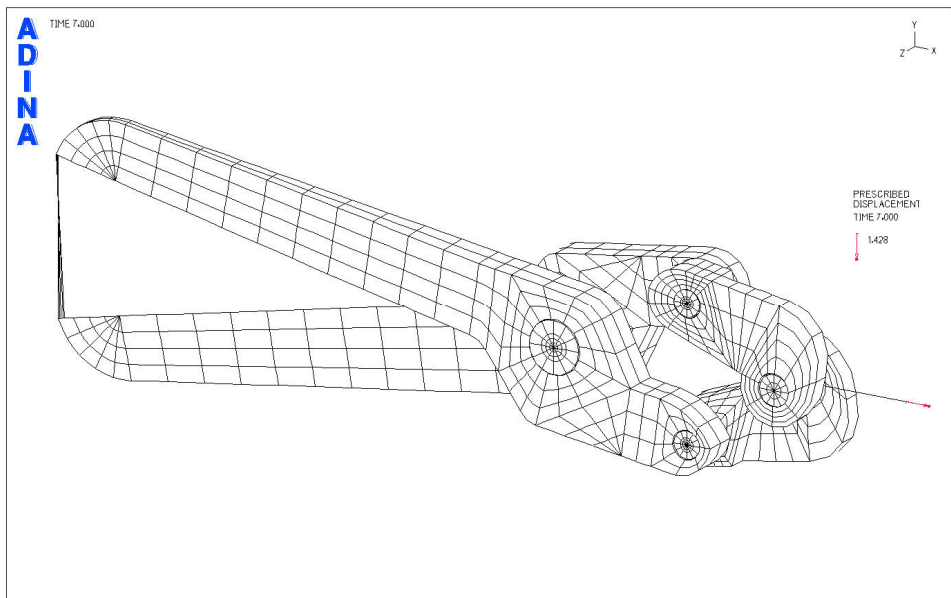
W analizie numerycznej przyjęto przestrzenny (3D) model rozpatrywanego zagadnienia. Analizowana postać konstrukcyjna nożyczek laparoskopowych składała się z 4 niezależnych ruchomych elementów połączonych 4 sworzniami, z czego 2 elementy były nożami a 2 łącznikami. Na rys. 1 przedstawiono siatkę elementów skończonych wygenerowaną dla analizowanej geometrii nożyczek. W modelu numerycznym zastosowano elementy kontaktowe pomiędzy sworz-

niami a otworami w ruchomych elementach nożyczek. Wprowadzenie kontaktu pozwoliło na dokładniejszą analizę zachowania się zespołu elementów nożyczek laparoskopowych. Do obliczeń przyjęto właściwości stali 1.4034 (oznaczenie wg EN). W tabeli 1 przedstawiono skład chemiczny oraz wyniki badań doświadczalnych, tj. podstawowe własności mechaniczne, wykonanych dla stali używanej powszechnie na nożyczki chirurgiczne. Model konstytutywny materiału zakładał jego liniowo-sprężyste właściwości. Przyjęcie takiego modelu jest wystarczające, ponieważ założono, że elementy narzędzia laparoskopu pod obciążeniem roboczym nie będą przenosić naprężeń powyżej granicy plastyczności.

Tabela 1. Skład chemiczny i właściwości mechaniczne stali 1.4034

Skład chemiczny				Właściwości mechaniczne				
C%	Si%	Mn%	Cr%	R _{0,2} [MPa]	R _r [MPa]	E [MPa]	ν	Twardość
0,435	0,39	0,517	13,578	383	640	$2,2 \cdot 10^5$	0,29	225 HV

Siatka MES zbudowana była z 27-węzłowych elementów sześciennych typu 3D. W sumie do zamodelowania nożyczek użyto 2382 elementów, co dało 19383 węzłów. Przyjęta ilość elementów i węzłów zapewniała prawidłowe odwzorowanie geometrii.



Rys. 1. Model numeryczny nożyczek laparoskopowych

Założone warunki brzegowe ograniczały przemieszczenia osi sworznia o największej średnicy w trzech kierunkach. Z uwagi na przyjęte założenia, przemieszczenia w objętości tego sworznia były niewielkie i wynikały z obciążenia go przez siły kontaktu. Pozostałe elementy układu kinematycznego nie były związane żadnymi warunkami brzegowymi. Pomiędzy końcami nożyczek laparoskopu zamodelowano liniowe elementy sprężyste, które miały za zadanie symulowanie obciążenia układu. Parametry elementów sprężystych zostały tak dobrane, aby przy zamkniętych nożyczkach uzyskać siłę $F = 10\text{ N}$ na obu końcach. Do sworznia łączącego ze sobą dwa łączniki zostało przyłożone obciążenie w formie przemieszczenia. Ruch realizowany był przez zmianę przemieszczenia tego sworznia. Całkowita wartość przemieszczenia realizowana w trakcie obliczeń wynosiła $\Delta l = 2\text{ mm}$. Wielkość rozwarcia noży laparoskopu uzyskana przez zmianę położenia przesuwanego sworznia wyniosła $\alpha = 40^\circ$.

Zaproponowany model numeryczny pozwala na analizę stanu naprężenia i odkształcenia nożyczek laparoskopu w funkcji przemieszczenia sworznia. Dla kolejnych etapów obciążenia modelujemy liniowy wzrost siły potrzebnej do ściśnięcia elementów sprężystych, przyłożonych na końcu nożyczek laparoskopu. Ponadto użycie elementów kontaktowych na wszystkich powierzchniach pomiędzy sworzniami i elementami nożyczek laparoskopowych pozwala precyzyjnie określić stan naprężenia w całym układzie kinematycznym nożyczek laparoskopu.

Narzędzia laparoskopowe są stosunkowo prostymi mechanizmami kinematycznymi. Jednak wymaga się od nich szczególnych warunków pracy. Projektując narzędzie laparoskopowe, należy zwrócić uwagę na wartość naprężeń krytycznych, dla danego materiału użytego w narzędziu, oraz wytrzymałość zmęczeniową Z . Narzędzia laparoskopowe ze względu na dużą niezawodność powinny być projektowane z dużym współczynnikiem bezpieczeństwa. W niniejszej pracy założono, że współczynnik bezpieczeństwa musi spełniać zależność $x \geq 6$. Tak duża wartość współczynnika bezpieczeństwa podyktowana była koniecznością zapewnienia bezpiecznego użytkowania w trudnym środowisku korozyjnym. Płyny fizjologiczne i warunki sterylizacji wpływają w znacznym stopniu na pogorszenie odporności na korozję.

Najbardziej niebezpieczną i najczęściej występującą formą korozji w narzędziach laparoskopowych jest korozja naprężeniowa. Ten rodzaj zagrożenia jest szczególnie trudny do identyfikacji, a skutki mogą stanowić poważne zagrożenie dla zdrowia pacjenta. Prawdopodobieństwo wystąpienia korozji naprężeniowej wzrasta wraz ze zwiększeniem agresywności środowiska i wzrostu naprężeń. Na rozwój korozji naprężeniowej ma wpływ również stopień zużycia elementów trących. Zużycie powoduje deformację powierzchni tarcia i wprowadza w ten obszar lokalne spiętrzenia naprężeń. W fazie projektowania należy uwzględnić to zjawisko i projektować poszczególne elementy narzędzia tak, aby

nie występowały zbyt duże wartości naprężeń w małych przekrojach. Lokalne spiętrzenia naprężeń zależą w dużym stopniu również od dokładności wykonania poszczególnych elementów oraz precyzji montażu całego narzędzia.

Jak wynika z długoletnich doświadczeń, w eksploatacji narzędzi laparoskopowych kluczem do ich niezawodnej pracy jest właściwa konstrukcja zapewniająca minimalizację stanu naprężeń w każdym elemencie narzędzia. Uzyskanie najbardziej korzystnego stanu naprężeń w elementach narzędzia laparoskopowego można dokonać jedynie na drodze analizy zaawansowanych modeli numerycznych.

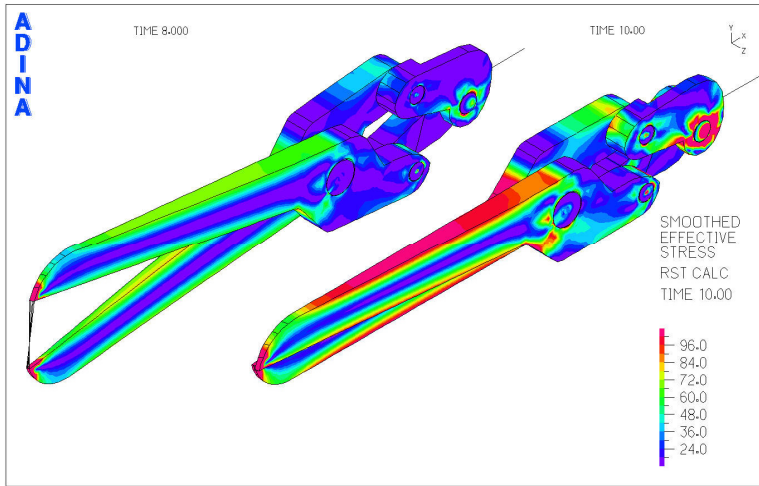
Przedstawiona powyżej metodyka badań narzędzi laparoskopowych zapewnia kompleksową analizę zagadnienia i uzyskanie praktycznych wyników obliczeń przydatnych do dalszej optymalizacji kształtu.

2. Wyniki obliczeń

Obliczenia numeryczne nożyczek laparoskopowych w postaci rozkładu naprężeń zredukowanych były podstawą analizy i wnioskowania o sposobie modyfikacji kształtu tych narzędzi. Wraz z rosnącym krokiem czasowym narastało obciążenie, zmieniając układ kinematyczny i powodując wzrost naprężeń w elementach nożyczek laparoskopowych. Ze względu na założenie, dotyczące przyjęcia liniowo-sprężystego materiału wynika, że wraz z liniowym wzrostem obciążenia liniowo wzrastać będą również naprężenia wewnątrz elementów nożyczek laparoskopu. Najbardziej niekorzystne położenie ze względu na stan naprężeń występuje w ostatnim kroku czasowym.

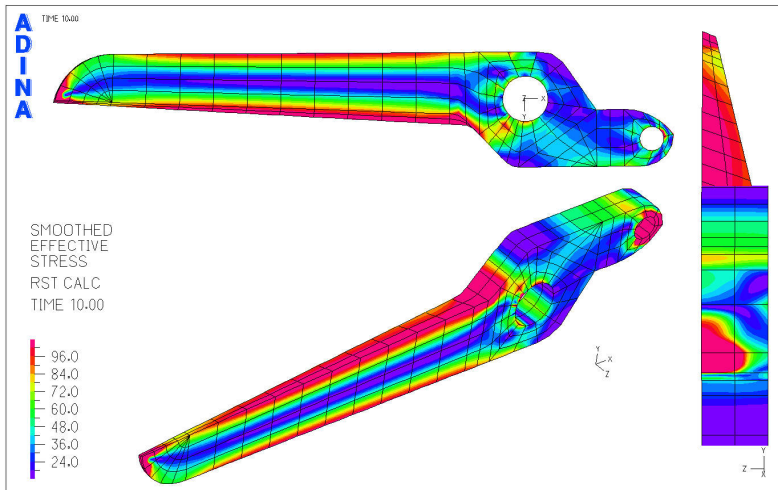
Na rys. 2 zaprezentowano rozkład naprężeń zredukowanych dla dwóch stanów obciążenia. Poszczególne rysunki różnią się wartością naprężeń zredukowanych. Strefa największych naprężeń w pokazanych układach kinematycznych występuje w roboczej części noża oraz w okolicy sworznia łączącego dwa łączniki narzędzia laparoskopowego.

Przyjęty sposób obciążenia i zadane warunki brzegowe dla nożyków laparoskopu są podobne do schematu zginania belki, jednak analityczne rozpatrywanie jest utrudnione poprzez zmienny przekrój noży. Rozkład naprężeń pozostałych elementów narzędzia laparoskopu jest zależny od występujących w danej chwili obciążeń i położenia układu kinematycznego. Zakres obciążeń występujący przy maksymalnym obciążeniu zaczyna się od miejsc, w których naprężenia są zerowe, a kończy się na obszarach, gdzie naprężenia dochodzą do wartości 100 MPa. Poszczególne kategorie elementów nożyczek laparoskopu różnią się sposobem obciążenia i charakterem występujących naprężeń. Dla noży istotne będzie uwzględnienie naprężeń spowodowanych zginaniem, a dla łącznika najistotniejsze są naciski kontaktowe.



Rys. 2. Rozkład naprężeń zredukowanych [MPa] dla dwóch kroków czasowych $t_s = 8$ oraz $t_s = 10$

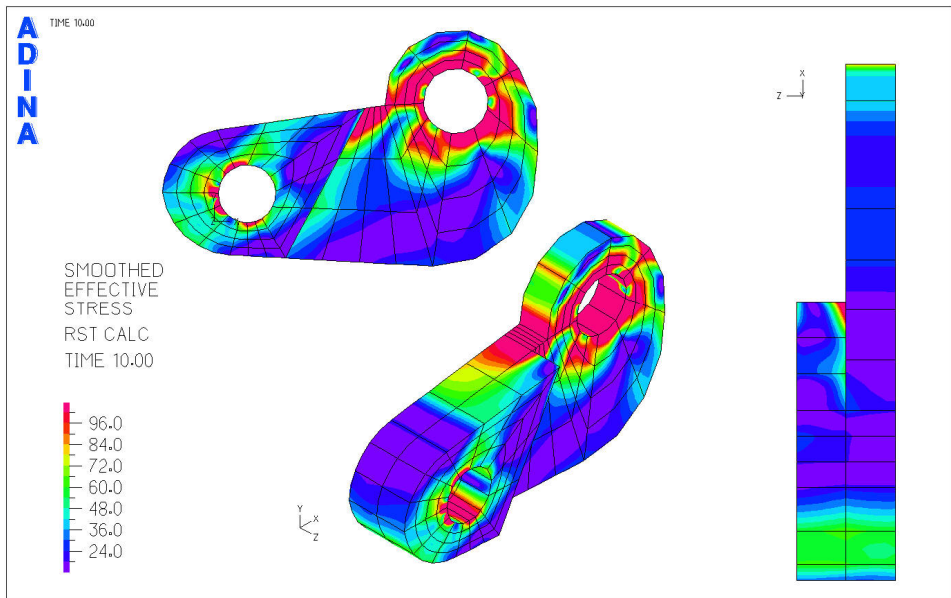
Na rys. 3 przedstawiono rozkłady naprężeń zredukowanych dla pojedynczego noża narzędzia laparoskopu w trzech rzutach. Rysunek pokazuje wszystkie charakterystyczne obszary występowania niekorzystnego stanu obciążeń. Najbardziej obciążonym obszarem tego elementu jest ramię z ostrzem roboczym. W rozpatrywanym modelu obciążenie zadane w postaci elementu sprężystego na końcu noża działa jak siła przyłożona na krawędzi noża. Pozostały układ kinematyczny określa położenie noża roboczego.



Rys. 3. Rozkład naprężeń zredukowanych [MPa] dla pojedynczego noża laparoskopu w trzech rzutach

Z przedstawionych wyników można wnioskować, że ostrze, mimo iż nie jest bezpośrednio obciążone, narażone jest na działanie niekorzystnego stanu naprężeń. Ze sposobu obciążenia noża wynika, że na ostrzu pojawiają się naprężenia rozciągające. Wartość tych naprężeń jest w tym przypadku stosunkowo niewielki i nie stwarza zagrożenia pęknięcia. Drugim niekorzystnym obszarem ze względu na poziom naprężeń jest mniejszy z otworów łączący nóż z łącznikiem za pomocą sworznia. Jak wynika z przeprowadzonej analizy, poziom naprężeń będzie w dużym stopniu zależał od wielkości luzu pomiędzy sworzniem i otworem w elemencie noża. Wielkość tego luzu będzie się zmieniać w czasie ze względu na zużycie. Połączenie ślizgowe w tym przypadku pracuje bez smarowania, dlatego zużycie jest bardziej intensywne. Z obserwacji zużytych elementów nożyczek laparoskopu wynika, że to połączenie należy do częstych przyczyn wycofania z eksploatacji tych narzędzi, dlatego przy projektowaniu i wykonaniu owego połączenia należy zwrócić szczególną uwagę na ten element.

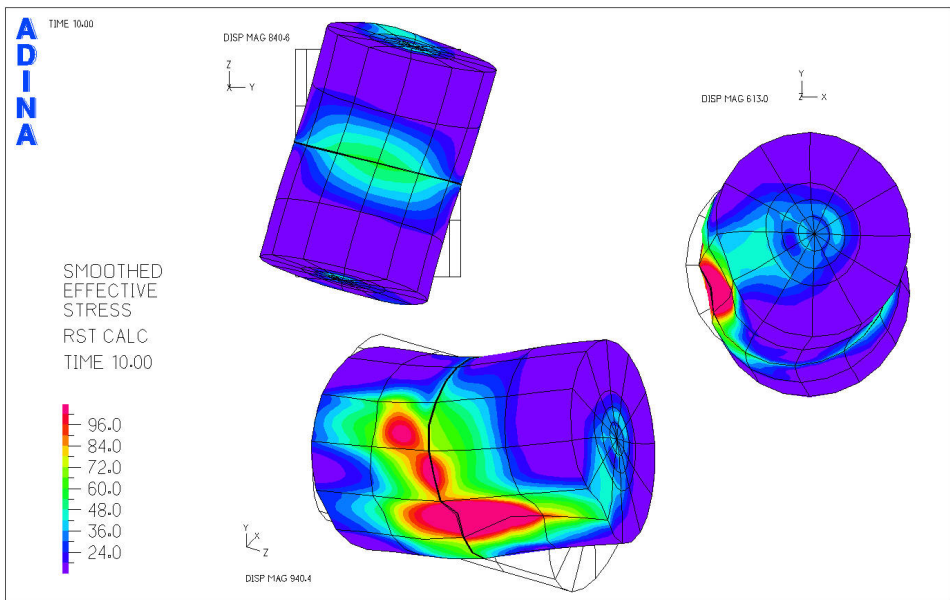
Obciążenie z noża jest przenoszone na łącznik poprzez sworznie. Łącznik jest elementem, w którym wykonano dwa otwory i posiada dwie grubości w przekroju poprzecznym. Jak wynika z rys. 4, najbardziej obciążonym miejscem łącznika jest otwór usytuowany na mniejszej grubości blachy, mimo że ma nieco większą średnicę.



Rys. 4. Rozkład naprężeń zredukowanych [MPa] dla pojedynczego łącznika laparoskopu w trzech rzutach

Obserwowany wzrost naprężeń zredukowanych w okolicy większego otworu w stosunku do mniejszego spowodowany jest przez mniejszą grubość łącznika. Zauważalny jest również wpływ działania karbu na skutek ostrego załamania geometrii łącznika, mimo tego wartości naprężeń w przedstawionej geometrii należy uznać za bezpieczny. Optymalne rozwiązanie geometrii może być przedmiotem dalszej analizy, w której należy dążyć do usunięcia efektu wzrostu naprężeń spowodowanych działaniem karbu. Należałoby również dążyć do uproszczenia geometrii łącznika w celu jego łatwiejszego i tańszego wykonania zwracając jednocześnie szczególną uwagę na dokładność wykonania otworów pod sworznie. Ze względu na duże naciski jednostkowe przenoszone w przegubach konieczna jest obróbka cieplna współpracujących elementów, mająca na celu podniesienie trwałości i odporności na zużycie. Należałoby również rozważyć inne sposoby umocnienia powierzchni kontaktu otworu i sworznia.

Sworznie tworzące ruchome połączenia pomiędzy elementami narzędzia laparoskopowego są narażone na działanie naprężeń ścinających oraz nacisków kontaktowych. Jak pokazano na rys. 5, na powierzchni sworznia występują lokalne koncentracje naprężeń spowodowane działaniem sił kontaktowych. W środkowej części sworznia wyraźnie można zauważyć działanie naprężeń ścinających. Maksymalna wartość naprężeń zredukowanych w objętości sworznia nie przekracza naprężeń dopuszczalnych określonych dla tego narzędzia.



Rys. 5. Rozkład naprężeń zredukowanych [MPa] dla sworznia; deformacja kształtu na skutek obciążeń

Sworzeń pod obciążeniem deformuje swój kształt, co niekorzystnie wpływa na proces eksploatacji narzędzia laparoskopowego. Deformacja powodowana jest przez trzy główne czynniki: zginanie, ścinanie i naciski powierzchniowe. Na etapie projektowania znajomość naprężeń i charakteru deformacji pozwala na optymalny dobór wielkości otworów pod sworznie oraz określenie luzu pomiędzy otworem i sworzniem.

Przyjęty model symulacyjny daje wyniki, których szczegółowa analiza wykazuje zbieżność z obserwacjami zużytych narzędzi laparoskopowych. Można zatem z dużym prawdopodobieństwem projektować i przewidywać, z użyciem MES, zachowanie się nowych konstrukcji narzędzi laparoskopowych.

Wnioski

Przedstawiona charakterystyka i symulacja numeryczna nożyczek laparoskopowych pozwala na przedstawienie następujących wniosków:

- Strefa największych naprężeń w pokazanym układzie kinematycznym występuje w roboczej części noża oraz w okolicy sworznia łączącego dwa łączniki narzędzia laparoskopowego.
- Obserwowany wzrost naprężeń zredukowanych w okolicy większego otworu w stosunku do mniejszego spowodowany jest przez mniejszą grubość łącznika.
- Na skutek ostrego załamania geometrii łącznika zauważalny jest wpływ działania karbu, mimo tego wartości naprężeń w tym obszarze geometrii należy uznać za bezpieczne.
- Należy dążyć do uproszczenia geometrii łącznika w celu wyeliminowania działania karbu łatwiejszego.
- Ze względu na duże naciski jednostkowe przenoszone w przegubach konieczna jest obróbka cieplna współpracujących elementów mająca na celu podniesienie trwałości i odporności na zużycie. Należałoby również rozważyć inne sposoby umocnienia powierzchni kontaktu otworu i sworznia.

Praca naukowa finansowana ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego, wykonana w ramach realizacji Programu Wieloletniego pn. „Doskonalenie systemów rozwoju innowacyjności w produkcji i eksploatacji w latach 2004–2008”.

Bibliografia

1. Krawczyk M. (red.): Biblioteka chirurga i anestezjologa. Cholecystektomia Laparoskopowa. PZWL, Warszawa 1998.
2. Kostewicz W. (red.): Chirurgia Laparoskopowa. PZWL, Warszawa 2002.

3. Widuchowski J.: Kolano, Artroskopia Diagnostyczna i Operacyjna. Wydawnictwo Sport&Med., Katowice 2002.
4. Paszenda Z., Tyrlik-Held J.: Instrumentarium chirurgiczne. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003.
5. Bathe K. J.: Finite Element Procedures. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1996.
6. Zienkiewicz O.C.: The finite element method. Vol. 1, Basic formulation and linear problems / O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor. Wydanie 4th ed. Oxford : Butterworth-Heinemann, 2000.
7. ADINA R& D, Theory and Modeling Guide Volume I: ADINA Solids & Structures Inc. Report ARD 05-7 October 2005.

Recenzent:
Jerzy DOBRODZIEJ

Numerical analysis of laparoscopic instruments

Summary

The aim of the work is improvement of utilitarian properties of laparoscopic instruments. As the example of the instrument a laparoscopic scissors were analyzed. On the basis of utilization conditions study, a key parameters were set and a numerical analysis was applied. Results of the numerical simulation allowed to determine the loading scheme in this type of instruments. The obtained results will be used in optimization of the scissors' shape and in improvement of their utilitarian properties.