



**POLITECHNIKA
RZESZOWSKA**
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



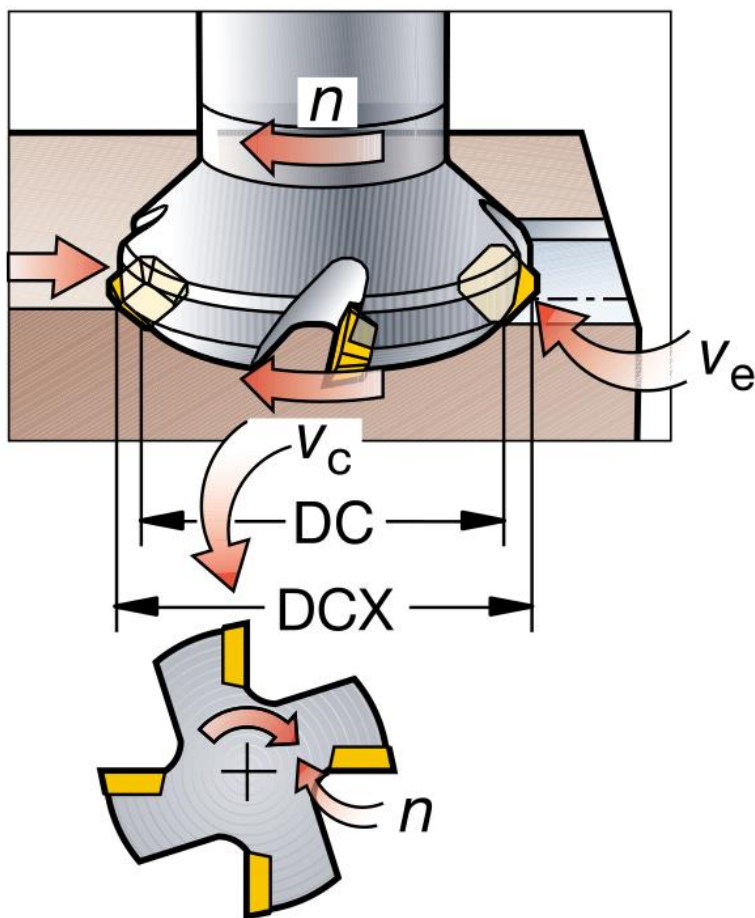
**WYDZIAŁ
BUDOWY MASZYN
I LOTNICTWA**
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

Projektowanie elementów frezowanych

dr inż. Michał Batsch

Frezowanie - wprowadzenie

Frezowanie wykonywane jest za pomocą obracającego się narzędzia wielostrzowego, które porusza się w zaprogramowany sposób prawie w każdym kierunku w stosunku do przedmiotu obrabianego. Frezowanie jest najczęściej stosowane do obróbki płaskich powierzchni, lecz wraz stosując sterowanie numeryczne można obrabiać również powierzchnie swobodne.



n = Prędkość obrotowa wrzeciona, obr./min

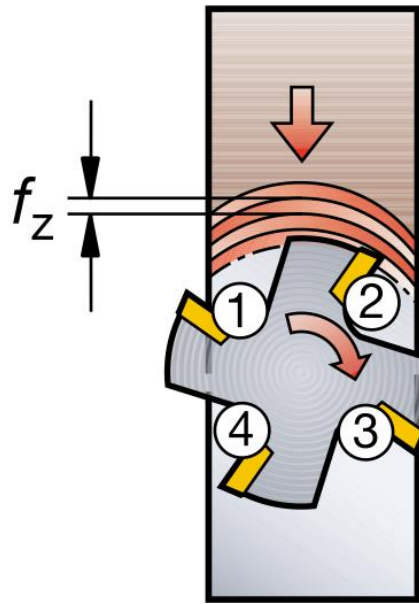
v_c = Prędkość skrawania, m/min

v_e = Efektywna prędkość skrawania m/min

DC = Średnica frezu, mm

DCX = Maksymalna średnica skrawania, mm

Frezowanie - parametry



$$z_n = 4$$

$$z_c = 4$$

f_z = Posuw na ostrze, mm/ostrze

v_f = Prędkość posuwu, mm/min

z_n = Liczba ostrzy we frezie (szt.)

z_c = Liczba efektywnych ostrzy (szt.)

f_n = Posuw na obrót, mm/obr ($f_z * z_c$)

n = Prędkość obrotowa wrzeciona, obr/min

$$v_f = f_z \times z_c \times n$$

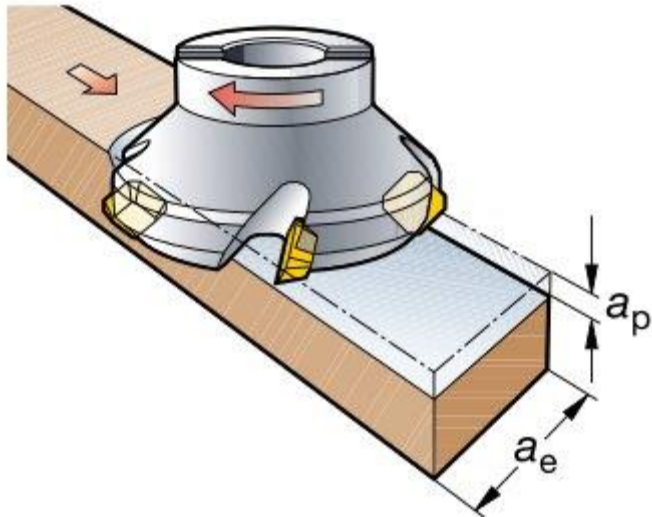
a_e = Szerokość frezowania, mm

a_p = Osiowa głębokość skrawania, mm

k_c = Opór właściwy skrawania N/mm²

P_c = Moc skrawania netto, kW

M_c = Moment obrotowy, Nm

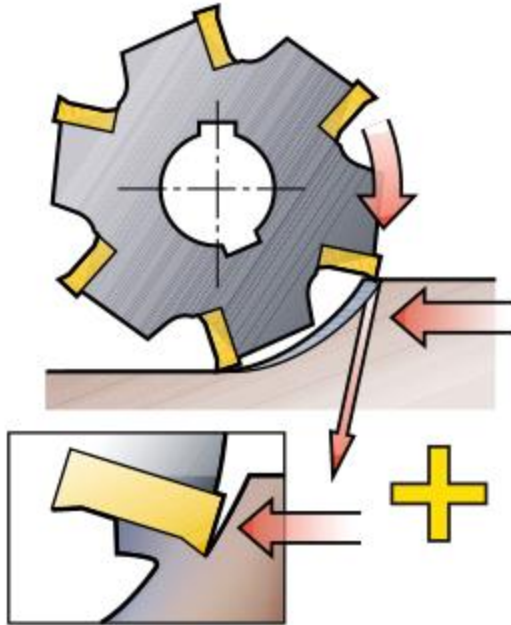


$$P_c = \frac{a_p \times a_e \times v_f \times k_c}{60 \times 10^6}$$

$$M_c = \frac{P_c \times 30 \times 10^3}{\pi \times n}$$

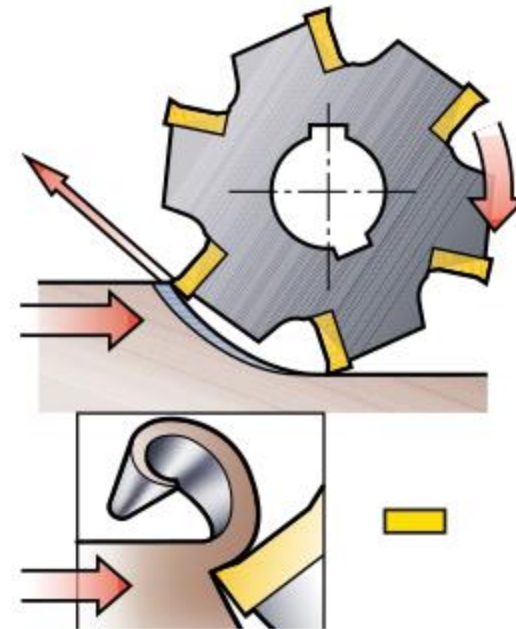
Frezowanie - odmiany

Frezowanie współbieżne
(zalecane)



Przedmiot obrabiany przesuwa się w kierunku zgodnym z ruchem pracujących ostrzy freza.

Frezowanie przeciwbieżne



Przedmiot obrabiany przesuwa się w kierunku przeciwnym do ruchu pracujących ostrzy freza

Frezowanie czołowe

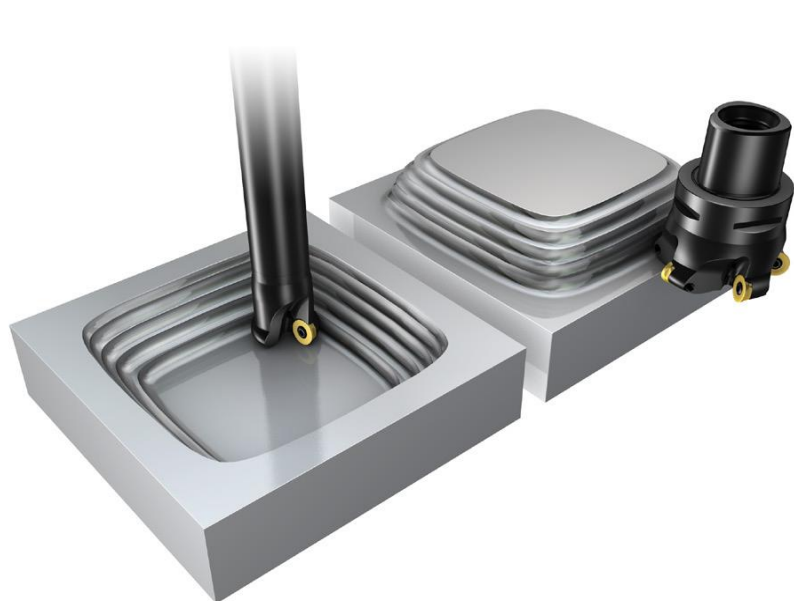


Frezowanie walcowo-czołowe



Frezowanie - profilowanie

Obróbka zgrubna

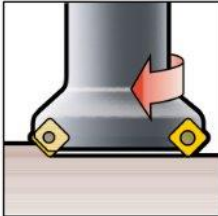
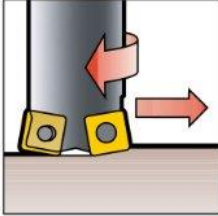
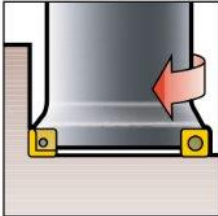
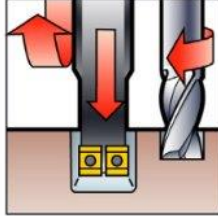
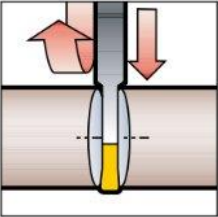
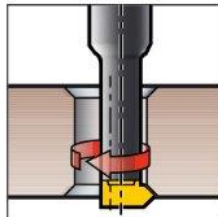
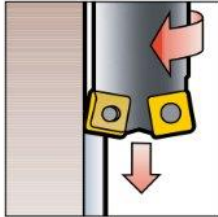


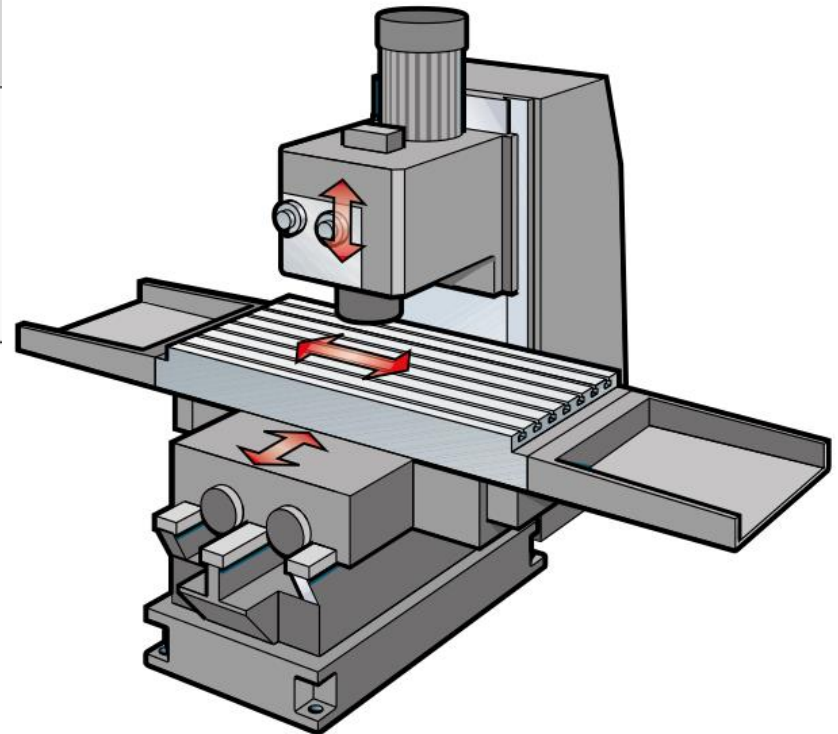
Obróbka wykończeniowa



Metody frezowania

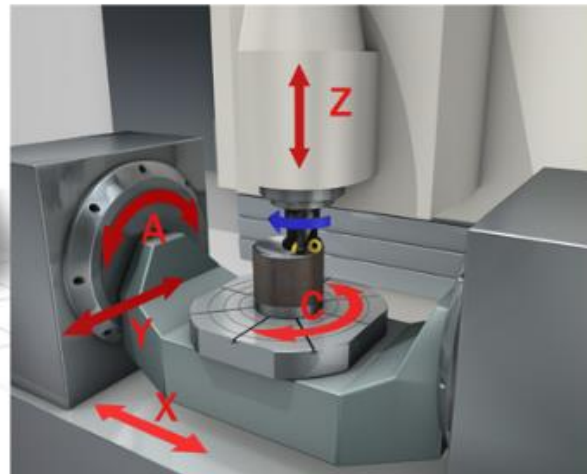
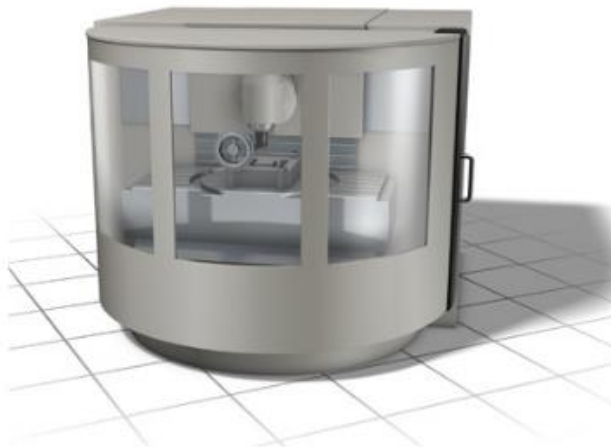
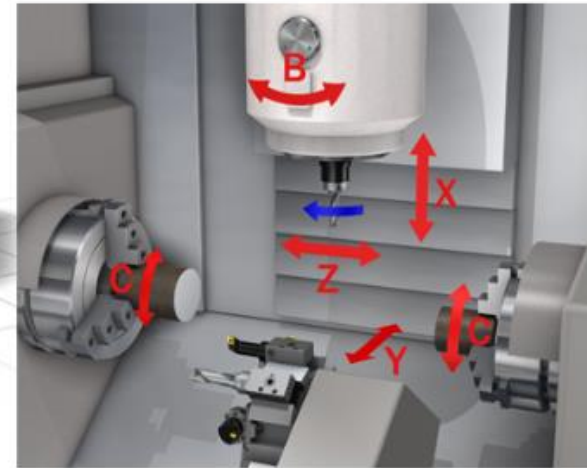
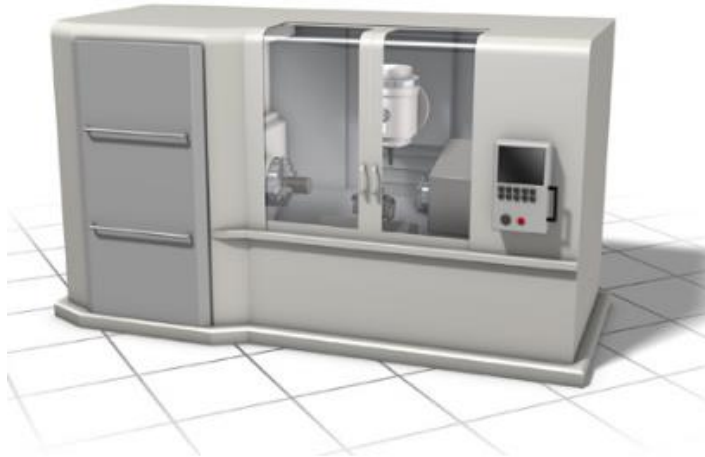
Frezowanie 3-osiowe

Frezowanie czołowe	Frezowanie z wysokim posuwem	Frezowanie walcowo-czołowe	Frezowanie rowków
			
Przecinanie	Fazowanie	Frezowanie wgłębne	
			




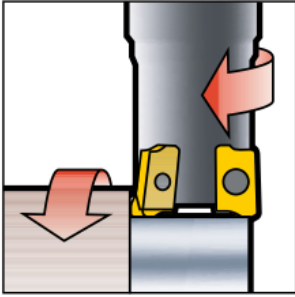
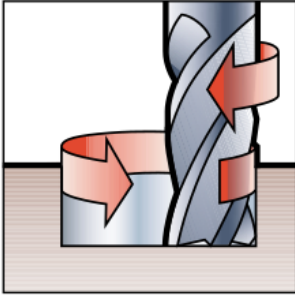
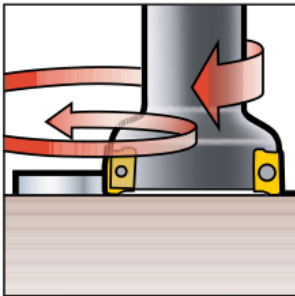
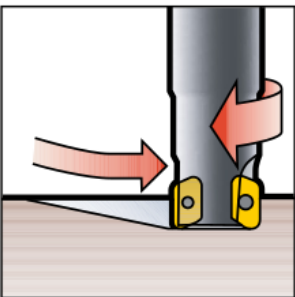
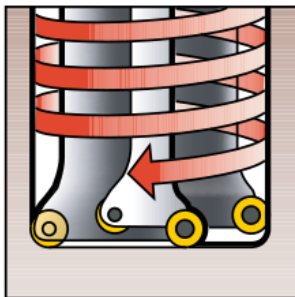
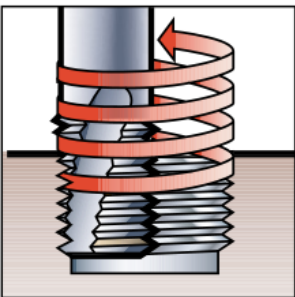
Metody frezowania

Frezowanie 4- lub 5-osiowe



Metody frezowania

Frezowanie 4- lub 5-osiowe

Frezowanie profilowe	Frezowanie toczne	Frezowanie trochoidalne	Frezowanie kołowe
			
Frezowanie liniowe ze skośnym zagłębieniem	Interpolacja śrubowa	Frezowanie gwintów	
			

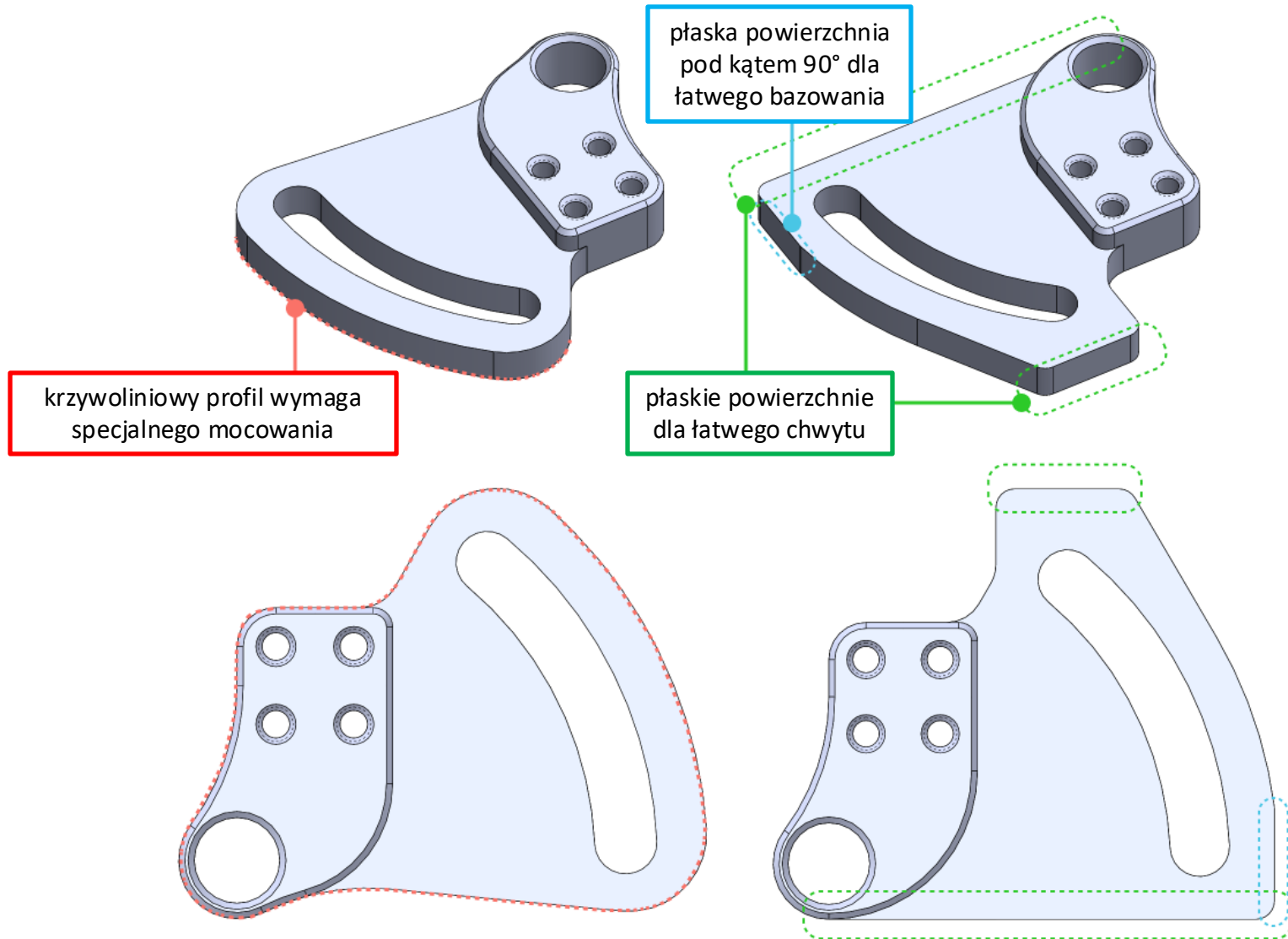
Wytyczne do projektowania

Strategia mocowania i bazy projektowe

- 1. Zasada jednej operacji:** Projektuj tak, aby element mógł zostać wykonany przy jednym zamocowaniu. Każde przełożenie detalu to ryzyko błędu i dodatkowy koszt.
- 2. Dostęp do powierzchni:** Unikaj konieczności obróbki powierzchni, które są zakryte przez uchwyt lub imadło.
- 3. Baza:** Zapewnij płaską powierzchnię (bazę), która posłuży jako punkt odniesienia (referencja) i miejsce pewnego chwytu.
- 4. Sztywność pod obciążeniem:** Upewnij się, że detal po zamocowaniu jest na tyle sztywny, by nie ugiął się pod siłami skrawania (szczególnie ważne przy cienkich ściankach).

Wytyczne do projektowania

Strategia mocowania i bazy projektowe

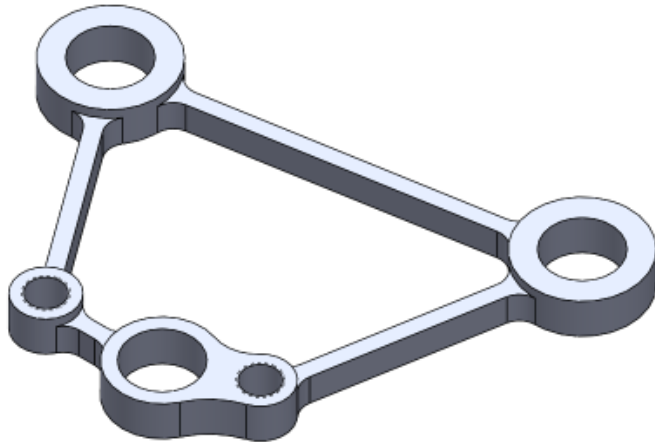


Wytyczne do projektowania

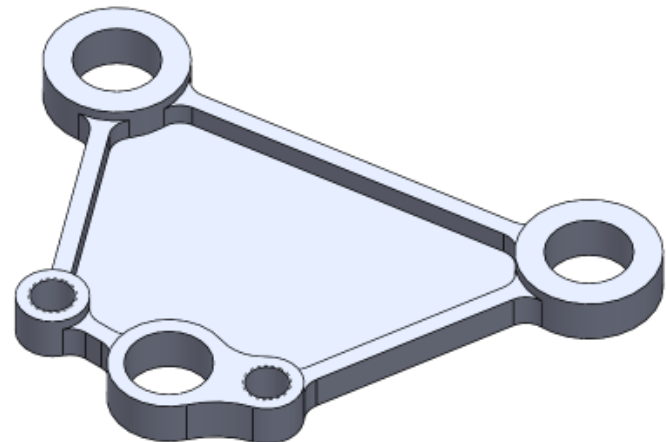
Strategia mocowania i bazy projektowe



Utrudnione mocowanie bez deformowania - mała sztywność



Wystarczająca sztywność - pewne mocowanie
(dodana ścianka usztywniająca)



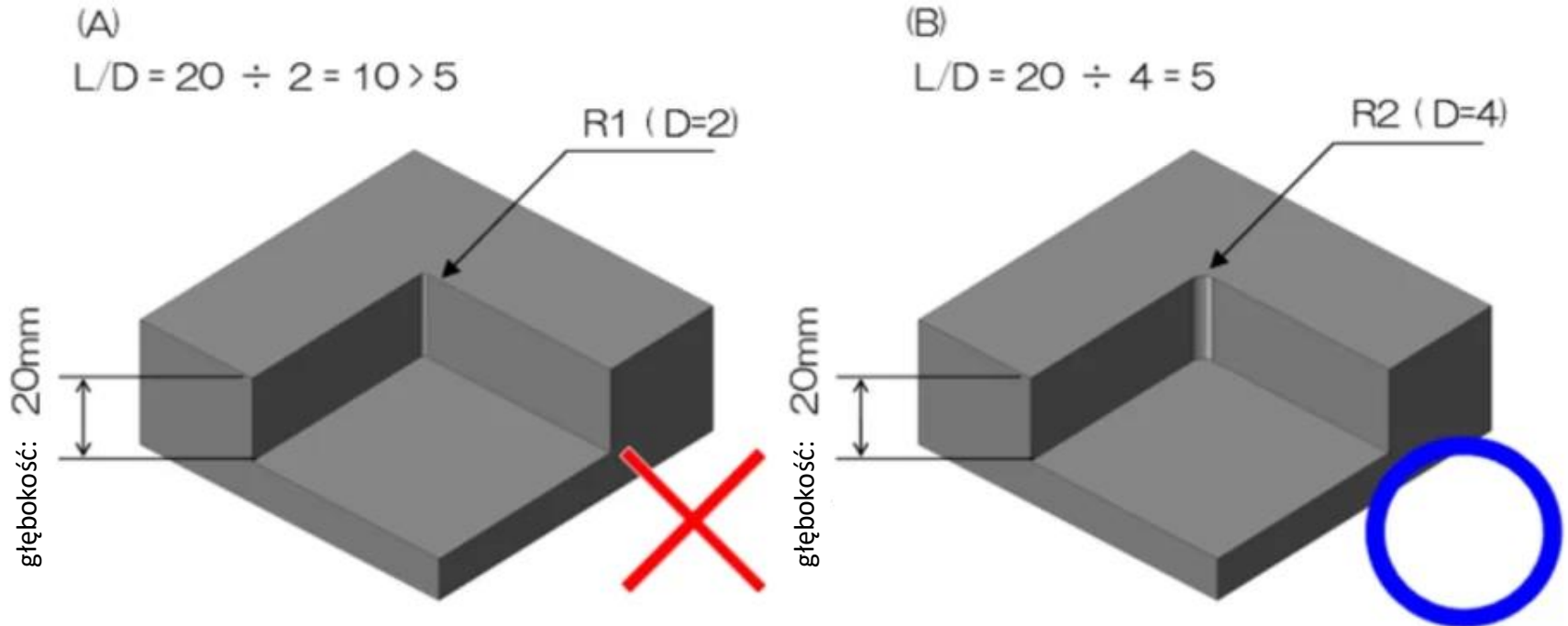
Wytyczne do projektowania

Geometria otworów i kanałów

- 1. Standardowe proporcje L/D:** Otwory i kieszenie powinny mieć stosunek długości do średnicy pozwalający na użycie standardowych narzędzi (zwykle L/D od 3 do 5).
- 2. Orientacja:** Otwory powinny być równoległe lub prostopadłe do osi detalu/bazy. Unikaj otworów pod dziwnymi kątami, jeśli to możliwe.
- 3. Otwory nieprzelotowe (ślepe):** Dno powinno być stożkowe (wynik pracy wiertła). W otworach gwintowanych gwint nie powinien dochodzić do samego dna (miejsce na wyjście gwintownika i wióry).
- 4. Otwory:** Unikaj otworów łamanych (dogleg) lub wygiętych – są niemożliwe do wykonania klasycznym frezowaniem/wierceniem.

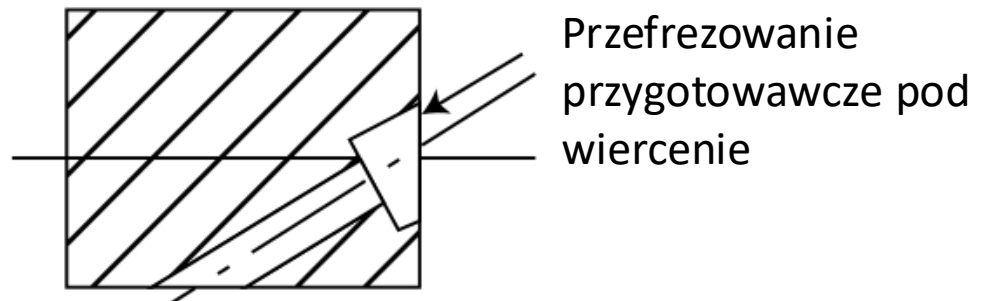
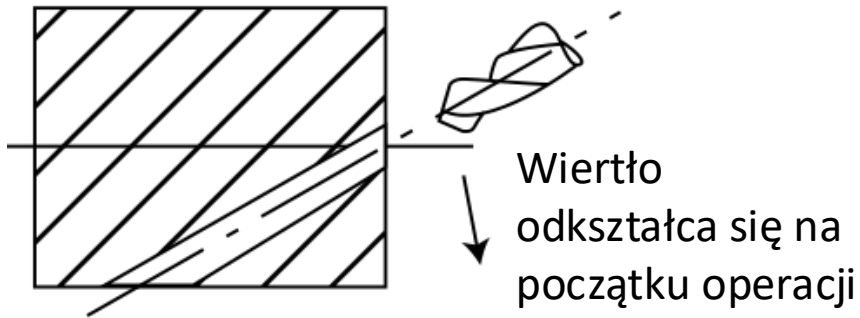
Wytyczne do projektowania

Geometria otworów i kanałów



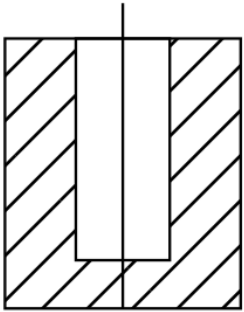
Wytyczne do projektowania

Geometria otworów i kanałów

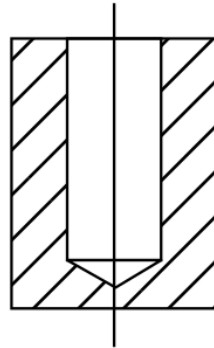


Wytyczne do projektowania

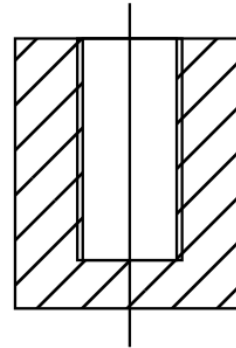
Geometria otworów i kanałów



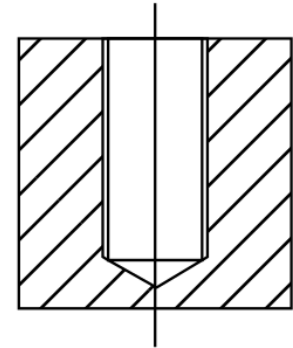
Trudny



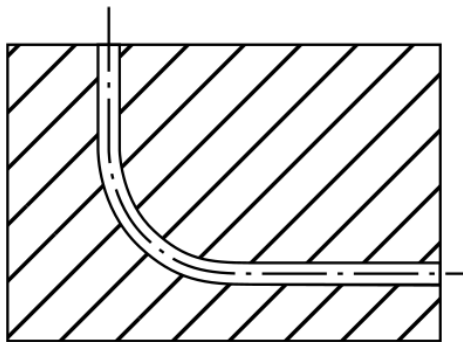
Łatwy



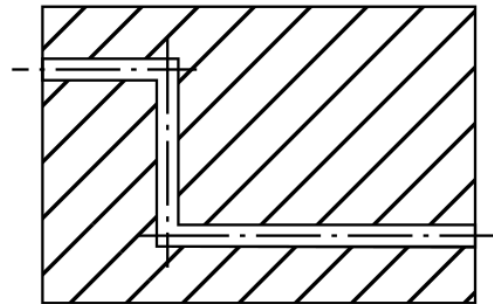
Nieвозмоżliwy



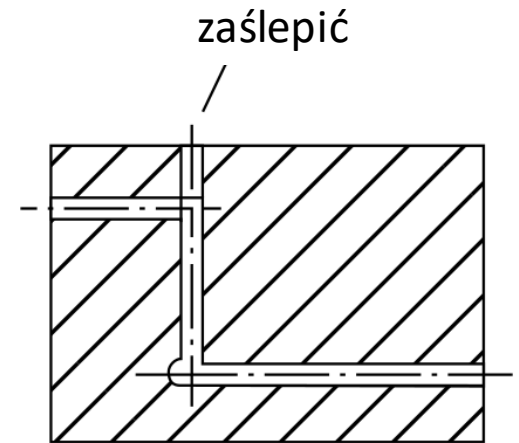
Łatwy



Nieвозмоżliwy



Nieвозмоżliwy



Możliwy

Wytyczne do projektowania

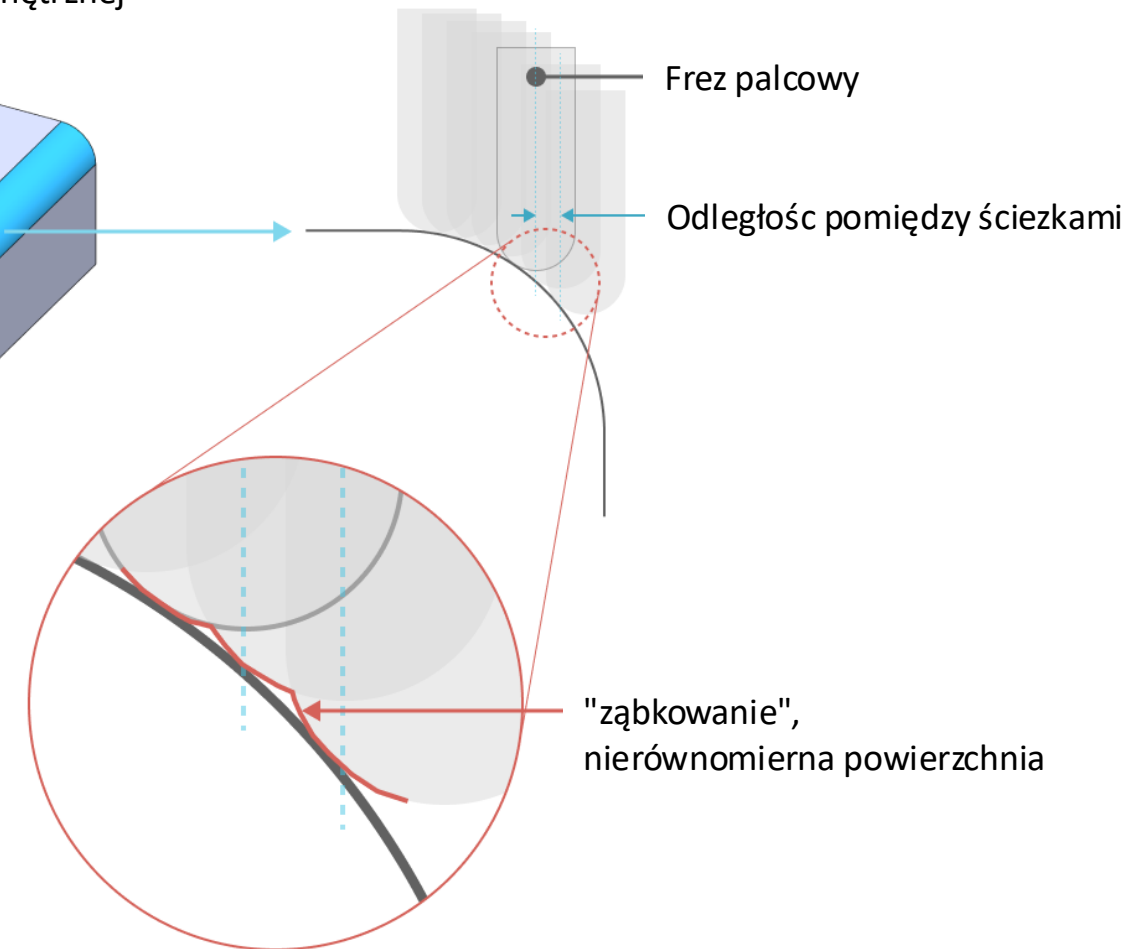
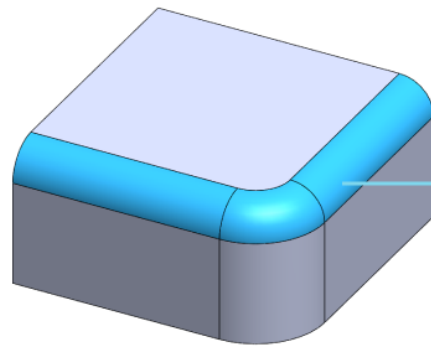
Kształtowanie kieszeni i naroży

- 1. Promienie naroży:** Promienie wewnętrzne prostopadłe do bazy muszą odpowiadać standardowym promieniom frezów. Im większy promień, tym lepiej (większe, sztywniejsze narzędzie i szybsza praca).
- 2. Płaszczyzny:** Dąż do tego, by obrabiane powierzchnie były wzajemnie prostopadłe lub równoległe do bazy.
- 3. Ograniczenie stron obróbki:** Jeśli to możliwe, ogranicz frezowanie rowków i kanałków do jednej strony detalu.
- 4. Kolizje:** Zawsze weryfikuj, czy oprawka narzędziowa lub wrzeciono nie uderzy w detal lub uchwyt przy obróbce głębokich elementów.
- 5. Naroża zewnętrzne:** fazować, nie stosować zaokrągleń zewnętrznych

Wytyczne do projektowania

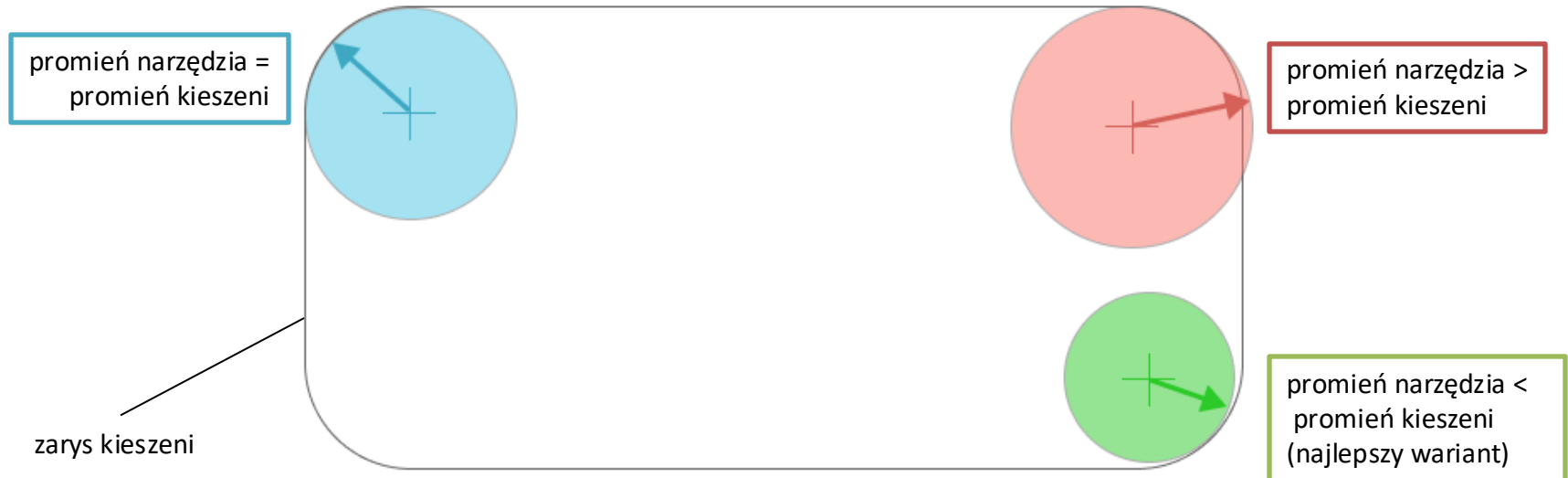
Kształtowanie kieszeni i naroży

Zaokrąglenie krawędzi zewnętrznej



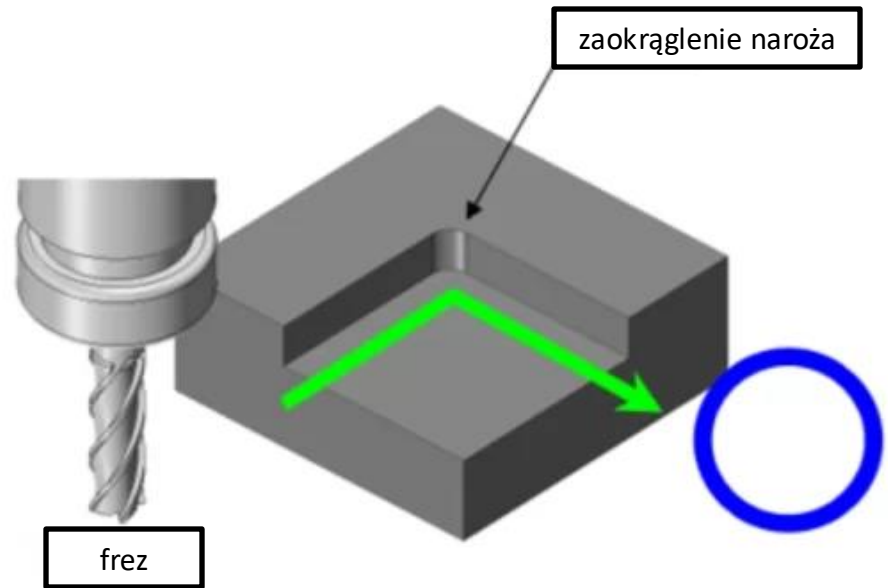
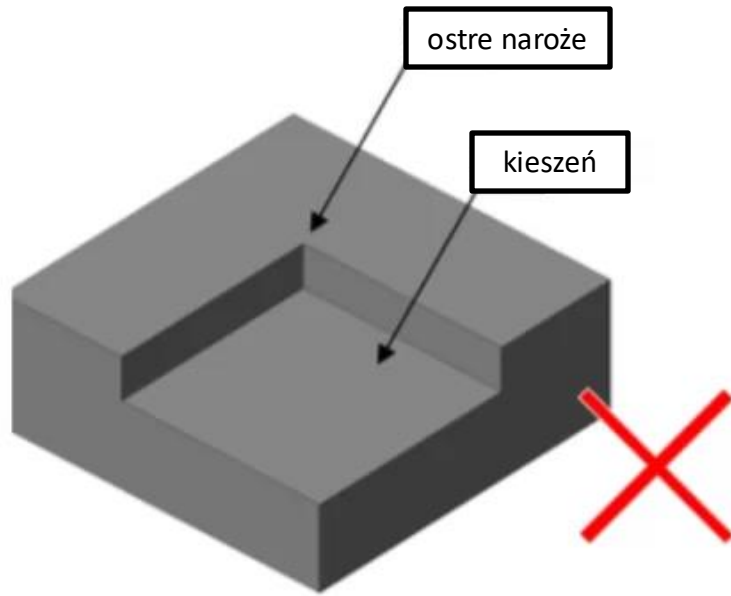
Wytyczne do projektowania

Kształtowanie kieszeni i naroży



Wytyczne do projektowania

Kształtowanie kieszeni i naroży



Wytyczne do projektowania

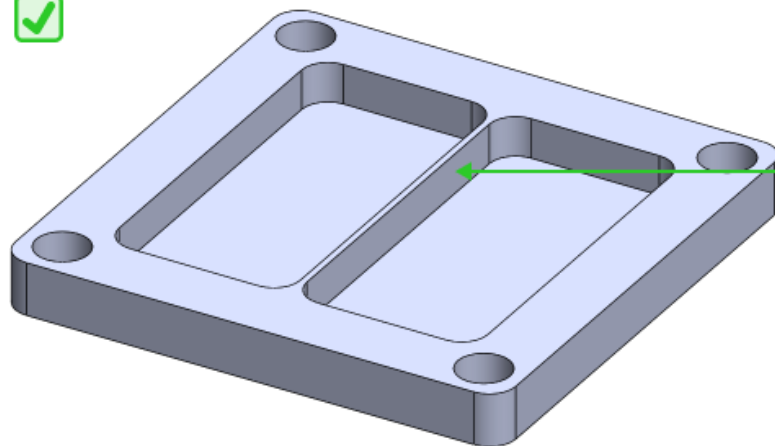
Specyfika dużych i długich elementów

- 1. Długie komponenty:** Unikaj głębokich otworów wzdłużnych. Zamiast frezować cały przekrój, rozważ użycie materiału wstępnie uformowanego (np. profili ciągnionych lub ekstrudowanych).
- 2. Gabaryty:** Unikaj elementów ekstremalnie długich lub cienkich – są podatne na drgania i odkształcenia termiczne.
- 3. Elementy skrzynkowe:** Unikaj obróbki wewnątrz zamkniętych lub głębokich kostek – brak miejsca na odprowadzenie wiórów i dostęp narzędzia.

Wytyczne do projektowania

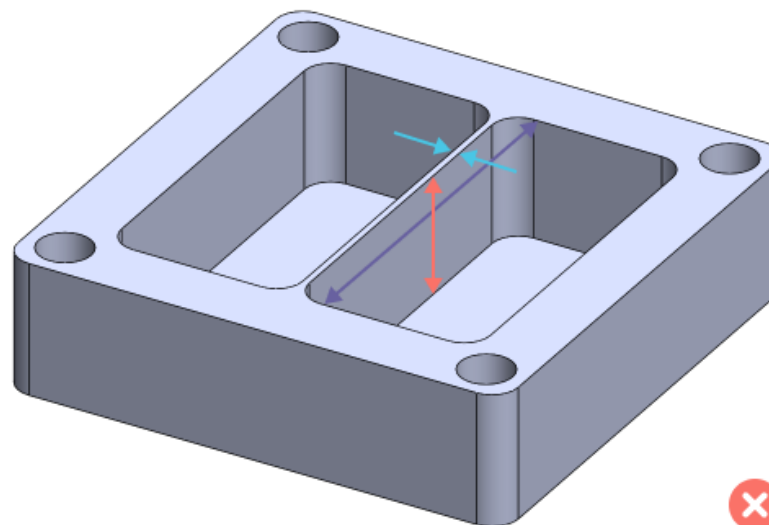
Specyfika dużych i długich elementów

Cienkie ścianki



Należy zachować odpowiednią sztywność cienkich ścianek aby zapobiec drganiom podczas obróbki. Można analizować je jako belki.

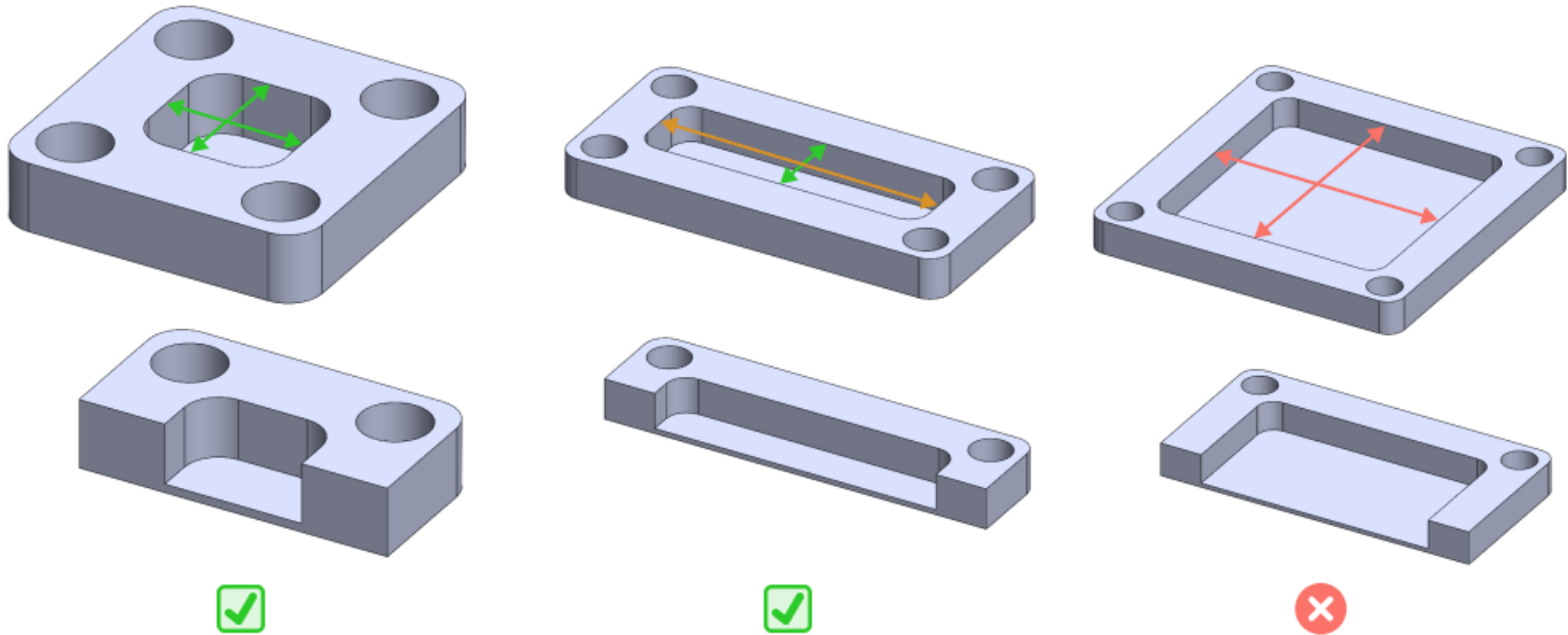
Sztywność elementów cienkościennych maleje nieliniowo wraz ze wzrostem **wysokości** i **długości** oraz zmniejszeniem **grubości**



Wytyczne do projektowania

Specyfika dużych i długich elementów

Drgania elementów typu "błona"



Elementy długie i cienkie (o dużej smukłości) częściej wpadają w wibracje w trakcie frezowania.

Wytyczne do projektowania

Wykończenie i tolerancje

- 1. Zasada "Najgorszej akceptowalnej jakości":** Stosuj najszersze możliwe tolerancje i największą dopuszczalną chropowatość powierzchni, które zapewnią poprawne działanie. *(Uwaga: Zmniejszenie tolerancji o połowę często podwaja koszt wykonania.)*
- 2. Powierzchnie szlifowane:** Jeśli powierzchnia ma być szlifowana po frezowaniu, powinna być wyniesiona (naddatek) i nigdy nie powinna tworzyć naroży wewnętrznych z innymi powierzchniami (trudny dostęp ściernicy).

Wytyczne do projektowania

Wykończenie i tolerancje



Optymalizacja topologiczna

Istota optymalizacji topologicznej

1. Bryła startowa

Proces zaczyna się od wypełnienia całej dostępnej przestrzeni projektowej litym materiałem.

2. Definicja warunków brzegowych:

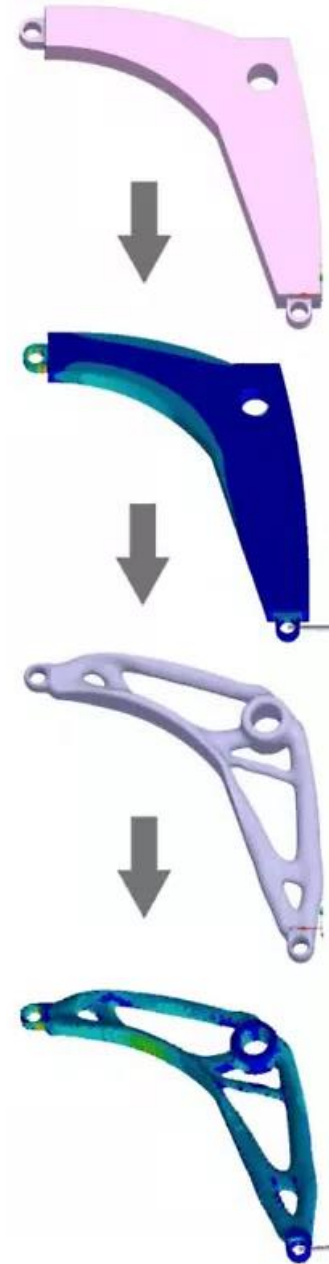
Sposób zamocowania (podpory).

Przyłożone siły (obciążenia).

Właściwości materiałowe i dopuszczalne naprężenia

3. Dyskretyzacja

Oprogramowanie dzieli bryłę na siatkę małych elementów skończonych, aby obliczyć rozkład sił.



Optymalizacja topologiczna

Mechanizm usuwania materiału

Podejście binarne

Algorytm sprawdza każdy element siatki. Jeśli element nie przenosi obciążeń – zostaje usunięty (wyłączony).

Sztywność i gęstość

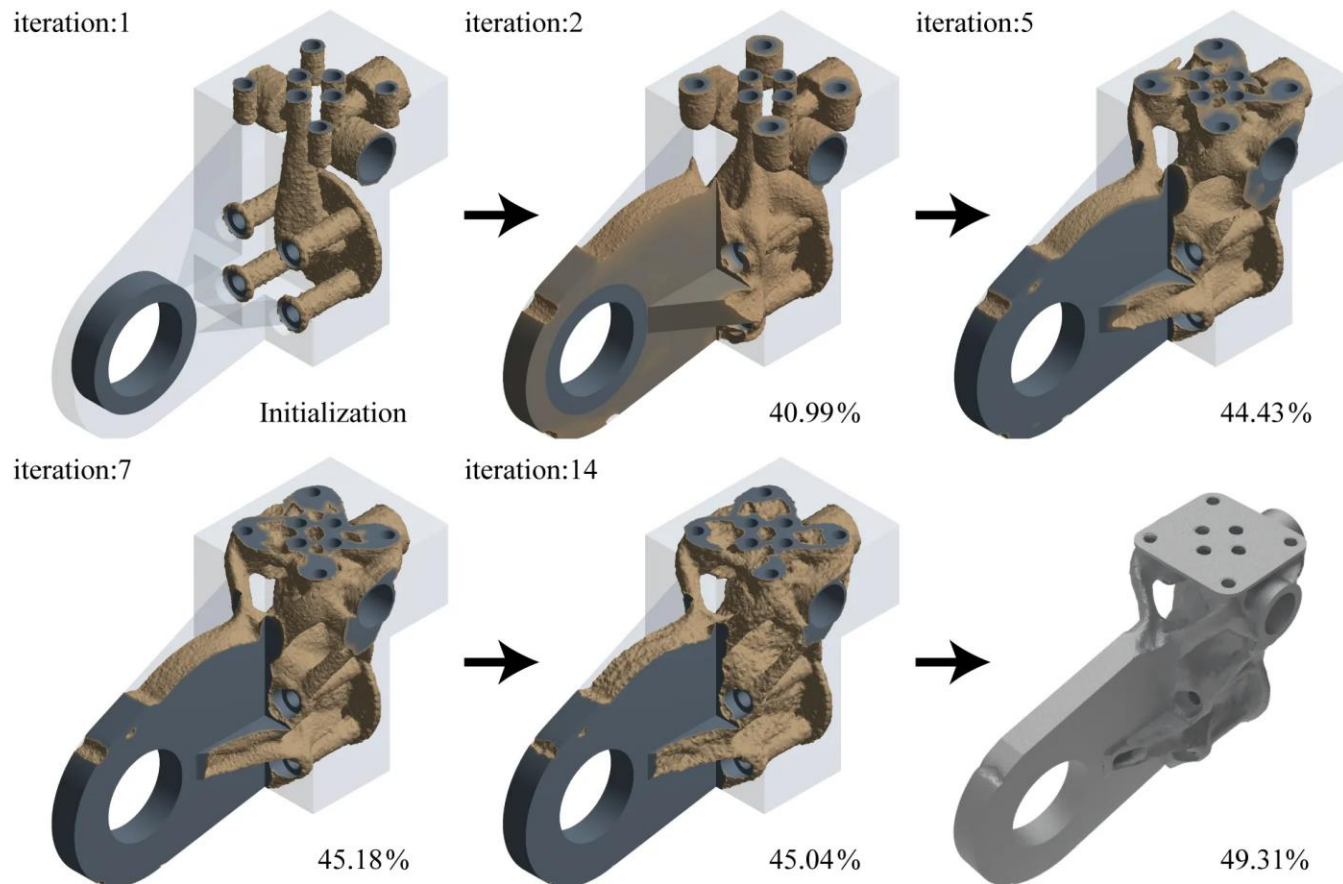
Każdy element albo pracuje w 100%, albo wcale. To przyspiesza obliczenia.

Iteracyjność

Proces powtarza się wielokrotnie, aż osiągnięta zostanie minimalna masa przy zachowaniu założonej wytrzymałości.

Wynik

Powstaje surowy, "schodkowy" model, który służy jako szkielet dla projektanta.



Optymalizacja topologiczna

Parametry projektowe i ograniczenia wytwórcze

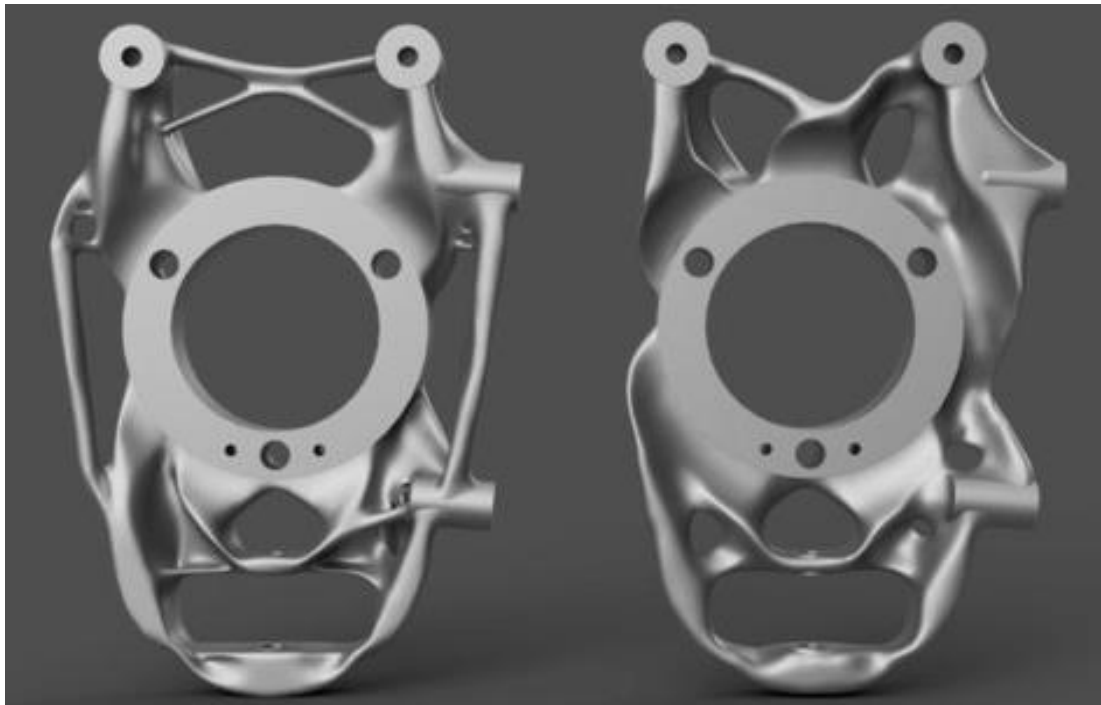
Parametry projektowe

Konstruktor może narzucić zmienne, takie jak:

- Standardowe średnice otworów,
- Minimalne promienie zaokrągleń,
- Momenty bezwładności,
- Geometrię, która musi zostać zachowana.

Ograniczenia produkcyjne

- Dla frezowania: Brak podcięć, minimalne promienie narzędzia, maksymalna głębokość wybrania.
- Dla druku 3D: Kąty nachylenia ścian, brak struktur wsporczych.
- Dla odlewów: Kąty pochylenia, minimalna grubość ścianek, promienie zaokrągleń.



Optymalizacja topologiczna

Parametry projektowe i ograniczenia wytwórcze

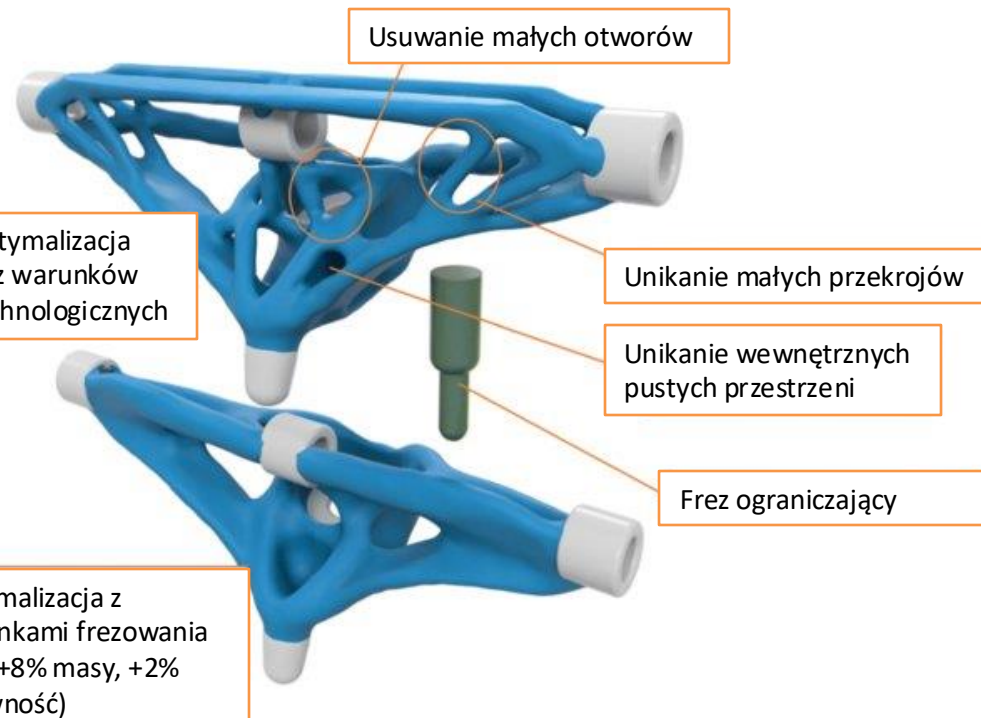
Parametry projektowe

Konstruktor może narzucić zmienne, takie jak:

- Standardowe średnice otworów,
- Minimalne promienie zaokrągleń,
- Momenty bezwładności,
- Geometrię która musi zostać zachowana.

Ograniczenia produkcyjne

- Dla frezowania: Brak podcięć (overhangs), minimalne promienie narzędzia, maksymalna głębokość wybrania.
- Dla druku 3D: Kąty nachylenia ścian, brak struktur wsporczych.
- Dla odlewów: Kąty pochylenia (draft angles), minimalna grubość ścianek.



Optymalizacja topologiczna

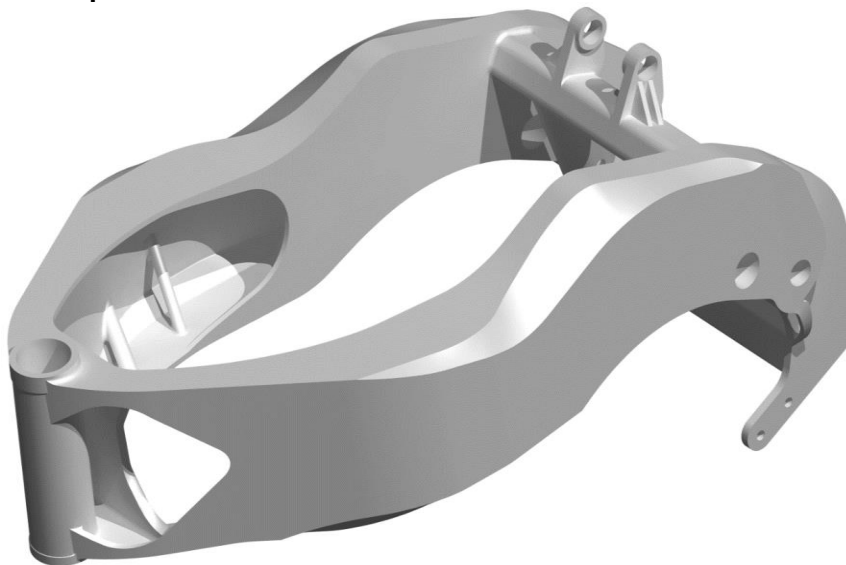
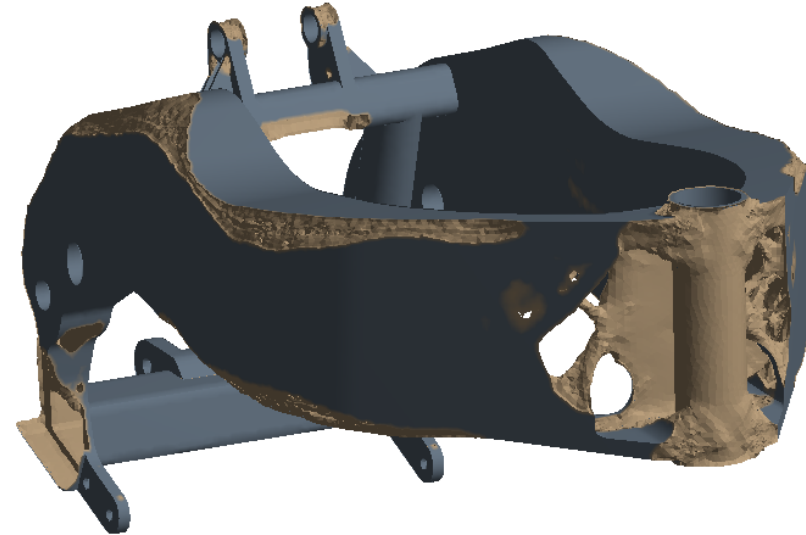
Post-processing i weryfikacja

1. Wygładzanie (Refinement)

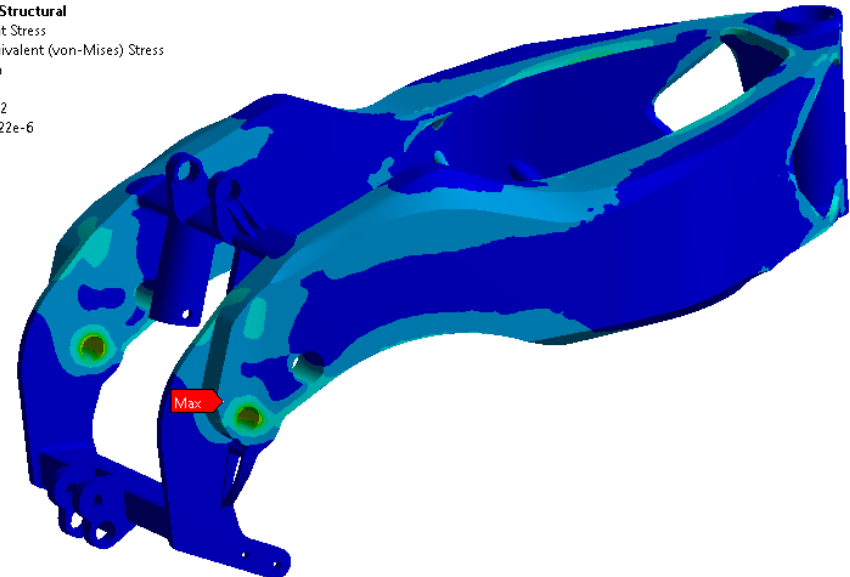
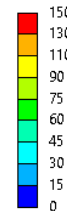
Inżynier wykorzystuje surowy wynik TopOpt jako bazę do stworzenia czystego modelu CAD (np. poprzez modelowanie powierzchniowe).

2. Weryfikacja końcowa

Gotowy model CAD musi przejść ponowną analizę MES (FEA), aby potwierdzić, że finalny rozkład materiału spełnia wymagania bezpieczeństwa.

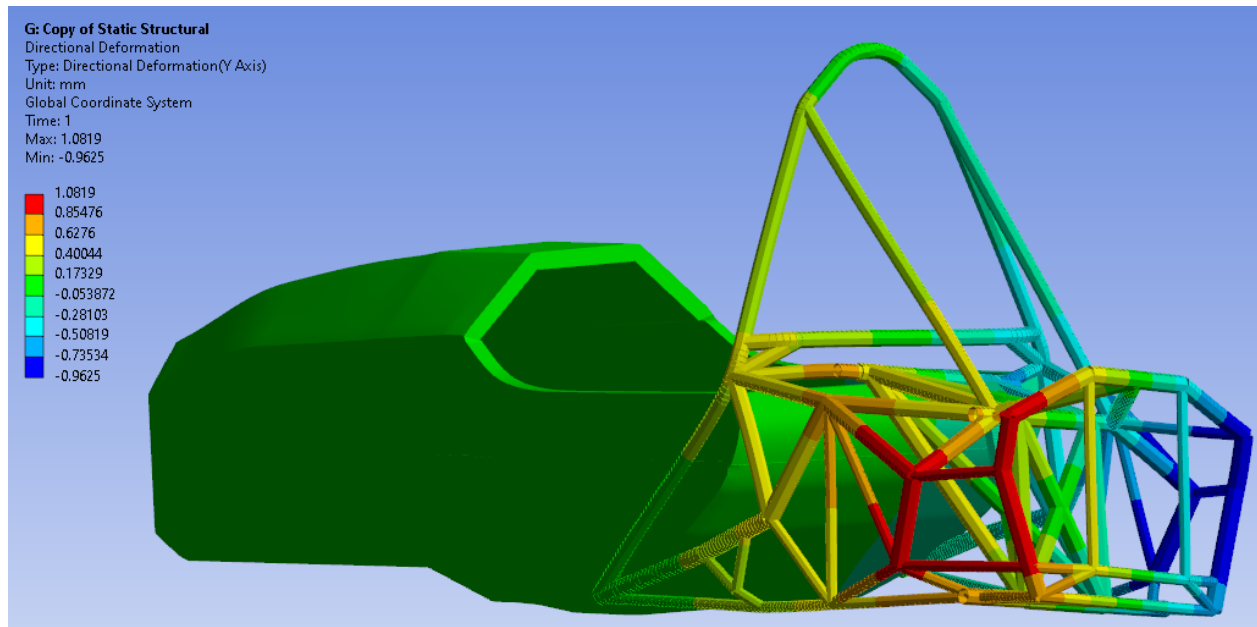
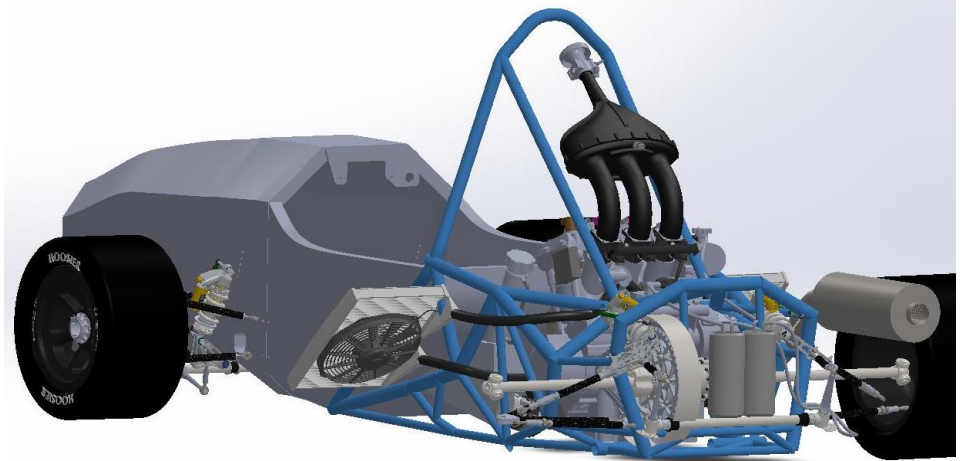
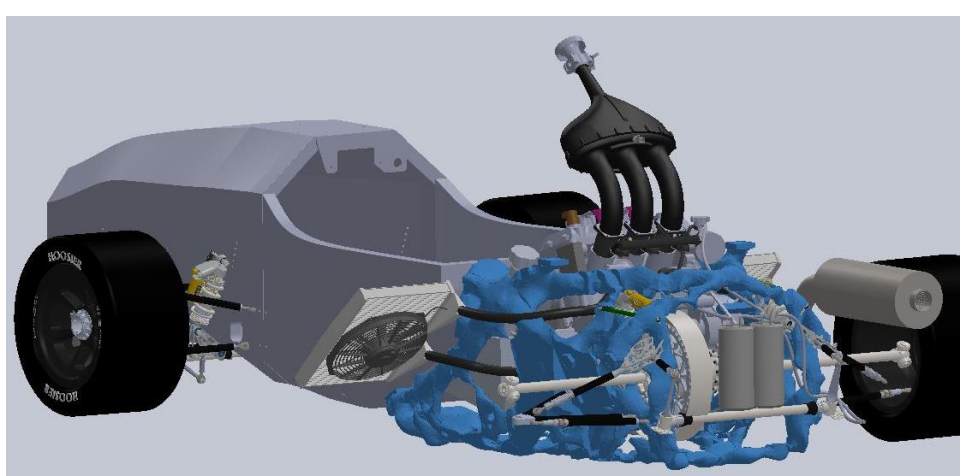


B: Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1
Max: 93,22
Min: 2,1322e-6



Optymalizacja topologiczna

Post-processing i weryfikacja



Optymalizacja topologiczna

Wykonanie





**POLITECHNIKA
RZESZOWSKA**
im. IGNACEGO ŁUKASIEWICZA



**WYDZIAŁ
BUDOWY MASZYN
I LOTNICTWA**
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

Dziękuję za uwagę!

dr inż. Michał Batsch