

KOMPUTEROWY MODEL MECHANICZNEGO ZESPOLENIA ŚCIAN ŻOŁĄDKA

COMPUTER MODEL OF THE STOMACH WALLS ANASTOMOSIS

Magdalena Karczewska*

Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, 80-233 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12

* e-mail: magdalena.karczewska@pg.gda.pl

STRESZCZENIE

Celem pracy jest zoptymalizowanie połączenia sztytego ścian żołądka. Optymalizacja ma obejmować zmianę konfiguracji zszywek, co wpłynie na poprawę szczelności zespolenia. W niniejszej pracy omówiony został sposób tworzenia modelu elementów skończonych MES tkanki miękkiej. Przedstawione założenia będą stanowić bazę do dalszych modyfikacji, opartych na danych materiałowych, zebranych w trakcie badań elastyczności próbek tkanki żołądka. Działania te mają na celu znalezienie modelu hipersprężystego, najlepiej opisującego charakter badanego materiału.

Słowa kluczowe: MES, tkanka miękka, optymalizacja, model komputerowy

ABSTRACT

The main goal of this work is optimization of the surgical connection (sutures) of stomach walls. The staples' configuration changes should be reflected in the improved anastomotic tightness. In this paper it is explained how to create the FEM model of soft tissue. It will be a base for further modifications based on the material data collected during the study of flexibility of stomach tissue samples. The main goal is determine the hyperelastic model optimally describing the nature of the tested material.

Keywords: FEM, soft tissue, optimization, computer model

1. Wstęp

Konieczność wykonywania zabiegów chirurgicznych w obrębie żołądka jest najczęściej wynikiem choroby nowotworowej lub wrzodowej. Coraz większą popularność zyskuje również chirurgia bariatryczna, czyli operacyjne zmniejszenie żołądka u osób otyłych.

W przypadku raka żołądka, wybór metody postępowania zależy od stopnia zaawansowania choroby. We wczesnym stadium lub gdy zmiany umiejscowione są w 1/3 dalszej części żołądka, zalecana jest prawie całkowita resekcja narządu wraz z otaczającymi go węzłami chłonnymi oraz wykonanie zespolenia żołądkowo-jelitowego. Konieczność całkowitej resekcji pojawia się, gdy nowotwór obejmuje okolicę wpustu lub zmiany są wieloogniskowe. W sytuacji złych rokowań przeprowadza się operacje paliatywne, które polegają na wytworzeniu zespolenia mających na celu ominięcie niedrożnych odcinków przewodu pokarmowego lub wytworzenia stomii [1].

Wskazaniem do operacji w przypadku choroby wrzodowej, oprócz niepowodzenia leczenia zachowawczego (farmakologicznego), są powikłania, tj. krwawienie, perforacja, umiejscowienie wrzodu na wysokości trzustki, zwężenie odźwiernika. W tym wypadku leczenie chirurgiczne można podzielić na [1, 2]:

- resekcje – częściowe wycięcie żołądka oraz wykonanie zespolenia żołądkowo – jelitowego metodą Rydygiera (Billrotha I) lub Billrotha II [1]
- wagotomie – przecięcie nerwów błędnych, co prowadzi do zmniejszenia wydzielania soku żołądkowego [1, 3]. Wyróżniamy:
 - wagotomię pniową – przecina się pnie nerwów błędnych;
 - wagotomię wybiórczą – przecięcie gałęzi żołądkowych przedniego i tylnego nerwu Latarjeta;
 - wagotomię wysoce wybiórczą – przecinane są gałązki nerwów błędnych, odpowiadających za wydzielanie kwasu solnego w okolicy wpustu, dna i trzonu;
 - wagotomię proksymalną – przecięcie włókien nerwu błędnego, które unerwiają trzon oraz większą krzywiznę żołądka;
- wagotomie połączone z resekcją – wykonuje się je w celu poprawy opróżniania żołądka [1]:
 - antrektomia – wycięcie części odźwiernikowej,
 - pyloroplastyka – przecięcie odźwiernika.

Także w przypadku polipów może być niezbędne usunięcie objętych zmianami części żołądka. Na ogół jednak polipy (wykrywa się, gdy ich wielkość nie przekracza 2 cm i można je usunąć endoskopowo [1, 4]. Każdy z przypadków chorobowych wiąże się z możliwością wystąpienia zespolów poresekcyjnych, takich jak [1, 5]:

- wczesny zespół poposiłkowy – w wyniku niekontrolowanego, szybkiego przemieszczenia się treści pokarmowej do jelita cienkiego dochodzi do wyrównania ciśnień osmotycznych, kosztem przemieszczenia się wody do jelita. Należy ok. 2 godziny po posiłku spożyć drobny posiłek, w przypadku nawrotów zaburzeń trzeba rozważyć zmianę typu zespolenia na metodę Roux-en-Y.
- niedrożność pętli doprowadzającej – powstaje w wyniku zagięcia pętli doprowadzającej w okolicy zespolenia. Konieczna jest zmiana zespolenia na metodę Rydygiera (Billrotha I) lub na Roux-en-Y.
- alkaliczne zapalenie śluzówki żołądka – jest wynikiem zarzucania żółci, soku trzustkowego i wydzieliny dwunastnicy do żołądka. Konieczne jest wykonanie zespolenia Roux-en-Y na długiej pętli, gdzie odległość między żołądkiem a zespoleniem jelitowo – jelitowym wynosi co najmniej 40 cm.
- nawracający wrzód żołądka – powstaje na skutek niewłaściwie przeprowadzonej wagotomii (np. na skutek nieznaalezienia tylnego nerwu błędnego). Według statystyk, największe prawdopodobieństwo niepowodzenia zabiegu niesie wagotomia wysoce selektywna (10–15%). Tuż za nią są wagotomia z pyloroplastyką i wagotomia selektywna (5–10%). Najmniej nawrotów pojawia się po zastosowaniu wagotomii z atrektomią i zespoleniem Rydygiera (1–2%) lub Billrotha II (1–3%).
- atonia żołądka – zbyt szybkie lub wolne opróżnianie żołądka, zwłaszcza w zespoleniu Roux-en-Y (ok. 50% pacjentów). Leczenie polega na przeczekaniu objawów lub podaniu odpowiednich leków.
- zaburzenia odżywiania – nieprawidłowe wchłanianie pokarmu. Wymaga leczenia farmakologicznego lub podania suplementów diety.

2. Materiały używane w chirurgii bariatrycznej

W operacjach bariatrycznych do zamknięcia narządów rurowych wykorzystuje się endostaplery o różnej długości magazynków i zszywek. Narzędzia te ułatwiają przecięcie i zespolenie narządów, poprzez zmniejszenie utraty krwi oraz obniżenie ryzyka wystąpienia nieszczelności szwu lub zakażenia pooperacyjnego rany [7]. Obecnie wiele operacji bariatrycznych wykonuje się przy użyciu

laparoskopu. W tym wypadku trokary¹ są dłuższe niż w klasycznej laparoskopii, a ich średnica (wynikająca z użycia endostaplerów) wynosi 12 i 15 mm [7].

Na wielkość zużycia materiałów zespalających ma wpływ rodzaj narzędzia do cięcia i koagulacji. W celu zmniejszenia m.in. ilości ciał obcych (nici, zszywki itp.) w jamie brzusznej, co przekłada się na czas gojenia się ran, zaleca się stosowanie np. nożyczek ultradźwiękowych lub elektrokoagulatorów [7]. Do przecinania żołądka i jelit służy endostapler liniowy z nożem, który może mieć różną długość magazynków (30, 45, 60 mm) i wysokość zszywek (dobieranych w zależności od grubości ścian operowanego narządu). Zespolenia zaś wykonuje się przy użyciu staplerów okrężnych i liniowych [8]. W chirurgii żołądka i jelit rozróżnia się staplery:

- z niebieskimi magazynkami → zszywki mają długość 3,5 mm;
- z brązowymi magazynkami → zszywki mają długość 3,8 mm;
- z zielonymi magazynkami → zszywki mają długość 4,5 mm.

Dobór staplerów zależy od zaleceń firmy dostarczającej narzędzia, sytuacji anatomicznej oraz przede wszystkim od doświadczenia chirurga. Oczywiście zespolenie można wykonać za pomocą ręcznego szycia tkanek za pomocą specjalnych nici wchłanialnych, jednak nie jest tak korzystnym rozwiązaniem, jak zastosowanie endostaplerów i staplerów okrężnych [7].

3. Modelowanie MES tkanek miękkich

Tkanki biologiczne mogą oddziaływać w bardzo skomplikowany sposób, dlatego podczas modelowania należy określić szeroki zakres warunków brzegowych. W celu przeprowadzenia analizy zachowania tkanek miękkich, można skorzystać z dostępnych w programów numerycznych wykorzystujących metodę elementów skończonych (MES) [10]. Aby móc dobrać odpowiedni model, należy po rozpoznaniu badanych tkanek określić równania różniczkowe, definiujące elementy skończone modelu. Dopiero na tej podstawie możliwe będzie znalezienie odpowiedzi, jakie parametry będą niezbędne do dalszej pracy. Istotnym ograniczeniem jest tutaj również dostępność oprogramowania oraz zakres możliwości jego wykorzystania (wersje bezpłatne, studenckie, komercyjne). Pomocne mogą okazać się również biblioteki programów, np. deal.II, pozwalające na obliczenia równań różniczkowych z wykorzystaniem adaptacyjnych elementów skończonych.

W modelowaniu tkanek znalazły zastosowanie m.in. materiały hipersprężyste. W celu ich wykorzystania należy dobrać odpowiednią funkcję energii odkształcenia oraz prawidłowo wyznaczyć stałą materiałową. Na szczególną uwagę, ze względu na ich potwierdzoną skuteczność w analizach numerycznych, zasługują modele:

- Mooney'a – Rivlina,
- Ogdena,
- Verondy – Westmanna,
- Arrudy – Boyce'a,
- neo-Hookean,
- poprzecznie izotropowy,
- sprężysty izotropowy.

Jednym z najprostszych zagadnień pokazujących niedoskonałość prostych modeli hipersprężystych, tj. model neo-Hookean i Mooney'a-Rivlina, jest inflacja balonu. Jak zapewne każdy zauważył, przy próbie nadmuchania balonika najwięcej wysiłku trzeba włożyć na samym początku. Wraz z rozciąganiem ścianek napompowywanie powietrzem staje się łatwiejsze, by na moment przed pęknięciem balonu znów stało się to bardzo trudne. Proces ten jest procesem nieliniowym i należy go rozważać w zakresie dużych deformacji. Wykorzystując relacje konstytutywne hipersprężystości, nie potrafimy przewidzieć momentu pęknięcia balonu, gdyż wymaga to uzupełnienia modelu o kryterium zniszczenia materiału. Pomocne w analizie może być założenie, iż początkowo balon jest membraną sferyczną o danym promieniu i znacznie mniejszej grubości.

¹ **Trokar** – „narzędzie chirurgiczne w kształcie prowadnicy rurowej (kaniula), w której umieszczony jest stalowy trzpień (mandryn, obturator) o ostrym bądź tępym zakończeniu” [14]

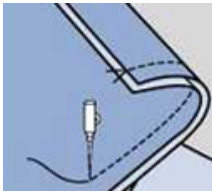

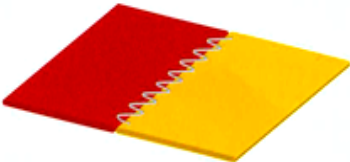
Zakładamy też, że kształt balonu jest zachowany. Ciśnienie gazu w balonie (na który działa również ciśnienie atmosferyczne) w momencie nadmuchiwania musi powodować równomierne rozszerzanie się materiału. Proces ten jest powolny. W ten sposób można określić jednorodne rozszerzenie membrany oraz wydłużenie prostopadłe do jej powierzchni [11].

4. Modelowanie MES mechanicznego zespolenia ścian żołądka

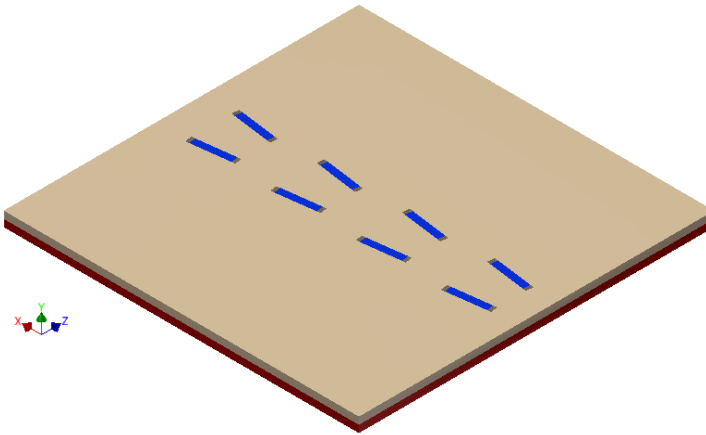
W modelowaniu ściany żołądka można odnieść się do modelu ściskania i rozciągania tarcz z materiału ściśliwego. W tym przypadku zaleca się stworzenie symetrycznej siatki MES, zagęszczonej w narożach tarczy. Należy również określić warunki brzegowe w przemieszczeniach (np. przemieszczenia zerowe górnej krawędzi oraz zerowe przemieszczenie dolnej krawędzi w kierunku poziomym). Rozciągnięcie i skrócenie tarczy jest wtedy realizowane poprzez pionowe przemieszczenie dolnej krawędzi. W przypadku skrócenia tarczy przy zadanym przemieszczeniu pionowym w okolicach naroży tarczy pojawia się silne uwypuklenie i ścinanie materiału w wyniku znacznej deformacji [11].

W ramach prób znalezienia optymalnej konfiguracji szwów w zespoleniu ścian żołądka warto zaczerpnąć informacje nie tylko dotyczące szwów chirurgicznych, ale i tekstylnych. W tabeli 1 przedstawiono wybrane ściegi, mogące wpłynąć na szczelność połączenia tkanek. Na szczególną uwagę zasługują wytrzymałe ściegi bieliźniane oraz płaski, które z powodzeniem stosuje się w szyciu bardzo cienkich i delikatnych dzianin. Dodatkową ich zaletą jest kształt, dzięki któremu szycie jest ledwo wyczuwalne i nieusztynione. Wykorzystując informacje dotyczące tych ściegów, można przeprowadzić analizy numeryczne MES, umożliwiające określenie optymalnej wielkości pojedynczego szwu oraz odległości i kąta między nimi.

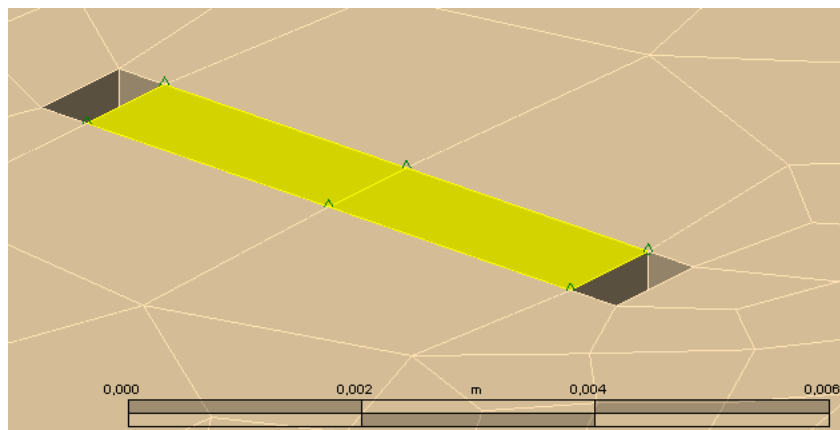
Tabela 1. Wybrane ściegi tekstylne [12]

Rodzaj szwu		Charakterystyka
	Bieliźniany	- bardzo mocny, - do łączenia elementów wyrobów bieliźnianych, ubiorów damskich, odzieży dziecięcej, koszul męskich, odzieży zawodowej i innych tkanin lekkich typu bawełnianego;
	Płaski	- składa się z dwóch komponentów, - stosowany jest w bardzo cienkiej odzieży z dzianin, gdzie szwy muszą być delikatne i płaskie;
	Stykowy	- stosowany do łączenia skór, - bardzo mocne pięcionitkowe szwy używane do przemysłowego szycia odzieży.

Wykorzystując program Autodesk Simulation Mechanical® 2015 oraz Autodesk Inventor Professional® 2013 stworzono komputerowy model 3D zespolonej tkanki miękkiej (p. rys. 1). Jednym z założeń modelu jest wyidealizowanie kształtu powierzchni tkanki tak, aby przy zachowaniu rzeczywistych wymiarów głównych, uzyskać formę możliwie zbliżoną do bryły prostej. Dodatkowym uproszczeniem jest sprowadzenie połączenia do prostokątnego pola (znajdującego się 0,001 mm poniżej linii tkankowej), odpowiadającego powierzchni pod pojedynczym szwem oraz otworów powstających podczas szycia (p. rys. 2).



Rys. 1. Uproszczony model zespolenia



Rys. 2. Uproszczona geometria zespolenia

Niezbędnym elementem analizy było zdefiniowanie właściwości sprężystych tkanki miękkiej. W ramach weryfikacji poprawności założeń, do opisu przyjęto model hipersprężysty neo-Hookean. W tabeli 2 przedstawiono wykorzystane stałe materiałowe.

Tabela 2. Stałe materiałowe tkanki miękkiej [13]

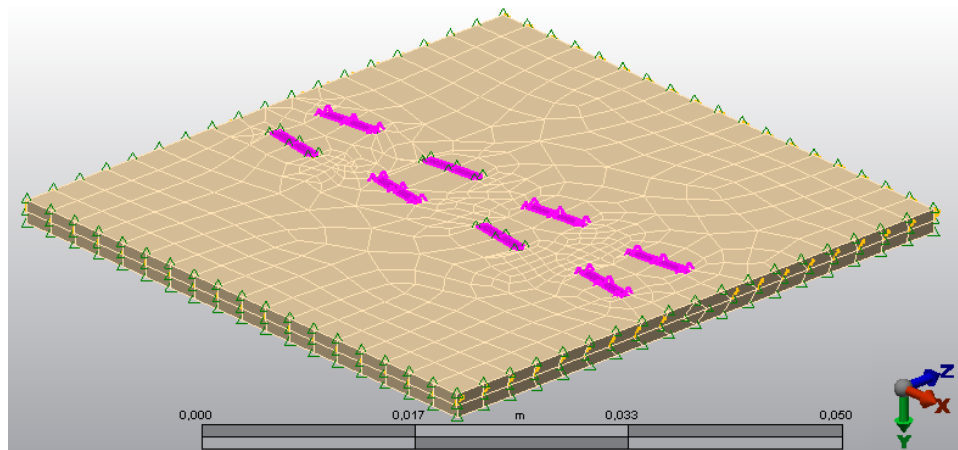
	Tkanka miękka
Rodzaj modelu hipersprężystego	neo-Hookean
Gęstość [kg/m ³]	1000
Współczynnik C10 [kPa]	1,2
Współczynnik sprężystości objętościowej K [kPa]	30

Przed przystąpieniem do obliczeń, model geometryczny został odpowiednio sparametryzowany:

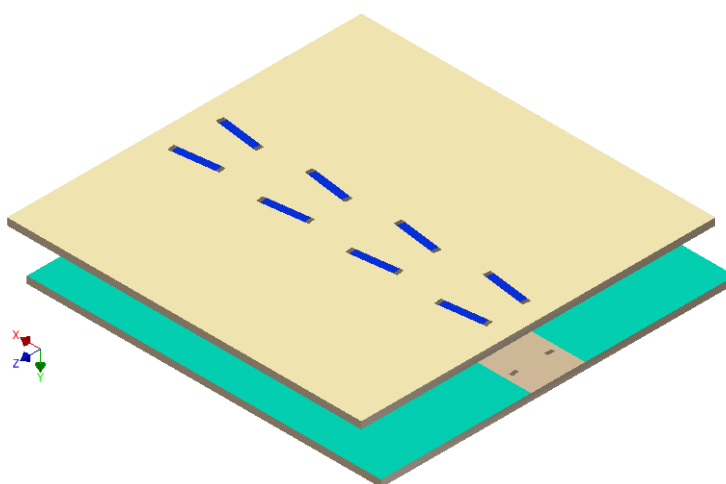
- szerokość, długość i grubość tkanek,
- szerokość i długość zszywek,
- rozstaw zszywek,
- kąt pomiędzy zszywkami,
- wielkość otworów.

Przyjętą geometrię oraz jej podział na elementy skończone przedstawiono na rysunku 7. Zastosowane zostały 21-węzłowe elementy skończone ze wszystkimi stopniami swobody w każdym. Brzegom tkanki odebrano swobodę ruchu względem osi Y, zaś węzłom na powierzchniach szwów odebrano wszystkie stopnie swobody. Dodatkowo zdefiniowano kontakt pomiędzy powierzchniami

stycznymi tkanek. Obciążenie określono w postaci ciśnienia o wartości 6,9 kPa, przyłożonego do powierzchni pomiędzy tkankami (p. rys. 3). Przyjęta wartość została określona doświadczalnie.



Rys. 3. Model geometryczny zespolenia tkanek



Rys. 4. Ciśnienie pomiędzy tkankami (zielone powierzchnie)

W symulacji zastosowano następujące uproszczenia:

- założono symetryczność tkanek,
- nie uwzględniono zszywek,
- model podparto w węzłach,
- pominięto ciężar własny elementów zespolenia.

Analizę numeryczną przeprowadzono dla różnych grubości tkanek i układów zszywek. W tabeli 3 przedstawiono wykorzystane konfiguracje szwów.

Tabela 3. Rodzaje szwów wykorzystane w analizie numerycznej

Rodzaj szwu	Schemat	Uwagi
Równoległy		brak
Zakładkowy równoległy		brak
Skośny		Zmienny kąt nachylenia zszywek: 15°, 30°, 45°
Zakładkowy skośny		Zmienny kąt nachylenia zszywek: 15°, 30°, 45°

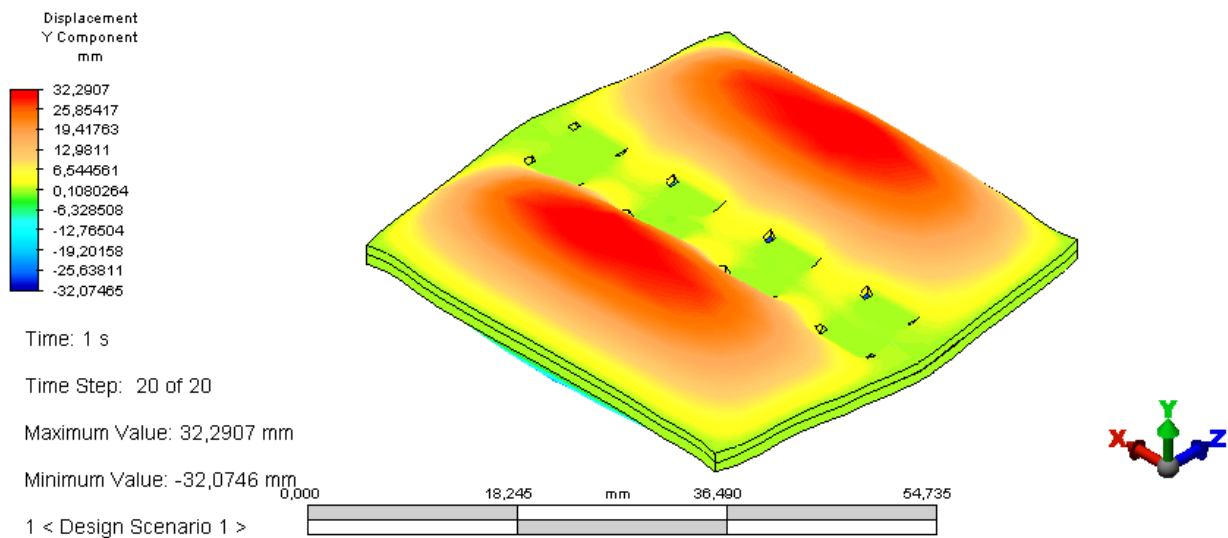
5. Wyniki

Na rysunkach 5–12 przedstawiono przykładowe wyniki analizy numerycznej tkanki przy różnym ustawieniu zszywek. Tabela zawiera dane przyjęte w obliczeniach, których wyniki znajdują się na poniższych rysunkach.

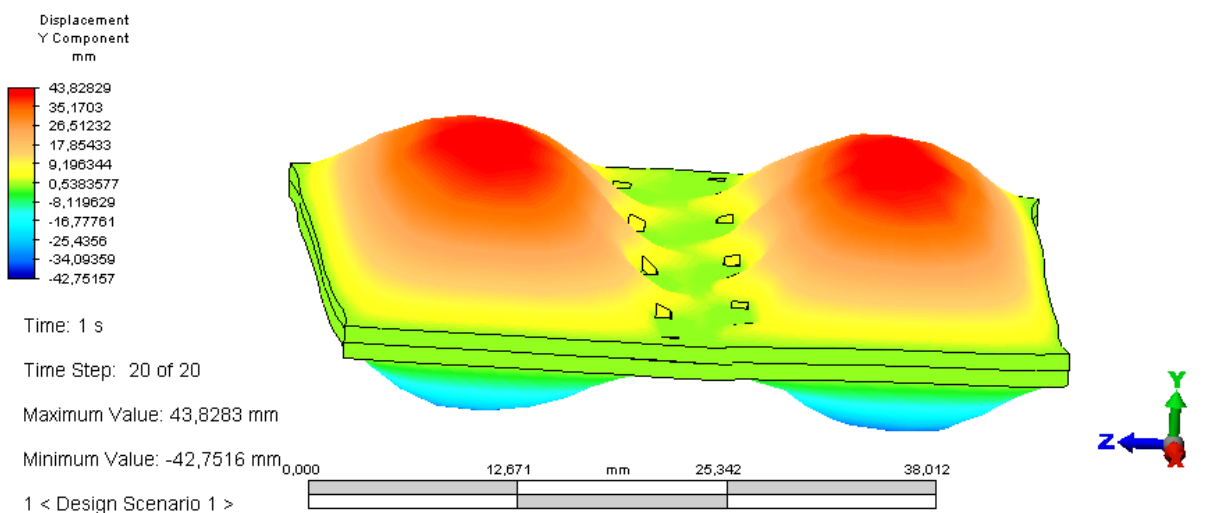
Tabela 4. Parametry geometrii przyjęte do obliczeń z rysunków 9–16

Wielkość tkanki	Długość zszywki	Liczba zszywek w szeregu	Wielkość otworów	Przesunięcie szeregów zszywek względem siebie
[mm]	[mm]	[szt.]	[mm]	[mm]
50 × 50 × 1	4,5	4	0,5 × 0,5	3

Na rysunkach 5 i 6 przedstawione zostały szwy równoległe i zakładkowe równoległe. W obu przypadkach przemieszczenie wzdłuż osi pionowej w okolicach szwu waha się w granicach 4–9 mm.

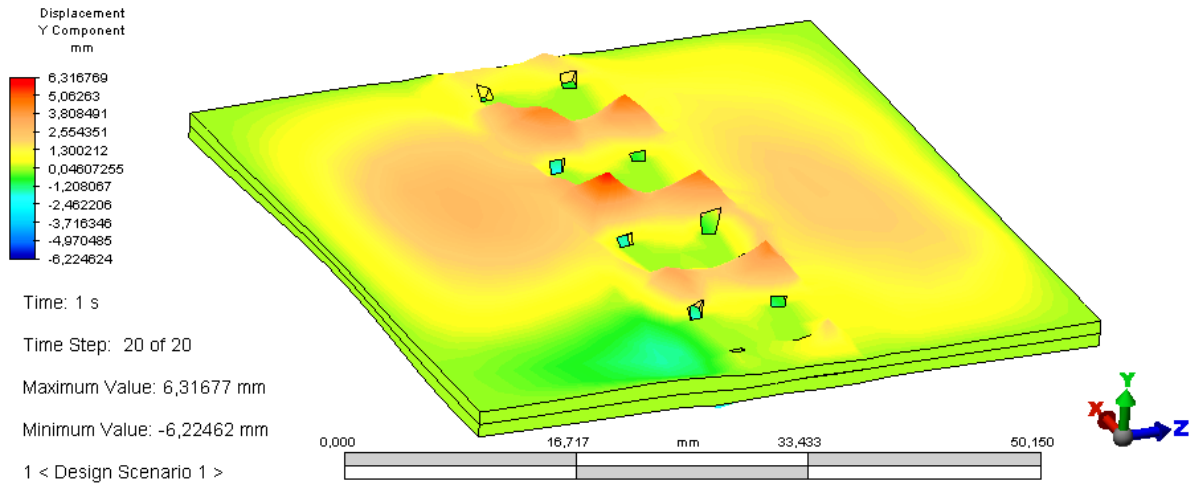


Rys. 5. Szew równoległy – przemieszczenia względem osi Y

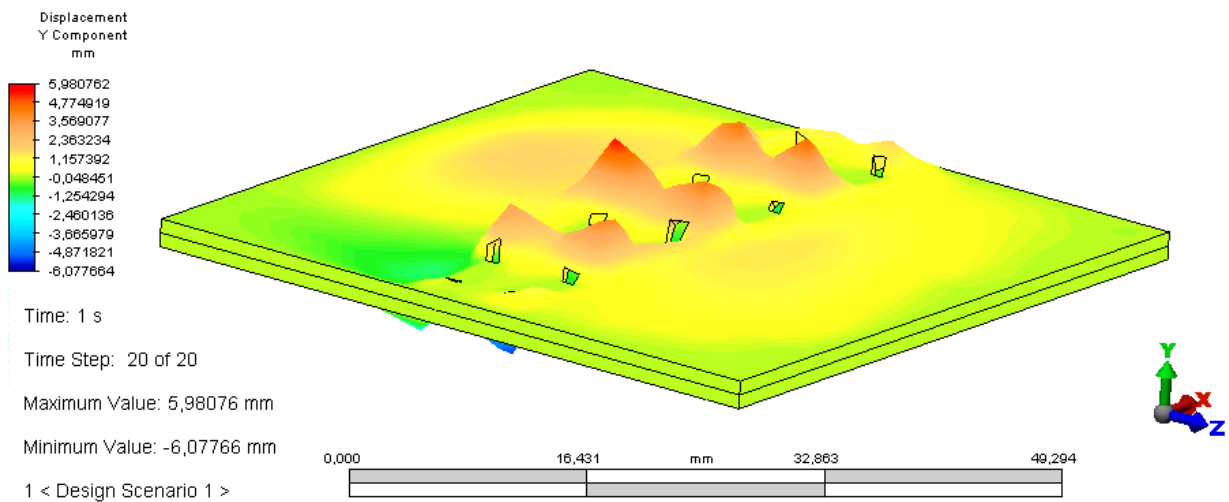


Rys. 6. Szew zakładkowy równoległy – przemieszczenia względem osi Y

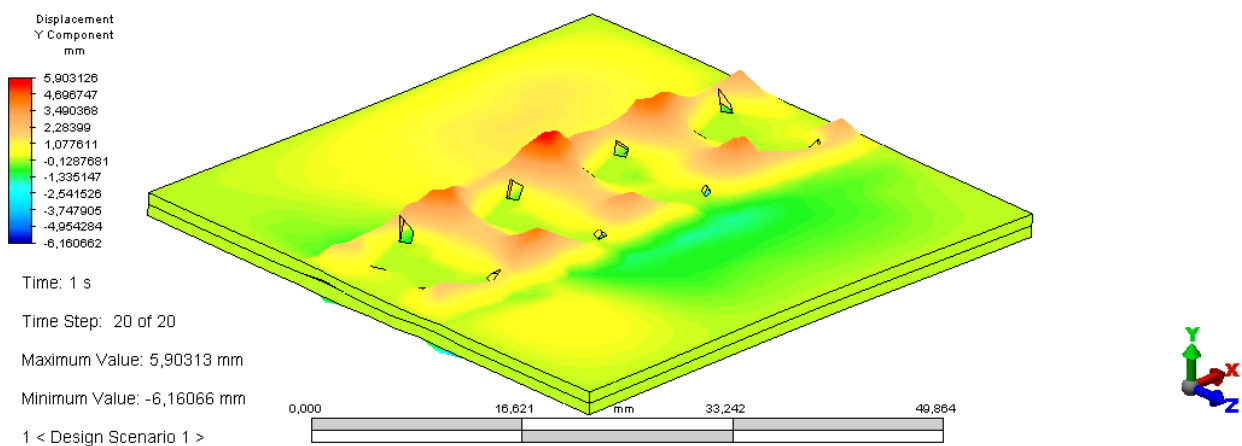
Rysunki 7–9 przedstawiają kolejno szew skośny o zszywkach ustawionych pod kątem 15°, 30° i 45°. Przemieszczenie względem osi pionowej w tych przypadkach nie przekracza 6,5 mm.



Rys. 7. Szew skośny o zszywkach ustawionych pod kątem 15° – przemieszczenia względem osi Y

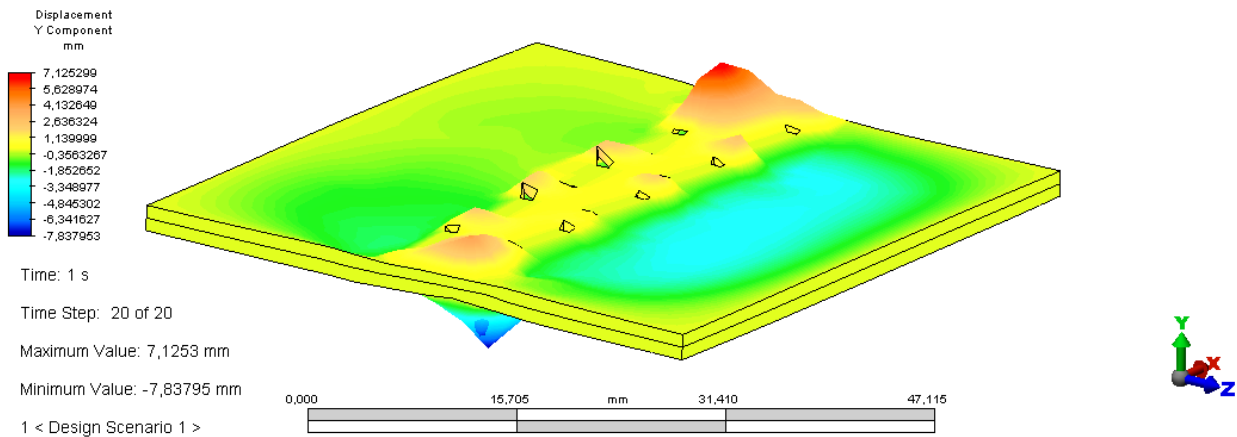


Rys. 81. Szew skośny o zszywkach ustawionych pod kątem 30° – przemieszczenia względem osi Y

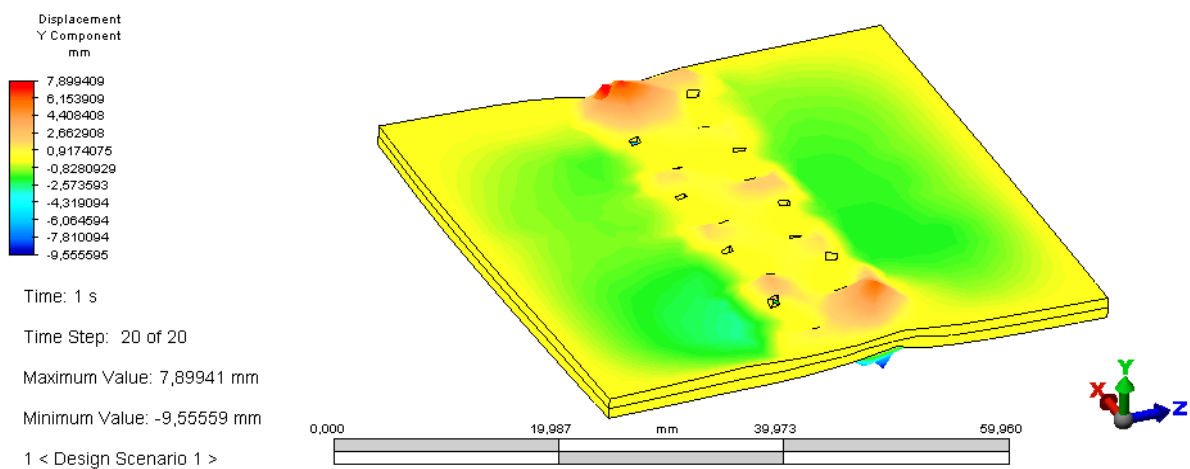


Rys. 9. Szew skośny o zszywkach ustawionych pod kątem 45° – przemieszczenia względem osi Y

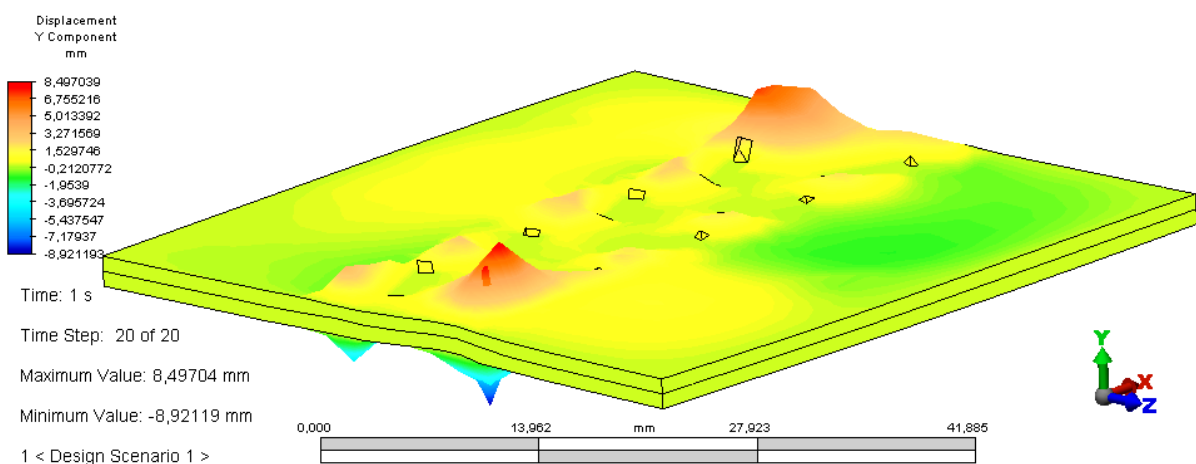
Kolejnym analizowanym wariantem był szew zakładkowy skośny (p. rys. 10–12). Przy takim ustawieniu można zaobserwować, iż przemieszczenia pionowe są znacznie mniejsze niż w powyższych przypadkach i nie przekraczają 3 mm.



Rys. 10. Szew zakładkowy skośny o zszywkach ustawionych pod kątem 15° – przemieszczenia względem osi Y



Rys. 11. Szew zakładkowy skośny o zszywkach ustawionych pod kątem 30° – przemieszczenia względem osi Y



Rys. 22. Szew zakładkowy skośny o zszywkach ustawionych pod kątem 45° – przemieszczenia względem osi Y

6. Podsumowanie

Wagotomia oraz chirurgia bariatryczna, tak jak każdy zabieg chirurgiczny, obciążone są ryzykiem, takim jak np. nieszczelność związana z nieprawidłowym wykonaniem lub doбором sposobu zespolenia. Wybór rodzaju szwu (szycie specjalnymi nićmi lub metalowymi zszywkami za pomocą

staplerów) w głównej mierze zależy od umiejętności, doświadczenia lub niekiedy nawet intuicji chirurga. W ramach prób poprawy szczelności połączenia powstaje model mechanicznego zespolenia ścian żołądka.

Pierwsze analizy numeryczne modelu MES zespolenia wskazują na kilka istotnych zależności pomiędzy ustawieniem szwów a szczelnością zespolenia. Na podstawie uzyskanych wyników można wnioskować, że jakość połączenia zależy od:

- a) odległości pomiędzy zszywkami leżącymi w jednym rzędzie – szczelność wzrasta odwrotnie proporcjonalnie do odległości między szwami,
- b) ustawienia względem siebie rzędów zszywek – im ustawienie jest bliższe tzw. „cegiełce”, tym mniejsze są przemieszczenia;
- c) kąta nachylenia zszywek względem siebie – im większy, tym mniejsze przemieszczenia wokół szwu.

Ze względu na skomplikowany sposób oddziaływania tkanek biologicznych, niezbędne jest dokładne poznanie właściwości elastycznych materiału oraz określenie szerokiego zakresu warunków brzegowych. W związku z tym, kolejnym prowadzonym etapem prac są badania ścian żołądka, mające na celu określenie wybranych właściwości fizycznych tkanki. Umożliwi to dokładniejsze zdefiniowanie modelu hipersprężystego i przeprowadzenie właściwej analizy numerycznej poszczególnych konfiguracji zszywek. Uzyskane wyniki będą stanowić podstawę do weryfikacji doświadczalnej jakości optymalizowanych połączeń.

LITERATURA

- [1] eChirurgia, *Żołądek i dwunastnica*, <http://www.echirurgia.pl/zoladek/>.
- [2] e-zdrowe.pl, *Wrzody żołądka i dwunastnicy*, <http://e-zdrowe.pl/wrzody-zoladka-dwunastnicy-jak-powstaja-wrzody-niedobory-pokarmowe-wrzody-a-hpylori-grupa-krwi-a-wrzody-zoladka.html>.
- [3] Wikipedia - wolna encyklopedia, *Wagotomia*, <http://pl.wikipedia.org/wiki/Wagotomia>.
- [4] Mówimy jak, *Polipy bywają groźne - dlaczego?*, http://www.mowimyjak.pl/zdrowie/choroby_i_profilaktyka/polipy-bywaja-grozne-dlaczego,96_62910.html.
- [5] *Chirurgiczne leczenie otyłości, Powikłania operacji bariatrycznych*, <https://sites.google.com/a/obesity.pl/chirurgiczne-leczenie-otylosci/home/powiklania-operacji-bariatrycznych>.
- [6] Dieta.mp.pl, *Roux-Y gastric bypass*, http://www.mp.pl/img/articles/leczeniechirurgiczne/Roux-Y_gastric_bypass.jpg.
- [7] E. Stanowski, K. Paśnik: *Postęp Nauk Medycznych. Sprzęt i instrumenty stosowane w chirurgicznym leczeniu otyłości. Przemysłenia własne*, <http://www.pnmedycznych.pl/spnm.php?ktory=486>.
- [8] Beryl Med Ltd., *Staplery okrężne*, <http://www.beryl-med.com/pl/nasz-asortyment/staplery2/65-staplery-okrezne>.
- [9] P.F. Lawrence: *Chirurgia ogólna*, Urban & Partner, 1998.
- [10] M. Major, J. Różycka: *Gumopochodne materiały hipersprężyste - omówienie i kryteria praktycznego zastosowania*, Budownictwo 17 - Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej, 2011.
- [11] S. Jemiolo: *Studium hipersprężystych własności materiałów izotropowych. Modelowanie i implementacja numeryczna*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002.
- [12] *Coats Industrial*, <http://www.coatsindustrial.com/pl/information-hub/apparel-expertise/seam-types>.
- [13] E.K. Main: *Constitutive mechanical properties of carpal tunnel soft tissue structures*, Iowa Research Online 2011.
- [14] Wikipedia - wolna encyklopedia, *Trokar*, <http://pl.wikipedia.org/wiki/Trokar>.

otrzymano / submitted: 12.07.2015

wersja poprawiona / revised version: 16.08.2015

zaakceptowano / accepted: 30.08.2015