POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING
14(7)/2019, 15–22
Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

Katarzyna KALCZYŃSKA[1], Bogdan LIGAJ[2]

MODELE SERCA 3D TRENAŻERA WYBRANYCH PRZEZSKÓRNYCH ZABIEGÓW KARDIOLOGICZNYCH

Streszczenie: W artykule omówiono budowę serca, trenażer do zabiegów przezskórnych na sercu oraz przykładowe modele serc opracowywanych w czasie projektowania i budowy trenażera. Zdefiniowano również niezbędne parametry modelu serca.

Słowa kluczowe: serce, zabieg przezskórny, implantacja zastawki aortalnej, TAVI, zamknięcie ubytku międzyprzedsionkowego, ASD, ASD typu 2, zabieg kardiologiczny, kardiochirurgia, symulacja zabiegu, planowanie zabiegu, sztuczne warunki, trenażer, trenażer zabiegów przezskórnych, ćwiczenia zabiegu, model serca, badania projektowe

1. WSTĘP

W artykule przedstawiono badania projektowe i analizę przykładowych modeli serca, które mogą potencjalnie zostać użyte w trenażerze do ćwiczeń wybranych przezskórnych zabiegów kardiologicznych.

Trenażer czyli urządzenie, które w warunkach sztucznych umożliwia ćwiczenia określonej sprawności, w tym przypadku umiejętności kardiologiczno-zabiegowych. Modele serc wykonano w technologii druku 3D (FFF) z materiału PLA.

Zabiegi, które mogą być przeprowadzone na trenażerze, to zamknięcie ubytku w przegrodzie międzyprzedsionkowej typu 2 (ASD typu II) oraz implantacja zastawki aortalnej (TAVI).

Ubytek ADS typu 2 to perforacja w przegrodzie międzyprzedsionkowej powodująca mieszanie się krwi nienatlenowanej z natlenowaną. Wykonywany jest na przykład u dzieci, których wiek i stan nie pozwala na operacje na otwartym sercu. Zabieg zamknięcia ubytku polega na wprowadzeniu okludera przez żyłę główną dolną, następnie przedsionek prawy i do przedsionka lewego przez ubytek. Okluder ma postać dwóch połączonych ze sobą rozkładanych dysków, które są umieszczane po przeciwnych stronach ubytku.

Zabieg implantacji zastawki aortalnej wykonuje się, gdy zastawka pacjenta nie spełnia swojej funkcji. Metoda TAVI jest preferowana w przypadku osób w podeszłym wieku i pacjentów tzw. wysokiego ryzyka, dla których operacja na otwartym sercu jest zbyt dużym obciążeniem. W celu implantacji sztucznej zastawki cewnik wprowadza się przez tętnicę udową, następnie tętnicę brzuszną

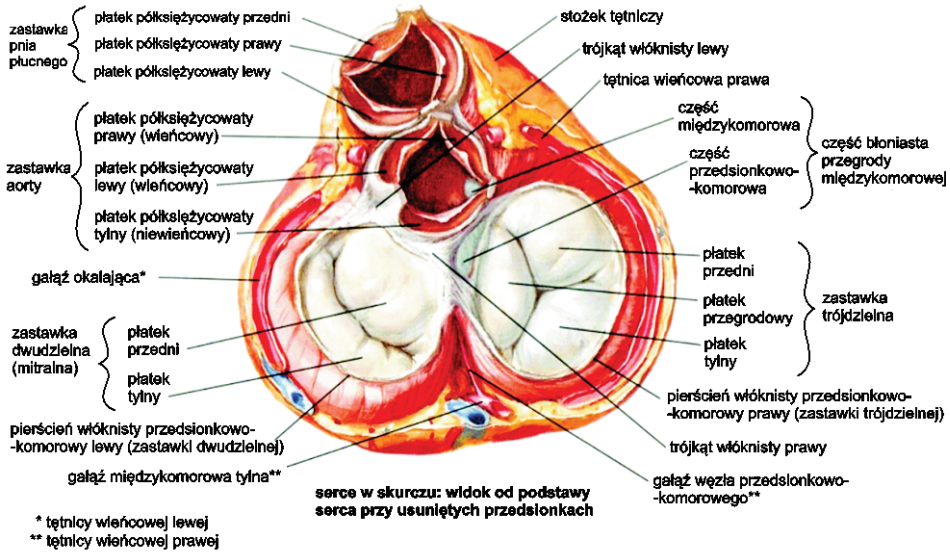
[1] inż. Katarzyna KALCZYŃSKA, UTP Bydgoszcz, e-mail: kalczynska@outlook.com
[2] dr hab. inż. Bogdan LIGAJ, prof. UTP, UTP Bydgoszcz, e-mail: bogdanj@utp.edu.pl

i aortę, tam w zależności od rodzaju użytej zastawki albo uwalnia się zastawkę z koszulki (stent samorozprężalny), albo pompuje się balonik, na którym umieszczona jest zastawka. Najczęstsze powikłania tego zabiegu to przeciekanie lub przemieszczenie zastawki i udar.

Jednym z najważniejszych czynników modeli serca jest ich różnorodność geometryczna i możliwość zmiany tej geometrii. Serca pacjentów podlegających zabiegom rzadko kiedy mają podręcznikową budowę, większość z nich może również mieć patologie i choroby współistniejące. Dlatego też kluczowe w trenażerze jest umożliwienie treningu na modelach o różnej geometrii.

2. BUDOWA SERCA

Serce należy do najważniejszych ludzkich organów, jego nieprawidłowe działanie rzutuje na pracę innych organów i całego organizmu. Zbudowane z tkanki mięśniowej, regularnymi skurczami wymusza pulsacyjny ruch krwi przez układ naczyń krwionośnych. Jest położone w śródpiersiu środkowym, pomiędzy płucami. Od dołu graniczy z przeponą, a od tyłu z przełykiem. Około 2/3 serca leży po lewej stronie od linii środkowej ciała. Składa się z dwóch komór i dwóch przedsionków. Budowę serca przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Budowa serca [3]
Fig. 1. Anatomy of the heart [3]

Przedsionek prawy zbiera nieutlenowaną krew z całego organizmu z wyjątkiem płuc. Dalej nieutlenowana krew wpływa do prawej komory serca przez zastawkę trójdzielną, następnie przez zastawkę półksiężycowatą i pień płucny przez tętnice płucne aż do płuc. Lewy przedsionek serca zbiera krew utlenowaną

z płuc. Przez ujście przedsionkowo-komorowe lewe z zastawką mitralną krew wpływa do komory lewej. Z kolei krew z komory lewej jest wyrzucana przez aortę do krwiobiegu obwodowego. Ciśnienie krwi w prawej komorze jest mniejsze niż w lewej, wynika to z grubości ścian komór serca. Ściana prawej komory jest cieńsza niż komory lewej. Ściana serca składa się aż z trzech warstw: nasierdzia (osierdzia), śródsierdzia i wsierdzia. Osierdzie zbudowane jest z dwóch warstw tkanki łącznej. Pomiędzy warstwami znajduje się płyn osierdziowy, który zmniejsza tarcie w trakcie pracy serca. Wsierdzie z kolei złożone jest ze śródbłonka i zawiera liczne naczynia krwionośne, które odżywiają serce. Śródsierdzie składa się ze szkieletu serca, mięśnia sercowego i układu bodźcoprzewodzącego.

Szkielet serca zbudowany jest m.in. z pierścieni i trójkątów włóknistych. Mięsień sercowy ma budowę poprzecznie prążkowaną o zróżnicowanej budowie w przedsionkach i komorach. O ile w przedsionkach nie widać dokładnych warstw mięśni, o tyle są one widoczne w komorach. Jest to związane z dużym ciśnieniem panującym w tych jamach serca.

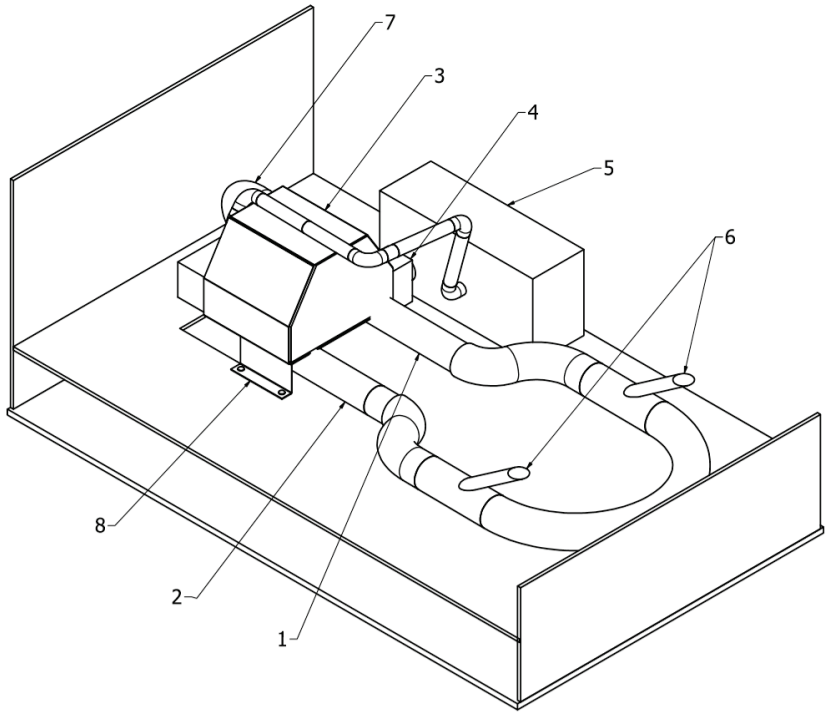
Ważnym elementem budowy serca jest system bodźcoprzewodzący, ponieważ to on opowiada za regulacje rytmu pracy serca. Składa się z miocytów, które mają zdolność do generowania impulsu nerwowego.

3. TRENAŻER

Trenażer do wybranych zabiegów przezskórnych na sercu pozwala na ćwiczenie zabiegu implantacji zastawki aorty oraz zamknięcie ubytku międzyprzedsionkowego typu 2 ASD II.

Ideą powstania trenażera było umożliwienie treningu umiejętności praktycznych, aby zwiększyć efektywność przeprowadzanych zabiegów oraz zmniejszyć liczbę powikłań spowodowanych przez uszkodzenia tkanek w czasie zabiegu. Trening na tym urządzeniu ma pozwolić na zapoznanie się ze sprzętem i procedurą zabiegu, bez presji życia i zdrowia pacjenta. Większa efektywność zabiegów przezskórnych mogłaby doprowadzić do zmniejszenia przeciwwskazań do zabiegów, dzięki czemu byłyby one wykonywane na jeszcze większą skalę. Trenażer umożliwia ćwiczenia konkretnych czynności oraz obsługi urządzeń służących do tych zabiegów personelowi medycznemu. Stanowisko posiada wymienne elementy (komora, przedsionek) różniące się budową. Pozwala to na urozmaicenie ćwiczeń i zachowanie czujności ćwiczącego. Urządzenie może być wykorzystane również w celach dydaktycznych lub omówienia konkretnego przypadku do czego można dostosować model.

Na rysunku 2 przedstawiono schematyczną budowę trenażera. Można zaobserwować położenie modela serca (3) umieszczonego w stelażu (8). Stelaż pozwala na łatwą wymianę modeli serca oraz na zachowanie geometrii przewodów (1, 2), przypominając kształt głównych naczyń krwionośnych w ciele człowieka.



Rys. 2. Schemat budowy trenażera: 1 – przewód tętniczy, 2 – przewód żylny, 3 – model serca, 4 –pompa, 5 – zbiornik, 6 – membrany, 7 – model aorty, 8 – stelaż (opracowanie własne)
Fig. 2. Building scheme of the exercise machine for heart surgery: 1 – tube-artery, 2 – tube-vein, 3 – heart model, 4 – pump, 5 – tank, 6 – entry, 7 – aorta model, 8 – frame (own study)

4. MODEL SERCA

4.1. Wymagania

W skład budowy stanowiska do zabiegów przezskórnych na sercu, zwanego dalej trenażerem, wchodzi opracowany model serca. Ze względu na niezwykle skomplikowaną budowę ludzkiego serca w czasie projektowania i budowy modelu zastosowano odpowiednie uproszczenia i dostosowano go do spełnienia kluczowych funkcji dla projektu. Przez uproszczenie rozumiano utworzenie modelu w oparciu o bryły geometryczne, aby uprościć produkcję i zmniejszyć jej koszty. Model ma występować w różnych wariantach, różniących się wymiarami znaczących otworów i ich położeniem. Może posiadać struktury imitujące patologie w budowie serca.

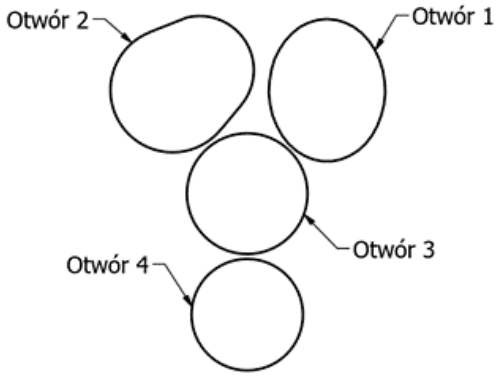
Wymagania:

- prosta geometria,
- niskie koszty produkcji,
- możliwość produkcji modelu w różnych wariantach,
- prosta produkcja.

Zadaniem modelu jest umożliwienie zabiegu implantacji zastawki aorty oraz zamknięcie ubytku międzyprzedsionkowego typu 2 ASD II. Musi on również zapewniać odpowiednio ukierunkowany przepływ płynu oraz łatwy montaż i demontaż. Model wykonany będzie z transparentnego materiału, który pozwoli na ocenę ulokowania zastawki lub okludera.

Walory estetyczne nie są istotne, ponieważ model jest zamknięty w obudowie trenażera.

Każdy z modeli posiada od 4 do 7 otworów. Na rysunku 3 przedstawiono schematycznie rozkład otworów – pierścieni zastawek w modelu serca. Otwór 1 jest to obręcz zastawki mitralnej, otwór 2 – obręcz zastawki przedsionkowo-komorowej, otwór 3 – pień płucny oraz otwór 4 – aorta. Pozostałe otwory są odpowiednie dla ujścia żyły głównej i żył płucnych. Dodatkowo w większości modeli występuje otwór technologiczny 7, widoczny na rysunku 5 przedstawiającym finalny model serca, spełniający rolę ubytku międzyprzedsionkowego. Znajduje się on w ścianie odgradzającej przedsionki, jego wymiary można zmieniać, jednak muszą się zawierać w granicznych wartościach podanych dla używanego okludera. Dla wykonywanego modelu znamienne jest położenie i wymiary otworów 1, 2, 4, 5 i 7. Ich wymiary są zbliżone do średnich wymiarów tych otworów w ludzkim sercu; alternatywne modele mogą mieć zmienione wymiary otworów na maksymalne lub minimalne wartości lub jako zmiany patologiczne.



Rys. 3. Schematyczne ułożenie otworów na podstawie serca (opracowanie własne)
Fig. 3. Schematic set of openings (own study)

Wszystkie prototypy wykonywano metodą druku 3D. Wybrano tę metodę, ponieważ pozwala ona na wykonanie jednolitych komór bez konieczności uszczelniania połączeń co minimalizuje ryzyko powstawania przecieków. W tej metodzie łatwo jest modyfikować projekty i zmieniać ich parametry.

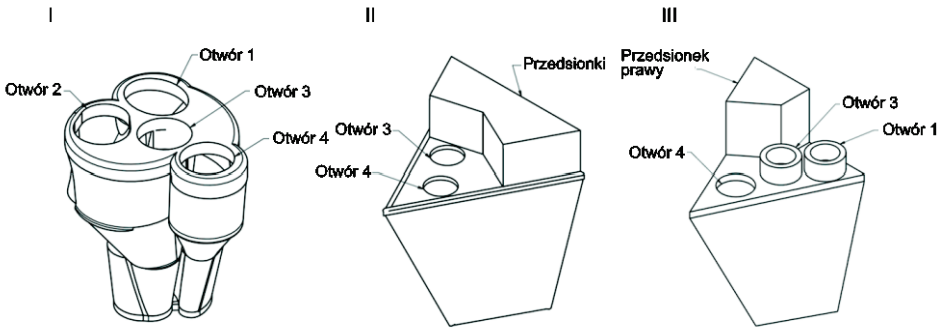
4.2. Przykładowe modele

Wszystkie modele serca utworzono w oparciu o obrazy serca w atlasach anatomicznych i literaturę z zakresu anatomii człowieka, tak aby zachować proporcje i wymiary znamiennych elementów.

W pierwszym wykonanym modelu skupiono się na odwzorowaniu geometrii komór serca, jednak na późniejszych etapach uznano to za nieistotne. Rozstaw otworów względem siebie jest najbliższy występującemu w ludzkim sercu (rys. 4).

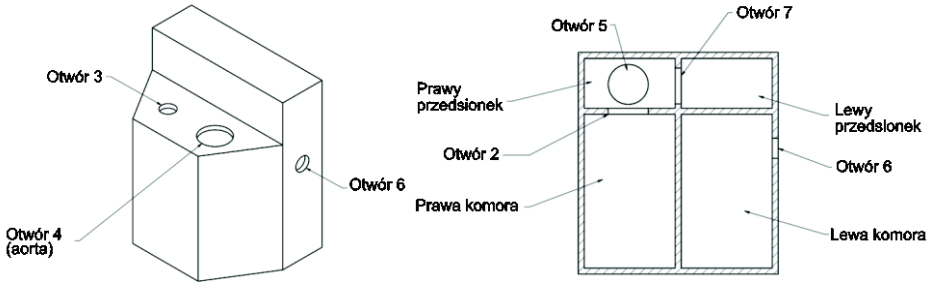
Model serca przedstawiony na rysunku 4 II ma uproszczony kształt komór do prostych brył geometrycznych, jednak w ten sposób, aby nie wywierał znaczącego wpływu na przepływ płynu przez komory. Zachowano kolejność przepływu cieczy między komorami wzorując się na przepływie w ludzkim sercu. Ten model miał niekorzystne rozmieszczenie otworów na górnej powierzchni, uniemożliwiające poprawne zamocowanie do modelu przewodów układu hydraulicznego.

Trzeci z kolei model (III) posiadał w odróżnieniu od pozostałych 3 komory i był przeznaczony do symulacji jedynie zabiegu implantacji zastawki aorty, ponieważ miał tylko jedną komorę przedsionka. W stosunku do poprzedniego modelu nadano mu inne wymiary i zlikwidowano krawędź przy górnej powierzchni. Powyższe zmiany umożliwiły zmianę rozstawu otworów i zamocowanie kołnierzy umożliwiających połączenie przewodów układu hydraulicznego z modelem.



Rys. 4. Modele serca I, II oraz III (opracowanie własne)
Fig. 4. Heart models I, II and III (own study)

Finalny model serca posiada prostą geometrię (rys. 5). Jest zbudowany z czterech komór, dwóch przedsionków i dwóch komór serca. W przeciwieństwie do poprzednich modeli nie występuje tu przepływ przez lewy przedsionek. Wymiar otworu technologicznego można zmieniać zależnie od rozmiaru używanego okludera.



Rys. 5. Czwarty model serca (opracowanie własne)
Fig. 5. Fourth heart model (own study)

5. PODSUMOWANIE

Celem powyższych zabiegów było uzyskanie modelu ludzkiego serca spełniającego wymagane założenia. Model IV umożliwia wykonanie ćwiczeń wybranych zabiegów przezskórnych, ma prostą geometrię. Proces produkcji za pomocą technologii przyrostowej – druku 3D – jest dostępny i nie generuje dużych kosztów, co pozwala na produkcję wielu modeli. Modele wykonano z materiału PLA. Jednak w tej technologii nie ma możliwości uzyskania transparentnego elementu ze względu na jego geometrię i wymaganą grubość warstwy. Można rozważyć również wykonanie modelu poprzez odlewanie. Wymagałoby to podzielenia modelu na kilka elementów i wykonaniu kilku form, a powstałe odlewy należy później skleić i uszczelnić.

Wykonanie modeli za pomocą tomografii komputerowej umożliwiłoby dokładne odwzorowanie geometryczne serca. Jednak całościowy wygląd serca ma małe znaczenie, bo potrzebne są jedynie jego fragmenty, przez które przeprowadzane są urządzenia chirurgiczne w trakcie ćwiczeń. Obrazy serca tomografii komputerowej nie są łatwo dostępne, a ich użycie nie wprowadziłoby znaczących zmian.

LITERATURA

[1] BRASSARD M., FOURON J., DOESBURG N.H., MERCIER L., DE GUISE P.: Outcome of children with atrial septal defect considered too small for surgical closure. The American Journal of Cardiology 83(11), 1 June 1999, 1552–1555.
[2] MICHAJLIK A., RAMOTOWSKI W.: Anatomia i fizjologia człowieka. PZWL Warszawa, 1996.
[3] NETTER F.H.: Atlas anatomii Nettera. Elsevier Urban & Partner, 2015.
[4] RAJPUT F.A., ZELTSER R.: Aortic Valve Replacement. StatPearls Publishing, Treasure Island (FL), [Updated 2020 May 8].
[5] RUPARELIA N., PRENDERGAST B.D.: Technical aspects of transcatheter aortic valve implantation (TAVI). An article from the E-journal of Cardiology Practice 14(5), 07 Mar 2016.
[6] TSIGKAS G., DESPOTOPOULOS S., MAKRIS A., KONIARI I., ARMYLAGOS S., DAVLOUROS P., HAHALIS G.: Transcatheter versus surgical aortic valve replacement in severe, symptomatic aortic stenosis. Journal of Geriatric Cardiology 15(1), Jan 2018, 76–85.

3D HEART MODEL OF THE TRAINER FOR CARDIOLOGY PERCUTANEOUS TREATMENTS

Summary: The article discusses the construction of the heart, the trainer for percutaneous treatments on the heart and examples of hearts models developed at the time of designing and construction of the trainer. The necessary parameters of the heart model was defined.

Key words: heart, percutaneous surgery, simulation of surgery, surgery planning, cardiac surgery, percutaneous aortic valve replacement, PAVR, percutaneous aortic valve implantation, PAVI, transcatheter aortic valve implantation, TAVI, transcatheter aortic valve replacement, TAVR, atrial septal defect, ASD, the trainer for percutaneous treatments, trainer, heart model, surgery practice