

Politechnika Poznańska
Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania
Inżynieria biomedyczna
Rok III, Semestr VI
Rok akademicki 2016/2017



Modelowanie i symulacja zagadnień biomedycznych

**PORÓWNANIE WYTRZYMAŁOŚCI
ALUMINIOWEGO I STALOWEGO
BALKONIKA REHABILITACYJNEGO
NA PODSTAWIE SYMULACJI MES**

Prowadzący: dr hab. Tomasz Stręk, prof. nadzw.

Patrycja Pastusiak
Marta Szczetyńska
Adam Żarczyński

Spis treści

1. Wprowadzenie.....	2
2. Wstęp teoretyczny	2
2.1. Balkoniki rehabilitacyjne	2
2.2. Materiały	4
2.3. Metoda Elementów Skończonych.....	6
2.4. Tworzenie modelu 3D w Programie Autodesk Inventor Professional	7
3. Symulacja wytrzymałościowa.....	12
3.1. Model aluminiowy	13
3.2. Model stalowy	19
4. Podsumowanie	23
5. Bibliografia.....	24

1. Wprowadzenie

Balkonik jest sprzętem pomocniczo-rehabilitacyjnym przeznaczonym dla osób niepełnosprawnych ze schorzeniami narządu ruchu, problemami pionizacji lub mających problem z utrzymaniem równowagi w czasie chodzenia. Wyeksploatowany przez lata układ ruchu, poważne operacje, urazy czy zwyrodnienia, a także choroby takie jak reumatyzm czy Parkinson mogą prowadzić do bardzo poważnych ograniczeń w poruszaniu się. Osoby starsze, a także młode w okresie rehabilitacji, bardzo często wymagają specjalnego wsparcia w przemieszczaniu się zarówno po ulicy, jak i w obrębie domu. W przypadkach, w których zwykła laska ortopedyczna lub kule nie są wystarczające, należy zaopatrzyć pacjenta w chodzik lub balkonik. Są to specjalnie zaprojektowane konstrukcje wykonane z lekkich i jednocześnie bardzo wytrzymałych materiałów. Wyposażone są w specjalne uchwyty, siedziska, kółka lub podpórki, dzięki którym chory podczas przemieszczania się może odciążyć niektóre partie ciała, co ułatwia mu poruszanie się na co dzień lub ma bardzo korzystny wpływ na powrót do pełnej funkcjonalności podczas procesu rehabilitacji.

2. Wstęp teoretyczny

2.1. Balkoniki rehabilitacyjne

Balkonik rehabilitacyjny sztywny dla niepełnosprawnych

Cena – 139 zł



Rys. 2.1. Balkonik rehabilitacyjny sztywny

Balkonik rehabilitacyjny sztywny stanowi sprzęt pomocniczo-rehabilitacyjny przy poruszaniu się i pionizacji pacjentów dorosłych i dzieci. Balkoniki sztywne przeznaczone są dla osób niepełnosprawnych, ze schorzeniami narządu ruchu. Mogą być wykorzystywane do samodzielnej nauki chodzenia po przebytej chorobie lub urazie. Wysokość balkonika może być dostosowana do wzrostu pacjenta. Ergonomicznie i anatomicznie dostosowane uchwyty zapewniają odpowiednią stabilizację.

Cechy produktu: składany, wykonany z aluminium (bardzo lekki), wzmocnione połączenia, stabilna i wytrzymała konstrukcja, wysokość regulowana skokowo, co 2,5 cm.

Parametry techniczne:

- wysokość min.: 77,0 cm
- wysokość max.: 95,0 cm
- szerokość: 57,0 cm
- głębokość: 47,0 cm
- masa: 2,4 kg
- maksymalne obciążenie: 100,0 kg

Balkonik stały rehabilitacyjny z kółkami

Cena 139 zł



Rys. 2.2. Balkonik stały rehabilitacyjny z kółkami

Ten balkonik do chodzenia znacznie ułatwia poruszanie się osobom niepełnosprawnym i starszym. Dzięki kółkom znacznie łatwiej jest go przesuwac.

Cechy produktu: składana, aluminiowa rama, dodatkowe wzmocnienia, nóżki tylne zakończone gumowymi zabezpieczeniami antypoślizgowymi, kółka przednie o średnicy 12 cm, ergonomiczne uchwyty, wysokość regulowana skokowo, co 2,5 cm.

Parametry techniczne:

- szerokość: 64 cm
- wysokość: 80-97,5 cm
- masa: 2,5 kg
- maksymalne obciążenie: 110 kg

Balkonik inwalidzki ułatwiający wstawanie

Cena 149 zł



Rys. 2.3. Balkonik inwalidzki ułatwiający wstawanie

Balkoniki ułatwiające wstawanie stanowią sprzęt pomocniczo-rehabilitacyjny przy poruszaniu się i pionizacji pacjentów dorosłych i dzieci. Balkoniki ułatwiające wstawanie przeznaczone dla osób niepełnosprawnych, ze schorzeniami narządu ruchu. Mogą być wykorzystywane do samodzielnej nauki chodzenia po przebytej chorobie lub urazie. Wysokość balkonika może być dostosowana do wzrostu pacjenta. Ergonomicznie i anatomicznie dostosowane uchwyty zapewniają odpowiednią stabilizację. Ten model balkonika posiada 2 punkty podporu, co szczególnie umożliwia łatwe wstawanie.

Parametry techniczne:

- szerokość: 63 cm
- głębokość: 54 cm
- szerokość po złożeniu: 12 cm
- wysokość regulowana: 79 - 97 cm
- masa: 2,75 kg
- bezpieczne obciążenie: 113 kg

2.2. Materiały

Aluminium 7075

Aluminium jest drugim, po żelazie, najczęściej wykorzystywanym metalem podczas produkcji. Wynika to z faktu, że metal ten łączy w sobie unikalną kombinację pożądanych własności:

- niewielka masa,
- wysoka wytrzymałość,

- plastyczność,
- podatność na obróbkę,
- wysoka odporność na korozję,
- dobre przewodnictwo ciepła,
- dobre przewodnictwo elektryczności,

Gęstość:

Gęstość aluminium wynosi 2,7 g/cm³ i jest około trzy razy mniejsza niż gęstość stali.

Wytrzymałość:

Wytrzymałość na rozciąganie stopów aluminium wynosi od 70 do 700 N/mm². W odróżnieniu od większości gatunków stali, aluminium nie staje się kruche w niskich temperaturach. Wręcz przeciwnie – jego wytrzymałość w niskich temperaturach zwiększa się.

Rozszerzalność liniowa:

W porównaniu z innymi metalami aluminium charakteryzuje się stosunkowo wysokim współczynnikiem rozszerzalności liniowej. Fakt ten musi być uwzględniony w niektórych typach konstrukcji.

Plastyczność:

Wysoka plastyczność, będąca warunkiem wyciskania profili aluminiowych, jest wykorzystywana również przy gięciu, oraz innych rodzajach obróbki plastycznej, zarówno na gorąco, jak i zimno.

Łączenie:

Elementy aluminiowe można łączyć poprzez: nitowanie, skręcanie, spawanie, lutowanie i klejenie. Aluminium z powodzeniem można łączyć również z innymi materiałami.

Obróbka:

Stopy aluminium dają się łatwo obrabiać większością metod, do których należą między innymi toczenie, frezowanie, wiercenie, cięcie, wykrawanie, gięcie.

Odporność na korozję:

Podobnie jak większość pozostałych metali, aluminium wchodzi w reakcję w zawartym w powietrzu tlenem. Tworząca się w ten sposób warstewka tlenku jest bardzo cienka, jej grubość wynosi zaledwie kilka setnych mikrometra. Powłoka jest szczelna i stanowi bardzo dobre zabezpieczenie przed korozją. W przypadku uszkodzenia warstwy tlenku następuje samoczynne jej samozasklepienie. Aluminium charakteryzuje się wysoką odpornością w środowiskach neutralnych i lekko kwaśnych. W warunkach silnej kwasowości lub zasadowości tempo korozji jest wysokie.

Nietoksyczność:

Glin jest trzecim, po tlenie i krzemie, pierwiastkiem występującym w skorupie ziemskiej, a związki glinu są naturalnym składnikiem naszego pożywienia.

Właściwości mechaniczne:

Min. wytrzymałość na rozciąganie Rm: 480-540 Mpa

Min. granica plastyczności Rp0,2: 390-470 MPa

Twardość: 104-157 HB

Stal 4340

Stal o dobrej hartowności, przeznaczona na obciążone części i podzespoły pojazdów mechanicznych, silników i samolotów. Stosowana również przy produkcji części narażonych na uderzenia, skręcania i drgania, takich jak wały wykorbione, korbowody, piasty śmigieł, elementy pomp, pras, sprzęzarek oraz części pracujące przy podwyższonych temperaturach 400-450 °C.

Własności mechaniczne:

Wytrzymałość na rozciąganie Rm: 1250-1450 MPa

Granica plastyczności Rp0,2: min 1050 MPa

Warunki procesów technologicznych obróbki plastycznej i cieplnej:

Kucie 1050-850 °C

Walcowanie 1050-850 °C

Wyżarzanie normalizujące 850-880 °C

Wyżarzanie zmiękczające 650-700 °C,

Hartowanie 865-885 °C / olej, powietrze

Odpuszczanie 550-650 °C

Własności fizyczne stali:

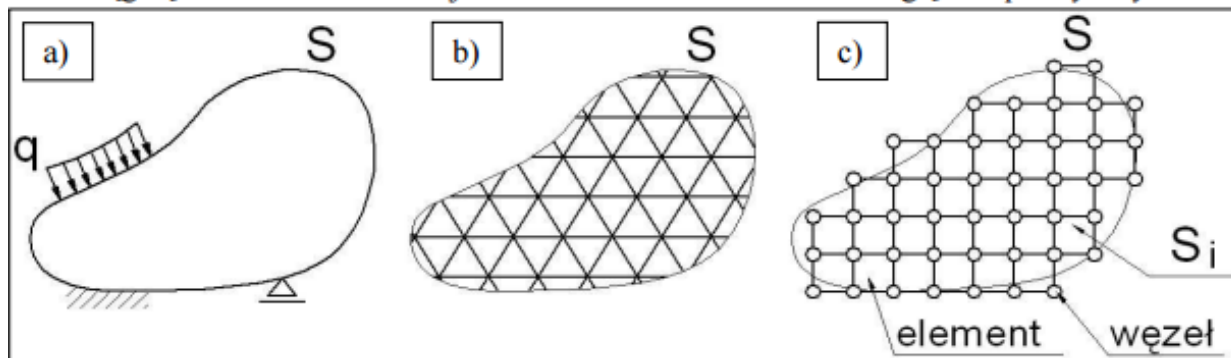
Gęstość - 7,82 g/cm³

2.3. Metoda Elementów Skończonych

Idea Metody Elementów Skończonych (MES) zakłada modelowanie bardzo złożonych konstrukcji (części i zespołów) poprzez ich reprezentację za pomocą możliwie prostych geometrycznie elementów składowych, z uwzględnieniem nieciągłości i wielofazowości materiałowych. Głównie założenie MES to podział modelu geometrycznego ciągłego (Rys. 2.4.) na elementy skończone, łączące się w tzw. węzłach, czego efektem jest utworzenie modelu geometrycznego dyskretnego. Efektem dyskretyzacji jest transformacja układu o nieskończonej liczbie stopni swobody (zdolności do zmiany wartości określonej współrzędnej) do postaci układu o skończonej liczbie stopni swobody (SSW).

Należy zauważyć, że: $S = \sum_1^n S_i$, gdzie $n \rightarrow +\infty$

lecz osiągnięcie warunku $n \rightarrow +\infty$ jest trudne do zrealizowania ze względów praktycznych.



Rys. 2.4. Dyskretyzacja modelu ciągłego – transformacja w zbiór (siatkę) elementów skończonych: a) model geometryczny ciągły, b) model dyskretny idealny, c) model dyskretny obliczeniowy

Adaptacyjna metoda elementów skończonych

Biorąc pod uwagę sposób, w jaki szacujemy błąd aproksymacji, istnieje możliwość zwiększenia precyzji metody przez zmniejszanie rozmiarów elementów skończonych i podnoszenie stopnia aproksymacji. Wiąże się to z większym zapotrzebowaniem na moc obliczeniową – rozwiązaniem jest oparcie się na znajomości zjawiska i wprowadzenie tych zmian lokalnie, w miejscach, w których szczególnie zależy nam na zminimalizowaniu błędu.

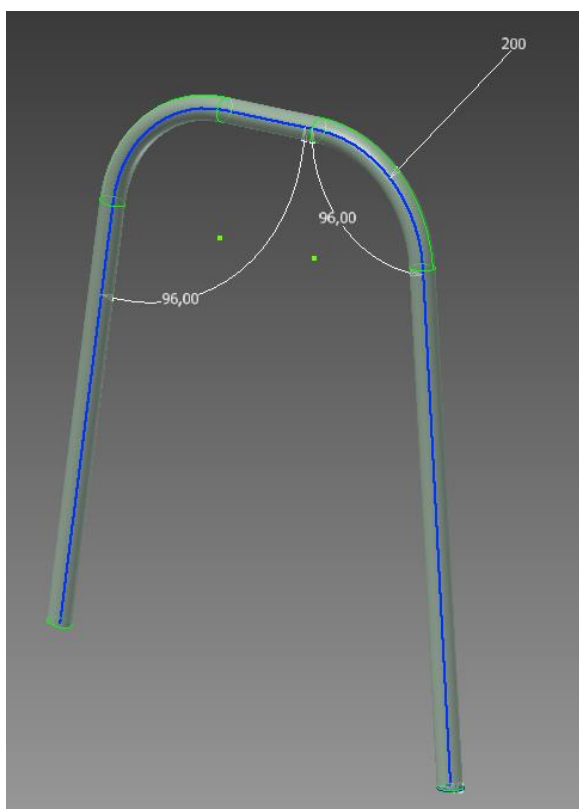
Etapy realizacji symulacji

Pierwszym krokiem jest wybór, bądź stworzenie modelu matematycznego zjawiska. Model taki jest następnie przekształcany w model numeryczny – równania różniczkowe przekształcane są do postaci całkowej lub wariacyjnej, wybierane są techniki szacowania błędu. Następnym krokiem jest wybór algorytmów, które posłużą do rozwiązywania układów równań, całkowania numerycznego, dyskretyzacji czasowej itp. Mając model numeryczny i algorytmy można przejść do implementacji – wyboru struktur danych, sposobu realizacji, analizy architektury systemu komputerowego. Problem zostaje wymodelowany geometrycznie, a także zaprojektowana i nałożona zostaje siatka. Utworzony układ równań liniowych zostaje rozwiązany, a wyniki prezentowane są w formie graficznej.

2.4. Tworzenie modelu 3D w Programie Autodesk Inventor Professional

Autodesk Inventor Professional jest systemem 3D do projektowania mechanicznego o wysokiej wydajności, przeznaczonym dla konstruktorów i inżynierów mechanicznych. To zaawansowany modelator bryłowy, który służy do zamodelowania projektowanego urządzenia lub konstrukcji, jako modelu 3D, a następnie wygenerowania na podstawie modelu rysunków złożeniowych, wykonawczych, poglądowych i innych. Program ten umożliwia również zapisanie pliku w formatach pozwalających na dalszą jego analizę.

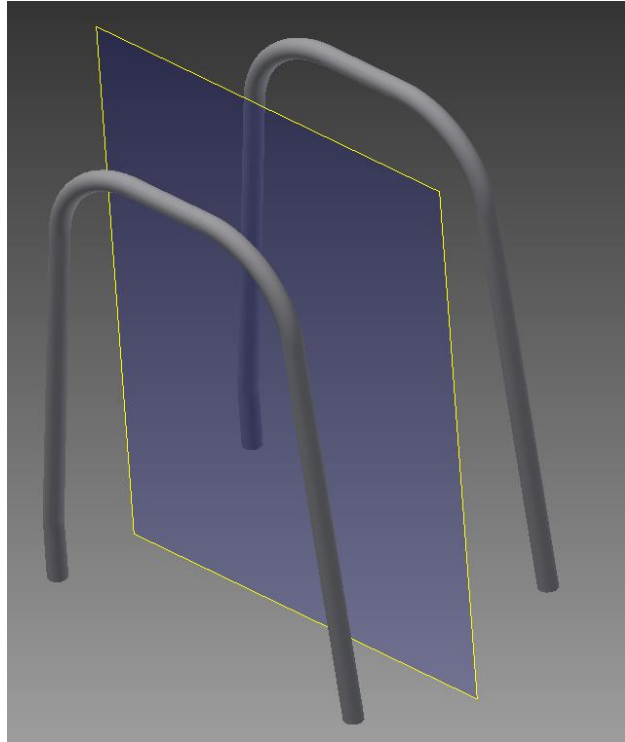
Poniżej zamieszczone są zdjęcia pokazujące proces wykonywania modelu 3D balkoniku rehabilitacyjnego.



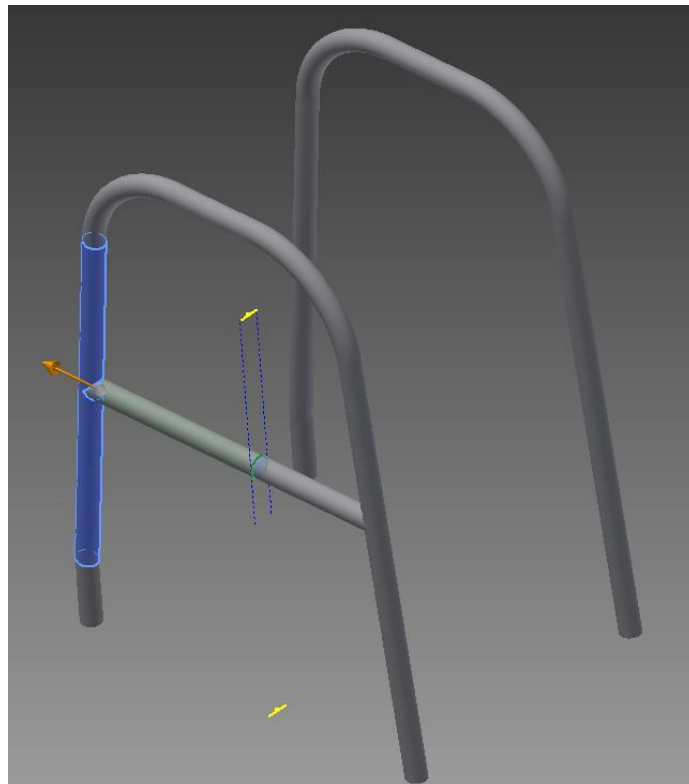
Rys. 2.5. Tworzenie modelu 3D w programie Autodesk Inventor Professional



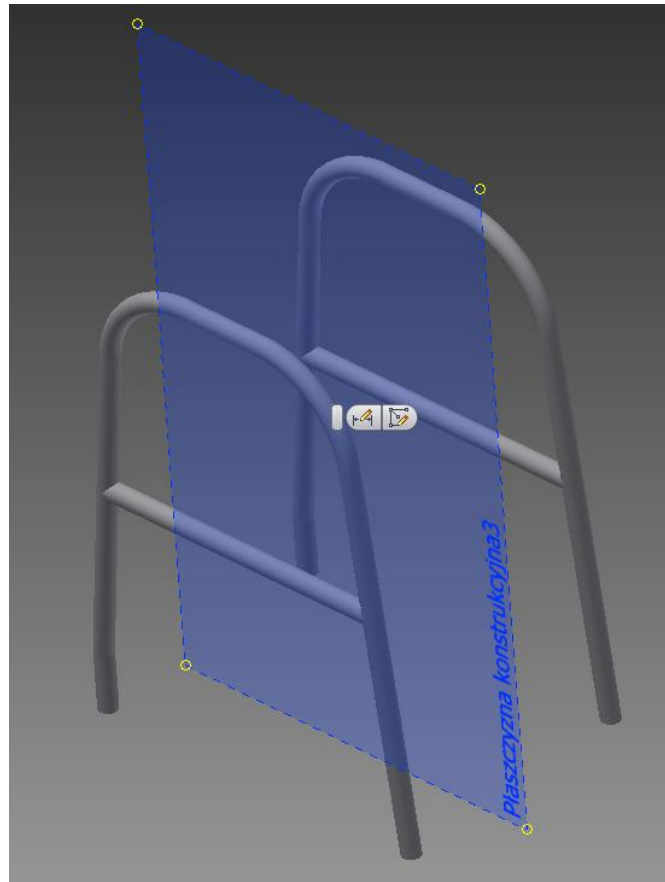
Rys. 2.6. Tworzenie modelu 3D w programie Autodesk Inventor Professional



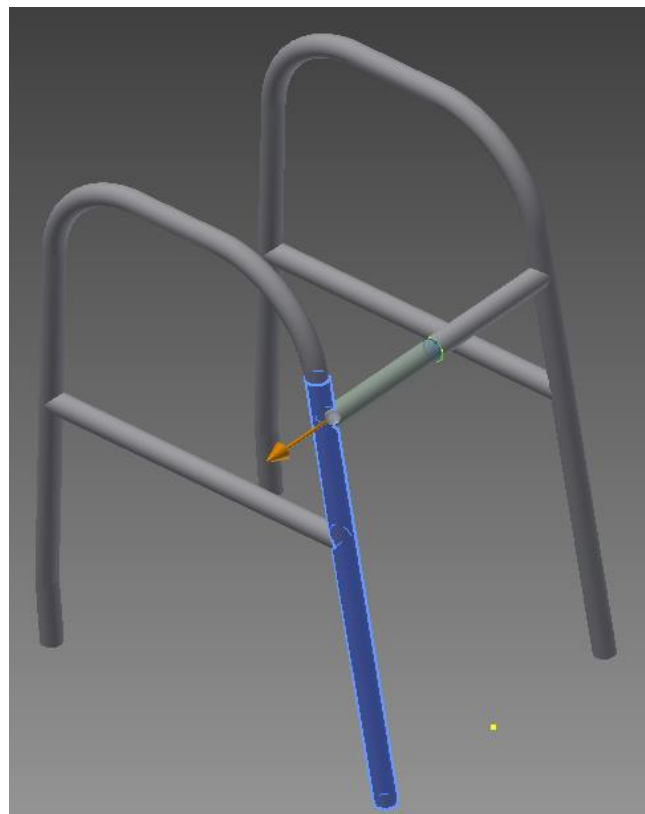
Rys. 2.7. Tworzenie modelu 3D w programie Autodesk Inventor Professional



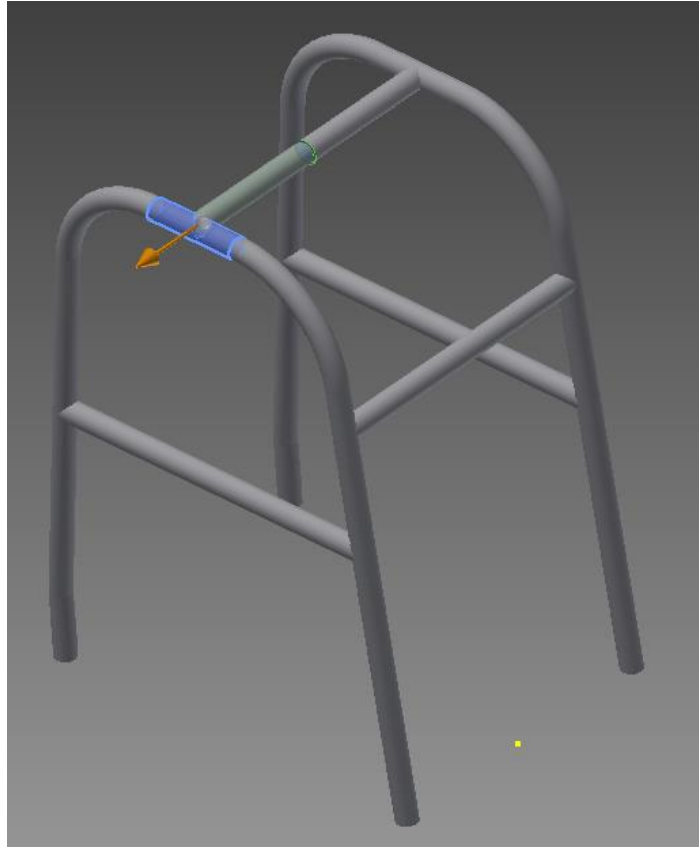
Rys. 2.8. Tworzenie modelu 3D w programie Autodesk Inventor Professional



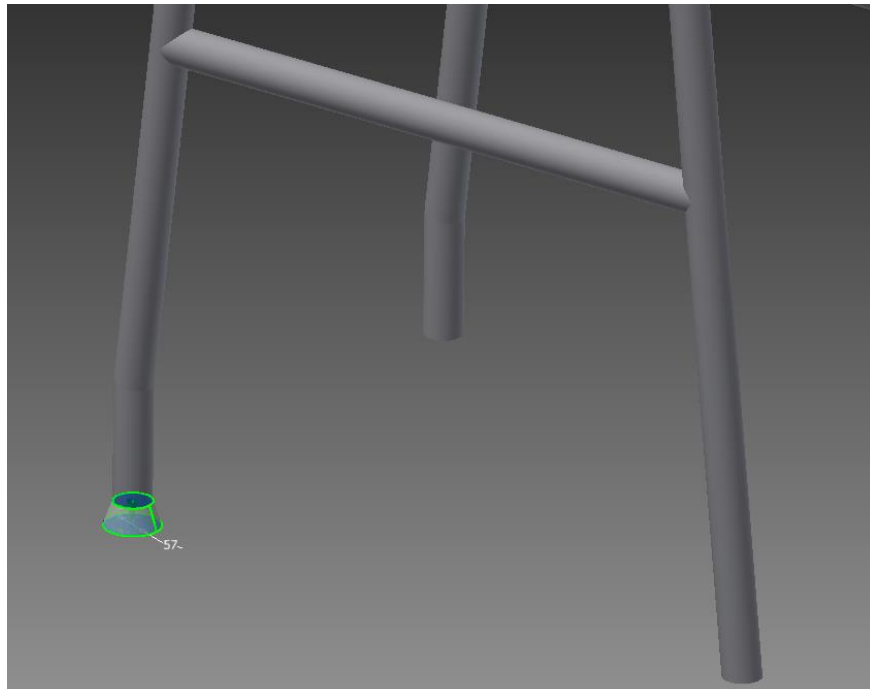
Rys. 2.9. Tworzenie modelu 3D w programie Autodesk Inventor Professional



Rys. 2.10. Tworzenie modelu 3D w programie Autodesk Inventor Professional



Rys. 2.11. Tworzenie modelu 3D w programie Autodesk Inventor Professional



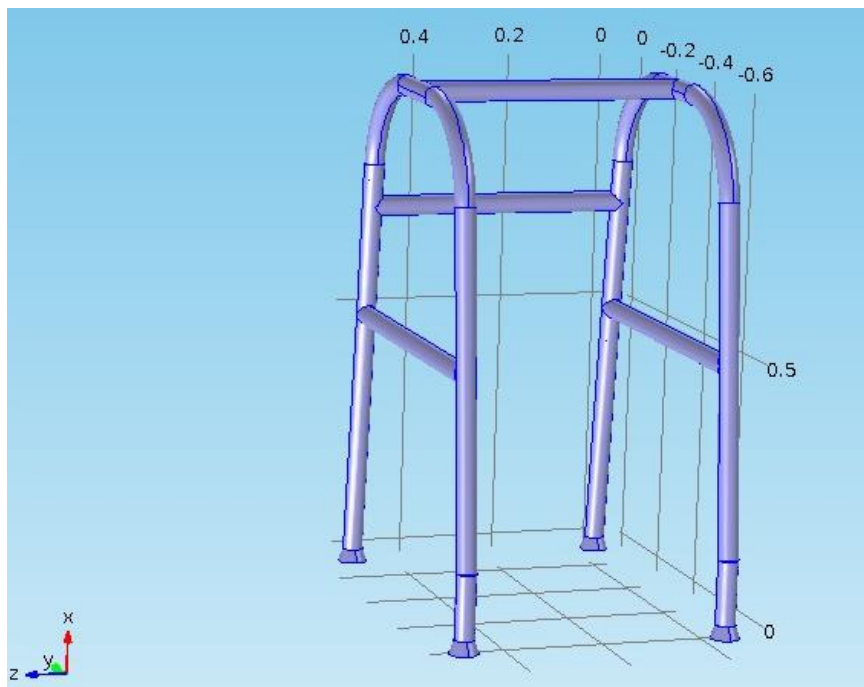
Rys. 2.12. Tworzenie modelu 3D w programie Autodesk Inventor Professional



Rys. 2.13. Gotowy model 3D w programie Autodesk Inventor Professional

3. Symulacja wytrzymałościowa

Analiza wytrzymałościowa modelu balkonika rehabilitacyjnego została przeprowadzona w programie Comsol Multiphysics. Pierwszym etapem był import modelu w formacie .STP, wykonanego wcześniej w programie Autodesk Inventor Professional.



Rys.3.1. Zaimportowany model do programu Comsol Multiphysics

Do analizy zostały wybrane dwa materiały, w celu porównania ich wytrzymałości na działanie określonych sił, działających podczas użytkowania balkonika. Dokonano również wizualizacji częstotści własnych obydwu materiałów.

3.1. Model aluminiowy

Pierwszym analizowanym materiałem jest aluminium 7075, ze względu na to, iż jest powszechnie stosowany na tego rodzaju sprzęt rehabilitacyjny. Materiał liniowo-sprężysty definiowany jest następująco:

$$-\nabla \cdot \sigma = F_V$$

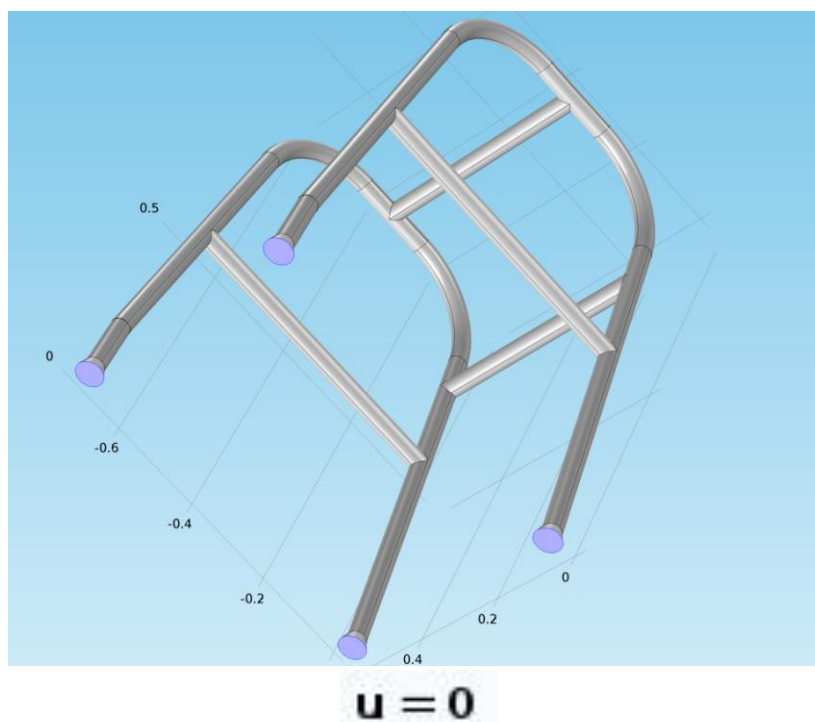
Rys.3.2. Równanie Naviera

»	Property	Name	Value	Unit
✓	Density	rho	rho(T[1/K])[kg/...	kg/m ³
✓	Young's modulus	E	E(T[1/K])[Pa]	Pa
✓	Poisson's ratio	nu	nu(T[1/K])	1
	dL	dL	(dL(T[1/K]))-dL(...	
	Resistivity	res	res_solid_T6_1(...	Ω·m
	Coefficient of thermal expansion	alpha	(alpha(T[1/K]))[1...	1/K
	Heat capacity at constant pressure	Cp	C(T[1/K])[J/(kg*...]	J/(kg·K)
	mu	mu	mu(T[1/K])[Pa]	Pa
	Electrical conductivity	sigma	sigma_solid_T6...	S/m
	nemiss	nemiss	nemiss(T[1/K])	
	kappa	kappa	kappa(T[1/K])[P...	Pa

Rys.3.3. Właściwości wybranego materiału – Aluminium 7075

Kolejnym krokiem było ustalenie warunków brzegowych. Jako pierwsze zostało ustawione utwierdzenie w miejscach styku balkonika z podłożem. Tego typu wiązania odbierają wszystkie stopnie swobody.

- Miejsce utwierdzenia



Rys.3.4. Utwierdzenie w nóżkach balkonika wraz z równaniem warunku brzegowego

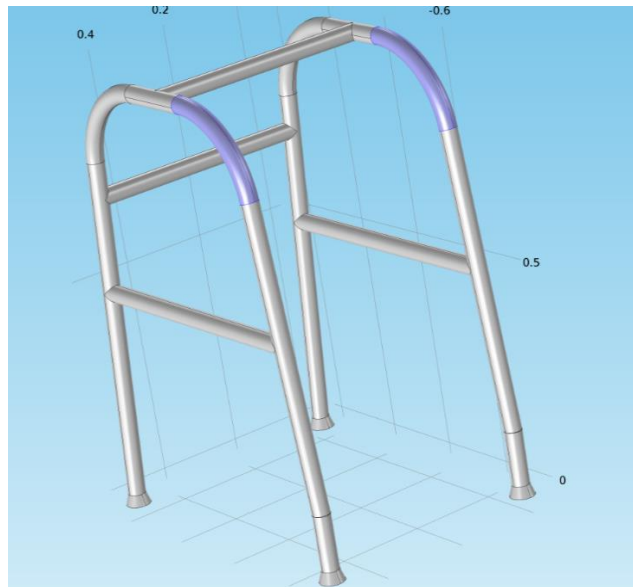
Dalszym etapem było zadanie sił obciążających. Za pomocą funkcji Boundary Load została ustawiona siła wzdłuż osi X o przeciwnym zwrocie do osi. Wartość siły przyjęta została dla pacjenta ważącego około 100 kg. Całkowita wartość siły wyniosła 1000 N. Siła została rozpatrzona w dwóch przypadkach. W pierwszym przypadku pacjent opiera się na uchwytach balkonika, więc siła rozkłada się równomiernie i wynosi około 500 N na stronę. W drugim przypadku pacjent opiera się o belkę łączącą uchwyty balkonika, więc cała siła skupiona jest w jednym miejscu.

Równanie opisanych warunków przedstawia się następująco:

$$\sigma \cdot n = F_{\Delta}$$

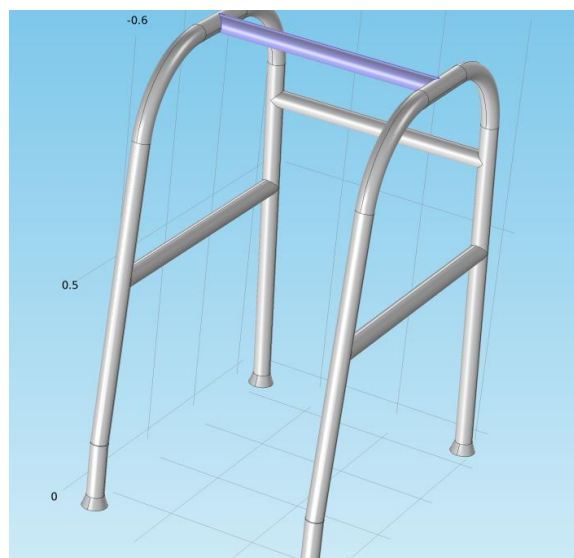
$$F_{\Delta} = \frac{F_{tot}}{A}$$

- Przyłożenie siły nr 1



Rys.3.5. Miejsce przyłożenia siły nr 1

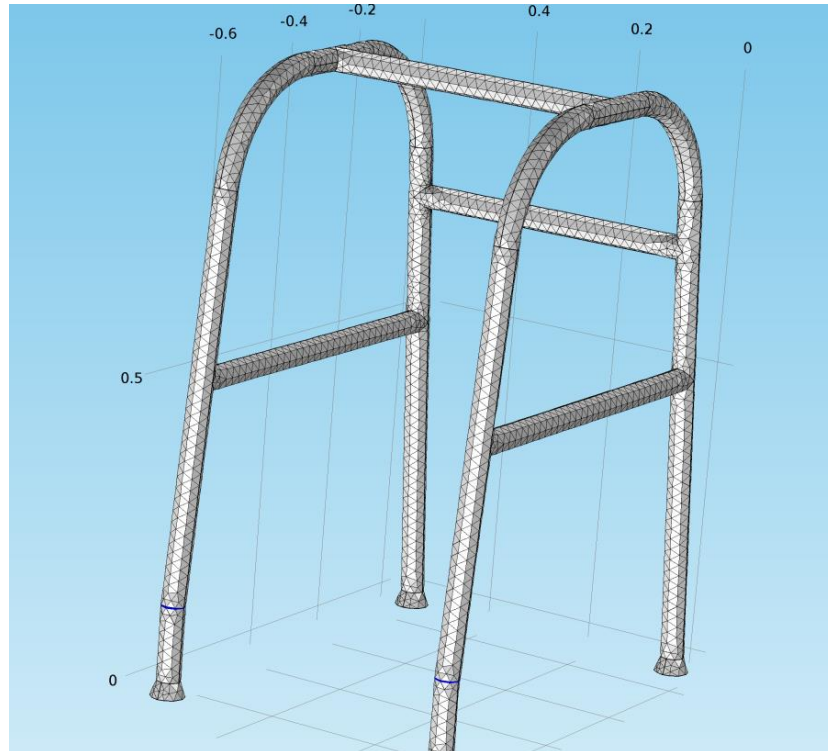
- Przyłożenie siły nr 2



Rys.3.6. Miejsce przyłożenia siły nr 2

Ostatnim etapem przed rozpoczęciem symulacji było nałożenie siatki elementów skończonych. Nałożono siatkę typu Triangular, generowaną automatycznie o gęstości „Fine”. Utworzona siatka składała się z 13259 elementów.

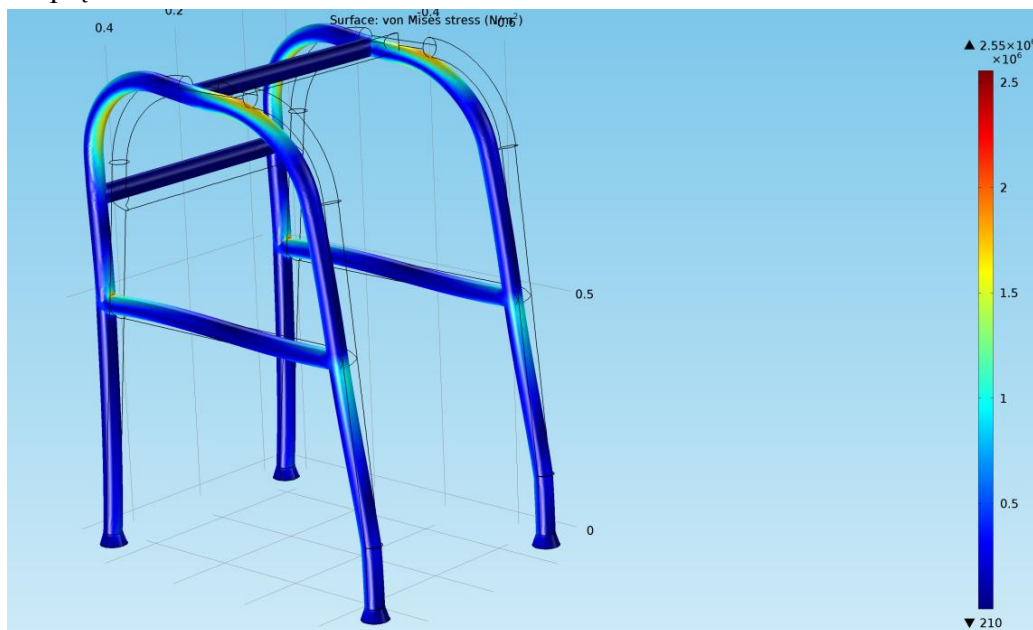
- Siatka



Rys.3.7. Utworzona siatka elementów skończonych

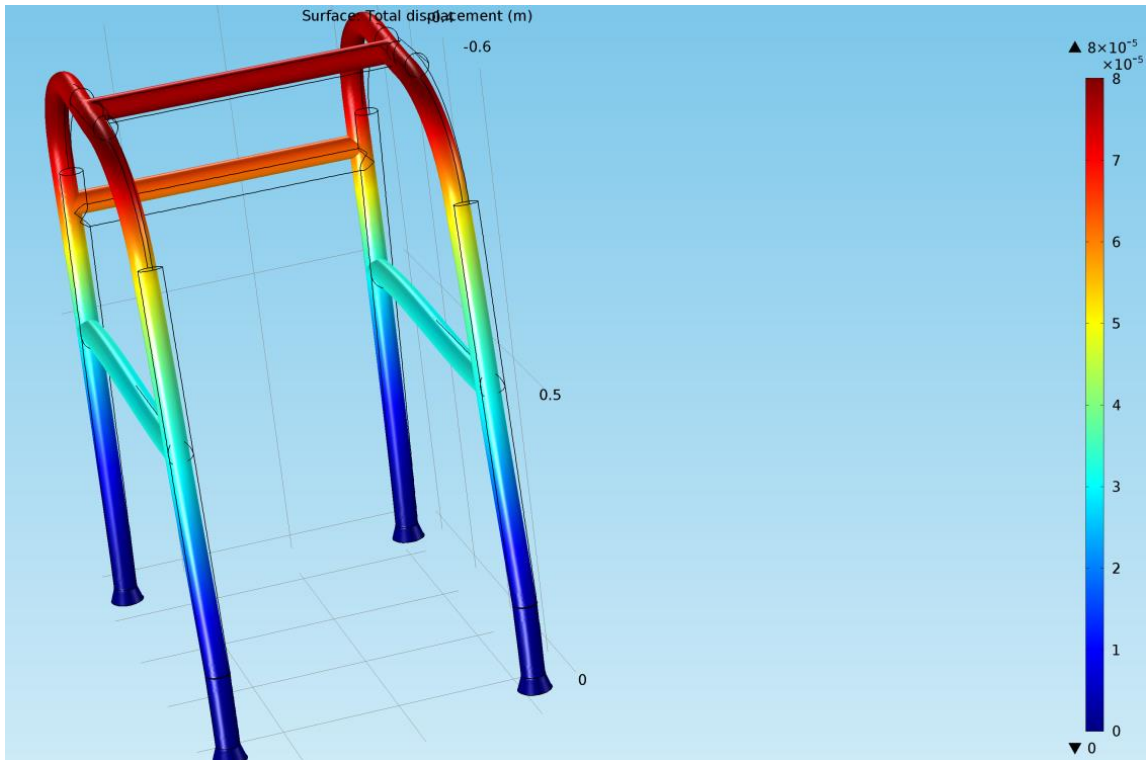
Prezentacja uzyskanych wyników dla aluminium po przyłożeniu 1 siły:

- Naprężenia von Misesa



Rys.3.8. Naprężenia zredukowane von Misesa przy sile nr 1

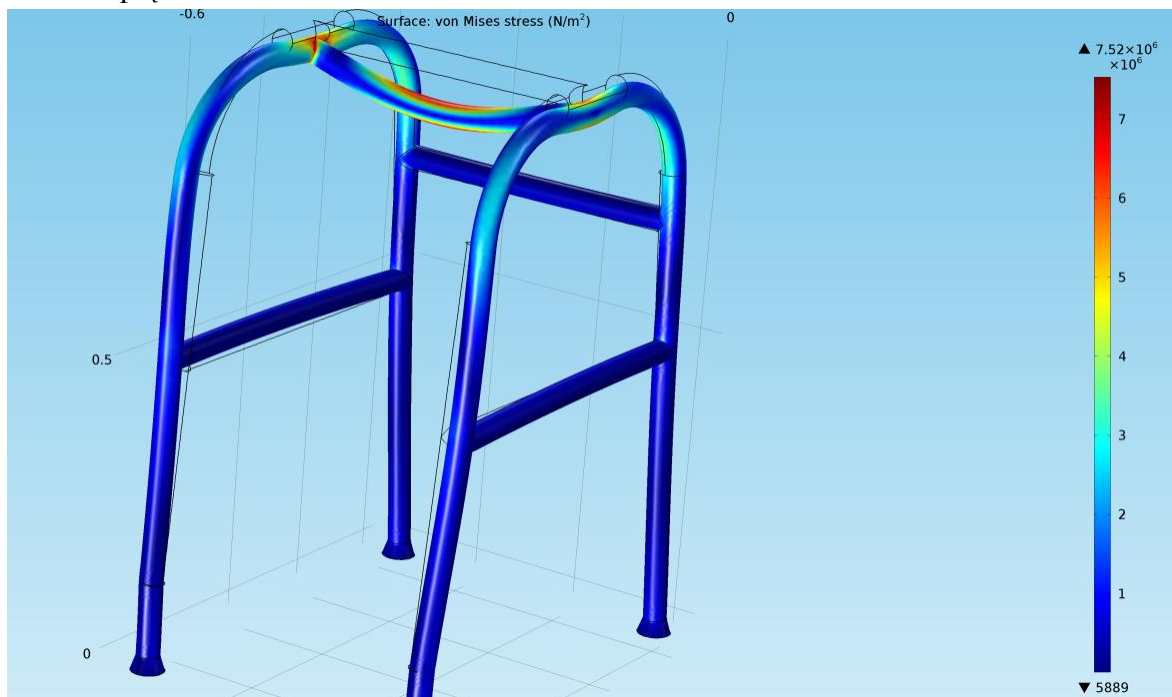
- Całkowite przemieszczenie



Rys.3.9. Całkowite przemieszczenie przy sile nr 1

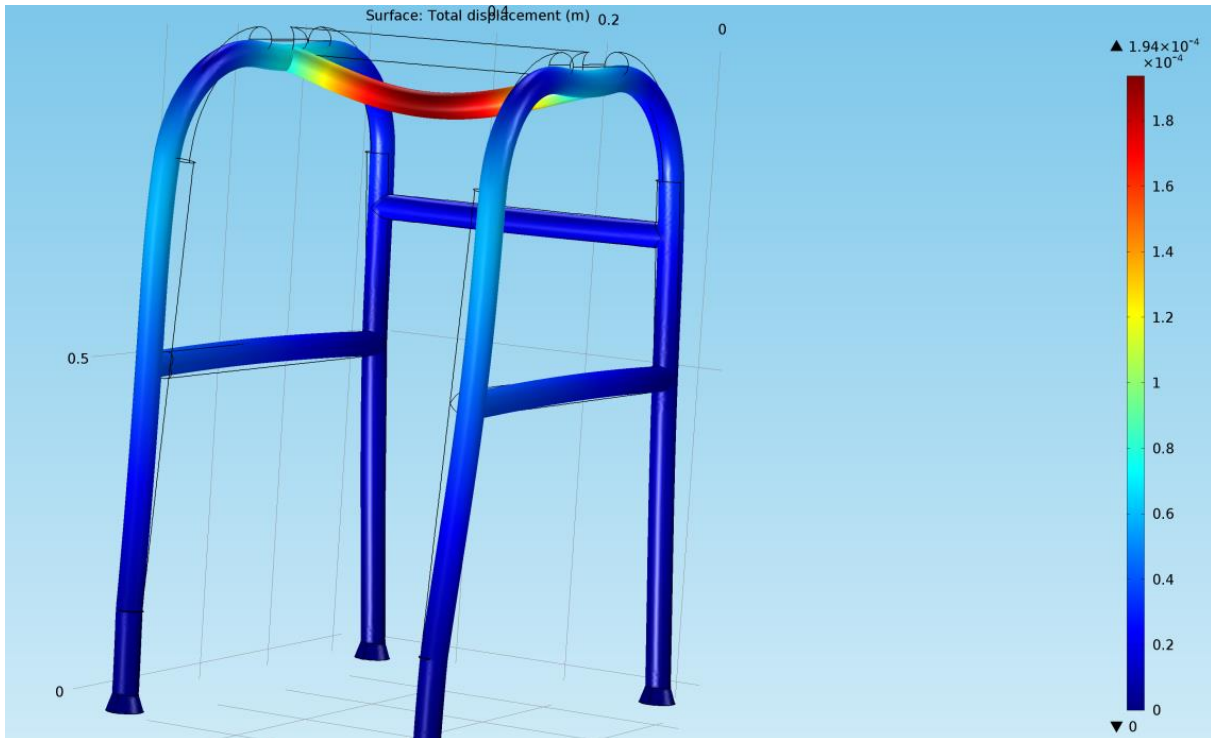
Uzyskane wyniki dla aluminium po przyłożeniu siły nr 2:

- Naprężenia von Misesa



Rys.3.10. Naprężenia zredukowane von Misesa przy sile nr 2

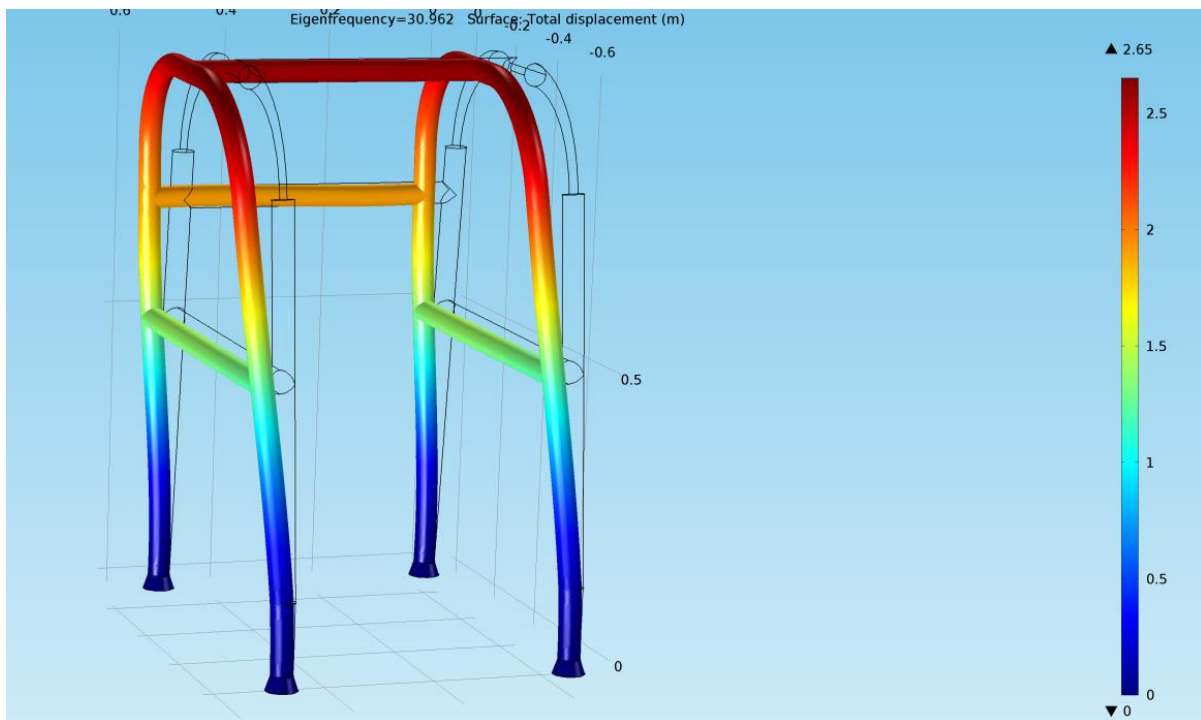
- Całkowite przemieszczenie



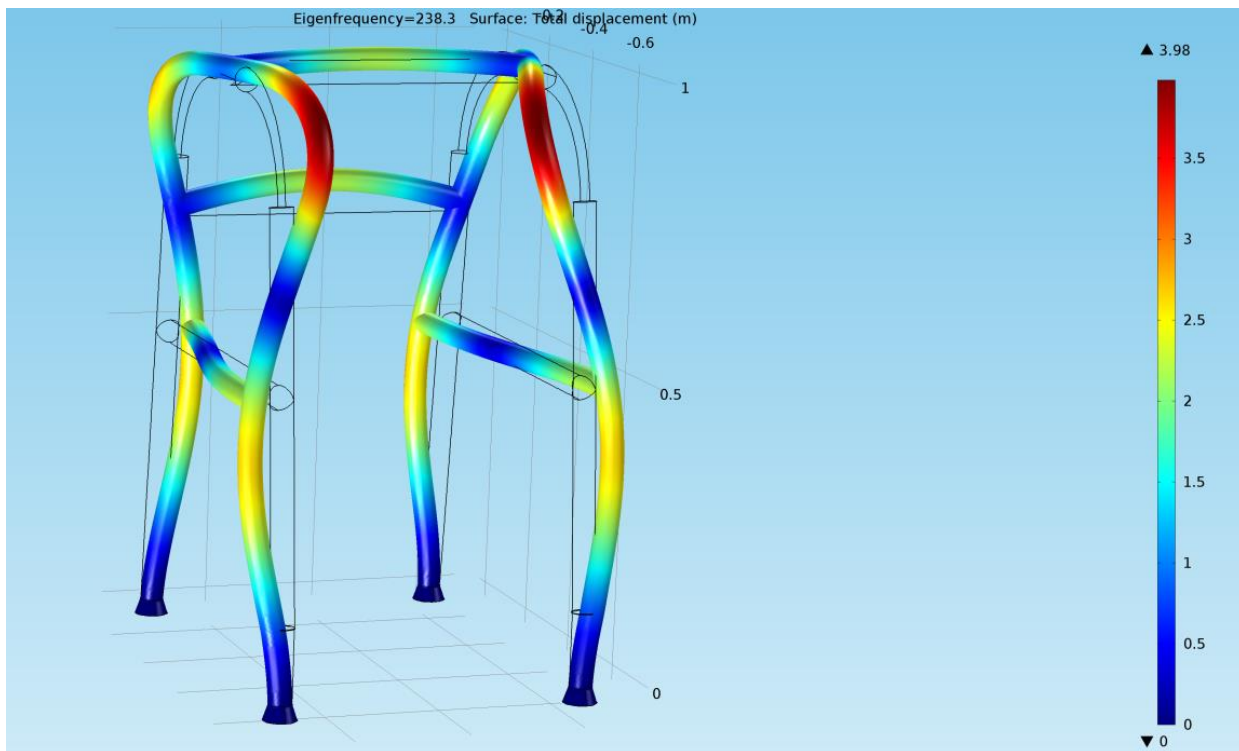
Rys.3.11. Całkowite przemieszczenie modelu przy sile nr 2

- Sprawdzenie wartości częstości własnych materiału

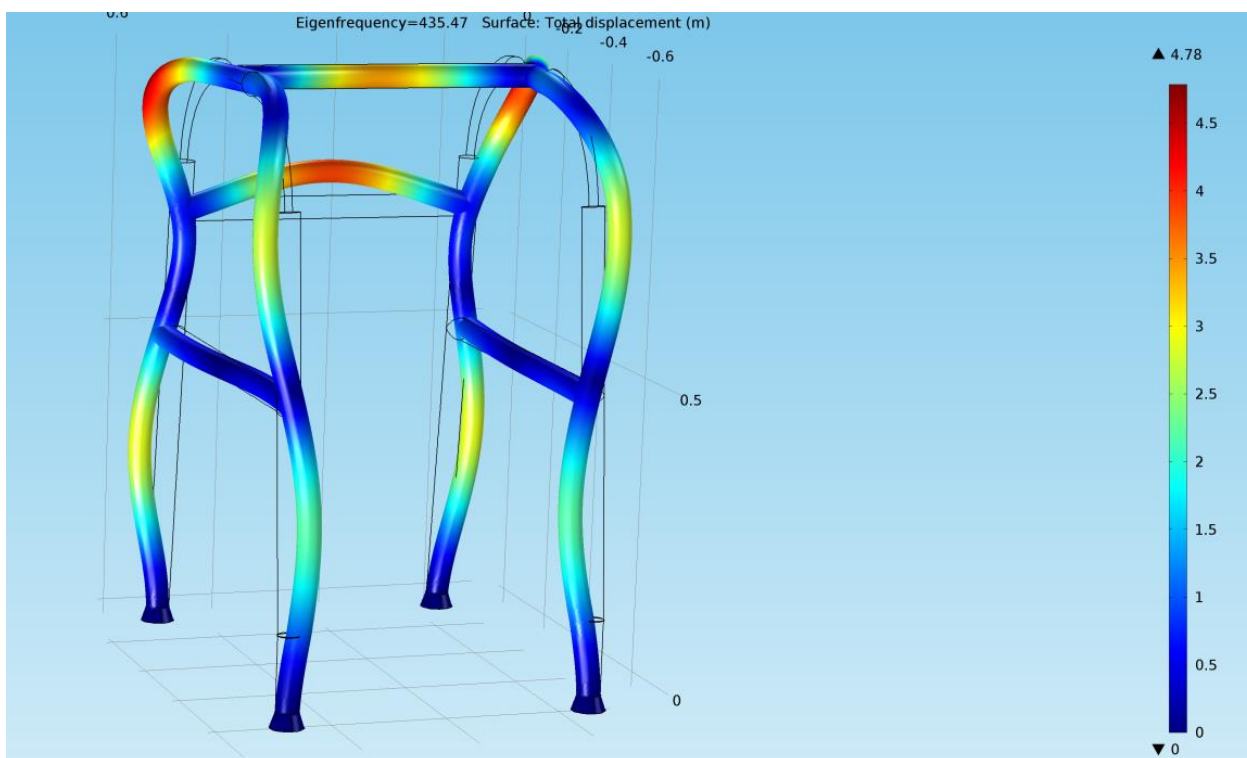
Ponadto została przeprowadzona symulacja ukazująca 3 wybrane częstości drgań własnych aluminium, przy których materiał wpada w rezonans.



Rys.3.12. Zachowanie modelu przy częstotliwości 30,962 Hz



Rys.3.13. Zachowanie modelu przy częstotliwości 238,3 Hz



Rys.3.14. Zachowanie modelu przy częstotliwości 435,47 Hz

3.2. Model stalowy

Po przeprowadzeniu analizy dla stopu aluminium, powtórzono badanie zmieniając jedynie materiał na stal 4340, w celu ich późniejszego porównania. Warunki brzegowe, miejsce przyłożenia sił oraz ich wartości pozostały bez zmian.

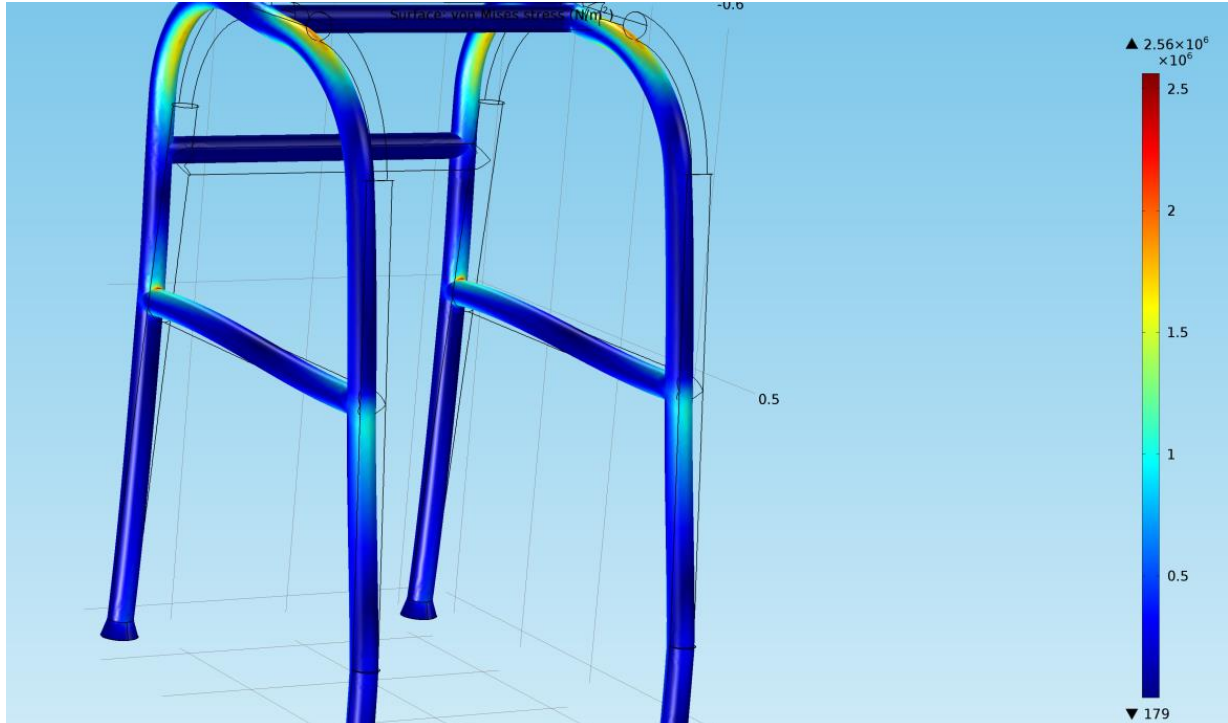
»	Property	Name	Value	Unit
✓	Density	rho	rho(T[1/K])[kg/...	kg/m ³
✓	Young's modulus	E	E(T[1/K])[Pa]	Pa
✓	Poisson's ratio	nu	nu(T[1/K])	1
	dL	dL	(dL(T[1/K])-dL(...	
	CTE	CTE	CTE(T[1/K])[1/K]	1/K
	Thermal conductivity	k	k_solid_normali...	W/(m·K)
	Resistivity	res	res(T[1/K])[oh...	Ω·m
	Coefficient of thermal expansion	alpha	alpha(T[1/K])[1...	1/K
	mu	mu	mu(T[1/K])[Pa]	Pa
	Electrical conductivity	sigma	sigma(T[1/K])[S...	S/m
	TD	TD	TD(T[1/K])[m^...	m ² /s
	kappa	kappa	kappa(T[1/K])[P...	Pa

Rys.3.15. Właściwości wybranego materiału – Stal 4340

Prezentacja uzyskanych wyników dla stali:

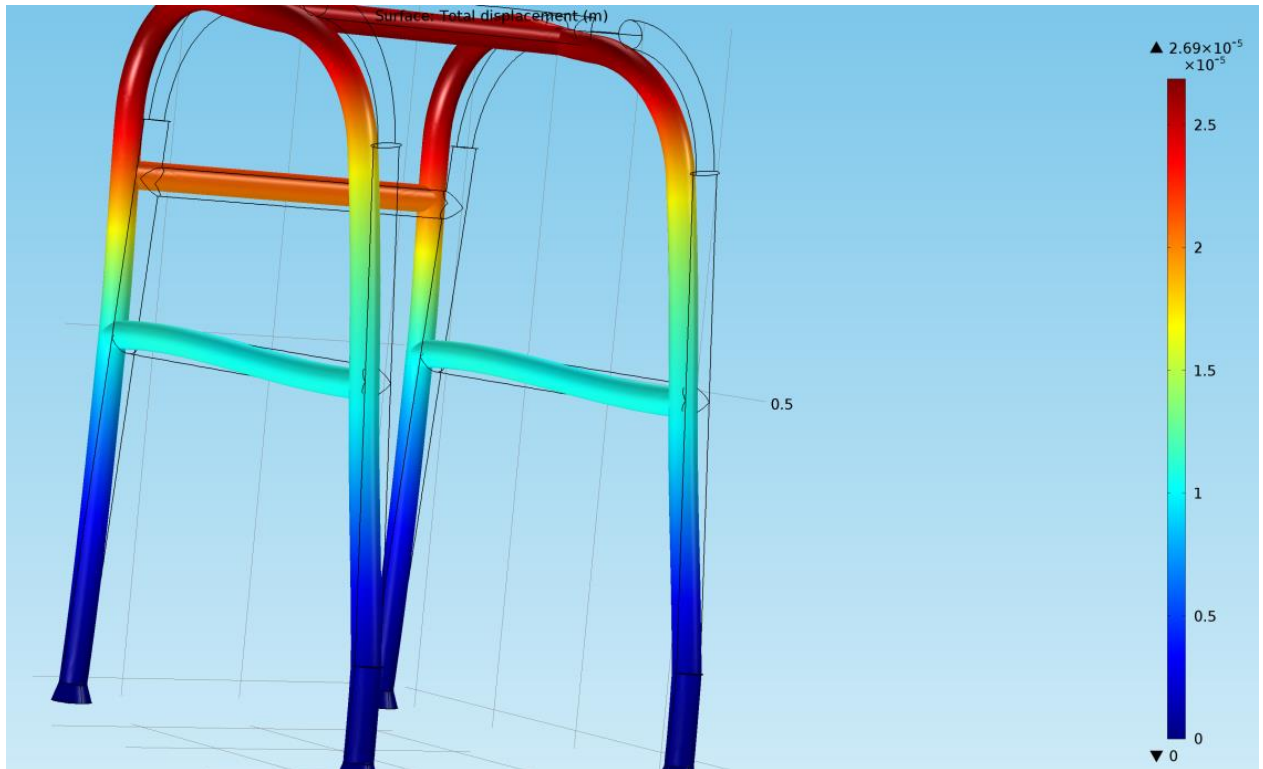
Po przyłożeniu siły nr 1

- Naprężenia von Misesa



Rys.3.16. Naprężenia zredukowane von Misesa przy sile nr 1

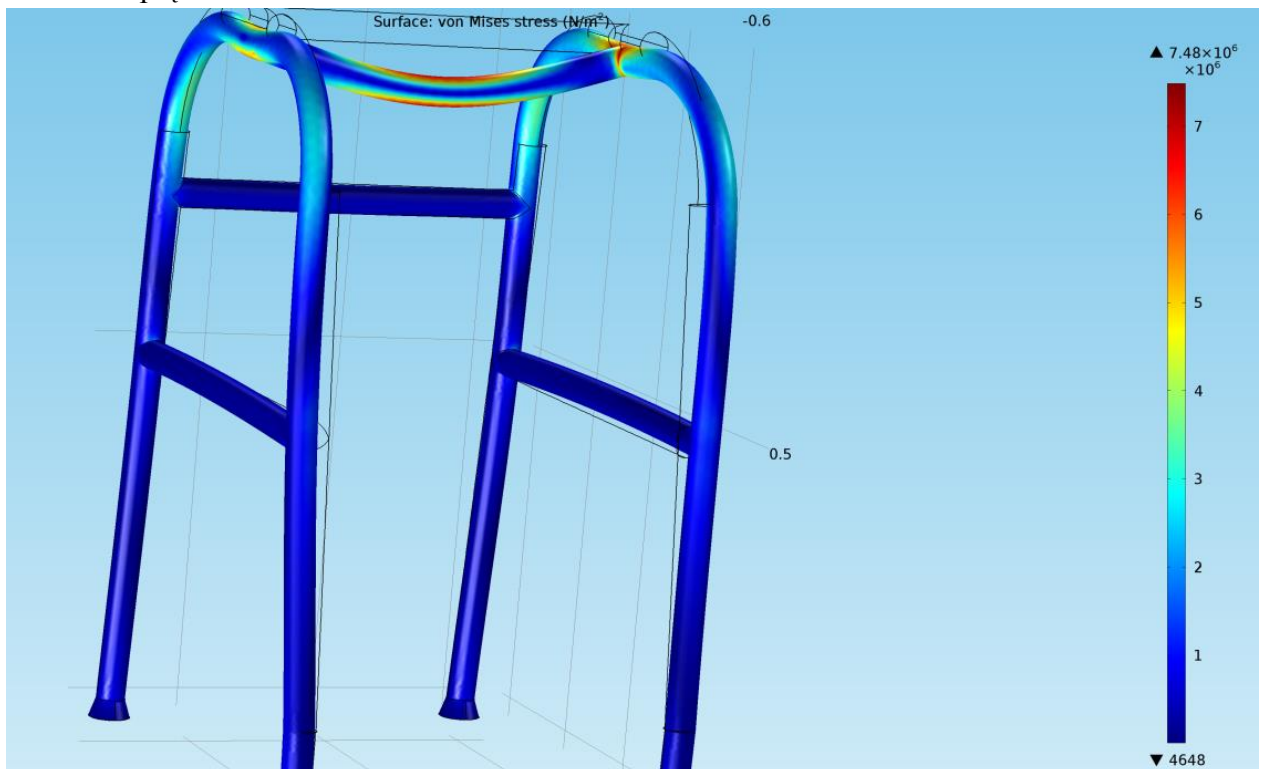
- Całkowite przemieszczenie



Rys.3.17. Całkowite przemieszczenie przy sile nr 1

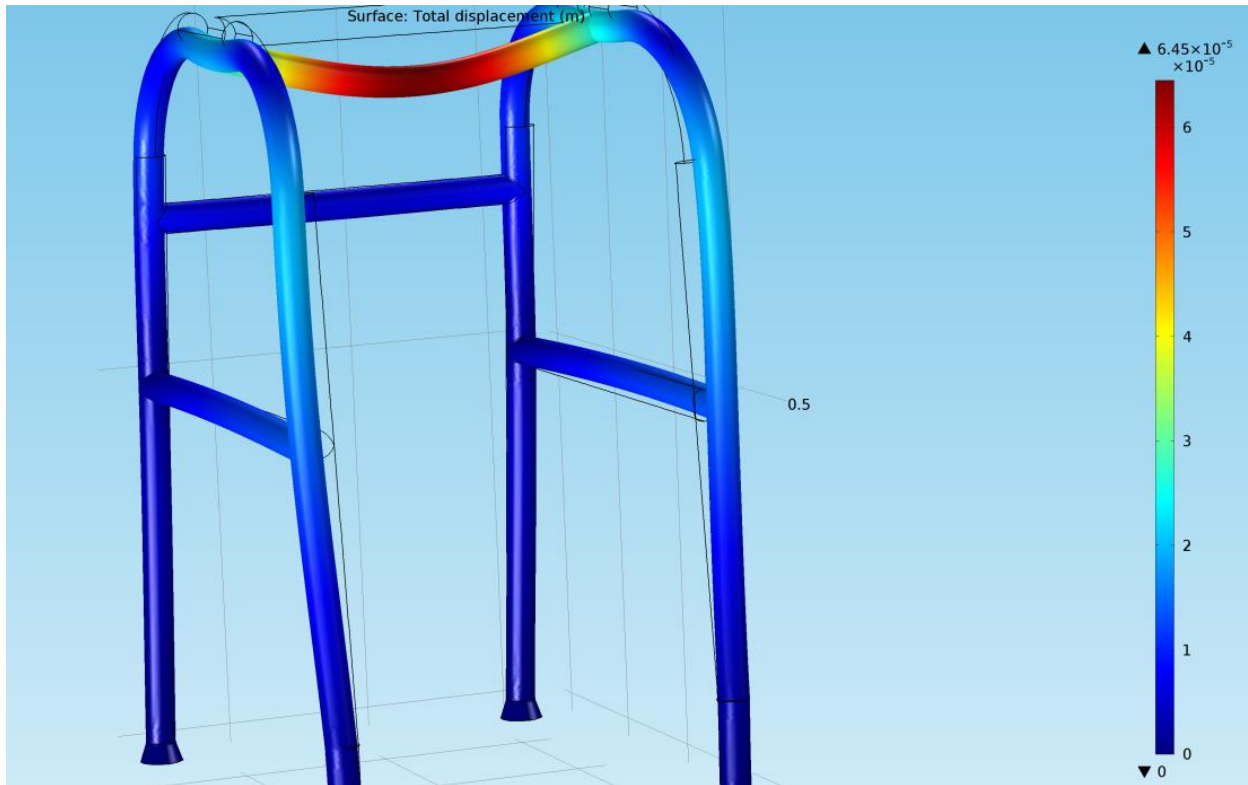
Po przyłożeniu siły nr 2

- Naprężenia von Misesa



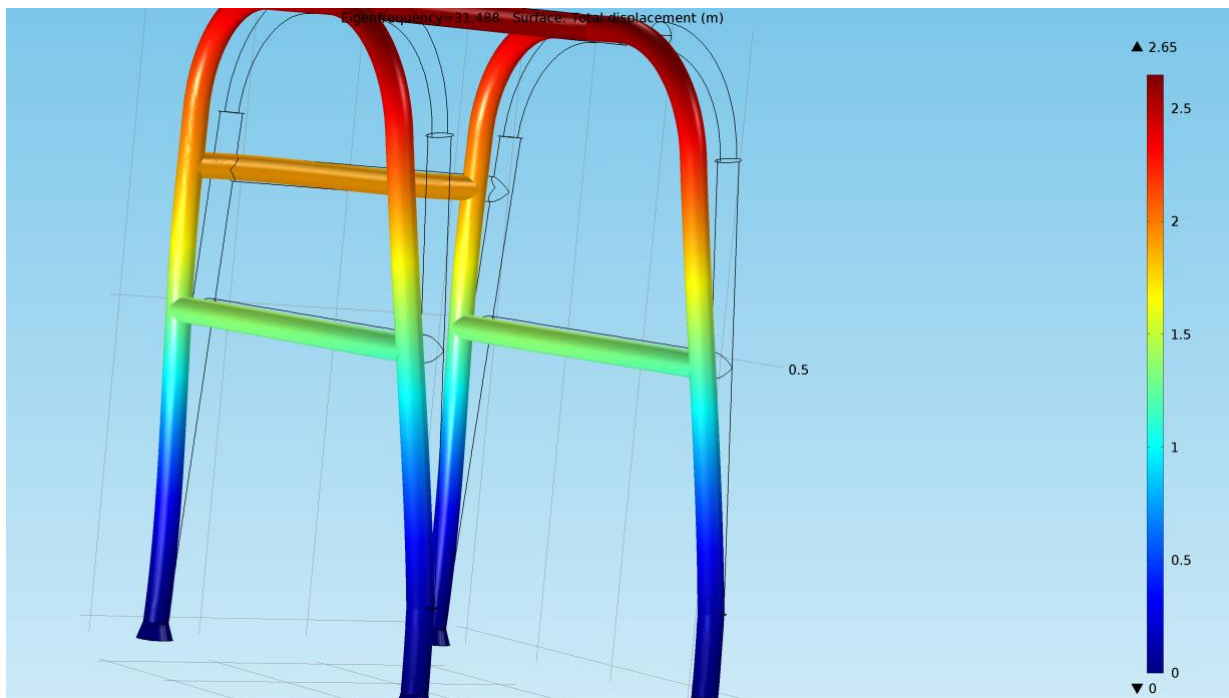
Rys.3.18. Naprężenia zredukowane von Misesa przy sile nr 2

- Całkowite przemieszczenie

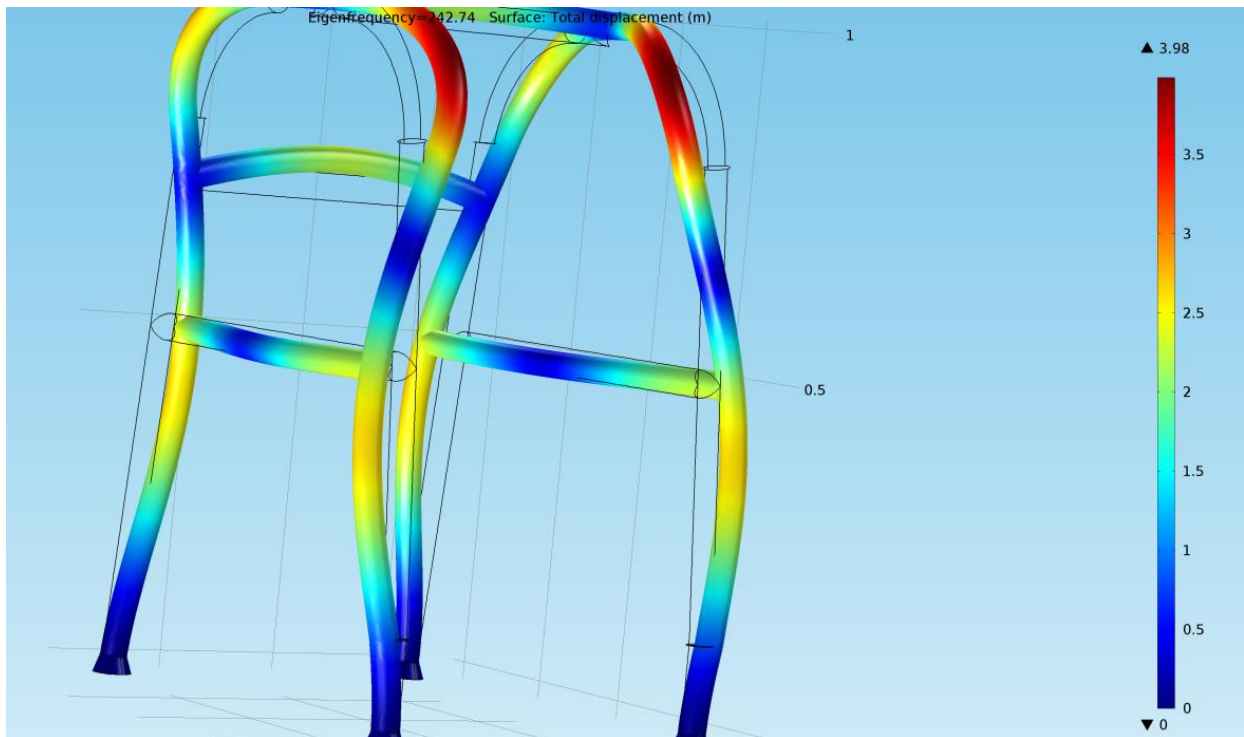


Rys.3.19. Całkowite przemieszczenie przy sile nr 2

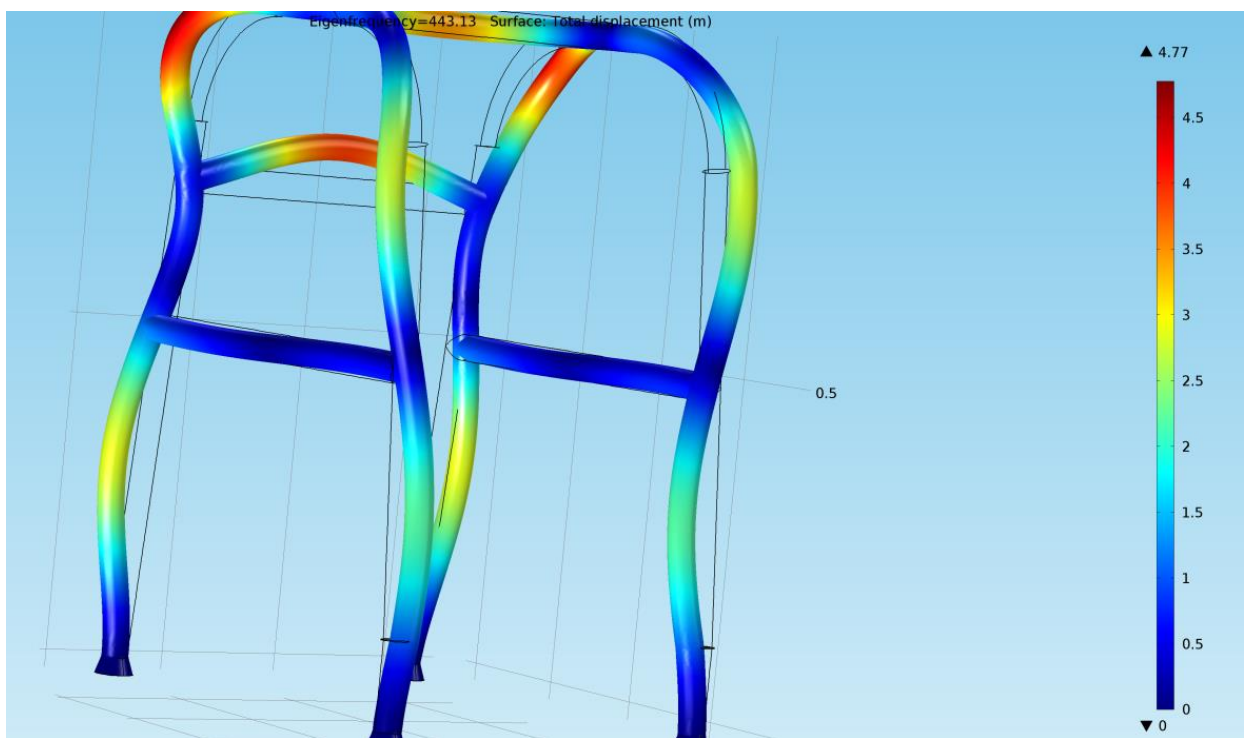
- Sprawdzenie wartości częstości własnych materiału:



Rys.3.20. Zachowanie modelu przy częstotliwości 31,488 Hz



Rys.3.21. Zachowanie modelu przy częstotliwości 242,74 Hz



Rys.3.22. Zachowanie modelu przy częstotliwości 433,13 Hz

4. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych symulacji wytrzymałościowych można stwierdzić, iż zarówno stop aluminium 7075, jak i stal 4340 nadają się jako materiał do produkcji analizowanego modelu balkonika rehabilitacyjnego dla pacjenta o maksymalnej masie 100kg.

Maksymalne wartości naprężeń były identyczne dla obu materiałów. Dla pierwszego przypadku, gdy przyłożona siła została rozłożona na dwa uchwyty, naprężenia maksymalne wyniosły około 2,6 MPa. Natomiast w przypadku, gdy pacjent opiera obie ręce na belce łączącej uchwyty, wyniosły około 7,5 MPa. Żadna z tych wartości nie przekracza granicy plastyczności materiałów, które wynoszą odpowiednio: 390-470 MPa dla aluminium oraz 1050 MPa dla stali.

Przemieszczenia uzyskane po przeprowadzonej symulacji osiągnęły niewielkie wartości. Największe przemieszczenie balkonika wykonanego z aluminium wystąpiło, gdy siła przyłożona została do środkowej belki modelu i wyniosło około 0,19 mm. Natomiast przyłożenie siły do uchwytów, spowodowało wystąpienie maksymalnego przemieszczenia o wartości około 0,08 mm. Stalowy balkonik odkształcił się w mniejszym stopniu, dla którego maksymalne przemieszczenia wyniosły – około 0,03 mm w pierwszym przypadku oraz około 0,06 mm w drugim.

Symulacja częstości drgań własnych modelu aluminiowego i stalowego miała na celu wizualizację zachowania modelu przy określonych częstotliwościach, w których balkoniki wpadają w rezonans. Wartości te różnią się w zależności od badanego materiału, choć są do siebie zbliżone. Częstości, przy których występuje omawiane zjawisko nie są jednak możliwe do osiągnięcia podczas standardowego użytkowania sprzętu, czyli nie występuje z tego powodu ryzyko deformacji lub zniszczenia produktu.

Wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych dla obu materiałów wypadły bardzo podobnie, a wartości uzyskane pozwalają stwierdzić, iż oba materiały spełnią warunki wytrzymałościowe badanego sprzętu rehabilitacyjnego generowane podczas jego eksploatacji. Przy doborze tworzywa na balkoniki rehabilitacyjne należy jednak zwrócić również uwagę na końcową masę produktu. W związku z tym, lepszym wyborem jest aluminium, które posiada około trzykrotnie mniejszą gęstość niż stal, co bezpośrednio przekłada się na niższą masę finalną sprzętu i zapewnia wyższy komfort użytkowania badanej pomocy rehabilitacyjnej.

5. Bibliografia

1. Katalog sklepu medycznego ze sprzętem rehabilitacyjnym, strona internetowa: www.pomocedlaseniora.pl [dostęp: 07.06.2017]
2. Krótki wstęp do zastosowania Metody Elementów Skończonych do numerycznych obliczeń inżynierskich, strona internetowa: www.knse.pl/publikacje/65.pdf [dostęp: 07.06.2017]
3. Strona producenta, firma AlfaTech Quality Steel, strona internetowa: www.alfa-tech.com.pl/stale-konstrukcyjne-stopowe-stal-do-ulepszania-cieplnego [dostęp 07.06.2017]
4. Strona producenta, firma DacPol, strona internetowa: www.dacpol.eu/pl/druzy/product/wlasciwosci-fizyczne-miedzi-i-aluminium [dostęp 07.06.2017]