

Politechnika Poznańska

Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej

Praca dyplomowa magisterska

Optymalizacja topologiczna wspornika technicznego wytwarzanego technologią druku przestrzennego

inż. Michał Wielgat

Promotor: dr hab. Tomasz Stręk, prof. PP
Instytut Mechaniki Stosowanej
Wydział Inżynierii Mechanicznej

Poznań 2024

SPIS TREŚCI

Streszczenie.....	3
Abstract.....	3
1 Wprowadzenie.....	4
1.1 Wstęp.....	4
1.2 Cel i zakres pracy.....	4
1.3 Układ pracy.....	4
2 Analiza MES zagadnienia mechaniki ciała stałego.....	6
2.1 Metoda elementów skończonych.....	6
2.2 Prawo Hooke'a.....	7
2.3 Równanie Naviera.....	8
2.4 Programy do analizy MES.....	8
3 Optymalizacja topologiczna.....	10
3.1 SIMP.....	10
3.2 ESO.....	12
3.3 LSM.....	13
4 Druk przestrzenny.....	14
4.1 Żywcze drukarki SLA, DLP i MSLA.....	15
4.1.1 Porównanie metody TE i BE.....	15
4.1.2 Technologia SLA.....	16
4.1.3 Technologia DLP.....	16
4.1.4 Technologia MSLA.....	16
4.2 Drukarki FDM.....	17
4.3 Drukarki SLS.....	18
5 Oprogramowanie CAD.....	20
5.1 Autodesk Inventor Professional 2024.....	20
5.2 nTop.....	21
6 Projekt optymalizacji topologicznej.....	22
6.1 Ustalenie funkcji i formy badanej części.....	23
6.2 Zaprojektowanie części w programie CAD.....	24
6.3 Przygotowanie optymalizacji topologicznej w nTop.....	25

7 Wyniki optymalizacji topologicznej.....	27
7.1 Wynik optymalizacji topologicznej dla siatki 1 mm.....	27
7.2 Wynik optymalizacji topologicznej dla siatki 2 mm.....	28
7.3 Wynik optymalizacji topologicznej dla siatki 3 mm.....	29
7.4 Przekroje wyników optymalizacji.....	30
8 Wyniki badania MES.....	32
8.1 Wspornik przed optymalizacją.....	32
8.2 Optymalizacja z siatką 1 mm.....	33
8.3 Optymalizacja z siatką 2 mm.....	34
8.4 Optymalizacja z siatką 3 mm.....	35
9 Podsumowanie i wnioski.....	37
Literatura.....	39

STRESZCZENIE

W pracy za cel objęto przeprowadzenie optymalizacji topologicznej wspornika technicznego oraz wykonanie analizy wytrzymałościowej części przed oraz po optymalizacji. Na początku przedstawiono podstawowe zagadnienia związane z metodą elementów skończonych (MES), optymalizacją topologiczną oraz drukiem przestrzennym. Do zaprojektowania wspornika oraz przeprowadzenia badań użyto dwóch programów CAE: Autodesk Inventor Professional 2024 oraz nTop. Opisano kroki podjęte w celu przeprowadzenia optymalizacji i analizy wspornika. Wykonano trzy optymalizacje topologiczne, wykorzystując siatki o różnych rozmiarach elementów skończonych. Użyto MES do obliczenia naprężeń oraz przemieszczeń występujących we wspornikach. Otrzymane w badaniu dane zostały użyte do porównania właściwości wspornika nieoptymalizowanego oraz wsporników zoptymalizowanych.

ABSTRACT

The aim of this paper was to conduct topology optimization of a technical support with the goal of performing structural analysis of a part before and after optimization. The first sections explain the basics of finite element method (FEM), topology optimization and 3D printing. To design and analyze the support two CAE programs were utilized: Autodesk Inventor Professional 2024 and nTop. Steps required to conduct topology optimization and structural analysis of the support were described. Three separate topology optimizations were conducted, using three separate meshes with different finite element sizes. FEM was used to calculate stress and displacement of all the supports. The resulting data was gathered and used to compare unoptimized support with the optimized supports.

1 WPROWADZENIE

1.1 WSTĘP

Technologia druku przestrzennego, zwana także wytwarzaniem przyrostowym, znajduje coraz większe znaczenie w przemyśle wytwórczym. Rozwój tej technologii produkcyjnej pozwala na zwiększenie opłacalności wytwarzania części o skomplikowanych kształtach. Złożone geometrie uzyskane podczas optymalizacji topologicznej stanowią wyzwanie dla tradycyjnych metod wytwarzania, ale wykorzystując wytwarzanie przyrostowe można pominąć niektóre z problemów występujących w tradycyjnej obróbce, np. konieczność zapewnienia dostępności wiertła frezarki do wnętrza części. Optymalizacja topologiczna pozwala wykorzystać potencjał druku przestrzennego, ponieważ tworzone za pomocą tej metody części cechują się znakomitą wydajnością w stosunku do ich masy.

1.2 CEL I ZAKRES PRACY

Celem tej pracy jest przeprowadzenie optymalizacji topologicznej wspornika technicznego oraz wykonanie analizy wytrzymałościowej części przed oraz po optymalizacji. Badanie wytrzymałościowe zostanie wykonane z użyciem metody elementów skończonych (MES). W celu porównania wyników zostaną wzięte pod uwagę naprężenia zredukowane von Misesa, przemieszczenie oraz masa części. Optymalizacja topologiczna zostanie przeprowadzona dla trzech przypadków, używając podczas każdej optymalizacji innego rozmiaru elementów siatki MES. Model wspornika stworzono w programie Autodesk Inventor Professional 2024, a optymalizację topologiczną oraz analizę MES przeprowadzono w programie nTop [18, 19].

1.3 UKŁAD PRACY

Pracę podzielono na rozdziały przedstawiające podstawowe zagadnienia związane z tematem oraz rozdziały opisujące wykonywane czynności oraz badania. W pierwszym rozdziale znajduje się krótki wstęp wyjaśniający znaczenie optymalizacji topologicznej oraz druku przestrzennego. Następnie został opisany cel pracy oraz wspomniano metody i narzędzia użyte do osiągnięcia tego celu.

Drugi rozdział ma za zadanie wprowadzić podstawowe informacje o metodzie elementów skończonych. Oprócz podstawowej wiedzy poruszono też kwestie użycia tej metody do przeprowadzenia analizy wytrzymałościowej części.

W trzecim rozdziale przedstawiono podstawy zagadnienia optymalizacji topologicznej. Wymieniono też trzy najpopularniejsze metody optymalizacji topologicznej, jednocześnie opisując cechy oraz działanie tych metod.

W czwartym rozdziale wprowadzono zagadnienia związane z drukiem przestrzennym. Opisano metody druku żywicznego pod względem strony naświetlania wydruku oraz systemów kierowania światła na wydruk. Wspomniano też o drukarkach FDM, pokazując działanie popularnego układu wykorzystującego tą technologię. Wspomniano też o drukarkach SLS i wymieniono zalety i wady wszystkich technologii druku przestrzennego.

Piąty rozdział został przeznaczony na przedstawienie programów CAD użytych w tej pracy. Po krótkim wstępie opisano możliwości programu Autodesk Inventor Professional 2024. Następnie uzasadniono wykorzystanie programu nTop.

Szósty rozdział obejmuje kroki wykonane w celu przeprowadzenia optymalizacji topologicznej. Przedstawiono wstępną koncepcję badania wspornika oraz jego nieoptymalizowaną wersję. Podano też parametry optymalizacji oraz warunki brzegowe.

W rozdziale siódmym zaprezentowano zoptymalizowane modele wspornika dla wszystkich trzech wariantów siatki elementów skończonych. Pokazano też przekroje części i skomentowano uzyskane geometrie.

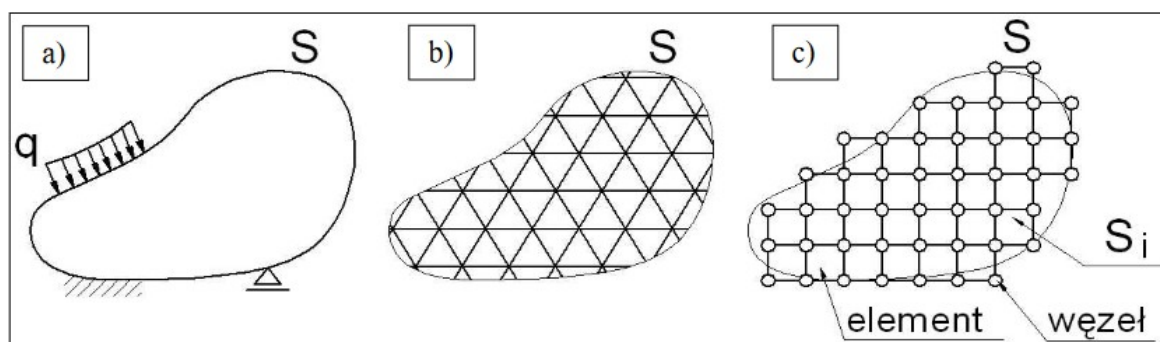
Ósmy rozdział zawiera wynik symulacji MES. Umieszczono w nim analizę wspornika przed optymalizacją oraz trzech wsporników po optymalizacji. Podano parametry otrzymanych modeli oraz skomentowano wykresy naprężeń zredukowanych von Misesa.

Rozdział dziewiąty służy podsumowaniu przeprowadzonych badań oraz wyciągnięciu wniosków z otrzymanych wyników.

2 ANALIZA MES ZAGADNIENIA MECHANIKI CIAŁA STAŁEGO

2.1 METODA ELEMENTÓW SKOŃCZONYCH

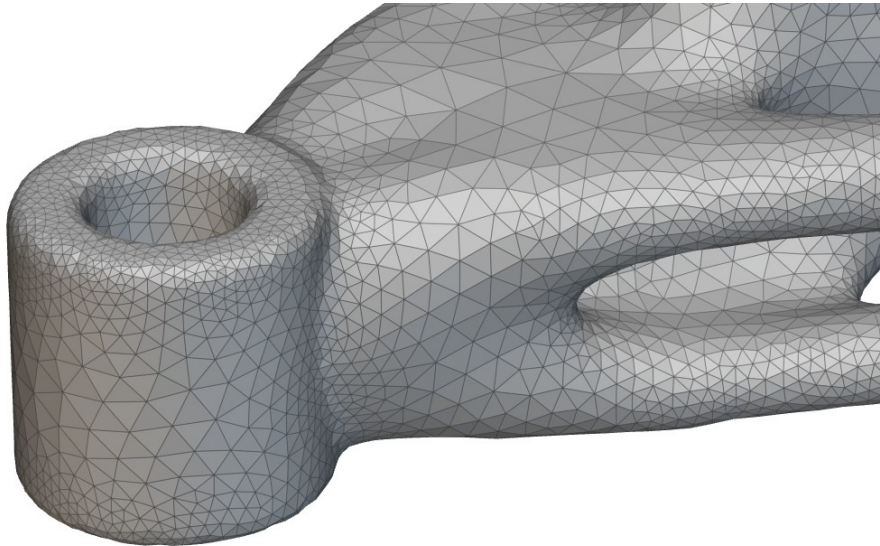
Jedną z podstawowych metod prowadzenia symulacji podczas projektowania wspieranego komputerowo jest metoda elementów skończonych (MES). Polega ona na dyskretyzacji geometrycznych układów ciągłych na skończoną ilość mniejszych elementów. Pozwala to obliczyć zachowanie złożonych konstrukcji poprzez reprezentację ich za pomocą prostych geometrycznie obiektów, zamieniając systemy o nieskończonej ilości stopni swobody na takie ze skończoną ilością stopni swobody [1].



Rys. 2.1: Dyskretyzacja płaskiej geometrii ciągłej za pomocą siatki: a) początkowa geometria ciągła, b) model dyskretny idealny c) model dyskretny obliczeniowy [1].

Na rys. 2.1 zaprezentowano przykład dyskretyzacji geometrii ciągłej. Otrzymana siatka składa się z wielu elementów kwadratowych, sąsiednie elementy łączone są za pomocą wspólnych węzłów. Z założenia, przy ich liczbie zbliżającej się do nieskończoności, powierzchnia siatki powinna być równa powierzchni elementu ciągłego. Jednak w praktyce liczba poszczególnych elementów jest ograniczona zdolnościami obliczeniowymi użytych systemów komputerowych. Obliczenia fizyczne wykonywane są dla pojedynczych elementów siatki. Każdy z węzłów badanej struktury otrzymuje własne równanie przemieszczeniowe [1, 2].

W trójwymiarowych zagadnieniach MES stosuje się różne kształty geometryczne w roli elementów siatki. Są to najczęściej czworościany lub prostopadłościany ale stosuje się też inne proste trójwymiarowe elementy geometryczne. Przykład trójwymiarowej siatki czworościennej pokazano na rys. 2.2 [3].



Rys. 2.2: Trójwymiarowa siatka czworościenna.

2.2 PRAWO HOOKE'A

Prawo Hooke'a opisuje liniową zależność między naprężeniem a odkształceniem. Zależność ta zachodzi dla małych odkształceń, poniżej granicy proporcjonalności, zwaną też granicą Hooke'a. Ogólna forma prawa Hooke'a dla ściskania układu jednoosiowego ma postać [17]:

$$\boldsymbol{\sigma} = E \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (2.1)$$

gdzie:

$\boldsymbol{\sigma}$ – naprężenie normalne, pogrubienie oznacza zapis tensora,

$\boldsymbol{\varepsilon}$ – odkształcenie,

E – moduł Younga.

Rozwinięciem prawa Hooke'a dla układów trójosiowych jest związek konstruktywny, czyli równania opisujące zależność tensora naprężeń od tensora odkształceń. Dla materiału izotropowego zależność ta jest opisana układem równań [17]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)], \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)], \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]. \end{aligned} \quad (2.2)$$

2.3 RÓWNANIE NAVIERA

Równanie ruchu Naviera jest jedną z podstawowych zależności opisujących izotropowe materiały liniowe sprężyste. Razem z prawem Hooke'a stanowi bazę do obliczania naprężeń w zagadnieniach stacjonarnych. Ogólna postać równania Naviera jest zapisywana jako [2]:

$$(\lambda + \mu) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} = \rho \frac{\delta^2 \mathbf{u}}{\delta t^2}, \quad (2.3)$$

gdzie:

λ, μ – stałe Lamégo,

∇ – operator nabra,

\mathbf{u} – wektor przemieszczenia,

\mathbf{f} – siła masowa, zwana też siłą objętościową,

ρ – gęstość,

t – czas.

Stałe Lamégo można zapisać za pomocą:

$$\lambda = \frac{E \cdot \nu}{(1 - 2\nu)(1 + \nu)}, \quad \mu = G = \frac{E}{2(1 + \nu)}, \quad (2.4)$$

gdzie:

ν – współczynnik Poissona,

E – moduł Younga,

G – moduł Kirchhoffa.

Zazwyczaj siła masowa \mathbf{f} jest pomijana z równania (2.3), a w zagadnieniach stacjonarnych część $\rho \frac{\delta^2 \mathbf{u}}{\delta t^2}$ jest równa zeru, co daje zmienioną formę:

$$(\lambda + \mu) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mu \nabla^2 \mathbf{u} = 0. \quad (2.5)$$

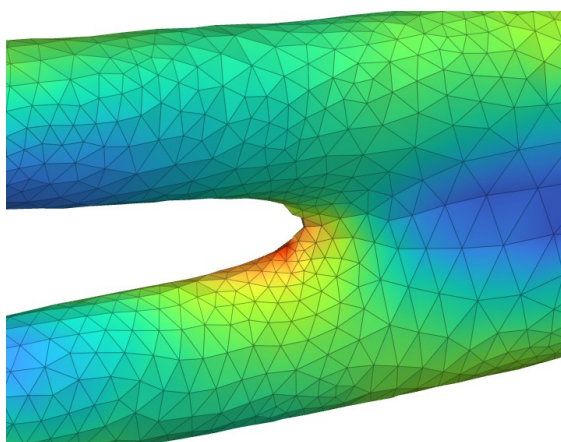
2.4 PROGRAMY DO ANALIZY MES

Ze względu na dużą ilość obliczeń potrzebnych do przeprowadzenia analizy MES używa się do tego celu komputerowych stacji roboczych wyposażonych w programy CAE (z ang. Computer Assisted Engineering). Programy te składają się na trzy główne moduły:

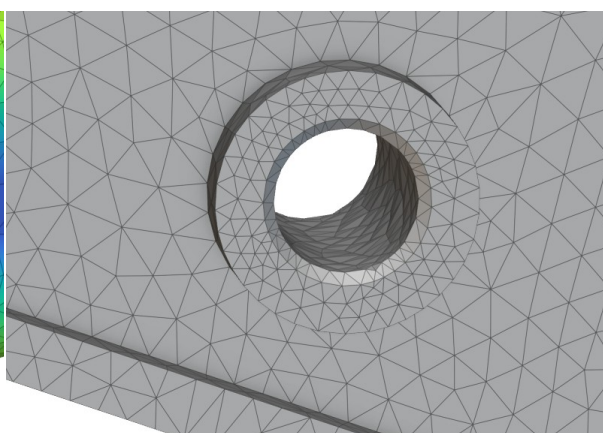
- preprocesor służący do wgrania lub stworzenia badanych geometrii, ustawienia parametrów siatki MES oraz ustalenia warunków brzegowych,

- solver wykonujący obliczenia po wcześniejszym wybraniu odpowiedniego modelu matematycznego,
- postprocesor, którego zadaniem jest przedstawienie wyników obliczeń.

Ze względu na dostępne zasoby obliczeniowe może wystąpić potrzeba uproszczenia modelu poprzez usunięcie detali. Analizę MES można wykonywać na obiektach 1-wymiarowych, 2-wymiarowych oraz 3-wymiarowych. Mniejsza wymiarowość skutkuje przyspieszeniem badania. Rozmiar elementów siatki MES powinien zostać dobrany ze względu na potrzebną dokładność wyników symulacji. Liniowe zmniejszanie rozmiaru elementów siatki skutkuje jednak nieliniowym zwiększaniem się czasu wykonywania obliczeń. Optymalnym rozwiązaniem jest zagęszczenie siatki elementów skończonych tylko w obszarach szczególnej istotności, co ukazano na rys. 2.4 [2].



Rys. 2.3: Wyniki analizy MES przedstawione na siatce jako skala barw



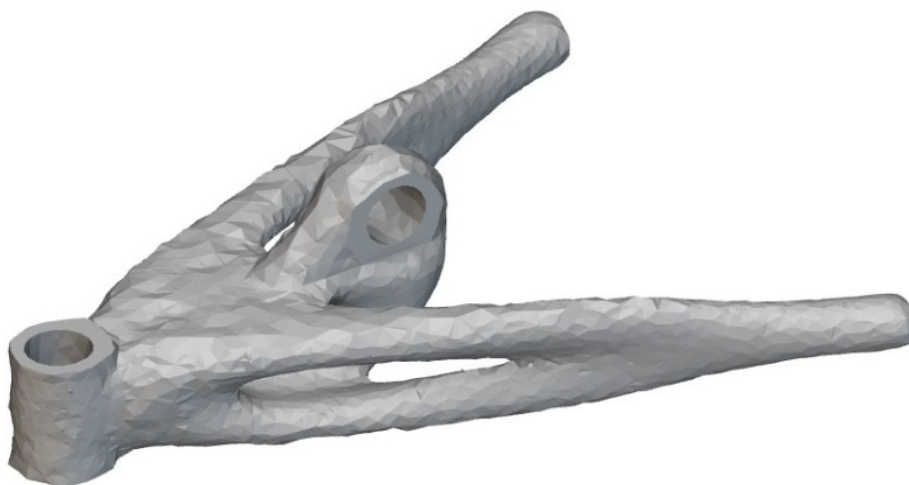
Rys. 2.4: Siatka MES została zagęszczona wokół otworu, ponieważ będzie przykładana w tym miejscu siła.

Przygotowując badanie należy także dobrać odpowiednie parametry materiału. Podczas projektowania analizy statycznej należy zablokować stopnie swobody części poprzez użycie odpowiednich utwierdzeń. Obciążenie części można zaimplementować poprzez dodanie siły lub wymuszonego przemieszczenia elementów. Wyniki badania MES są zazwyczaj prezentowane poprzez zmianę wyglądu elementów siatki według skali barw, na której poszczególne kolory odpowiadają danym wartościom wynikowym. Przykład reprezentacji wyników analizy MES pokazano na rys. 2.3 [2].

W tej pracy do wykonania analiz MES użyto programu nTop. Dołączony w programie moduł analizy MES traktuje badaną część jako zmienną programową, więc po stworzeniu badania można w prosty sposób zbadać inną część z użyciem tych samych parametrów. Generator siatki automatycznie zagęszcza elementy skończone aby lepiej odwzorować detale, choć istnieje też opcja ręcznego zagęszczenia siatki, co pokazano odpowiednio na rys. 2.3 oraz rys. 2.4. Aby nadać siłę lub utwierdzić część należy wybrać grupę węzłów, do których ta właściwość będzie przypisana. Po wykonaniu analizy MES wynik też jest traktowany jako zmienna programowa, co umożliwia wykorzystanie otrzymanych danych w dalszych krokach badania [19].

3 OPTIMALIZACJA TOPOLOGICZNA

Optymalizacja topologiczna to proces projektowania części i struktur, który wykorzystuje obliczeniowe podejście do rozwiązywania problemów z zagadnień optymalizacji. Optymalizacja topologiczna zakłada znalezienie najwydajniejszego rozłożenia materiału na zadanym obszarze, które spełnia dane wymogi oraz ograniczenia. Służy do projektowania wyspecjalizowanych, lekkich części o wysokiej wydajności. Metoda stosowana jest w przemyśle samochodowym, lotniczym, kosmicznym oraz w architekturze. Oprócz rozwiązywania problemów natury wytrzymałościowej, może też pomóc w rozwiązaniu zagadnień związanych z mechaniką cieczy, akustyką, elektromagnetyzmem, optyką oraz układów uwzględniających kilka dziedzin fizyki jednocześnie. Przez ostatnią ćwierć wieku opracowano wachlarz metod zajmujących się problemami związanymi z optymalizacją topologiczną. Popularnością wyróżniają się trzy metody: oparta o pseudo-gęstość SIMP (z ang. Solid Isotropic Material with Penalization), ewolucyjne rozwiązanie ESO (z ang. Evolutionary Structural Optimization) oraz LSM (z ang. Level Set Method) [4, 5].

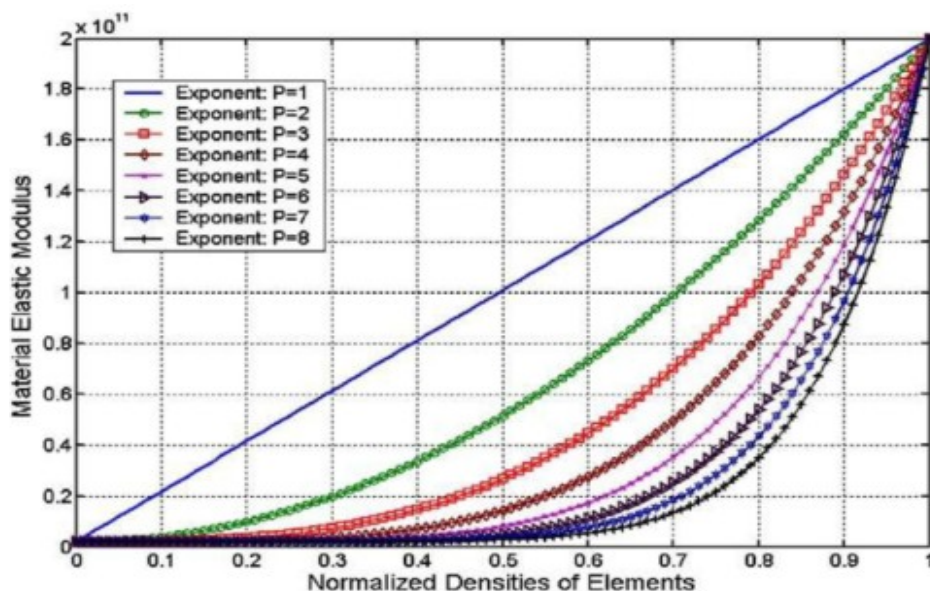


Rys. 3.1: Przykład optymalizacji topologicznej dolnego wahacza zawieszenia samochodu za pomocą metody SIMP. Stan bezpośrednio po optymalizacji, przed obróbką.

3.1 SIMP

Metoda SIMP została opracowana niezależnie przez dwa zespoły, w skład pierwszego wchodził MP. Bendsøe, a w skład drugiego M. Zhou oraz G.I.N. Rozvany. Sama nazwa SIMP została zaproponowana przez pracę, w której uczestniczył Rozvany. Metoda ta jest znana ze swojej prostoty i wydajności numerycznej, przez co jest szeroko stosowana w programach

komputerowych służących do przeprowadzania optymalizacji topologicznej. Przykładowy wynik użycia metody SIMP ukazano na rys. 3.1. Metoda ta polega na obliczaniu pseudo-gęstości, której wartość mieści się w zakresie od 0 do 1. Zero oznacza brak materiału, a 1 odpowiada pełnemu wypełnieniu materiałem. Wartości między 0 a 1 nie mają jednoznacznej interpretacji fizycznej. Z tego względu algorytmy SIMP wykorzystują współczynnik penalizujący pośrednie gęstości. Współczynnik ten posiada charakterystykę wykładniczą, pokazaną na rys. 3.2 [6, 7].



Rys. 3.2: Wpływ współczynnika penalizującego, zależność modułu sprężystości materiału od znormalizowanej gęstości elementów [4].

Matematyczna implementacja współczynnika penalizującego jest podawana następująco [4]:

$$E_e = E_0 \cdot \rho_e(x)^p, \quad (3.1)$$

$$V = \sum_{e=1}^N \rho_e(x) \cdot V_e, \quad (3.2)$$

gdzie:

E_e – wirtualny moduł Younga elementu e ,

E_0 - rzeczywisty moduł Younga materiału,

$\rho_e(x)$ – funkcja gęstości elementu e ,

p – współczynnik penalizujący,

V – całkowita objętość materiału,

V_e – objętość elementu e .

3.2 ESO

Metoda zaproponowana we wczesnych latach 90-tych przez Y.M. Xie oraz G.P. Steven'a. Początkowe założenia tej metody obejmowały ewolucję struktury do stanu optymalnego przez konsekwentną eliminację niewydajnego materiału (elementów o małych wartościach naprężenia). Decyzja o usunięciu danego elementu jest podejmowana na podstawie współczynnika odrzucania. Jeśli podczas iteracji żaden element nie zostanie odrzucony, to optymalizacja osiąga stan równowagi [4].

$$\sigma_e \leq RR \cdot \sigma_{MAX}, \quad (3.3)$$

gdzie:

σ_e – naprężenia von Misesa elementu,

RR – współczynnik odrzucania,

σ_{MAX} – maksymalne naprężenia von Misesa w optymalizowanym obiekcie.

Podczas kolejnych iteracji współczynnik odrzucania może być modyfikowany przez współczynnik ewolucji ER :

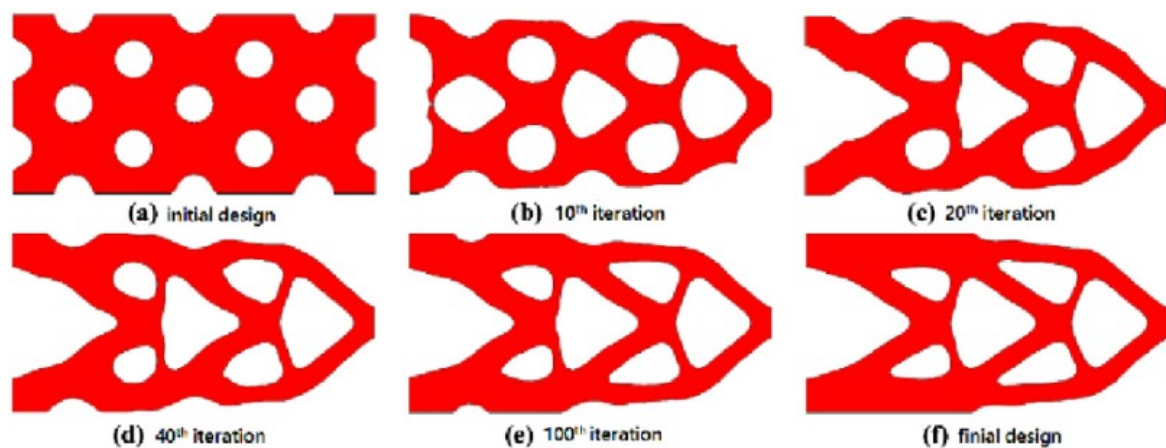
$$RR_{stary} = RR_{nowy} + ER. \quad (3.4)$$

Iteracje analizy naprężeń oraz usuwania elementów będą się powtarzać do momentu osiągnięcia zadanego optimum [4].

W niektórych scenariuszach metoda ta nie pozwala na łatwe uzyskanie optymalnych wyników. Problematycznym aspektem jest brak możliwości przywracania usuniętych elementów do konstrukcji. Zniwelowano ten problem opracowując metodę BESO (z ang. Bi-directional Evolutionary Structural Optimization), która dodatkowo uwzględnia aspekty metody AESO, to jest metody odwrotnej do ESO, w której materiał jest dodawany do konstrukcji. Metoda BESO została zaproponowana przez O.M. Querin, a jej efektywność została potwierdzona przez X. Huang oraz Y.M. Xie [4, 7].

3.3 LSM

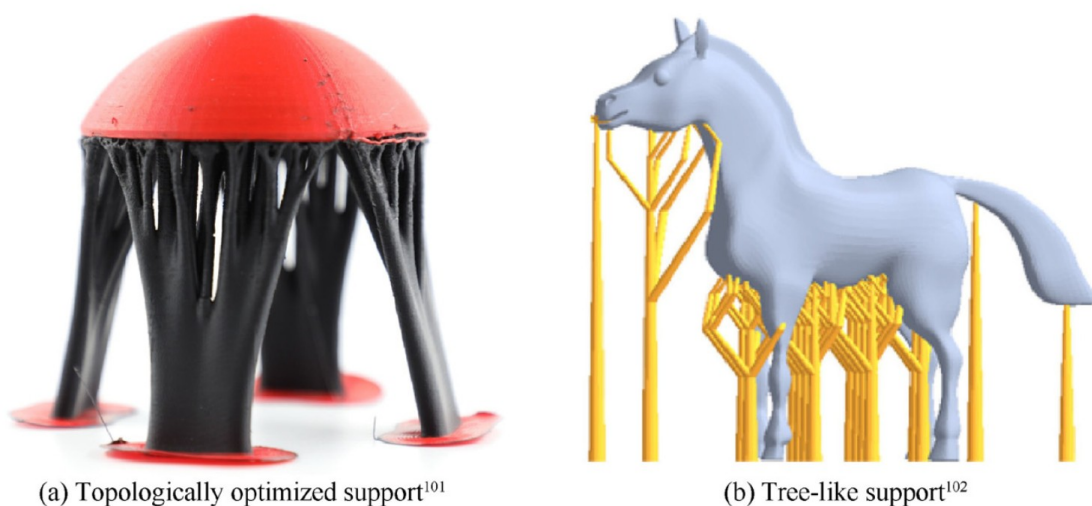
Metoda zaproponowana w roku 1999 przez J.A. Sethian'a, używa wielowymiarowych funkcji metody poziomic do opisu powierzchni optymalizowanego obiektu. Optymalizacja opiera się na iteracyjnym aktualizowaniu funkcji poziomic poprzez rozwiązywanie równania Hamiltona-Jacobiego. Materiał jest usuwany z obszarów minimalnych naprężeń oraz dodawany w obszarach maksymalnych naprężeń [4, 7].



Rys. 3.3: Optymalizacja topologiczna za pomocą metody LSM. W (a) pokazana jest struktura wejściowa, w (b-e) kolejne iteracje optymalizacji, a w (f) ostateczny kształt [16].

4 DRUK PRZESTRZENNY

Druk przestrzenny, zwany także wytwarzaniem przyrostowym, to metoda wytwarzania obiektów zaprojektowanych w programach CAD (z ang. Computer Assisted Design) opierająca się na przestrzennym odkładaniu materiału, zazwyczaj drukując wiele ułożonych na sobie warstw. Główną zaletą tej metody jest możliwość drukowania geometrycznie skomplikowanych kształtów, które były by zbyt drogie lub niemożliwe do odtworzenia za pomocą innych technologii wytwarzania. Umożliwia to pominięcie szczegółów takich jak przelewy i zbiorniki wlewowe lub otwory dostępne dla narzędzi. Idealnym zastosowaniem druku przestrzennego są kształty uzyskiwane w procesach optymalizacji topologicznej lub innych form zaawansowanego odciążania części. Przy projektowaniu druk 3D może być użyty do szybkiej i taniej produkcji prototypów, ponieważ ten sam sprzęt może zostać wykorzystany do produkcji zupełnie zróżnicowanych wyrobów. Dodatkowym atutem ułatwiającym szybką produkcję są niezbędne dane wejściowe, które w przypadku procesu druku przestrzennego ograniczają się do komputerowo wygenerowanego modelu. Pominięcie tworzenia skomplikowanych instrukcji obróbki i montażu oraz brak potrzeby użycia drogich form znacząco obniża koszt produkcji z niskim nakładem. Pewnym ograniczeniem wielu z obecnie używanych metod druku przestrzennego jest za to potrzeba stosowania podpór. Struktury te są używane w miejscach, gdzie następna warstwa nie opiera się w dostateczny sposób o poprzednią warstwę. Na rys. 4.1 zostały przykłady użycia podpór. [8, 9].

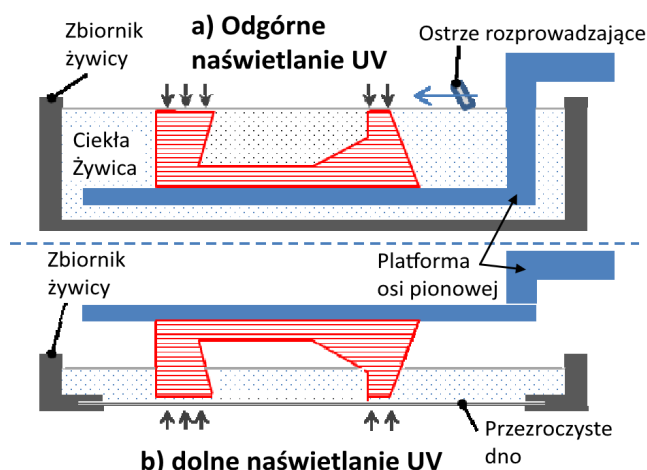


Rys. 4.1: Podpory w druku 3D, a) optymalizowane topologicznie, b) drzewo-podobne [4].

4.1 ŻYWICZNE DRUKARKI SLA, DLP I MSLA

Drukowanie żywiczne to jedna z pierwszych technologii druku 3D, metoda ta została opracowana już w latach 80-tych. Polega na selektywnej fotopolimeryzacji żywicy lub roztworu monomeru. Utwardzając zadany kształt warstwa po warstwie tworzony jest trójwymiarowy obiekt o określonym kształcie. Zazwyczaj używa się promieniowania ultrafioletowego (UV) lub wiązek elektronowych. Wybór materiałów jest dosyć ograniczony, żywice stosowane w tej metodzie muszą wykazywać kilka konkretnych właściwości. Podstawowe składniki takiej żywicy to zazwyczaj fotoinicjator, multifunkcjonalne monomery lub oligomery oraz wypełniacz rozcieńczający roztwór [10, 11].

W zależności od budowy drukarki, platforma osi pionowej może poruszać się w dół (metoda TE – Top Exposure), zanurzając drukowany obiekt w następnej warstwie żywicy, lub poruszać się w górę (metoda BE – Bottom Exposure), pozwalając na dalsze naświetlenie obiektu od dołu przez przezroczyste dno zbiornika z żywicą. Obie metody pokazano na rys. 4.2 [12].



Rys. 4.2: Sposoby naświetlania warstw w drukarkach żywicznych: a) TE, b) BE [12].

4.1.1 PORÓWNANIE METODY TE I BE

Metoda naświetlania dolnego (BE) odznacza się niższym kosztem. Zbiornik żywicy może być mniejszy od metody TE, a sam obiekt nie musi być zanurzony w całości. Dodatkowo, dno zbiornika wymusza płaskość warstwy żywicy, więc nie ma potrzeby stosowania ostrza rozprowadzającego materiał, tak jak ma to miejsce w TE. Do wad natomiast można zaliczyć ryzyko przywierania drukowanej powierzchni do dna, co może uszkodzić drukowany obiekt. Metoda BE nie nadaje się do drukowania zbyt masywnych części, ponieważ siła ciężkości może oddzielić część od ruchomej platformy osi pionowej [12].

4.1.2 TECHNOLOGIA SLA

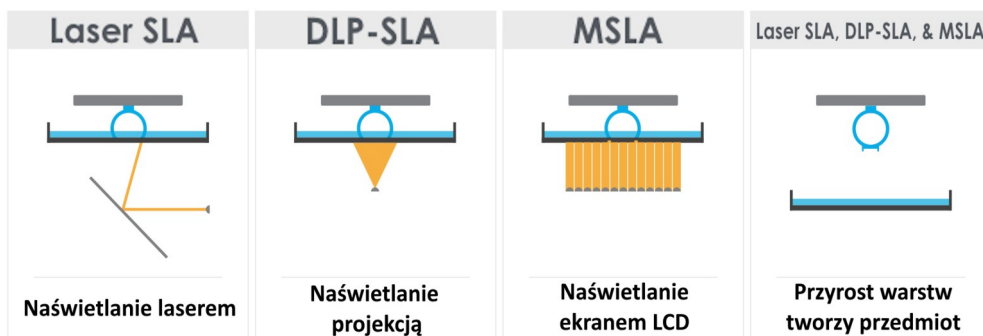
Drukarki SLA (Stereolitography) używają wiązki lasera do naświetlania płynnego fotopolimeru. Wiązka ta kierowana jest za pomocą sterowanego komputerowo zwierciadła. Żądany obraz jest w ten sposób rysowany na żywicy, tworząc kolejne warstwy drukowanego obiektu. Jest to najwcześniej opracowana metoda druku przestrzennego [11, 12].

4.1.3 TECHNOLOGIA DLP

Drukarki DLP (Digital Light Processing) zamiast pojedynczej wiązki lasera wykorzystują projekcję obrazu za pomocą cyfrowego rzutnika UV. Podejście to skutkuje w drukowaniu całej warstwy w jednym momencie, co zostało przedstawione na rys. 4.3. Szczególną odmianą tej technologii jest CLIP (Continuous Liquid Interface Production). Metoda CLIP polega na dolnym naświetlaniu żywicy przy jednoczesnym użyciu membrany przepuszczającej tlen. Natlenienie dolnej warstwy żywicy ogranicza jej możliwości fotopolimeryzacji, co pozwala na stałe doprowadzanie płynnej żywicy oraz eliminuje ryzyko przyklejania części do dna. Metoda CLIP zwiększa prędkość druku w porównaniu do DLP poprzez eliminację procesu odrywania wydruku od dna [11, 12].

4.1.4 TECHNOLOGIA MSLA

Drukarki MSLA (Masked Stereolithography) wykorzystują matryce LCD (Liquid Crystal Display) do wybiórczego oświetlania żywicy. W ostatniej dekadzie tego typu drukarki były utożsamiane z niskobudżetowym sprzętem dla amatorów druku trójwymiarowego. Jednak ze względu na postępy w technologii wyświetlaczy LCD, technologia MSLA charakteryzuje się już parametrami wydruku porównywalnymi z osiąganymi przez drukarki DLP [13].



Rys. 4.3: Porównanie technologii naświetlania. Źródło oryginalnej, angielskiej wersji grafiki: Dsazer25, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=90618574>

Zalety drukarek żywicznych [10-12]:

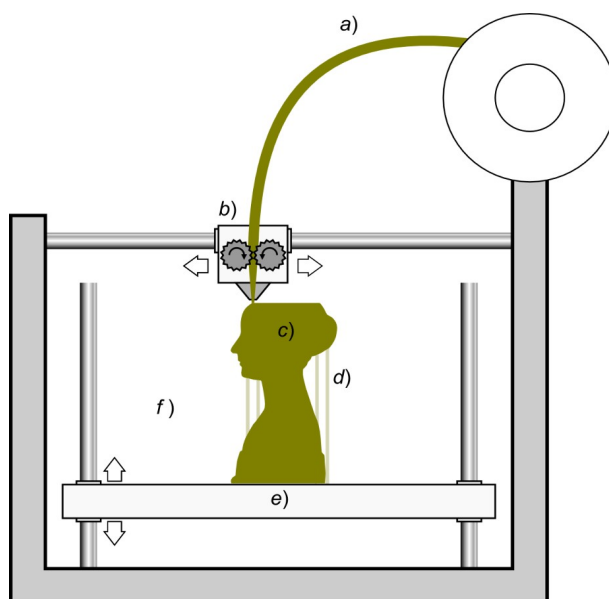
- wysoka rozdzielczość (10-160 μm) i dokładność wydruku,
- chemiczne wiązania między warstwami, strukturalnie jednorodny wydruk.

Wady drukarek żywicznych [10-12]:

- ograniczony wybór materiałów,
- potrzeba dalszego naświetlania gotowego wydruku.

4.2 DRUKARKI FDM

Metoda FDM (Fused Deposition Method) polega na wyciskaniu z dyszy pół-stałego filamentu w postaci tworzywa termoplastycznego, który po ekstruzji utwardza się na powierzchni wydruku. W ten sposób nakładane są kolejne warstwy, podczas gdy świeżo drukowane tworzywo łączy się z jeszcze częściowo plastycznym tworzywem z poprzedniej warstwy. Uznawana za najprostszą metodę drukowania przestrzennego, jest szeroko stosowana do produkcji prototypów oraz części wymagających mniejszej precyzji. Tego typu drukarki wymagają specjalnie wybranych parametrów operacji. Ich wybór wpływa znacząco na charakterystykę drukowanego przedmiotu. Najczęściej stosowaną technologią FDM jest FFF (Fused Filament Fabrication), gdzie materiał do drukowania w formie żył filamentu jest pobierany ze szpuli. Schemat działania drukarek FFF ukazano na rys. 4.4 [10].



Rys. 4.4: Schemat metody FFF (Fused Filament Fabrication) a) szpula z tworzywem sztucznym, b) Podgrzewany ekstruder, c) wyrób, d) struktury podpierające, e) ruchoma podstawa. Źródło: Paolo Cignoni, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=57953642>

Najczęściej modyfikowaną zmienną w drukowaniu FDM jest grubość warstwy. Zwiększenie grubości przyspiesza drukowanie, ale pogarszają się możliwości odwzorowywania szczegółów, a poszczególne warstwy są bardziej widoczne. Innym ważnym parametrem jest gęstość wewnętrznej struktury. Zazwyczaj wyroby drukowane metodami FDM posiadają w pełni wypełnione ściany zewnętrzne, a ich wewnętrzną objętość zajmują struktury o niższej gęstości pomagające zmniejszyć masę części oraz zaoszczędzić materiał. Czym ta struktura jest gęstsza, tym wydrukowana część wykazuje lepsze właściwości wytrzymałościowe. Ważnym parametrem jest też szybkość drukowania, czyli prędkość przemieszczania się dyszy drukującej wobec wydruku. Nadmierne zwiększanie tej wartości może spowodować problemy z wydrukiem oraz gorszą jakość wynikowych części [10, 14].

Zalety drukarek FDM [10]:

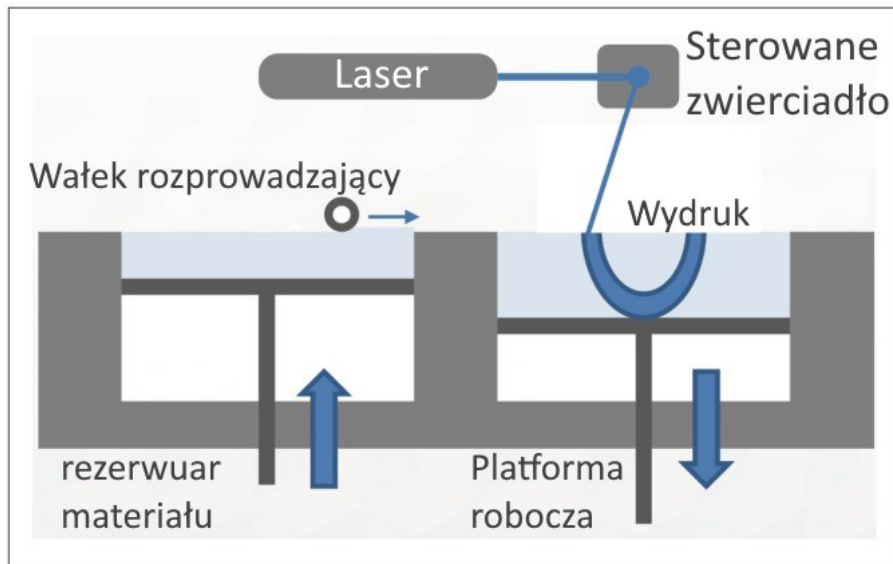
- dobra szybkość wydruku,
- stosunkowo niskie koszty.

Wady drukarek FDM [10]:

- słabe właściwości wytrzymałościowe,
- duża chropowatość powierzchni,
- ograniczony wybór materiałów,
- potrzeba stosowania struktur podpierających przy nawisach.

4.3 DRUKARKI SLS

Drukarki SLS (Selective Laser Sintering) działają na zasadzie uplastyczniania albo topienia proszku, folii lub pelletu za pomocą sterowanego lasera. Jako materiały stosuje się tworzywa termoplastyczne (np. PA, ABS, PC, nylon), metale (np. tytan, stal nierdzewna, stal narzędziowa) lub odpowiednie ceramiki. Wiązka lasera selektywnie wygrzewa materiał wejściowy, topiąc go i tworząc pojedynczą warstwę wydruku. Po ukończeniu drukowania warstwy na wierzch nakładany jest materiał, po czym proces jest powtarzany aż do ukończenia druku. Proces ten przedstawiono na rys. 4.5 [10, 14, 15].



Rys. 4.5: Przykład drukarki SLS, wersja proszkowa [15].

Zalety drukarek SLS [10, 15]:

- szeroki wybór materiałów,
- dobre właściwości mechaniczne,
- brak potrzeby stosowania struktur podpierających wydruk.

Wady drukarek SLS [10, 15]:

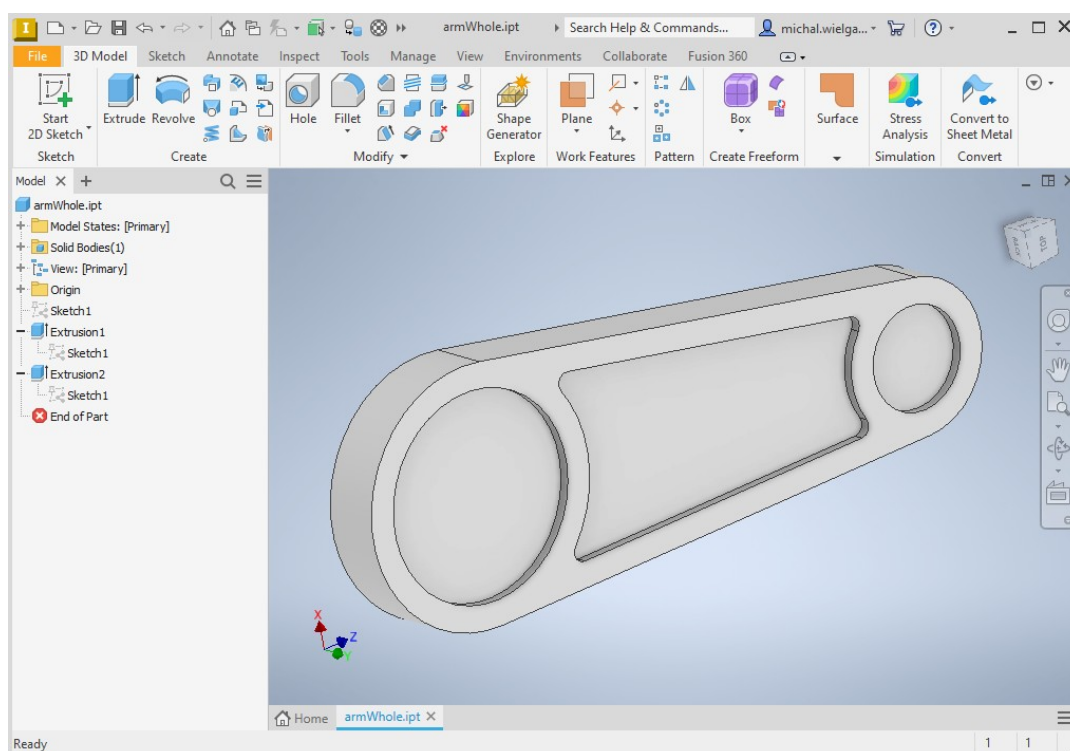
- koszt materiałów i drukarek,
- naprężenia wewnętrzne w wydrukach z metalu.

5 OPROGRAMOWANIE CAD

Oprogramowanie do komputerowo wspieranego projektowania CAD (z ang. Computer Assisted Design) zaczęło się już pojawiać w latach 60-tych i oryginalnie służyło do tworzenia płaskich rysunków inżynierskich. Obecnie programy tej kategorii służą do definiowania trójwymiarowych elementów i są nieodłącznym elementem wszelkich projektów inżynierskich. Wyspecjalizowane wersje programów CAD mogą służyć też do przeprowadzania symulacji komputerowych na zaprojektowanych częściach. Tego typu programy zalicza się do rodziny CAE (z ang. Computer Assisted Engineering). W tej pracy użyto dwa tego typu programy: Autodesk Inventor Professional 2024 oraz nTop [9].

5.1 AUTODESK INVENTOR PROFESSIONAL 2024

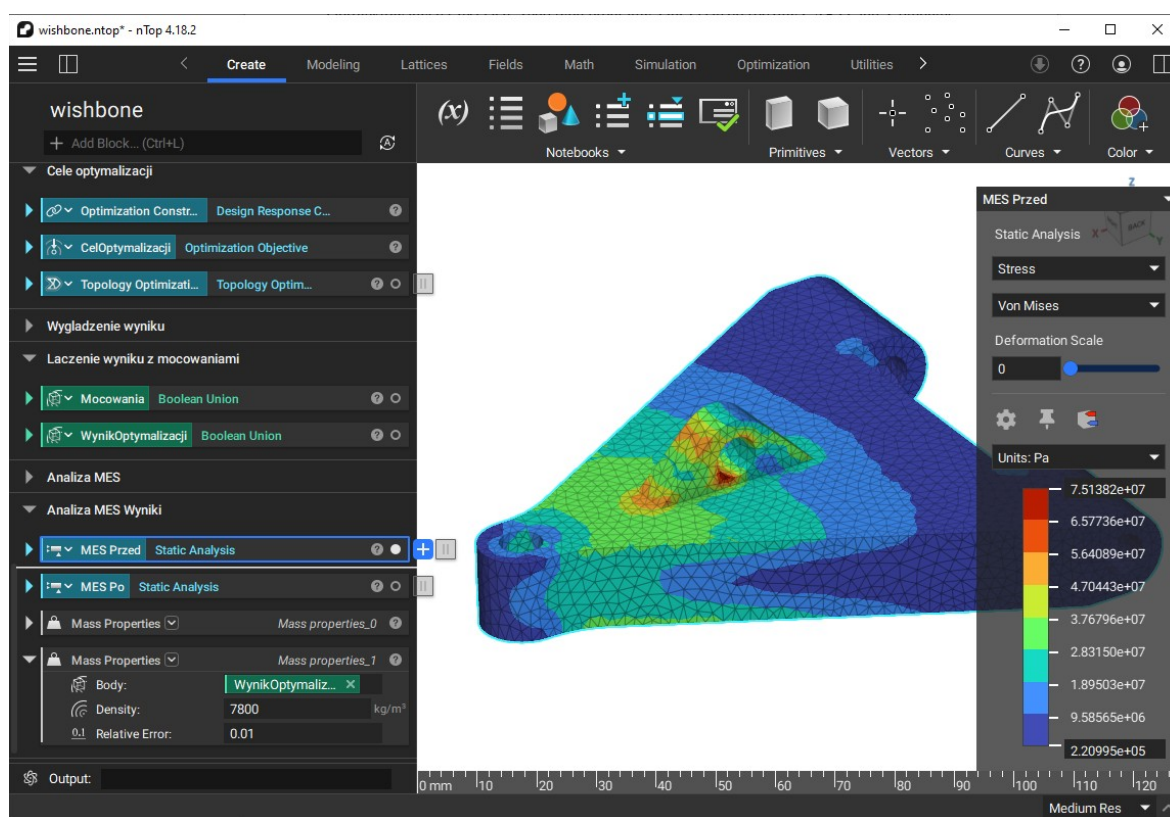
Jest to oprogramowanie CAD umożliwiające profesjonalne projektowanie konstrukcji mechanicznych, dokumentacji oraz symulacje zachowań układów. Wykorzystuje koncepcję projektowania parametrycznego, co umożliwia łatwą edycję parametrów części po jej zaprojektowaniu. Zawiera narzędzia pomocne przy projektowaniu konstrukcji bryłowych, blachowych, ram, rur i przewodów. W tej pracy jest ono użyte do projektowania części. Interfejs programu został przedstawiony na rys. 5.1 [18].



Rys. 5.1: Interfejs użytkownika programu Autodesk Inventor Professional 2024.

5.2 nTOP

Program z rodziny CAE, służący do wspomagania procesu projektowania części przeznaczonych do wytwarzania za pomocą technologii druku przestrzennego. Obiekty w nTop definiowane są jako powierzchnie algebraiczne, co pozwala na tworzenie skomplikowanych struktur wykorzystujących ciała geometryczne. Zapis ciał w formie równań matematycznych przyspiesza prace wykorzystujące zaawansowane geometrie, np. trójwymiarowe obszary wypełnione kratownicą o zmiennej grubości. Wbudowane drzewko operacji pozwala na szybkie zmiany modelu co pozwala na użycie danego badania do analizy i edycji wielu różnych elementów. Możliwości projektowania części wejściowych są jednak ograniczone, a producenci oprogramowania zalecają importowanie gotowych modeli z innych programów. Po wzbogaceniu projektu w skomplikowane geometrie część może zostać wyeksportowana do programów obsługujących drukarki 3D. W tej pracy program ten użyto do przeprowadzenia analiz MES oraz optymalizacji topologicznej. Interfejs programu przedstawiono na rys. 5.2 [19].



Rys. 5.2: Interfejs użytkownika programu nTop.

6 PROJEKT OPTIMALIZACJI TOPOLOGICZNEJ

W celu zbadania wpływu optymalizacji topologicznej na właściwości mechaniczne części wykonano projekt, który można podzielić na następujące kroki:

- ustalenie funkcji i formy badanej części,
- zaprojektowanie części w programie CAD,
- przygotowanie modelu optymalizacji topologicznej,
- uruchomienie obliczeń komputerowych,
- porównanie właściwości mechanicznych części przed i po optymalizacji za pomocą analizy MES,
- przeprowadzenie kolejnych analiz MES dla elementów zoptymalizowanych z użyciem innych wymiarów elementów siatki.

Ustalenie funkcji i formy części jest pierwszym, fundamentalnym krokiem projektu. Założenie przeznaczenia elementu jest wymagane do podjęcia decyzji o tym, które parametry należy poddać optymalizacji. Na tym etapie pomocne jest narysowanie wstępnego szkicu części wraz z zaznaczonymi ograniczeniami oraz siłami wywieranymi na model. Pomoże to w wykonaniu następnego etapu, którym jest zaprojektowanie trójwymiarowej części zgodnej z koncepcją wstępnego szkicu. Oprócz odwzorowania głównej części należy też zaprojektować elementy, które zostaną później wykorzystane do obróbki zoptymalizowanego topologicznie modelu. Elementy te obejmują zamocowania części oraz obszary, które nie powinny zostać zmodyfikowane podczas optymalizacji.

Krok przygotowania modelu optymalizacji topologicznej zawiera w sobie ustawienie w programie do optymalizacji podstawowych parametrów takich jak wiązania, siły działające na obiekt, właściwości materiałowe oraz cel obliczeń optymalizacji. W tym kroku dodawane też są dodatkowe układy obciążenia, w których zwrot wektora siły jest nieznacznie zmieniony w celu zniwelowania szansy na wyboczenie gotowej części pod wpływem sił o nie idealnym zwrocie.

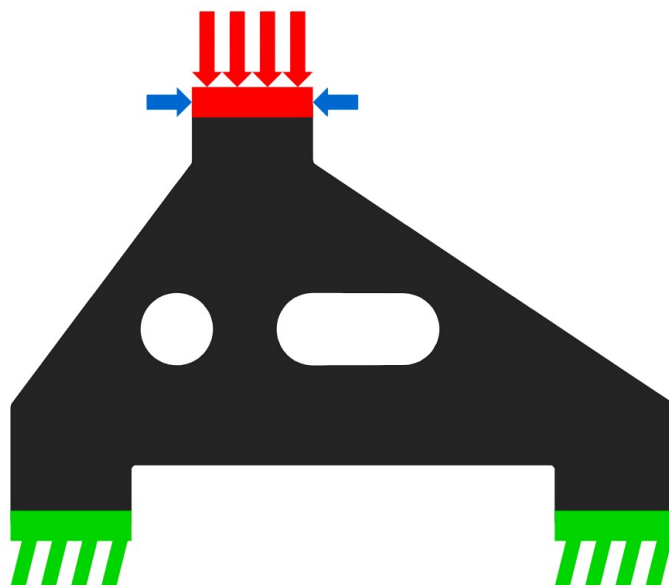
Etap uruchamiania obliczeń daje wgląd w zachowanie się optymalizowanego modelu. Pozwala to dostosować parametry symulacji oraz model części tak, aby wynik był jak najbardziej zbliżony do ustaleń koncepcyjnych dla badanego elementu. Po uzyskaniu satysfakcjonującego wyniku można przejść do końcowej obróbki modelu, czyli wygładzeniu powierzchni oraz dodaniu elementów mocujących.

Porównanie właściwości wytrzymałościowych polega na ustanowieniu obciążenia o ustalonej wartości siły na modele przed i po optymalizacji oraz wykonanie analizy MES. Wyniki tych symulacji mogą być porównane poprzez wyodrębnienie danych takich jak maksymalne przemieszczenia, maksymalne naprężenia, objętość oraz masa. Pomocne w formowaniu wniosków jest też obserwacja zachowania się całości części, oraz ocena czy przemieszczenia są akceptowalne dla założonego przeznaczenia elementu.

Optymalizacje przeprowadzono dla trzech różnych wymiarów elementów w siatce MES: 1 mm, 2 mm oraz 3 mm.

6.1 USTALENIE FUNKCJI I FORMY BADANEJ CZĘŚCI

W celu ułatwienia oceny skuteczności optymalizacji jako badany element wybrano wspornik techniczny. Jego zadaniem jest przeniesienie siły z powierzchni górnej na dwie sztywno umocowane dolne podstawy. Wspornik zawiera otwory, które nie mogą zostać zakryte podczas optymalizacji. Otwory te symulują przestrzeń na umożliwienie dostępu do innych elementów lub kanały przelotowe dla przewodów. Przybliżony model koncepcyjny został ukazany na rys. 6.1.

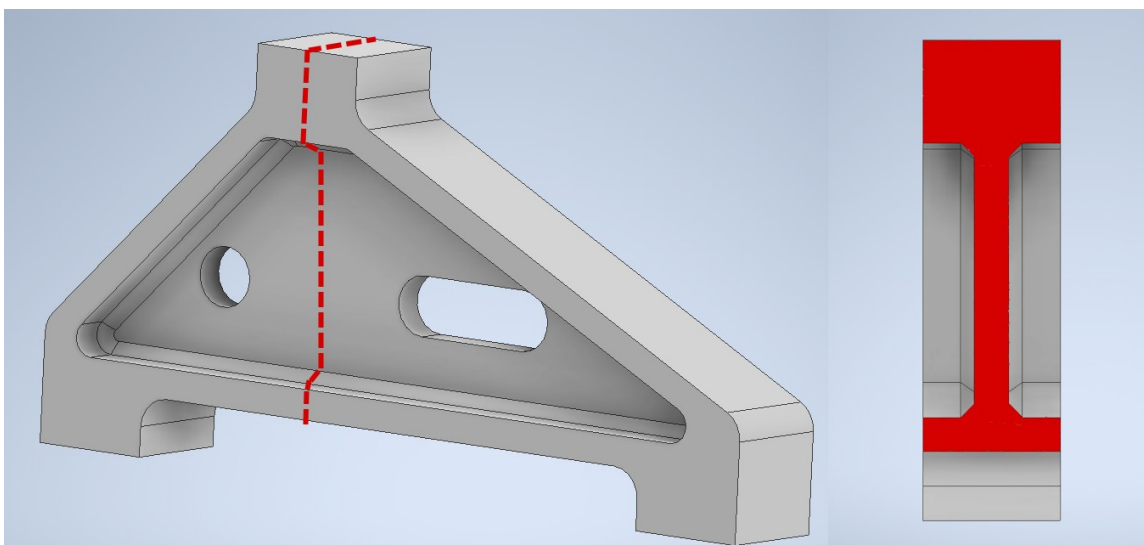


Rys. 6.1: Model koncepcyjny wspornika. Proporcje wymiarów nie odpowiadają ostatecznej wersji wspornika. w Siła jest nadawana na górną powierzchnię (kolor czerwony). Wspornik jest sztywno zamocowany na dolnych podporach (kolor zielony). W projekcie uwzględniono niewielkie siły wybaczące (kolor niebieski).

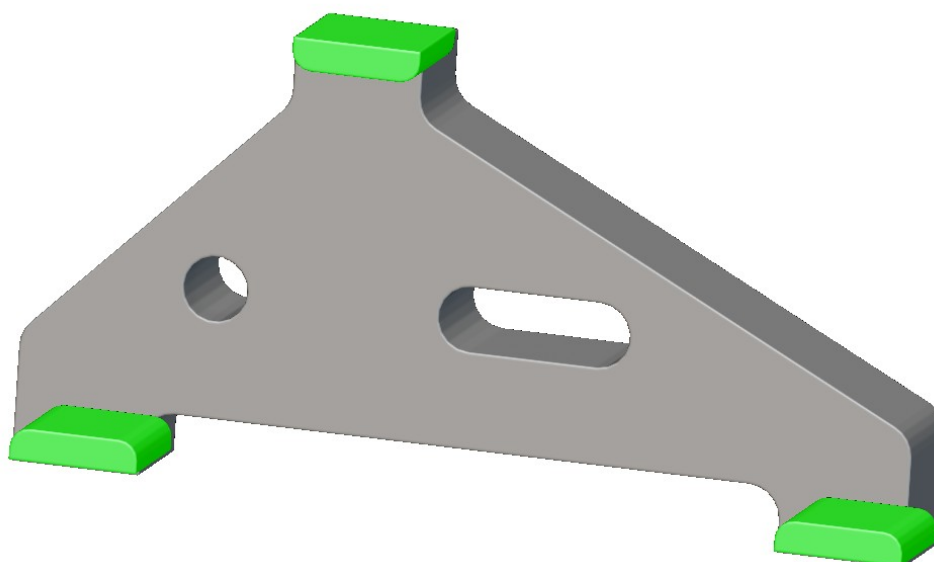
6.2 ZAPROJEKTOWANIE CZĘŚCI W PROGRAMIE CAD

Trójwymiarowy model wspornika zaprojektowano w programie Autodesk Inventor Professional 2024. Na projekt składają się trzy oddzielne części:

- wspornik z ręcznie usuniętą częścią materiału, ukazany na rys. 6.2. Wymiary gabarytowe wspornika to 140 mm na 70 mm, o grubości 20 mm,
- obszar ograniczający optymalizację, przedstawiony na rys. 6.3,
- elementy mocujące, ukazane na rys. 6.3 kolorem zielonym.



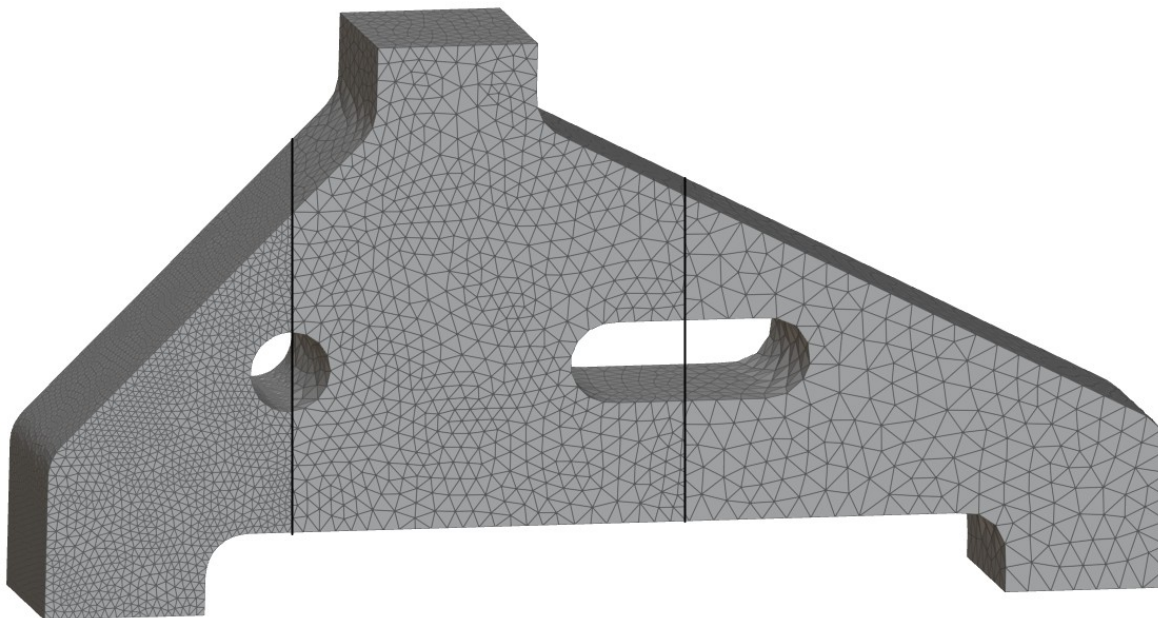
Rys. 6.2: Wspornik z ręcznie usuniętym nadmiarem materiału. Przekrój poprzeczny kształtem przypomina dwuteownik.



Rys. 6.3: Obszar ograniczający optymalizację (kolor szary) oraz elementy mocowania wspornika (kolor zielony).

6.3 PRZYGOTOWANIE OPTIMALIZACJI TOPOLOGICZNEJ W NTOP

Optymalizację topologiczną przeprowadzono na siatkach elementów skończonych stosując metodę SIMP. Wygenerowano trójwymiarowe siatki złożone z czworoscianów o trzech różnych wymiarach: 1 mm, 2 mm i 3 mm. Ilość elementów w tych siatkach wyniosła odpowiednio 726142, 88685 oraz 26699. Siatki te porównano na rys. 6.4.



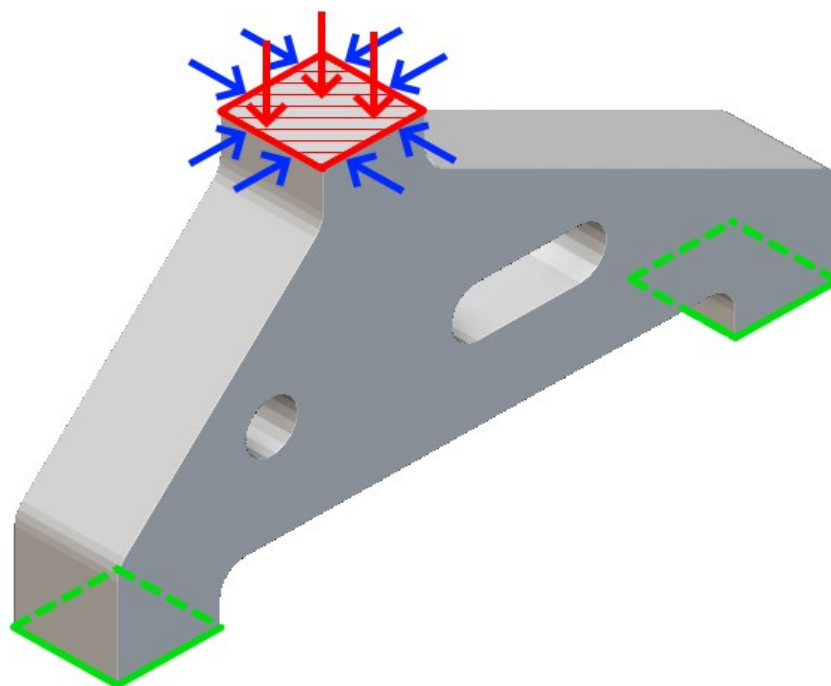
Rys. 6.4: Siatka elementów skończonych użyta do optymalizacji topologicznej. Rysunek podzielono na trzy części o różnych wymiarach siatki. Są to kolejno od lewej 1 mm, 2 mm oraz 3 mm.

Jako parametry użytego materiału zastosowano następujące wartości: moduł Younga równy 100 GPa, liczba Poissona równa 0,3 oraz gęstość wynosząca 4500 kg/m³. Materiał ten jest zbliżony parametrami do stopów tytanu [20].

Zastosowano następujące warunki brzegowe:

- umocowanie podstaw wspornika – wszystkie stopnie swobody usunięte,
- odgórna siła nacisku działająca na górną powierzchnię wspornika o wartości 3000 N,
- siły wybaczące o wartości 300 N działające na górną powierzchnię wspornika w kierunkach prostopadłych do głównej siły. Uwzględniono 4 różne zwroty, co przedstawiono na rys. 6.5.

Podczas optymalizacji uwzględniono 5 przypadków działania sił na wspornik. W każdym z nich wspornik był sztywno zamocowany i pod naciskiem głównej siły odgórnej. W pierwszym przypadku nie uwzględniono siły wybaczącej. W kolejnych siła wybacząca posiadała unikalny dla danego przypadku zwrot.



Rys. 6.5: Warunki brzegowe wspornika. Podstawy zaznaczono kolorem zielonym, główną siłą nacisku czerwonym, a siły wybaczące kolorem niebieskim.

Ustanowiono następujące cele optymalizacji:

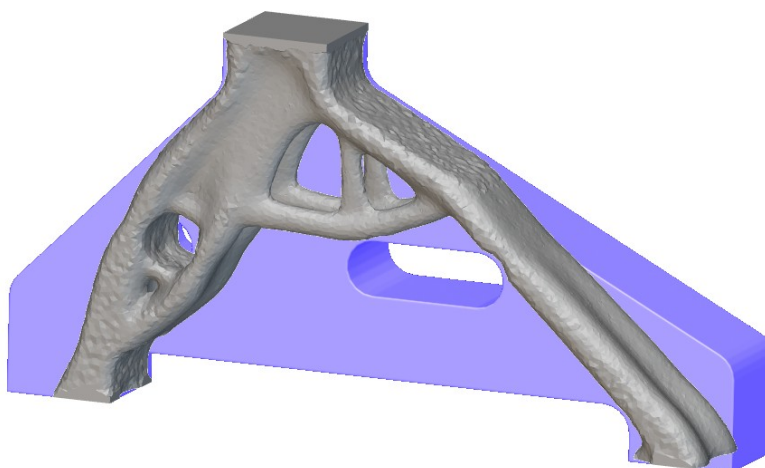
- zmniejszenie objętości poniżej 30% pierwotnej części,
- uzyskanie jak największej sztywności.

Maksymalny limit iteracji optymalizacji ustawiono na 200, ale może ona się skończyć wcześniej jeśli wymóg objętości zostanie spełniony oraz zmiany między iteracjami będą mniejsze od ustalonych progów. W programie nTop są to dwa parametry: zmiana wyniku funkcji celu oraz zmiana gęstości. Zmiana wyniku funkcji celu używa skwantyfikowanej wartości wyniku w celu ustalenia, czy zachodzące zmiany mają zauważalny wpływ na strukturę części. Oba parametry wpływają na jakość wyniku optymalizacji i powinny być dopasowywane do danego badania. W tej pracy ich wartości wynosiły 0,0005 dla zmiany wyniku funkcji celu oraz 0,01 dla zmiany gęstości.

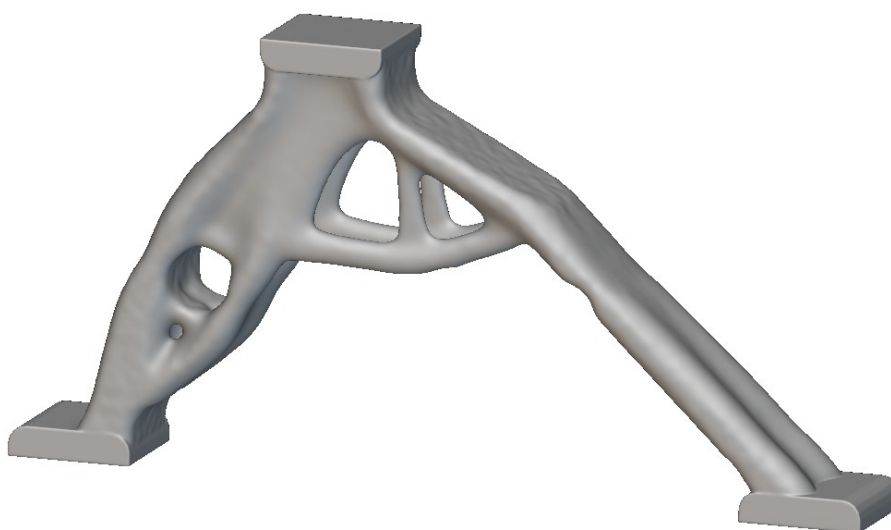
7 WYNIKI OPTYMALIZACJI TOPOLOGICZNEJ

7.1 WYNIK OPTYMALIZACJI TOPOLOGICZNEJ DLA SIATKI 1 MM

Optymalizacja topologiczna znacząco zmieniła geometrię wspornika. Porównanie wspornika przed oraz po optymalizacji przedstawiono na rys. 7.1. Znaczna większość materiału została zachowana w obszarach występujących między dolnymi podporami a górną powierzchnią. Powstałe w ten sposób belki złączone są poziomymi elementami w środkowej części wspornika. Na prawej belce występuje mały ubytek w miejscu, gdzie znajdował się podłużny otwór. W ramach obróbki wspornika wygładzono powierzchnię oraz dodano elementy mocujące. Gotowy wspornik ukazano na rys. 7.2.



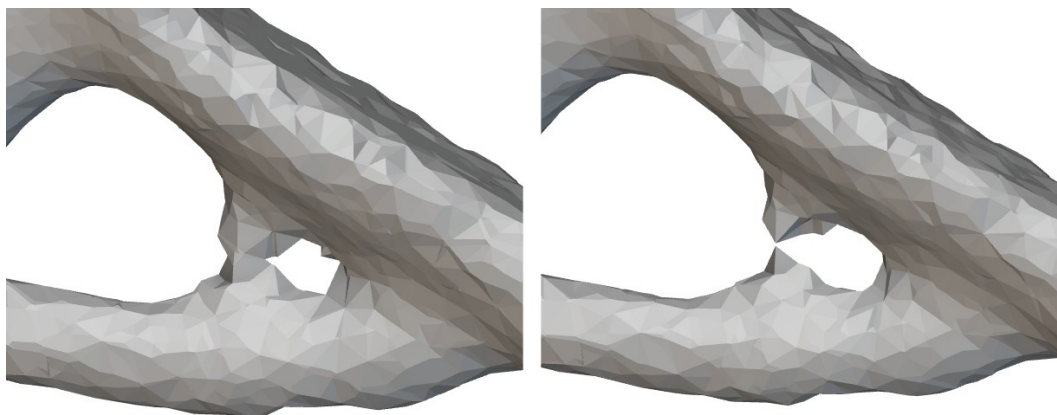
Rys. 7.1: Wynik optymalizacji topologicznej przed obróbką. Niebieski kolor ukazuje obszar z którego został usunięty materiał. Wymiar siatki 1 mm.



Rys. 7.2: Wynik optymalizacji po wygładzeniu powierzchni oraz dodaniu elementów mocowania Wymiar siatki 1 mm.

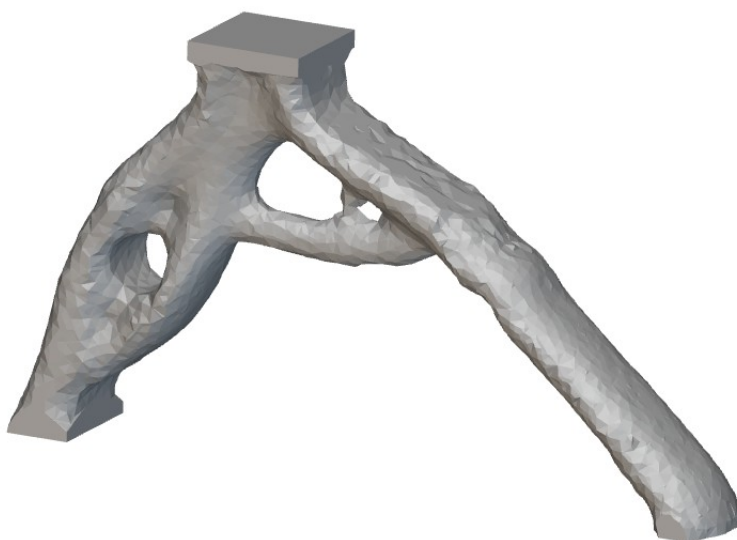
7.2 WYNIK OPTIMALIZACJI TOPOLOGICZNEJ DLA SIATKI 2 MM

Wynik tej optymalizacji wymagał zmiany parametru progu usuwania elementów. Przy użyciu domyślnej wartości progu wynoszącej 0,5 jeden z elementów wspornika pozostał przerwany. Po zmianie progu na wartość 0,46 objętość wspornika została zwiększona, a przerwa w elemencie została wyeliminowana. W tej pracy jest to jedyny przypadek zmiany wartości progu. Porównanie elementu przed oraz po złączeniu ukazano na rys. 7.3.

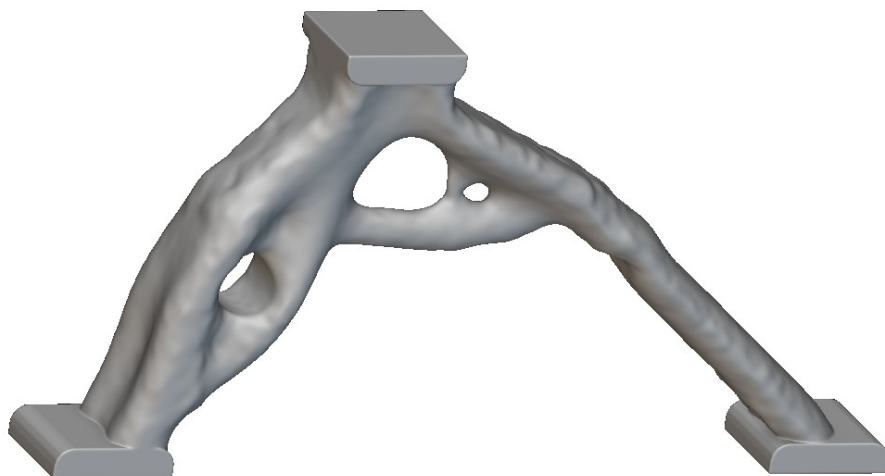


Rys. 7.3: Zbliżenie na przerwany element. Z lewej strony wartość progu wynosi 0,46, podczas gdy z prawej strony wynosi ona 0,5.

Ogólny kształt części przypomina wynik optymalizacji dla siatki 1 mm, ale występuje tylko pojedynczy poziomy element łączący belki wspornika. Prawa belka wspornika jest grubsza od tej w poprzednim wyniku. Wynik przed obróbką pokazano na rys. 7.4. W ramach obróbki dodano elementy mocowania oraz wygładzono powierzchnię wspornika, co ukazano na rys. 7.5.



Rys. 7.4: Wynik optymalizacji przed obróbką, siatka 2 mm.



Rys. 7.5: Wspornik po wygładzeniu i dodaniu elementów mocowania, siatka 2 mm.

7.3 WYNIK OPTIMALIZACJI TOPOLOGICZNEJ DLA SIATKI 3 MM

Otrzymany wspornik przypomina wynik optymalizacji dla siatki 2 mm. Zauważalną zmianą jest zmniejszenie objętości poziomego elementu między belkami oraz eliminacja pionowego elementu, który w poprzednim wyniku był rozłączony. Prawa belka tego wspornika jest grubsza od obu poprzednich wyników.



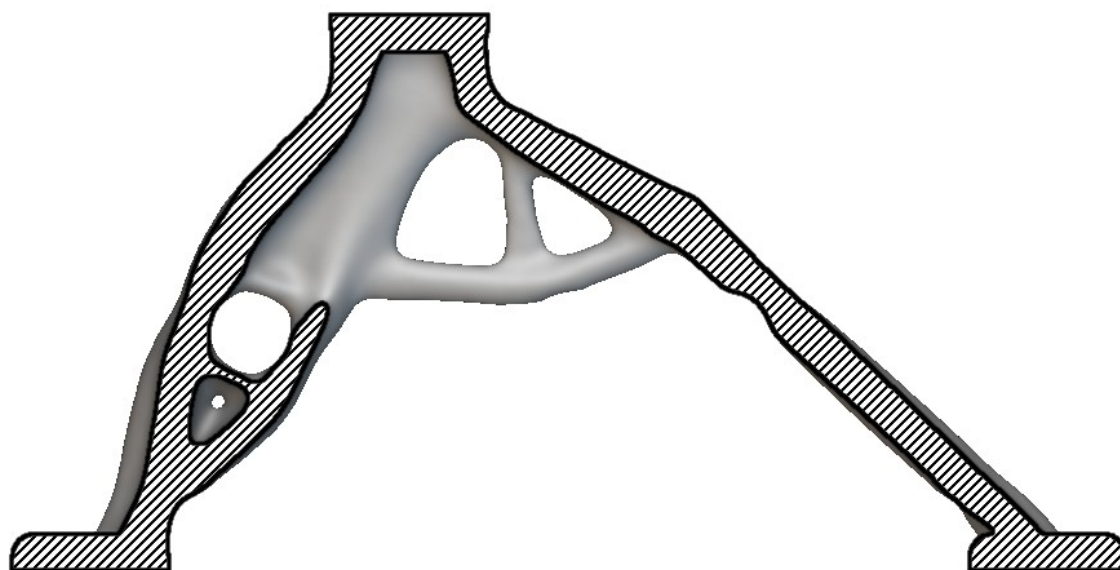
Rys. 7.6: Wynik optymalizacji przed obróbką, siatka 3 mm.



Rys. 7.7: Wspornik po wygładzeniu i dodaniu elementów mocowania, siatka 3 mm.

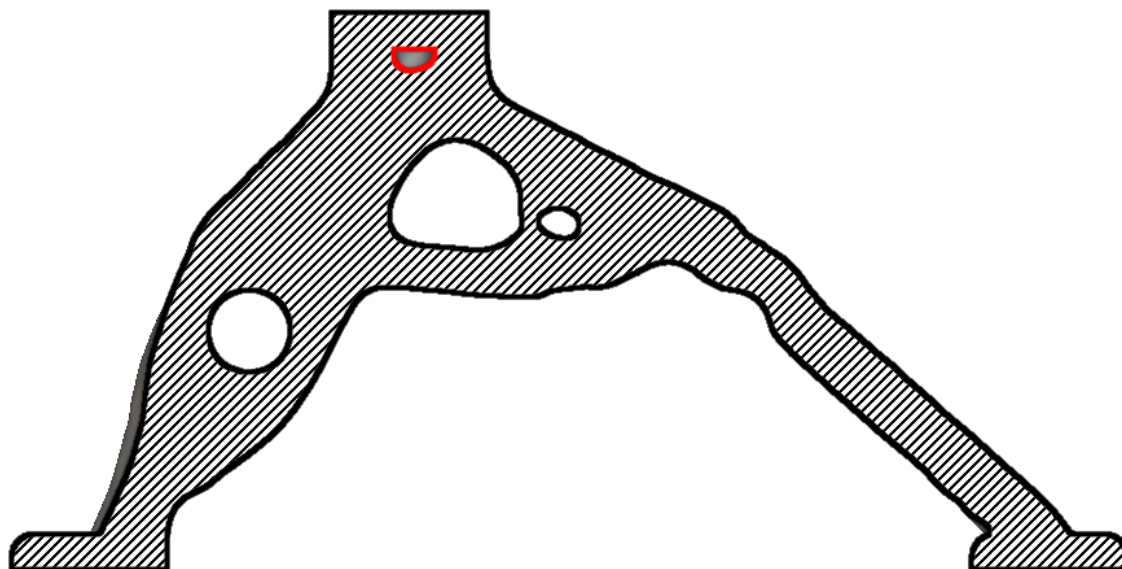
7.4 PRZEKROJE WYNIKÓW OPTYZMALIZACJI

Po uzyskaniu wyników optymalizacji i ich obróbce zostały wygenerowane przekroje wsporników. We wnętrzu wspornika zoptymalizowanego na siatce 1 mm znajdują się puste przestrzenie, jednak są one zamknięte materiałem. Przekrój został ukazany na rys. 7.8.



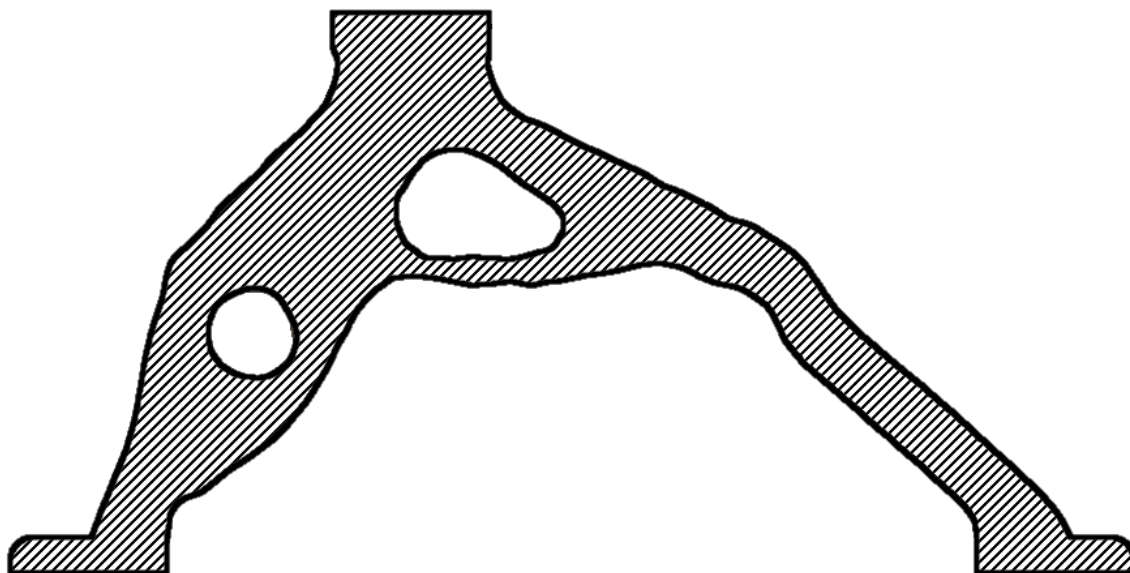
Rys. 7.8: Przekrój wspornika, siatka 1 mm.

Wspornik z siatką 2 mm posiada zamkniętą pustą przestrzeń, oznaczoną na rys. 7.9 kolorem czerwonym. Ogranicza to ilość możliwych do wykorzystania metod druku przestrzennego. W zależności od wybranej metody wytwarzania przestrzeń ta powinna zostać wypełniona lub powinien zostać dodany otwór do usunięcia luźnego materiału podczas końcowej obróbki.



Rys. 7.9: Przekrój wspornika, siatka 2 mm.

Wspornik zoptymalizowany na siatce 3 mm jest w całości wykonany z litego materiału. Jego przekrój pokazano na rys. 7.10.



Rys. 7.10: Przekrój wspornika, siatka 3 mm.

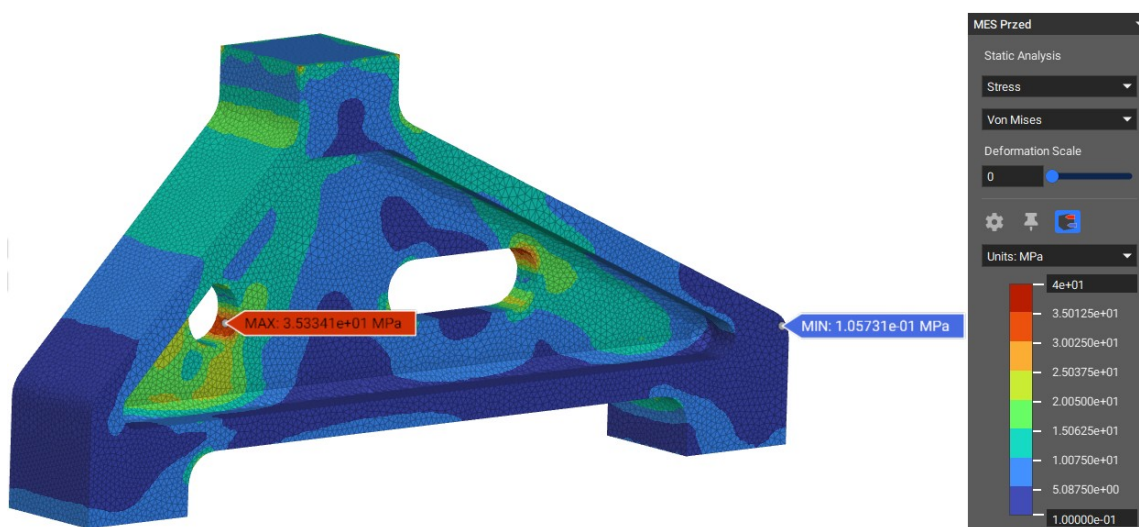
8 WYNIKI BADANIA MES

Przeprowadzono analizę statyczną MES dla wspornika przed optymalizacją oraz dla wsporników po optymalizacji. Parametry symulacji MES pozostały stałe dla wszystkich badań.

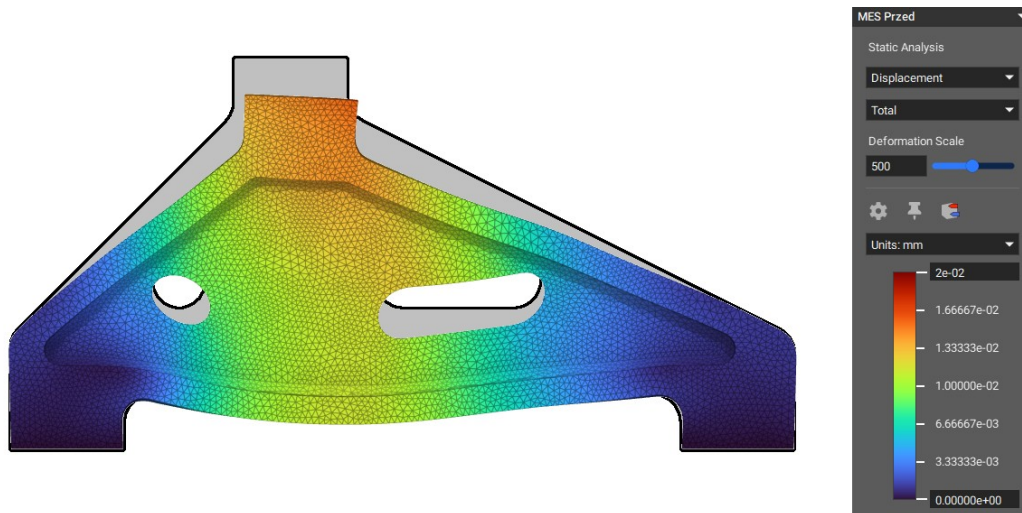
Wygenerowano siatkę czworościenną o wymiarach elementów 1 mm. Usunięto wszystkie stopnie swobody w dolnych podstawach wspornika. Zadano odgórną siłę nacisku działającą na górną powierzchnię wspornika o wartości 3000 N. Nie uwzględniono sił wybaczących. Graficzne przedstawienie warunków brzegowych przedstawiono na rys. 6.5.

8.1 WSPORNIK PRZED OPTYMALIZACJĄ

Przeprowadzono badanie wytrzymałościowe MES na wsporniku nieoptymalizowanym topologicznie. Wizualizację naprężeń zredukowanych von Misesa ukazano na rys. 8.1. Maksymalne wartości naprężeń znajdują się na ściankach otworów i dochodzą do 35,3 MPa. Duże wartości naprężeń występują między górną powierzchnią a podporami. Na znacznej objętości materiału naprężenia nie przekraczają 5 MPa. Masa części wynosi 261,4 g. Maksymalna wartość przemieszczenia wyniosła 1,59 mm. Wizualizacja przemieszczenia znajduje się na rys. 8.2. Siatka MES użyta w badaniu składa się z 426909 elementów.



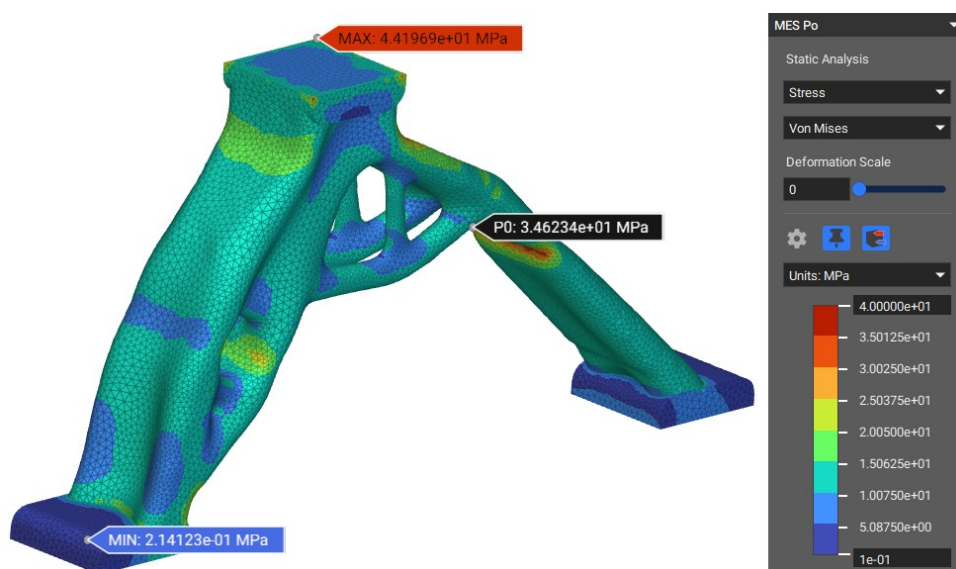
Rys. 8.1: Wspornik przed optymalizacją - naprężenia zredukowane von Misesa.



Rys. 8.2: Wizualizacja przemieszczenia wspornika przed optymalizacją, skala przemieszczeń 500 razy większa od rzeczywistego wymiaru.

8.2 OPTIMALIZACJA Z SIATKĄ 1 MM

Maksymalna wartość uzyskana w analizie MES występuje na ostrej krawędzi siatki. Jest to wynik niepoprawny, więc jako rzeczywistą wartość odnotowano punkt o drugiej najwyższej wartości naprężenia. Punkt ten jest oznaczony na rys. 8.3 jako P0.

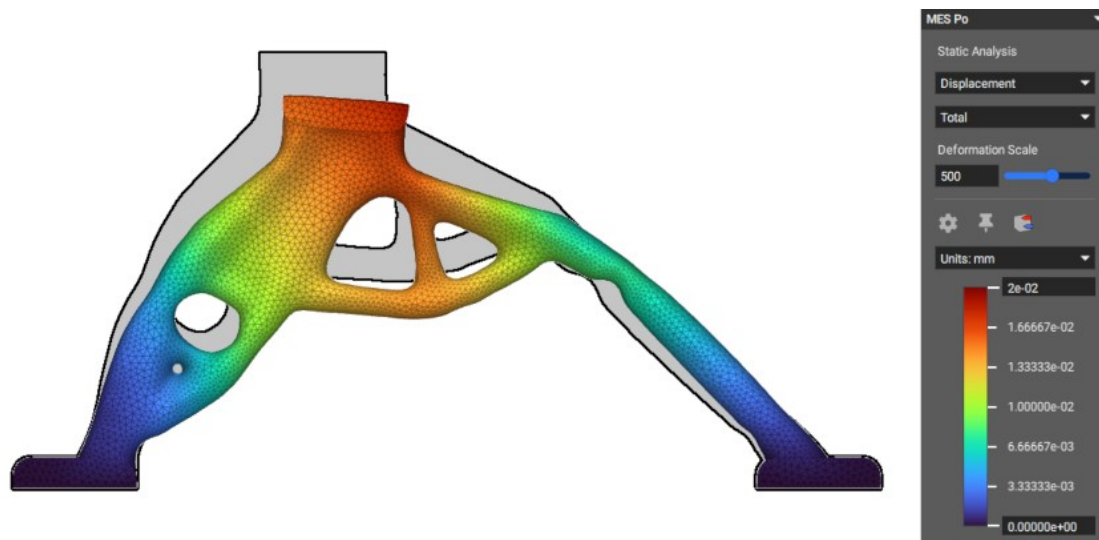


Rys. 8.3: Wspornik po optymalizacji - naprężenia zredukowane von Misesa. Siatka 1 mm.

Tabela 8.1: Wartości masy oraz maksymalnych naprężeń wsporników, siatka 1 mm

	Masa [g]	Maks. naprężenia von Misesa [MPa]	Maks. przemieszczenie [mm]
Przed optymalizacją	261,4	35,3	1,59
Po optymalizacji	145,4	34,6	1,89

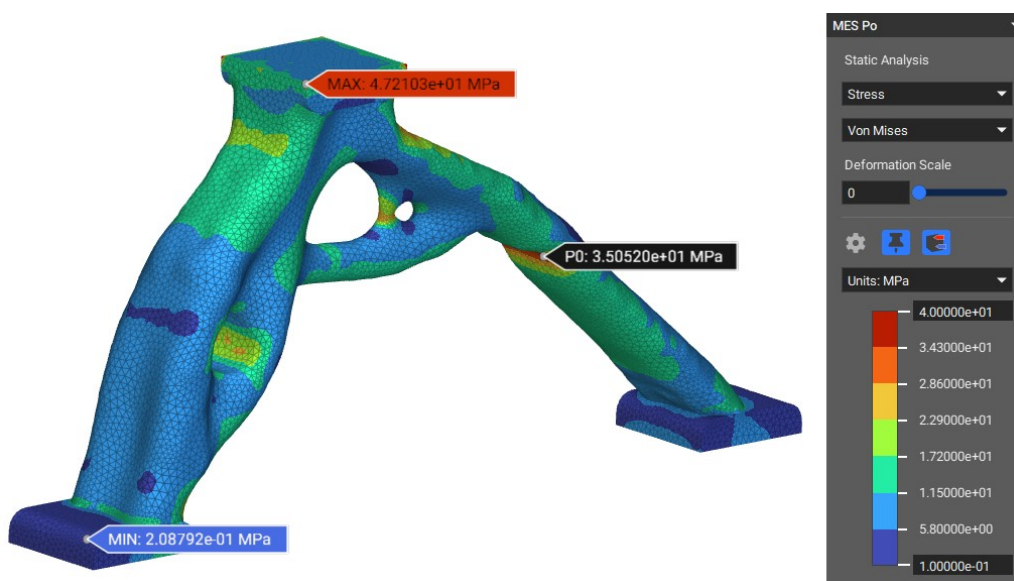
Masę oraz maksymalne naprężenia wynikowej części podano w tabeli 8.1. Największe naprężenia wystąpiły w najcieńszej sekcji prawej belki. Rozkład naprężeń jest równomierny, a wartości poniżej 5 MPa występują tylko na dodanych po optymalizacji elementach mocujących. Maksymalna wartość przemieszczenia wyniosła 1,89 mm. Wizualizacja przemieszczenia znajduje się na rys. 8.4. Ilość elementów siatki MES wyniosła 248400.



Rys. 8.4: Wizualizacja przemieszczenia wspornika po optymalizacji, skala przemieszczeń 500 razy większa od rzeczywistego wymiaru. Siatka 1 mm.

8.3 OPTYMALIZACJA Z SIATKĄ 2 MM

Tak jak w badaniu MES wspornika zoptymalizowanego na siatce 1 mm, maksymalna wartość naprężeń występuje na ostrej krawędzi siatki. Jest to wynik niepoprawny, więc jako rzeczywistą wartość odnotowano punkt o drugiej najwyższej wartości naprężenia. Punkt ten jest oznaczony na rys. 8.5 jako P0.

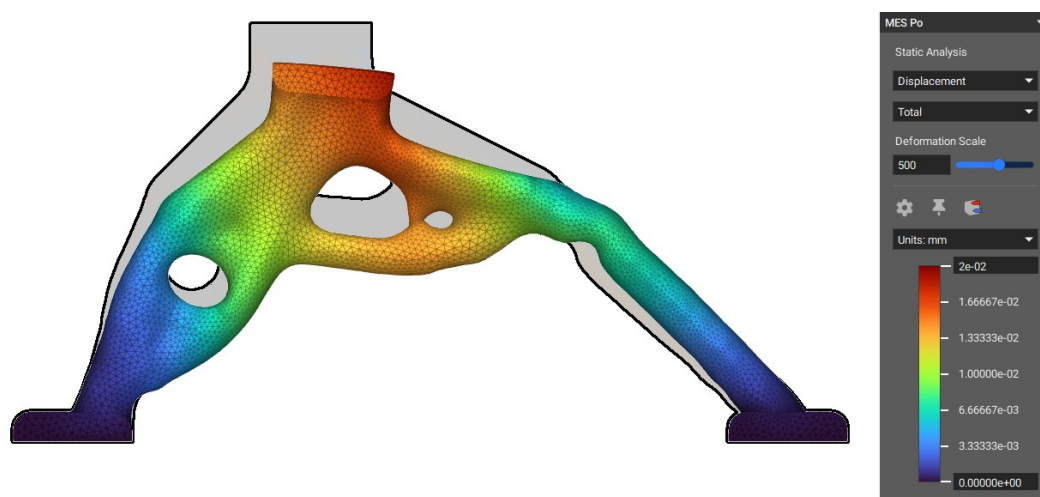


Rys. 8.5: Wspornik po optymalizacji - naprężenia zredukowane von Misesa. Siatka 2 mm.

Tabela 8.2: Wartości masy oraz maksymalnych naprężeń wsporników, siatka 2 mm.

	Masa [g]	Maks. naprężenia von Misesa [MPa]	Maks. przemieszczenie [mm]
Przed optymalizacją	261,4	35,3	1,59
Po optymalizacji	153,9	35,1	1,95

Masę oraz maksymalne naprężenia wynikowej części podano w tabeli 8.2. Największe naprężenia wystąpiły w najcieńszej sekcji prawej belki. Równomierność rozłożenia naprężeń jest mniejsza niż w przykładzie z rozdziału 8.2. Naprężenia o wartości poniżej 5 MPa w większości występują na dodanych po optymalizacji elementach mocujących. Maksymalna wartość przemieszczenia wyniosła 1,95 mm. Wizualizacja przemieszczenia znajduje się na rys. 8.6. Ilość elementów siatki MES to 253364.



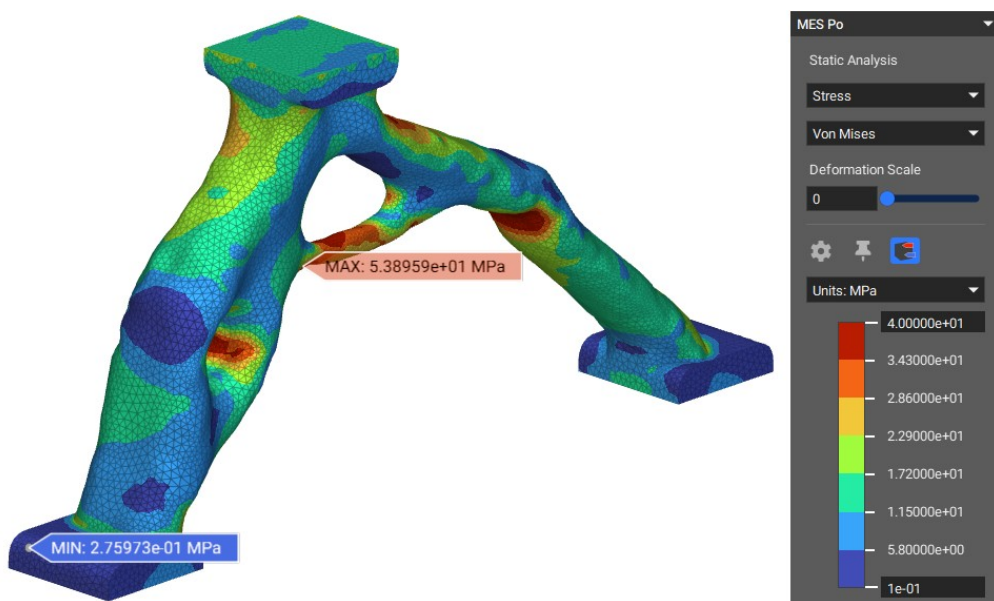
Rys. 8.6: Wizualizacja przemieszczenia wspornika po optymalizacji, skala przemieszczeń 500 razy większa od rzeczywistego wymiaru. Siatka 2 mm.

8.4 OPTIMALIZACJA Z SIATKĄ 3 MM

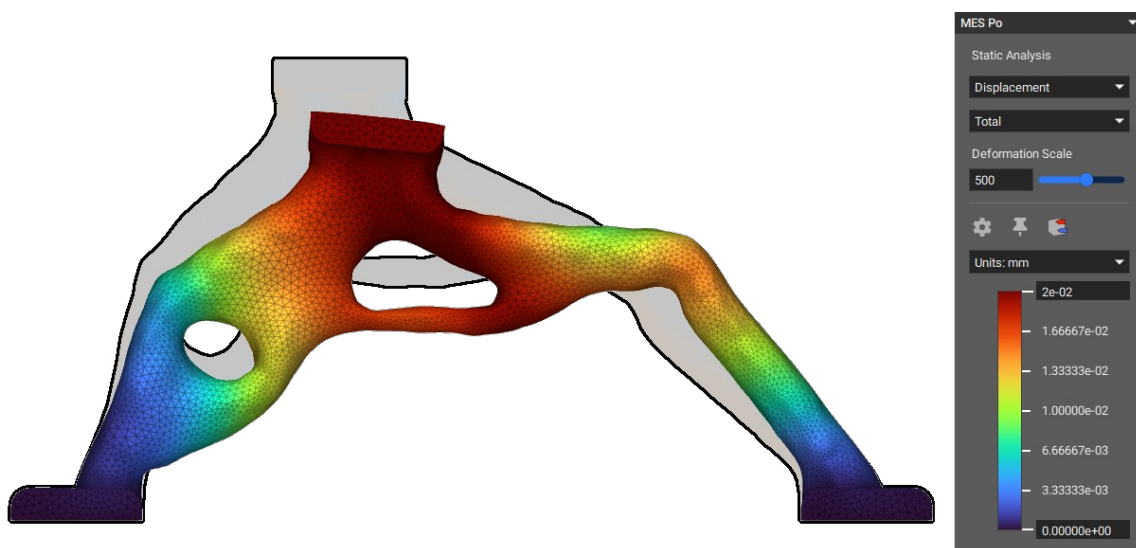
Wizualizację wyników analizy pokazano na rys. 8.7. Masę oraz maksymalne naprężenia wynikowej części podano w tabeli 8.3. Maksymalne naprężenia odnotowano na ściance otworu w lewej belce, na najcieńszej sekcji prawej belki oraz na elemencie poziomym łączącym obie belki. Rozkład naprężeń nie jest równomierny. Maksymalna wartość przemieszczenia wyniosła 3,06 mm. Wizualizację przemieszczeń umieszczono na rys. 8.8. Ilość elementów siatki MES wyniosła 225782.

Tabela 8.3: Wartości masy oraz maksymalnych naprężeń wsporników, siatka 3 mm.

	Masa [g]	Maks. naprężenia von Misesa [MPa]	Maks. przemieszczenie [mm]
Przed optymalizacją	261,4	35,3	1,59
Po optymalizacji	133,2	53,9	3,06



Rys. 8.7: Wspornik po optymalizacji - naprężenia zredukowane von Misesa. Siatka 3 mm.



Rys. 8.8: Wizualizacja przemieszczenia wspornika po optymalizacji, skala przemieszczeń 500 razy większa od rzeczywistego wymiaru. Siatka 3 mm.

Tabela 8.4: Podsumowanie wyników badań MES

Wariant wspornika	Masa [g]	Maks. naprężenia von Misesa [MPa]	Maks. przemieszczenie [mm]
Przed optymalizacją	261,4	35,3	1,59
Siatka 1 mm	145,4	34,6	1,89
Siatka 2 mm	153,9	35,1	1,95
Siatka 3 mm	133,2	53,9	3,06

9 PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy przeprowadzono optymalizację topologiczną wspornika technicznego wykorzystując siatki elementów skończonych o trzech różnych dokładnościach. Następnie przeprowadzono analizy wytrzymałościowe MES i zebrano otrzymane dane.

Wspornik nieoptymalizowany topologicznie wykazał najmniejsze przemieszczenia. Wynik ten jest osiągnięty kosztem dużej masy, która wynosi 261,4 g. Większa objętość oznacza też większą ilość elementów skończonych w siatce, co może przedłużyć wykonywanie dokładnej analizy MES. Maksymalne naprężenia znajdują się przy otworach. Ogólny rozkład naprężeń jest nierównomierny i może oznaczać mało wydajne użycie materiału. Dodanie materiału w okolicach otworów mogłoby ulepszyć właściwości wytrzymałościowe części.

Wszystkie wsporniki zoptymalizowane topologicznie posiadają znacząco zredukowaną masę. Redukcja objętości zmniejszyła ilość elementów skończonych, co może przyspieszyć analizę MES. W przypadku wspornika zoptymalizowanego na siatce 1 mm jest to 248400 elementów, czyli tylko 58,2% z 426909 elementów siatki wspornika nieoptymalizowanego. Zoptymalizowane wsporniki posiadają charakterystyczny, organicznie wyglądający kształt który by utrudnił wykonanie ich metodami innymi niż druk przestrzenny. Do druku zoptymalizowanych wsporników w drukarkach opartych na technologii FDM oraz żywicznych wymagane by było zastosowanie podpór. Wszystkie zoptymalizowane części posiadają mały ubytek po prawej stronie, który jest spowodowany przez uwzględnienie przestrzeni na zaprojektowany otwór techniczny. Zbierają się w nim naprężenia, więc zmiana parametrów optymalizacji mogłaby ulepszyć wydajność tych części.

Wspornik zoptymalizowany na siatce 1 mm jest najlepszy wśród zoptymalizowanych wsporników. Maksymalne naprężenia o wartości 34,6 MPa są porównywalne z naprężeniami części nieoptymalizowanej. Równomierny rozkład naprężeń na części, wydajne użycie materiału. Jako wadę można zaznaczyć duże wymagania obliczeniowe, siatka użyta podczas optymalizacji miała 8 razy więcej elementów od siatki z rozmiarem elementów 2 mm.

Wspornik zoptymalizowany na siatce 2 mm posiadał niepołączony detal i wymagał zmniejszenia współczynnika proggu, co skutkowało zwiększeniem objętości. Z tego względu jego masa jest największa ze wszystkich zoptymalizowanych wsporników. Powierzchnia części pozostaje nieregularna nawet po wygładzeniu. Naprężenia maksymalne o wartości 35,1 MPa są porównywalne z wspornikiem nieoptymalizowanym.

Wspornik zoptymalizowany na siatce 3 mm stracił pewne dokładniejsze detale w porównaniu do poprzednich. Słaby wynik analizy MES, wartość maksymalnych naprężeń wynosi

53,9 MPa. Ogólny rozkład naprężeń jest nierównomierny i może wskazywać na nieoptymalne rozmieszczenie materiału. Naprężenia skupiają się w wielu miejscach. Stosunkowo duże maksymalne przemieszczenie.

Biorąc pod uwagę przeanalizowane tutaj przykłady można stwierdzić, że dokładniejsza siatka elementów skończonych użyta przy optymalizacji topologicznej powinna skutkować lepszymi osiągnięciami wynikowej części. Analizując dane podane w tabeli 8.4 można zauważyć zależność zmniejszania się wartości maksymalnego przemieszczenia oraz naprężenia wraz ze spadkiem rozmiaru elementów siatki.

Wyniki zawarte w tabeli 8.4 wskazują, że tylko dla siatek o małych elementach (1-2 mm) otrzymujemy mniejsze naprężenia von Misesa-Hubera niż dla wspornika przed optymalizacją. Otrzymane wyniki są wówczas również dokładniejsze. Zastosowanie siatek o zbyt dużych elementach prowadzi w optymalizacji topologicznej do mniej dokładnych wyników.

Optymalizacja może być uznana za sukces, wsporniki na siatkach 1 mm i 2 mm wykazują porównywalne naprężenia z wspornikiem nieoptymalizowanym. Jednocześnie ich masa wynosi kolejno 145,4 g i 153,9 g, czyli 55,6% oraz 58,9% masy wspornika nieoptymalizowanego.

LITERATURA

1. Budzyński A., Krótki wstęp do zastosowania Metody Elementów Skończonych (MES) do numerycznych obliczeń inżynierskich, *GM View*, 5/2006, Wrocław 2006.
2. Idczak E., Optymalizacja topologiczna dwufazowych metamateriałów auksetycznych, *Rozprawa doktorska*, Politechnika Poznańska, Poznań 2019.
3. Zienkiewicz O. C., *Metoda elementów skończonych*. Arkady, Warszawa 1972.
4. Khadiri I., Zemzami M., Nguyen, N., Abouelmajd M., Hmina N., Soufiane B., Topology optimization methods for additive manufacturing: a review. *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, 2023, 14, 12.
5. Mata M., Pinto M., Costa J. Topological Optimization of a Metal Extruded Doorhandle using nTopology. *U.Porto Journal of Engineering*, 2023, 9, 42-54.
6. Wang C., Zhu J., Wu M., Hou J., Zhou H., Meng L., Li C., Zhang W., Sherry L. Multi-scale design and optimization for solid-lattice hybrid structures and their application to aerospace vehicle components. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34, 386-396.
7. Zhu J., Zhou, H., Wang C., lu Z., Yuan S., Zhang W. A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34, 91-110.
8. Wiberg A., Persson J., Ölvander J. Design for Additive Manufacturing Using a Master Model Approach. *ASME 2019 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, USA, August 18–21, 2019, Anaheim, California, ASME, 2020
9. Fuchs D., Bartz R., Kuschmitz S., Vietor T. Necessary advances in computer-aided design to leverage on additive manufacturing design freedom. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 2022, 16, 1633-1651
10. Gade S., Vagge S., Rathod M. A Review on Additive Manufacturing – Methods, Materials, and its Associated Failures. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 2023, 17, 40-63.
11. Sarabia-Vallejos M., Rodríguez-Umanzor F., Gonzalez Henriquez C., Rodriguez Hernandez J. Innovation in Additive Manufacturing Using Polymers: A Survey on the Technological and Material Developments. *Polymers*, 2022, 14, 1351.

12. Emami M., Barazandeh F., Yaghmaie F. Scanning-Projection Based Stereolithography, Method and Structure. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 218, 116-124.
13. Leong K., Quach M., Lin C., Craig C., Sun A., Guo F., Robinson T., Olanrewaju A. Democratizing access to microfluidics: Rapid prototyping of capillary microfluidics with a low-cost masked stereolithography 3D printer. 2023.
14. Gibson I., Rosen D., Stucker B. *Additive Manufacturing Technologies*. 2nd Edition, Springer, 2015.
15. Kim G., Lee S., Kim H., Yang D., Kim Y., Kyung Y., Kim C., Choi S., Kim B., Ha H., Kwon S., Kim N. Three-Dimensional Printing: Basic Principles and Applications in Medicine and Radiology. *Korean Journal of Radiology*, 2016, 17, 182-197.
16. Gui X., Xiao M., Zhang Y., Gao L., Liao Y., Structural topology optimization based on parametric level set method under the environment of ANSYS secondary development. 2nd International Conference on Computer Engineering, Information Science & Application Technology, 2016, Atlantis Press, 868–877.
17. Internetowa Encyklopedia PWN, Prawo Hooke’a, <https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/;3912632>, dostęp 24.06.2024.
18. Strona producenta programu Inventor Professional 2024, <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview>, dostęp 28.01.2024.
19. Dokumentacja i artykuły nTop, <https://www.ntop.com/resources>, dostęp: 16.11.2023.
20. AZO Materials, Titanium Alloys – Physical Properties, <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1341>, dostęp 24.06.2024.

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 2.1: Dyskretyzacja płaskiej geometrii ciągłej za pomocą siatki: a) początkowa geometria ciągła, b) model dyskretny idealny c) model dyskretny obliczeniowy [1].....	6
Rys. 2.2: Trójwymiarowa siatka czworościenna.....	7
Rys. 2.3: Wyniki analizy MES przedstawione na siatce jako skala barw.....	9
Rys. 2.4: Siatka MES została zagęszczona wokół otworu, ponieważ będzie przykładana w tym miejscu siła.....	9
Rys. 3.1: Przykład optymalizacji topologicznej dolnego wahacza zawieszenia samochodu za pomocą metody SIMP. Stan bezpośrednio po optymalizacji, przed obróbką.....	10
Rys. 3.2: Wpływ współczynnika penalizującego, zależność modułu sprężystości materiału od znormalizowanej gęstości elementów [4].....	11
Rys. 3.3: Optymalizacja topologiczna za pomocą metody LSM. W (a) pokazana jest struktura wejściowa, w (b-e) kolejne iteracje optymalizacji, a w (f) ostateczny kształt [16].....	13
Rys. 4.1: Podpory w druku 3D, a) optymalizowane topologicznie, b) drzewo-podobne [4].....	14
Rys. 4.2: Sposoby naświetlania warstw w drukarkach żywicznych: a) TE, b) BE [12].....	15
Rys. 4.3: Porównanie technologii naświetlania. Źródło oryginalnej, angielskiej wersji grafiki: Dsazer25, CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=90618574	16
Rys. 4.4: Schemat metody FFF (Fused Filament Fabrication) a) szpula z tworzywem sztucznym, b) Podgrzewany ekstruder, c) wyrób, d) struktury podpierające, e) ruchoma podstawa. Źródło: Paolo Cignoni, CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=57953642	17
Rys. 4.5: Przykład drukarki SLS, wersja proszkowa [15].....	19
Rys. 5.1: Interfejs użytkownika programu Autodesk Inventor Professional 2024.....	20
Rys. 5.2: Interfejs użytkownika programu nTop.....	21
Rys. 6.1: Model koncepcyjny wspornika. Proporcje wymiarów nie odpowiadają ostatecznej wersji wspornika. w Siła jest nadawana na górną powierzchnię (kolor czerwony). Wspornik jest sztywno zamocowany na dolnych podporach (kolor zielony). W projekcie uwzględniono niewielkie siły wybaczące (kolor niebieski).	23
Rys. 6.2: Wspornik z ręcznie usuniętym nadmiarem materiału. Przekrój poprzeczny kształtem przypomina dwuteownik.....	24
Rys. 6.3: Obszar ograniczający optymalizację (kolor szary) oraz elementy mocowania wspornika (kolor zielony).....	24

Rys. 6.4: Siatka elementów skończonych użyta do optymalizacji topologicznej. Rysunek podzielono na trzy części o różnych wymiarach siatki. Są to kolejno od lewej 1 mm, 2 mm oraz 3 mm.....	25
Rys. 6.5: Warunki brzegowe wspornika. Podstawy zaznaczono kolorem zielonym, główną siłę nacisku czerwonym, a siły wybaczące kolorem niebieskim.....	26
Rys. 7.1: Wynik optymalizacji topologicznej przed obróbką. Niebieski kolor ukazuje obszar z którego został usunięty materiał. Wymiar siatki 1 mm.....	27
Rys. 7.2: Wynik optymalizacji po wygładzeniu powierzchni oraz dodaniu elementów mocowania Wymiar siatki 1 mm.....	27
Rys. 7.3: Zbliżenie na przerwany element. Z lewej strony wartość progu wynosi 0,46, podczas gdy z prawej strony wynosi ona 0,5.....	28
Rys. 7.4: Wynik optymalizacji przed obróbką, siatka 2 mm.....	28
Rys. 7.5: Wspornik po wygładzeniu i dodaniu elementów mocowania, siatka 2 mm.....	29
Rys. 7.6: Wynik optymalizacji przed obróbką, siatka 3 mm.....	29
Rys. 7.7: Wspornik po wygładzeniu i dodaniu elementów mocowania, siatka 3 mm.....	30
Rys. 7.8: Przekrój wspornika, siatka 1 mm.....	30
Rys. 7.9: Przekrój wspornika, siatka 2 mm.....	31
Rys. 7.10: Przekrój wspornika, siatka 3 mm.....	31
Rys. 8.1: Wspornik przed optymalizacją - naprężenia zredukowane von Misesa.....	32
Rys. 8.2: Wizualizacja przemieszczenia wspornika przed optymalizacją, skala przemieszczeń 500 razy większa od rzeczywistego wymiaru.....	33
Rys. 8.3: Wspornik po optymalizacji - naprężenia zredukowane von Misesa. Siatka 1 mm.....	33
Rys. 8.4: Wizualizacja przemieszczenia wspornika po optymalizacji, skala przemieszczeń 500 razy większa od rzeczywistego wymiaru. Siatka 1 mm.....	34
Rys. 8.5: Wspornik po optymalizacji - naprężenia zredukowane von Misesa. Siatka 2 mm.....	34
Rys. 8.6: Wizualizacja przemieszczenia wspornika po optymalizacji, skala przemieszczeń 500 razy większa od rzeczywistego wymiaru. Siatka 2 mm.....	35
Rys. 8.7: Wspornik po optymalizacji - naprężenia zredukowane von Misesa. Siatka 3 mm.....	36
Rys. 8.8: Wizualizacja przemieszczenia wspornika po optymalizacji, skala przemieszczeń 500 razy większa od rzeczywistego wymiaru. Siatka 3 mm.....	36

SPIS TABEL

Tabela 8.1: Wartości masy oraz maksymalnych naprężeń wsporników, siatka 1 mm.....	33
Tabela 8.2: Wartości masy oraz maksymalnych naprężeń wsporników, siatka 2 mm.....	35
Tabela 8.3: Wartości masy oraz maksymalnych naprężeń wsporników, siatka 3 mm.....	35
Tabela 8.4: Podsumowanie wyników badań MES.....	36