



# POLITECHNIKA POZNAŃSKA

## Projekt Laboratorium MES

---

WBMiZ, MiBM

Sem 5, rok III

2018/2019

**Prowadzący:**

dr hab. inż. Tomasz Strępek prof. PP

## **Spis treści:**

1. Cel projektu
2. Właściwości materiałowe
3. Analiza termiczno-wytrzymałościowa pojedynczych elementów
4. Analiza wytrzymałościowa pojedynczych elementów
5. Analiza wytrzymałościowa dla złożeń elementów
6. Porównanie wyników wytrzymałościowych z analizą Solidworks Simulation
7. Podsumowanie

## 1. Cel projektu

Przedmiotem projektu jest analiza wytrzymałościowa mocowania dyferencjału LSD. Analiza była podstawą do zaprojektowania mocowania, które w dalszych krokach zostanie wykonane oraz zamontowane w bolidzie klasy Formuły Student.

W pierwszej kolejności zostało przebadane samo mocowanie, jako osobna część. Była to analiza termiczno-wytrzymałościowa. Kolejnym etapem było zasymulowanie wyłącznie obciążenia mechanicznego na mocowanie.

Dalszym etapem projektu było stworzenie złożenia mocowania, wraz z wałkiem symulującym dyferencjał oraz pozostałymi mocowaniami do stalowej ramy przestrzennej. Przeprowadzane badanie dla złożenia cadowskiego odbyło się wyłącznie dla obciążenia mechanicznego.

Zadawane obciążenie było odzwierciedleniem rzeczywistych sił działających na mocowanie dyferencjału. Temperatura przyłożona do mocowania była efektem "grzania" się łożyska.

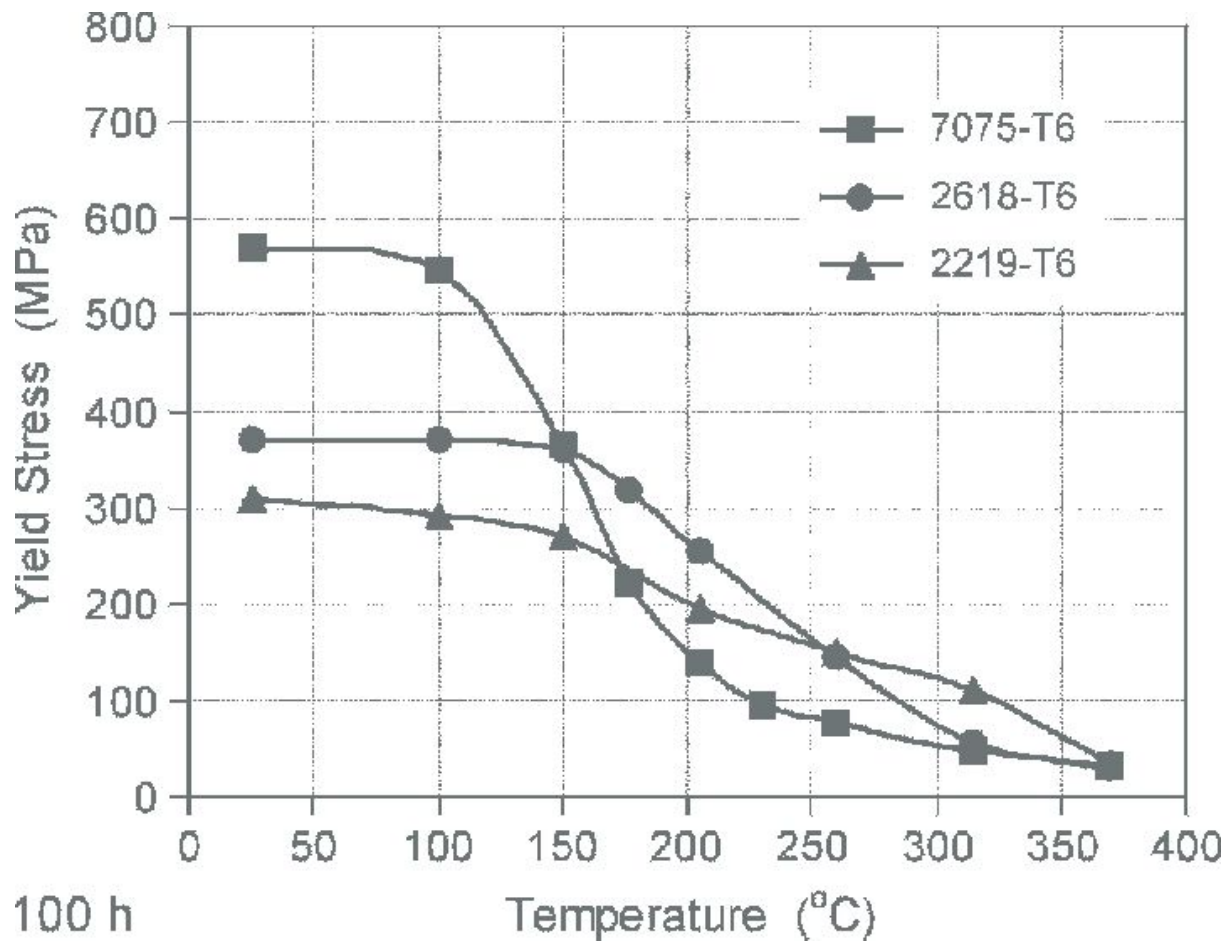
W przypadku wybranego materiału na mocowanie dyferencjału, którym jest aluminium 7075 T6 (Fortal), wpływ temperatury jest znaczący dla jego wytrzymałości.

## 2. Właściwości materiałowe

Stop - stan <b>7075 T6</b>	Moduł sprężystości E <b>72000 [MPa]</b>	Moduł sprężystości poprzecznej G <b>27100 [MPa]</b>	Liczba Poissona <b>0.33</b>	Temperatura krzepnięcia <b>475 [°C]</b>	Temperatura płynięcia <b>635 [°C]</b>	
Ciepło właściwe <b>862</b> [J/kgK]	Współczynnik rozszerzalności cieplnej <b>23.5 [µm/mK]</b>	Gęstość <b>2810 [kg/cm<sup>3</sup>]</b>	Opór właściwy <b>52 [nWm]</b>	Przewodność cieplna <b>134 [W/mK]</b>	Przewodność elektryczna <b>33 [%IACS]</b>	
Stop - stan <b>7075 T651/T62</b>		Grubość <b>25 - 50 [mm]</b>		Wytrzymałość na rozciąganie Rm min. <b>530 [MPa]</b>	Wytrzymałość na rozciąganie Rm max. <b>- [MPa]</b>	
Granica plastyczności Rp02 min. <b>460 [MPa]</b>	Granica plastyczności Rp02 max. <b>- [MPa]</b>	Wydłużenie min. A50mm <b>- [%]</b>	Wydłużenie min. A <b>5 [%]</b>	Promień gięcia 180° <b>-</b>	Promień gięcia 90° <b>-</b>	Twardość w skali Brinella <b>158 [HB]</b>

Aluminium 7075 charakteryzuje się wytrzymałością na rozciąganie na poziomie 530 MPa oraz wysoką twardością (w stosunku do innych stopów bazujących na aluminium). Przy gęstości mniejszej o 2,8 raza od stali, właściwości wytrzymałościowe są porównywalne.

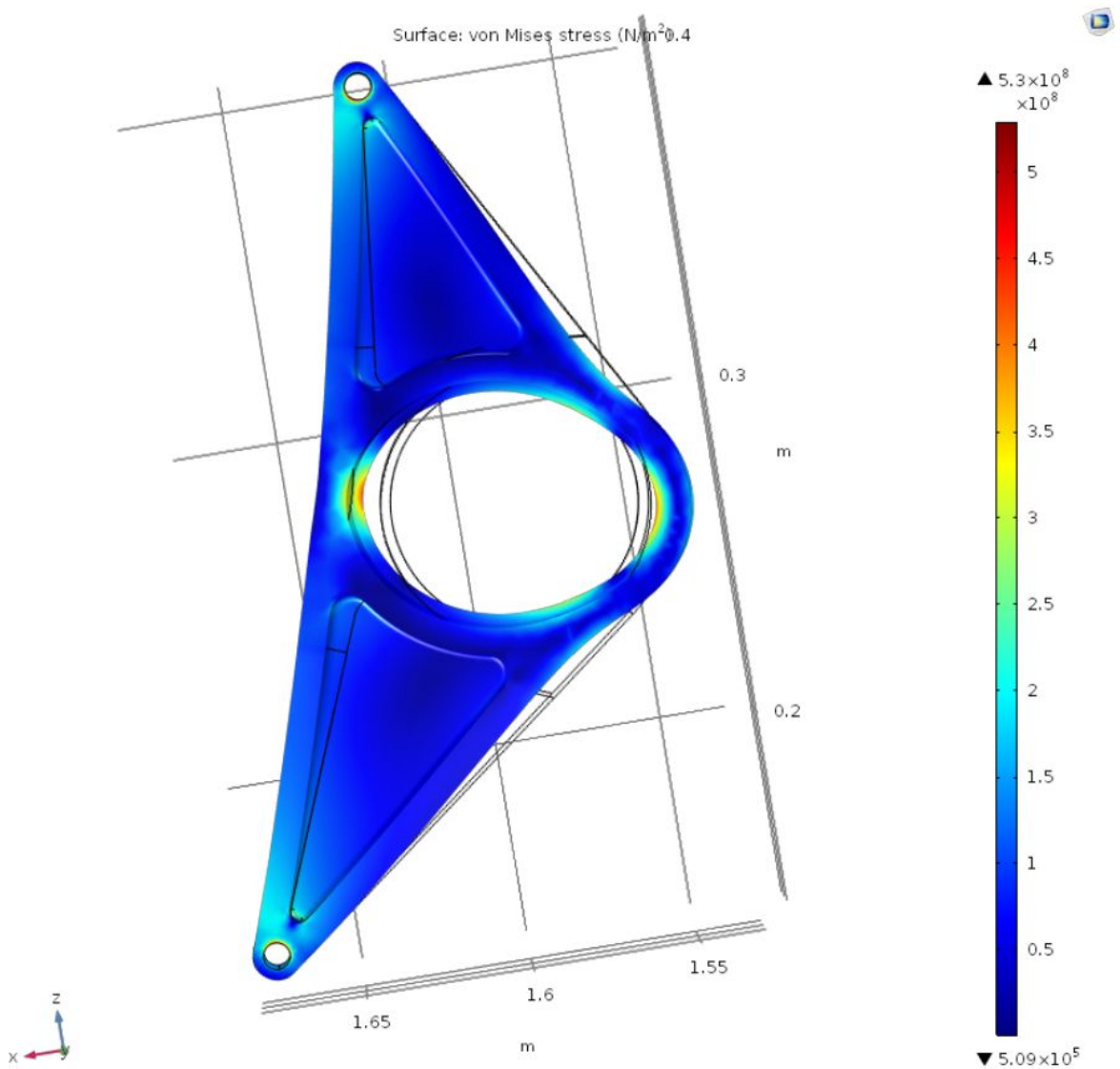
Na przedstawionym poniżej wykresie można zauważyć, że wytrzymałość aluminium 7075 T6 w dużej mierze zależy od temperatury. Przekroczenie temperatury 100°C powoduje gwałtowny spadek wytrzymałości stopu, więc zastosowanie tego rodzaju aluminium musi zostać poprzedzone badaniem panującej temperatury w miejscu zastosowania.



### 3. Analiza termiczno-wytrzymałościowa pojedynczych elementów

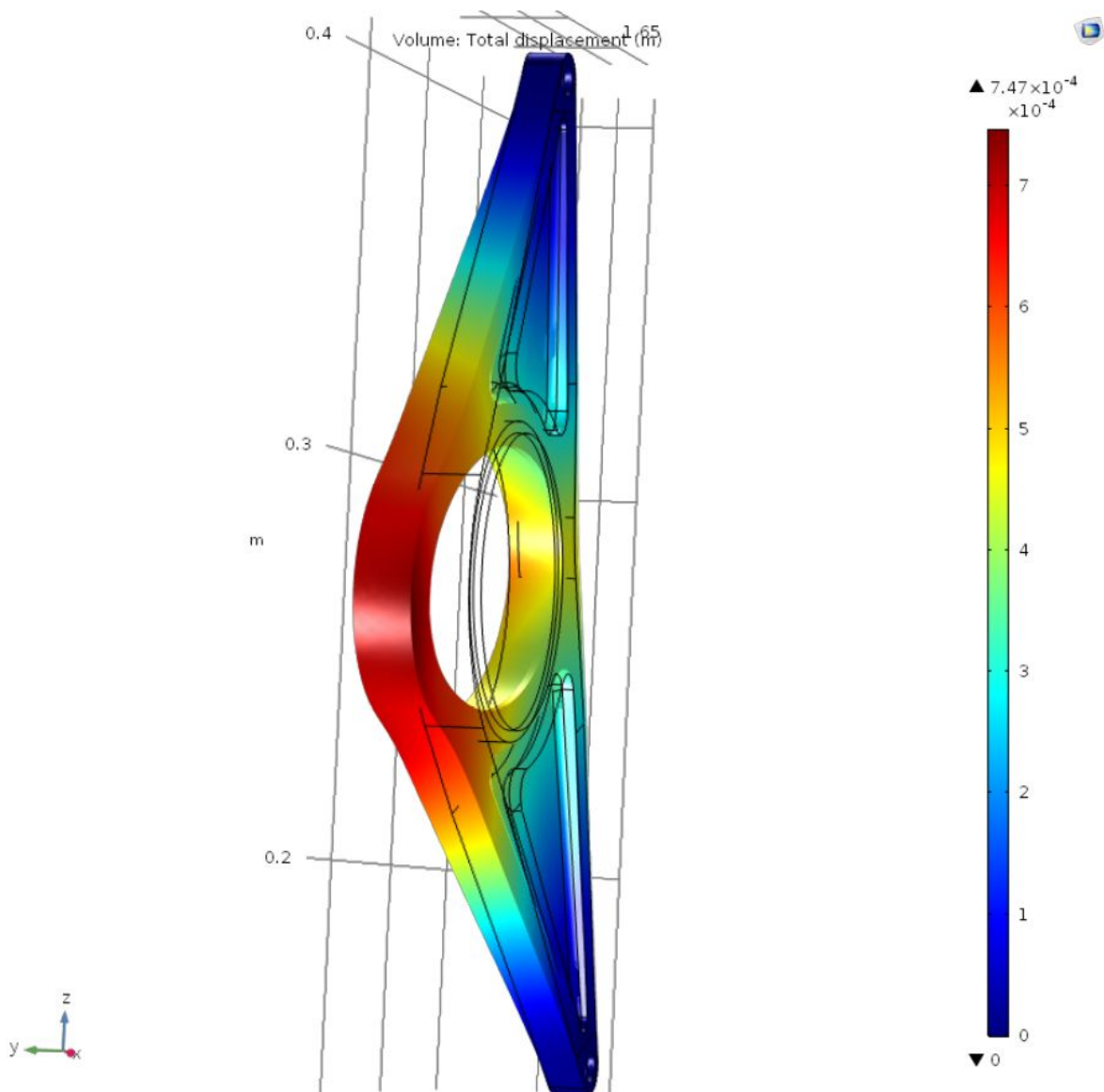
Pierwszym badaniem było przeprowadzenie analizy naprężeń, przemieszczeń oraz rozkład temperatur w lewym mocowaniu dyferencjału, przy użyciu modułu naprężeń statycznych oraz naprężeń termicznych. W największym mocowaniu znajduje się łożysko, które w warunkach eksploatacji może się nagrzewać pod wpływem obrotu dyferencjału. Model poddany analizie został zdefiniowany tak, aby na wewnętrzną ściankę działała temperatura 80°C (353K), podczas gdy siła działająca wzdłuż osi Y ścisnęła mocowanie z siłą 12kN.

Naprężenia:



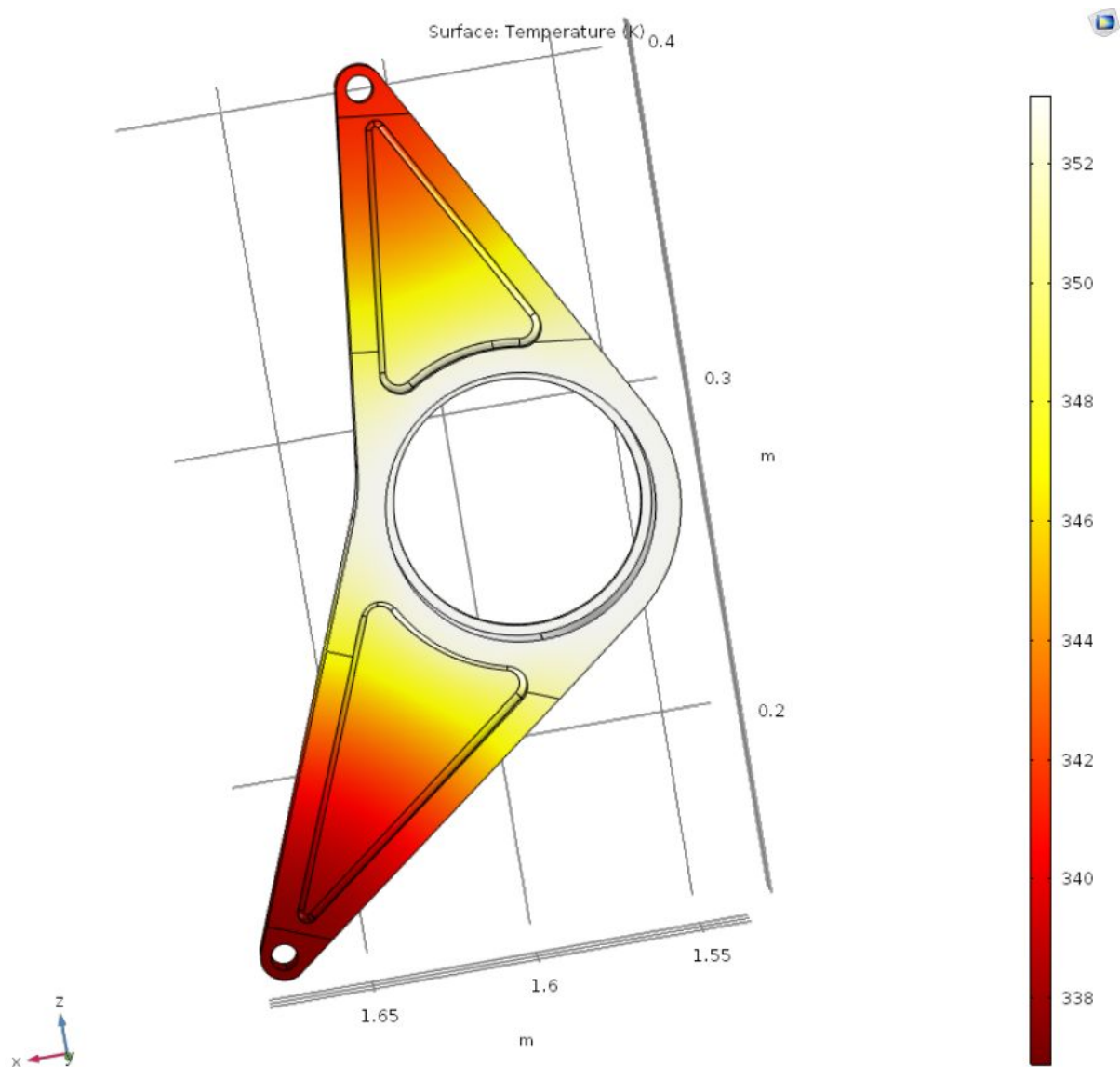
Największe naprężenia wyniosły  $5,3 \times 10^8$  N/m<sup>2</sup> (530 Mpa), co jest wg producenta naprężeniem granicznym materiału na rozciąganie.

Przemieszczenia:



Maksymalne przemieszczenia wyniosły 0,747 mm, co w takim układzie jest całkowicie akceptowalne. Przemieszczenie boczne wynikało z działania siły działającej nieosiowo na ścianę, gdyż z jednej strony mocowanie ma kołnierz, na którym opiera się łożysko, na który siła nie działa.

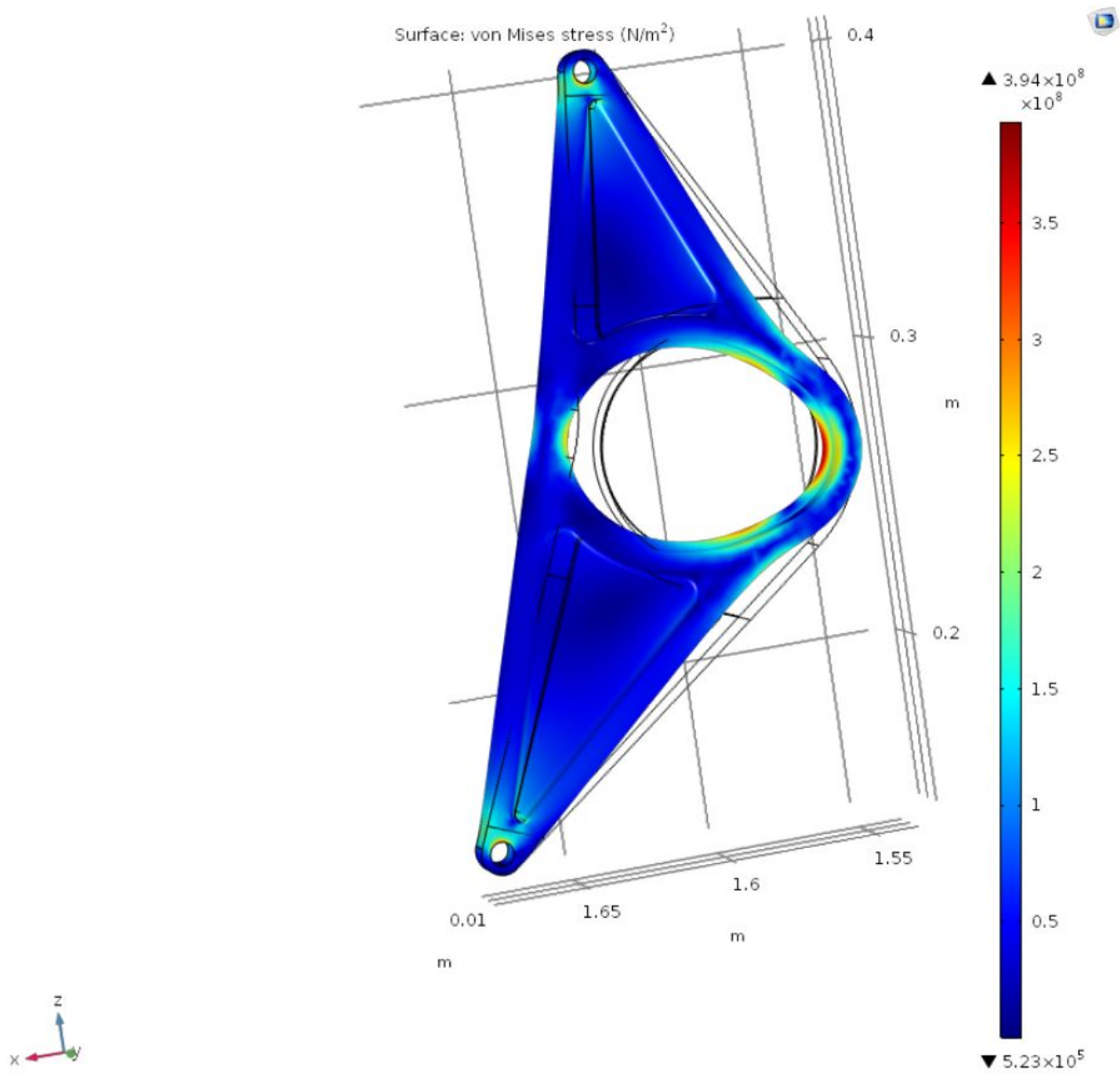
Rozkład temperatur na mocowaniu:



Temperatury rozkładały się od 80°C (352K) przy otworze łożyska, do 65°C (338K) na skrajnych krańcach przy sworzniach.

To samo mocowanie, obciążone jedynie naprężeniem statycznym taką samą siłą 12kN.

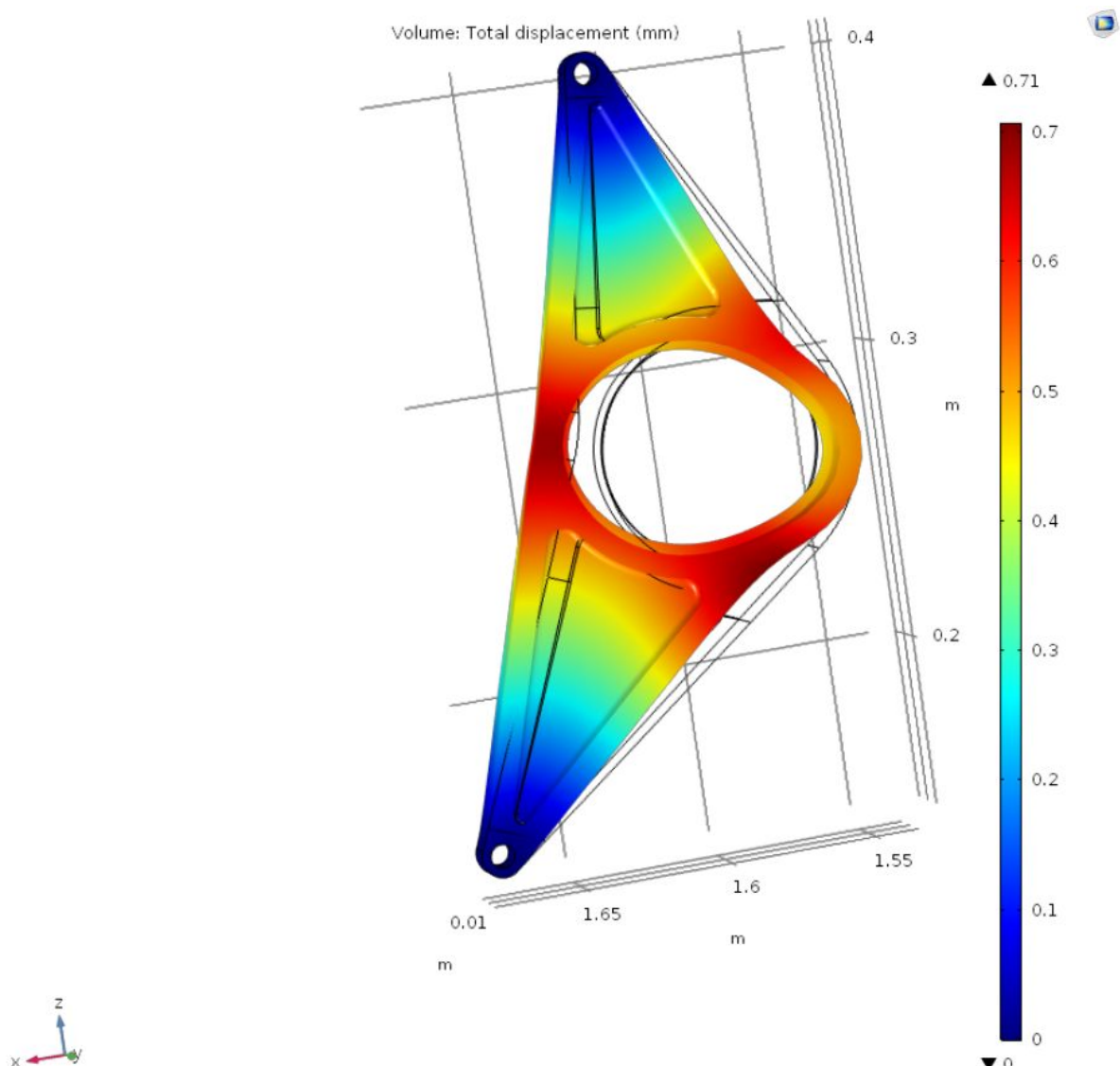
Naprężenia:



Analiza statyczna wykazała największe naprężenia na poziomie 394 Mpa, które mieszczą się w granicy plastyczności wynoszącej 460 Mpa.



Przemieszczenia:



W tym przypadku maksymalne przemieszczenia wyniosła 0,71 mm.

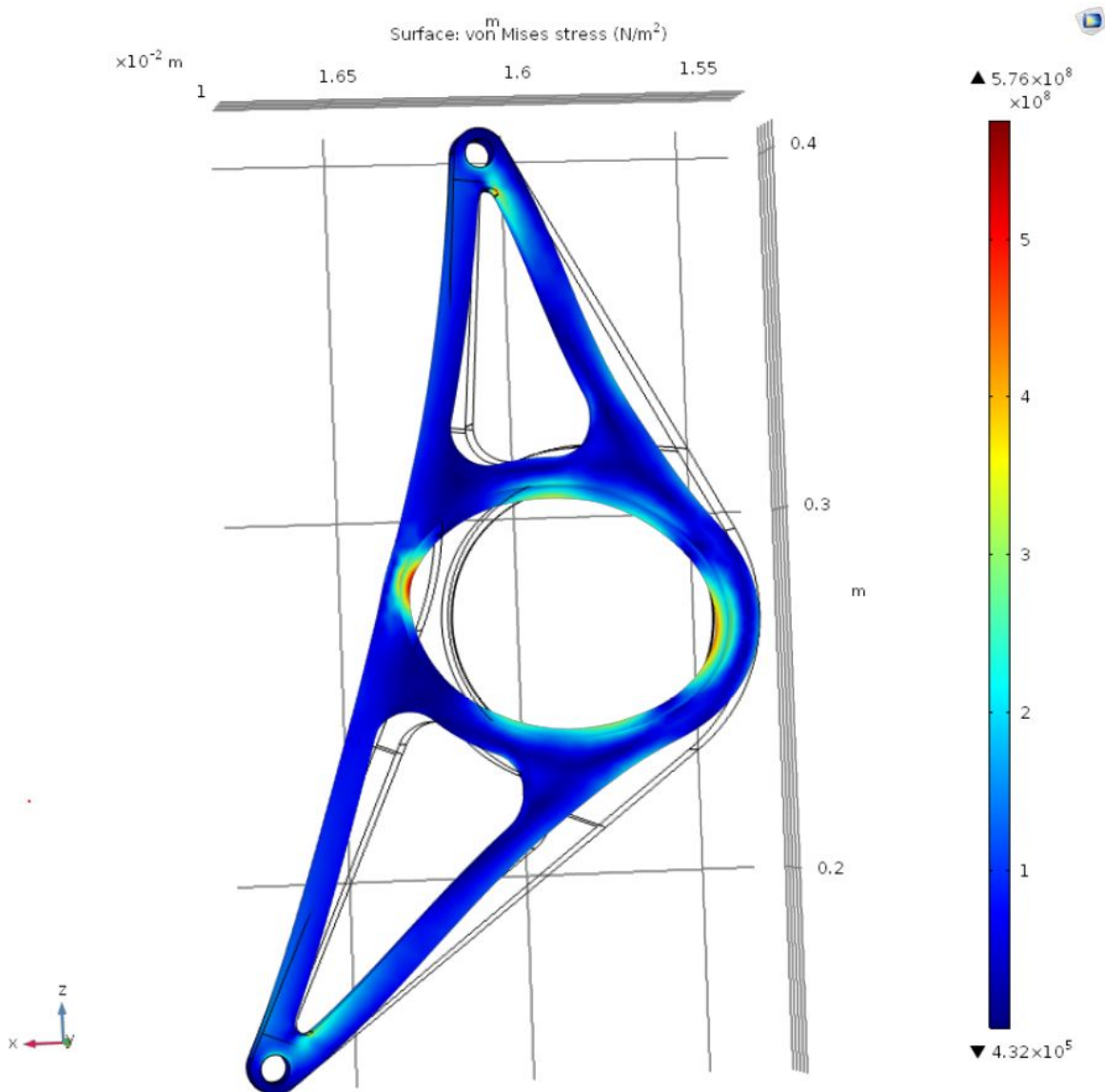
Porównując wyniki tych dwóch analiz wynika, że dodanie analizy termicznej uzyskujemy wyższe wartości naprężeń i przemieszczeń. Różnica naprężeń to 530 Mpa a 394 Mpa. W przypadku przemieszczeń różnice są mniejsze - 0,747 mm do 0,71 mm.

Aby odpowiedzieć sobie na pytanie dlaczego tak się dzieje, należy spojrzeć na wykres przedstawiający wytrzymałość materiału w funkcji temperatury. Wynika z niego, że aluminium 7075 T6 już od temperatury powyżej ok. 75°C traci na wytrzymałości. Drugą kwestią jest wytrzymałość materiału na rozciąganie podane przez producenta, która jest zaniżona w porównaniu z danymi biblioteki programu. Producenci stosują takie praktyki

dodając pewien współczynnik bezpieczeństwa ze względu na odpowiedzialność za swój certyfikowany produkt.

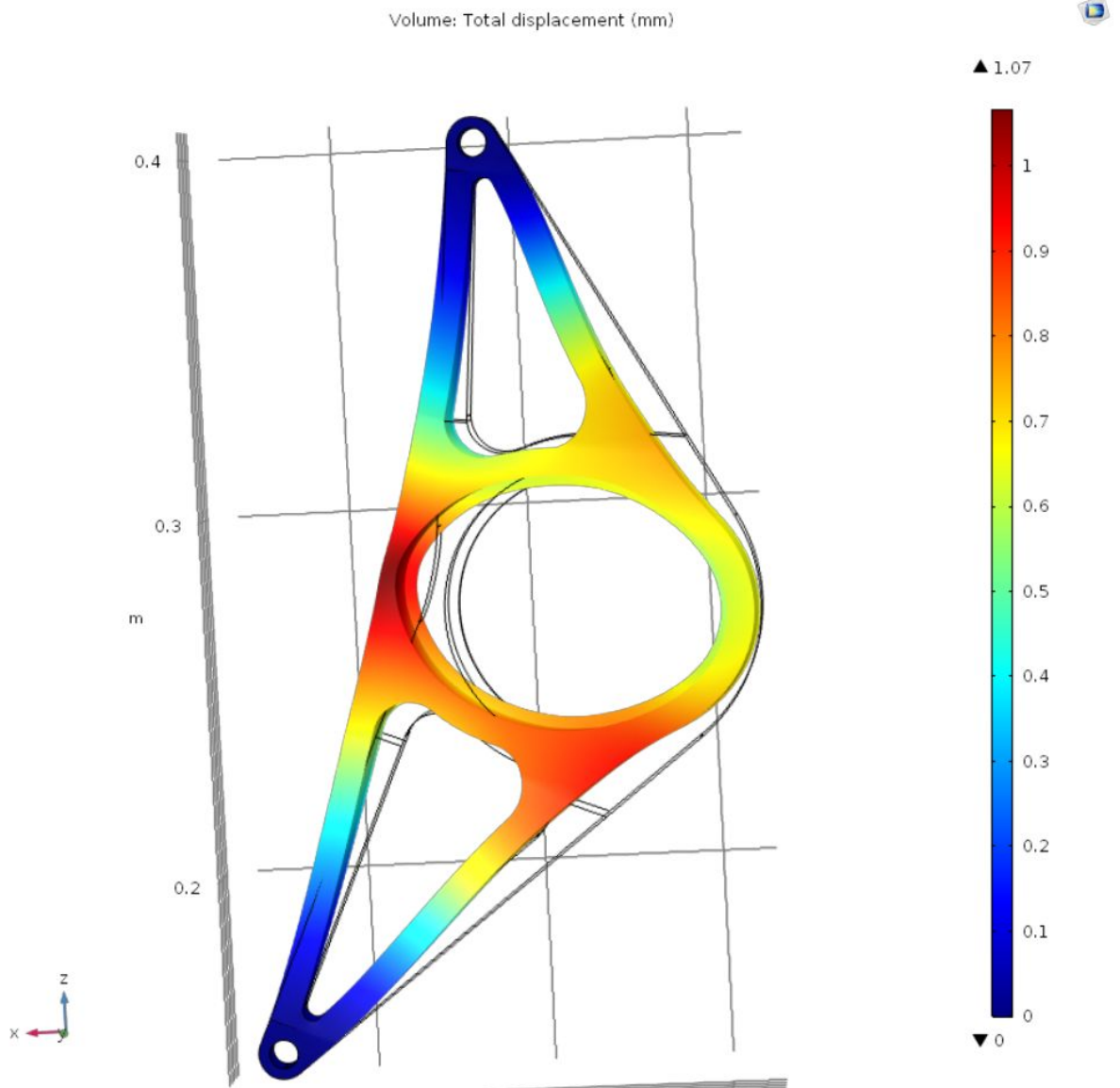
Następnym zagadnieniem było porównanie "domyślnego" mocowania oraz jego odchudzonej wersji, obciążonej taką samą siłą 12kN. "Odchudzenie" polegało na wycięciu na wylot płaszczyzn, które według optymalizacji topologicznej nie przenoszą obciążeń (domyślnie w tym miejscu mocowanie miało 4 mm grubości).

Naprężenia dla odchudzonej wersji:



Naprężenia znacząco wzrosły do 576 Mpa.

Przemieszczenia:



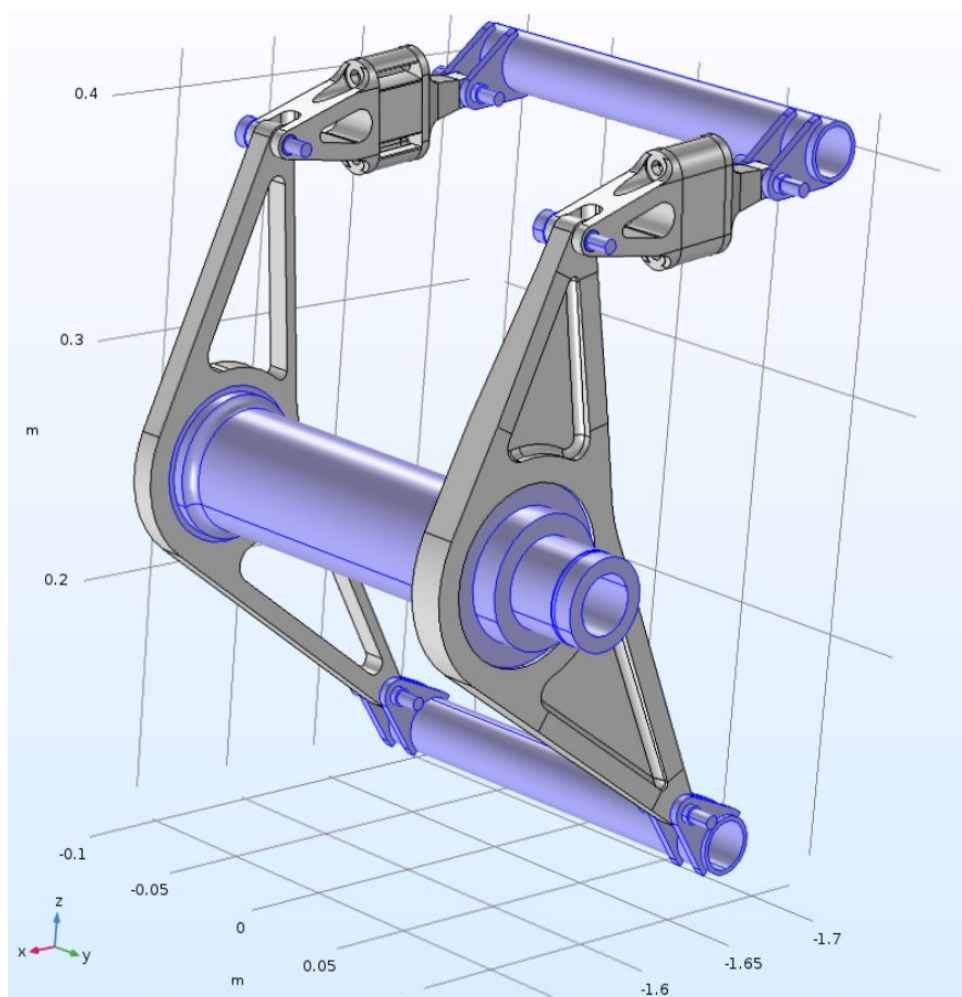
Przemieszczenia wzrosły do 1,07 mm.

Analiza porównawcza dowodzi, że wycięte na wylot powierzchnie, które w teorii nie miały wpływać na wytrzymałość mocowania, podczas analizy nie dają satysfakcjonujących wyników. Ich wytrzymałość jest 25,6 % niższa od wersji pierwotnej przy tylko 20,8 % zmniejszenia masy (295,04 a 233,71 g).

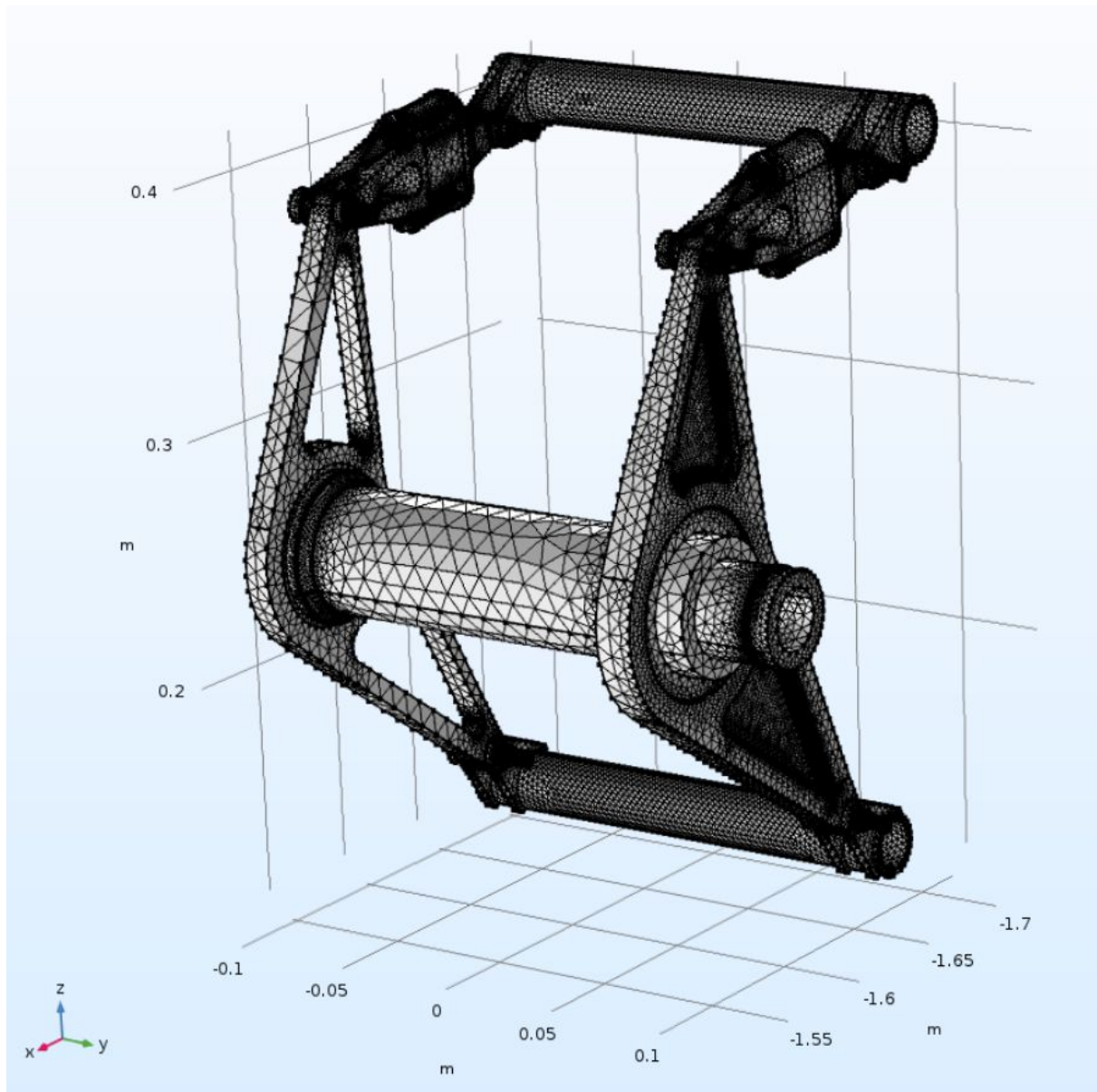
## 5. Analiza wytrzymałościowa dla złożeń elementów

W celu odwzorowania sytuacji panującej w rzeczywistości, analiza została stworzona dla złożeń elementów. Poprzez dodanie pozostałych części, takich jak wał imitujący dyferencjał, mocowań do ramy stalowej, blaszek regulujących napięcie łańcucha oraz łożysk, analiza wytrzymałościowa jest bardziej wiarygodna. Zadane obciążenia są wynikiem obciążeń działających na poszczególne mocowania. Obciążenie działające na złozenie zostało obliczone dla siły działającej poprzez łańcuch na koło zębate, a co dalej idzie na właściwe mocowanie.

Na przedstawionym ilustracji zobrazowano materiał poszczególnych części. Elementy szare wykonane są z aluminium 7075 T6, natomiast na niebiesko zaznaczone są elementy wykonane ze stali 4130.



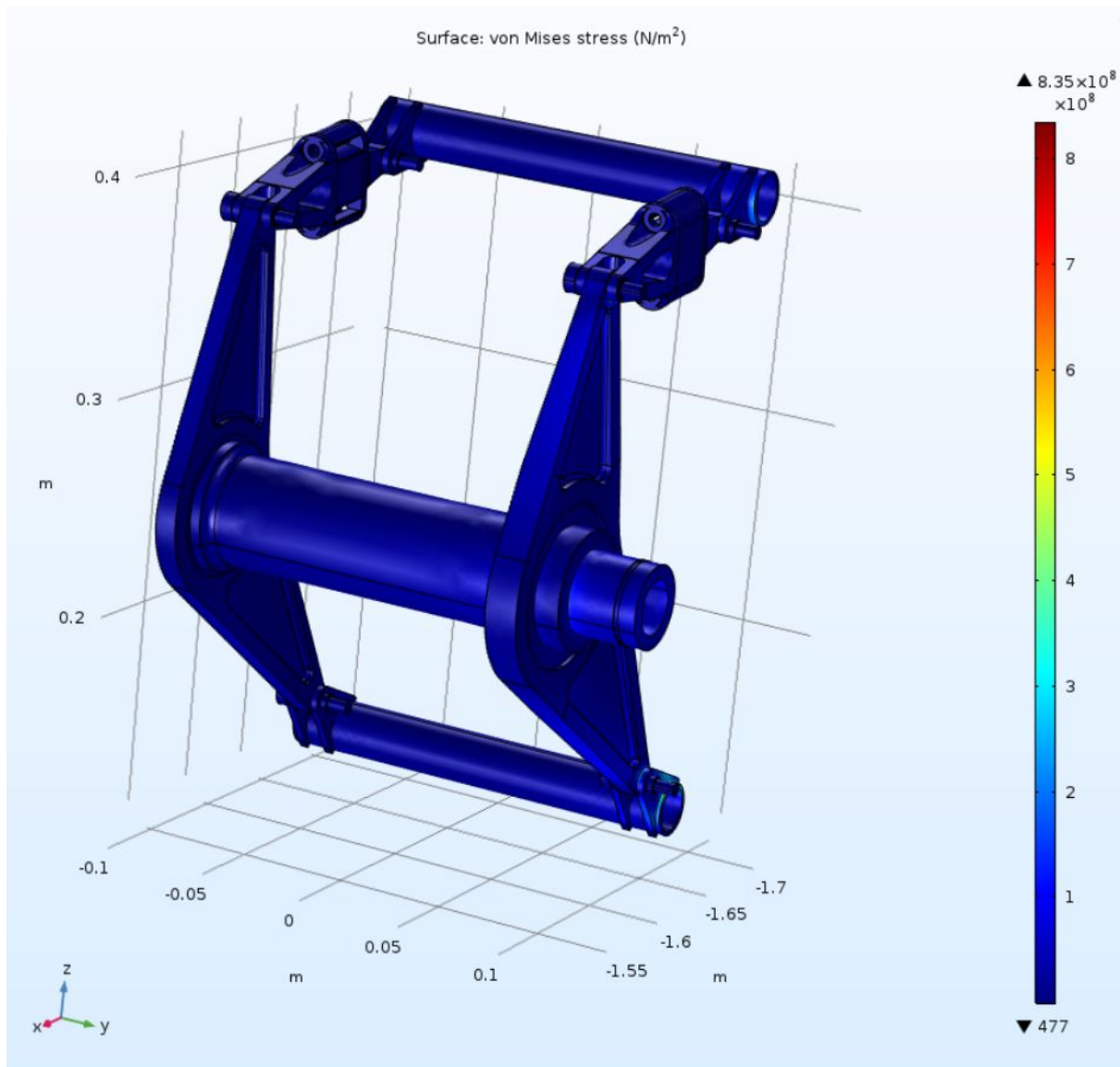
Siatka dla złożenia elementu przedstawia się następująco:



W miejscach krzywizn, śrub, kołków zabezpieczających, siatka została automatycznie zagęszczona w celu uzyskania dokładniejszych wyników.

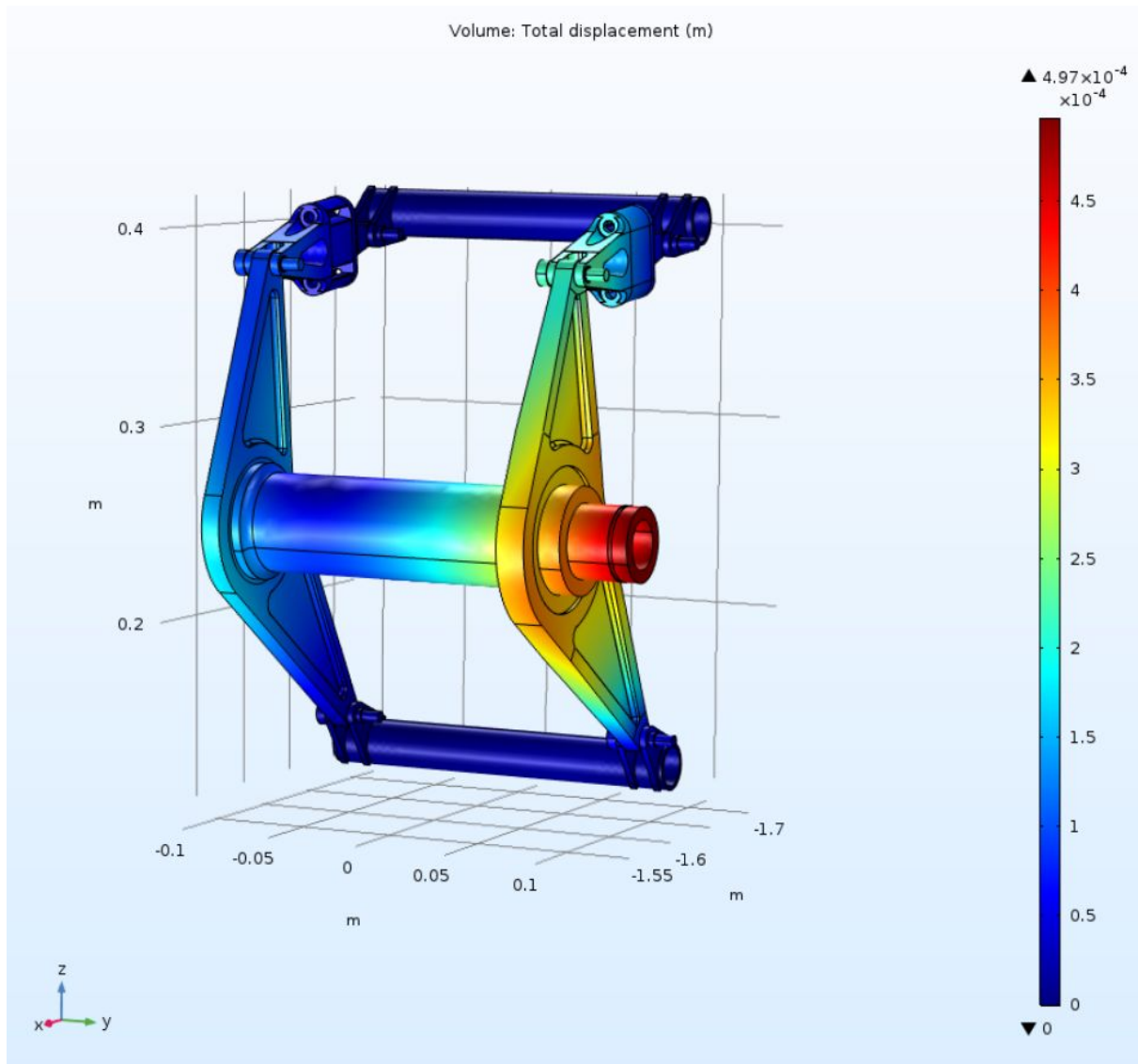
Pierwszej analizie zostało poddane złozenie o “nieodchudzonych” elementach mocowania.

Naprężenia:



Dla przedstawionej analizy można zauważyć, że w żadnej części badanego mocowania nie zostały przekroczone maksymalne naprężenia. Można wyciągnąć wniosek, że w przypadku analizy złozenia wyniki są zadowalające, porównując do analizy wyłącznie samego mocowania.

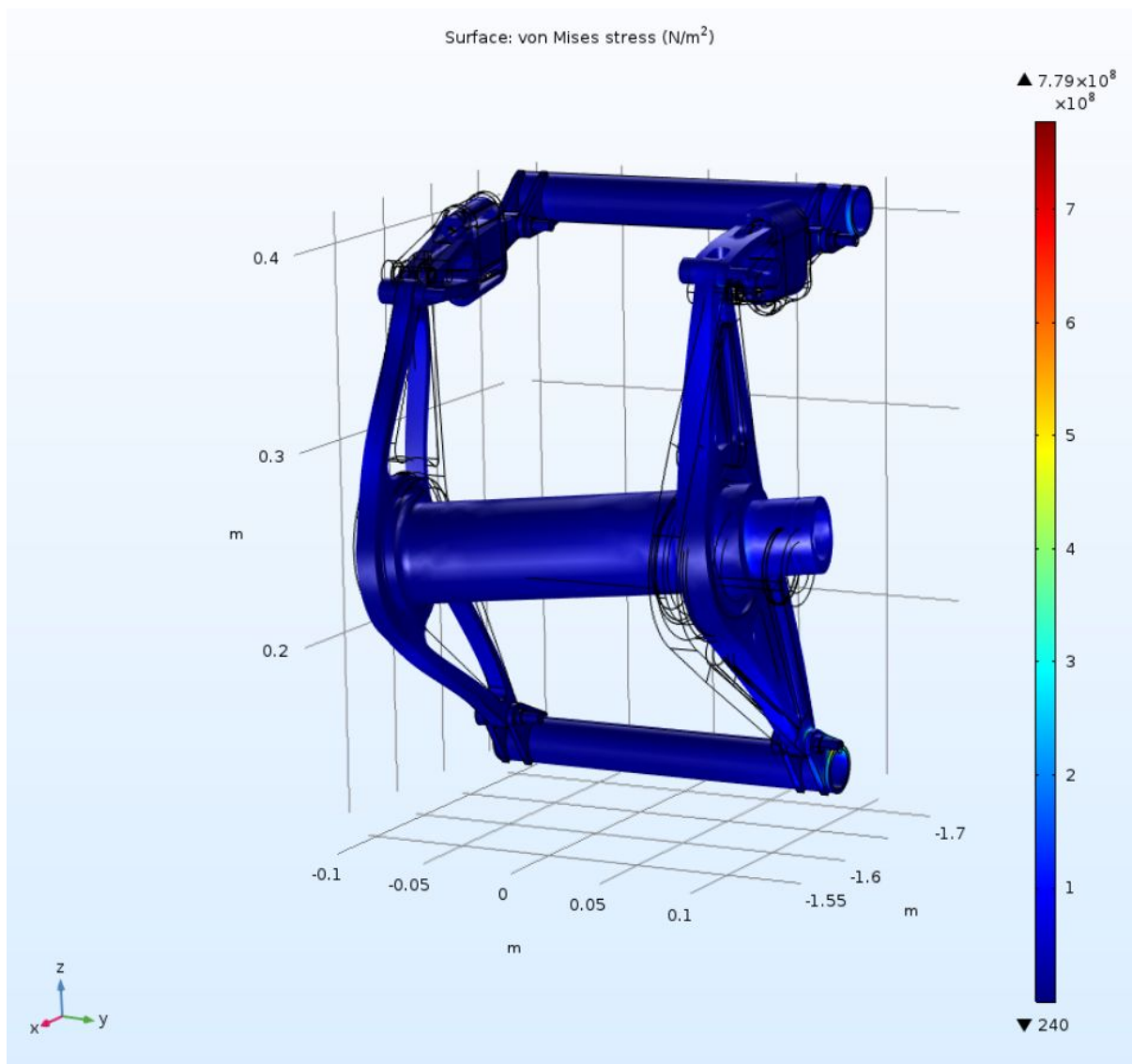
Przemieszczenia:



Przemieszczenia na poziomie 0,4 mm w porównaniu do wymiarów całego złozenia jest wynikiem akceptowalnym, nie wpływającym na poprawne działanie przeniesienia napędu.

Na podstawie wcześniejszej analizy zostało zamodelowane “odchudzone” mocowanie. Dalszym krokiem była analiza taka sama, jak w przypadku mocowania z cięższymi elementami mocującymi.

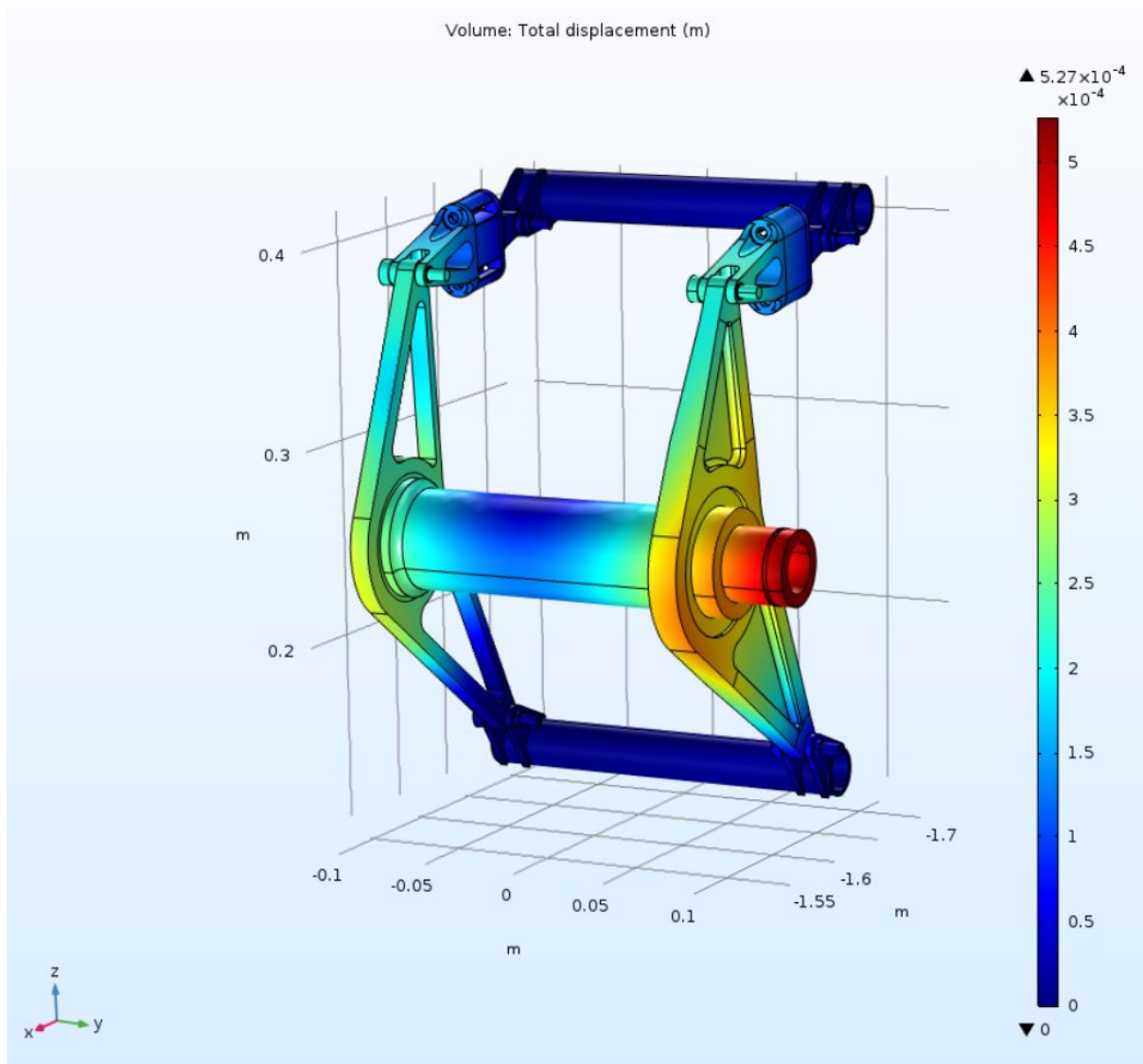
Naprężenia:



Wykonana symulacja jest potwierdzeniem, że wybranie materiału w obu mocowaniach nie wpływa na sztywność złozenia, a korzystnie wpłynęło na masę części.



Przemieszczenia:

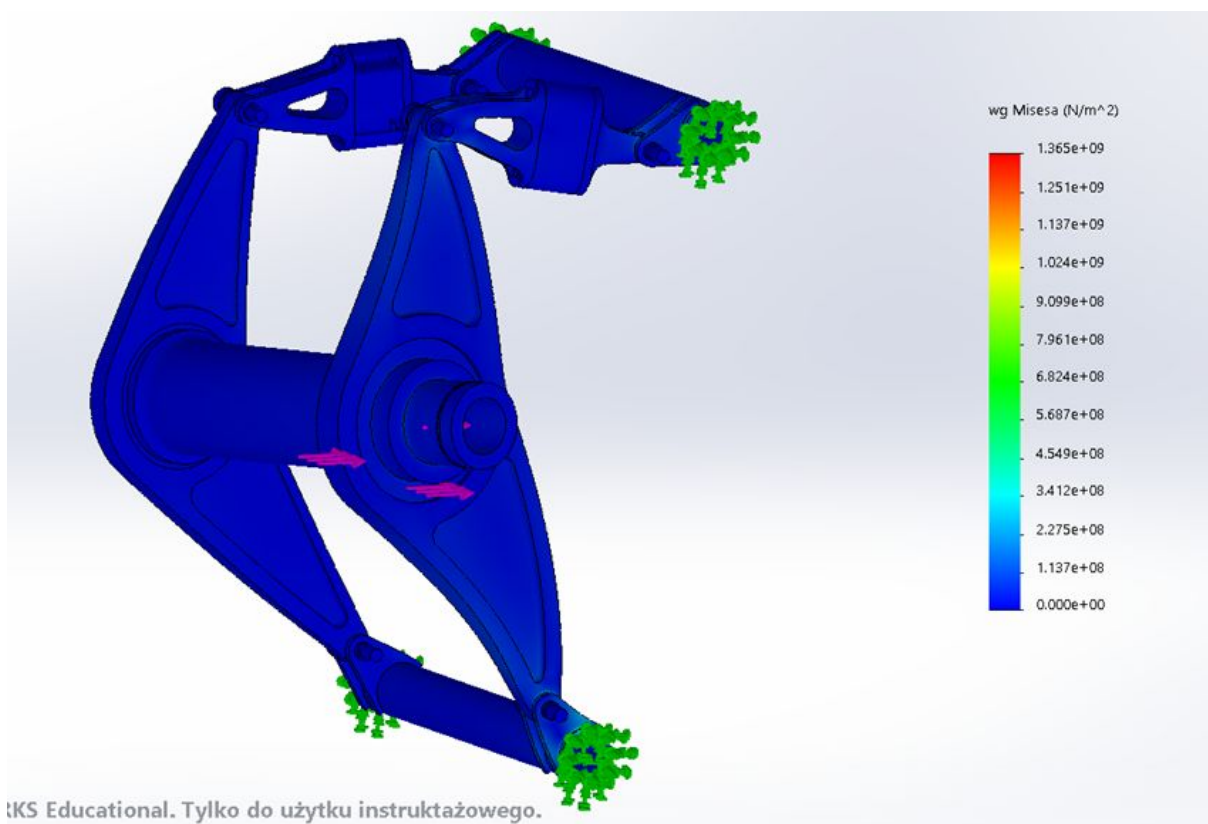


Różnica w wartości przemieszczeń na poziomie 0,1 mm jest zadowalająca. Przemieszczenie 0,5mm w porównaniu do rozmiarów całego elementu, nie będzie miało wpływu na poprawne działanie przeniesienia napędu.

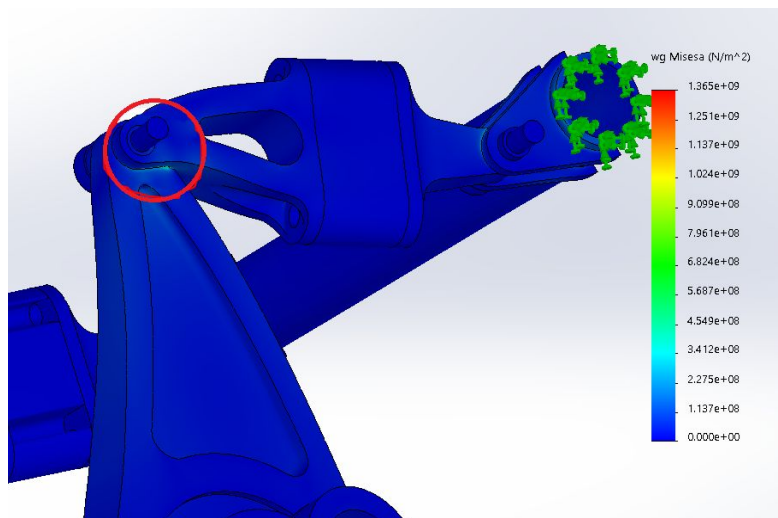
## 6. Porównanie wyników wytrzymałościowych z analizą SolidWorks Simulation

Poniżej wstawione są symulacje przeprowadzone w programie SolidWorks Simulation, dla tego samego złożenia i tak samo zdefiniowanych utwierdzeń oraz obciążeń.

Naprężenia:



Jak widać przemieszczenia maksymalne osiągnęły bardzo wysoką wartość 1365 Mpa, która w rzeczywistości pojawia się w miejscu styku mocowania z insertem regulacji naciągu łańcucha (przedstawione poniżej).

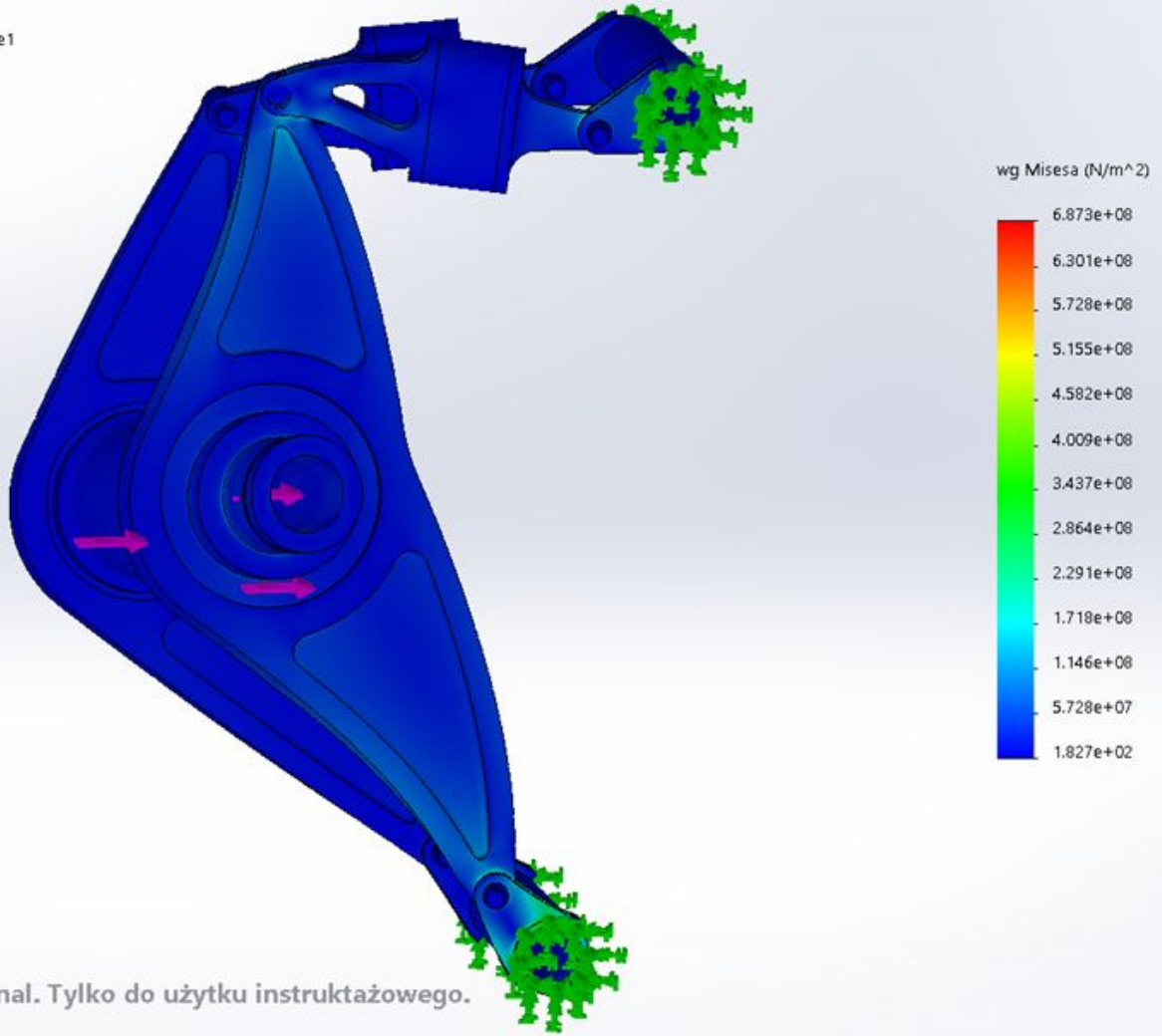


Reszta naprężeń zaznaczona jest w kolorze niebieskim, nie przekraczającym 350 Mpa.

W modelu z COMSOL wartości naprężeń również są zawyżone, jednak mniejsze ze względu na drobniej wygenerowaną siatkę w tym miejscu (dokładniejsze wyniki).

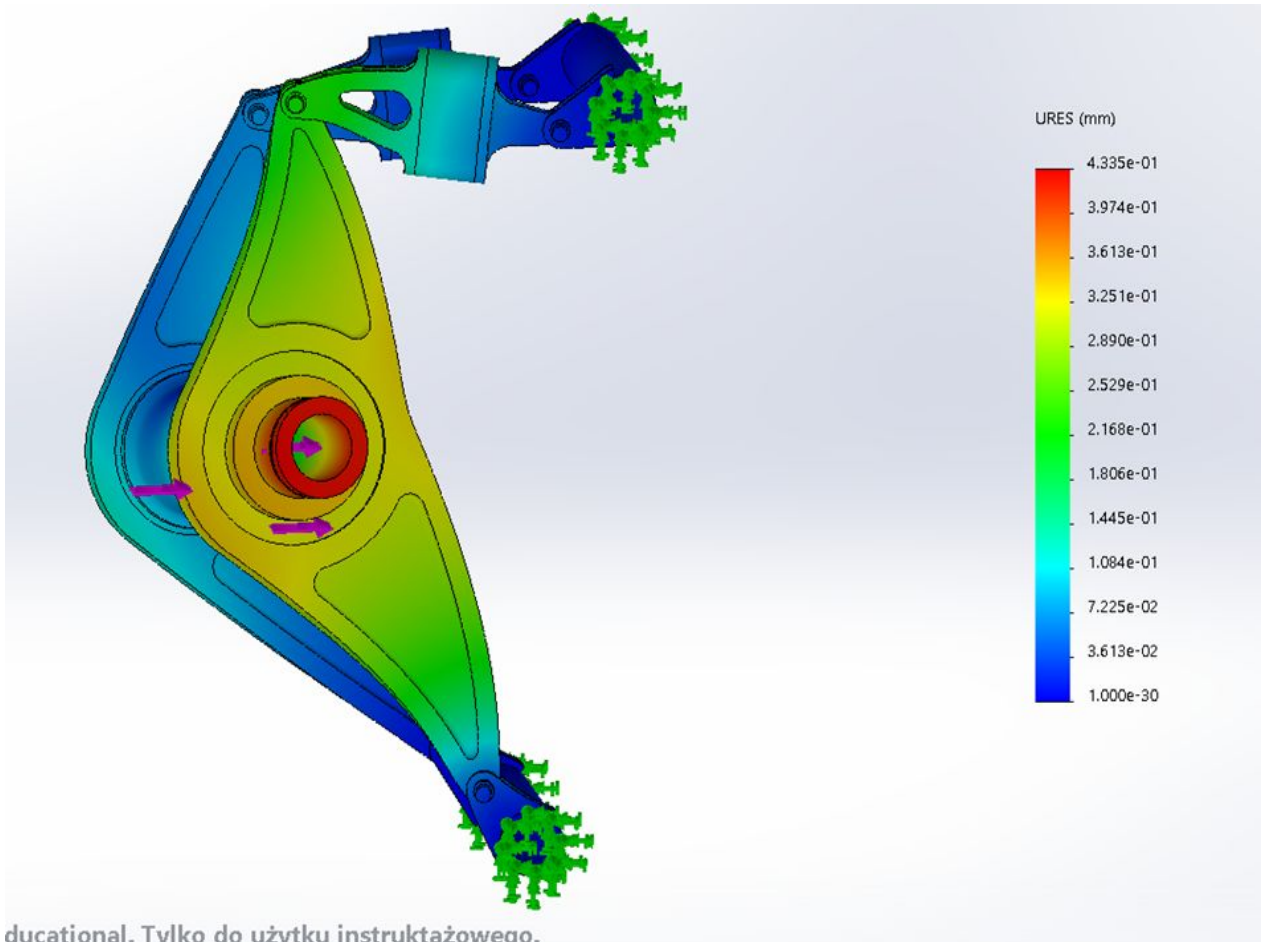
Po wygaszeniu sworznia w wyniku analizy, wartości naprężeń zmniejszyły się:

Przebieg 1



ational. Tylko do użytku instruktażowego.

Przemieszczenia:



Przemieszczenia wynoszą 0,434 mm. Jest to wynik bardzo zbliżony do tych podanych przez COMSOL wynoszących 0,497 mm.

## 7. Podsumowanie

Programy do obliczeń MES oraz analiz multifizycznych pozwalają na dogłębną analizę konstrukcji pod względem wytrzymałości jeszcze na etapie projektowania. Potrzeba doświadczenia w pracy z programem, aby poznać zasady jego działania oraz pewne zależności, które minimalizują stopień dysproporcji wyników względem tych oczekiwanych, rzeczywistych.

Jak widać po analizie, w której zostały również uwzględnione naprężenia termiczne, wytrzymałość mocowania z aluminium jest zależna od temperatury, w której pracuje.

Kolejna analiza pokazała, że podczas minimalizowania masy elementów konstrukcyjnych wytrzymałość układu nie zmniejsza się liniowo wraz ze spadkiem masy (25,6% spadku wytrzymałości przy 20,4% redukcji masy).

Symulacje naprężeń i przemieszczeń wykonane w programie COMSOL oraz SolidWorks Simulation są do siebie bardzo zbliżone. Różnią się od siebie nieznacznie. Przyczyną tych różnic może być dokładność generowanych siatek do obliczeń MES, gdzie program COMSOL radzi sobie zdecydowanie lepiej.

Symulacje przeprowadzane dzięki programom MES umożliwiają projektowanie zoptymalizowanych pod względem masy do wytrzymałości konstrukcji, używanych między innymi w świecie zawodów Formuła Student.