

# OPTYMALIZACJA ELEMENTU AKTYWNEGO W PRZEGUBIE ROBOTA ROCH-3

## OPTIMIZATION OF THE ACTIVE ELEMENT IN THE JOINT OF ROCH-3 ROBOT

**Dominik Mazan\*, Lucyna Leniowska**

Uniwersytet Rzeszowski, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy,  
Katedra Mechatroniki i Automatyki, 35-310 Rzeszów, ul. Pigońia 1

\*e-mail: dmazan@ur.edu.pl

### STRESZCZENIE

ROCH-3 to robot przeznaczony do wspomagania chirurgii małoinwazyjnej, projektowany w Katedrze Mechatroniki i Automatyki na Uniwersytecie Rzeszowskim. Jest następcą opatentowanej w 2014 roku konstrukcji ROCH-1. W artykule przedstawiono proces optymalizacji jednego z jego przegubów, który posiada dwa stopnie swobody. Dzięki optymalizacji geometrii, odpowiedniemu dobraniu wymiarów parametrów decyzyjnych uzyskano znacznie mniejsze naprężenia w elemencie wykonanym ze stali chirurgicznej, co przełożyło się na zwiększenie wartości współczynnika bezpieczeństwa. Wykonano również symulacje dla materiałów innych niż stal chirurgiczna.

**Słowa kluczowe:** optymalizacja, robot chirurgiczny, modelowanie CAD

### ABSTRACT

The ROCH-3 is a robot intended to assist in minimally invasive surgery, designed in the Department of Mechatronics and Control Engineering at the University of Rzeszów. It is the successor of ROCH-1 structure patented in year 2014. The article presents the optimization process of one of his wrists, which has two degrees of freedom. By optimizing the geometry and the appropriate choice of the dimensions of decision parameters, a much less stress in the element made of surgical steel was obtained, which resulted in increasing the value of the safety factor. The simulations for materials other than surgical steel were also conducted.

**Keywords:** optimization, surgical robot, CAD design

### 1. Wprowadzenie

Robotyka medyczna przeżywa obecnie okres dynamicznego rozwoju, zwłaszcza w dziedzinie operacji małoinwazyjnych, tzw. MIS (ang. *Minimally Invasive Surgery*). To rewolucyjne podejście do operacji jest możliwe m.in. za pomocą zrobotyzowanych systemów chirurgicznych, takich jak *Da Vinci* i pozwala na precyzyjne wykonanie zabiegu poprzez stosunkowo małe nacięcia w ciele pacjenta. W rezultacie minimalizowane są urazy i uszkodzenia zdrowych tkanek, a czas rekonwalescencji jest znacznie krótszy. Robot *Da Vinci* jest w chwili obecnej najczęściej sprzedawanym urządzeniem w zakresie technologii MIS, ale ma sporo wad, w tym m.in. bardzo wysoką ceną, ok. 8 mln PLN. Obecnie głównym trendem rozwojowym MIS jest miniaturyzacja rozwiązań i tworzenie systemów mikromechanicznych ściśle powiązanych z elektroniką oraz z algorytmami sterowania. Pojawiające się

nowe technologie z zakresu sensoryki i mikronapędów pozwalają na opracowywanie innowacyjnych konstrukcji robotów, które zmieniają oblicze chirurgii [1].

W artykule przedstawiono optymalizację projektu dynamicznego przegubu Cardana, jako elementu konstrukcyjnego robota chirurgicznego ROCH-3, następcy ROCH-1. Robot tego typu powstał w latach 2010–2013, w ramach współpracy Uniwersytetu Rzeszowskiego z Politechniką Rzeszowską i AGH w ramach projektu NCN 2376/B/T02/2010/38 [2]. Posiadał otwarty łańcuch kinematyczny z pięcioma stopniami swobody w postaci obrotowych par kinematycznych. Wszystkie przeguby były sterowane za pomocą miniaturowych silników bezszczotkowych umieszczonych w ramionach robota o średnicy ok. 10 mm. Przekazanie momentu obrotowego do członów odbywało się poprzez przekładnie zębate oraz poprzez przekładnie ślimakowe. Podczas testów napotkano na barierę technologiczną związaną z miniaturowymi przekładniami. W obecnym rozwiązaniu autorzy chcą zrezygnować z przekładni tego typu na rzecz mechanizmu cięgnowego z przegubami Cardana.

Analizując literaturę związaną z robotyką można stwierdzić, iż struktury robotów zawierają wyłącznie przeguby o jednym stopniu swobody (obrotowe bądź liniowe) [3, 4, 5]. Jeśli robot posiada przegub o większej liczbie stopni swobody, np. przegub kulowy, to jest to para kinematyczna pasywna, nie mająca napędów umożliwiających sterowanie danym łączem.

Zaprojektowano pierwszy człon, który zrealizowano w oparciu o przegub Cardana. Przestrzeń robocza takiego manipulatora, który posiada tylko jeden przegub Cardana ma postać wycinka sfery. W celu zwiększenia przestrzeni roboczej robot będzie wyposażony w kilka dodatkowych przegubów. Dzięki rozbudowie łańcucha kinematycznego o kilka dodatkowych par kinematycznych będzie możliwa oprócz powiększenia przestrzeni roboczej również zmiana orientacji efektora.

Zgodnie z dominującą tendencją miniaturyzacji, manipulator musi posiadać średnicę zewnętrzną maksymalnie 8 mm, ponieważ ogranicza go trokar przez który następuje wprowadzenie narzędzia do ciała pacjenta. Miniaturyzacja robota również jest istotna z punktu widzenia przemieszczania się manipulatora w ciele pacjenta.

W artykule przedstawiono optymalizację geometryczną elementu aktywnego wchodzącego w skład sterowalnego przegubu Cardana. Wykonano symulację dla różnych materiałów, przedstawiono wyniki wykonane przed operacją optymalizacji oraz po wykonaniu optymalizacji parametrów geometrycznych.

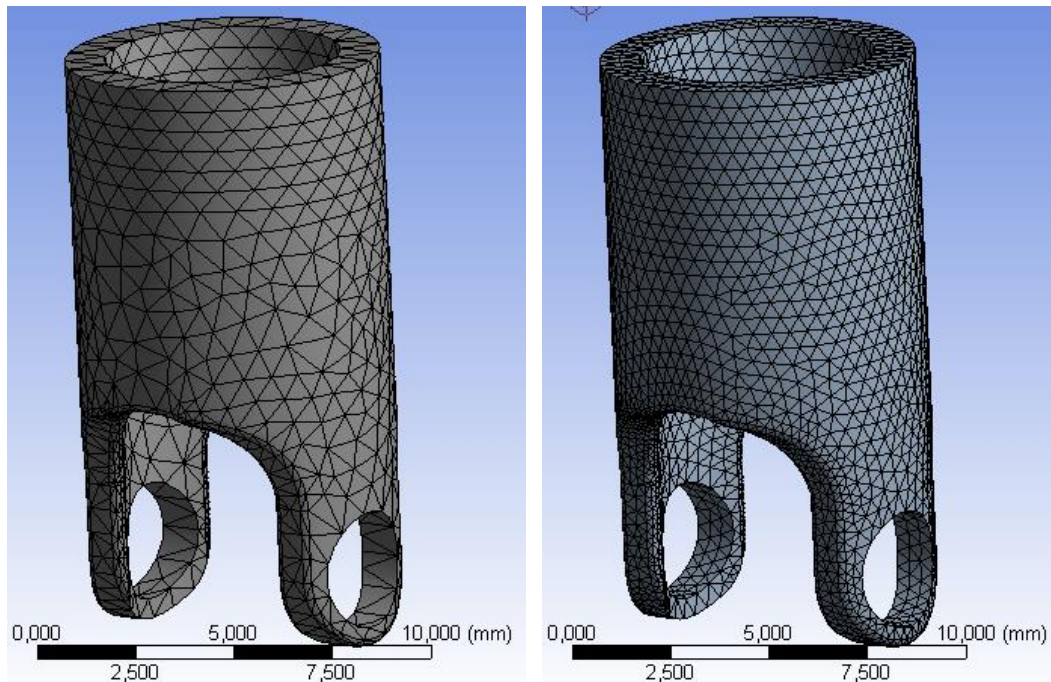
## 2. Przygotowanie modelu do optymalizacji

Na rysunku 1 znajduje się model sterowalnego przegubu Cardana wykonany w oprogramowaniu Autodesk Inventor Professional.



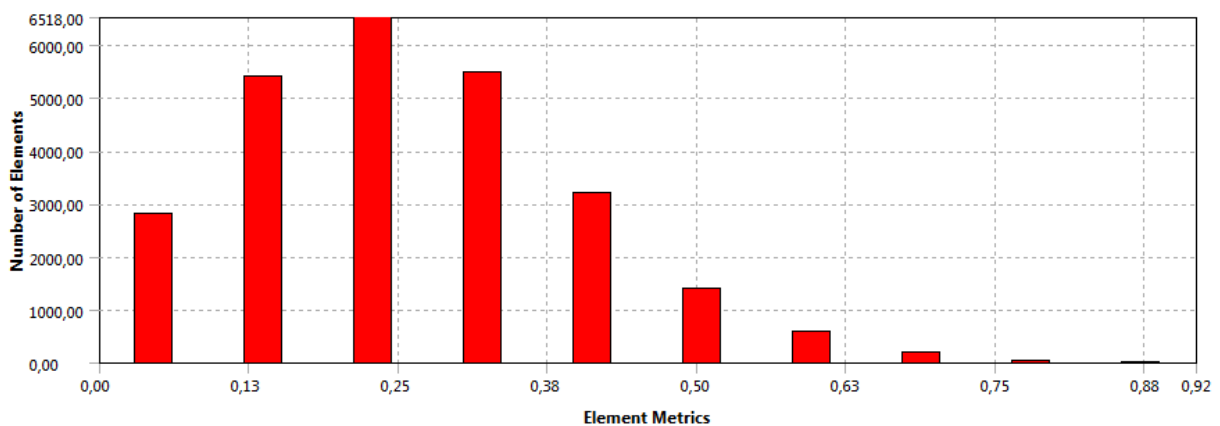
Rys. 1. Model przegubu Cardana wykorzystanego w projekcie robota ROCH-3

Element przegubu poddano dyskretyzacji na elementy skończone. W pierwszej fazie podzielono badaną część na elementy dyskretne typu teta. Uzyskano 5 913 elementów oraz 10 914 węzłów. Siatkę poddano zagęszczeniu na krawędziach oraz w miejscach gdzie spodziewano się wystąpienia dużych wartości naprężeń zredukowanych. W końcowym etapie uzyskano siatkę składającą się z 25 540 elementów i 41 894 węzłów. Model poddany dyskretyzacji przedstawiony jest na rysunku 2. Kolejną czynnością było wykonanie symulacji dla początkowej, wzorcowej geometrii elementu.



Rys. 2. Siatka elementów skończonych: zgrubna (po lewej) i dokładna (po prawej)

Według kryterium skośności elementów średnia z wszystkich elementów wynosiła 0,25, co jest bardzo dobrym wynikiem i można przyjąć, iż siatka jest dobrej jakości. Wykres przedstawiający liczbę elementów pogrupowanych względem jakości przedstawiony jest poniżej.

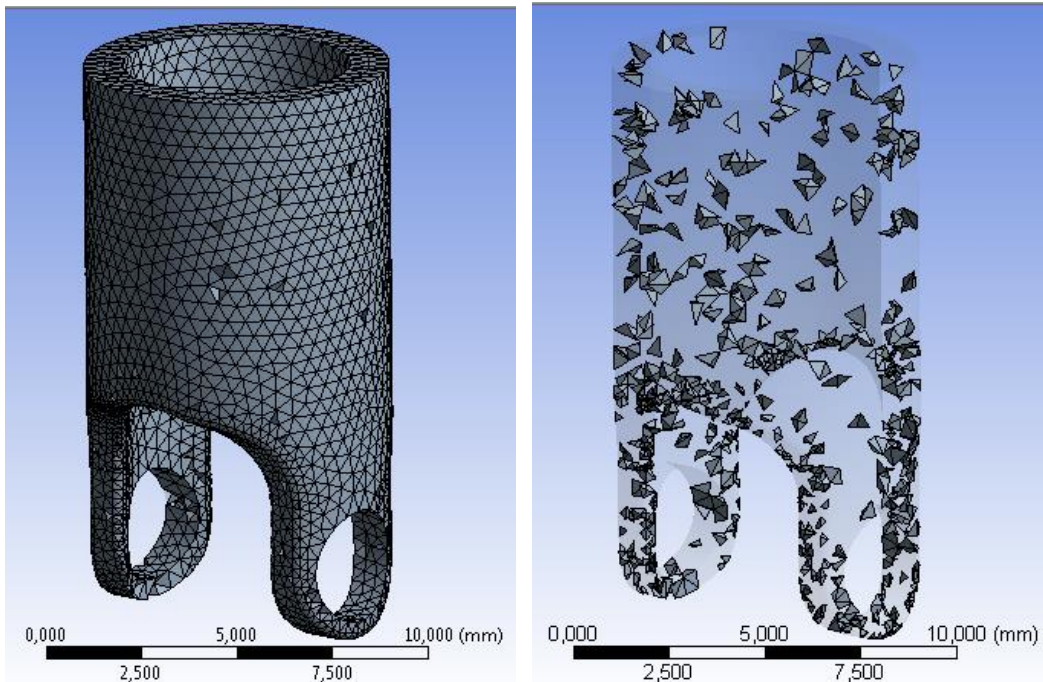


Rys. 3. Rozkład elementów skończonych według kryterium skośności elementu

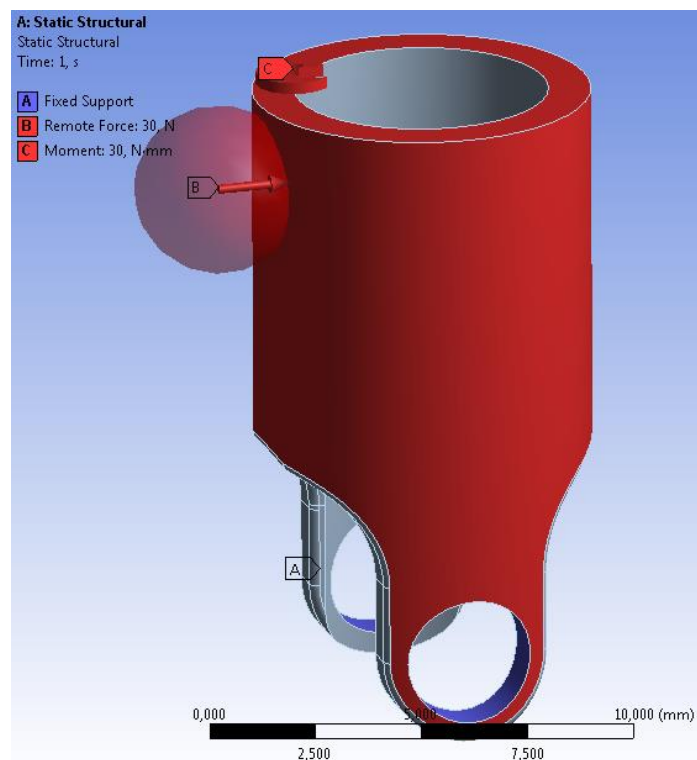
Na rysunku 4 przedstawione jest rozmieszczenie elementów które posiadają bardzo wysoki współczynnik z przedziału od 0 do 0,5 (po lewej stronie rysunku), oraz rozmieszczenie elementów o najlepszej jakości – powyżej 0,5 (po prawej stronie rysunku).

### 3. Proces optymalizacji elementu aktywnego przegubu

Podczas symulacji zostały wprowadzone warunki brzegowe w postaci unieruchomienia elementu w miejscu, gdzie znajdują się łożyska ślizgowe. Jako siłę zewnętrzną działającą na badany element przyłożono siłę o wartości 30 N. W celu przyłożenia siły do walcowej powierzchni zastosowano tzw. *Pinball region*. Dzięki takiemu podejściu istnieje możliwość oddziaływania siłą na wybrany obszar, który ograniczony jest sferą. Sposób przyłożenia siły przedstawiony jest na rysunku poniżej. Dodatkowym wymuszeniem zastosowanym podczas symulacji jest moment skręcający działający na płaszczyźnie zaznaczonej literą C.

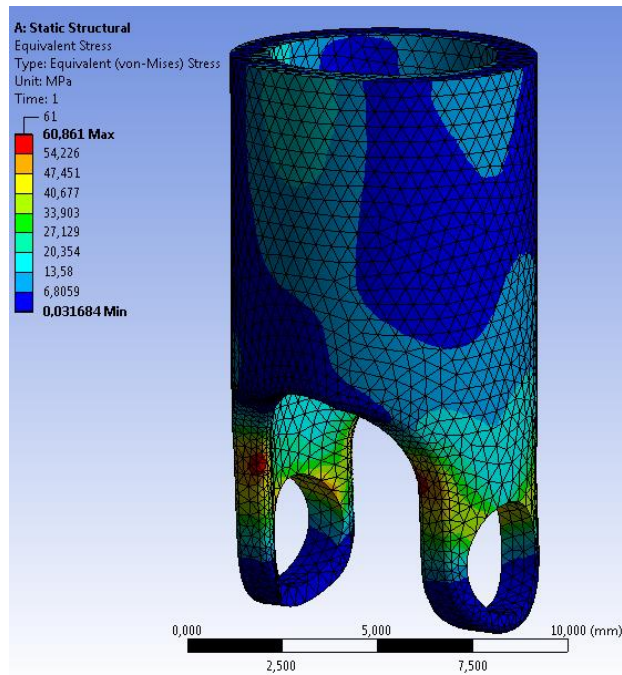


Rys. 4. Rozmieszczenie elementów skończonych: elementy o wartości z przedziału  $<0, 0,5>$  (po lewej) i elementy o wartości z przedziału  $(0,5, 0,9)$  (po prawej)



Rys. 5. Warunki brzegowe

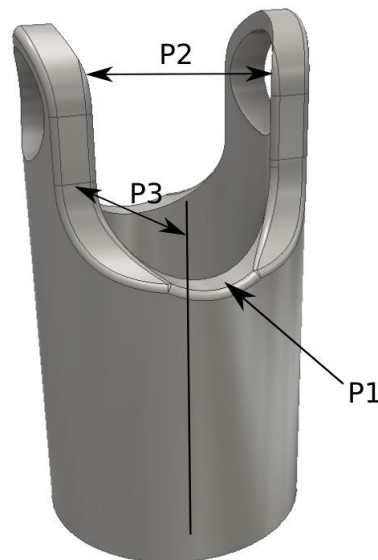
Dla początkowych wartości zmiennych decyzyjnych otrzymano maksymalne naprężenie na poziomie 60,861 MPa. Rozkład naprężeń zredukowanych w elemencie przegubu przedstawiony jest na rysunku 6.



Rys. 6. Naprężenia w badanym elemencie wg hipotezy Hubera–von Misesa

Pierwszym etapem analizy było wprowadzenie różnych wartości parametrów geometrycznych – decyzyjnych (tzw. design point) dla elementu aktywnego przegubu:

- grubość ścianki (P1),
- grubość uchwytu (P2), gdzie jest mocowany element łącznika przegubu,
- wycięcie boczne (P3).



Rys. 7. Element pasywny przegubu z zaznaczonymi parametrami decyzyjnymi

Parametrami wyjściowymi brany pod uwagę były:

- masa całego elementu (P5),
- maksymalne naprężenie dopuszczalne według hipotezy von Misesa (P6),
- maksymalne odkształcenie (P7),
- współczynnik bezpieczeństwa (P8).

Współczynnik bezpieczeństwa mówi ile razy naprężenie dopuszczalne  $\sigma_{dop}$  dla danej konstrukcji jest

mniejsze od naprężenia niebezpiecznego  $\sigma_n$  [6].

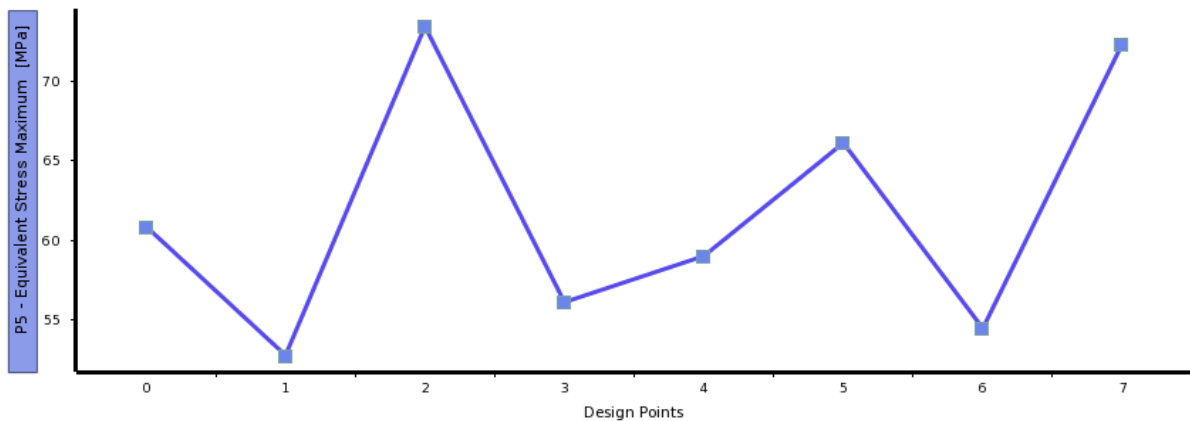
$$k = \frac{\sigma_n}{\sigma_{dop}} \quad (1)$$

gdzie  $\sigma_n$  jest przyjęte jako granica plastyczności dla materiału z którego jest wykonany element. W tabeli 1 przedstawiono wyniki symulacji dla ośmiu konfiguracji parametrów wejściowych.

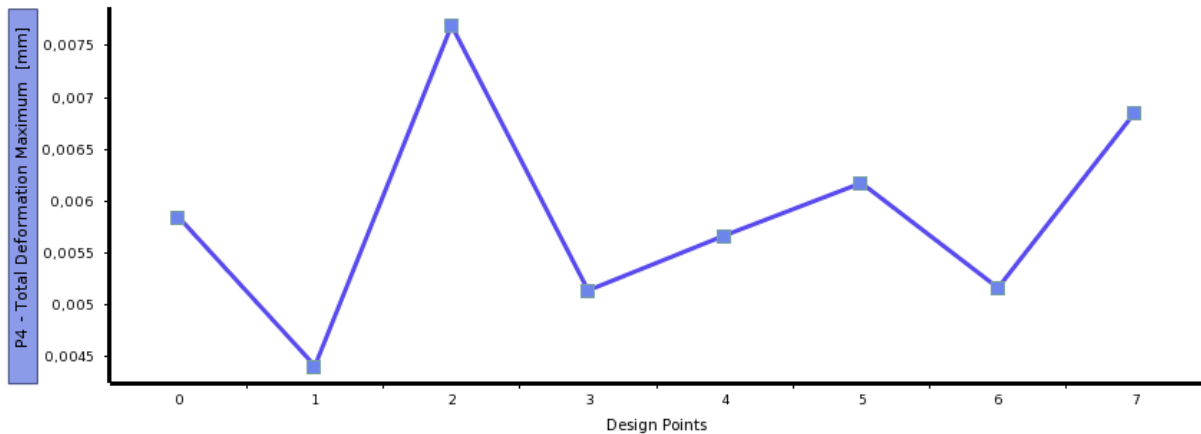
Tabela 1. Wyniki dla poszczególnych punktów konstrukcyjnych

	Grubość ścianki [mm]	Grubość uchwytu [mm]	Wycięcie boczne [mm]	Masa [kg]	Maksymalne naprężenie [MPa]	Maksymalne odkształcenie [mm]	Współczynnik bezpieczeństwa
	P1	P2	P3	P5	P6	P7	P8
DP 0	1	5	2	0,001811	60,86	0,00584	4,10
DP 1	1,5	5	2	0,002489	52,76	0,00441	4,73
DP 2	0,8	5	2	0,001487	73,42	0,00769	3,40
DP 3	1,2	4,8	1,9	0,002095	56,09	0,00513	4,45
DP 4	1	4,7	2	0,001818	59,00	0,00567	4,23
DP 5	1	5,3	2	0,001799	66,10	0,00617	3,78
DP 6	1	5	2,2	0,001845	54,45	0,00516	4,59
DP 7	1	5	1,8	0,001779	72,33	0,00685	3,45

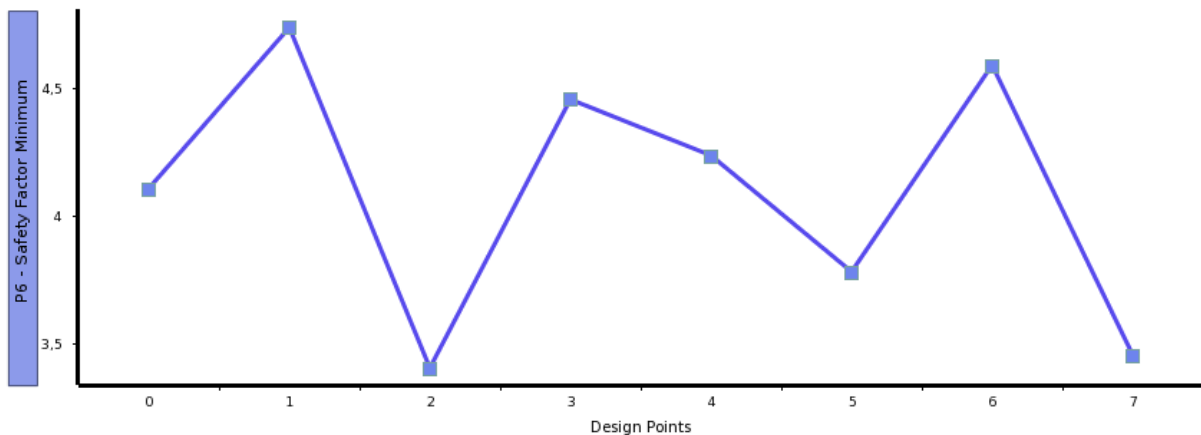
Na wykresach poniżej przedstawiona jest zmiana wartości parametrów wyjściowych w zależności od danej konfiguracji punktów konstrukcyjnych. Na osi X znajdują się kolejno punkty konstrukcyjne od DP0 do DP7, zaś na osi Y parametry wyjściowe tj., masa elementu, naprężenie zredukowane, maksymalne odkształcenie, oraz współczynnik bezpieczeństwa.



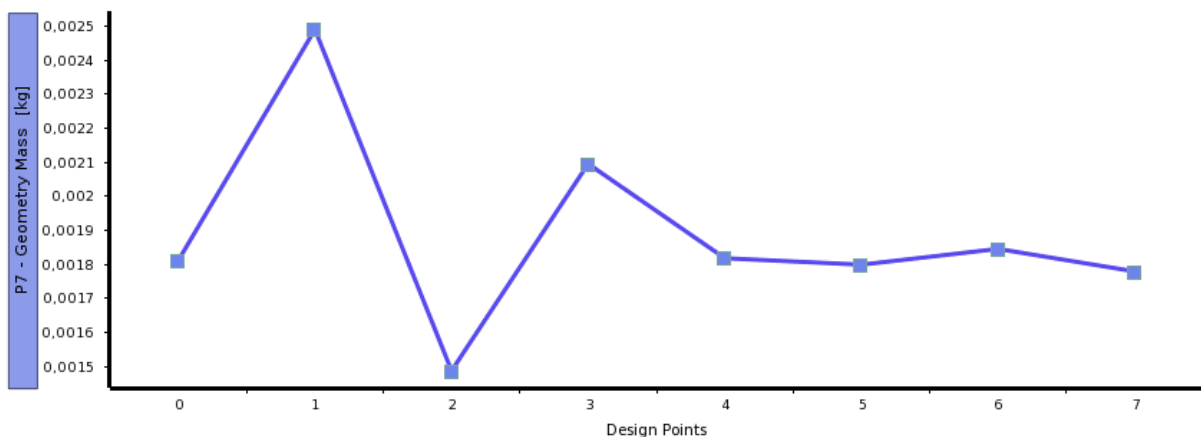
Rys. 8. Charakterystyka zmiany naprężenia zredukowanego względem punktów konstrukcyjnych



Rys. 9. Charakterystyka zmiany maksymalnego odkształcenia względem punktów konstrukcyjnych

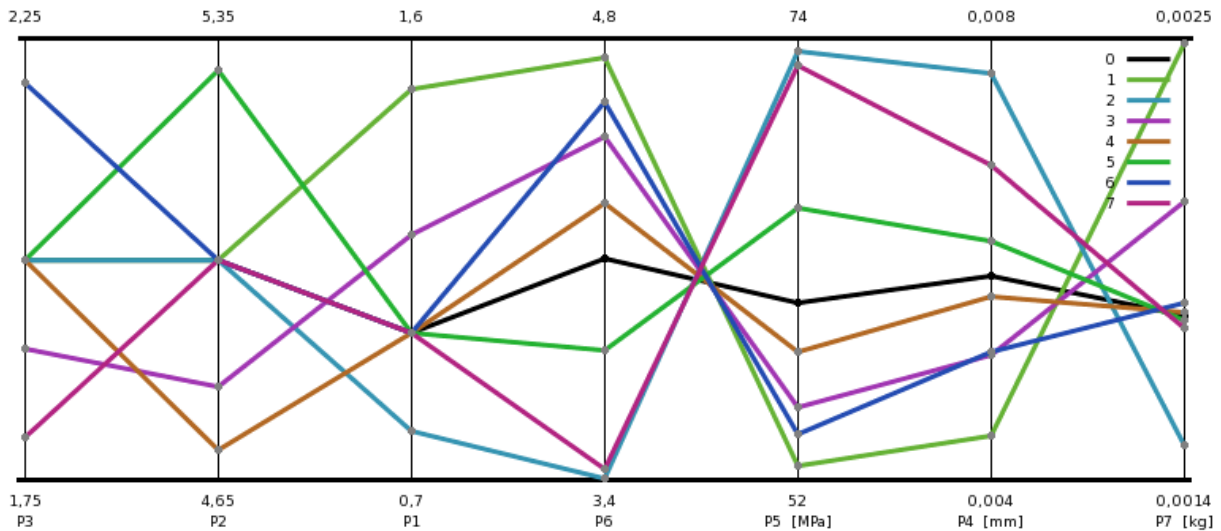


Rys. 10. Charakterystyka zmiany współczynnika bezpieczeństwa względem punktów konstrukcyjnych



Rys. 11. Charakterystyka zmiany masy elementu badanego względem punktów konstrukcyjnych

Kolejny wykres przedstawia zależność wszystkich parametrów wyjściowych od punktów konstrukcyjnych. Kolorami oznaczono poszczególne pogrupowane wartości parametrów (tzw. *design points*). Pierwszy z numerem 0 jest to punkt projektowy, gdzie parametry nie zostały zmienione, zaś kolejno numerami 1- zielony, 2 – niebieski, 3 – różowy oznaczone są kolejne punkty konstrukcyjne. Na osi X znajdują się wszystkie parametry wejściowe i wyjściowe. W górnej części wykresu znajdują się uzyskane maksymalne wartości parametrów.



Rys. 12. Zależność wartości parametrów wejściowych i wyjściowych od poszczególnych punktów konstrukcyjnych

Jak przewidywano, współczynnik bezpieczeństwa rośnie gdy grubość ścianki jest zwiększana oraz gdy wartość wycięcia pomiędzy uchwytami jest zmniejszana.

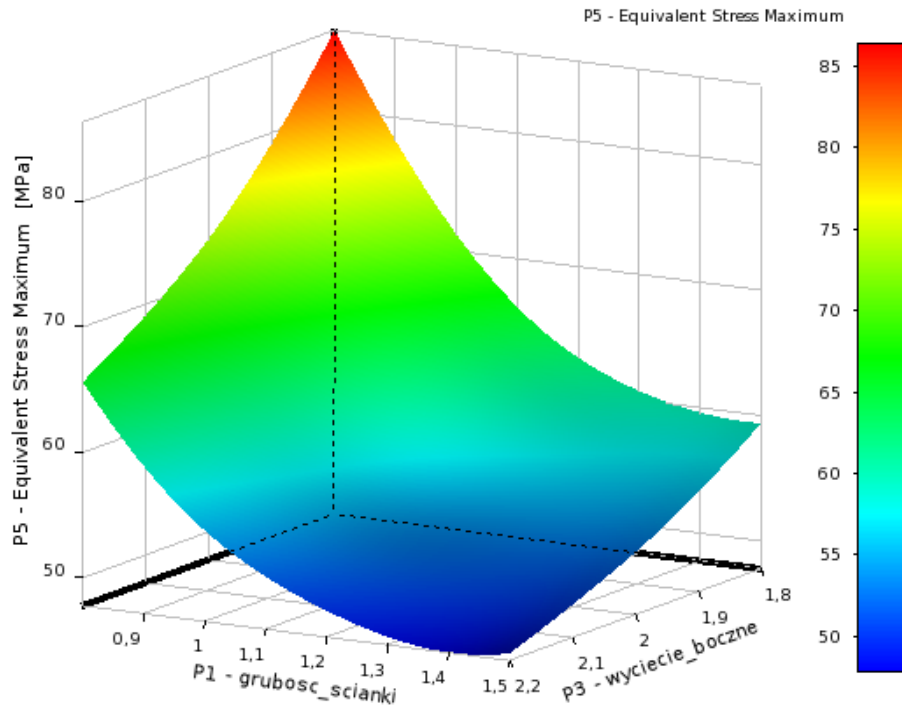
Kolejnym etapem optymalizacji jest zwiększenie ilości punktów konstrukcyjnych i wykonanie analizy dla wartości parametrów w określonym przedziale. Ze względu na konstrukcję urządzenia, możliwość przemieszczania się elementów względem siebie zastosowano następujące zakresy wartości parametrów decyzyjnych (p. tabela.2).

Tab. 2. Zakres wartości zmiennych decyzyjnych

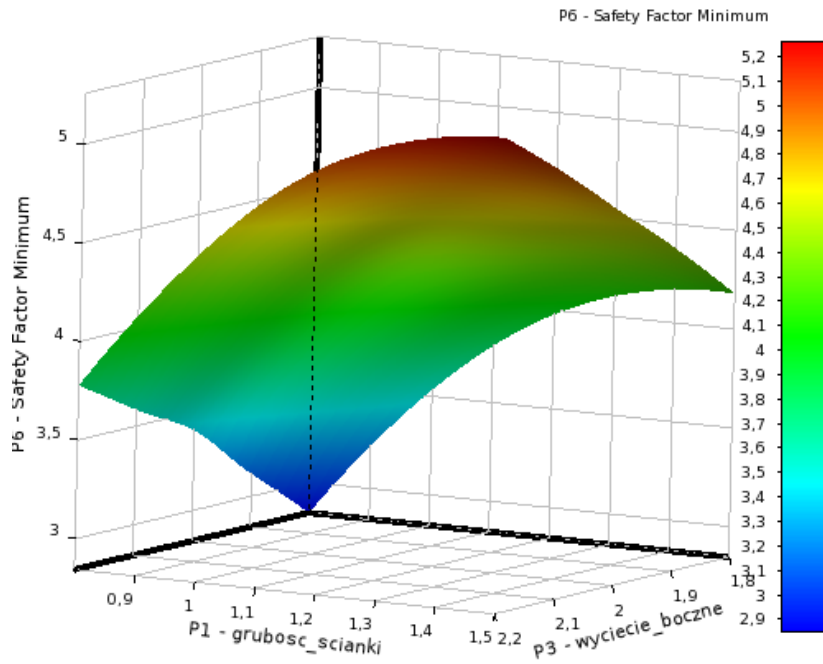
Nazwa parametru	Symbol	Zakres wartości [mm] min- początkowa - max
grubość ścianki	P1	0,8 – 1 -1,5
grubość uchwytu	P2	4,7 - 5 - 5,3
wycięcie boczne	P3	1,8 – 2 - 2,2

Dla tak przyjętych wartości parametrów zostało wygenerowanych 30 konfiguracji punktów obliczeniowych. Następnie obliczono odkształcenie, naprężenie i współczynnik bezpieczeństwa. Na podstawie wygenerowanych punktów konstrukcyjnych oraz interpolacji wielomianu drugiego stopnia utworzono powierzchnię odpowiedzi.

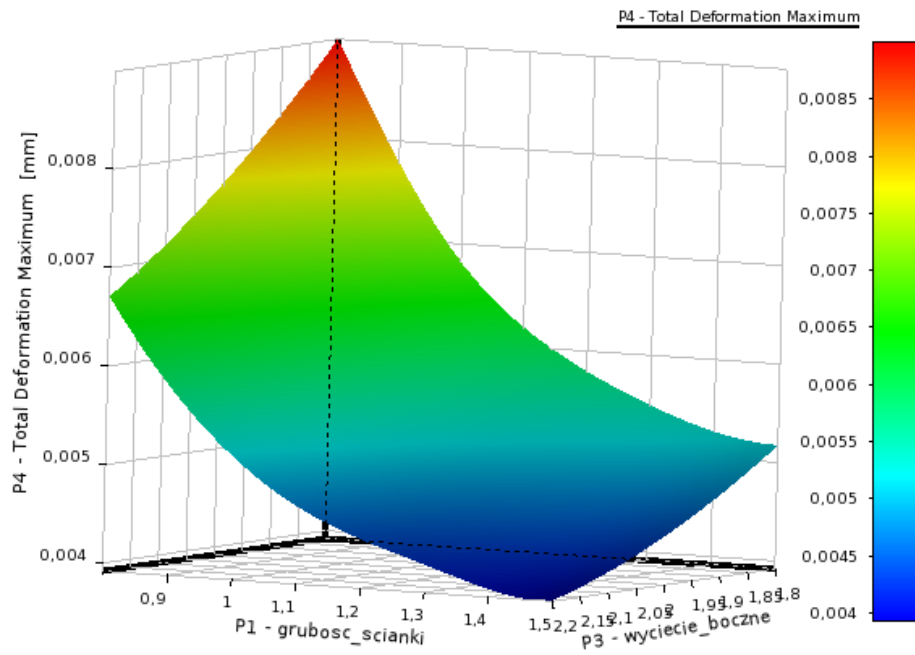




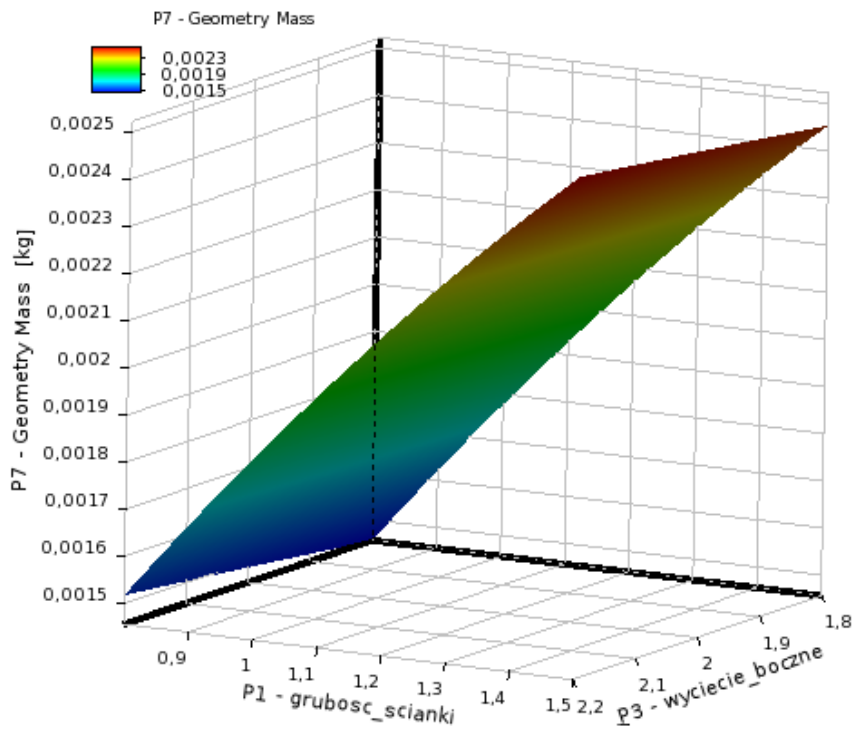
Rys. 13. Powierzchnia odpowiedzi dla maksymalnego naprężenia wg hipotezy Hubera-von Misesa



Rys. 14. Powierzchnia odpowiedzi dla współczynnika bezpieczeństwa

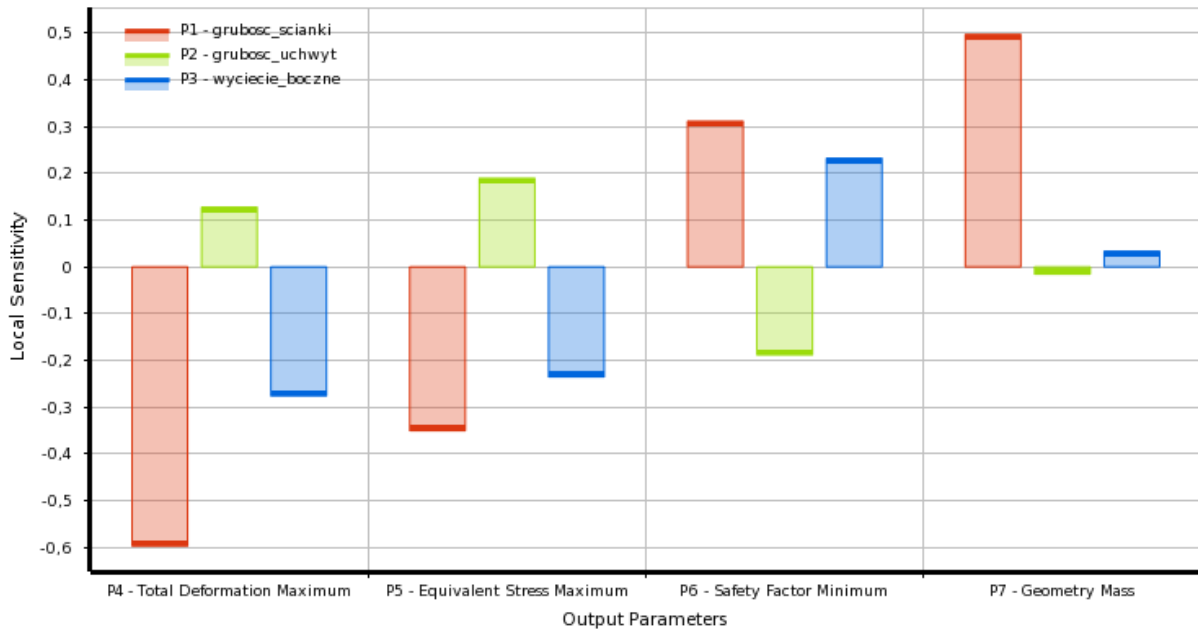


Rys. 15. Powierzchnia odpowiedzi dla maksymalnego odkształcenia



Rys. 16. Powierzchnia odpowiedzi dla masy elementu

Na wykresie poniżej przedstawiono czułość zmian parametrów wyjściowych na zmieniające się parametry wejściowe.

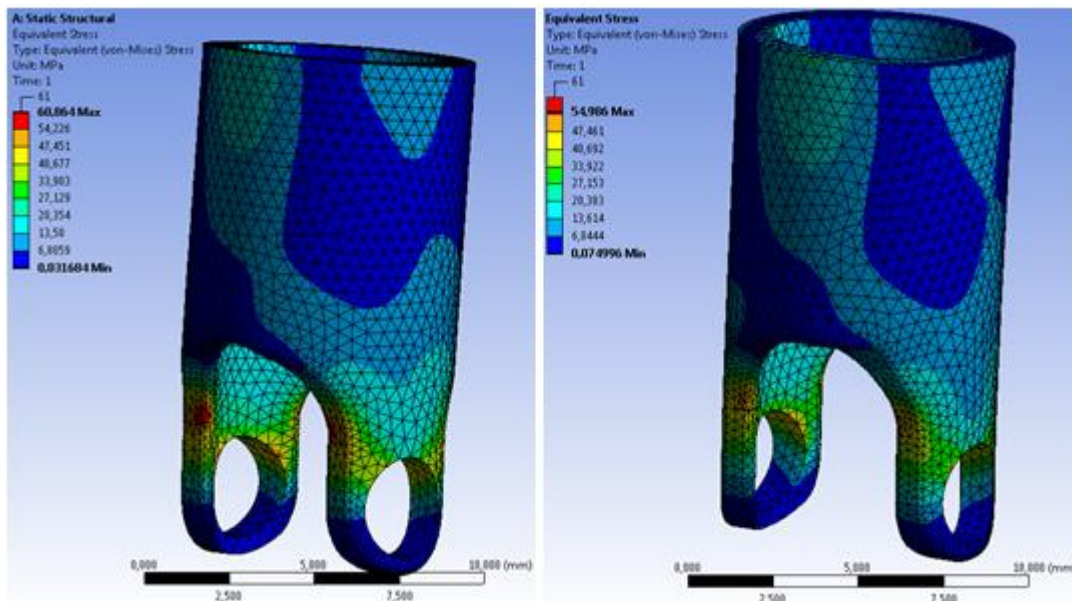


Rys. 17. Czułość zmian parametrów wyjściowych na zmiany parametrów wejściowych

W procesie optymalizacji rozpatrzono dwa warunki:

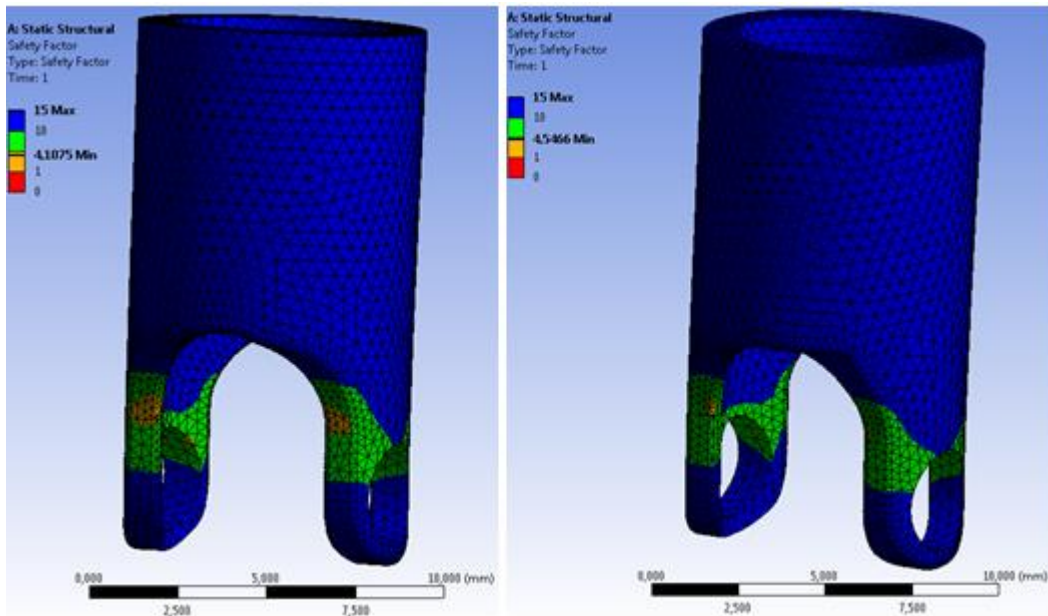
- warunek minimalizacji naprężeń w elemencie oraz minimalizacji masy badanego obiektu;
- warunek minimalizacji masy, gdzie naprężenia nie mogą przekroczyć nominalnej wartości tj. 60 MPa.

Przy zachowaniu tej samej masy i profilowaniu wyłącznie parametrów geometrycznych udało się zmniejszyć naprężenie w elemencie o 10%. Wynik uzyskanych naprężeń przedstawiono na rysunku poniżej.



Rys. 18. Wykres naprężeń zredukowanych według hipotezy Hubera. Po lewej stronie dla ogniwa z parametrami początkowymi, po prawej ogniwo po operacji optymalizacji

Poniżej znajduje się ilustracja przedstawiająca rozkład współczynnika bezpieczeństwa. Z rysunku 19 wynika, iż współczynnik bezpieczeństwa wzrósł po optymalizacji z wartości 4,44 do 5,88.



Rys. 19. Wykres współczynnika bezpieczeństwa. Po lewej ogniwo przed optymalizacją, po prawej ogniwo po optymalizacji

W tabeli 3 przedstawiono wyniki z symulacji przed optymalizacją oraz po optymalizacji geometrii elementu. Z tabeli wynika iż przy zachowaniu tej samej masy udało się ograniczyć naprężenia o 10% oraz zmniejszyć odkształcenie.

Tabela 3. Wyniki symulacji przed optymalizacją i po optymalizacji

Wielkość badana	Przed optymalizacją	Po optymalizacji
Maksymalne naprężenie	60,864 MPa	54,986 MPa
Maksymalne odkształcenie	0,005851 mm	0,005261 mm
Masa	0,0018115 kg	0,0017969 kg
Współczynnik bezpieczeństwa	4,1075	4,5466

Tabela 4. Wartości parametrów decyzyjnych przed i po optymalizacji

Nazwa parametru	Symbol	Wartość parametrów przed optymalizacją [mm]	Wartość parametrów po optymalizacji [mm]
grubość ścianki	P1	1	0,96
grubość uchwyt	P2	5	4,88
wycięcie boczne	P3	2	2,19

Przy optymalizacji, gdzie jako cel wyznaczono zmniejszenie masy elementu przy zachowaniu naprężeń uzyskano redukcję masy na poziomie 8%.

Wykonując symulację wytrzymałościową ogniwa, dokonano również modyfikacji materiału. Wykonano test dla ogniwa wykonanego ze stopu aluminium, który jest dużo tańszy i dla celów badawczych byłby dobrym rozwiązaniem. Współczynnik bezpieczeństwa jest na poziomie 5, a odkształcenie 0,01 mm. Do symulacji wykorzystano również bardzo popularny materiał do szybkiego prototypowania – tworzywo sztuczne ABS. Niestety ze względu na właściwości materiałowe – niską granicę plastyczności, niską wytrzymałość na rozciąganie – materiał ten nie nadaje się do wykonania prototypu robota. Podczas działania siły zewnętrznej ABS znacznie się deformuje, a współczynnik bezpieczeństwa jest kilka rzędów mniejszy od wartości 1.

#### 4. Wnioski

ROCH-3 jest następcą opatentowanej w 2014 roku konstrukcji robota chirurgicznego ROCH-1 [7]. W artykule przedstawiono proces optymalizacji modelu sterowalnego przegubu Cardana, przeznaczonego do nowej wersji robota chirurgicznego ROCH-3. Poddano optymalizacji geometrii człon aktywny wchodzący w skład przegubu. Po optymalizacji otrzymano naprężenia zredukowane, mniejsze o 10% względem naprężeń występujących w modelu bazowym bez optymalizacji. Przebadano również człon aktywny wykonany z innych materiałów niż stal chirurgiczna, tj. z aluminium i z tworzywa sztucznego ABS. Na bazie symulacji można stwierdzić, że ABS nie nadaje się do wykonania modelu przegubu, zaś stop aluminium będzie można zastosować do wykonania prototypu urządzenia.

#### LITERATURA

- [1] L. Leniowska, Z. Nawrat (red.): *Advances in Medical Robotics*, s. 213, Wydawnictwo Uniwersytet Rzeszowski – Inprona, Rzeszów 2013.
- [2] R. Leniowski, L. Leniowska: *Mathematical model of a multi-link surgical manipulator joint with an antiseptic coating*, Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems, vol. 5(3), 2011.
- [3] R. Leniowski: *Podstawy robotyki*, Wydawnictwo Uniwersytet Rzeszowski.
- [4] T Szkodny: *Podstawy robotyki*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2012.
- [5] J Craig: *Wprowadzenie do robotyki*, Warszawa WNT, 1995.
- [6] J. Zwolak: *Wytrzymałość materiałów: przykłady obliczeń – zadania*, Wydawnictwo Uniwersytet Rzeszowski. Katedra Mechatroniki i Automatyki, 2013.
- [7] Patent P-391263 *Manipulator chirurgiczny*, Urząd Patentowy RP, data udzielenia: 05.05.2014 r.

otrzymano / submitted: 20.11.2016  
wersja poprawiona / revised version: 27.11.2016  
zaakceptowano / accepted: 19.12.2016