

Politechnika Poznańska

Wydział Budowy Maszyn i Zarządzania

Kierunek Mechanika i Budowa Maszyn

Praca dyplomowa inżynierska

Modelowanie i analiza mechaniczna wiązań do narciarstwa zjazdowego



Promotor: dr hab. inż. Tomasz Stręk, prof. nadzw.

Poznań 2016

Spis treści

1.	Wprowadzenie	3
2.	Cel i zakres pracy	5
3.	Wiązania narciarskie	6
3.1.	Budowa oraz zasada działania wiązań narciarskich	6
3.2.	Materiały stosowane w budowie wiązań narciarskich	10
4.	Modelowanie	13
4.1.	Model 3D wiązań	13
4.1.1.	Elementy modelowane	13
4.1.2.	Zastosowane metody pomiaru	18
4.2.	Metoda elementów skończonych	21
5.	Wyniki numeryczne	25
5.1.	Podstawa.....	25
5.1.1.	Przygotowanie modelu	25
5.1.2.	Wyniki symulacji	26
5.2.	Dźwignia	28
5.2.1.	Przygotowanie modelu	28
5.2.2.	Wyniki symulacji	29
5.3.	Blok podparcia	31
5.3.1.	Przygotowanie modelu	31
5.3.2.	Wyniki symulacji	31
5.4.	Kostka.....	34
5.4.1.	Przygotowanie modelu	34
5.4.2.	Wyniki symulacji	35
5.5.	Popychacz.....	38
5.5.1.	Przygotowanie modelu	38
5.5.2.	Wyniki symulacji	38
5.6.	Sworzeń duży	40
5.6.1.	Przygotowanie modelu	40
5.6.2.	Wyniki symulacji	40
6.	Wnioski i podsumowanie	42
7.	Streszczenie	42
8.	Literatura	43

1. Wprowadzenie

W każdym sporcie poza oczywistym dążeniem do jak najlepszych wyników należy również dbać o własne bezpieczeństwo jak i zdrowie. Jest to bardzo ważne, gdyż gdy je zaniedbamy możemy doprowadzić nawet do własnego kalectwa lub utraty życia. W przypadku narciarstwa zjazdowego w celu zachowania bezpieczeństwa stosowane są różnorakie metody. Od spisania ogólnych zasad bezpiecznego przebywania na stoku do specjalnej odzieży na przykład kasków, gogli chroniących przed nadmiernym słońcem, lub rozjaśniających, specjalnej odzieży osłaniającej przed wiatrem, zimnem oraz przetarciami, ochraniacze na plecy i kolana. Innym bardzo istotnym elementem są same narty a konkretnie wiązania narciarskie do nich mocowane. Poza funkcją pewnego mocowania buta umożliwiają one również jego samoczynne wypięcie w sytuacji tego wymagającej.



Fot. 1 Różne ochraniacze stosowane w narciarstwie, od lewej: zbroja, ochraniacz na kolana, kask, ochraniacz na plecy [14, 15, 16, 17].

Praca ma na celu analizę mechaniczną modeli przestrzennych powstałych na podstawie rzeczywistych elementów wiązań narciarskich firmy MARKER®. Wiązania te pochodzą z nart Racetiger Speedwall GS UVO (sezon 2014/2015) firmy Völkl®. Wykonane są one w większości ze stopów lekkich oraz różnego rodzaju tworzyw sztucznych np. polioksymetylen (POM).

Obecnie od tego typu konstrukcji wymaga się wielu właściwości jak na przykład lekkość, zapewnienie bezpieczeństwa użytkownikowi, praca w niskich temperaturach, odpowiedni design, pewne oraz natychmiastowe przenoszenie siły z buta na narty, możliwości łatwej i szybkiej regulacji bez specjalnych narzędzi, odporność na korozję, ścieranie i uderzenia oraz tłumienie drgań. Najczęstsze

uszkodzenia wynikają z normalnego użytkowania tj. zatarcia, korozja niektórych elementów, głębokie bruzdy spowodowane kolizjami przy dużych prędkościach.

Wiązania mogą zadziałać (przez wypięcie buta) na dwa sposoby tj. w ich przedniej lub tylnej części. Tylna część wiązania odpowiada za ruch góra-dół, natomiast przednia za ruch lewo-prawo. Gdyby zastosowano mechanizm umożliwiający wypięcie buta w większej ilości osi po obu jego stronach zwiększyłyby to znacznie koszty wytworzenia części oraz pogorszyło trwałość użytkową.



Fot. 2 Narty Racetiger Speedwall GS UVO oraz montowane na nich wiązania firmy MARKER [18, 19].

2. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest stworzenie wiarygodnego modelu tylnej części wiązań narciarskich, na którym byłoby możliwe przeprowadzanie analiz rozwiązań konstrukcyjnych oraz wytrzymałościowych.

Badania przeprowadzono w środowisku programowym SolidWorks oraz COMSOL Multiphysics 5.0. Na podstawie prawdziwych wiązań narciarskich stworzono wirtualne modele metodą inżynierii wstecznej (ang. reverse engineering). W celu ich uproszczenia ograniczono się do elementów tylnej części wiązań a kształty elementów pełniące rolę estetyczną pominięto. Większa część z nich została pomierzona suwmiarką, oraz przy pomocy zdjęć natomiast te bardziej skomplikowane próbowano przy pomocy skanera 3D metodą triangulacyjną. Ponieważ skaner generuje jedynie siatkę punktów na powierzchni detalu zastosowano program do inżynierii wstecznej. Niestety elementy okazały się być zbyt skomplikowane, by zastosować to rozwiązanie. Następnie przypisano poszczególnym elementom właściwości materiałowe i przygotowano symulację przy pomocy programu COMSOL Multiphysics 5.0.

Praca składa się z części teoretycznej oraz symulacyjnej a jej struktura wygląda następująco:

- Część teoretyczna
 - Budowa oraz zasada działania wiązań.
 - Materiały stosowane w budowie wiązań.
 - Analiza różnych rozwiązań.
- Część symulacyjna
 - Stworzenie modelu 3D.
 - Przeprowadzenie symulacji.
 - Analiza wyników.

3. Wiązania narciarskie

3.1. Budowa oraz zasada działania wiązań narciarskich

Obecne rozwiązania dotyczące zasady działania oraz budowy wiązań do nart zjazdowych nie mają między sobą wielu różnic. Mechanizmy te składają się z podobnych elementów pełniących podobne funkcje, różnice polegają na zastosowaniu innych materiałów, różnicach w wymiarach gabarytowych, szczegółów dotyczących geometrii lub designu stosowanych przez różne firmy. Zazwyczaj większość elementów jest mocowana w podstawie, jednak zdarza się, że na przykład śruba, regulacja, oraz sprężyna mocowane są w dźwigni, która jest równocześnie blokiem podparcia (pełni jednocześnie rolę obu elementów). Główne starania inżynierów na rynku bieżą w kierunku redukcji drgań oraz masy, jak najszybszego i bezstratnego przeniesienia siły od narciarza poprzez buty na narty, których to częścią są wiązania, a także poprawienia komfortu jazdy.

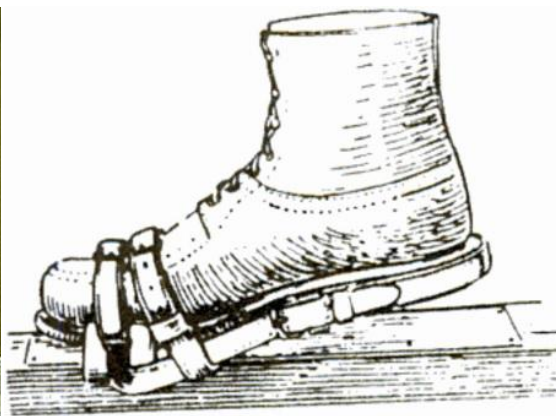
Inną budowę mają wiązania narciarskie telemarkowe czy do skitouringu, gdyż muszą zapewniać dodatkowo ruch obrotowy względem przedniej części wiązań, by ułatwić przemieszczanie się w górę stoku. Ten sam warunek muszą spełniać wiązania dla nart biegowych jednak ich budowa jest o wiele prostsza i sprowadza się do mocowania pręta o małej średnicy będącego częścią buta (pod palcami) do narty. Wiązania do jazdy poza stokiem (ang. freesking) odznaczają się tym, że dla zwiększenia stabilności nie są mocowane na płycie, która normalnie pośredniczy między nimi a nartą lecz bezpośrednio do narty. W standardowej sytuacji płyta zwiększa wysokość na jakiej się znajdujemy i ułatwia wejście na krawędź w czasie wykonywania skrętu.

W pierwszych wiązaniach, w czasach gdy nie było przygotowanych stoków zapewnienie możliwości łatwego podchodzenia było bardzo ważne. Początkowo buty narciarskie nie różniły się znacząco od zwykłych a mocowano je przy pomocy skórzanych pasów czy rzemieni do stalowej podstawy. Ta, była mocowana za pomocą ruchomej osi do samych nart umożliwiając łatwe podejście oraz zjazd. Rozwiązanie to nie zapewniało jednak szybkiego przeniesienia energii do nart, buty nie usztywniały kostek a samo wiązanie nie pozwalało na samoczynne uwolnienie stopy w sytuacji tego wymagającej. Te elementy sprawiły, że zaczęto szukać innych, bezpieczniejszych rozwiązań [4].

Obecnie wiązania narciarskie mają możliwość działania na dwa sposoby. Ich przednia część umożliwia wypięcie przez ruch buta na boki natomiast tylna przez ruch w osi „góra-dół”. Takie działanie w dwóch kierunkach pozwala na zachowanie bezpieczeństwa w większości sytuacji. Przednia jak i Tylna część wiązań działa na zasadzie pokonywania siły granicznej potrzebnej do wypięcia ustawianej przy pomocy odpowiedniego napięcia sprężyny. W przypadku przedniej części wiązań but jest ograniczony po bokach przez elementy przypominające „łapy”, zamocowanych na osiach obrotowych. Są one przy pomocy krzywek połączone między sobą oraz z napiętą sprężyną (czasem siłownikiem) umieszczoną z przodu i zorientowaną wzdłuż narty. W przypadku wystąpienia siły większej od granicznej sprężyna poddaje się pośrednio działaniu siły nacisku padającej na łapy i pozwala na wypięcie buta. Dodatkowo but zazwyczaj znajduje się na przesuwnej płycie, która w momencie wypięcia prowadzi go przez określony czas po zadanym torze, dzięki czemu jego ruch jest przewidywalny. Czasem na łapach dodatkowo montowane są rolki, które od pewnej chwili pomagają się zsunąć stopie poza wiązania. Tylna część działa na zasadzie dźwigni, której ruch jest dodatkowo powstrzymywany przez napiętą sprężynę. Tej dźwigni (złożonej z bloku podparcia, elementu „dźwignia” oraz kilku innych) używa się zarówno do wypinania i wpinania nart, jak i w sytuacji zagrożenia zdrowia. W przypadku pierwszym naciskamy na dźwignię (element), ona podnosi blok podparcia ponad punkt równowagi, po którego przekroczeniu sprężyna zamiast powstrzymać ten ruch (w górę) zaczyna go wzmacniać. W sytuacji wpinania buta wszystko dzieje się w odwrotnym kierunku, to znaczy naciskamy na blok podparcia, on na dźwignię. Ten ruch znowu jest powstrzymywany przez napinającą się sprężynę do pewnego momentu, od którego zaczyna ona powodować, że blok sam naciska od góry na but. W momencie, gdy but musi zostać samoczynnie wypięty (w sytuacji potencjalnie niebezpiecznej) a my jesteśmy na przykład wyrzucani do przodu w momencie gdy narty są zablokowane tył buta naciska na blok podparcia od dołu, ten unosi się przenosząc część siły na dźwignię oraz kostkę. Ruch tych dwóch elementów jest pośrednio powstrzymywany przez napiętą sprężynę. Jednak zakładając, że wiązania zostały odpowiednio ustawione sprężyna powinna ulegać sile biegnącej z wcześniej wymienionych elementów, aż w końcu po przekroczeniu pewnej wysokości na którą podnosi się blok podparcia wspomóc ruch podnoszenia i uwolnić stopę.

Modelowanie i analiza mechaniczna wiązań do narciarstwa zjazdowego.

Możliwość wypięcia buta jest konieczna ze względu na duże prędkości przy których obecnie się zjeżdża (w dyscyplinie downhill czyli jeździe tylko w dół stoku bez skrętów lub przy bardzo długich skrętach które nie powodują zbytniego spowolnienia, rekord wynosi 160 km/h) oraz fakt że narty mają długość zbliżoną do dwóch metrów. W momencie wypadku na stoku czy poza nim, narta lub samo ciało narciarza może stworzyć dźwignię, która w przypadku pełnego zablokowania nogi, mogłaby doprowadzić do jej skrzywienia lub innych urazów. Dodatkowo bardzo częste jest, że narciarz, szczególnie początkujący przewróci się w taki sposób, że noga, która powinna znaleźć się wyżej, jest przyciśnięta do śniegu przez drugą. Trudno jest wstać z takiej pozycji dodatkowo jest ona wysoce niekomfortowa a możliwość szybkiego wpięcia jednej z nart pozwala na sprawne podniesienie się.



Po lewej: Fot. 3 Jedne z pierwszych wiązań narciarskich. [20]

Po prawej: rys. 1 Inne wiązania z widocznym uniesieniem buta, umożliwiające podchodzenie. [4]



Po lewej: Fot. 4 Wiązania do „skitouring-u” [21].

Po prawej: Fot. 5 Wiązania do „skitouring-u” z widocznym uniesieniem płyty w tylnej części [11].



Po lewej: Fot. 6 Rozwiązanie stosowane w wiąźaniach dla nart biegowych [21].
Po prawej: Fot. 7 Wiąźania do nart do jazdy poza przygotowanymi stokami (ang. freeride) o widocznym, szerokim skistopie [22].

Wartość wypięcia podawana jest w skali DIN i ustalana według norm ISO 11088 oraz ISO 8061. W czasie ustawiania siły wypięcia bierze się pod uwagę szereg czynników. Te czynniki to wzrost narciarza, jego waga, poziom zaawansowania czy też sposób w jaki jeździ (agresywny lub nie), wiek oraz długość skorupy buta. Wzrost i waga zazwyczaj dzielone są na przedziały a na ich podstawie określany jest kod narciarza oznaczany odpowiednią literą. W odpowiednich tabelach na jednej osi znajduje się kod narciarza na drugiej długość skorupy buta. Poziom zaawansowania oraz wiek służą do nanoszenia poprawek do wyniku. Dobrą praktyką jest stosowanie tabel wydanych przez producenta a jeszcze lepszą oddanie nart do serwisu gdzie osoba przeszkolona je odpowiednio ustawi. W Szwajcarii wymagany jest pomiar siły wypięcia na specjalnej maszynie, która wyznacza osobne ustawienie dla przedniej i tylnej części nart z dodatkowym rozróżnieniem na lewą i prawą. Po takim pomiarze klient otrzymuje certyfikat który ważny jest przez następny rok i pełni rolę zabezpieczenia w razie dokonywania formalności na przykład w firmie ubezpieczeniowej[10].

Tab. 1 Dobór siły wypięcia dla wiązań firmy MARKER [25].

Skier		Skier Code	Toe and Heel Indicator Values						Twist	Forward Lean
Weight	Height		Boot Sole Length in mm							
			≤ 250	251-270	271-290	291-310	311-330	≥ 331		
									5	18
22-29lbs 10-13kg		A	0.75	0.75					8	29
30-38lbs 14-17kg		B	1.00	1.00	0.75				11	40
39-47lbs 18-21kg		C	1.50	1.25	1.00				14	52
48-54lbs 22-25kg		D	1.75	1.50	1.50	1.25			17	64
57-64lbs 26-30kg		E	2.25	2.00	1.75	1.50	1.50		20	75
67-78lbs 31-35kg		F	2.75	2.50	2.25	2.00	1.75	1.75	23	87
79-91lbs 36-41kg		G	3.50	3.00	2.75	2.50	2.25	2.00	27	102
92-107lbs 42-48kg	≤ 4'10" ≤ 148cm	H		3.50	3.00	3.00	2.75	2.50	31	120
108-125lbs 49-57kg	4'11"-5'1" 149cm-157cm	I		4.50	4.00	3.50	3.50	3.00	37	141
126-147lbs 58-66kg	5'2"-5'5" 158cm-166cm	J		5.50	5.00	4.50	4.00	3.50	43	165
148-174lbs 67-78kg	5'6"-5'10" 167cm-178cm	K		6.50	6.00	5.50	5.00	4.50	50	194
175-209lbs 79-94kg	5'11"-6'4" 179cm-194cm	L		7.50	7.00	6.50	6.00	5.50	58	229
≥ 210lbs ≥ 95kg	≥ 6'5" ≥ 195cm	M			8.50	8.00	7.00	6.50	67	271
		N			10.00	9.50	8.50	8.00	78	320
		O			11.50	11.00	10.00	9.50	91	380
		P				13.00	12.00	11.50	105	452
									122	536
									142	640

* Based on "Type I" skier
Note 1: For skiers 29 lbs. and under, no further correction is appropriate.
Note 2: For skiers 38 lbs. and under, Skier Type -I is inappropriate.



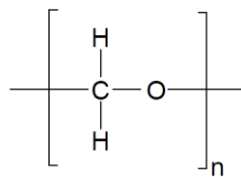
Fot. 8 Maszyna do automatycznego pomiaru siły wypięcia [26].

3.2. Materiały stosowane w budowie wiązań narciarskich

Wiązania narciarskie muszą spełniać szereg wymagań, tak samo materiały stosowane w ich budowie. Materiały te muszą być między innymi lekkie, wytrzymałe (twardość i udarność), odporne na ścieranie, odpowiednio sztywne, tłumiące drgania oraz odporne na działanie korozji. Szeroko stosowane są tworzywa sztuczne oraz stopy

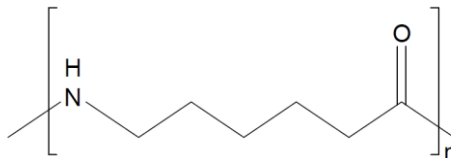
aluminium. Wszystkie stosowane materiały są tajemnicą firmy, także w modelu zastosowano materiały, które mogły być wykorzystane lub, miały zbliżone właściwości.

- podstawa – polioksymetylen, (POM, ang. polyoxymethylene) – polimer z grupy termoplastycznych. W jego łańcuchy główne wkomponowane są grupy acetalowe. Wytwarzany głównie w procesie polimeryzacji aldehydów. Gęstszy od wody ($1,42 \text{ g/cm}^3$) o niskim współczynniku tarcia, wysokiej udatności także w niskich temperaturach. Jego inne zalety dla tego zastosowania to mała rozszerzalność cieplna zatem możliwość stosowania w szerokim zakresie temperatur, odporność na ścieranie oraz zmęczenie, wysoka sztywność oraz wytrzymałość mechaniczna [8, 9].



Rys. 2 Wzór strukturalny polioksymetylenu.

- dźwignia – stop aluminium z cynkiem PA9 (oznaczenie wg. AISI to 7075) – cechują go dobre właściwości wytrzymałościowe (R_m 480 -540 MPa, twardość 104 – 157 HB), średnia odporność na korozję, dobra skrawalność [7].
- blok podparcia – polikaprolaktam 6 z 30% włókien szklanych (PA-6 GF30, poliamid-6, ang. polycaprolactam), wytwarzany w procesie polimeryzacji z otwarciem pierścienia z kaprolaktamu w atmosferze azotu i w temperaturze 260 stopni Celsjusza. Gęstość $1,36 \text{ g/cm}^3$, odporna na ścieranie o dużej stabilności wymiarowej, twardości powierzchniowej oraz sztywności. Maksymalna temperatura użytkowa to 120 stopni Celsjusza. Jest stosowany również w elementach samochodowych, częściach do przekładni, narzędziach, uchwytach [10].

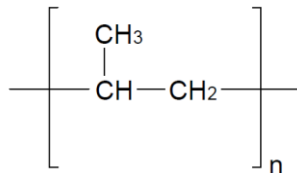


Rys. 3 Wzór strukturalny polikaprolaktamu.

- kostka – polioksymetylen
- popychacz - stop aluminium z cynkiem PA9

Modelowanie i analiza mechaniczna wiązań do narciarstwa zjazdowego.

- śruba – austenityczna stal nierdzewna 1.4401 (w AISI 316, natomiast w PN OH17N12M2) - posiada około 17% chromu i 12% niklu, dla zwiększenia odporności na korozję od 2 do 2,5 % molibdenu oraz do 0,07% węgla. W jej skład wchodzi również krzem, mangan oraz azot (odpowiednio: do 1,00%, do 2,00% oraz do 0,11% zawartości)
- regulacja – polipropylen (PP, ang. polypropylene) otrzymywany w procesie polimeryzacji propylenu, ma wysoką temperaturę mięknięcia oraz dobre właściwości mechaniczne ze względu na wysoki stopień krystaliczności. Gęstość $0,91 \text{ g/cm}^3$ sprawia, że jest najlżejszym z tworzyw zastosowanych w stworzonym modelu wiązań. Niska masa wyrobu jest kluczowa w sporcie, gdyż zmniejsza wpływ sił bezwładności pozwalając mięśniom na szybszą reakcję [6].



Rys. 4 Wzór strukturalny polipropylenu.

- sworzeń mały – stop aluminium z cynkiem PA9
- sworzeń duży – stop aluminium z cynkiem PA9
- podkładka – austenityczna stal nierdzewna 1.4401

4. Modelowanie

4.1. Model 3D wiązań

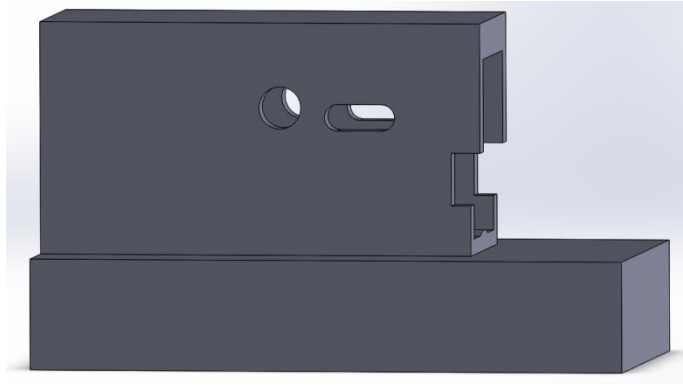
4.1.1. Elementy modelowane

Model wiązań składa się z łącznie dziesięciu elementów (poza dziewięcioma wymienionymi poniżej jest jeszcze podkładka pod sprężynę). Każdy z elementów ma jakieś zadanie w całej konstrukcji i są mu w związku z tym stawiane określone wymagania. Nie wszystkie zostały użyte do przeprowadzenia symulacji ze względu na małe siły oddziaływujące:

- podstawa – poliacetal lub poliamid – pełni rolę podparcia dla pozostałych elementów oraz pozwala na zamocowanie wiązań do narty przy pomocy mechanizmu zapadkowego oraz gwintu na obrotowym pręcie z zakończeniem pozwalającym na obracanie nim przy pomocy śrubokrętu. W momencie gdy kręcimy prętem podstawa porusza się wzdłuż szyny zamocowanej do narty. Pozwala to na szybki montaż oraz regulację wiązań. Musi być ona odporna na działanie czynników zewnętrznych, ścieranie, uszkodzenia mechaniczne oraz zużycie cieerne. Wszystkie te cechy powinny być uzyskane przy jednoczesnej małej masie elementu.

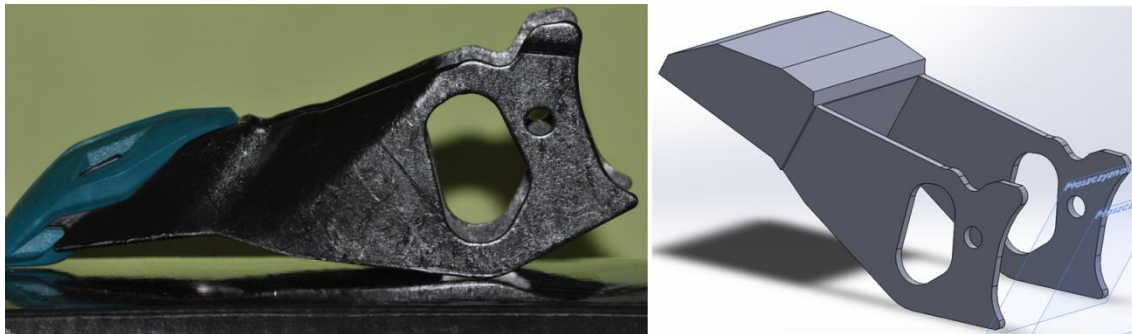


Fot. 9, 10 Podstawa w oryginalnych wiązaniach.



Rys. 5 Model podstawy wykonany w programie SolidWorks 2014.

- dźwignia – jej głównym zadaniem jest umożliwienie użytkownikowi szybkiego wypięcia nart, musi być odpowiednio długa, by było to możliwe bez znacznego użycia siły. Jednocześnie musi mieć małą masę, by zwiększyć komfort jazdy oraz ułatwić transport nart. W momencie naciśnięcia dźwigni wewnątrz podstawy klocek przesuwany jest do przodu blok podparcia ulega obrotowi a jego przednia część podniesieniu. Skutkuje to uwolnieniem buta z wiązań.



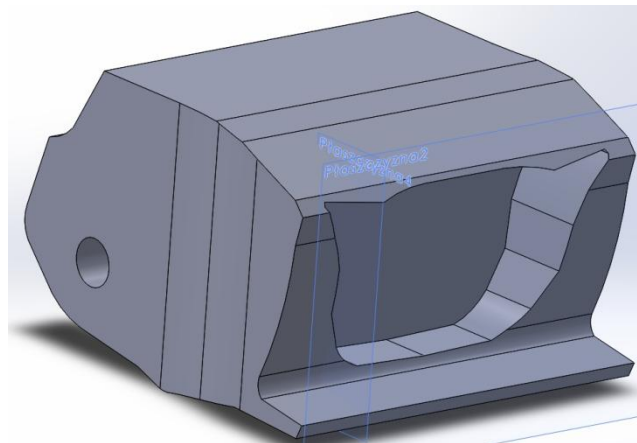
Fot. 11 Dźwignia użyta w oryginalnych wiązaniach.

Rys. 6 Model dźwigni wykonany w programie SolidWorks 2014.

- blok podparcia – ten element ma bezpośredni styk z butem narciarskim. Gdy but naciska na jego dolną ściankę blok podparcia ulega przemieszczeniu względem osi dużego sworznia. Musi być on odporny na ścieranie, odkształcenia plastyczne, wpływ warunków zewnętrznych oraz mieć małą masę ze względu na dużą objętość.

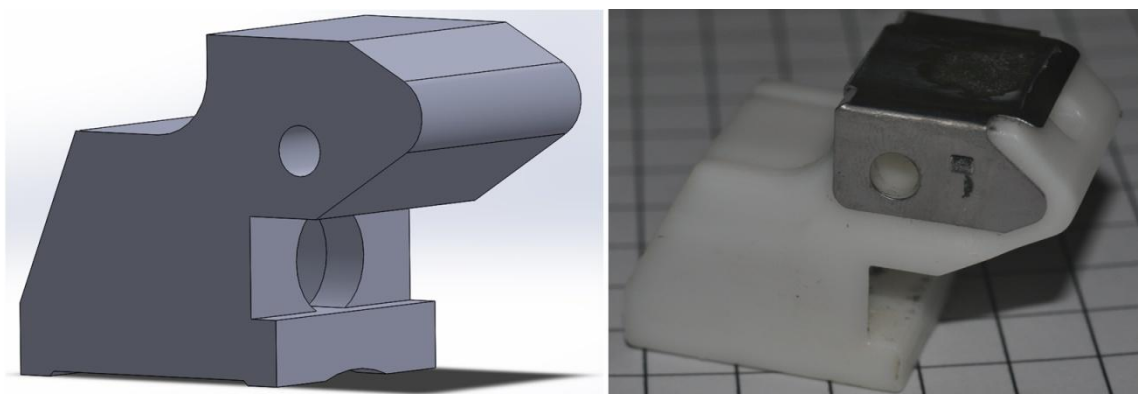


Fot. 12, 13, 14 Oryginalny blok podparcia użyty w wiązaniach.



Rys. 7 Model bloku podparcia wykonany w programie SolidWorks 2014.

- kostka – jest elementem pośredniczącym w mechanizmie kinematycznym nart, przesuwa się wewnątrz podstawy i jest otoczona smarem stałym. Musi być odporna na ścieranie, lekka oraz odporna na działanie czynników zewnętrznych, gdyż nie jest osłonięta przed otoczeniem. Jej przednia część pełni rolę krzywki po której przemieszcza się blok podparcia w trakcie zmiany pozycji.

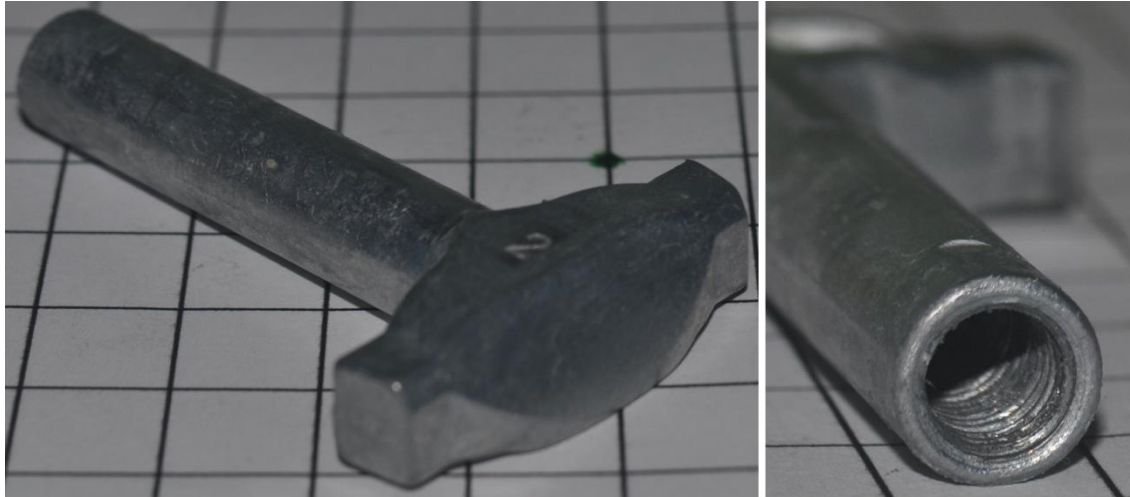


Rys. 8 Model kostki wykonany w programie SolidWorks 2014.

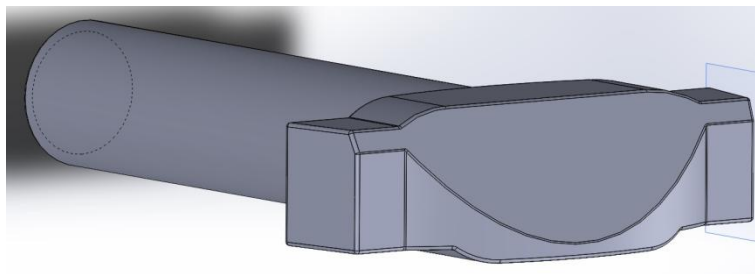
Fot. 15 Oryginalna kostka użyta w wiązaniach.

Modelowanie i analiza mechaniczna wiązań do narciarstwa zjazdowego.

- popychacz - pełni rolę elementu pośredniczącego w łańcuchu kinematycznym wiązań. Ma kontakt z blokiem podparcia, kostką, śrubą oraz podstawą. Obracając śrubą wewnątrz popychacza (w tylnej części posiada on gwint wewnętrzny) regulujemy siłę wypięcia nart.

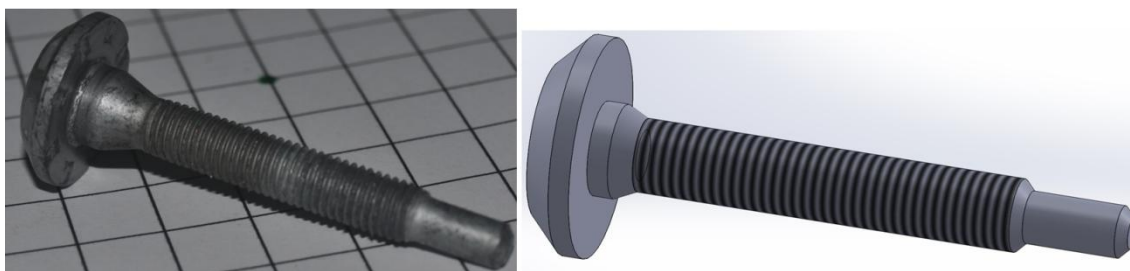


Fot. 16, 17 Oryginalny popychacz użyty w wiązaniach. Po prawej widać gwint wewnętrzny, w który wkręcamy śrubę.



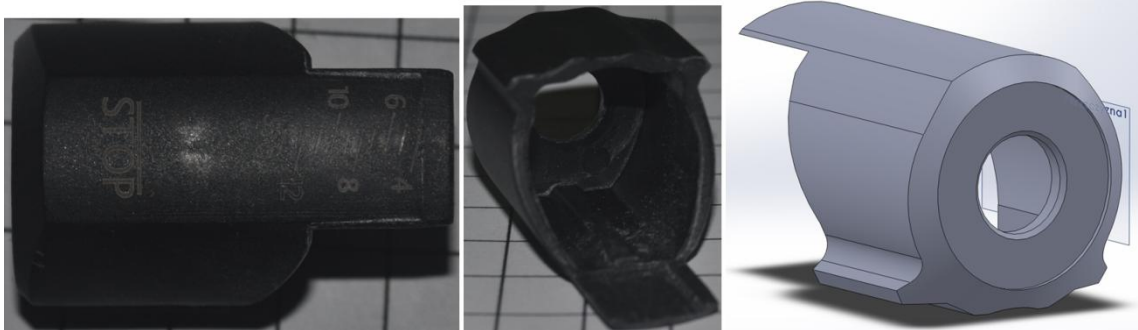
Rys. 9 Model popychacza wykonany w programie SolidWorks 2014.

- śruba – Jest oparta o regulację oraz sprężynę, jednocześnie nacięty na niej gwint wkręcany jest w popychacz. W momencie jej obrotu poprzez manipulowanie napięciem sprężyny regulujemy siłę wypięcia wiązań.



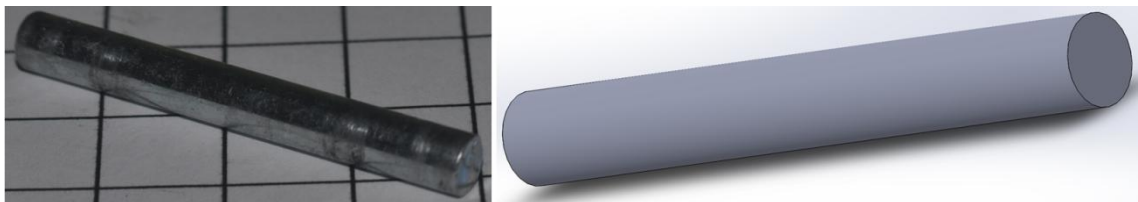
Fot. 18 Oryginalna śruba użyta w wiązaniach.
Rys. 10 Model śruby wykonany w programie SolidWorks 2014.

- regulacja – chroni wnętrze podstawy gdzie znajduje się smar oraz elementy podatne na korozję przed wpływem czynników zewnętrznych. Naniesiona jest na nią skala informująca o ustawionej sile wypięcia za pomocą skali DIN-owskiej.



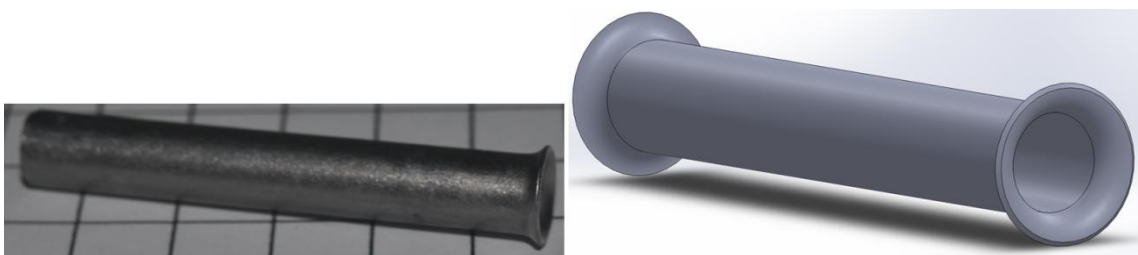
Fot. 19, 20 Oryginalna regulacja użyta w wiązaniach.
Rys. 11 Model regulacji wykonany w programie SolidWorks 2014.

- sworzeń mały – ma kontakt z podstawą, kostką oraz dźwignią. Jego oś, jest osią obrotu dla dźwigni, jednocześnie sam może przemieszczać się wzdłuż podstawy. Przechodzi również przez otwór w kostce, ma więc kontakt z większością ważnych elementów w łańcuchu kinematycznym wiązań.



Fot. 21 Oryginalny mały sworzeń użyty w wiązaniach.
Rys. 12 Model małego sworznia wykonany w programie SolidWorks 2014.

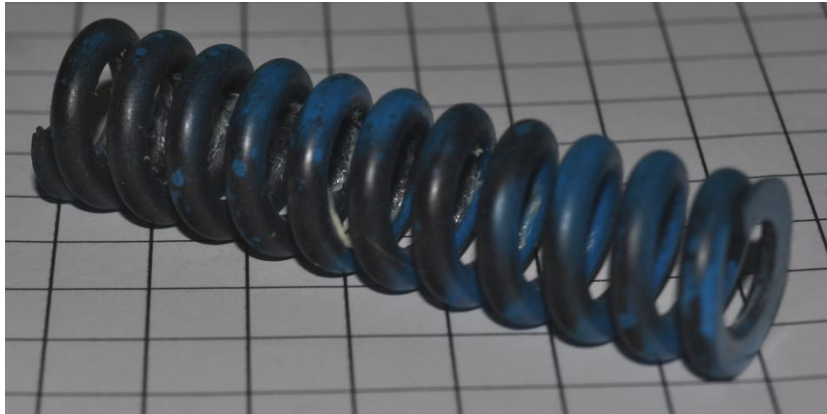
- sworzeń duży – pełni rolę osi obrotu dla pozostałych elementów. Jest pusty w środku, by zmniejszyć masę wiązań. Musi być on odporny na zginanie, wpływ warunków atmosferycznych oraz korozję.



Fot. 22 Oryginalny sworzeń duży użyty w wiązaniach.
Rys. 13 Model dużego sworznia wykonany w programie SolidWorks 2014.

Modelowanie i analiza mechaniczna wiązań do narciarstwa zjazdowego.

- sprężyna – nie został stworzony model bryłowy tego elementu. Sprężyna poddawana jest wielokrotnym cyklom ściskania oraz, gdy narty nie są właściwie zakonserwowane po sezonie ulega długotrwałym naprężeniom (po sezonie należy możliwie najmocniej zmniejszyć siłę napięcia sprężyny). Nie może ona w wyniku takiego działania zmieniać swoich właściwości, musi być również odporna na działanie niskich temperatur, korozji oraz mogącej dostać się do środka wiązań wody.



Fot. 23 Oryginalna sprężyna użyta w wiązaniach.

4.1.2. Zastosowane metody pomiaru

Wszystkie wymiary w modelach były wprowadzane z dokładnością do 0,1 mm. Ze względu na różny stopień skomplikowania elementów, zastosowano też wobec nich różne metody określenia wymiarów:

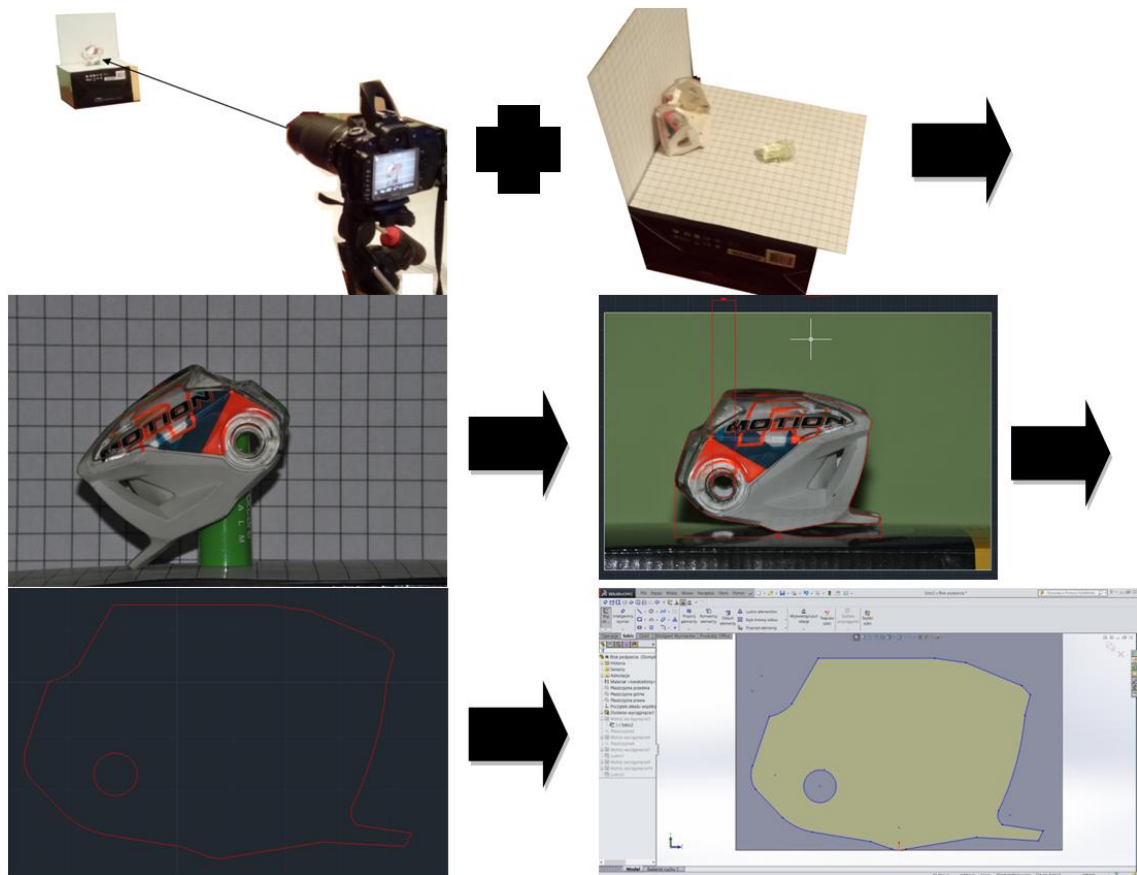
- Pomiar suwmiarką

Wszystkie wymiary dla danego elementu zostały zmierzone suwmiarką następnie na podstawie tych wymiarów w programie SolidWorks 2014 został stworzony model numeryczny danej części.

- Fotogrametria

W przypadku elementów bardziej skomplikowanych umieszczano je na specjalnie przygotowanym stanowisku złożonym z aparatu na statywie oraz podstawy z naniesioną siatką kwadratów 10mm/10mm. Następnie wykonano serię zdjęć przedmiotu w różnych pozycjach. Zdjęcia wykonano tak by obraz był jak najbardziej płaski (duża odległość aparatu od przedmiotu, zastosowany obiektyw o ogniskowej 200 mm), charakterystyczne powierzchnie przedmiotu ustawione były prostopadle do osi obiektywu (osie obrotu, powierzchnie równoległe do płaszczyzn stanowiska lub osi

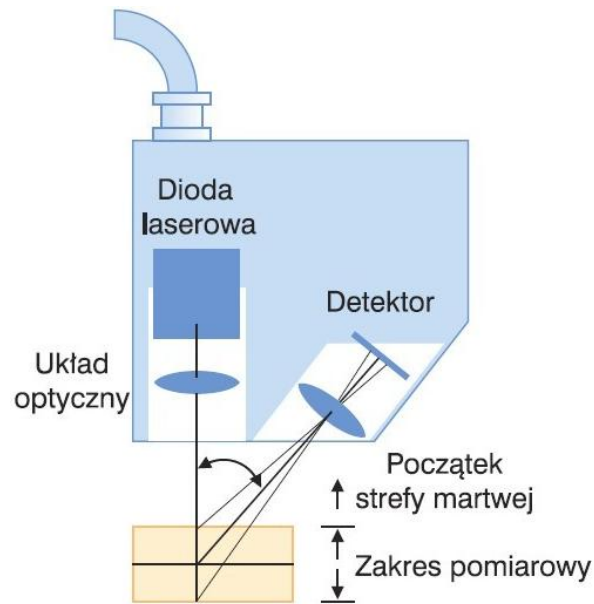
aparatu) oraz by możliwe było dostrzeżenie wszystkich wymiarowanych krawędzi przedmiotu. Następnie wybrane zdjęcia zostały przeniesione do programu AutoCAD 2014. Obrysowano je tak, by otrzymać kontury potrzebne do stworzenia modelu (bloku) w programie SolidWorks. Jednocześnie na podstawie jednego wymiaru zmierzonego suwmiarką obliczono skalę i zmieniono wymiary konturu tak, by odpowiadały rzeczywistym.



Rys. 14 Przebieg procesu tworzenia konturu na potrzeby modelu. Od lewego górnego rogu do prawego dolnego: wykonanie zdjęcia na stanowisku, otrzymane zdjęcie, obrócony obraz z naniesioną skalą, przeskalowany kontur, szkic w programie SolidWorks 2014.

- Metoda triangulacyjna

Metoda polega na oświetleniu mierzonego przedmiotu światłem laserowym a następnie wykryciu jego położenia przez detektor. Kąt między światłem padającym a odbitym służy do określenia odległości. Jednocześnie obiekt obraca się na aluminiowym stole a kolejne punkty są zapisywane w pamięci. Po wykonaniu pełnego obrotu następuje pomiar na innej wysokości aż zapisane zostaną punkty w całym zaprogramowanym przedziale wysokości.



Rys. 15 Graficzne przedstawienie triangulacyjnej metody pomiaru [23].

Metodą tą został zmierzony blok podparcia w celu uzyskania wymiarów w miejscach niemożliwych do zmierzenia dwoma poprzednimi metodami. Do tego celu użyto skanera 3D japońskiej firmy PICZA LPX-600. Wytworzone modele jednak miały zbyt dużą ilość powierzchni, by możliwe było ich zaimportowanie w formie modelu bryłowego czy powierzchniowego do programu SolidWorks.



Rys. 16 Model wygenerowany w formie graficznej.



Fot. 24 Stanowisko do skanowania 3D metoda triangulacyjną Politechniki Poznańskiej.

4.2. Metoda elementów skończonych

Możliwe jest opisanie stanu naprężeń w przestrzeni 3D dla elementu za pomocą wartości odkształceń u, v, w oraz ich pochodnych. Naprężenia tnące można zaprezentować w formie tensorów ε_{xy} , ε_{yz} , ε_{xz} . Przy założeniu skrajnie małego przemieszczenia, wartości naprężeń normalnych oraz ścinających są dane wzorami:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} & \varepsilon_{xy} &= \frac{\gamma_{xy}}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} & \varepsilon_{yz} &= \frac{\gamma_{yz}}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} & \varepsilon_{xz} &= \frac{\gamma_{xz}}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)\end{aligned}$$

Rys. 17 Wartości naprężeń normalnych oraz tnących. [5]

Symetryczny tensor odkształceń składa się zarówno z normalnych jak i stycznych składowych odkształceń:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_y & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} & \varepsilon_{yz} & \varepsilon_z \end{bmatrix}$$

Rys. 18 Macierz symetrycznego tensora odkształceń. [5]

Modelowanie i analiza mechaniczna wiązań do narciarstwa zjazdowego.

Naprężenie w materiale jest opisane przez symetryczny tensor naprężania. Składa się on z trzech naprężeń normalnych σ_x , σ_y , σ_z oraz sześciu lub trzech jeśli wykorzystujemy symetrię stycznych τ_{xy} , τ_{yz} , τ_{xz} :

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad \tau_{xy} = \tau_{yx} \quad \tau_{xz} = \tau_{zx} \quad \tau_{yz} = \tau_{zy}$$

Rys. 19 Symetryczny tensor naprężania. [5]

W sytuacji, gdy zależność między odkształceniami a naprężeniami jest liniowa dana jest ona wzorem:

$$\sigma = D\varepsilon$$

Rys. 20 Zależność liniowa między tensorem naprężeń i odkształceń. [5]

D to macierz sprężystości 6x6 a wartości sigma oraz epsilon są dane w postaci wektorów z sześcioma elementami (tensory odkształceń oraz naprężeń):

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix}$$

Rys. 21 Wektor naprężeń oraz odkształceń. [5]

Macierz sprężystości D oraz macierz odwrotna D^{-1} są różnie definiowane w zależności od tego czy materiał jest izotropowy czy też nie. Dla materiału o właściwościach izotropowych macierz D^{-1} wygląda następująco:

$$D^{-1} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\nu & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & 1 & -\nu & 0 & 0 & 0 \\ -\nu & -\nu & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2(1+\nu) \end{bmatrix}$$

Rys. 22 Macierz elastyczności D^{-1} . E to moduł Younga, natomiast ν to współczynnik Poissona. [5]

Po odwróceniu macierzy otrzymujemy następującą:

$$D = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix}$$

Rys. 23 Macierz odwrotna. [5]

Równania równowagi dla naprężeń w przestrzeni trójwymiarowej dane są wzorami (gdzie F oznacza siły objętościowe):

$$\begin{aligned} -\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= F_x \\ -\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} - \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} - \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= F_y \\ -\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} - \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} - \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= F_z \end{aligned}$$

Rys. 24 Równania równowagi. [5]

Wykorzystując zapis skrócony, można zapisać te zależności jako:

$$-\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{F}$$

Rys. 25

Gdzie sigma jest tensorem naprężeń. Zastosowanie zależności między naprężeniami oraz przemieszczeniami w powyższym wzorze skutkuje otrzymaniem równania Naviera-Stokesa, którego wynikiem jest przemieszczenie.

Te równania, wraz z odpowiednimi warunkami brzegowymi zostały rozwiązane przy pomocy metody elementów skończonych.

Modelowanie i analiza mechaniczna wiązań do narciarstwa zjazdowego.

Metoda elementów skończonych, MES (ang. finite element method, FEM) polega na podziale konstrukcji na skończoną ilość elementów połączonych wiązaniami i rozmieszczonych tak by tworzyły siatkę np. trójkątów lub kwadratów. Następnym etapem jest rozwiązanie układu równań na podstawie, w wyniku czego otrzymujemy szukane przez nas wartości fizyczne. Momentem przełomowym w okresie opracowywania tej metody były lata 60 XX wieku. Wówczas to badania prof. O. Zienkiewicza oraz prof. S. Przemienieckiego doprowadziły do znacznego rozpowszechnienia tej metody w wielu dziedzinach mechaniki i inżynierii. Obecnie jest szeroko wykorzystywana do celów projektowych, optymalizacyjnych, testowych oraz wielu innych [1, 2, 3, 5].

Większość programów MES jest podzielonych na trzy moduły:

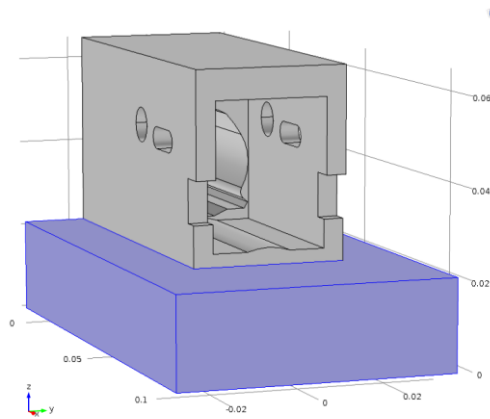
- Preprocesor - służy do przygotowania geometrii, naniesienie siatki elementów, wprowadzenie parametrów materiałowych, wprowadzenie warunków brzegowych.
- Solver – rozwiązuje układ równań.
- Postprocesor – odpowiada za prezentację wyników obliczeń.

5. Wyniki numeryczne

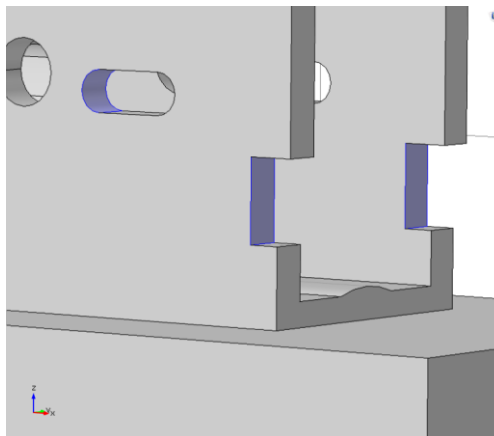
5.1. Podstawa

5.1.1. Przygotowanie modelu

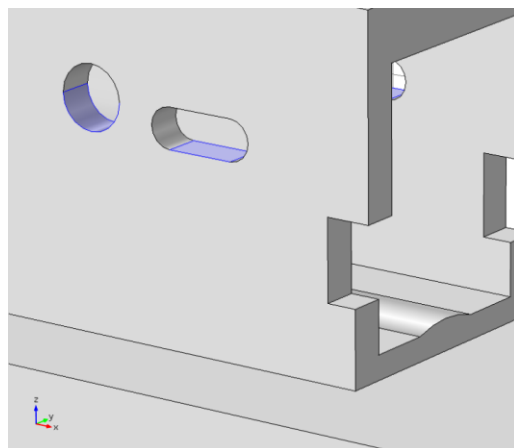
W pierwszej kolejności wygenerowano model w rozszerzeniu „parasolid” (.x_t). kolejnym krokiem było wybranie materiału z wbudowanej biblioteki programu. Wybrano tworzywo „POM (polyoxymethylene)”. Dodano również brakujące właściwości materiałowe na podstawie danych z baz internetowych. Następnie utwierdzono model w jego dolnej części [Rys. 17] oraz dodano siły skupione. Siły te podzielono na skierowane w osi narty (o wartości 4030N) oraz skierowane w kierunku podłoża (o wartości 2230N). Na końcu stworzono siatkę czworościanów i uruchomiono moduł obliczeniowy.



Rys. 26 Sposób utwierdzenia modelu.



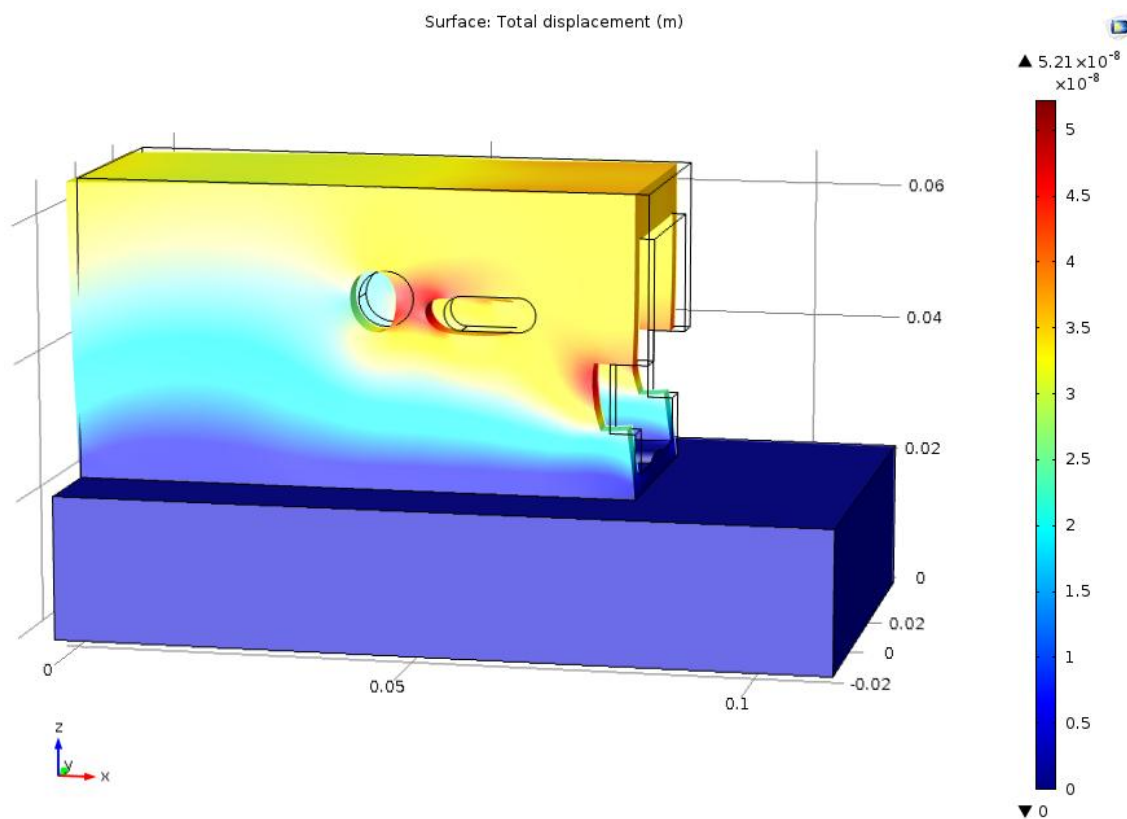
Rys. 27 Siły skupione skierowane w osi narty.



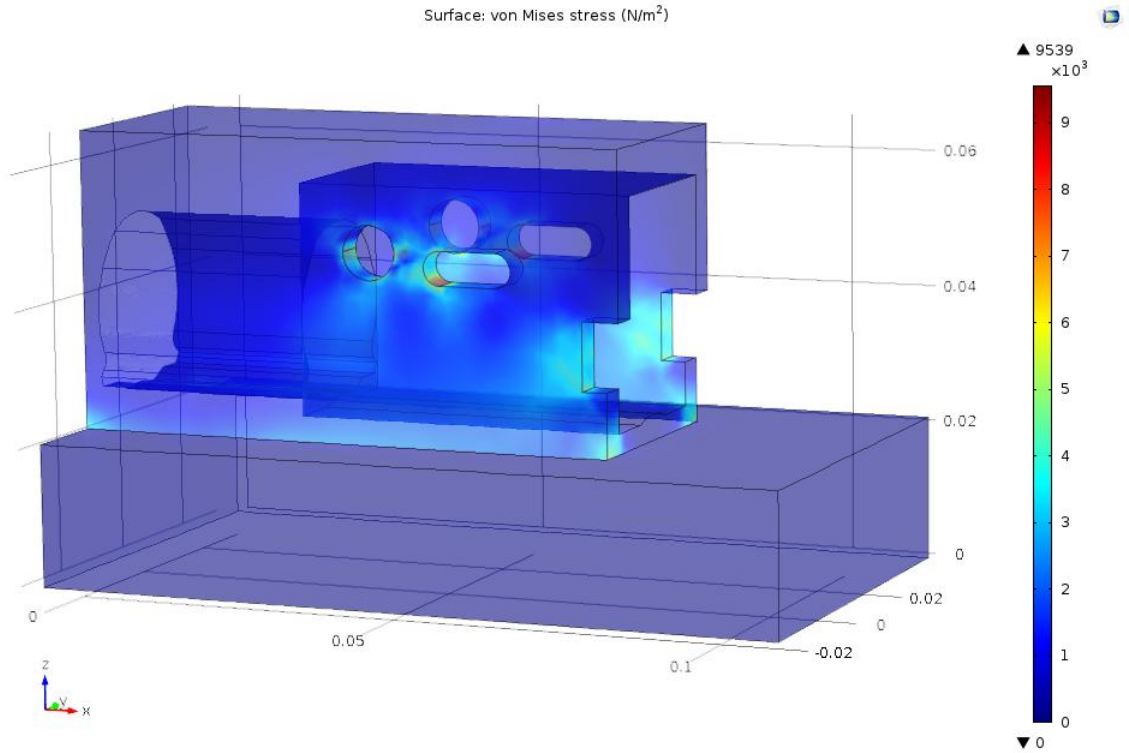
Rys. 28 Siły skupione skierowane w kierunku podłoża.

5.1.2. Wyniki symulacji

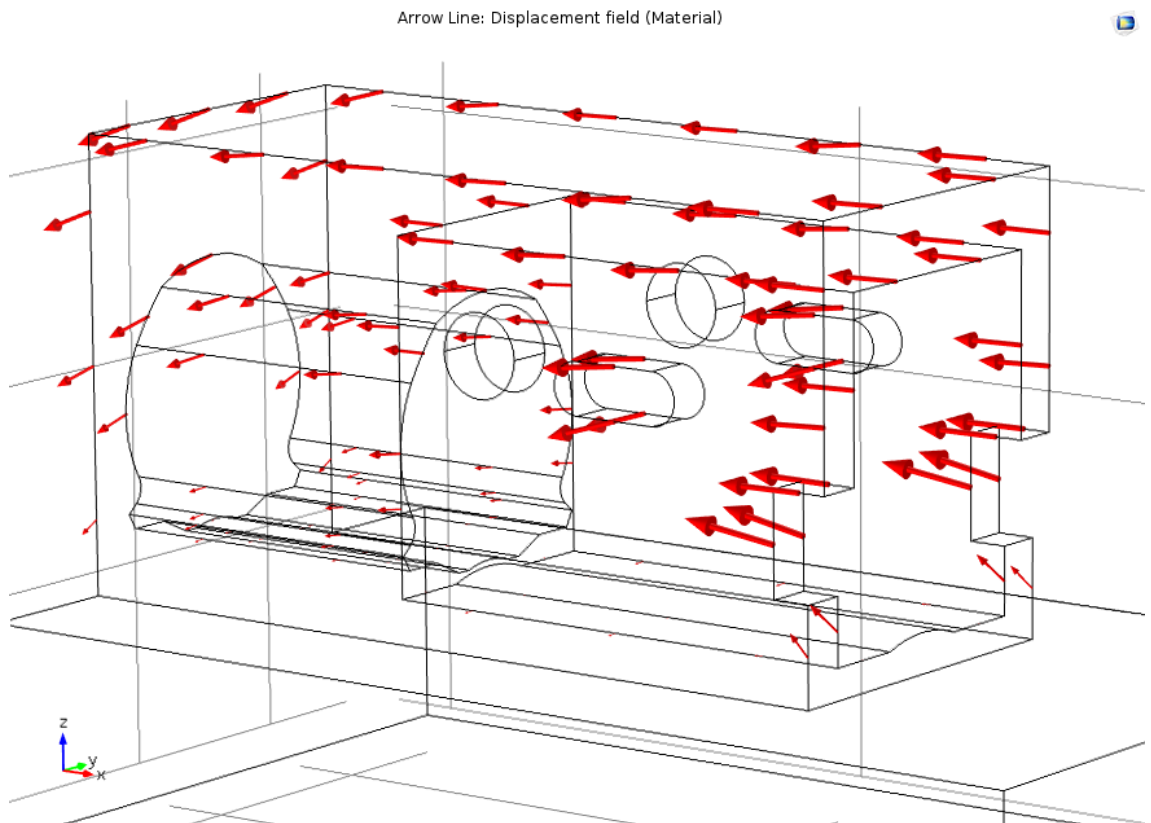
W całym modelu zostały zbadane przemieszczenia oraz naprężenia. Wyniki obliczeń widać na rysunkach poniżej. Jak widać wartości maksymalne są na tyle małe, że nie powodują odkształceń potencjalnie niebezpiecznych dla elementu. Kierunek przemieszczeń skierowany jest głównie w osi narty, ze względu na większe wartości sił w tym kierunku. Naprężenia skupiają się głównie w krawędziach oraz miejscach przyłożenia sił.



Rys. 29 Przemieszczenia w modelu.



Rys. 30 Naprężenia w modelu.

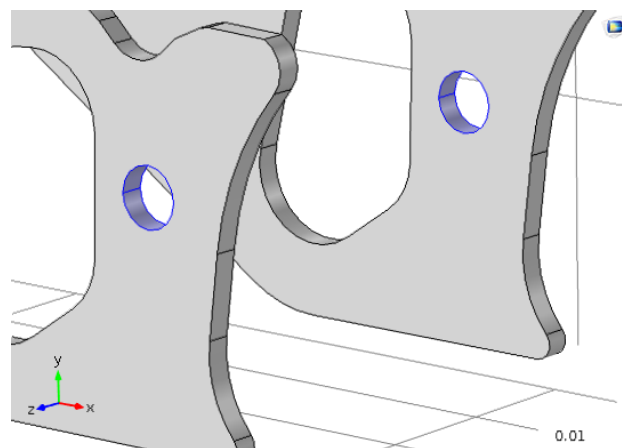


Rys. 31 Kierunki przemieszczeń w modelu.

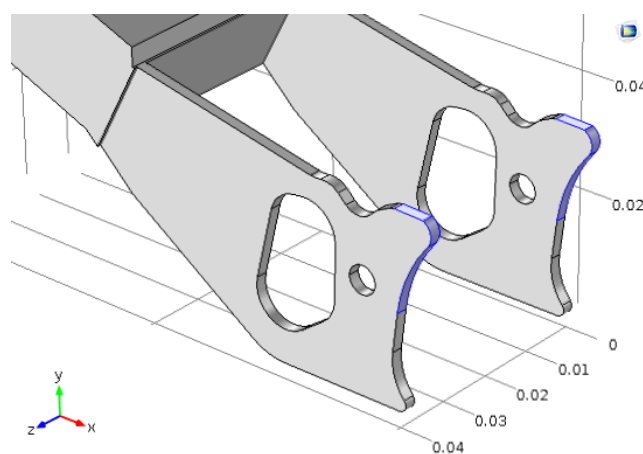
5.2. Dźwignia

5.2.1. Przygotowanie modelu

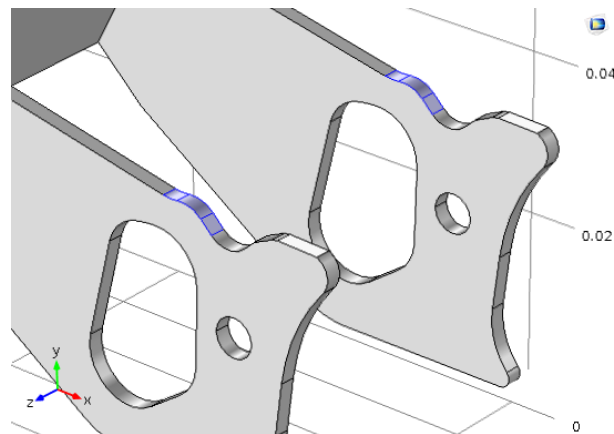
Po wygenerowaniu pliku w rozszerzeniu „parasolid”, wybrano z wbudowanej biblioteki materiał, tj. stop aluminium 7075 oraz dodano brakujące cechy konieczne do obliczeń. Następnym krokiem było dodanie cylindrycznego układu współrzędnych tak, by model obracał się wokół odpowiedniej osi (małego sworznia). Przy pomocy funkcji „Predescribed Displacement” wybrano powierzchnie, na których punkty mogą się obracać tylko wokół osi stworzonej za pomocą wcześniej dodanego układu [Rys. 23]. Ruch obrotowy został zablokowany przez ograniczenie ruchu powierzchni zaznaczonych na rysunku 24. W miejscach zaznaczonych na rysunku 25 przyłożono siły o wartości 3820N. Końcowymi etapami były stworzenie siatki czworościanów oraz uruchomienie modułu obliczeniowego.



Rys. 32 powierzchnie wskazujące oś obrotu detalu.



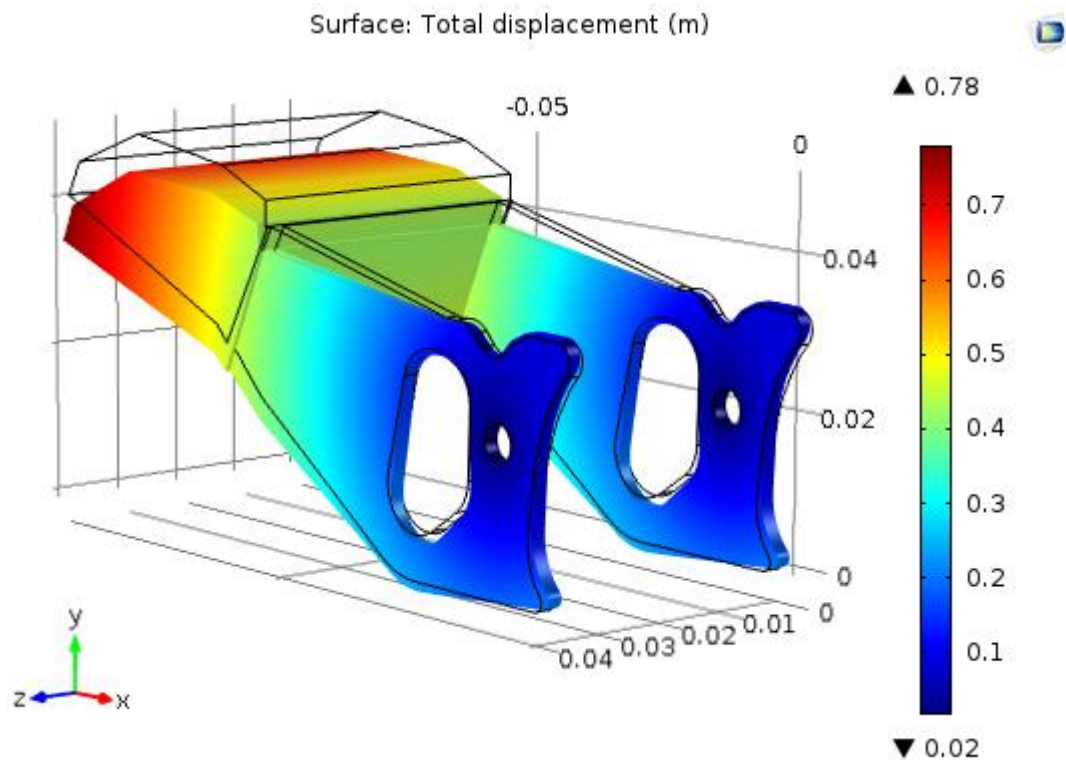
Rys. 33 Zablokowane powierzchnie.



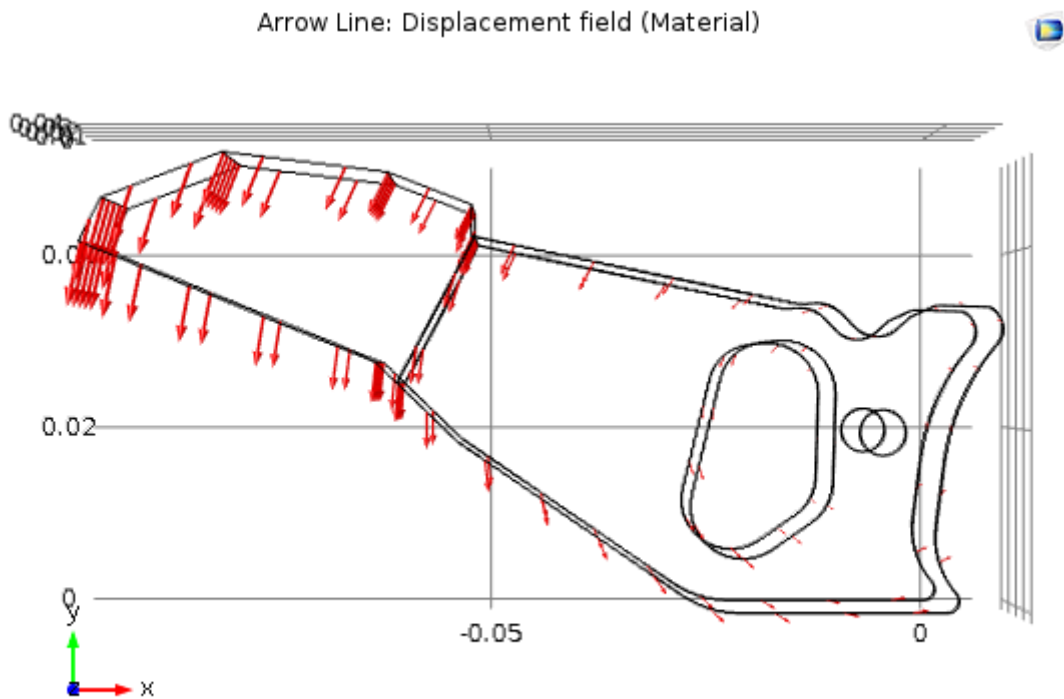
Rys. 34 miejsce przyłożenia sił.

5.2.2. Wyniki symulacji

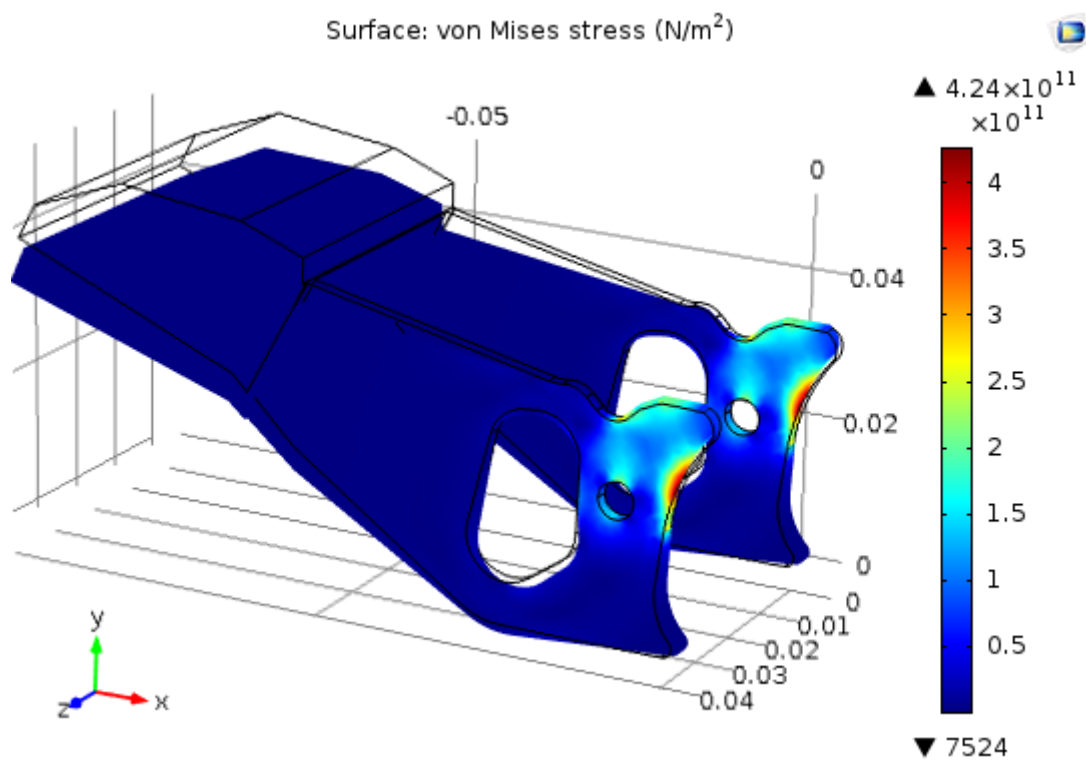
W całym modelu zostały zbadane przemieszczenia oraz naprężenia. Wyniki obliczeń widać na rysunkach poniżej. Przemieszczenie przebiega zgodnie z przewidywaniami, tj. im dany punkt jest dalej od osi obrotu, tym przemieszczenie jest większe. Jego kierunek jest zgodny z kierunkiem działania siły. Naprężenia skupione są na łukach natomiast zanikają na wypustkach widocznych po prawej stronie. Wartości maksymalne naprężeń są na tyle małe, że nie powodują zagrożenia dla elementu. Wartości przemieszczeń wynikają głównie ze sposobu utwierdzenia modelu.



Rys. 35 Wartości przemieszczeń w modelu.



Rys. 36 Kierunek przemieszczenia.

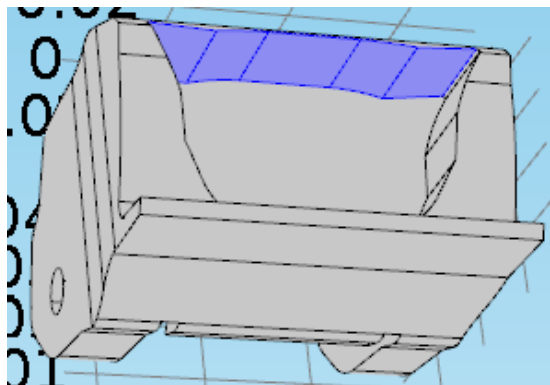


Rys. 37 Wartości naprężeń w modelu.

5.3. Blok podparcia

5.3.1. Przygotowanie modelu

W pierwszej kolejności wygenerowano model w rozszerzeniu „parasolid” (.x_t). Następnie wybrano materiał tj. nylon wypełniony w 35% włóknem szklanym. Dodano wymagane właściwości materiałowe tj. współczynnik Poissona (nie był przyporządkowany do materiału). Gęstość oraz moduł Younga znajdowały się już w bibliotece programu COMSOL Multiphysics 5.0. Kolejnym etapem było podanie warunków brzegowych, wartości sił oraz dodanie układu współrzędnych. Cylindryczny układ współrzędnych umieszczono tak by umożliwić modelowi ruch obrotowy względem osi znajdującej w tylnej jego części. Model unieruchomiono również w ten sposób by po przemieszczeniu się o odległość zbliżoną do tej, w której to zbliża się do wcześniej opisanego punktu krytycznego, (od którego to stopa zaczyna być aktywnie uwalniana z wiązań) nastąpiło jego zablokowanie a siła wpłynęła na powstanie naprężeń. Zadana siła to 2230N. Do zablokowania modelu zostały wykorzystane te same powierzchnie, do których przyłożono siły brzegowe oraz dwie położone bezpośrednio nad nimi. Następnie zbudowano siatkę czworokątów oraz uruchomiono symulację.



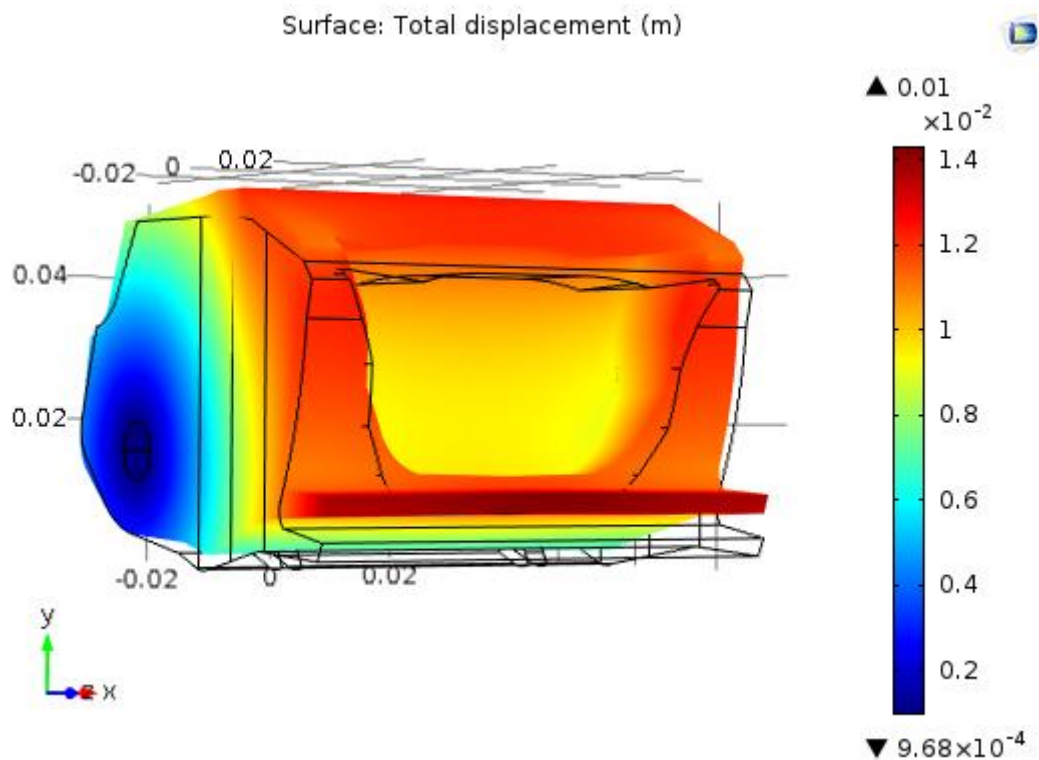
Rys. 38 Miejsca przyłożenia sił brzegowych na bloku podparcia.

5.3.2. Wyniki symulacji

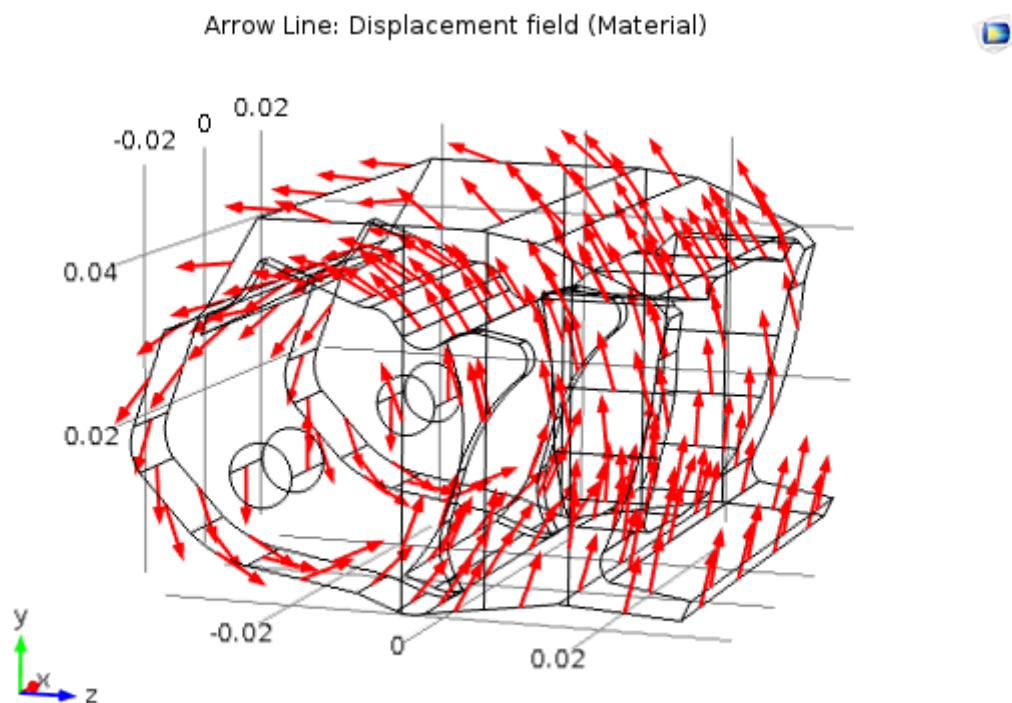
Zbadane zostały przemieszczenia oraz naprężenia w całym elemencie. Ze względu na duże skupienie naprężeń, wykonano dodatkowy rysunek z nałożonym filtrem dolnoprzepustowym, który pokazuje rozkład naprężeń w pozostałych rejonach detalu. Jak widać naprężenia mają bardzo małe wartości a odkształcenia głównie

Modelowanie i analiza mechaniczna wiązań do narciarstwa zjazdowego.

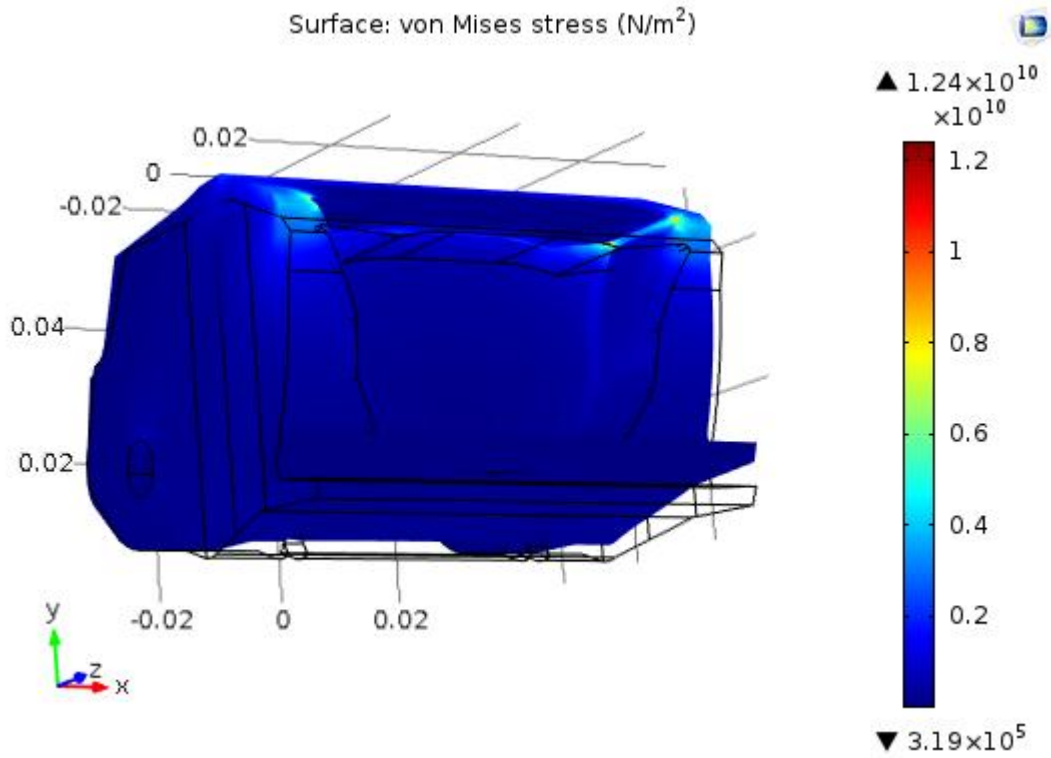
wynikają z przemieszczenia się całego detalu (wszystkie bieżą zgodnie z przewidywanym ruchem bloku).



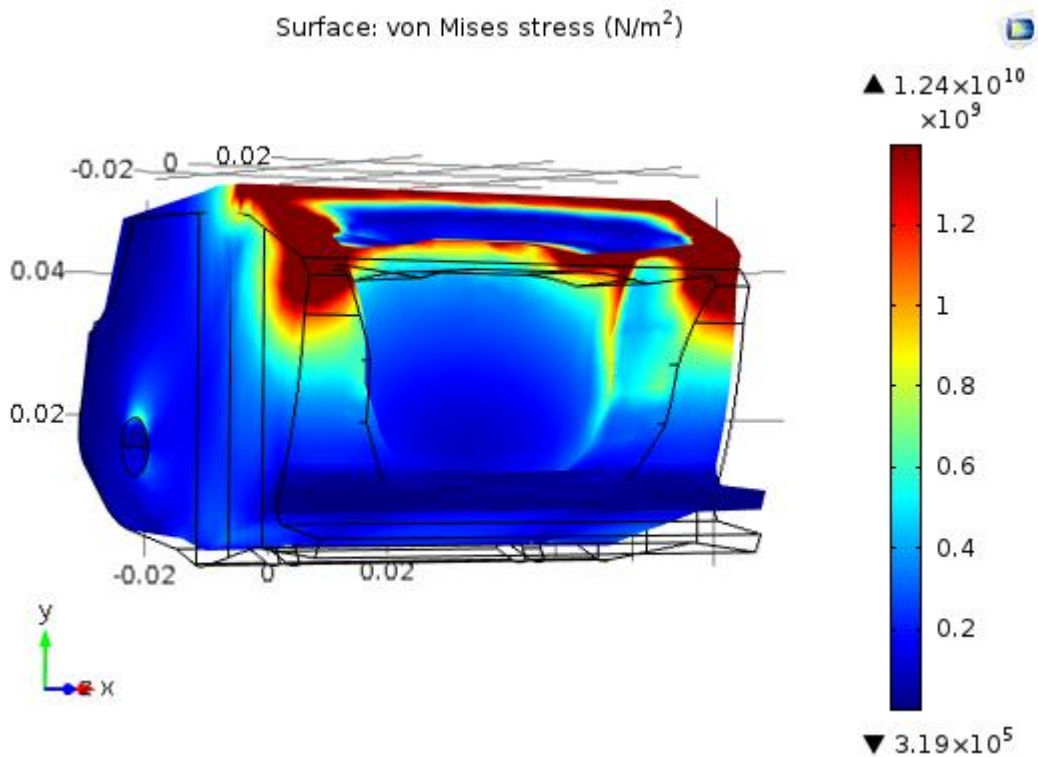
Rys. 39 Wartości przemieszczenia w modelu.



Rys. 40 Kierunek przemieszczenia.



Rys. 41, Naprężenia w całym elemencie.

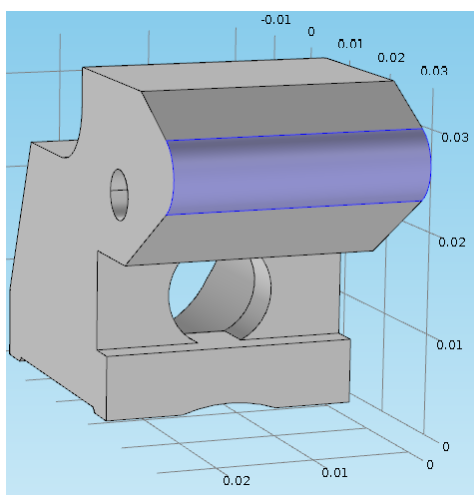


Rys. 42 Wartości naprężeń z pominięciem miejsc najwrażliwszych (ciemna czerwień).

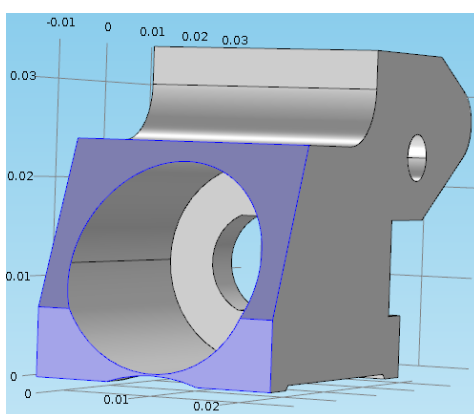
5.4.Kostka

5.4.1. Przygotowanie modelu

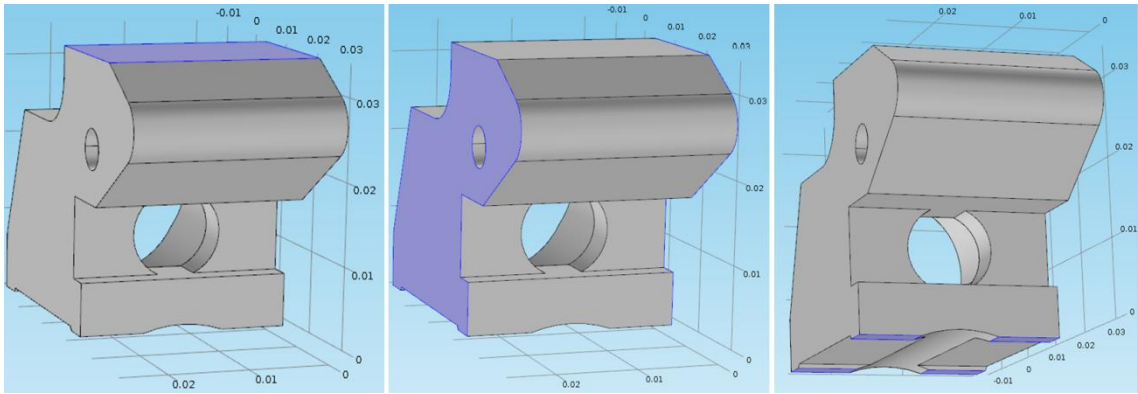
Po wygenerowaniu modelu w rozszerzeniu „parasolid” oraz zaimportowaniem go do programu COMSOL Multiphysics 5.0 dodano właściwości materiałowe dla tworzywa POM. Niestety w bibliotece programu nie znajdowały się potrzebne właściwości, także konieczne było skorzystanie z internetowych baz materiałowych. Siłę skupioną o wartości 4030N przyłożono w miejscu zaznaczonym na rysunku poniżej [Rys. 34]. Model zablokowano z drugiej strony na powierzchniach, które są ograniczane przez podstawę [Rys. 35]. Dodatkowo ruch modelu został zablokowany tak, by odkształcał się jakby był wewnątrz podstawy [Rys. 36]. Ostatnie etapy to stworzenie siatki czworościanów oraz uruchomienie modułu obliczeniowego.



Rys. 43 Miejsce przyłożenia siły brzegowej.



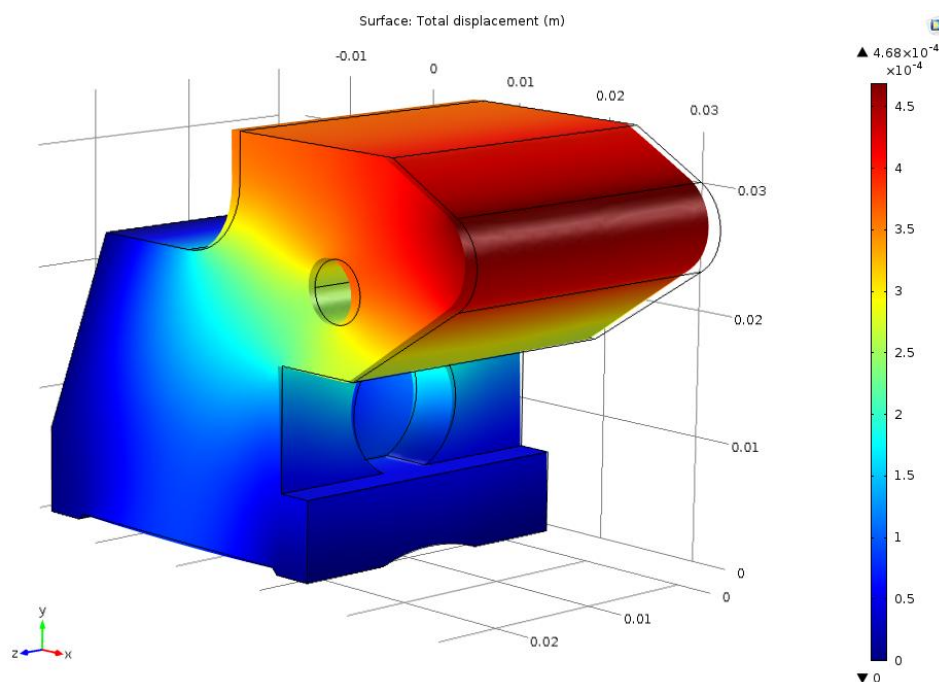
Rys. 44 Miejsce zablokowania modelu.



Rys. 45 Miejsca zablokowania ruchu kostki.

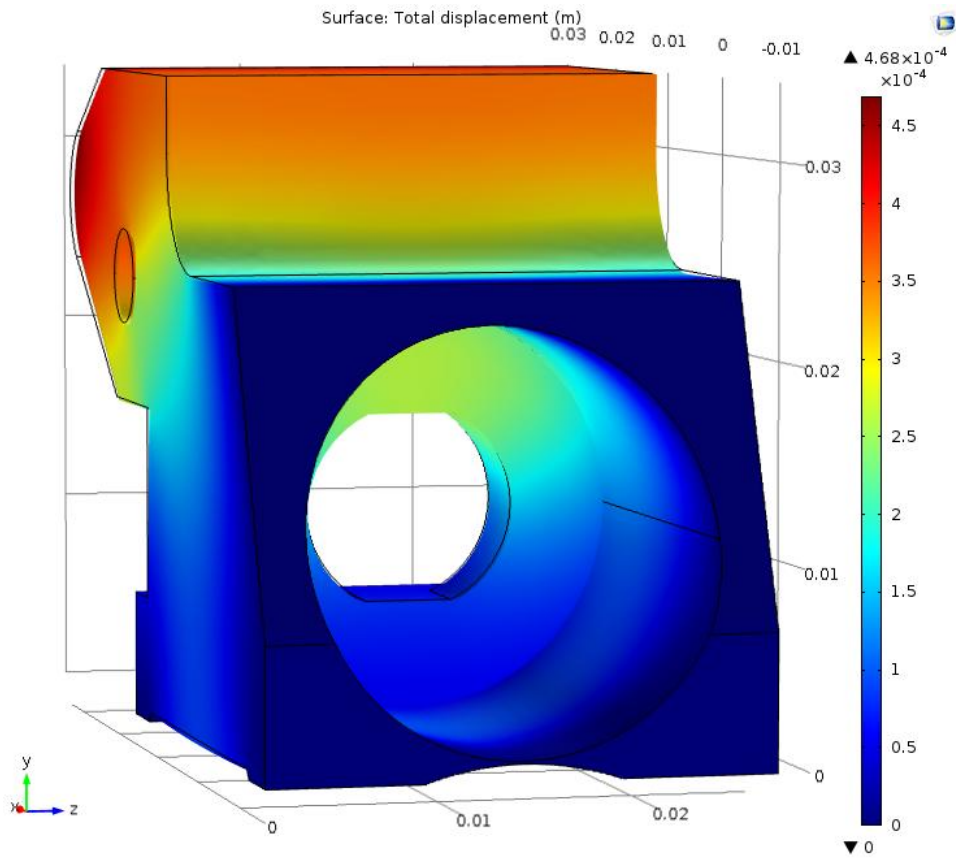
5.4.2. Wyniki symulacji

Zbadane zostały przemieszczenia oraz naprężenia w całym elemencie. Wyniki graficzne oraz wartości skrajne przedstawiono na rysunkach poniżej. Górna część elementu została najmocniej odkształcona, wynika to ze sposobu jego utwierdzenia. Prawdopodobnie z tego powodu jest do niej mocowany w tym miejscu dodatkowy element metalowy, który chroniłby kostkę lub podstawę przed nadmiernym zużyciem ściernym. Otwór także uległ stosunkowo dużym odkształceniom. Naprężenia wyraźnie skupiają się w zagięciu za górną część modelu oraz w otworze pod mały sworzeń i krawędziach w tylnej części modelu. Wszystkie wartości maksymalne (naprężenia oraz odkształcenia) są zbyt małe by trwale uszkodzić element.

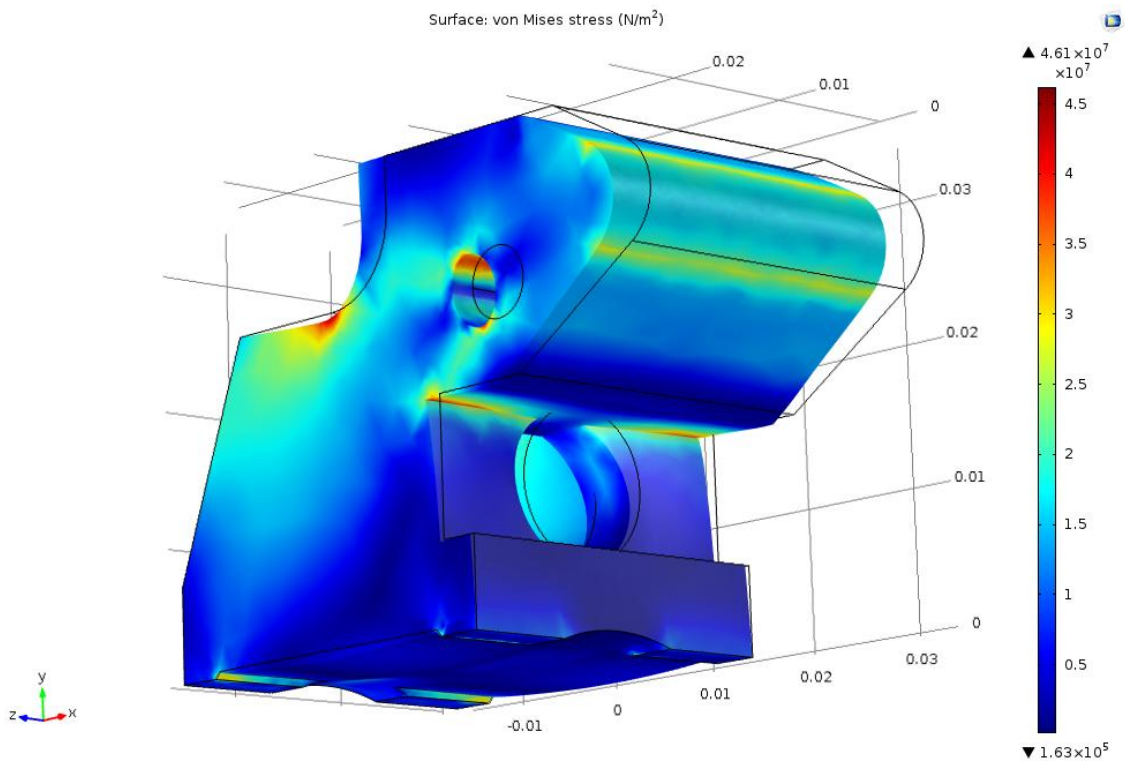


Rys. 46 Wartości przemieszczenia w modelu.

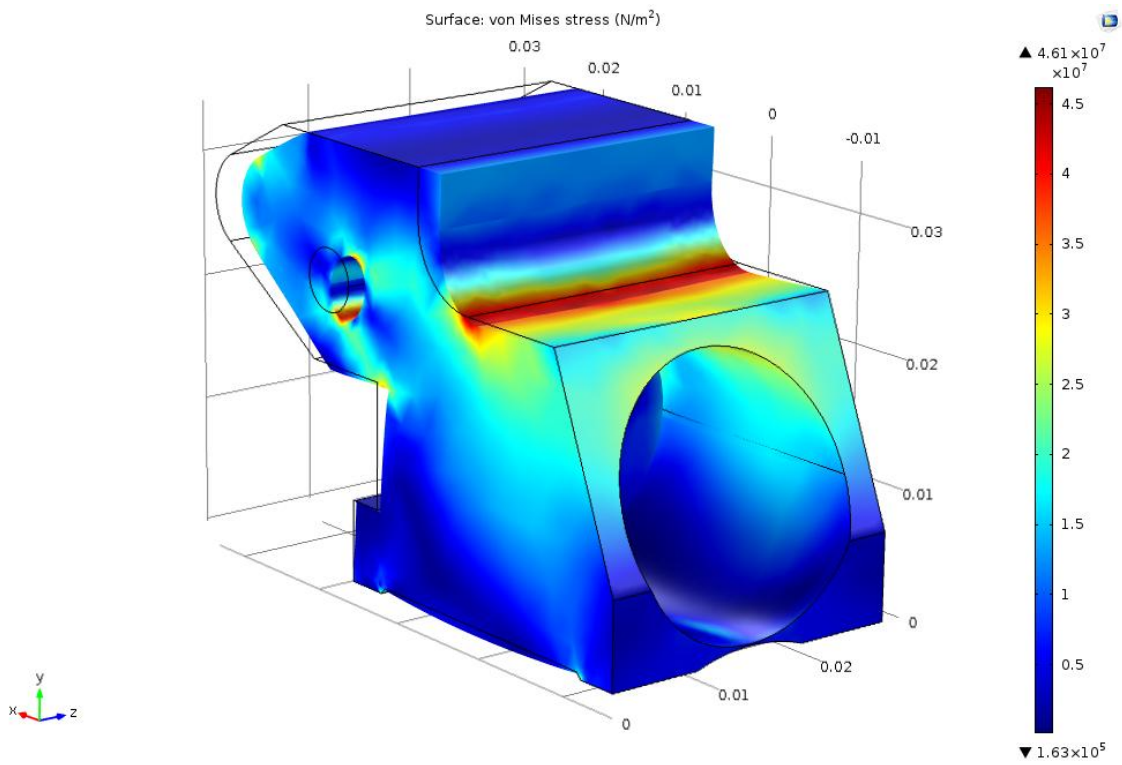
Modelowanie i analiza mechaniczna wiązań do narciarstwa zjazdowego.



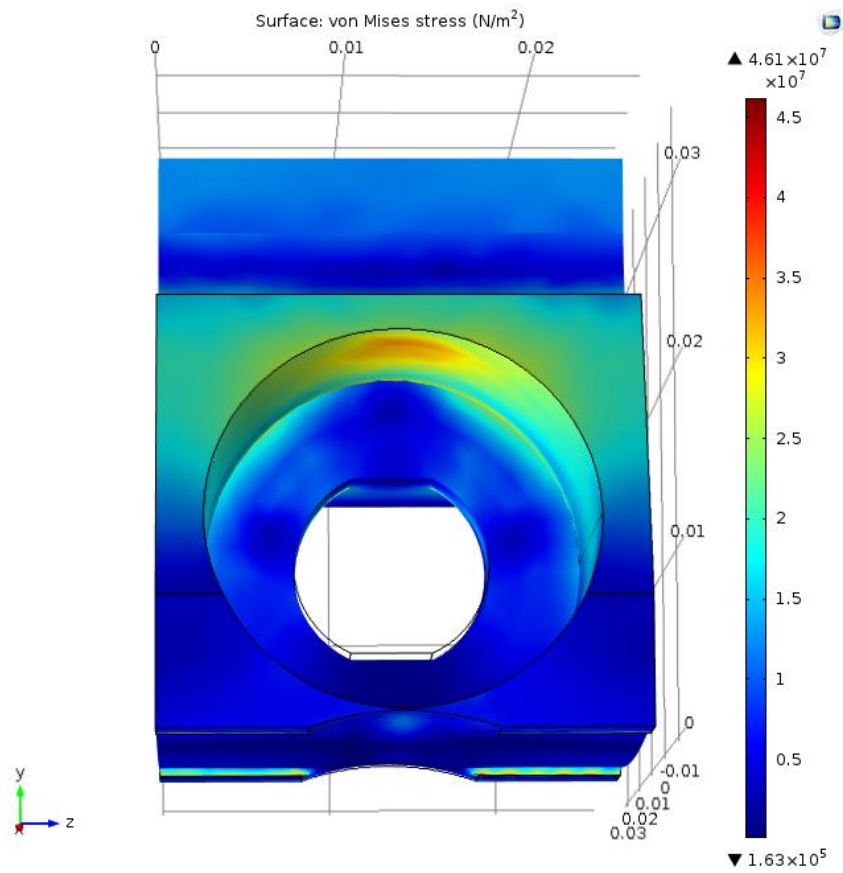
Rys. 47 Wartości przemieszczenia w modelu od strony tylnej.



Rys. 48 Wartości naprężeń w modelu.



Rys. 49 Wartości naprężeń w modelu.

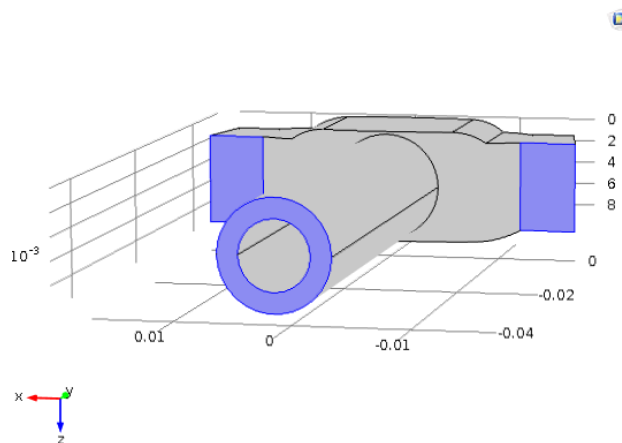


Rys. 50 Wartości naprężeń w modelu.

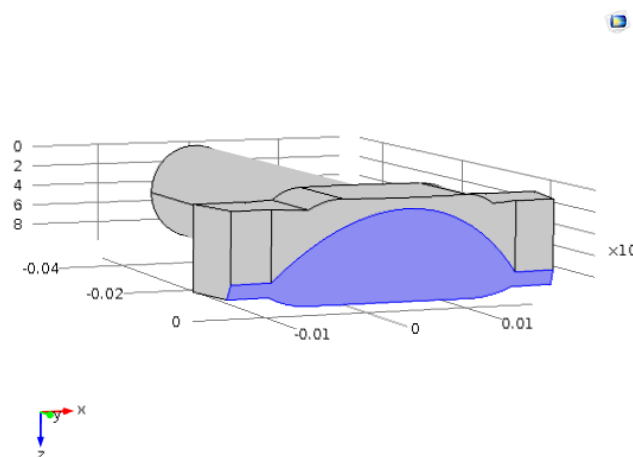
5.5. Popychacz

5.5.1. Przygotowanie modelu

Model przygotowano analogicznie do pozostałych. Użyty materiał to stop aluminium z cynkiem 7075, przyłożona siła ma wartość 4030N. Element na stałe zablokowano w miejscach oznaczonych na rysunku numer 42.



Rys. 51 Miejsca zablokowania elementu.

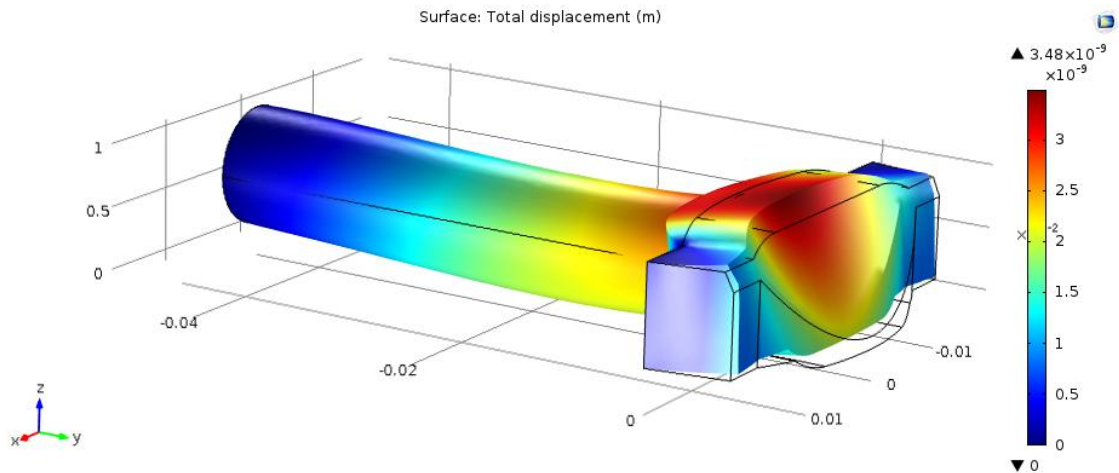


Rys. 52 Miejsce przyłożenia siły skupionej.

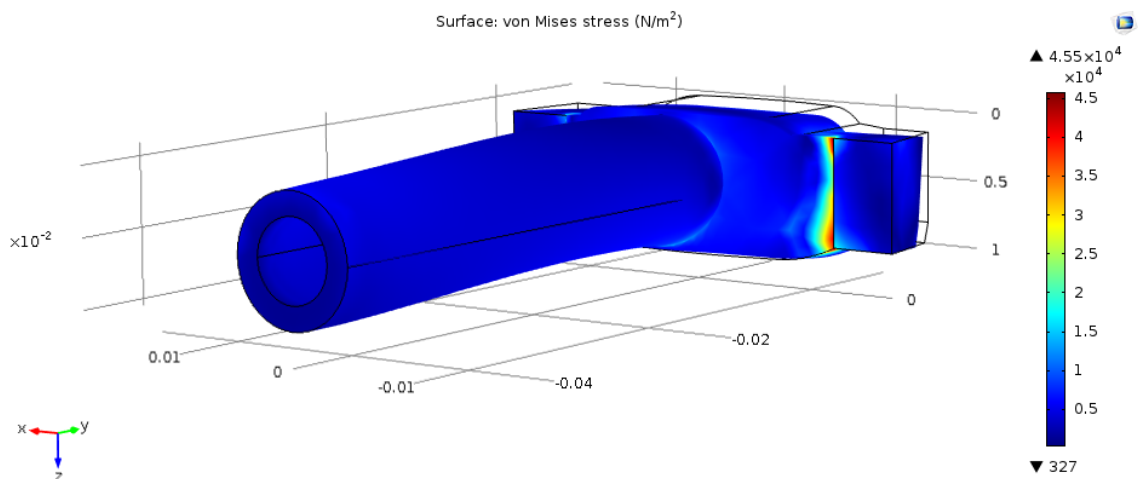
5.5.2. Wyniki symulacji

W całym modelu zostały zbadane przemieszczenia oraz naprężenia. Wyniki obliczeń widać na rysunkach poniżej. Najmocniej została wgnieciona część czołowa, która to przyjmuje impet uderzenia. Dodatkowo całość wygięła się ku dołowi co wynika z kształtu elementu. Z tej samej przyczyny odkształcenia zwrócone są pod kątem w praktycznie całym elemencie. Naprężenia skupione są w krawędziach po obu bokach popychacza, głównie w pobliżu miejsc utwierdzonych. Wartości maksymalne naprężeń

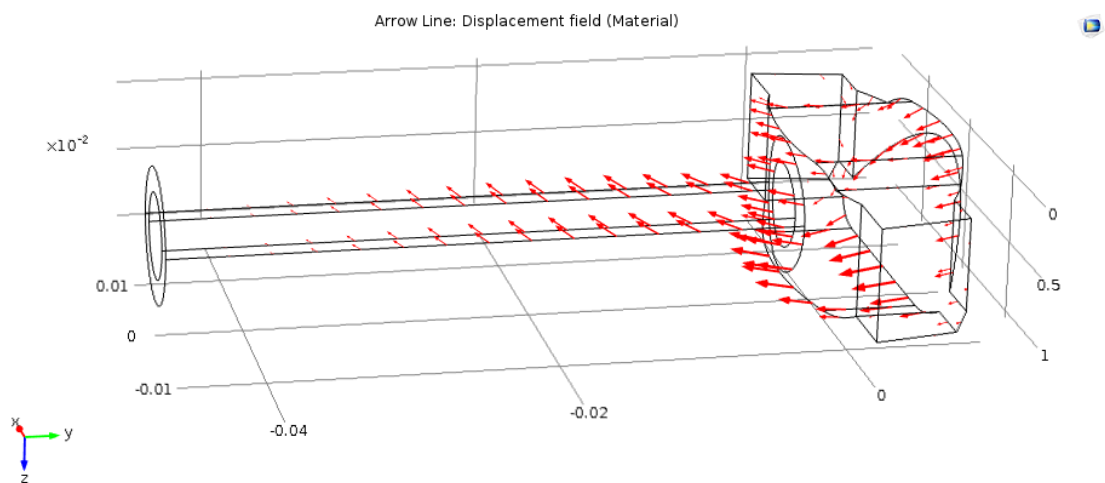
nie są na tyle duże by miały one powodować trwałe uszkodzenie elementu. Tak samo przemieszczenia mają małe wartości, rzędu 10^{-9} metra.



Rys. 53 Sposób odkształcenia modelu (obrócony w osi Y).



Rys. 54 Naprężenia w modelu.

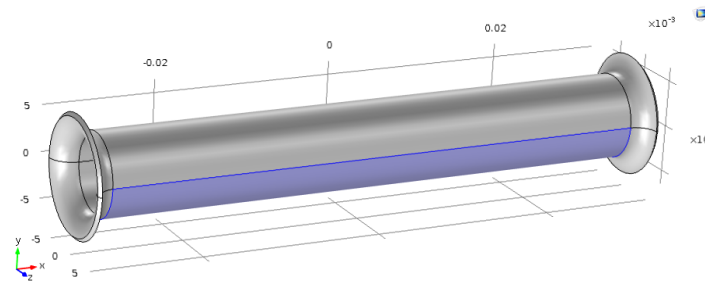


Rys. 55 Kierunek przemieszczeń w modelu.

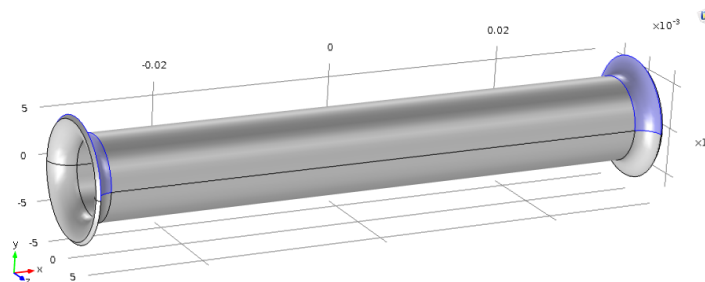
5.6. Sworzeń duży

5.6.1. Przygotowanie modelu

Model przygotowano analogicznie do pozostałych. Użyty materiał to stop aluminium z cynkiem 7075, przyłożona siła ma wartość 2230N. Element na stałe zablokowano w miejscu oznaczonym na rysunku numer 47.



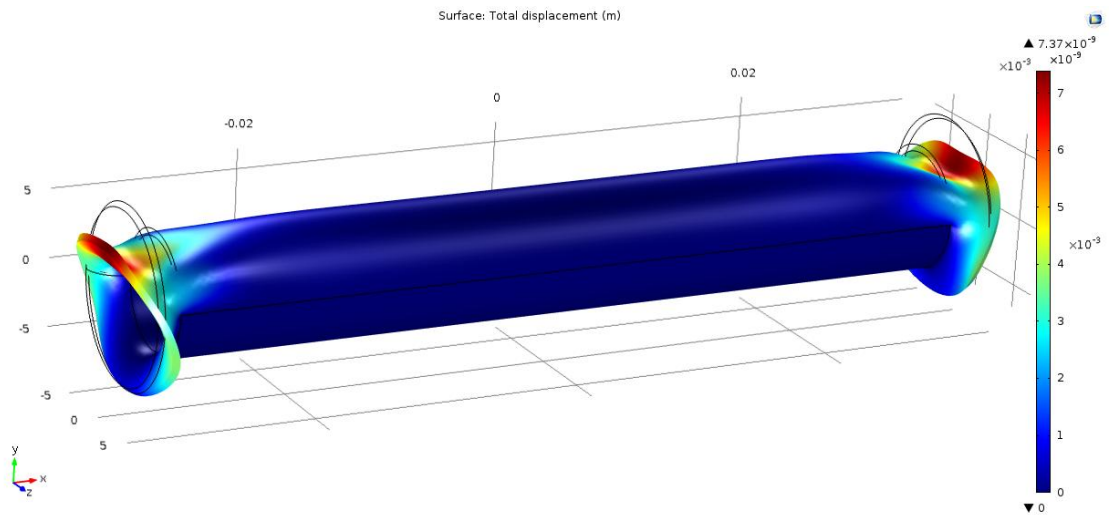
Rys. 56 Miejsce utwierdzenia elementu.



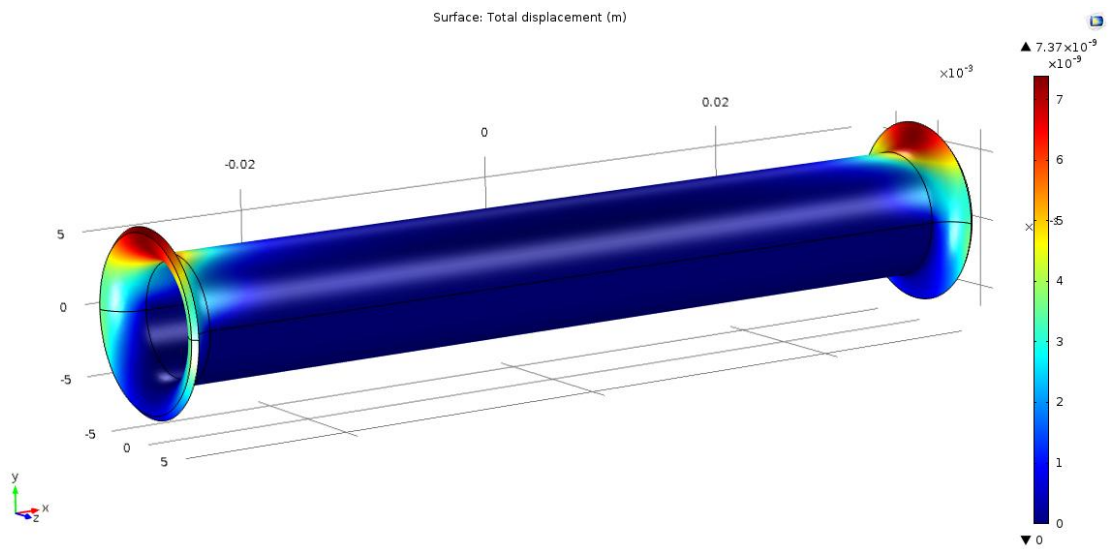
Rys. 57 Miejsca przyłożenia sił skupionych.

5.6.2. Wyniki symulacji

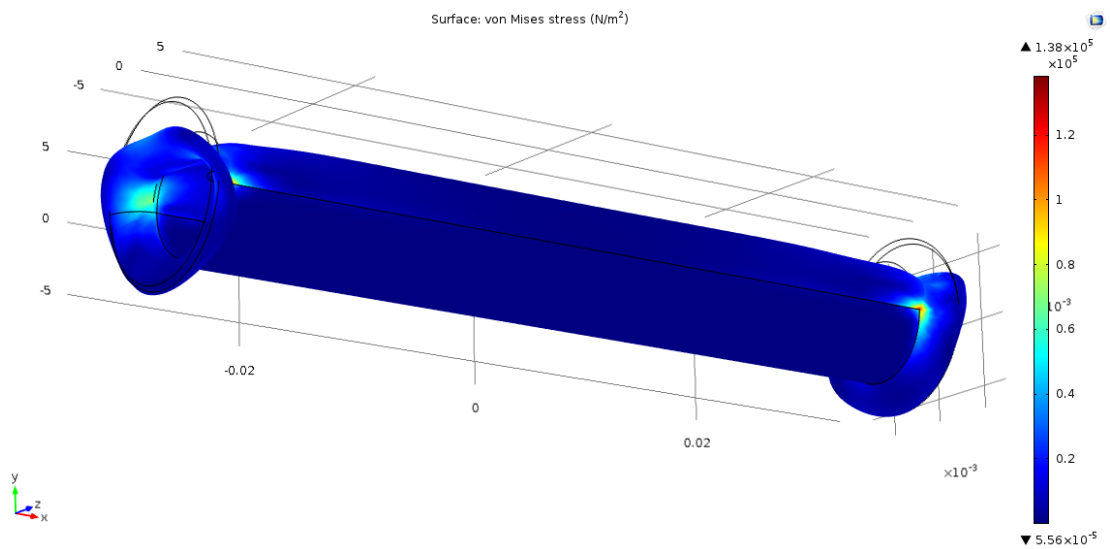
Model został zbadany w sposób analogiczny do pozostałych. Wyniki przedstawiono na rysunkach poniżej. Ze względu na dużą skalę „wyolbrzymienia odkształceń” zaproponowaną przez program, na rysunku 50 dodatkowo zobrazowano je w skali 1:1. Podobne różnice były widoczne w pozostałych modelach. Odkształcenia jak i naprężenia skupiają się w górnej części elementu w pobliżu miejsc przyłożenia sił skupionych. Naprężenia są przy tym największe w miejscu styku z utwierdzoną połową sworznia. Podobnie jak w pozostałych modelach naprężenia oraz odkształcenia nie stanowią zagrożenia dla elementu oraz jego funkcjonowania całym mechanizmie.



Rys. 58 Przemieszczenia w modelu.



Rys. 59 Przemieszczenia w modelu w skali 1:1.



Rys. 60 Naprężenia w modelu.

6. Wnioski i podsumowanie

Wszystkie elementy zostały poddane naprężeniom, o małych wartościach. Przemieszczenia również miały wartości ułamków milimetrów. Wnioskować można z tego iż nie miałyby one wpływu na prawidłową pracę wiązań oraz tym bardziej nie powodowałyby ich uszkodzenia. Zwiększenie dokładności modeli a przez to liczby karbów nie powinno również skutkować wynikami negatywnymi. Dostrzec można iż użyto więcej materiału niż było to konieczne, a wyrób gotowy jest w stanie przetrwać długi okres eksploatacji. Wiązania zostały stworzone z założeniem, że używają je osoby mogące je uszkodzić w sposób nieprzewidziany, dlatego zastosowano materiały o odpowiednich właściwościach, wytrzymałości i sztywności. Zrozumiałe jest obecne, pracowanie nad pozostałymi właściwościami, które muszą one spełniać a które są kluczowe w sporcie jak zmniejszenie masy, odpowiednia sztywność. Tak, samo logiczne wydaje się, że w związku z osiągnięciem pewnego przystępnego poziomu bezpieczeństwa, który współczesne wiązania zapewniają szuka się również innych metod przyciągnięcia klienta (design, cena).

7. Streszczenie

W ramach pracy wykonano symulacje komputerowe, których wynikiem były wartości rozkładu naprężeń oraz przemieszczeń wywołanych siłami skupionymi. By te wyniki uzyskać w pierwszej kolejności zwiaryowano rzeczywiste elementy i stworzono modele bryłowe 3D w programie SolidWorks 2014. Następnie zaimportowano je do programu COMSOL Multiphysics 5.0. Ostatecznie do modeli dodano właściwości materiałowe, utwierdzono je lub ograniczono ich ruch oraz wybrano punkty przyłożenia, kierunki i wartości sił oddziaływujących. W wyniku przeprowadzonych symulacji wszystkie elementy wykazały się wystarczającą wytrzymałością. Przemieszczenia oraz naprężenia w nich występujące miały wartości, które nie sugerowały, że mogą wpłynąć na pracę mechanizmu.

Abstract of thesis

The part of thesis was to prepare FEM simulations of stress placement and total displacement resulted by focused forces. First in order, to receive those values was measuring dimensions of every part. Then the 3D models were prepared in program SolidWorks 2014. Next step was to import them to program COMSOL Multiphysics 5.0. Last one was to add material parameters to models, fix them or to confine their movement and add focused forces (their point of attach, value, direction). Results of prepared simulations showed that maximal total displacements and stress values have no influence on mechanism ability to work property.

8. Literatura

1. P. Wielentejczyk, „*Teoria sprężystości*”, skrypt opracowany na podstawie wykładów prof. dr hab. inż. J. Rakowskiego, Politechnika Poznańska, 2004.
2. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., “*The Finite Element Method*”, Vol. 1-3 (5th ed.), Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.
3. A. Wysokowski, J. Howis “*Metody obliczeń konstrukcji przepustów. Cz. IV. Obliczenia przepustów metodą elementów skończonych (MES)*”, “Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne” 2011, nr. 20.
4. Wolfgang Lert, *A Binding Revolution*, „*Skiing Heritage Journal, the long story of short skis*”, 2002, vol. 14, str. 25

Źródła internetowe, dostępność styczeń 2016r:

5. Strona z wykładami od prof. dr hab. inż. Tomasza Stręka,
<http://www.strek.strefa.pl>
6. Skrypt laboratorium Nauki o materiałach Politechniki Łódzkiej,
<http://iim.p.lodz.pl/media/materialy/mat-kier-MiBM-AiR-PiP-Trans/Cwiczenie%2012.pdf>
7. Firma zajmująca się wyrobami m.in. ze stopu aluminium PA9,
<http://www.oberonrd.pl>
8. Firma zajmująca się wyrobami m.in z polioksymetylenu,
<http://www.plastem.pl>
9. Firma zajmująca się wyrobami m.in z polioksymetylenu,

<http://www.profilex.com>

10. Magazyn o narciarstwie, <http://skimagazyn.pl>
11. Strona producenta wiązań narciarskich, <http://marker.net>
12. Baza materiałów, <http://www.goodfellow.com>
13. Baza materiałów, <http://www.matweb.com>

Źródła grafik, dostępność styczeń 2016r:

14. <http://www.bergsport.pl/p/Ochraniacz-zbroja-DAINESE-Manis-Jacket-Pro-rozmiar-M,5371>
15. <http://www.okazje.info.pl/sh/sport-i-hobby/ochraniacze-narciarskie-leki-na-golenie-worldcup-pro.html>
16. <https://www.skatepro.com.pl/316-15055.htm>
17. <http://www.nartyszerwis.pl/pancerz-sport-lite-1-forcefield-test-i-ogolne-wrazenia>
18. <http://www.top-narty.pl/narciarstwo-zjazdowe/narty-zjazdowe/racetiger-speedwall-gs-uvo-detail>
19. <http://www.ekosport.co.uk/volkl-racetiger-speedwall-gs-uvo-demo-rmotion2-12.0-15-p-1-29763.html>
20. http://www.wikiwand.com/en/Cable_binding
21. Angielska strona wikipedii o wiązaniach narciarskich,
https://en.wikipedia.org/wiki/Ski_binding
22. <http://expertsinsnow.com/wiazanie-look-pivot-14-wide-kiwi-green-p-9.html>
23. Metoda triangulacyjna pomiaru,
<http://automatykab2b.pl/tematmiesiaca/4135-laserowe-pomiary-wielkosci-geometrycznych-czesc-1-czujniki-laserowe?showall=1>
24. http://www.holtex.pl/wgrane_pliki/PA6%20GF30.pdf
25. <http://www.theaccessroad.com/12/all-about-din-settings>
26. Maszyny do pomiaru siły wypięcia, <http://www.montana-international.com>