



# Podręcznik projektowania dla technologii HP Multi Jet Fusion 3D



# Nowe metody projektowania i procesów produkcji

## Wprowadzenie do technologii



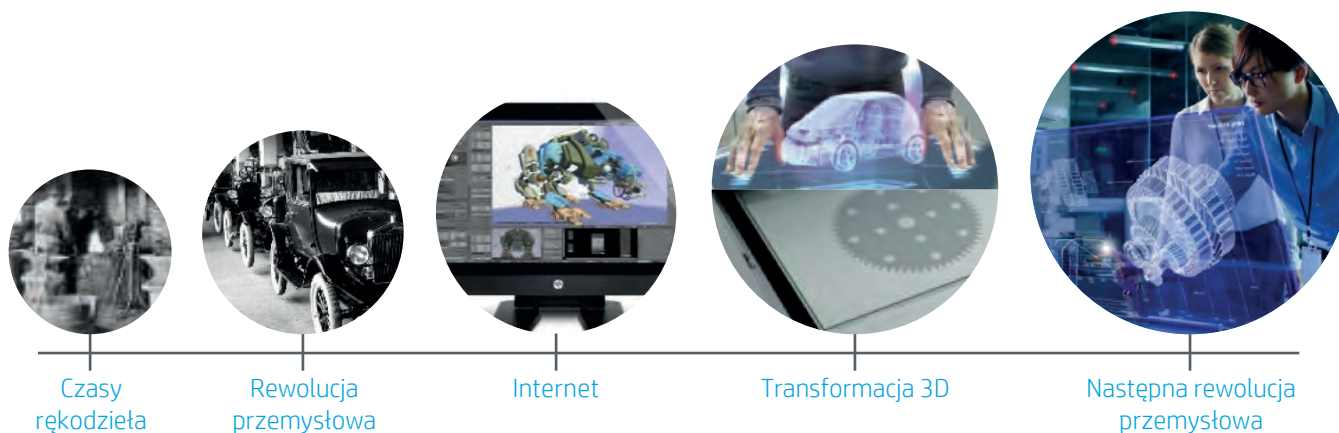
### Transformacja z wykorzystaniem druku 3D

Do czasów XVIII-wiecznej rewolucji przemysłowej normą były ręczne tworzenie jednorazowych projektów i realizacja produkcji na tej podstawie. Kowale byli jednocześnie projektantami i producentami; każda wykonana przez nich para podków była niepowtarzalna, nawet jeśli były przeznaczone dla tego samego konia! Tempo produkcji było wolne, a towary robiono na zamówienie. Z wyjątkiem niektórych artykułów o dużej wartości jak kawa, herbata czy przyprawy, bardzo rzadko, o ile w ogóle, wytwarzano towary z wyprzedzeniem, zliczano czy przygotowywano do sprzedaży. Nie istniały łańcuchy dostaw dla produkowanych towarów.

To uległo zmianie w XVIII wieku wraz z rozpowszechnieniem maszyn i pierwszą rewolucją przemysłową. Zamiast z ręcznie nawijanej wełny materiały włókiennicze zaczęto robić z bawełny tkanej z użyciem krosna i kołowrotka, przyspieszając produkcję i obniżając koszty. Wprowadzenie krosna tkackiego, odziarniarki, silnika parowego i zakładów montażowych zmieniło sam charakter procesu wytwarzania jakichkolwiek artykułów.

W trakcie mniej więcej 75 lat - od końca XVIII w. do połowy XIX w. - produkcja stawała się coraz bardziej znormalizowana, a każde zadanie, od projektowania przez produkcję po montaż, rozłożono na szereg oddzielnych czynności. Na początku XX wieku Model T, opracowany przez Henry'ego Forda samochód osobowy, wprowadził kolejny poziom innowacji, łącząc szybką i wydajną produkcję z jej masowością realizowaną przez zakłady produkcyjne. Nowe materiały i techniki, w tym odlewanie metali i formowanie wtryskowe, odpowiadają obecnie za produkcję większości współczesnych artykułów. Dzięki coraz lepiej wyszkolonym pracownikom i usprawnianym praktykom produkcyjnym oraz komputerowej automatyzacji w zeszłym wieku przyspieszono tempo produkcji towarów, które uprzednio wymagały wielu godzin ludzkiej pracy, co umożliwiło produkcję na skalę masową. Wszyscy, którzy nie dostosowali się do nowych trendów zostali w tyle.

Pomimo tak gwałtownego rozwoju, trwającego przez cały XX wiek i kolejne dekady XXI wieku, nie doszło do zasadniczych zmian w procesach projektowania i produkcji. Tak naprawdę procesy te nie tylko nie zostały usprawnione, ale też w znaczącym stopniu nadwerżyły nasze zasoby naturalne, postawiły wysoki mur między producentem a konsumentem, a nawet ograniczyły elastyczność i możliwości personalizacji projektów.



Rycina 1: Dążenie do kolejnej rewolucji przemysłowej poprzez demokratyzację projektowania i wszechobecną produkcję

## Dlaczego druk 3D należy uznać za proces produkcji wyrobu gotowego?

Przez kolejne 10-15 lat siły uwarunkowania społeczno-ekonomiczne, innowacje w procesach projektowania i produkcji oraz mocno zautomatyzowane procesy drukowania będą współodpowiedzialne za zdecydowane przekształcenie współczesnych procesów produkcyjnych.

Wiele już mówiono o innowacyjnych projektach części, których realizacja była niemożliwa w czasach procesów analogowych. Teraz jest na to czas. Już dziś można sporządzić i wydrukować projekty o unikatowej geometrii. Obecnie możliwe są usprawnienia w zakresie działania i estetyki i to w krótszym czasie niż kiedykolwiek wcześniej. Ostatecznie narzędzia do projektowania i drukarki zostaną rozwinięte na tyle, by umożliwić rozróżnianie między wokselami, co zapewni jeszcze większą konkurencyjność wyrobów.

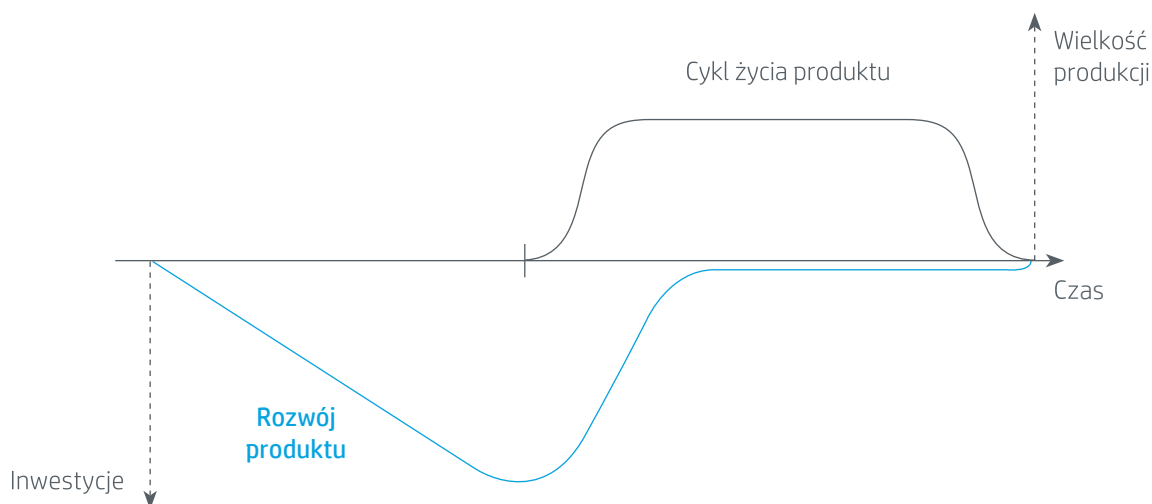


Rycina 2: Projektowanie wyrobów medycznych i protez w czasie rzeczywistym. Obraz kasku protetycznego za zgodą Invent Medical.



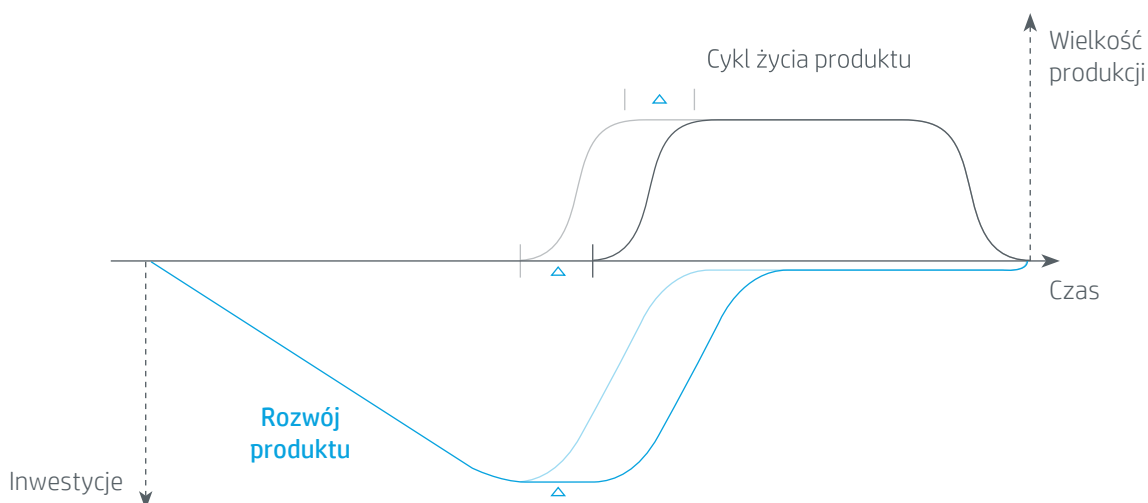
Rycina 3: Projektanci mogą tworzyć z pomocą drukarek 3D spersonalizowane, elastyczne, wytrzymałe i lekkie wyroby.

Ponadto, nawet jeśli projekty nie staną się jeszcze bardziej złożone, to można uzyskać zasadnicze korzyści z zaadoptowania procesów, które umożliwiają wprowadzenie szybszych i tańszych cykli rozwojowych. Na Rycinie 1 przedstawiono przykładowy zwrot z inwestycji.



Rycina 4: Ilustracja zwrotu z inwestycji w rozwój nowego produktu metalowego

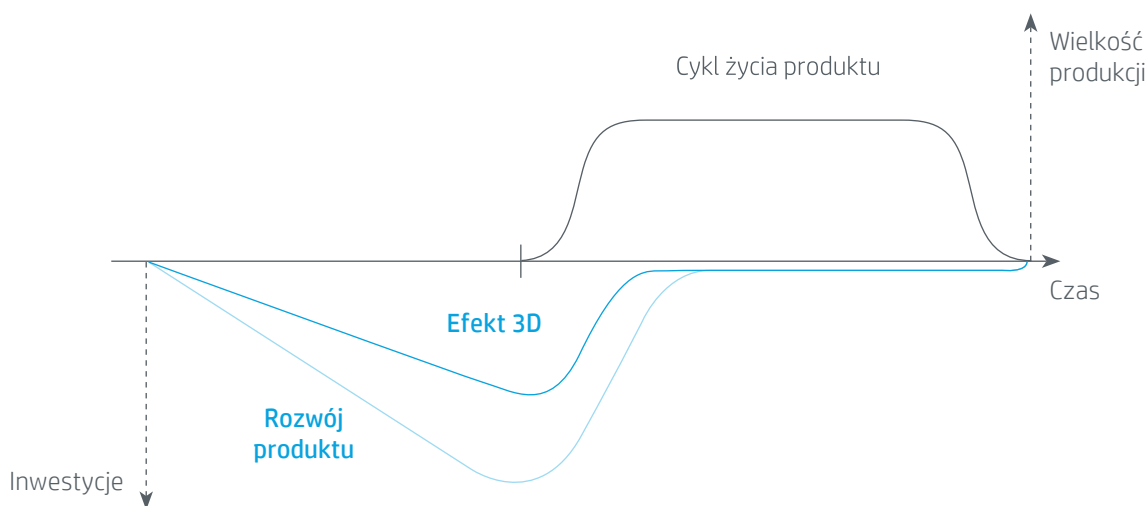
Z opóźnieniem rozwoju nowego produktu metalowego wiązało się dwojakie wyzwanie - aż do teraz. Przykładowo, opóźnienie procesu wytwórczego nie tylko oznacza, że trzeba inwestować na maksymalnym poziomie przez kolejne 30 dni, ale skutkuje też skróceniem okresu eksploatacji produktu o tenże miesiąc, co z kolei przyczynia się do utraty stabilnych przychodów z takiego miesięcznego okresu. Po przeliczeniu zwrotu z inwestycji od początku do samego końca może się okazać, że inwestycja nie ma już sensu. Przedstawiono to na Rycinie 2.



Rycina 5: Ilustracja przeliczonego zwrotu z inwestycji w rozwój nowego produktu metalowego

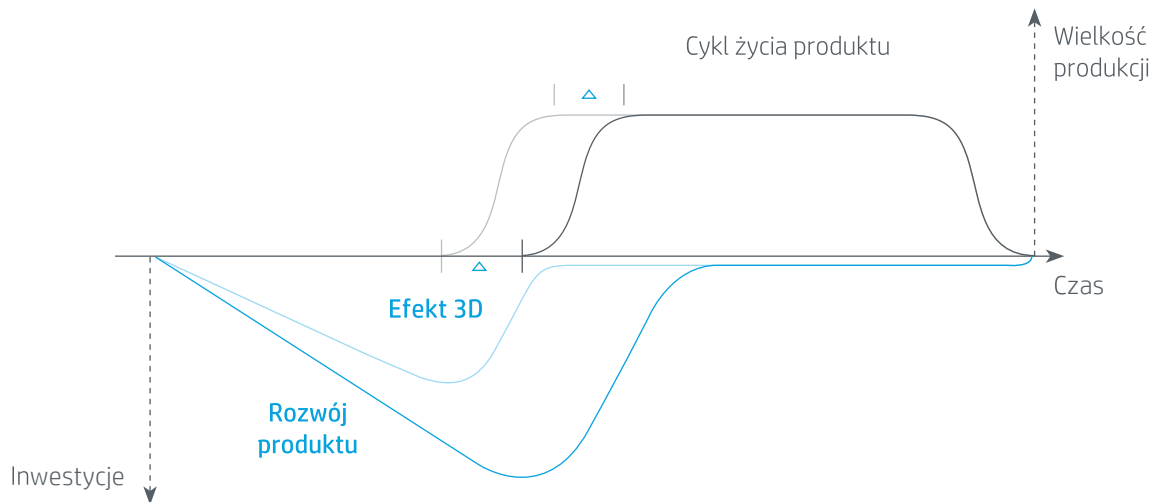
Zwykle wtedy uznaje się wydane pieniądze za koszty utopione i przekonuje się, że trzeba kontynuować działalność. Ale gdyby opóźnienie od początku było niepotrzebne? Gdyby dostępny był proces niedopuszczający części niestabilnych do obróbki i pozwalający rozpocząć produkcję na czas? Byłoby to możliwe z drukarką 3D zapewniającą równoważną jakość wyrobów i odpowiednią wydajność. Takie części można później poddać obróbce, ale drukarkę 3D wykorzystuje się do chwilowego wstrzymania harmonogramu produkcji. Stosując tę strategię, zwaną produkcją mostkową, można wykonać więcej iteracji części niestabilnych, a w rezultacie uzyskać poprawę jakości produktu.

Posiadanie drukarki 3D o równoważnej jakości, niezbędnej wydajności z możliwością długotrwałej pracy i za konkurencyjną cenę mogłoby oznaczać, że inwestowanie w narzędzia dla pewnych części jest zbędne, nawet w ramach produkcji masowej.



Rycina 6: Ilustracja efektu druku 3D na inwestycję w rozwoju nowego produktu metalowego

Choć wyroby o złożonej geometrii wymagają zastosowania części z kilku różnych procesów, to jednak wszystkie części można wydrukować w 3D, co pozwala nie tylko rozwijać nowe produkty przy niższej inwestycji, ale też wprowadzać je szybciej lub z większą częstotliwością, zachowując dzięki temu przewagę konkurencyjną.



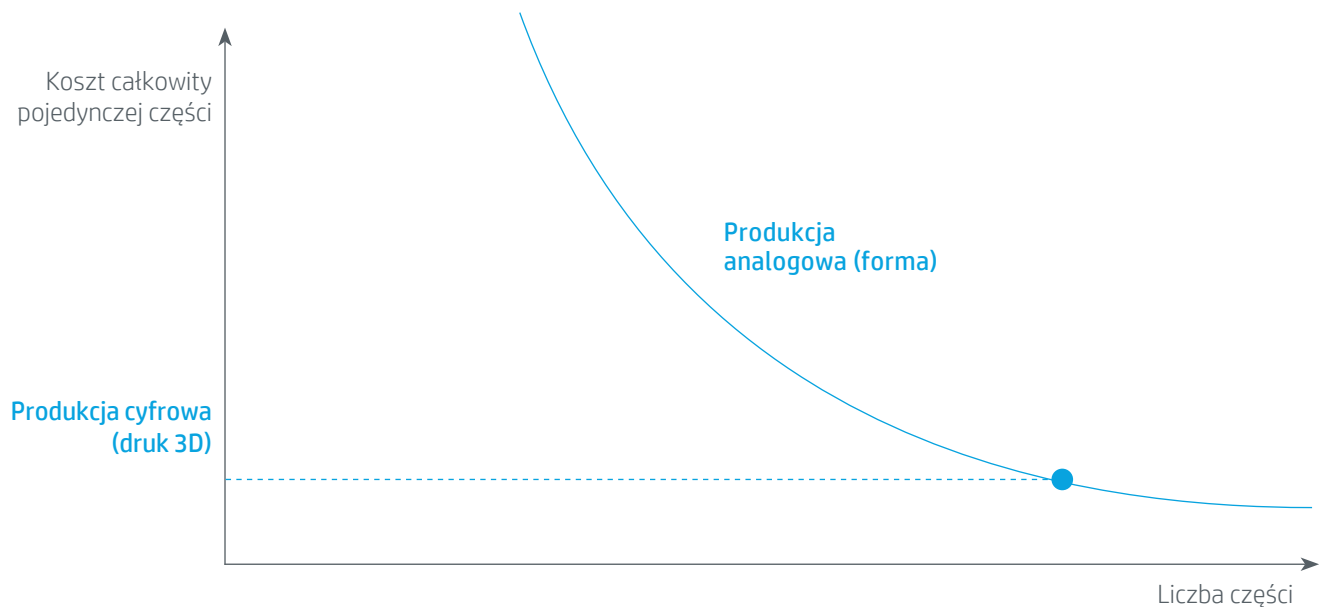
Rycina 7: Ilustracja efektu druku 3D na życie produktu w rozwoju nowego produktu metalowego

Korzystając z rozwiązań HP Jet Fusion 3D Printing Solutions opartych na przełomowej technologii HP Multi Jet Fusion można wprowadzić prędkość druku 3D na nowy poziom przy niższych kosztach operacyjnych, tworząc części łączące precyzję wykonania i wytrzymałość wyrobu gotowego w stopniu do tej pory niespotykanym. W ten sposób można przerwać cykl rozwoju produktu.

## Koszt i jakość: Dotychczasowe przeszkody

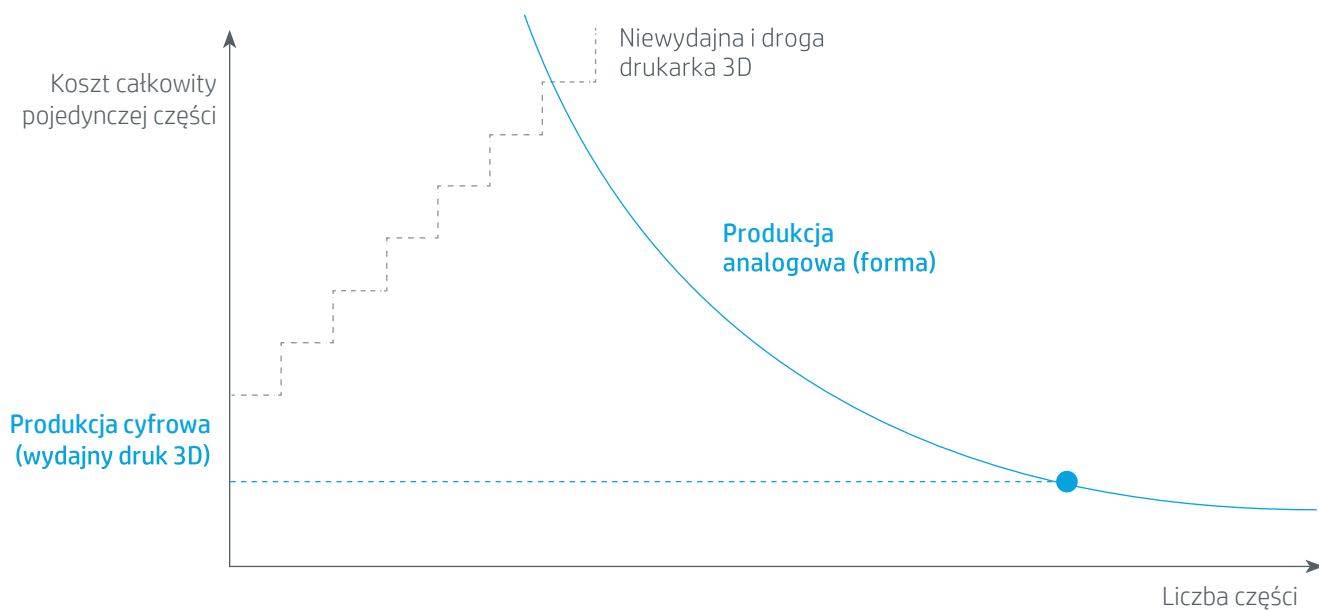
Dobierając proces wykorzystywany na końcowym etapie produkcji danej części należy rozważyć, jakie połączenie procesu i materiałów spełniające wymagania projektu będzie najmniej kosztowne. Do teraz dwiema głównymi przeszkodami we wdrażaniu druku 3D były koszt i jakość, parametry istotne przy podejmowaniu powyższej decyzji.

Pierwszą przeszkodą był efektywny koszt pojedynczej części i zdolność procesu druku 3D do konkurowania na równych zasadach z formowaniem wtryskowym. Przez lata koszt pojedynczej części w cyfrowych procesach druku 3D uznawano za liniowy, czyli pierwsza część kosztowała tyle co tysięczna, a ta z kolei tyle samo co dziesięciotysięczna (co przedstawiono na rycinie 5). Taki uproszczony pogląd prowadzi do kilku negatywnych założeń.



Rycina 8: Krzywa progę rentowności zakładając udział wydajnej drukarki 3D i brak kosztów początkowych lub czasu na rozwój

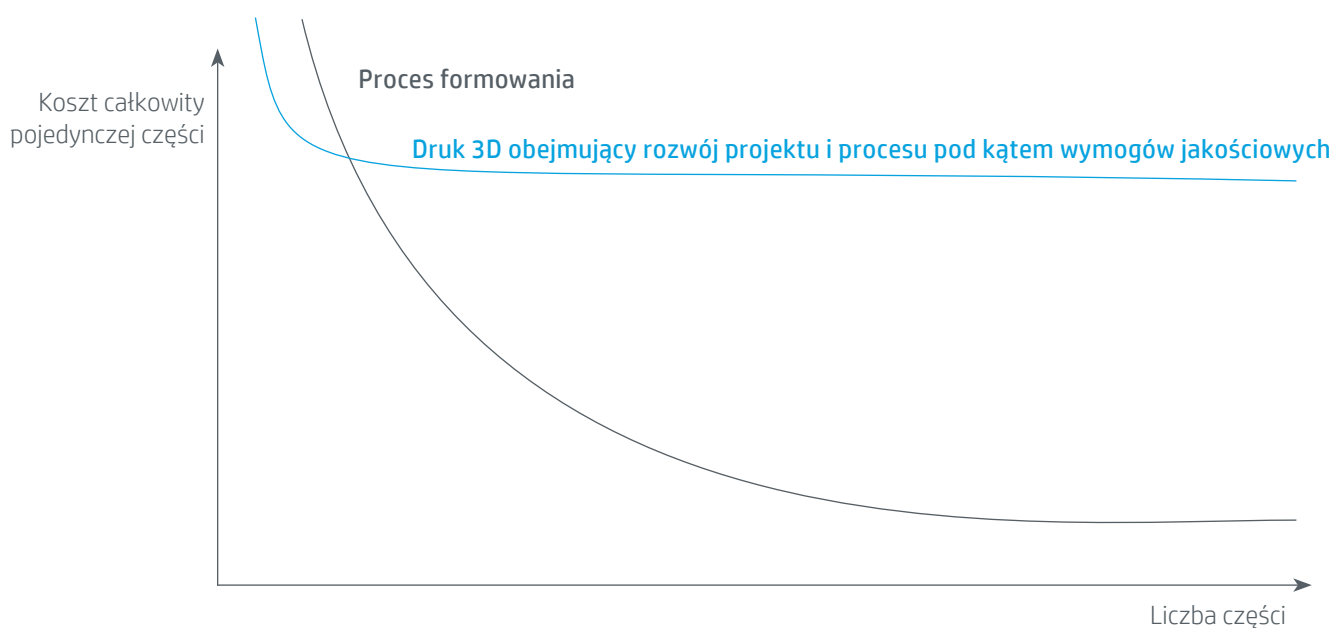
Do momentu wprowadzenia technologii HP Multi Jet Fusion zakładano w kontekście druku 3D, że drukarki mają wydajność wystarczającą do realizacji prognoz produkcyjnych firmy. Jednak faktem jest, że płacenie setek tysięcy dolarów za system, który jest w stanie wytworzyć jedynie paręset części rocznie daje w efekcie wykres liniowy, będąc w istocie funkcją skokową (jak na rycinie 6). Natomiast dzięki wysokiej produktywności technologii HP Multi Jet Fusion każdy taki skok może oznaczać dziesiątki tysięcy części zamiast setek (w zależności od ich rozmiaru).



Rycina 9: Krzywa progu rentowności zakładająca udział niewydajnej drukarki 3D i brak kosztów początkowych lub czasu na rozwój

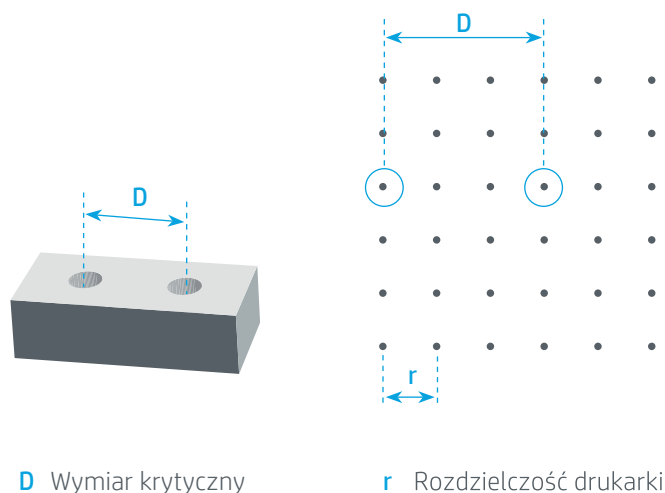
Drugie negatywne założenie dotyczące druku 3D w funkcji krzywoliniowej wskazuje, że można przejść od projektowania do produkcji bez rozwoju lub kosztów początkowych. Fakty są takie, że każdy proces będzie potrzebował jakiejś fazy rozwojowej, aby spełnić jakościowe wymagania projektu. W trakcie takiej fazy rozwojowej zawsze konieczne jest doprecyzowanie projektu i procesu, choćby w niewielkim stopniu. Projektant dopracowuje projekt z myślą o procesie wytwórczym, a inżynier procesu dopasowuje proces do projektu i jego wymogów. W druku 3D czy ogólnie produkcji cyfrowej piękno takiego dopasowania tkwi w tym, że można je prowadzić w formie cyfrowej, niekoniecznie przechodząc do kosztownej obróbki czy przeróbki części.

Optymalizacja i dopasowanie projektu do HP Multi Jet Fusion obejmuje kilka faz.



Rycina 10: Krzywa progu rentowności druku 3D uwzględniająca rozwój projektu i procesu pod kątem wymogów jakościowych

Pierwsza faza obejmuje podstawowe wytyczne procesu wytwórczego. Wszystkie procesy mają podstawowe wytyczne projektowe wynikające z fizyki samego procesu. HP Multi Jet Fusion ma takie wytyczne, jak zalecana grubość ścianek. Postępując zgodnie z nimi można uzyskać lepszą jakość i wydajność, a efektywny koszt pojedynczej części będzie niższy.

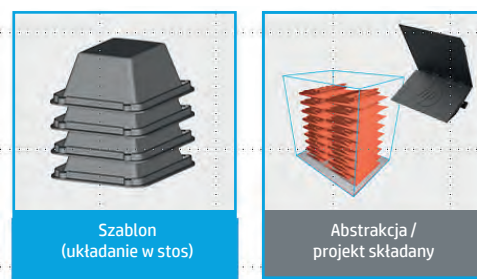


Rycina 11: Przykładowa wytyczna: Aby uzyskać maksymalną dokładność wymiary krytyczne powinny być wielokrotnościami rozdzielczości drukarki

Kolejny poziom optymalizacji to wprowadzanie do projektu drobnych zmian, które pozwolą na efektywniejsze wykorzystanie materiału lub wydajniejsze zarządzanie przestrzenią w całej objętości konstrukcji. Jeśli przy produkcji części można zużyć mniej materiału i/lub więcej części można zmieścić w takiej samej objętości konstrukcji, to efektywny koszt pojedynczej części obniży się jeszcze bardziej.



Rycina 12: Zoptymalizowane wykorzystanie materiału

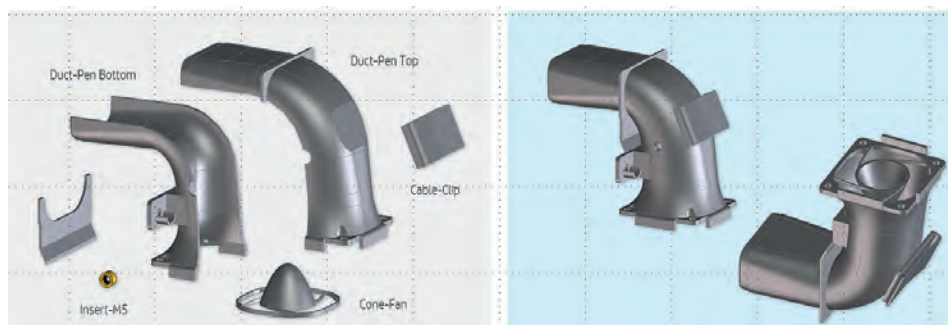


Rycina 13: Zoptymalizowane wykorzystanie objętości konstrukcji

Końcowa optymalizacja projektu druku 3D polega na tym, by części były w pełni trójwymiarowe i złączone w jedną całość. Gdy mechanik-projektant rozpatruje funkcję danego systemu i następnie projektuje jego części tak, by można je było wykonać za pomocą formowania wtryskowego, powstałe w ten sposób elementy są w większości 2,5-wymiarowe, co znaczy, że zwykle mają dwa wymiary większe od trzeciego. Wynika to z tego, że formy muszą się łatwo otwierać i zamykać. Natomiast w procesie drukowania w 3D te części mogą pozostać połączone, dzięki czemu krzywa prognozy rentowności odzwierciedla porównanie jednej części z kilkoma wytworzonymi w swoich formach.

### Formowanie wtryskowe

### HP Multi Jet Fusion



Rycina 14: Zachowanie projektu funkcjonalnego

## Jakie jest proponowane rozwiązanie?

W perspektywie średnioterminowej HP Jet Fusion 3D Solution będzie stanowić uzupełnienie portfela ułatwiającego naszym klientom zaadoptowanie technologii druku 3D, poczynając od analizy punktu początkowego przez metody projektowania po jak najlepsze wykorzystanie możliwości HP Jet Fusion 3D Printing Solution.

Pomocne może być tutaj oprogramowanie, które pozwoli projektantom dopasować swoje projekty do technologii HP Multi Jet Fusion też ułatwi inżynierom procesu dostosowanie technologii HP MJF do danego projektu. Ale podstawą pozostaje wiedza w danej dziedzinie.

Niniejszy podręcznik HP Multi Jet Fusion stanowi narzędzie pozwalające zdobywać wiedzę na temat użytkowania HP Multi Jet Fusion i dzielenia się nią z innymi, aby móc ją natychmiast zastosować.

W podręczniku zawarto rozdział dotyczący projektowania, który pozwoli projektantom zapoznać się z wytycznymi projektowania dla HP Multi Jet Fusion, których przestrzeganie pozwala uzyskać optymalną jakość. Ponadto, rozdział o projektowaniu zawiera też zasady optymalizacji projektów wykonywanych przy pomocy HP Multi Jet Fusion pod kątem kosztów.

Kolejne wydania podręcznika będą zawierać opisy metody optymalizacji procesów wspomagające inżynierów procesu w odpowiednim doborze parametrów dla danej jakości i ceny, przedstawiając ukierunkowanie części w strukturze lub właściwe odstępy między nimi.

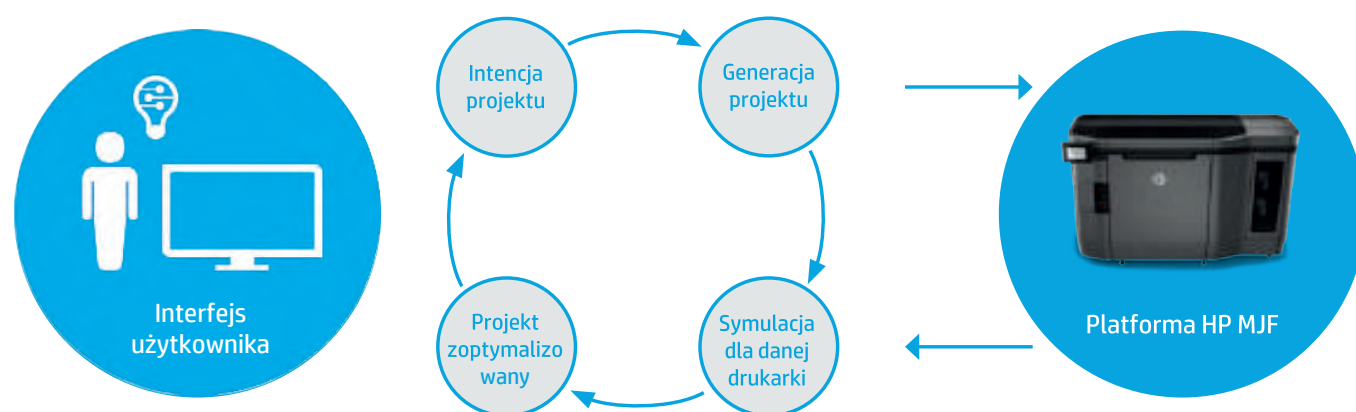
Inne planowane rozdziały omówią dobór materiału, kontrolę jakości i innego rodzaju wiedzę ułatwiającą wdrożenie HP Multi Jet Fusion do swojej biblioteki dostępnych procesów produkcji wyrobów gotowych.

## Jak ugryźć ten orzech

Gdy odpowiedni koszt i jakość są osiągalne, ujawnia się rzeczywisty potencjał druku 3D. Powstające w przyszłości narzędzia do projektowania umożliwią tworzenie różnorodnych wyrobów o przeróżnych formach, których wytworzenie w ramach procesu analogowego byłoby niemożliwe. Tym ważniejsze stanie się płynne działanie interfejsu między narzędziami do projektowania a drukarkami 3D, ponieważ w przyszłości drukarki pozwolą na określanie jednego przedmiotu wieloma właściwościami, jak choćby barwa, faktura, przezroczystość, wytrzymałość, sprężystość i inne.

Co projektujemy, jak i gdzie projektujemy, sprzedajemy i wytwarzamy wyroby ulegnie hiperglobalizmowi i hiperkonkurencyjności. Aby ciągle notować dobre wyniki po tej transformacji konieczne będzie przystosowanie się do nowych metod; w przeciwnym razie firmy utracą konkurencyjność.

Podręcznik, który trzymają Państwo w ręku może pomóc w gładkim przejściu tego procesu, a jego aktualizacje będą dostępne na [hp.com/go/MJFHandbook](http://hp.com/go/MJFHandbook). A tymczasem proponujemy zapoznać się z przyszłością procesów wytwórczych.F



Rycina 15: Projektanci mogą tworzyć z pomocą drukarek 3D spersonalizowane i proste do zaplanowania wyroby, jeśli otrzymują informacje o parametrach drukarek



# Jak działa druk proszkowy 3D?

## Dobór materiałów



### Wstęp

HP Multi Jet Fusion (MJF) to technologia proszkowego druku 3D, która umożliwia produkcję precyzyjnych, funkcjonalnych prototypów i wyrobów gotowych, w tym części kolorowych. Ponadto, HP MJF to technologia niewymagająca infrastruktury, co pozwala na projektowanie artykułów o złożonej geometrii bez dodatkowych kosztów, które znacząco podniosłyby koszty lub nawet uniemożliwiły produkcję w ramach tradycyjnych procesów wytwórczych.

### Druk 3D z wykorzystaniem HP MJF

Druk 3D HP MJF rozpoczyna się od cienkiej warstwy równomiernie podgrzanych cząsteczek proszku polimerowego, który jest rozprowadzany po platformie konstrukcji.

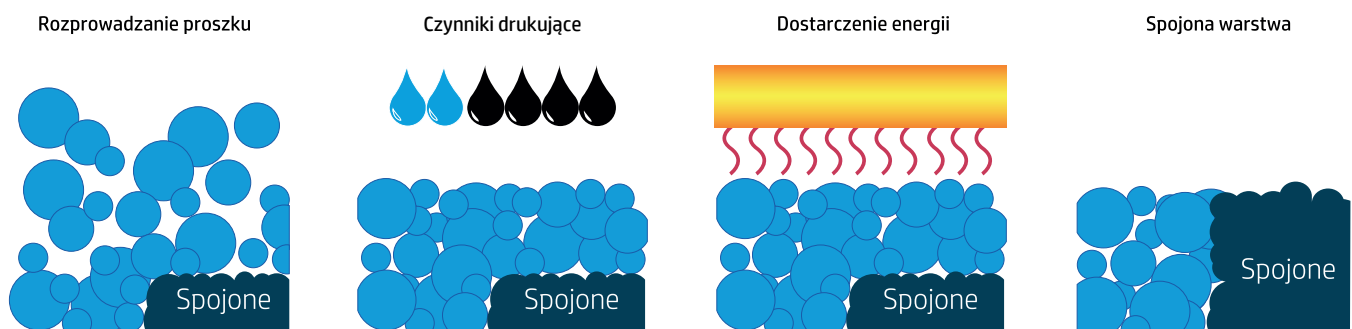
Kolejny etap to wykorzystanie wieloczynnikowego procesu drukowania, którego celem jest szybkie wykonanie jakościowej i funkcjonalnej części. Obszerna wiedza HP zdobyta przy tworzeniu rozwiązań dla druku 2D i struktury będące w dyspozycji firmy umożliwiają drukowanie milionów kropeł na sekundę wzdłuż każdego cała szerokości formy, co umożliwia bardzo wysoką precyzję i dokładność wymiarową.

Wieloczynnikowy proces drukowania HP Multi Jet Fusion pozwala precyzyjnie kontrolować ilość każdego czynnika rozmieszczonego w każdym wokselu projektowanej części. Taki proces drukowania wykorzystuje dwa różne rodzaje czynników, nakładane na całą platformę konstrukcji: czynniki spajające (lepiszcza) i czynniki wykańczające.

Czynnik spajający jest nakładany w miejscach, w których cząsteczki mają zostać zespolone, aby utworzyć odpowiedni przekrój części, a reszta proszku pozostaje niezmieniona. Czynnik wykańczający jest nakładany na krawędzie części, aby zmodyfikować proces spajania i wspomagać tworzenie drobnych detali i gładkich powierzchni.

Następnie źródło energii przechodzi nad platformą budowania, wywołując reakcję między czynnikami i tworzywem, która powoduje selektywne spajanie tworzywa w celu uformowania kompletnej warstwy, zapewniając odpowiedni przerób, gęstość tworzywa zbliżoną do tworzyw sztucznych w tradycyjnym formowaniu wtryskowym i jednorodne mechaniczne właściwości materiału w każdej płaszczyźnie.

Następnie proces powtarza się aż do uformowania kompletnej, funkcjonalnej części, Proces drukowania 3D z wykorzystaniem HP MJF przedstawiono na poniższej ilustracji:



Rycina 1: Proces drukowania 3D z wykorzystaniem HP Multi Jet Fusion

# Rodzina poliamidów

## Dobór materiałów



### Wstęp

HP ciężko pracuje nad wprowadzeniem innowacji materiałowych, które usuną część tradycyjnych barier utrudniających wdrożenie druku 3D - koszt, jakość i różnorodność.

Dlatego też opracowano szereg materiałów poliamidowych przeznaczonych do użycia z technologią HP Multi Jet Fusion, stanowiących konstrukcyjne tworzywa termoplastyczne zapewniające optymalną jakość wyrobu końcowego i duże możliwości ponownego wykorzystania przy niskim koszcie części.<sup>1</sup>

### Materiały poliamidowe do drukarek 3D HP Jet Fusion 4200 i HP Jet Fusion serii 5200

Materiały poliamidowe do drukarek 3D HP Jet Fusion 4200 i HP Jet Fusion 5200 Series obejmują HP 3D High Reusability PA 12 (HP 3D HR PA 12), HP 3D High Reusability PA 12 Glass Beads (HP HR PA 12 GB) i HP 3D High Reusability PA 11 (HP HR PA 11).

#### HP 3D HR PA 12: Idealny do wytwarzania wytrzymałych, funkcjonalnych, złożonych części

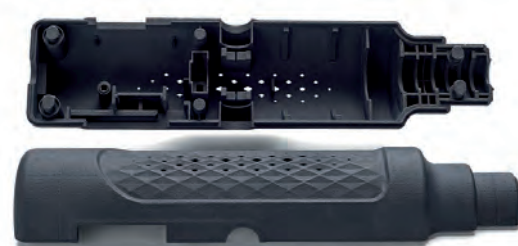
- Wytrzymałe tworzywo termoplastyczne, które pozwala tworzyć części o wysokiej gęstości, zbalansowanym profilu właściwości i wytrzymałej konstrukcji.
- Zapewnia doskonałą odporność chemiczną na oleje, smary, węglowodory alifatyczne i zasady.<sup>2</sup>
- Spełnia wymagania certyfikatów biokompatybilności, np. USP Class I-VI i US FDA, dla bezpiecznych materiałów powierzchniowych.
- Gwarantuje zrównoważenie wydajności i kosztów w porównaniu do innych materiałów poliamidowych HP do druku 3D.
- Opracowany do wytwarzania wyrobów gotowych i funkcjonalnych prototypów o dużej szczegółowości i dokładności wymiarowej oraz przeznaczony do produkcji części funkcjonalnych w różnych branżach.
- Idealny do złożonych podzespołów, obudów, i zastosowań wymagających wodoszczelności, zapewniając wodoszczelność bez dodatkowego postprocessingu.
- Kompatybilny z drukarkami 3D HP Jet Fusion 4200 i HP Jet Fusion 5200 Series.



Rycina 1: Część HP 3D HR PA 12 po post-processingu z użyciem szlifowania grafitowego

#### HP 3D HR PA 12 Glass Beads: Idealny do wytwarzania sztywnych, funkcjonalnych części

- Termoplastyczny materiał wypełniony w 40% szklanymi koralikami z optymalnymi właściwościami mechanicznymi i dużymi możliwościami ponownego wykorzystania.<sup>4</sup>
- Zapewnia stabilność wymiarową i powtarzalność.<sup>5</sup>
- Opracowany do typowych zastosowań ze szklanymi koralikami o dużej szczegółowości i dokładności wymiarowej oraz przeznaczony do produkcji części funkcjonalnych w różnych branżach.
- Idealny do zastosowań, w których niezbędna jest duża sztywność, jak obudowy, przyrządy i narzędzia.
- Kompatybilny z drukarką 3D HP Jet Fusion 4200.



Rycina 2: Część HP 3D HR PA 12 GB za zgodą NACAR

## HP 3D HR PA 11: Idealny do wytwarzania sztywnych, ciągliwych,<sup>6</sup> funkcjonalnych części

- Termoplastyczny materiał z odnawialnym surowcem z oleju rycynowego (zmniejszone oddziaływanie na środowisko).<sup>6</sup> Wykazuje optymalne właściwości mechaniczne i znakomitą odporność na substancje chemiczne<sup>2</sup> oraz większe wydłużenie przy zerwaniu.<sup>5</sup>
- Łatwy w obróbce materiał o wyższej produktywności, dający mniej odpadów.<sup>7</sup>
- Opracowany do wytwarzania wyrobów gotowych i funkcjonalnych prototypów o dużej szczegółowości i dokładności wymiarowej oraz przeznaczony do produkcji części funkcjonalnych w różnych branżach.
- Zapewnia udarność i ciągliwość<sup>5</sup> niezbędne w produkcji protez, wkładek do butów, artykułów sportowych, zatrzasków, żywych zawiasów itp.
- Kompatybilny z drukarkami 3D HP Jet Fusion 4200 i HP Jet Fusion 5200 Series.



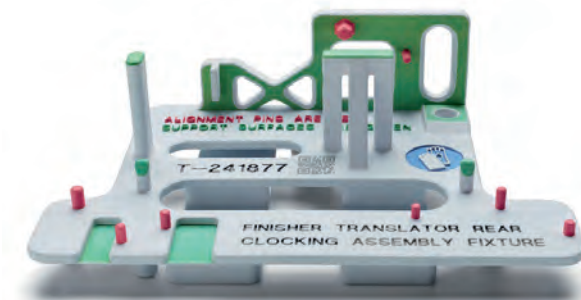
Rycina 3: Część HP 3D HR PA 11 za zgodą NACAR

## Materiały poliamidowe do drukarek 3D HP Jet Fusion 500 Series

Materiały poliamidowe do drukarek 3D HP Jet Fusion 500 Series obejmują HP 3D HR CB PA 12.

HP 3D HR CB PA 12: klasa konstrukcyjna, części całkowicie kolorowe<sup>8</sup> i białe

- Wytrzymałe tworzywo termoplastyczne, które pozwala tworzyć części o wysokiej gęstości, zbalansowanym profilu właściwości i wytrzymałej konstrukcji.
- Zapewnia doskonałą odporność chemiczną na oleje, smary, węglowodory alifatyczne i zasady.<sup>2</sup>
- Przeznaczony do produkcji kolorowych i białych części funkcjonalnych w różnych branżach.
- Idealny do kolorowych<sup>8</sup> i białych części takich jak przyrządy i przymiary, oznakowanie, modele i działające prototypy.



Rycina 4: Część HP 3D HR CB PA 12

# Dobre praktyki

## Projektowanie w HP MJF: Wytyczne dla projektowania

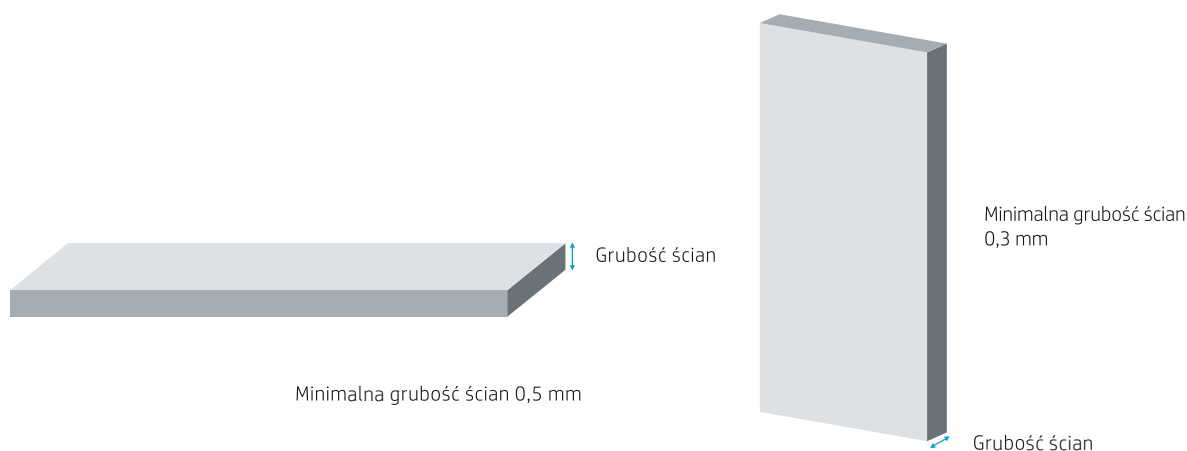


### Wstęp

Podobnie jak w innych technologiach druku 3D obowiązuje pewien zestaw zaleceń, których należy się trzymać podczas projektowania z użyciem technologii HP Multi Jet Fusion, aby części i ich parametry były zgodne ze specyfikacją.

### Grubość ścian

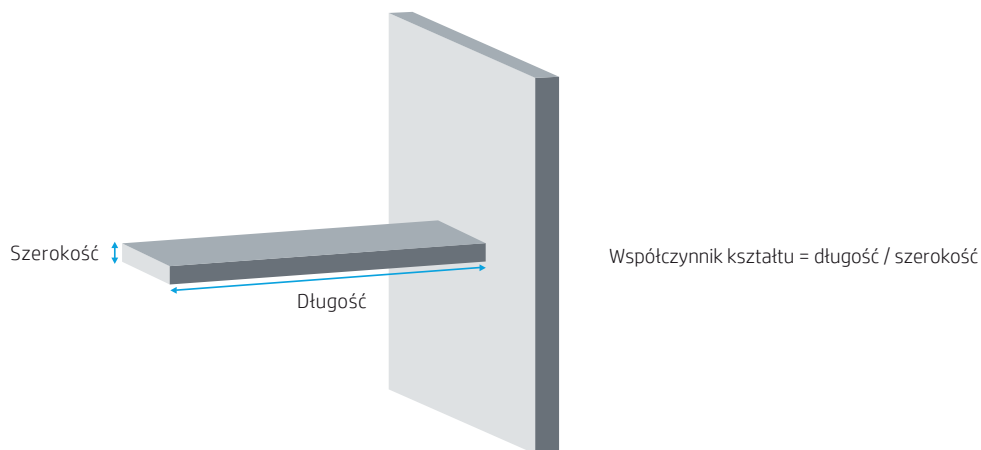
Zasadniczo, minimalna zalecana grubość ścian to 0,3 mm dla krótkich ścian w płaszczyźnie XY i 0,5 mm dla krótkich ścian w osi Z.



Rycina 1. Minimalna grubość ścian

### Wsporniki

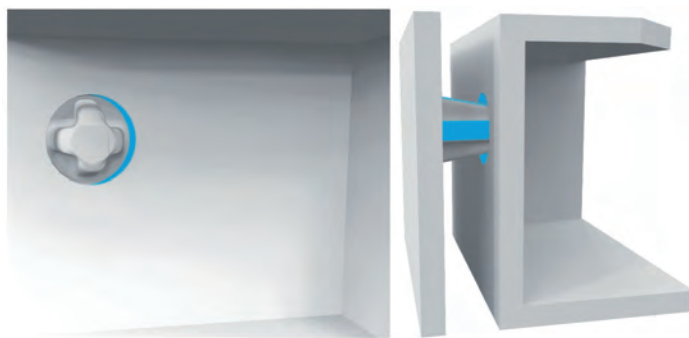
Podczas drukowania wspornika minimalna grubość ścian zależy od współczynnika kształtu, który oblicza się dzieląc długość przez szerokość. Przy wsporniku o szerokości poniżej 1 mm współczynnik kształtu powinien wynosić poniżej 1. Nie ma szczególnych zaleceń przy szerokości 1 mm i większych. W częściach z wysokim współczynnikiem kształtu zaleca się zwiększyć grubość ścian lub dodać żebrowanie w celu jej wzmocnienia.



Rycina 2. Wsporniki

## Części łączące

Czasami trzeba dopasować ze sobą parę wydrukowanych części, by uformować wyrób końcowy. Aby zapewnić prawidłowy montaż minimalny odstęp między stykającymi się powierzchniami tych części powinien wynosić co najmniej 0,4 mm ( $\pm 0,2$  mm tolerancji dla każdej części).

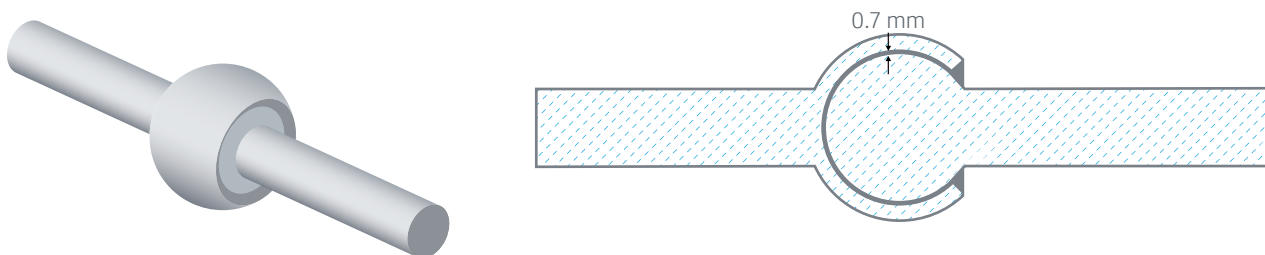


Rycina 3. Minimalny odstęp między częściami łączącymi

## Części ruchome

Ogólną zasadą jest, aby odstępy między powierzchniami drukowanych części zespołów powinny wynosić co najmniej 0,7 mm. Części ze ściankami o minimalnej grubości 30 mm powinny mieć większy odstęp między obydwooma stronami, aby zapewnić prawidłowe działanie.

W częściach ze ściankami cieńszymi niż 3 mm odstępy między drukowanymi częściami zespołów mogą mieć nawet 0,3 mm, ale to zależy wyłącznie od danego projektu, a w celu zapewnienia odpowiedniej jakości może się okazać konieczne wykonywanie przez producenta kolejnych iteracji produktu.

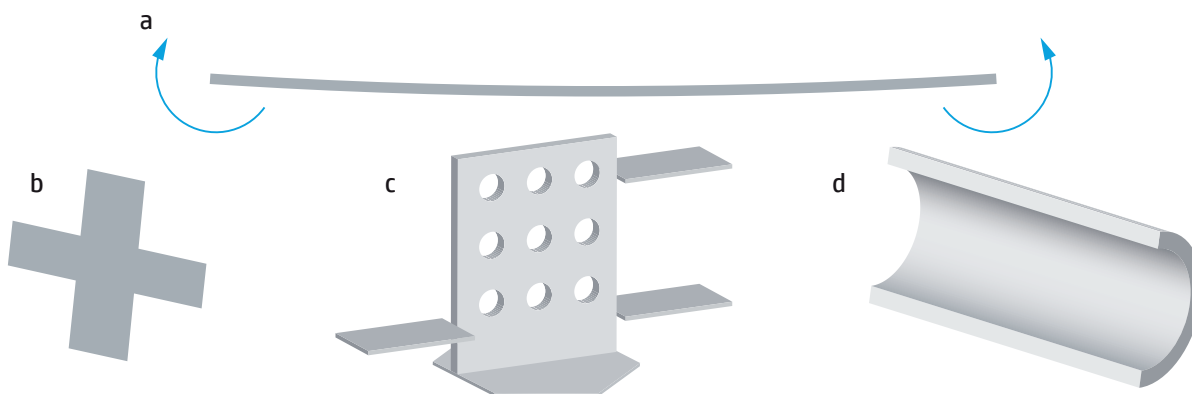


Rycina 4. Minimalny odstęp między częściami ruchomymi

## Części cienkie i długie

Części cienkie i długie są podatne na niejednorodne chłodzenie, co może być przyczyną nierównego kurczenia się drukowanych części i zarazem zniekształcenia w pewnym kierunku, co oznacza odchyłkę od nominalnego kształtu.

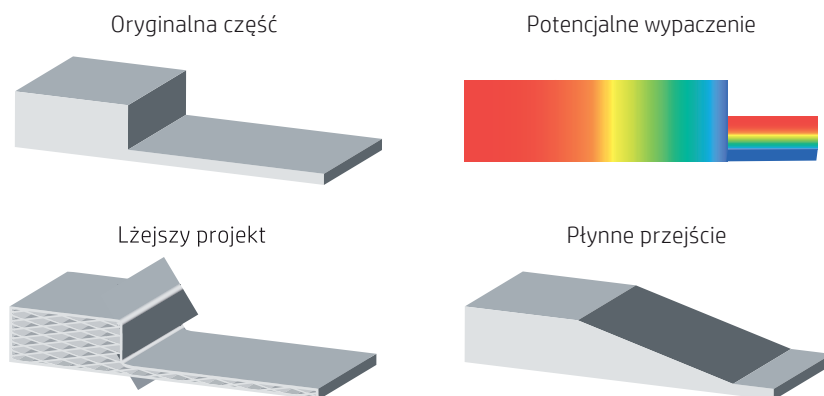
Należy pamiętać, że każda część o współczynniku kształtu (dł./szer.) większym od 10:1 i każda część, w której następuje gwałtowna zmiana przekroju lub która w przeważającym stopniu składa się z długiego, cienkiego i zakrzywionego segmentu jest podatna na wypaczenia, co przedstawiono na ilustracji:



Rycina 5. Kategorie części podatnych na wypaczenie powodowane przez kurczenie (a) obejmują: części cienkie i długie (b), części z gwałtowną zmianą przekroju (c) i cienkie zakrzywione powierzchnie (d)

Aby zminimalizować ryzyko takiego odkształcenia należy pamiętać o kilku zaleceniach w trakcie projektowania części:

- Zwiększyć grubość długich ścian, by obniżyć ich współczynnik kształtu.
- Unikać grzbietów i żebrowania na dużych, płaskich powierzchniach.
- Przeprojektować części o potencjalnie wysokim naprężeniu i zapewnić płynniejsze przejścia przekroju.
- Odciążyć części poprzez ich wydrążenie lub wykonanie kratownicy.



Rycina 6. Strategie minimalizujące ryzyko wypaczenia

## Strategie optymalizacji projektu: Część pełna lub wypełnienie konstrukcyjne

Technologia HP Multi Jet Fusion umożliwia drukowanie twórczych projektów zoptymalizowanych topologicznie, a nawet małych konstrukcji latisowych. Tego typu projekty pozwalają tworzyć cieńsze fragmenty, które gromadzą i oddają mniej ciepła, co poprawia dokładność wymiarową, a także ogólny wygląd i wrażenie dotykowe części.

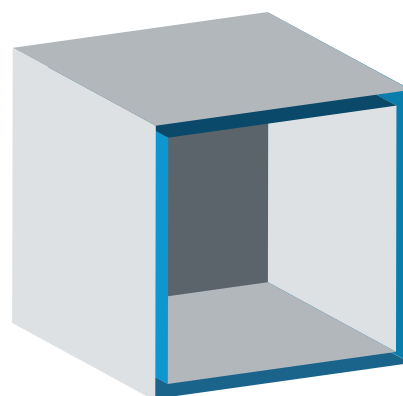
W ten sposób można też obniżyć wagę części, potrzebną ilość surowca i płynnego czynnika w porównaniu z pełnymi częściami, co w rezultacie obniża zarówno koszt części, jak i ogólny koszt operacyjny w zastosowaniach mocno zależnych od wagi elementów.

### Części wydrążone

Ta strategia optymalizacji projektu obejmuje drążenie modelu w ramach automatycznego procesu. (Taką funkcję wbudowano w profesjonalnych programach typu SolidWorks, Materialise Magics z Materialise Build Processor dla technologii HP Multi Jet Fusion i Autodesk® Netfabb®).

Minimalna zalecana grubość ścian wynosi 2 mm, ale grubsze ściany pozwalają uzyskać lepsze właściwości mechaniczne. Optymalny wybór zależy od zastosowania.

Po wydrukowaniu modelu można umieścić w wydrążonej części otwory spustowe, by usunąć resztę niespojonego proszku. W przeciwnym razie pozostały w środku proszek spowoduje, że część będzie cięższa i bardziej odporna w porównaniu do elementów całkowicie wydrążonych. Choć taka część jest lekka, to jednak jest słabsza niż wersja niewydrążona. Różnica wagi wynika z faktu, że gęstości materiału zespolonego i niespojonego są różne.



Rycina 7. Przykład części wydrążonej

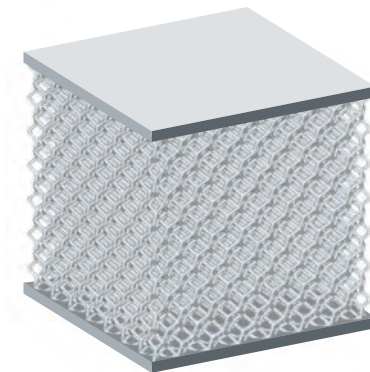


Pozostawianie proszku uwięzionego w części oszczędza również czas na postprocessing, ponieważ wydobywanie proszku nie jest konieczne.

## Konstrukcje kratownicowe

Ta strategia optymalizacji projektu obejmuje drążenie części i zastąpienie pełnego wnętrza konstrukcją kratownicową, która zapewnia wytrzymałość mechaniczną poprzez współpracę wielu sztywnych komórek, a jednocześnie znacząco obniża masę i koszt części.

Takie przeprojektowanie zajmuje niewiele czasu, a można je zautomatyzować stosując programy Materialise Magics czy nTopology.



Rycina 8. Przykład konstrukcji kratownicowej

## Optymalizacja topologii

Optymalizacja topologii to proces oparty na metodzie elementów skończonych (Finite Element Method, FEM), który odnajduje najlepszy rozkład materiału po zadaniu celu optymalizacji i określeniu zestawu ograniczeń. Do najczęstszych celów optymalizacji należą redukcja masy i nadanie określonych właściwości mechanicznych. Ten proces wymaga, aby projektant znał funkcję części i rozkład obciążeń na jej głębokości, ale też stanowi najlepiej zoptymalizowaną metodę redukcji wagi i kosztu pierwotnego projektu.



Część zoptymalizowana przez Autodesk z Netfabb

Rycina 9. Przykład optymalizacji topologicznej

# Projektowanie części precyzyjnych

## Projektowanie w HP MJF: Wytyczne dla projektowania



### Wstęp

Aby nie dopuścić do problemów z częściami i uzyskać maksymalną dokładność przy projektowaniu z użyciem technologii HP Multi Jet Fusion (MJF), należy pamiętać o pewnych założeniach.

### Dokładność wymiarowa

Projektując części w technologii HP MJF można uzyskać dokładność na poziomie IT Grade 13, z wartościami Cpk porównywalnymi do tych przy wtryskowym formowaniu tworzyw sztucznych.

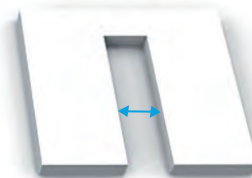
### Minimalne parametry części

Minimalne parametry części drukowanych w płaszczyznach X, Y i Z są następujące:

Minimalna średnica otworu przy grubości 1 mm	0.5 mm
Minimalna średnica wału przy wysokości 10 mm	0.5 mm
Minimalna wielkość czcionki drukowanej dla tłoczonych, wypukłych i wklęsłych, liter i cyfr	6 pt
Minimalna wielkość elementu lub detalu drukowanego (szerokość)	0.1 mm
Minimalny odstęp przy grubości 1 mm	0.5 mm
Minimalna szczelina między ścianami / tłoczonymi detalami	0.5 mm



Minimalny odstęp



Minimalna szczelina między ścianami



Minimalna średnica otworu



Minimalna średnica wału



Minimalna wielkość czcionki drukowanej



Minimalna szerokość elementu

Rycina 1. Minimalne parametry części



## Detale tłoczone i grawerowane

Technologia HP Multi Jet Fusion pozwala użytkownikom drukować tłoczone i grawerowane detale, np. litery i rysunki w bardzo dużych rozdzielczościach.

Aby uzyskać najlepsze wyniki, tekst, cyfry czy rysunki w takiej części powinny mieć głębokość lub wysokość równą co najmniej 1 mm.



Rycina 2. Przykłady tekstu tłoczonego i grawerowanego

## Wytyczne dla projektowanie części precyzyjnych

- Jeśli to możliwe, należy umieszczać małe elementy o krytycznych wymiarach (np. wypusty, otwory i tekst tłoczony) w tej samej płaszczyźnie.
- Projektować części o płynnych przejściach między różnymi przekrojami.
- Jeśli to możliwe, odciążyć części poprzez ich wydrążenie lub wykonanie kratownicy.
- Unikać długich, cienkich, płaskich części o współczynniku kształtu (dł. / szer./) powyżej 10:1.
- Nie projektować części składających się w przeważającej mierze z długich i cienkich zakrzywionych segmentów.
- Unikać grzbietów i żebrowania na dużych, płaskich powierzchniach.

# Projektowanie części estetycznych

## Projektowanie w HP MJF: Wytyczne dla projektowania



### Wstęp

Chcąc drukować części o właściwym wyglądzie i optymalnych właściwościach materiałowych należy pamiętać o zachowaniu pewnych parametrów.

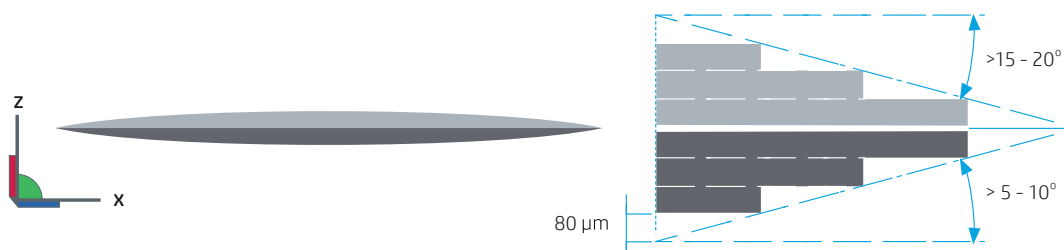
### Efekt schodkowania

Wszystkie technologie produkcyjne polegające na wytwarzaniu kolejnych warstw wymagają dyskretyzacji wymiaru Z odpowiednio do grubości warstwy. Widoczność tych warstw zależy od ich grubości i kątów drukowania.

Technologia HP Multi Jet Fusion (MJF) wykorzystuje warstwy o grubości zaledwie 80  $\mu\text{m}$  (0,080 mm), które w większości sytuacji trudno dojrzeć gołym okiem. Jednak przy małych kątach schodki powstałe w wyniku takiego układania warstw mogą stać się widoczne.

Dlatego też przy projektowaniu części z wystającymi elementami zaleca się zachować kąt powyżej 20° między dużymi, płaskimi powierzchniami i płaszczyzną XY, jeśli będą skierowane do góry. Powierzchnie skierowane w dół są zwykle wyłączone ze schodkowania, o ile są ukierunkowane i nie mają kątów w zakresie 5-10°.

Takie wartości stanowią jednak ogólne wskazanie, a faktycznie zależą od zastosowania. Aby wyniki były optymalne, najlepiej jest wypróbować kilka wariantów i wybrać ten, który zapewni najlepszy wygląd i wrażenie dotykowe.



Rycina 1: Efekt schodkowania

### Wytyczne dla projektowania części estetycznych

- Jeśli to możliwe, należy umieszczać małe elementy o krytycznych wymiarach (np. wypusty, otwory i tekst tłoczony) w tej samej płaszczyźnie, biorąc pod uwagę, że drukowane powierzchnie skierowane w dół będą mieć lepszy wygląd i wrażenie dotykowe niż te skierowane w górę.
- Projektować części o płynnych przejściach między różnymi przekrojami.
- Jeśli to możliwe, stosować wewnętrzne kratownice lub drążyć części, aby odciążyć projekt.
- Unikać długich, cienkich, płaskich części o współczynniku kształtu (dł. / szer.) powyżej 10:1.
- Nie projektować części składających się w przeważającej mierze z długich i cienkich zakrzywionych segmentów.
- Unikać grzbietów i żebrowania na dużych, płaskich powierzchniach.

# Projektowanie części łatwych do czyszczenia

## Projektowanie w HP MJF: Wytyczne dla projektowania



### Wstęp

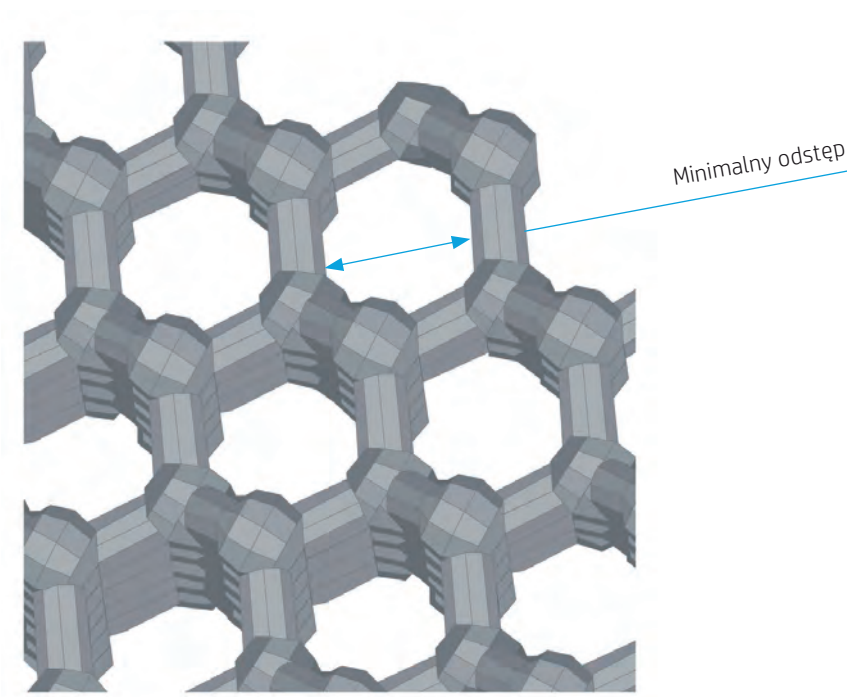
Łatwość czyszczenia to jedna z zalet technologii HP Multi Jet Fusion w porównaniu do innych technologii druku 3D. Jednak w kontekście produkcji części drukowanych projektanci powinni uwzględnić podstawowe zalecenia, aby ułatwić późniejsze czyszczenie i zminimalizować koszt wydrukowanej części.

### Otwory spustowe

Podczas drukowania części wydrążonych należy umieścić co najmniej dwa otwory spustowe po przeciwnych stronach części, aby móc usunąć proszek z jej wnętrza, co jest istotnym procesem z punktu widzenia redukcji wagi. Minimalna zalecana średnica otworów spustowych to 5 mm.

### Konstrukcje latisowe

Niezespojony proszek trudno usuwa się przez otwory spustowe, jeśli część ma wewnątrz kratownicę. Dlatego też zaleca się pozostawiać proszek wewnątrz lub też zostawić kratownicę częściowo otwartą. Minimalny zalecany odstęp w konstrukcji kratownicowej umożliwiający późniejsze usunięcie materiału z wnętrza to 5 mm.



Rycina 1. Minimalny odstęp dla konstrukcji kratownicowych

## Kanały

Aby usunąć materiał z wąskich kanałów, należy zaprojektować i wydrukować wewnątrz kanału pas lub łańcuch. Po wydrukowaniu części można pociągnąć za taki łańcuch i w ten sposób usunąć większość materiału. Pozostały materiał można usunąć w normalnym procesie czyszczenia.



Rycina 2. Czyszczenie kanałów

Kanały o szerokości poniżej 5 mm należy czyścić elastyczną śrubą już po wydrukowaniu części. Aby usprawnić jej działanie, można ją przyczepić do wiertarki.



Rycina 3. Elastyczna śruba

# Określanie tolerancji wymiarowej

## Projektowanie w HP MJF:

### Projektowanie dwuzłazczek



#### Wstęp

Technologia HP Multi Jet Fusion pozwala projektować i drukować części, która można montować ze sobą nawzajem lub na innych wyrobach, np. metalowych, by otrzymać wyroby gotowe i funkcjonalne zespoły. Części takie można łączyć za pomocą dwuzłazczek wykonanych z wkrętów samogwintujących, wkładek gwintowanych lub zatrzasków.

Należy pamiętać o uwzględnianiu tolerancji na wczesnym etapie procesu tworzenia produktu i projektować każdą część stanowiącą element wyrobu gotowego lub zespołu funkcjonalnego z uwzględnieniem dopuszczalnego zakresu różnicowania wymiarów, aby pasowały one do siebie i pracowały zgodnie z przeznaczeniem.

W zależności od tego, w jaki sposób części są łączone w celu utworzenia wyrobu gotowego lub realizowania funkcji zespołu, wymagana tolerancja będzie niższa lub wyższa, co oznacza, że w ramach procesu wytwórczego część musi być wyprodukowana z odpowiednią dokładnością.

#### Międzynarodowe klasy tolerancji (IT)

Projektowanie części często wymaga zastosowania międzynarodowych klas tolerancji zdefiniowanych w ISO 286, która zawiera przepisy normalizacyjne dla przykładowych procesów wytwórczych w zakresie tolerancji dla danego wymiaru.

Najpowszechniejsze procesy wytwórcze mają przypisaną klasę IT, która określa ich zdolność do dostarczenia precyzyjnie wykonanych części, jak na ilustracji poniżej:

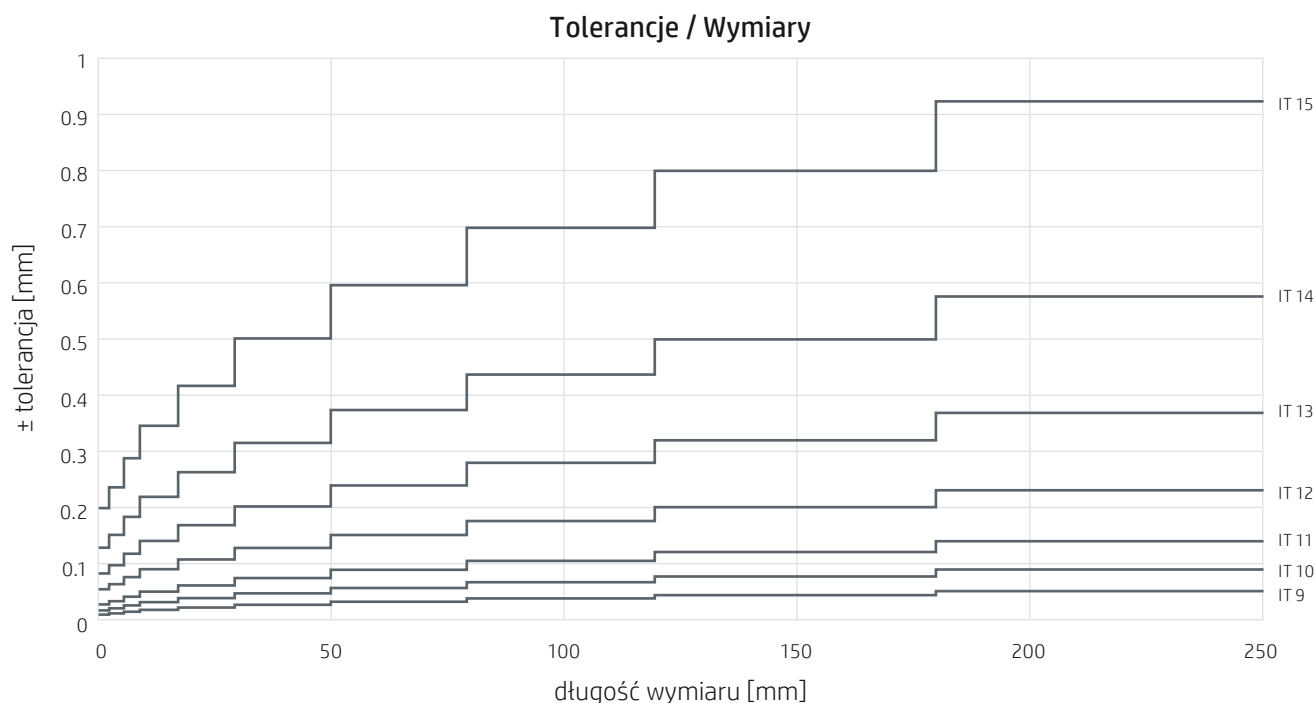
	Narzędzia pomiarowe										Materiały							
Klasy tolerancji (IT)	01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Pasowanie części										Tolerancja produkcji wielkoskalowej							

Rycina 1: Międzynarodowe klasy tolerancji (IT)

Każda klasa IT ustanawia dopuszczalne granice tolerancji dla danego wymiaru. Jak widać w poniższej tabeli, niższa klasa IT oznacza mniejszą tolerancję:

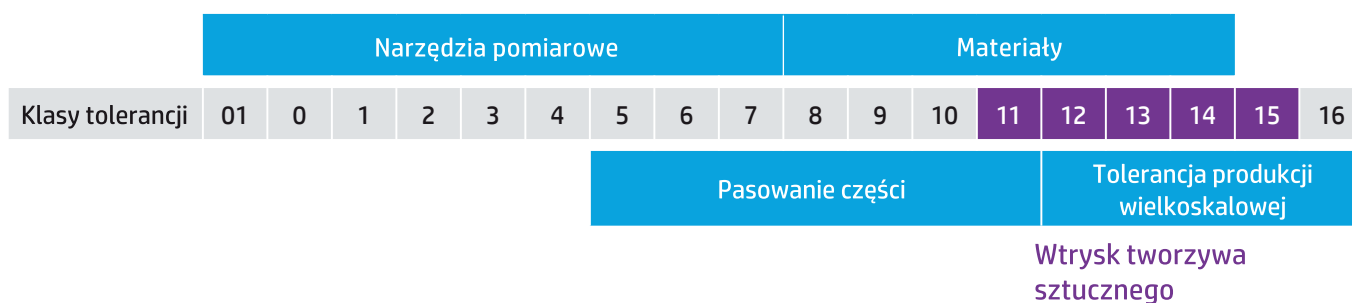
Standardowe klasy tolerancji	Wartości tolerancji standardowej [mm]								
	od: 1 do: 3	3 6	6 10	10 18	18 30	30 50	50 80	80 120	Rozmiar nominalny [mm]
1	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,002	0,002	0,003	Narzędzia pomiarowe
2	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	0,004	
3	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,004	0,005	0,006	
4	0,004	0,004	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,010	
5	0,005	0,005	0,006	0,008	0,009	0,011	0,013	0,015	Pasowania konstrukcyjne, łożyska, procesy obróbcze (szlifowanie, toczenie)
6	0,007	0,008	0,009	0,011	0,013	0,016	0,019	0,022	
7	0,009	0,012	0,015	0,018	0,021	0,025	0,030	0,035	
8	0,014	0,018	0,022	0,027	0,033	0,039	0,046	0,054	
9	0,025	0,030	0,036	0,043	0,052	0,062	0,074	0,087	
10	0,040	0,048	0,058	0,070	0,084	0,100	0,120	0,140	
11	0,060	0,075	0,090	0,110	0,130	0,160	0,190	0,220	Produkcja masowa, odlewanie ciśnieniowe, tłoczenie, odlewanie piaskowe
12	0,090	0,120	0,150	0,180	0,210	0,250	0,300	0,350	
13	0,140	0,180	0,220	0,270	0,330	0,390	0,460	0,540	
14	0,250	0,300	0,360	0,430	0,520	0,620	0,740	0,870	
15	0,400	0,480	0,580	0,700	0,840	1,000	1,200	1,400	
16	0,600	0,750	0,900	1,100	1,300	1,600	1,900	2,200	
17	0,900	1,200	1,500	1,800	2,100	2,500	3,000	3,500	
18	1,400	1,800	2,200	2,700	3,300	3,900	4,600	5,400	

Tabela 1: Standardowe klasy tolerancji



Rycina 2: Wykres międzynarodowych klas tolerancji (IT)

Ogólne formowanie wtryskowe tworzyw sztucznych zwykle pozwala na stosowanie tolerancji odpowiadających klasom IT od 12 do 15. Precyzyjne formowanie wtryskowe tworzyw sztucznych wymaga kosztowniejszego opracowania dokładnych form, ale pozwala na stosowanie tolerancji odpowiadających klasom IT od 8 do 11.

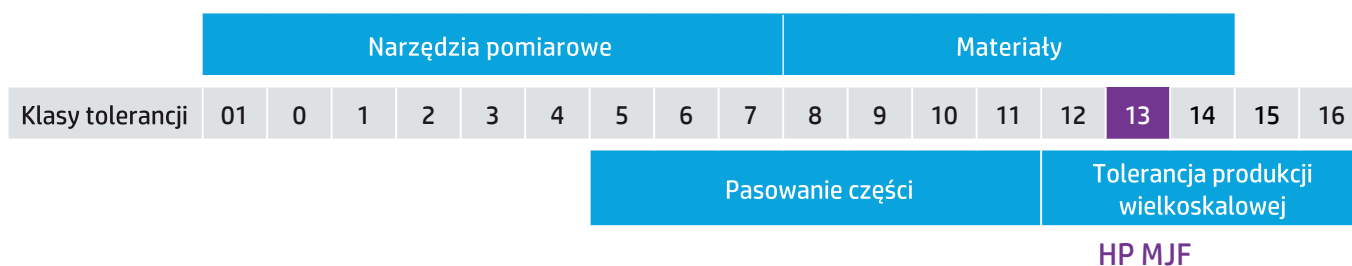


Rycina 3: Klasy IT odpowiadające wtryskowi tworzyw sztucznych

## Określanie tolerancji wymiarowej w HP MJF

Projektując części przy pomocy technologii HP MJF można uzyskać dokładność na poziomie IT Grade 13, z wartościami Cpk porównywalnymi do tych przy wtryskowym formowaniu tworzyw sztucznych.

Według międzynarodowych klas tolerancji określonych w ISO 286 ten zakres zróżnicowania wymiarów odpowiada klasie IT 13.



Rycina 4: Klasa IT odpowiadająca HP MJF

# Typy pasowań

## Projektowanie w HP MJF:

### Projektowanie dwuzłazczek



#### Wstęp

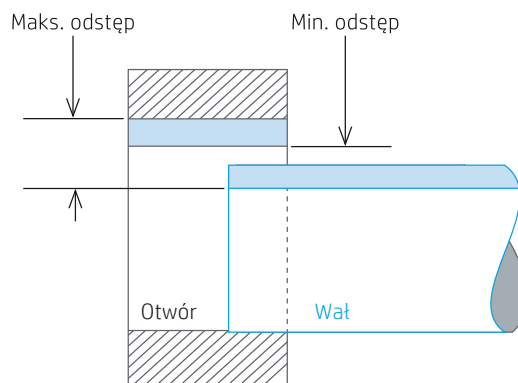
Technologia HP Multi Jet Fusion pozwala użytkownikom drukować części współpracujące w celu tworzenia funkcjonalnych zespołów. Projektując współpracujące części o właściwej tolerancji i danym typie dopasowania należy zadbać o to, by oszczędzać czas potrzebny na post-processing i eksploatację zespołu.

Pasowania służą do ustalenia tolerancji między wewnętrznymi i zewnętrznymi elementami łożysk, tulei, wałów lub otworów wierconych, a często są przedstawiane jako wał i otwór, choć bywają też częściami o innym kształcie niż cylindryczny.

Istnieją dwa typy pasowań wynikające z dopuszczalnych wymiarów granicznych wału i otworu:

#### Pasowanie luźne

Pasowanie luźne pozostawia przestrzeń lub odstęp między współpracującymi częściami. Średnica otworu jest większa od średnicy wału. Po zamontowaniu wał może się przesuwac i/lub obracać w otworze bez użycia siły.

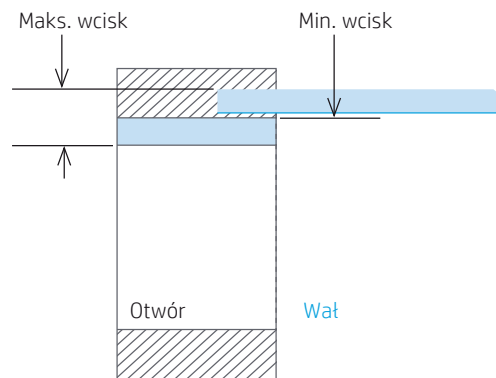


Rycina 1: Pasowanie luźne

W tego typu pasowaniu maksymalny odstęp stanowi różnicę między maksymalnym wymiarem otworu i minimalnym wymiarem wału, natomiast minimalny odstęp to różnica między minimalnym wymiarem otworu i maks. wymiarem wału.

#### Pasowanie na wcisk

W pasowaniu na wcisk średnica otworu jest mniejsza od średnicy wału. Tego typu pasowanie nie dopuszcza ruchu współpracujących części względem siebie, zapewniając mocne połączenie, a przy montażu i demontażu konieczne jest zastosowanie dużej siły.



Rycina 2: Pasowanie na wcisk



W tego typu pasowaniu maksymalny wcisk to różnica między maksymalnym wymiarem wału i minimalnym wymiarem otworu, a minimalny wcisk to różnica między minimalnym wymiarem wału i maksymalnym wymiarem otworu.

## Wytyczne dla projektowania

W zależności od tego, w jaki sposób części współpracujące są pasowane w celu realizowania funkcji zespołu, wymagana tolerancja będzie niższa lub wyższa, co oznacza, że konieczne jest zastosowanie dodatkowych procesów, np. obróbki, aby uzyskać odpowiednią dokładność.

### Pasowania standardowe

Normy międzynarodowe w systemie metrycznym, ISO 286 i ANSI B4.2, oraz w systemie brytyjskim, ANSI B4.1, określają dopuszczalne granice tolerancji, które należy stosować w zależności od typu pasowania.

Projektowanie części często wymaga zastosowania międzynarodowych klas tolerancji zdefiniowanych w ISO 286, która zawiera przepisy normalizacyjne dla przykładowych procesów wytwórczych w zakresie tolerancji dla danego wymiaru, podane w tabeli:

		Wtrysk tworzywa sztucznego																	
		Narzędzia pomiarowe								Materiały									
Klasy tolerancji (IT)		01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
										Pasowanie części				Tolerancja produkcji wielkoskalowej					
										<b>HP MJF</b>									

Tabela 1: Klasy tolerancji (IT)

Każda klasa IT ustanawia dopuszczalne granice tolerancji dla danego wymiaru. Jak widać w poniższej tabeli, niższa klasa IT oznacza mniejszą tolerancję:

Standardowe klasy tolerancji	Wartości tolerancji standardowej [mm]									Rozmiar nominalny [mm]
	od: 1 do: 3	3 6	6 10	10 18	18 30	30 50	50 80	80 120		
1	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,002	0,002	0,003		Narzędzia pomiarowe
2	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	0,004		
3	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,004	0,005	0,006		
4	0,004	0,004	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,010		
5	0,005	0,005	0,006	0,008	0,009	0,011	0,013	0,015		Pasowania konstrukcyjne, łożyska, procesy obróbcze (szlifowanie, toczenie)
6	0,007	0,008	0,009	0,011	0,013	0,016	0,019	0,022		
7	0,009	0,012	0,015	0,018	0,021	0,025	0,030	0,035		
8	0,014	0,018	0,022	0,027	0,033	0,039	0,046	0,054		
9	0,025	0,030	0,036	0,043	0,052	0,062	0,074	0,087		
10	0,040	0,048	0,058	0,070	0,084	0,100	0,120	0,140		
11	0,060	0,075	0,090	0,110	0,130	0,160	0,190	0,220		
12	0,090	0,120	0,150	0,180	0,210	0,250	0,300	0,350		Produkcja wielkoskalowa, odlewnictwo, prasowanie, odlewanie w formach piaskowych
13	0,140	0,180	0,220	0,270	0,330	0,390	0,460	0,540		
14	0,250	0,300	0,360	0,430	0,520	0,620	0,740	0,870		
15	0,400	0,480	0,580	0,700	0,840	1,000	1,200	1,400		
16	0,600	0,750	0,900	1,100	1,300	1,600	1,900	2,200		
17	0,900	1,200	1,500	1,800	2,100	2,500	3,000	3,500		
18	1,400	1,800	2,200	2,700	3,300	3,900	4,600	5,400		

Tabela 2: Standardowe klasy tolerancji

Zwykle najpowszechniejsze typy pasowań wymagają bardzo małych tolerancji, których uzyskanie jest niemożliwe bezpośrednio po zaprojektowaniu i wydrukowaniu części, co oznacza konieczność zastosowania dodatkowych procesów, np. obróbki, do uzyskania właściwej tolerancji.

Dlatego też wydano pewne zalecenia dla projektowania części, która będzie wymagać obróbki po wydrukowaniu, aby wykazać wymaganą tolerancję. Wśród tych zaleceń znajdują się precyzyjnie wykonane otwory i obudowy łożysk.

## Precyzyjne otwory

W zależności od metody obróbki otworu można zaprojektować w części otwór wstępny lub pilotażowy, aby ułatwić wprowadzenie wiertła w dane miejsce. Jeśli część jest obrabiana wiertłem o wymiarze równym końcowej średnicy wymaganego otworu, zaleca się obrabiać część bez zaprojektowanego otworu wstępnego i pozostawienie wykonania takiego otworu maszynie CNC, aby wiertło było prawidłowo umieszczone.

Jeśli konieczne jest obrabianie otworu o średnicy większej niż dostępne wiertło, trzeba go obrobić przy pomocy interpolacji. W takim przypadku można zaprojektować w części otwór wstępny lub pilotażowy, przy czym wymagana średnica musi być co najmniej 1 mm mniejsza od średnicy otworu końcowego.

## Obudowa łożyska

W zastosowaniach, w których konieczne jest pasowanie łożyska zaleca się je obrobić, dokonując interpolacji z wykorzystaniem mniejszego wiertła, a potem dostosowując je do wymaganej tolerancji. Podobnie jak w powyższym przypadku można zaprojektować w części otwór wstępny, by zaoszczędzić materiał, przy czym wymagana średnica musi być co najmniej 1 mm mniejsza od średnicy otworu końcowego, aby wykończenie było właściwe.



Rycina 3: Łożyska wstawiane do części HP MJF

## **Pasowania spersonalizowane (dopasowane do wymagań klienta)**

Zaleca się, aby podczas projektowania współpracujących części mających stanowić zespoły funkcjonalne z niewymaganym pasowaniem standardowym uwzględniać poniższe wytyczne dla projektowania:

- Drukując pasowanie luźne: Wstawiając metalowy wał do otworu w części HP MJF należy zachować minimalny odstęp:  
**Odstęp między współpracującymi częściami > maksymalny wymiar metalowego wału + minimalny wymiar otworu w części HP MJF**
- Drukując pasowanie na wcisk: Wstawiając metalowy kołek do otworu w części HP MJF należy zastosować wcisk jak niżej:  
**Wcisk we współpracujących częściach > minimalny wymiar metalowego kołka + maksymalny wymiar otworu w części HP MJF**

# Złączki gwintowane

## Projektowanie w HP MJF:

### Projektowanie dwuzłaczek



#### Wstęp

Najpowszechniej stosowane typy złączek to śruby i części gwintowane, ponieważ można je swobodnie złączać i rozłączać, a jednocześnie mieć wytrzymałą i trwałą złączkę. Stosowanie gwintów w częściach z tworzyw sztucznych jest typowe przy projektowaniu korków i personalizowanych elementów mocujących lub przy łączeniu rurek.

#### Zalecenia ogólne

Technologia HP Multi Jet Fusion pozwala użytkownikom drukować w części gwinty zewnętrzne i wewnętrzne, eliminując przy tym potrzebę mechanicznego kształtowania gwintu.

Zaleca się drukować gwinty zewnętrzne i wewnętrzne o wymiarach większych niż 6 mm (M6 lub ¼ cala w systemie brytyjskim), aby uzyskać korzystne wyniki przy każdym ukierunkowaniu druku. Jeśli potrzebny jest mały gwint (poniżej 6 mm), zaleca się używać śrub samogwintujących, gwintowanych wkładek lub obróbienia gwintu do małej tolerancji wymaganej przy takim wymiarze.

Tolerancje zależą od materiału, trybu drukowania i wybranego post-processingu. Z tej przyczyny zaleca się najpierw zweryfikować projekt z różnymi przesunięciami, zanim przejdzie się do drukowania wielu części.

#### Wytyczne dla projektowania

##### Wkręty samogwintujące

Choć technologia HP Multi Jet Fusion pozwala drukować wewnątrz części małe elementy, np. gwinty zewnętrzne i wewnętrzne, to gdy potrzebny jest mały gwint (poniżej 6 mm), zaleca się używać wkrętów samogwintujących, które kształtują gwint podczas wkręcania. Pewne rodzaje wkrętów samogwintujących wymagają wykonania otworu wstępnego, którego wymiary są zalecane przez dostawcę wkrętów.



Rycina 1: Wkręt samogwintujący

##### Gwinty obrabiane

Inny sposób na wykonanie małego gwintu (poniżej 6 mm) to obróbkę części po jej wydrukowaniu, aby uzyskać wymaganą dokładność. Narzędzia zalecane do obrabiania części HP Multi Jet Fusion są takie same jak przy innych technicznych tworzywach sztucznych. Choć nie jest to zalecane, można też użyć narzędzi do obróbki metalu (stali lub aluminium).

Standardowy proces obróbki pozwala uzyskać tolerancje wymiarowe do  $\pm 0,05$  mm.

## Gwinty

Aby obrobić gwint wewnętrzny, należy zacząć od otworu wstępnego i następnie obrabiać gwint odpowiednim gwintownikiem. Projektując otwór wstępny w części drukowanej projektanci mogą korzystać z zaleceń dla wymiarów wiertel do tworzyw sztucznych i metalu. Na przykład, w poniższej tabeli podano zalecenia dla wiertel do wykonywania gwintów metrycznych w tworzywach sztucznych.

### 1. Standardowe gwinty metryczne ISO

Wymiar gwintu metrycznego ISO	Rozmiar wiertła [mm]
M3	2,5
M4	3,3
M5	4,2
M6	5
M8	6,8
M10	8,5
M12	10,2
M16	14
M20	17,5
M24	21
M30	26,5
M36	32
M42	37,5
M48	43
M50	47
M56	50,5

### 2. Drobne gwinty metryczne ISO

Wymiar gwintu metrycznego ISO	Rozmiar wiertła [mm]
M3 x 0,35	2,65
M4 x 0,5	3,5
M5 x 0,5	4,5
M6 x 0,75	5,2
M8 x 1	7
M10 x 1,25	8,8
M12 x 1,25	10,8
M16 x 1,5	15,4
M20 x 1,5	18,5
M24 x 2	22
M30 x 2	28
M36 x 3	33

### 3. Gwinty Whitworth

Wymiar gwintu [cale]	Rozmiar wiertła [mm]	
	BSW	BSP
1/16	1,2	--
3/32	1,8	--
1/8	2,6	8,9
5/32	3,1	--
3/16	3,6	--
7/32	4,4	--
1/4	5,1	11,9
5/16	6,5	--
3/8	7,9	15,4
1/2	10,5	19
5/8	13,5	--
3/4	16,5	24,7
7/8	19,3	28,4
1	22	30,8
1 1/8	24,8	35,5
1 1/4	27,8	39,4
1 3/8	30,5	42
1 1/2	33,5	45,4

Tabela 1: Zalecane rozmiary wiertel do gwintów w tworzywach sztucznych

Zwykle podczas obrabiania części metalowych trzeba użyć zestawu trzech gwintowników. Przy tworzywach sztucznych HP wystarczy jeden ze względu na niższą twardość materiału HP w porównaniu do stali gwintownika.



Rycina 2: Testowanie wstępnego otworu HP MJF

## Gwinty zewnętrzne

Aby obrobić gwint zewnętrzny, należy zacząć od wydrukowanego pełnego walca i następnie obrabiać gwint odpowiednią matrycą. Średnica obrabianego walca musi być nieco mniejsza od największej średnicy matrycy. Obowiązują typowe zalecenia dla średnicy walca dla tworzyw sztucznych i metalu.



Rycina 3: Matryca metryczna

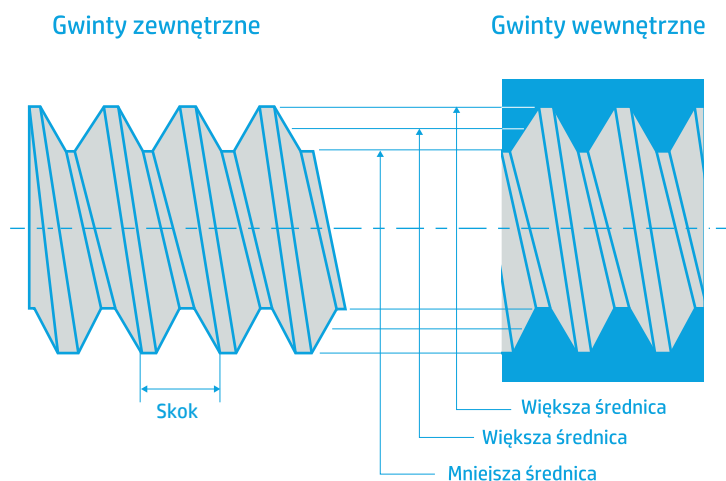
## Standardowe gwinty drukowane

Aby zapewnić prawidłową pracę zespołu wykonanego za pomocą technologii HP Multi Jet Fusion, należy stosować się do pewnych zaleceń podczas projektowania gwintów większych od 6 mm w ramach norm międzynarodowych (np. DIN 13-1, ISO 965-2, ANSI/ASME B1.1). Te normy międzynarodowe zwykle określają tolerancje względem średnicy i skoku gwintu.

Projektując gwinty wewnętrzne należy stosować mniej restrykcyjne wartości tolerancji (maksymalne wartości), a projektując gwinty zewnętrzne należy stosować bardziej restrykcyjne wartości tolerancji (minimalne wartości). Na przykład, projektując gwinty metryczne w ramach normy ISO 965-2 - gwinty o tolerancjach ogólnego przeznaczenia (6H-6g) i normalnej długości połączenia - należy stosować zalecane wartości projektowe pokazane w poniższej tabeli:

Gwint	Skok	Gwinty wewnętrzne - 6H					Gwinty zewnętrzne - 6g					
		ØD	Średnica skoku Ø		Mniejsza średnica Ø		Większa średnica Ø		Średnica skoku Ø		Mniejsza średnica Ø	
		min.	min.	maks.	min.	maks.	maks.	min.	maks.	min.	maks.	min.
M8	1.25	8	7.188	7.348	6.647	6.912	7.972	7.760	7.160	7.042	6.438	6.272
M10	1.5	10	9.026	9.206	8.376	8.676	9.968	9.732	8.994	8.862	8.128	7.938
M12	1.75	12	10.863	11.063	10.106	10.441	11.966	11.701	10.829	10.679	9.819	9.602
M16	2	16	14.701	14.913	13.835	14.210	15.962	15.682	14.663	14.503	13.508	13.271
M20	2.5	20	18.376	18.600	17.294	17.744	19.958	19.623	18.334	18.164	16.891	16.625

Tabela 2: Zalecane tolerancje gwintów zewnętrznych i wewnętrznych dla części HP MJF na podstawie wartości wskazanych w ISO 965-2

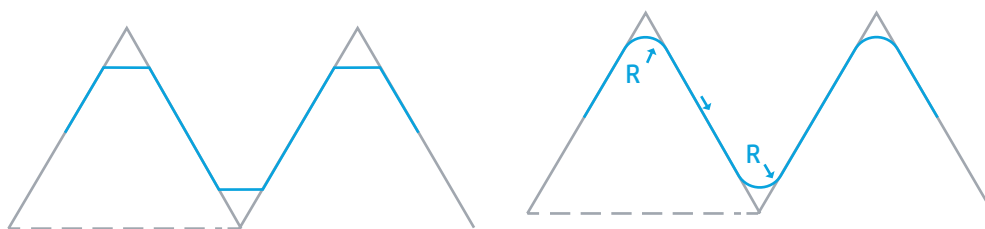


Rycina 4: Elementy gwintów zewnętrznych i wewnętrznych

## Gwinty spersonalizowane

W gwintach spersonalizowanych wszystkie gwinty zewnętrzne i wewnętrzne powinny się projektować z odstępem 0,2-0,4 mm między gwintem zewnętrznym i wewnętrznym.

Przy projektowaniu gwintów dla części HP Multi Jet Fusion zaleca się usuwać wszystkie ostre krawędzie i zastosować minimalny promień 0,1 mm.



Rycina 5: Okrągłe krawędzie w gwintach spersonalizowanych

## Wytyczne dla post-processingu

Gwinty można uznać za bardzo drobny detal i należy je czyścić ręczną lub automatyczną piaskarką ze szklanymi koralikami o rozmiarach od 70 do 110 mikronów i ciśnieniem 3-4 bar. W przypadkach, w których konieczne jest zastosowanie obróbki wibrościernej (bębnowania), aby poprawić szorstkość powierzchni w innych obszarach, zaleca się uprzednie wyczyszczenie gwintów piaskarką. Zwykle środki stosowane w obróbce wibrościernej są zbyt duże, by czyścić przestrzeń między gwintami.



Czyszczenie gwintów wewnętrznych jest trudniejsze; z tego względu lepiej jest skrócić tego typu gwint i, o ile to możliwe, robić otwory przelotowe. Do gwintów zarówno wewnętrznych, jak i zewnętrznych można używać gwintowników i matryc, jeśli nie są całkowicie wyczyszczone lub jeśli występuje nadmierne tarcie.

W żadnym wypadku nie zaleca się lakierowania gwintów; części można lakierować dopiero po zmontowaniu.

Z tej przyczyny do nadania koloru można używać wyłącznie farbowania, które nie zmienia dokładności wymiarowej.

# Wkładki

## Projektowanie w HP MJF: Projektowanie dwuzłaczek



### Wstęp

Gwintowane wkładki stanowią w częściach z tworzyw sztucznych wytrzymały i stały gwint wielokrotnego użytku, a zwykle są stosowane wtedy, gdy występuje konieczność częstego montażu i demontażu zespołów na potrzeby serwisu lub napraw. Wkładki gwintowane są często dostępne w wersji mosiężnej, aluminiowej lub ze stali nierdzewnej i mogą być montowane za pomocą różnych technik (np. zgrzewania na gorąco, drgań ultradźwiękowych lub wciskania).

### Wkładki zalecane do HP Multi Jet Fusion

Dobór wkładki gwintowanej i techniki montażowej zależy od kilku czynników: zastosowania części, materiału części plastikowej i wymogów wytrzymałościowych.

Części HP Multi Jet Fusion są wykonywane z tworzyw termoplastycznych i mogą być po wydrukowaniu przetapiane i formowane ponownie. Z tej przyczyny wkładki, które są montowane za pomocą zgrzewania na gorąco lub drgań ultradźwiękowych nadają się najlepiej do tworzyw termoplastycznych ze względu na ich dobre właściwości użytkowe; jednak w niektórych zastosowaniach właściwe będzie użycie wciskania (łączników rozporowych lub wkrętów sześciokątnych) i wkładek samogwintujących.

Typ wkładki		Właściwości użytkowe
Wkładka zgrzewana na gorąco lub montowana drganiami ultradźwiękowymi		Dobre właściwości użytkowe. W niewielkim stopniu zależna od rozmiaru otworu. Materiał nadtapiany wokół wkładki.
Wkładka wciskana	Łącznik rozporowy	W dużym stopniu zależny od rozmiaru otworu. Zalecany do zastosowań mniej istotnych
	Wkręt sześciokątny	W dużym stopniu zależny od rozmiaru otworu. Dobra odporność na wyciąganie. Zalecany do zastosowań mniej istotnych
Wkładka samogwintująca		Doskonała odporność na wyciąganie. Łatwa w montażu.

Tabela 1: Typy wkładek

## Wytyczne dla projektowania

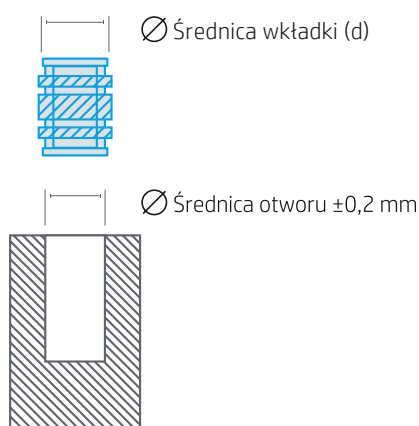
### Średnica otworu

Wstępny otwór jest niezbędny do montażu wkładki gwintowanej, zatem średnica otworu jest istotnym czynnikiem w kwestii uzyskania żądanej wytrzymałości. Otwory zbyt duże zmniejszają wytrzymałość łączenia, a zbyt małe mogą doprowadzić do pęknięcia części. Zwykle dostawcy wkładek gwintowanych określają wymiar średnicy otworu i głębokość potrzebną do montażu wkładki.



Wymiar otworu zależy od ukierunkowania części; z tego powodu zaleca się zawsze drukować część z tym samym ukierunkowaniem.

Części produkowane za pomocą HP Multi Jet Fusion mogą wykazywać różnice w wymiarach małych elementów, sięgające +/- 0,2 mm (ISO 286, IT Grade 13), co zwykle stanowi wartość wyższą od specyfikacji dostawcy. Z tej przyczyny należy pamiętać o dobraniu takiego typu wkładki, by pasowała do odchytek otworu.



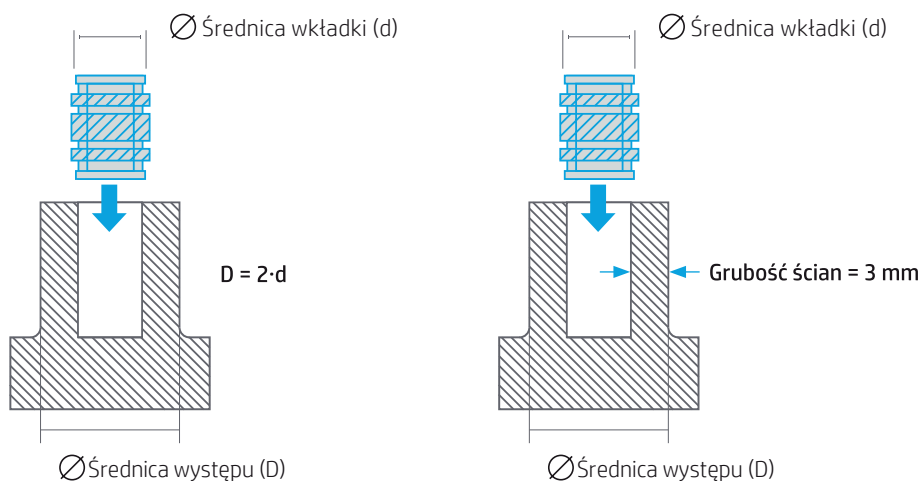
Rycina 1: Średnica otworu

### Występy

Występy są zwykle stosowane do celów montażu elementów mocujących lub jako gniazdo dla wkładek gwintowanych. Tradycyjnie, średnica występu stanowi dwukrotność wymiaru średnicy zewnętrznej wkładki, która ma poniżej 6 mm, natomiast w większych wkładkach stosuje się ścianki o grubości 3 mm.

Ø Ø Średnica wkładki (d) < 6 mm

Ø Ø Średnica wkładki (d) ≥ 6 mm



Rycina 2: Średnica występu



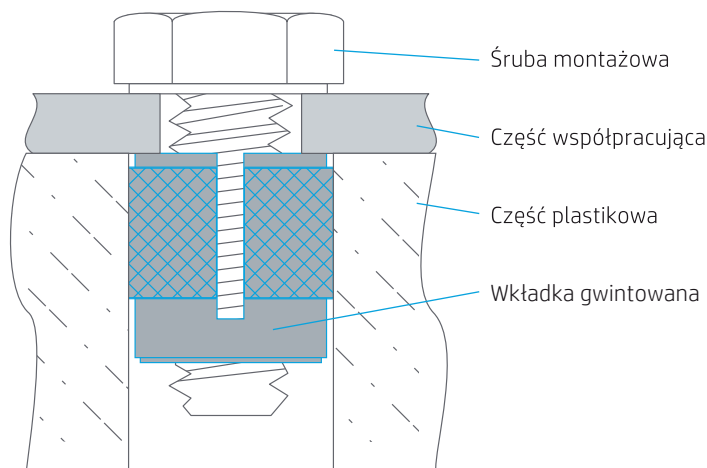


Należy szczególnie rozpatrzyć wszelkie przypadki wciskania na zimno, gdzie zwiększone naprężenie może wymagać zastosowania występu o większej średnicy.

### Część współpracująca

To wkładka gwintowana, a nie część z tworzywa sztucznego powinna przenosić obciążenie. Z tego względu średnica otworu w części współpracującej jest również ważna z punktu widzenia odporności wkładki na wyciągnięcie z otworu.

Dlatego też średnica otworu w części współpracującej musi być większa od zewnętrznej średnicy śruby montażowej, ale mniejsza od średnicy wkładki, jak na ilustracji:



Rycina 3: Złączka gwintowana



Część współpracująca musi również wytrzymać naprężenie wywołane przez siłę ściskającą. W przypadkach, gdy część współpracująca również jest plastikowa, należy rozważyć zastosowanie kołnierza lub podkładki między śrubą montażową i częścią współpracującą.

# Spoiny klejone

## Projektowanie w HP MJF:

### Projektowanie dwuzłaczek

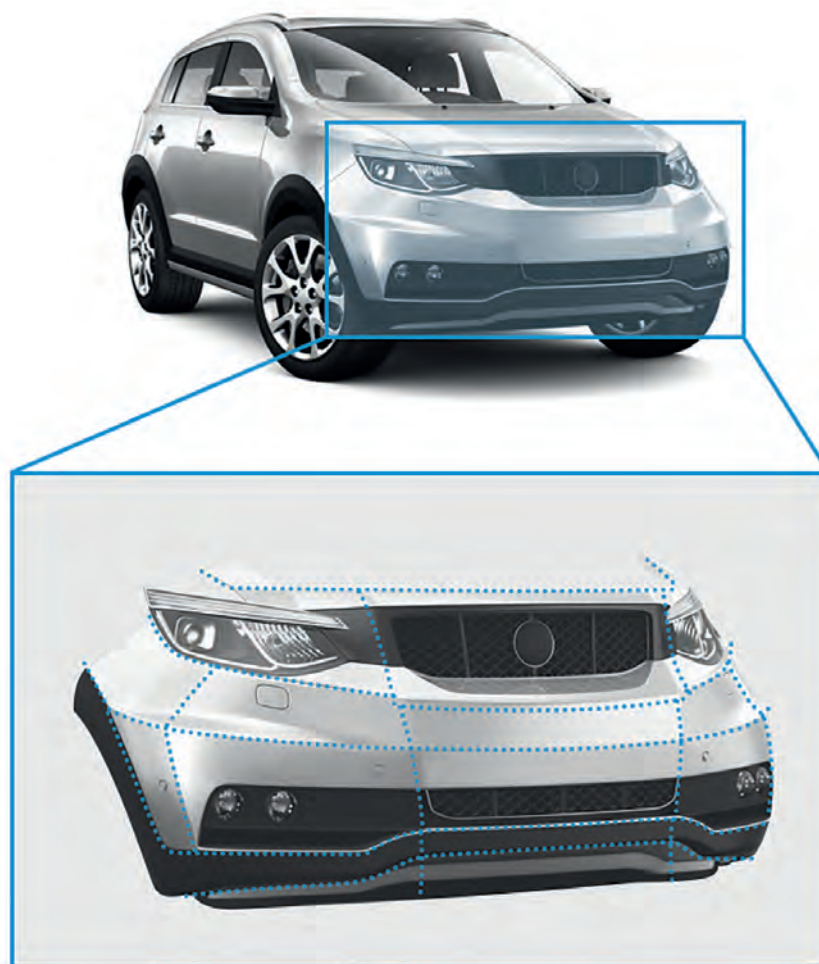


#### Wstęp

Stosując technologię HP Multi Jet Fusion czasem konieczne jest podzielenie części na fragmenty i potem ponowne ich złączenie. W dwóch przypadkach spajanie części jest konieczne:

#### Dzielenie dużych części

Niektóre duże części nie mieszczą się w komorach konstrukcyjnych drukarek 3D HP Jet Fusion. Dlatego części dzieli się na kilka fragmentów, a po wydrukowaniu łączy ponownie. Zdarza się tak w branży motoryzacyjnej lub podczas produkcji przyrządów i uchwytów obróbkowych, gdy duże części trzeba potem połączyć, aby zapewnić wytrzymałe połączenie i uzyskać właściwe rozwiązanie.

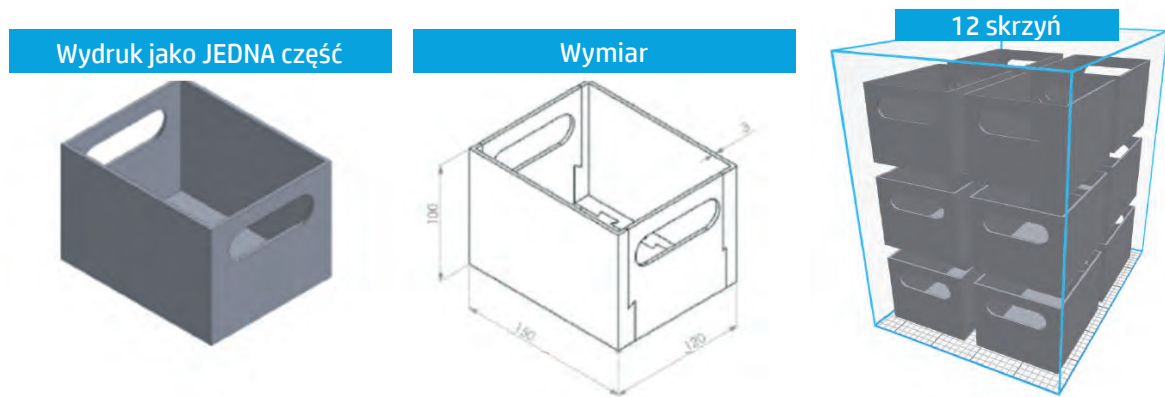


Rycina 1: Propozycja podzielenia zderzaka

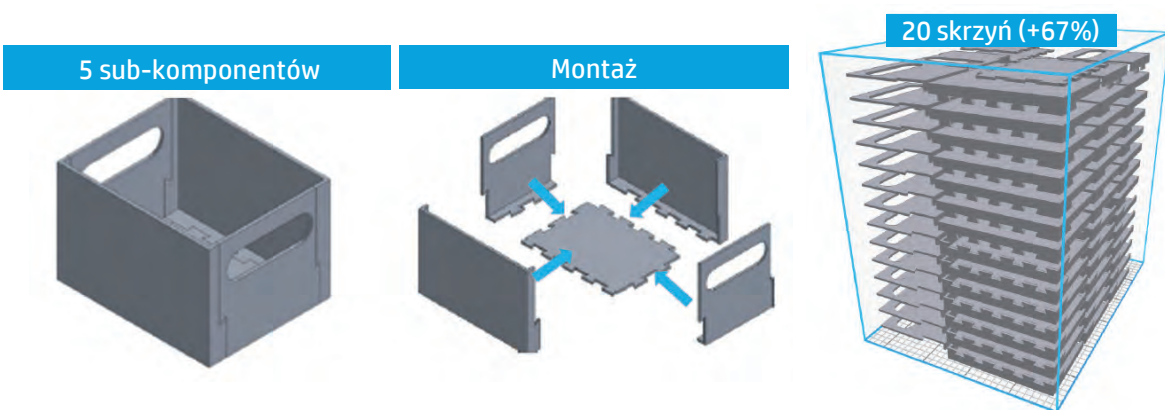
#### Zwiększenie gęstości pakowania

Zwiększenie gęstości pakowania to sposób na maksymalizację wydajności wydruku w kontekście kosztów i produktywności. W zależności od geometrii istnieją pewne ograniczenia pakowania przy danej wartości maksymalnej. W takich przypadkach można część podzielić.

Gęstość pakowania części można zoptymalizować np. dodając zawiasy, które umożliwiają składanie. Można je zablokować po wydrukowaniu za pomocą kleju lub zamka mechanicznego.



Rycina 2: Przykład optymalizacji gęstości pakowania: Oryginalny projekt skrzyni i liczba części mieszczących się na platformie drukowania. Dane za zgodą Henkel AG & Co. KgaA



Rycina 3: Przykład podziału części w celu optymalizacji gęstości pakowania: Po podziale gęstość pakowania wzrosła o 67%. Dane za zgodą Henkel AG & Co. KgaA

## Wytyczne dla projektowania

Stabilność łączenia mocno zależy od projektu złączki i sposobu, w jaki podzielono lub pocięto część na fragmenty. Właściwy projekt łączenia stanowi kluczowy czynnik udanego wykonania.

### Projektowanie złązek

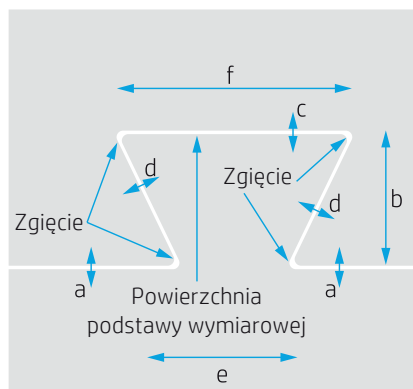
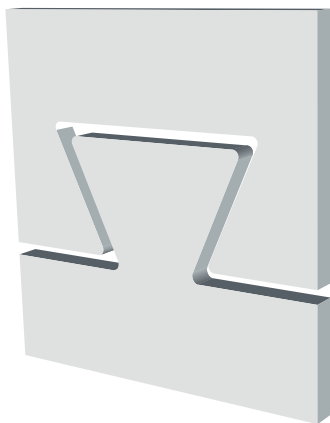
Projektowanie złązek łączenia stanowi kluczowy czynnik gwarantujący odpowiednie właściwości użytkowe łączenia w wyrobie gotowym. Czas poświęcony na zaprojektowanie właściwej złączki zależy od końcowego zastosowania łączonych fragmentów. Na przykład, prototyp do prezentacji, który nie jest poddawany obciążeniom potrzebuje złączki o prostym projekcie, natomiast część motoryzacyjna przeznaczona do użytku w wyrobie gotowym powinna być projektowana tak, by zapewnić najlepsze właściwości użytkowe.

Opcje projektowania zależą od grubości łączonych części i możliwości modyfikacji geometrii końcowej.

### Grubość < 1,7 mm bez możliwości zmiany geometrii

Jednym z celów procesu projektowania złączki jest zwiększenie obszaru łączenia w możliwie największym stopniu. Użycie elementów, które ułatwią dopasowanie jednego fragmentu do drugiego podczas łączenia pomoże uzyskać właściwe rozmieszczenie części i jak najlepszy efekt końcowy. W tym przypadku najwłaściwszym wariantem jest łączenie płetwowe (na jaskółczy ogon) widoczne poniżej:

## Jaskółczy / Ogon



Zalecane wymiary:

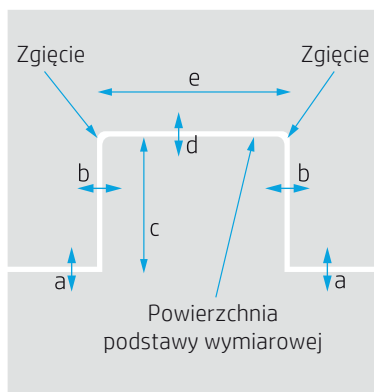
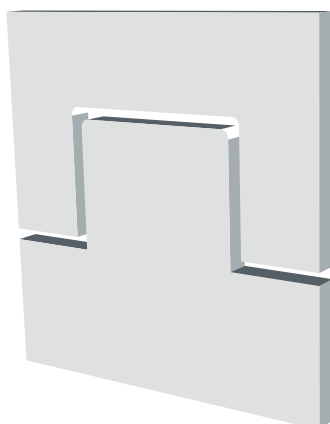
a:	0.2 mm
b:	10 mm
c:	0-0.1 mm
d:	0.2 mm
e:	10 mm
f:	20 mm

Rycina 4: Zalecenia dla projektu łączenia pletwowego (na jaskółczy ogon)

Złączka tego rodzaju pozwala zwiększyć powierzchnię łączenia i jednocześnie przytrzymuje montowane fragmenty.

Dostępne są również inne opcje, prostsze i dające zadowalające wyniki, które można wykorzystać przy szybszych projektach:

## Pióro i wpust

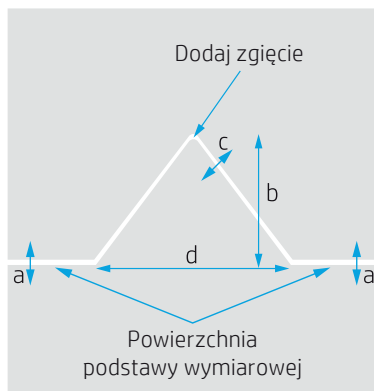


Zalecane wymiary:

a:	0.4 mm
b:	0.2 mm
c:	10 mm
d:	0-0.1 mm
e:	10 mm

Rycina 5: Zalecenia dla projektu łączenia na pióro i wpust

## Ząbek

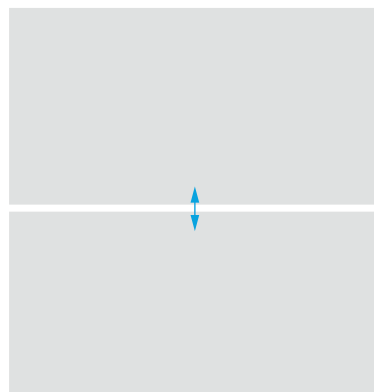
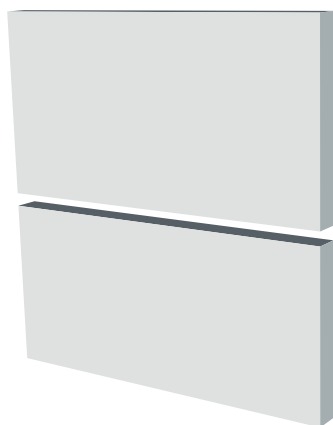


Zalecane wymiary:

a:	0-0.1 mm
b:	10 mm
c:	0.2 mm
d:	20 mm

Rycina 6: Zalecenia dla projektu łączenia ząbkowego

## Łączenie na styk



Zalecane odstępy  
między częściami:  
**0-0.1 mm**

Rycina 7: Zalecenia dla projektu łączenia na styk

Mając projekt łączenia, którego wykonanie nie jest możliwe ze względu na utrudnienia geometryczne (płetwowego, pióro i wpust lub ząbkowego) można zdecydować się na łączenie na styk, ale należy pamiętać, że prosta linia w obszarze łączenia to najłagodniejszy wariant łączenia ze względu na jego mniejszą powierzchnię.

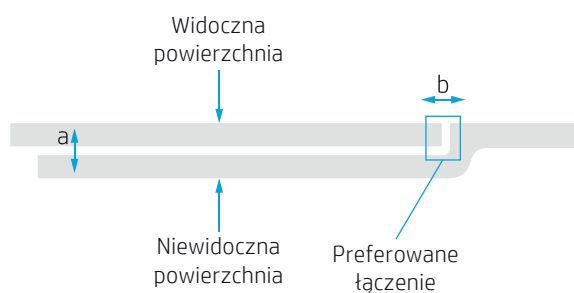
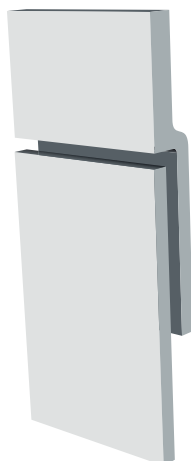


Wszystkie warianty projektów można łatwo zastosować przy pomocy programu 3D, np. Materialise Magics, lub też zaprojektować bezpośrednio w CAD.

## Grubość < 1,7 mm z możliwością zmiany geometrii

Jeśli możliwa jest zmiana geometrii, to powierzchnię łączenia można zwiększyć i wzmocnić mechanicznie dodając zakładkę między łączonymi powierzchniami.

## Zakładka z przesunięciem



Zalecane wymiary:

**a: 0.1 mm**

**b: 0 mm**

Zalecane łączenie:

**Styk** (powierzchnia kosmetyczna)

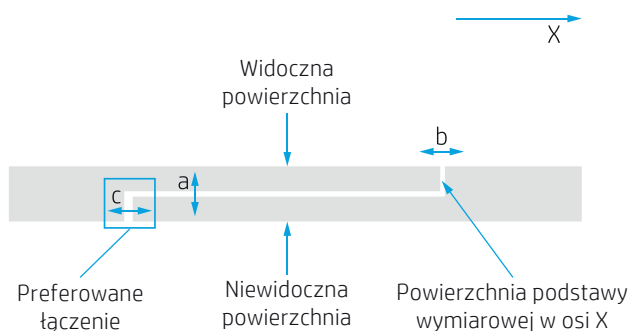
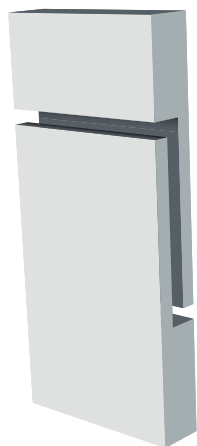
**Płetwa** (powierzchnia niekosmetyczna)

Rycina 8: Zalecenia dla projektowania zakładki z przesunięciem

## Grubość > 1,7 mm

Jeśli część ma wystarczającą grubość, by dołożyć nakładkę między częściami, nie trzeba zmieniać geometrii końcowej w celu jej wzmocnienia. Usprawnienie i optymalizację łączenia można wykonać bezpośrednio w pierwotnym projekcie, zwiększając i wzmacniając powierzchnię łączenia.

### Zakładka



Zalecane wymiary:

- a: 0.1 mm
- b: 0 mm
- c: ≥ 0.4 mm

Zalecane łączenie:

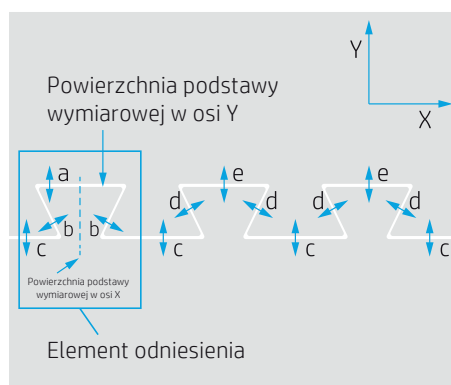
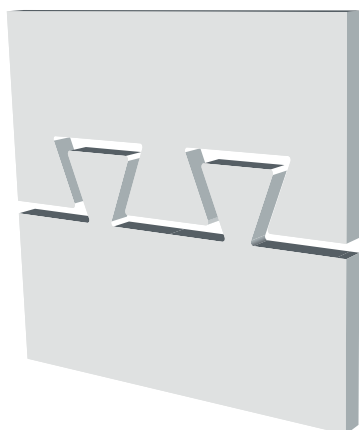
**Płetwowe/wpustowe**

Rycina 9: Zalecenia dla projektowania zakładki

## Dodawanie kilku elementów łączenia

Gdy linia łączenia jest długa, pomocne może się okazać dodanie większej liczby elementów przytrzymujących fragmenty po nałożeniu kleju. Niezależnie od tego, czy pozycja między obydwoema częściami jest krytycznym elementem projektu, elementy należy wykonać umieszczając najpierw element wciskowy, który pozwoli rozmieścić obydwoe części w płaszczyźnie XY, a następnie dodając pozostałe elementy z większym odstępem, aby skompensować ewentualną różnicę wymiarów.

### Z wieloma elementami



Zalecane wymiary:

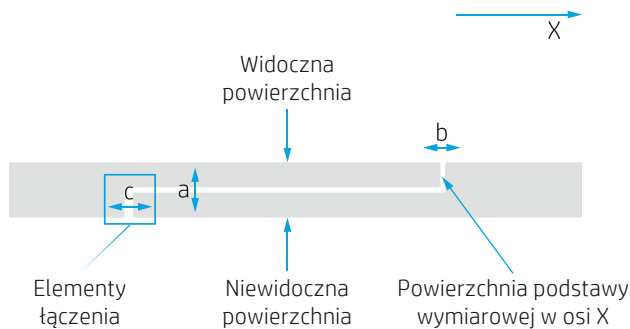
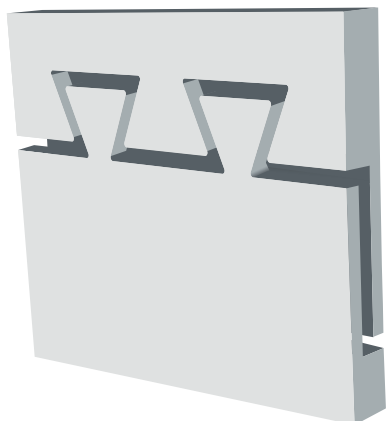
- a: 0.1 mm
- b: 0.2 mm
- c: ≥ 0.4 mm
- d: ≥ 0.3 mm
- e: 0.2 mm

Rycina 10: Łączenie z wieloma elementami: Zalecenia dla projektowania

## Połączenie łączenia zakładkowego z wieloma elementami wpustowymi

Biorąc pod uwagę wszystkie powyższe zalecenia, preferowanym projektem łączenia jest zastosowanie jednocześnie zakładki i elementów wciskowych (wpustowych). Takie elementy wciskowe można umieszczać na niewidocznej powierzchni i pomogą połączyć ze sobą dwa elementy w sposób optymalizujący właściwości użytkowe łączenia.

### Zakładka z wieloma elementami wpustowymi



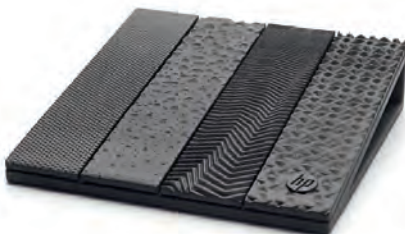
Zalecane wymiary:

- a: 0.1 mm
- b: 0 mm
- c:  $\geq 0.4$  mm

Rycina 11: Zakładka z wieloma elementami wpustowymi: Zalecenia dla projektowania

## Dodatkowe warianty wzmocnienia spoiny klejonej

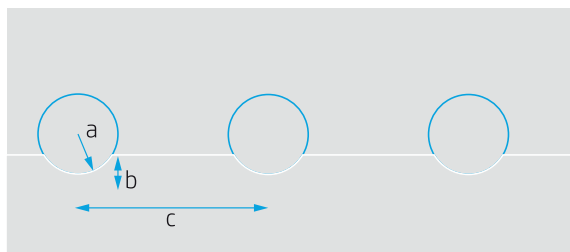
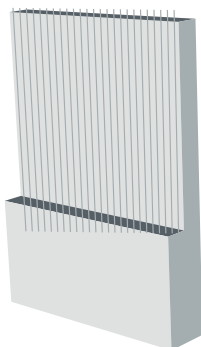
Jeśli klej może wypełniać szczeliny, to przyleganie mechaniczne kleju i części łączenia można jeszcze poprawić nadając powierzchni fakturę. Nadanie jej szorstkości zapewnia mechaniczne blokowanie elementów poprzez rozmieszczenie na powierzchni „ząbków”, a także zwiększa całkowitą efektywną powierzchnię łączenia.



Rycina 12: Przykładowa faktura zwiększająca przyleganie

Inną możliwością zwiększenia powierzchni łączenia jest rozmieszczenie rowków na powierzchniach części łączonych.

### Rowki



Zalecane wymiary:

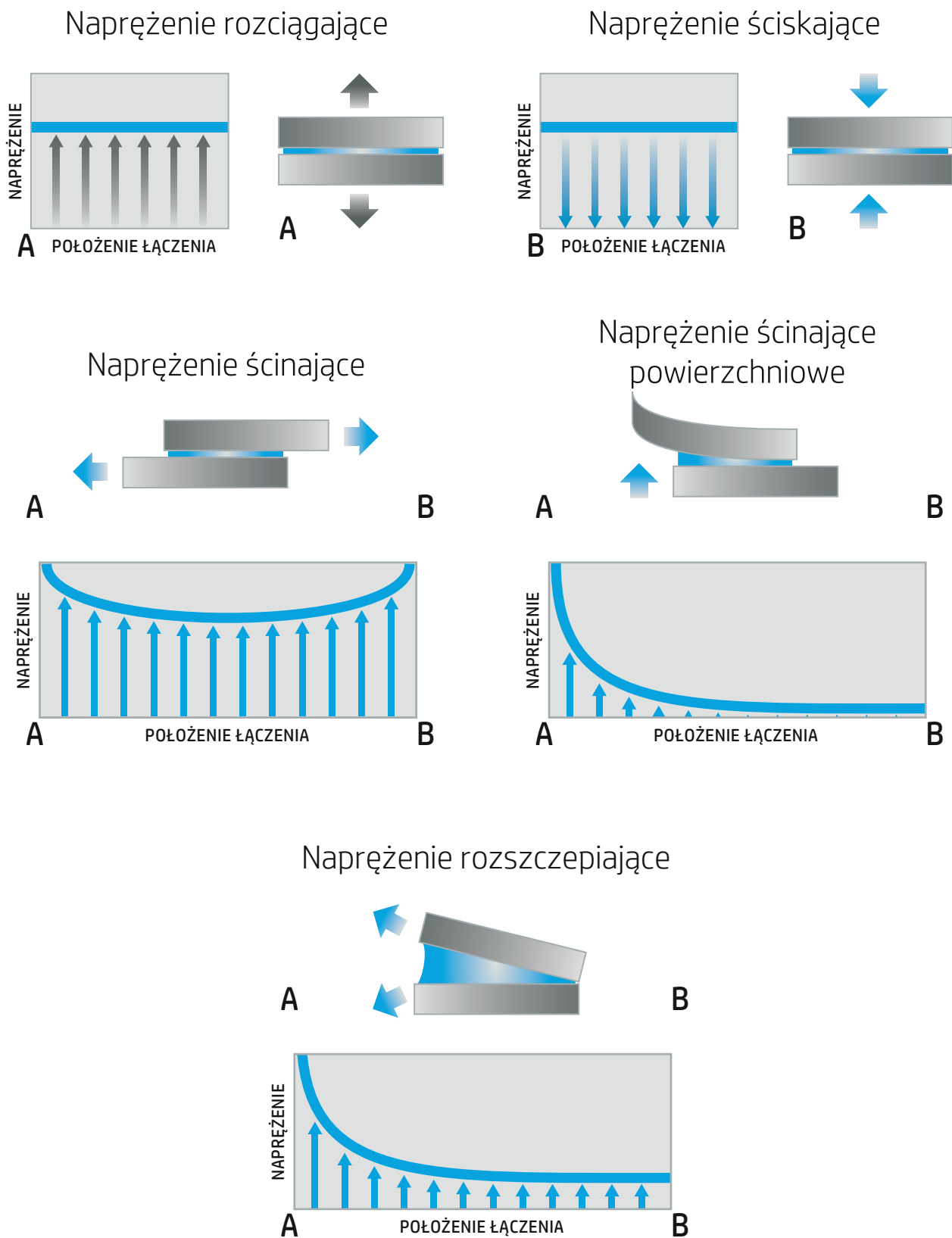
- a: 0.2 mm
- b: 0.1 mm
- c:  $\geq 1$  mm

Rycina 13: Rowki zwiększające powierzchnię łączenia Zalecenia dla projektowania

## Zalecenia dla skrawania

Gdy część wymaga cięcia, należy pamiętać, które części stanowią obciążenie przykładane do ostatecznie zmontowanego zespołu, ponieważ stabilność łączenia można zoptymalizować podejmując właściwe decyzje przy projektowaniu.

Napężenie obecne w obszarze łączenia zależy od przyłożonego obciążenia. Do najczęstszych należą:



Rycina 14: Rozkład naprężeń powodowanych przez różne obciążenia Dane za zgodą Henkel AG & Co. KgaA



Po wykonaniu cięcia należy wykończyć projekt, aby nie dopuścić do powstania naprężenia ścinającego powierzchniowego, rozszczepiającego lub rozciągającego. Spoiny klejone pracują lepiej pod naprężeniem ścinającym lub ściskającym, a projekt powinien zapewniać maksymalizację takich naprężeń, by zapewnić stabilność połączenia. Zastosowanie w łączeniu zakładki pomaga stworzyć łączenie, które pracuje lepiej pod naprężeniem ścinającym, co zapewnia maksymalizację właściwości użytkowych łączenia.



Zaleca się stosowanie szerszych zakładek zamiast dłuższych. Szersza zakładka pomaga rozłożyć naprężenie na szerokości elementu i zmniejsza maksymalne wartości naprężeń pojawiające się po bokach.

# Zatrzaski

## Projektowanie w HP MJF:

### Projektowanie dwuzłazczek



#### Wstęp

Zatrzask to efektywna metoda montażu stosowana do mocowania plastikowych części za pomocą wystającego elementu na jednej z nich (np. haczyka), który odchyła się podczas montowania przy jego wsuwaniu do rowka lub szczeliny w drugiej części. Po zmontowaniu wystający element powraca do pierwotnego położenia.

Zatrzaski to prosty i niedrogi sposób montowania części plastikowych, który znacząco skraca czas montażu. Metoda projektowania zatrzasku określa, czy można go montować i demontować wielokrotnie i jaka siła jest do tego potrzebna. Ta metoda montażowa nadaje się do tworzyw termoplastycznych ze względu na ich elastyczność, duże wydłużenie i możliwość drukowania złożonych kształtów.

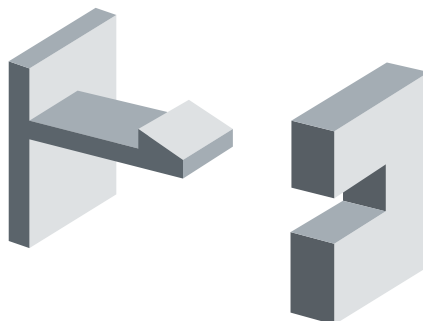
Technologia HP Multi Jet Fusion pozwala projektować i drukować części z wbudowanymi elementami, np. zatrzaskami, aby potem wykorzystać je do łączenia.

#### Typy zatrzasków

Poniżej przedstawiono różne typy zatrzasków.

##### Zatrzask wspornikowy

To najczęściej stosowany typ zatrzasku. Składa się z belki wspornikowej ze zgrubieniem na końcu. W tego typu zatrzasku istnieje bezpośrednia relacja między stabilnością montażu i wytrzymałością zatrzasku.



Rycina 1. Zatrzask wspornikowy



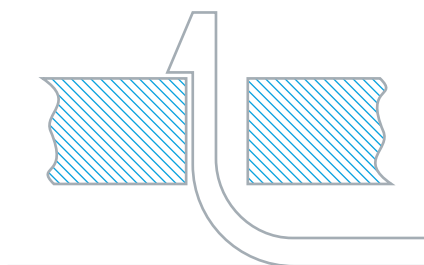
Rycina 2. Montaż zatrzasku wspornikowego

## Zatrask kątowy (profil L)

Jeśli nie można zaprojektować zatrzasku wspornikowego bez narażania stabilności montażu i wytrzymałości zatrzasku ze względu na ograniczenia materiałowe lub geometryczne, alternatywą może być zatrask kątowy. Umieszczenie rowka w podstawie zatrzasku zwiększa jego elastyczność i jednocześnie zmniejsza obciążenie belki w porównaniu do zatrzasku wspornikowego.



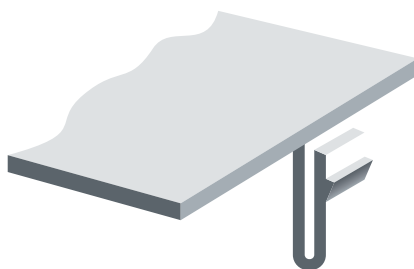
Rycina 3. Zatrask kątowy (profil L)



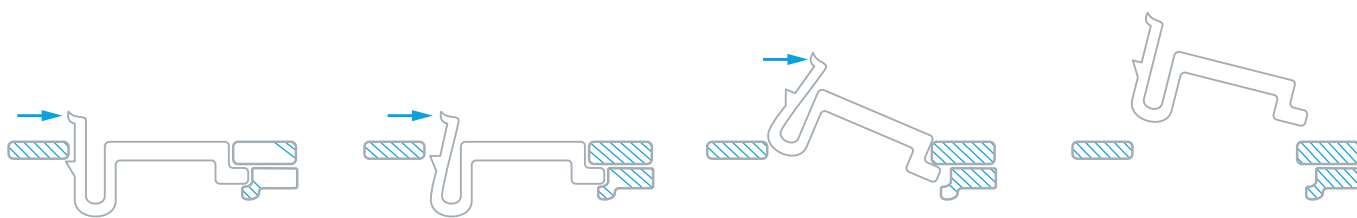
Rycina 4. Montaż zatrzasku kąтового

## Zatrask ceownikowy (profil U)

Zatrask ceownikowy (profil U) to kolejny wariant, który można stosować zamiast wspornikowego, gdy trzeba zwiększyć elastyczność zatrzasku w małej przestrzeni. Ten zatrask jest bardzo elastyczny, a zatem łatwo się go wyciąga. Tego typu zatrask jest stosowany, gdy części muszą być wielokrotnie rozłączane lub gdy nie wymagają dużej siły, by pozostawać w położeniu roboczym (np. pokrywa komory na baterie).



Rycina 5. Zatrask ceownikowy (profil U)

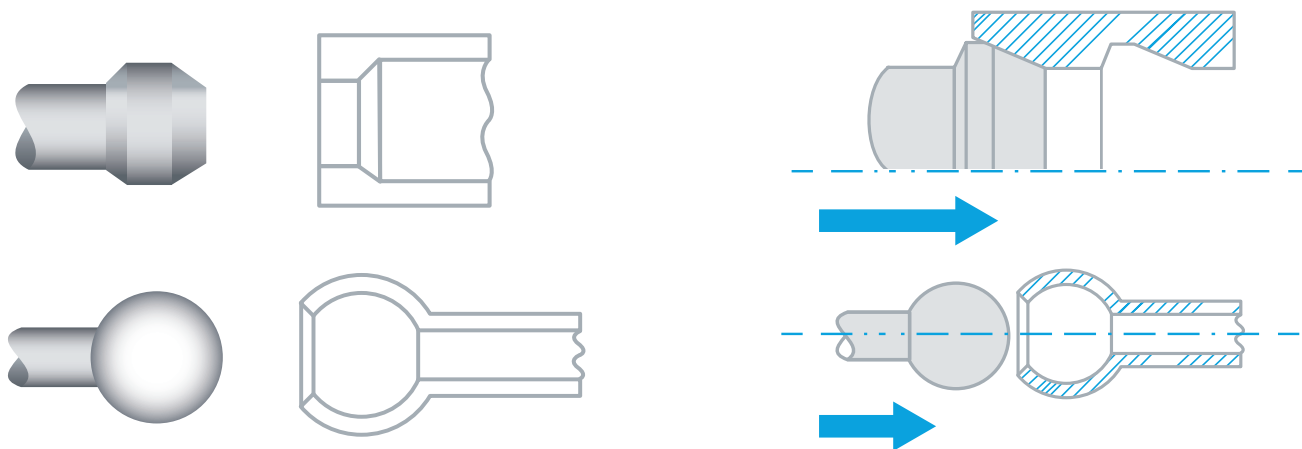


Rycina 6. Montaż zatrzasku ceownikowego

## Zatrząsk pierścieniowy

Zatrząsk pierścieniowy to metoda łączenia stosowana zwykle do połączenia dwóch części o kształcie cylindrycznym lub pierścieniowym lub dwóch obrotowo symetrycznych części, gdzie odkształcenie potrzebne do zmontowania lub zdemontowania zatrząsku występuje jednocześnie na całym pierścieniu (360°).

Ta metoda montażowa wymaga zaprojektowania jednej części z pierścieniowym/kulistym wpustem, a drugiej z łącznikiem, do którego wprowadza się wpust. Połączenie powstaje poprzez wciśnięcie wpustu do łącznika.

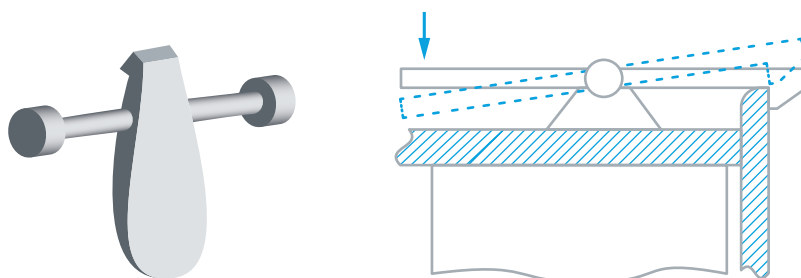


Rycina 7. Zatrząsk pierścieniowy

Rycina 8. Montaż zatrząsku pierścieniowego

## Zatrząsk skrętny

Zatrząsk skrętny to metoda montażu, w której punkt przegięcia mieści się w drążku skrętnym zamiast w samym korpusie zatrząsku. Po naciśnięciu drążka skrętnego następuje jego skręcenie i otwarcie połączenia.



Rycina 9. Zatrząsk skrętny

## Założenia projektowe

Jak wspomniano powyżej, zatrząsk wspornikowy to najczęściej stosowany typ zatrząsku. Projektując tego typu zatrząsk trzeba wypracować równowagę między stabilnością montażu i wytrzymałością belki zatrząsku.

Taki zatrząsk można aproksymować stosując uproszczenie ogólnej teorii zginania belki, która pozwala kontrolować wykonalność projektu zatrząsku. Takie podejście umożliwia wymodelowanie zatrząsku wspornikowego w postaci belki swobodnej z obciążeniem przykładanym punktowo na jednym końcu:



Rycina 10. Belka wspornika z obciążeniem przykładanym punktowo na jednym końcu

## Siła łączenia i naprężenie oddziałujące na belkę

Stabilność montażu zależy od siły (P) niezbędnej do zmontowania i zdemontowania zatrzasku. Jeśli do odgięcia belki zatrzasku nie trzeba dużej siły, to połączenie będzie słabe i niezdolne do utrzymania obydwu części. Z kolei w przypadku dużej siły zmontowane części będą stabilnie złączone, ale utrudnione będzie ich ewentualne demontowanie i ponowne montowanie.

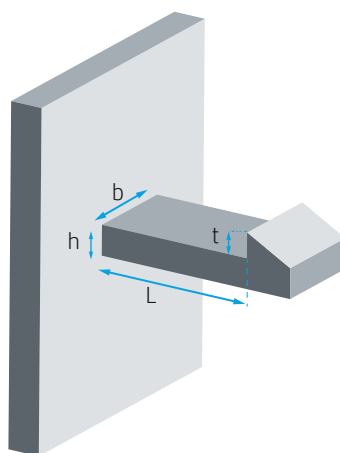
Ponadto, zatrzask musi być tak zaprojektowany, by wytrzymywał naprężenie ( $\sigma$ ) oddziałujące na belkę podczas jej wyginania w momencie przykładania siły łączącej (P), nie narażając przy tym samej konstrukcji zatrzasku i jego właściwości użytkowych.

Z tego względu podstawowymi założeniami, które wymagają uwzględnienia podczas projektowania zatrzasku wspornikowego są siła łącząca (P) i naprężenie belki ( $\sigma$ ), a zgodnie z teorią zginania belki zależą one od geometrii zatrzasku i jego materiału.

### Zależność od materiału i geometrii

Ze względu na bezpośrednią relację łączącą stabilność montażu i wytrzymałość zatrzasku materiał i geometria zatrzasku stanowią najistotniejsze parametry projektu, a często są zależne od dostępnej przestrzeni.

**Z tego względu podczas projektowania zatrzasku należy najpierw rozważyć dobór materiału i geometrii.**



Rycina 11. Geometria zatrzasku

Rozpatrując możliwe warianty geometrii i materiału zatrzasku (h, b, L, t) należy zdefiniować inne istotne czynniki:

- Wybór danej geometrii przekroju zatrzasku (h, b) pozwala projektantowi obliczyć moment bezwładności (I), który dla belki wspornika o przekroju prostokątnym oblicza się następująco:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

- Po wybraniu tworzywa kolejnym znanym parametrem jest moduł sprężystości (E), odczytywany z jego karty charakterystyki.



Iloczyn momentu bezwładności (I) i modułu sprężystości jest znany jako sztywność zginania belki (EI).

Zgodnie z teorią zginania belki te parametry, razem z materiałem i geometrią zatrzasku, są bezpośrednio powiązane z wymaganą siłą łączenia (P) i naprężeniem oddziałującym na belkę ( $\sigma$ ), jak widać poniżej:

- Ugięcie ( $y$ ) na końcu belki wspornika z obciążeniem przykładowym punktowo na jednym końcu:

$$y = \frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad (1)$$

- Maksymalne naprężenie ( $\sigma$ ) oddziałujące na belkę o jednorodnym przekroju prostokątnym:

$$\sigma = \frac{P \cdot L \cdot h}{2 \cdot I} \quad (2)$$

Minimalne ugięcie ( $y$ ) na końcu belki wspornika wymagane do zmontowania i zdemontowania zatrzasku jest zwykle znanym parametrem, zależnym od ograniczeń geometrycznych i dostępnej przestrzeni. Tak naprawdę jest ono definiowane przez głębokość ( $t$ ) zgrubienia na końcu zatrzasku:

- Minimalne ugięcie ( $y$ ) musi być co najmniej równe głębokości ( $t$ ) zgrubienia na zatrzasku, aby umożliwić prawidłowe montowanie i demontowanie.

$$y \geq t$$

- Większe zgrubienie daje mocniejsze połączenie montażowe, ale przy tym belka musi się mocniej ugiąć, co z kolei wymaga użycia większej siły łączącej ( $P$ ) - widocznej w równaniu (1) - i spowoduje, że na belkę oddziałuje większe naprężenie ( $\sigma$ ) - widoczne w równaniu (2).

## Obliczenia projektowe

Pierwszym krokiem do weryfikacji wykonalności projektu zatrzasku jest obliczenie niezbędnej siły łączącej ( $P$ ) i sprawdzenie, czy jest odpowiednia. Takie obliczenia wykonuje się rozwiązując równanie (1) z niewiadomą  $P$ :

$$P = \frac{3 \cdot E \cdot I \cdot y}{L^3} \quad (3)$$

Według równania (3) siła ( $P$ ) zależy od tego, jak bardzo musi się ugiąć ( $y$ ) belka zatrzasku, ale również od odporności materiału zatrzasku na odkształcenie zginające, znanej jako odporność belki na zginanie ( $k$ ) oraz jej funkcji sztywności zginania belki ( $EI$ ), długości ( $L$ ) belki i warunku brzegowego belki:

$$P = k \cdot y \quad (4)$$



Właściwa wartość siły łączącej ( $P$ ) nie powinna wykraczać poza zakres 50-100 N, co uznaje się za ergonomiczną wartość szacowanej średniej siły ludzkich palców.

Po obliczeniu siły łączącej ( $P$ ), jeśli jej wartość jest odpowiednia, drugim krokiem weryfikującym wykonalność zatrzasku jest obliczenie naprężenia ( $\sigma$ ) oddziałującego na belkę wspornika z wykorzystaniem równania (2).

Jeśli naprężenie belki ( $\sigma$ ) jest większe od granicy sprężystości materiału, to zatrzask się odkształci, przy czym część takiego odkształcenia będzie stała i nieodwracalna, co uniemożliwi pracę zatrzasku i ostatecznie doprowadzi do zerwania.

### **Naprężenie belki ( $\sigma$ ) < Granica sprężystości materiału (5)**

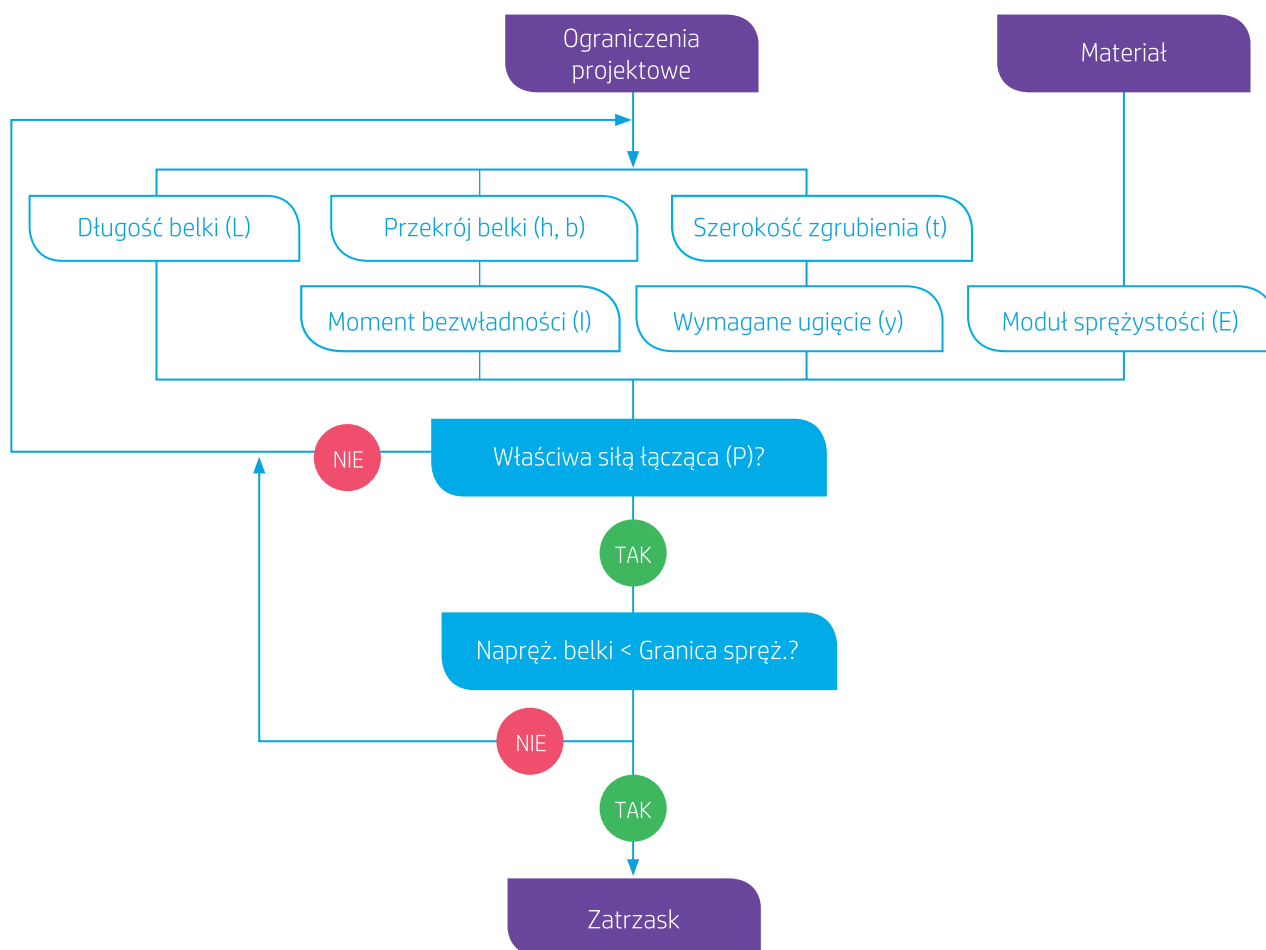
Biorąc pod uwagę, że granica sprężystości nie jest parametrem powszechnie umieszczanym w kartach charakterystyki tworzyw sztucznych, najlepiej jest obliczyć wytrzymałość zatrzasku stosując dopuszczalne odkształcenie materiału ( $\epsilon$ ) i moduł sprężystości ( $E$ ):

$$\text{Naprężenie belki } (\sigma) < E \cdot \epsilon \quad (6)$$

Aby uzyskać wartość dopuszczalnego odkształcenia materiału ( $\epsilon$ ), projektanci mogą wykorzystać zwykłe zalecenia dla innych procesów wytwórczych, np. formowania wtryskowego:

$$\text{Dopuszczalne odkształcenie } (\epsilon) < \frac{1}{3} \cdot \text{Wydłużenie materiału przy zerwaniu} \quad (7)$$

Wszystkie założenia projektowe przedstawiono w poniższym schemacie:



Rycina 12. Schemat blokowy procesu projektowania zatrząsku

	(Dopuszczalne) ugięcie			Siła uginająca
Typ projektu				
Kształt przekroju				
	$y = 0.67 \cdot \frac{\cdot L^2}{h}$	$y = 1.09 \cdot \frac{\cdot L^2}{h}$	$y = 0.86 \cdot \frac{\cdot L^2}{h}$	$P = \frac{bh^2}{6} \cdot \frac{E}{L}$
	Prostokąt			

Rycina 13. Równania obliczeniowe dla zatrząsku\*

\*Uwaga 1: Ugięcie belki (y) wyrażone za pomocą dopuszczalnego odkształcenia (ε) według równań (1), (2)

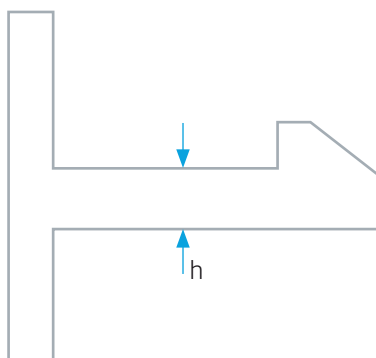
\*Uwaga 2: Siłą łączącą lub siłą uginającą (y) wyrażona za pomocą dopuszczalnego odkształcenia (ε) według równań (1), (2)

## Wytyczne dla projektowania

Przy projektowaniu zatrzasków z użyciem HP Multi Jet Fusion należy uwzględnić kilka zaleceń:

### Minimalna grubość (h)

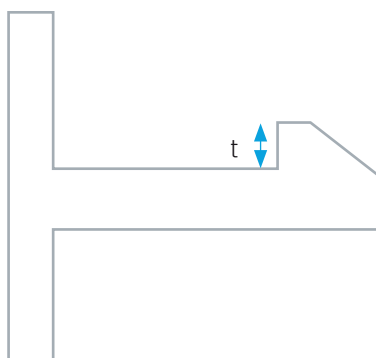
Minimalna zalecana średnica podstawy wspornika to 1 mm.



Rycina 14. Minimalna zalecana średnica podstawy wspornika

### Szerokość zgrubienia (t)

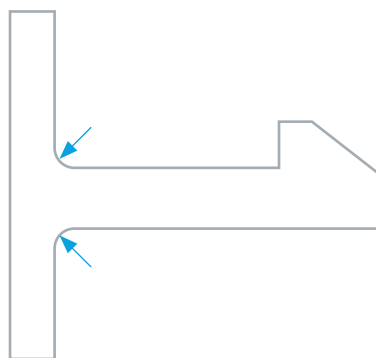
Minimalna szerokość zgrubienia (t) powinna wynosić 1 mm.



Rycina 15. Minimalna szerokość zgrubienia (t)

### Zalecany obustronny promień

Zaleca się określić obustronny promień kąta między belką a podstawą wspornika, aby nie dopuścić do powstania ostrych narożników i zmniejszyć koncentrację naprężeń. Ten promień powinien wynosić co najmniej połowę grubości (h) podstawy wspornika.



Rycina 16. Obustronny promień



## Zgrubienie zatrzasku

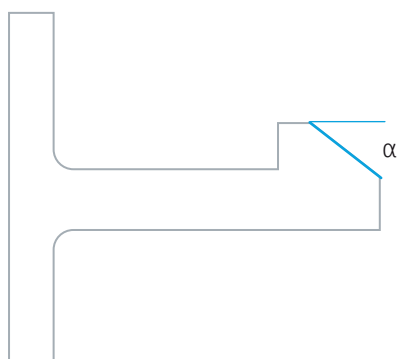
Zaleca się unikać stosowania ostrych krawędzi na końcu zgrubienia, umieszczając tam małe ścięcia, aby nie dopuścić do złamania podczas montowania.



Rycina 17. Zgrubienie zatrzasku

## Kąt montowania (zatrzaskiwania) ( $\alpha$ )

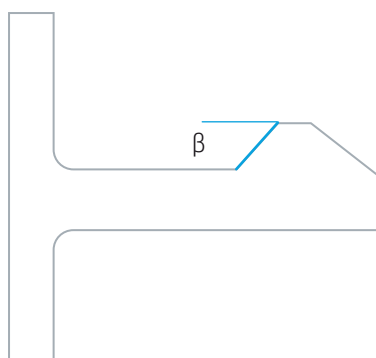
Jak wspomniano powyżej, zgrubienie zatrzasku zwykle ma delikatne ścięcie ułatwiające zatrzaskiwanie. Nachylenie tego ścięcia ( $\alpha$ ) bezpośrednio wpływa na siłę łączącą (P). Zmniejszenie tego kąta ( $\alpha$ ) oznacza również zmniejszenie siły łączącej (P). Zalecane wartości kąta montowania mieszczą się w zakresie 35-40°.



Rycina 18. Kąt montowania (zatrzaskiwania)

## Kąt demontowania (wyciągania) ( $\beta$ )

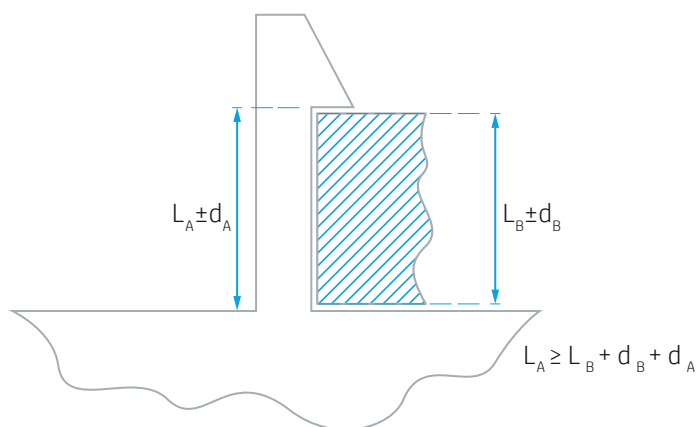
Metoda projektowania zgrubienia określa, czy zatrzask można montować i demontować wielokrotnie. Kąt demontowania (wyciągania) ( $\beta$ ) wpływa na łatwość demontowania łączenia. Na przykład, demontowanie jest niemożliwe pod kątem 90° ( $\beta$ ). Jednak zatrzask z kątem demontowania ( $\beta$ ) równym kątowi montowania ( $\alpha$ ) wymaga takiej samej siły łączącej (P) dla obydwu czynności.



Rycina 19. Kąt demontowania (wyciągania)

## Tolerancje między częściami

Projektując zatrzask należy pamiętać o odstępnie między wystającym elementem i rowkiem, aby zapewnić jego prawidłowe działanie, nawet przy tolerancji z najgorszego scenariusza jak na poniższej ilustracji:



Rycina 20. Tolerancje między częściami

## Zmiana siły łączącej (P)

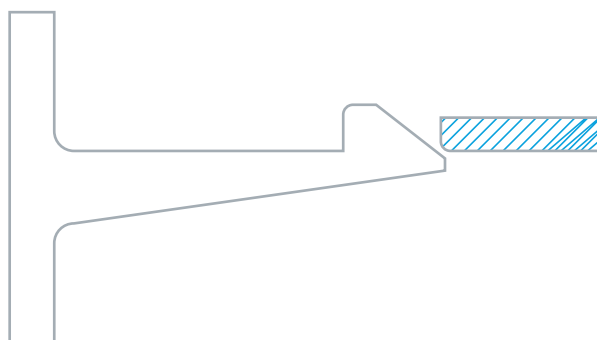
Czasem, już po wybraniu materiału i geometrii zatrzasku, wynikająca z nich siła łącząca (P) ma niepożądaną wartość. Na podstawie równania (3) i pamiętając, że podczas projektowania zatrzasku najbardziej ograniczające wartości tolerancji dotyczą długości (L) belki i szerokości (t) zgrubienia, to najczęstszym rozwiązaniem pozwalającym zmienić siłę łączącą (P) jest zmiana przekroju wspornika (h, b).



Zmniejszenie siły łączącej (P) oznacza również zmniejszenie naprężenia oddziałującego na belkę ( $\sigma$ ).

## Zwężana belka

Jedną z zalecanych zmian w przekroju zatrzasku jest zaprojektowanie zwężanej belki. Podczas gdy belka zatrzasku z jednorodnym przekrojem wykazuje nierówny rozkład odkształcenia i koncentruje naprężenie przy podstawie, to belka zwężana wykorzystuje mniej materiału i zapewnia bardziej równomierny rozkład odkształcenia na długości wspornika, redukując koncentrację naprężenia ( $\sigma$ ) oraz siłę montowania i demontowania (P).



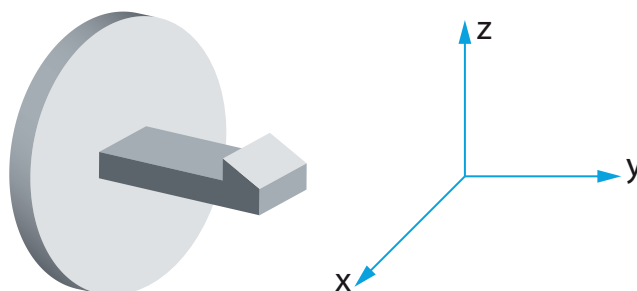
Rycina 21. Zwężana belka

## Kierunek drukowania

Podczas drukowania zatrzasku należy stosować zalecane ukierunkowanie, aby zapewnić odpowiednią dokładność i właściwości użytkowe.

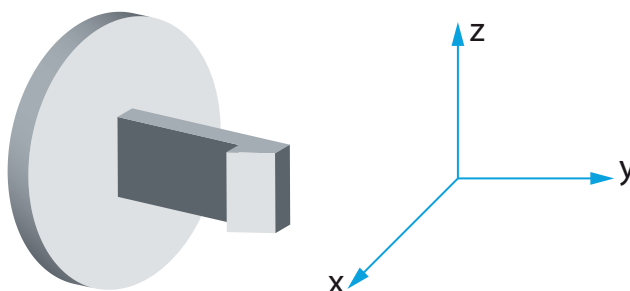
### W ciasnych zatrzaskach

Drukując ciasne zatrzaski, w których krytyczna jest długość belki (L), zaleca się ukierunkowanie w płaszczyźnie XY, aby zapewnić jak najlepszą dokładność i tym samym właściwości użytkowe.



Rycina 22. Ukierunkowanie w płaszczyźnie XY

Jeśli krytyczna jest szerokość zatrzasku (b), zaleca się ukierunkowanie w płaszczyźnie XZ lub YZ, aby zapewnić jak najlepszą dokładność i uniknąć zbyt dużych odstępów w płaszczyźnie XY, co mogło by powodować hałas i drgania.



Rycina 23. Ukierunkowanie w płaszczyźnie XZ lub YZ

## Rozwiązywanie problemów z drukowaniem

Drukowanie zatrzasku pochylonego lekko w osi X, Y lub Z może zmniejszyć prawdopodobieństwo wystąpienia typowych problemów przy drukowaniu.

## Zalecenia dla post-processingu

Technologia HP MJF pozwala stosować różne metody post-processingu, które mają wpływ na wykończenie drukowanej części. Choć większość metod post-processingu nie powinna wpływać na zatrzask drukowany w 3D, to jednak pewne automatyczne post-procesy mają pewien wpływ, np. bębnowanie (obróbka wibrościerna).

Obróbka wibrościerna polega na trafianiu wydrukowanego detalu 3D małymi granulkami ściernymi w celu zmniejszenia jego szorstkości. Ale proces może wpływać na niektóre wymiary i/lub małe elementy.

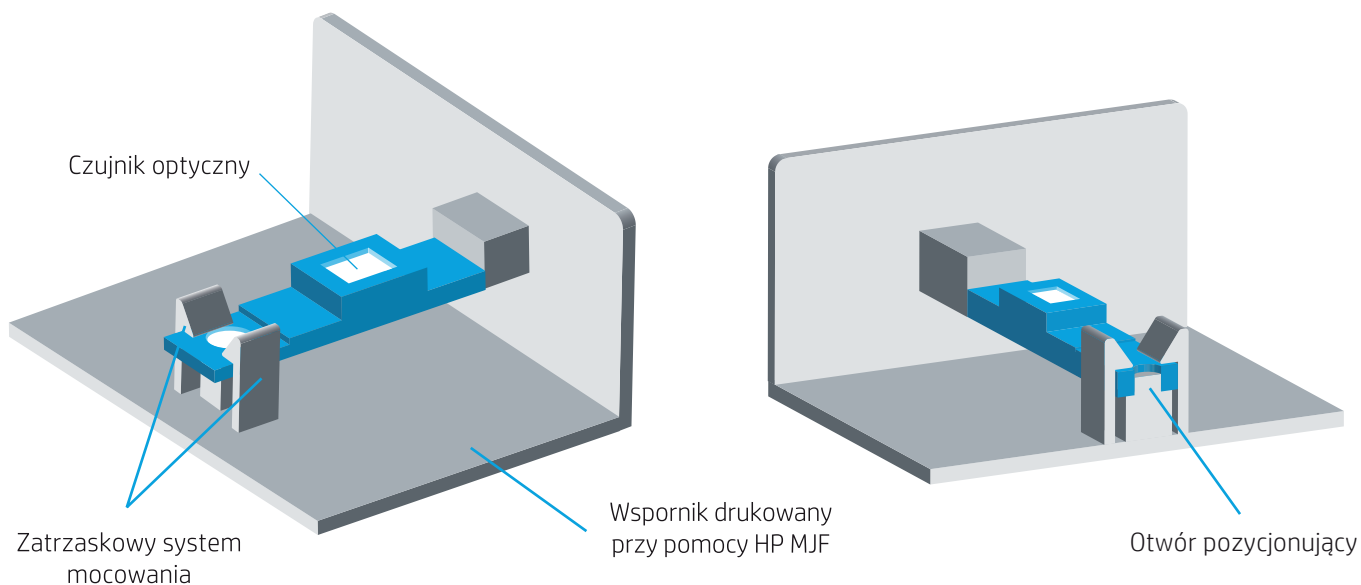
W przypadku zatrzasków proces bębnowania może zmniejszyć siłę łączącą (P) montowania, a nawet doprowadzić do zerwania, w zależności od geometrii zatrzasku.

Z tego względu, o ile konieczne jest stosowanie automatycznego post-processingu, zaleca się ochronę części skrzynią ze spiekanych materiałów, aby nie dopuścić do uszkodzeń.

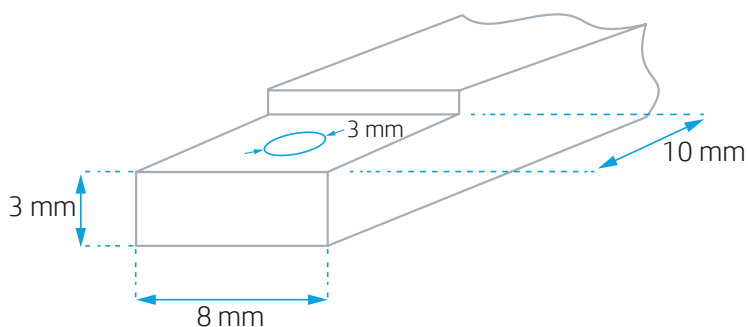
## Przykładowe obliczenia

Poniższa ilustracja przedstawia niezbędne obliczenia do zaprojektowania zatrzasku wspornikowego.

W tym konkretnym przypadku należy zaprojektować system mocowania dla czujnika optycznego:



Rycina 24. System mocowania czujnika optycznego

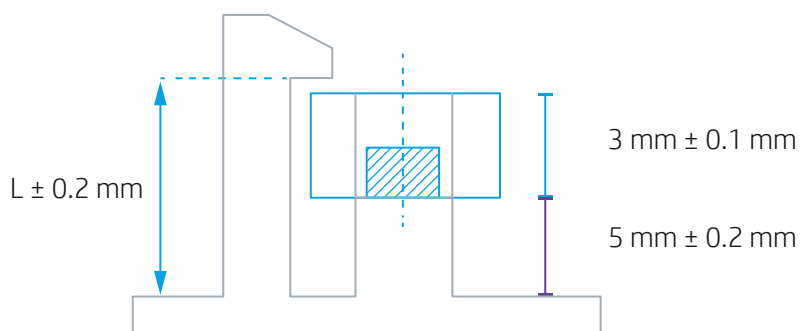


Rycina 25. Wymiary czujnika optycznego

Poniżej przedstawiono wymagania projektowe:

- Materiał użyty do wydrukowania części to HP 3D HR PA 12, mający moduł sprężystości (E) równy 1800 MPa.
- Ze względu na wymagania optyczne czujnik trzeba umieścić 5 mm nad podstawą. Dlatego całkowita długość zatrzasku musi uwzględnić tolerancję dla najgorszego scenariusza i wymagania optyczne:

$$L = 3 \text{ mm} + 0.1 \text{ mm} + 5 \text{ mm} + 0.2 \text{ mm} + 0.2 \text{ mm} = 8.5 \text{ mm}$$



Rycina 26. Obliczenie długości zatrzasku

- Ze względu na ograniczenia konstrukcyjne zatrzask nie może być zakładany na otwór pozycjonujący, a w związku z tym szerokość zgrubienia (t) musi wynosić od 1 mm - minimalna zalecana wartość - do 2,5 mm - maksymalny dopuszczalny dystans pozwalający uniknąć zetknięcia się zgrubienia zatrzasku i otworu pozycjonującego czujnika:

$$\text{Szerokość zgrubienia (t)} = y = 1 \text{ mm}$$

- Szerokość zatrzasku musi być mniejsza od 10 mm ze względu na ograniczenia geometrii:

$$b = 9.5 \text{ mm}$$

Po ostatecznym zdefiniowaniu geometrii i materiału zatrzasku (h, b, L, t) należy obliczyć siłę łączącą (P), aby stwierdzić, czy jest odpowiednia. Takie obliczenia wykonuje się rozwiązując równanie (3):

$$P = \frac{3 \cdot E \cdot I \cdot y}{L^3} = \frac{3 \cdot E \cdot (b \cdot h^3) \cdot y}{12 \cdot L^3} = \frac{3 \cdot 1800 \text{ MPa} \cdot 9.5 \text{ mm} \cdot (1.5 \text{ mm})^3 \cdot 1 \text{ mm}}{12 \cdot (8.5 \text{ mm})^3} = 23.49 \text{ N}$$

Obliczona wartość siły łączącej (P) mieści się w ergonomicznym przedziale wartości. Na podstawie równań (2) i (6) wykonuje się kolejny krok,

$$\sigma = \frac{P \cdot L \cdot h}{2 \cdot I} = E \cdot \varepsilon$$

$$\varepsilon = \frac{P \cdot L \cdot h}{2 \cdot I \cdot E} = \frac{12 \cdot P \cdot L \cdot h}{2 \cdot (b \cdot h^3) \cdot E} = \frac{12 \cdot P \cdot L}{2 \cdot (b \cdot h^2) \cdot E} = \frac{12 \cdot 23.49 \text{ N} \cdot 8.5 \text{ mm}}{2 \cdot (9.5 \text{ mm} \cdot (1.5 \text{ mm})^2) \cdot 1800 \text{ MPa}} = 0.03 = 3\%$$

Obliczone dopuszczalne odkształcenie ( $\varepsilon$ ) wskazuje, że zatrzask nie odkształca się podczas uginania przy przyłożonej sile łączącej (P) bez szkody dla jego konstrukcji i właściwości użytkowych.

# Zalecane formaty i rozdzielczości

## Projektowanie w HP MJF



### Wstęp

Przed wystaniem zlecenia do wydruku należy zamienić model 3D na format pliku kompatybilny z drukarkami 3D HP Jet Fusion.

Najczęściej używany w drukowaniu 3D format pliku to STL, pomimo faktu, że brakuje w nim podstawowych informacji o modelu 3D, takich jak kolor lub wskazanie jednostek odległości.

Z tego względu firma HP i inni liderzy technologii druku 3D wskazali potrzebę opracowania formatu pliku, który odpowiada na potrzeby aplikacji, usług i urządzeń w technologii druku 3D. Założono konsorcjum 3MF, którego celem jest opracowanie formatu 3MF, mającego spełniać wymogi branży druku 3D, a także zapewnić potencjał rozwojowy na przyszłość.

Ponadto, plik z rozszerzeniem 3MF będzie mieć mniejszy rozmiar w porównaniu do pliku STL dla danego modelu 3D i danej rozdzielczości.

### Kafelkowanie (tesselacja)

Aby zamienić model 3D na plik druku 3D, trzeba dokonać kafelkowania (tesselacji) modelu, co oznacza zamianę jego geometrii powierzchni na połączone ze sobą trójkąty.

Po przeprowadzeniu tesselacji modelu 3D jest on importowany do programu, który dzieli model 3D na plastry (warstwy) i przygotowuje do przesłania go do drukarki. Należy zwrócić uwagę na ten krok: Jeśli nie zostanie wykonany poprawnie, może być przyczyną problemów, np. niedokładności geometrycznej lub wolnego przetwarzania.

Typowy rozmiar pliku modelu 3D to 1-30 MB, ale zależy od rodzaju oprogramowania, w którym go utworzono, liczby trójkątów, a także poziomu i liczby detali (np. wyższa rozdzielczość oznacza więcej trójkątów, co zwiększy rozmiar pliku).

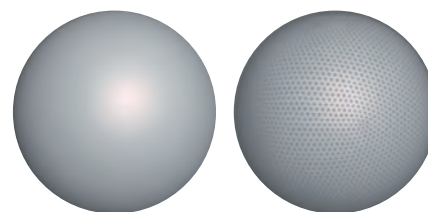
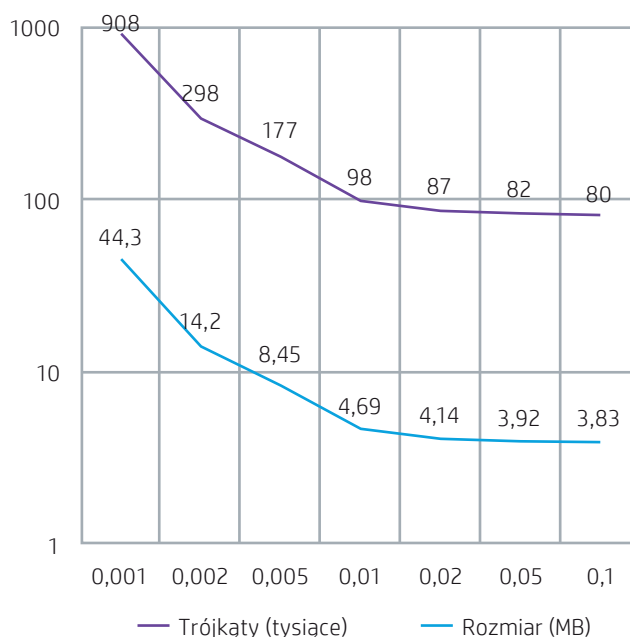


Figure 1. Example of tessellation



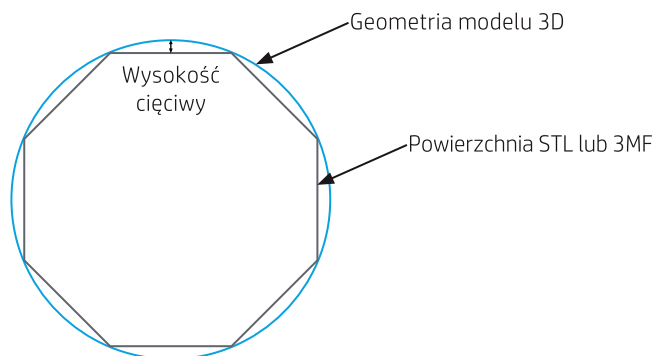
Rycina 2. Liczba trójkątów i rozmiar pliku / Dokładność eksportowania

## Eksportowanie modelu z CAD

Choć każda wersja oprogramowania CAD stosuje inną metodę do eksportowania modelu 3D do pliku STL lub 3MF, należy ręcznie wprowadzić niektóre parametry eksportowania, np. wysokość cięciwy odchyłki i tolerancję kąta, które definiują rozdzielczość i rozmiar pliku STL lub 3MF poprzez zmianę tolerancji w oprogramowaniu CAD.

### Wysokość cięciwy odchyłki

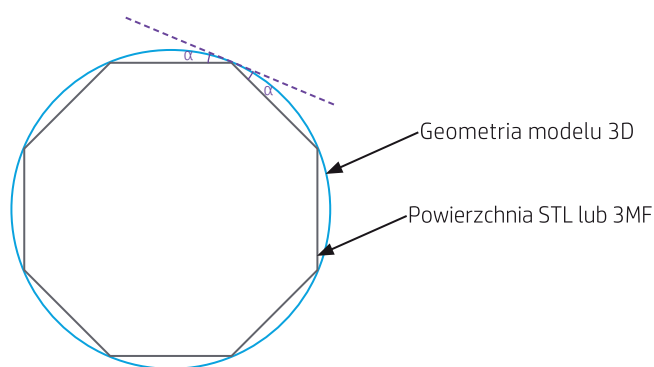
Długość cięciwy odchyłki to maksymalna odległość między geometrią modelu 3D i powierzchnią pliku STL lub 3MF. Zalecana wartość wysokości cięciwy to 0,05 mm. Niższa wysokość cięciwy odchyłki daje dokładniejszą powierzchnię.



Rycina 3. Długość cięciwy odchyłki

### Tolerancja kąta

Tolerancja kąta to maksymalny kąt między wektorami normalnymi sąsiadujących trójkątów. Zalecana wartość tolerancji kąta to 1°.



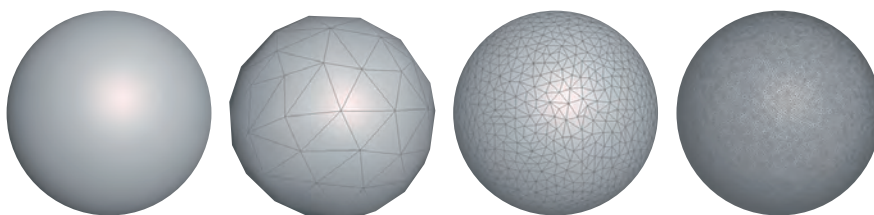
Rycina 4. Tolerancja kąta

## Błędy eksportowania

Nieoczekiwane wyniki takie jak niedokładność powierzchni (np. niezaplanowane otwory, niepołączone trójkąty, nakładające się trójkąty, małe skorupy, niewłaściwie obrócone trójkąty) lub słaba rozdzielczość należą do typowych błędów nieprawidłowego eksportowania pliku STL lub 3MF.

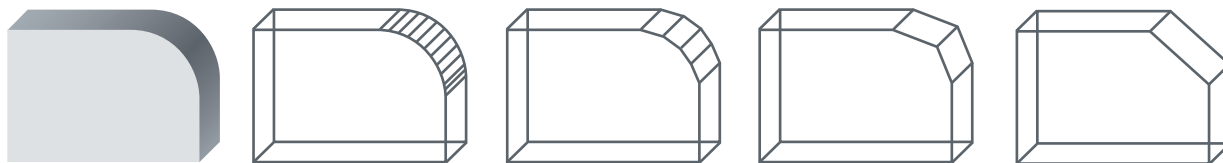
### Za dużo lub zbyt mało trójkątów

Choć siatka z większą liczbą trójkątów będzie zwykle dokładniejsza, to jednak zbyt duża liczba trójkątów utrudnia przetwarzanie, a po osiągnięciu pewnego rozmiaru kolejne trójkąty nie poprawiają już dokładności. Z tej przyczyny zbyt duża liczba trójkątów wydłuży czas przetwarzania, ale bez żadnych korzyści.



Rycina 5. Przykłady tesselacji (od lewej do prawej): Model 3D, tesselacja ze zbyt małą liczbą trójkątów, poprawna tesselacja, tesselacja ze zbyt dużą liczbą trójkątów

Z kolei zbyt mało trójkątów skutkuje słabą rozdzielczością. Triangulacja powierzchni powoduje podział powierzchni modelu 3D na fasety. Parametry eksportowania pliku STL lub 3MF regulują liczbę faset na powierzchni.



Rycina 6. Jakość eksportu zależy od projektu modelu 3D



Mała siatka niekoniecznie oznacza niższą jakość. Powierzchnie prostoliniowe dają bardzo wysoką jakość przy bardzo małej liczbie trójkątów. Niezbędna jakość eksportowania w dużym stopniu zależy od projektu.

## Naprawianie plików STL

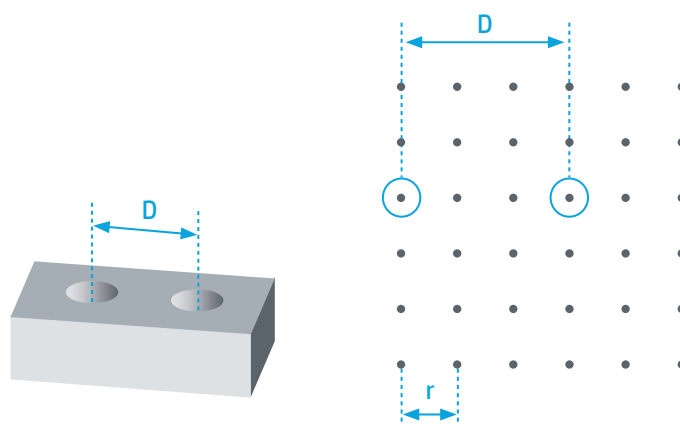
Zwykłe błędy można zwykle naprawić prawidłowo projektując i eksportując model 3D w programie CAD lub innym. Do naprawiania plików STL lub 3MF najczęściej stosuje się:

- Materialise Magics with Materialise Build Processor
- Autodesk® Netfabb® Engine
- HP SmartStream 3D Build Manager

## Wymiary w rozdzielczości drukarki

Najmniejsza kontrolowana objętość wydruku w technologii HP Multi Jet Fusion jest nazywana wokselem i to ona określa rozdzielczość.

Rozdzielczość wokselowa HP Multi Jet Fusion w osi Z wynosi 80 mikronów. Dlatego też należy zadbać o to, by krytyczne wymiary miały całkowitą liczbę wokseli: Efektem drukowania może być blok 3D o wielkości 160 lub 240 mikronów, natomiast nie można uzyskać takiego o wielkości 168,5 mikronów.



D= Funkcyjny wymiar krytyczny

r= Rozdzielczość drukarki

Rycina 7. Rozdzielczość drukarki



# Zalecenia ogólne dla procesów drukowania

## Dopasowanie procesu HP MJF do projektu



### Wstęp

Podczas pracy z technologią HP Multi Jet Fusion (MJF) należy stosować się do ogólnych zaleceń, które pozwalają zoptymalizować proces drukowania, zachować jak najdłuższą sprawność drukarki i osiągać pożądane wyniki.

### Założenia ogólne

Należy postępować zgodnie z poniższymi wskazówkami:

#### Sprzęt

- Temperatura robocza sprzętu powinna wynosić od 20°C do 30°C; nie należy dopuszczać do zbyt dużych wahań temperatury. Temperaturozbieżności spoza tego zakresu mogą niekorzystnie wpływać na jakość części.
- Wilgotność względna powinna wynosić 30-70%, aby drukarka pracowała optymalnie. W zależności od materiału czasem do przetworzenia może być konieczne zachowanie innego przedziału wilgotności. Na przykład, podczas korzystania z HP 3D HR PA 12 wilgotność powinna wynosić 50-70%. Warunki środowiskowe można sprawdzić na karcie charakterystyki tworzywa.
- Istotną jest też jakość linii zasilającej. Jeśli podejrzewa się, że zasilanie elektryczne w zakładzie może ulegać wahaniom, należy używać zasilacza UPS (Uninterrupted Power Supply)
- Wysokość umiejscowienia sprzętu powinna zależeć od położenia zakładu i drukarki. Błędny wybór może bezpośrednio wpływać na system chłodzenia i parametr ciśnienia.
- W podręczniku użytkownika opisano kluczowe kwestie związane z czyszczeniem, konserwacją i kalibracją.
- Należy sprawdzić, czy szyby okrywające lampy spajające i kamery cieplne są czyste.
- Należy też sprawdzić, czy skalibrowano poprawnie sterowanie parametrami cieplnymi drukarki i czy są one zgodne z poniższymi danymi:

**Kalibracja czujnika temperatury:** Ta kalibracja odpowiada za drobne przesunięcia górnego czujnika kamery temperatury. Jest potrzebna tylko przy nowych instalacjach i po wymianie kamery cieplnej.

**Kalibracja lamp spajających:** Ta kalibracja służy do korygowania odchyłek irradiancji i uzyskania prawidłowego statusu lamp. Zdecydowanie zaleca się wykonać tę kalibrację przy wilgotności względnej w zakresie 40-60% oraz kilkakrotnie sprawdzić odczyt wilgotności za pomocą zewnętrznego czujnika wilgotności. Ta kalibracja jest potrzebna tylko po wymianie lampy spajającej lub intensywnym czyszczeniu wypalonych punktów.

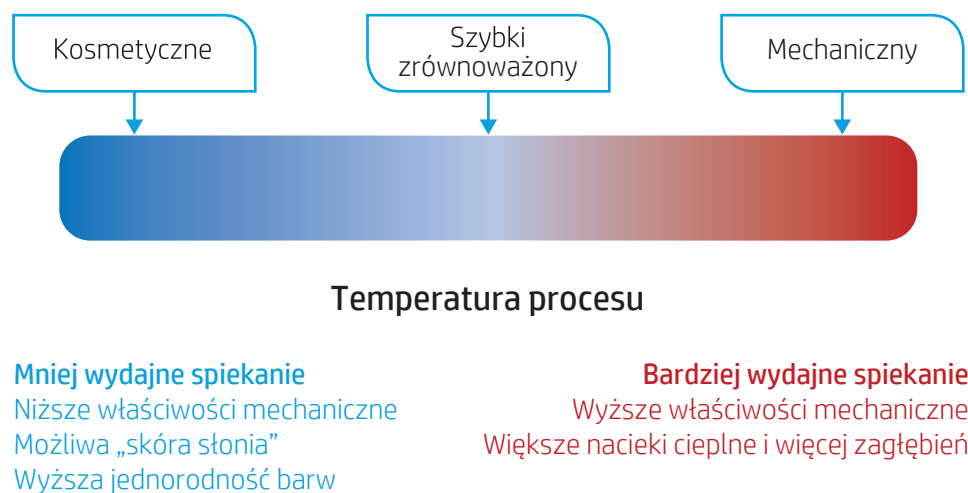
- Niektóre problemy mogą być efektem usterek głowicy drukującej, dlatego trzeba dbać o ich prawidłowe serwisowanie i ustawienie, a także o utrzymanie dysz w dobrym stanie.
- Nawet jeśli drukarka jest całkowicie czysta i skalibrowana, czasem trzeba dostroić poziom energii emitowanej przez lampy. W tym celu operator może zmodyfikować irradiancję lamp na podstawie oceny drukowanych próbek kontrolnych. Każdy profil druku wymaga określonej irradiancji lamp spajających. Wartość irradiancji można sprawdzić przed drukowaniem na przednim panelu.

#### Profile druku i materiały do drukowania

HP Multi Jet Fusion wykorzystuje w druku różnego rodzaju sproszkowane materiały, np. HP 3D HR PA 11 ("HP PA 11"), HP 3D HR PA 12 ("HP PA 12") i HP 3D HR PA 12 Glass Beads ("HP PA 12 GB").

Niektóre materiały, np. HP PA 11 i HP PA 12, mogą być drukowane z użyciem różnych profili druku, które stanowią przetestowane zestawy parametrów mające na celu maksymalizację określonych właściwości wyrobu gotowego, np. dokładności wymiarowej, wytrzymałości czy wyglądu.

Istnieje relacja - zachowywana w różnych materiałach - między energią, jaka jest dostarczana do części w trakcie drukowania i ich właściwościami mechanicznymi i wyglądem, co przedstawia Ryc. 1:

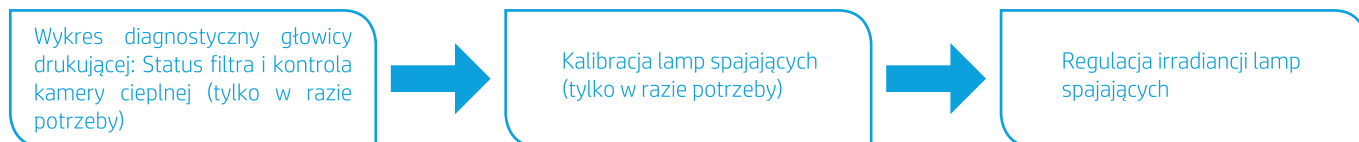


Rycina 1. Relacja między temperaturą procesu i zasadniczymi atrybutami części

Dlatego im gorętsza część, tym mocniejsze spiekanie proszku, a w rezultacie część jest gęstsza i ma mocniejsze właściwości. Jednak nadmiar ciepła może powodować przyleganie sąsiadującego proszku do powierzchni części (nacieki cieplne), a także więcej artefaktów wynikających z kurczenia cieplnego, np. zagłębień.

Po zimniejszej stronie skali te skutki są minimalizowane, co korzystnie wpływa na ogólny wygląd części, ale za cenę gorszych właściwości użytkowych i niejednorodnego kurczenia lokalnego.

Profile druku umieszcza się na tej skali w celach informacyjnych, ale o ich dokładnym położeniu decyduje zdolność do dostrojenia. Dostrojenie jest konieczne, aby wyśrodkować profile druku na optymalnych poziomach, odpowiednio do konkretnego zastosowania.



Rycina 2. Proces dostrajania

- Zlecenia o bardzo wysokiej gęstości pakowania, niezalecane proporcje mieszanki proszku i niewłaściwa konserwacja mogą być przyczyną problemów z jakością.
- Zaleca się stosować profile druku zrównoważonego (HP PA 11, HP PA 12 i HP PA 12 GB), które wymagają dwóch przejść na warstwę, aby zachować kompromis między wyglądem i odczuciem dotykowym, dokładnością wymiarową i właściwościami mechanicznymi. Kompromis w zakresie dokładności wymiarowej przy stosowaniu HP PA 11 występuje głównie w kierunku Z w odniesieniu do HP PA 12.

Zrównoważone profile druku z zastosowaniem HP PA 11 dają większe wydłużenie i udarność w porównaniu do HP PA 12, natomiast przy użyciu HP PA 12 GB dają wyższy moduł Younga przy niższym wydłużeniu.

HP PA 12 GB ma pojedynczy tryb druku bez konkretnej nazwy, ale należy go uznać za zrównoważony.



- Zaleca się używać mechaniczne profile druku (HP PA 11 i HP PA 12), które również wymagają dwóch przejść na warstwę, aby uzyskać najlepsze wydłużenie przy zerwaniu i udarność przy jednoczesnym zachowaniu wytrzymałości na rozciąganie, co nie występuje w zrównoważonych profilach druku.



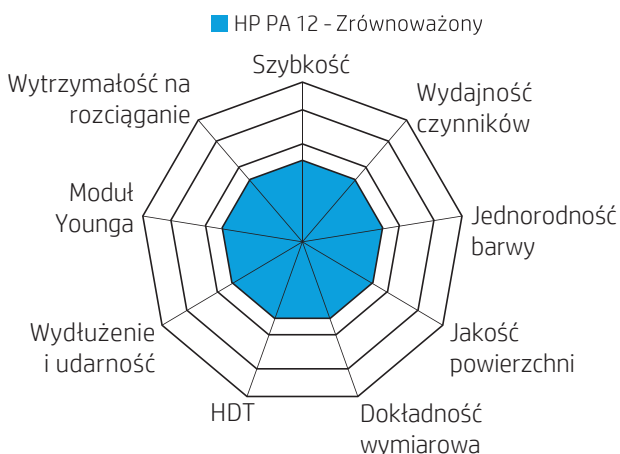
Szybkie profile druku z zastosowaniem HP PA 11 dają większe wydłużenie i udarność w porównaniu do HP PA 12.

- Profile szybkiego druku (HP PA 11 i HP PA 12) są zalecane w procesach, które wymagają redukcji czasu i kosztów, ponieważ stosuje się w nich o połowę mniej przejść drukujących używanych w trybach zrównoważonych (Balanced) i mechanicznych (Mechanical), a także mniejszą ilość płynnego środka. W obydwu przypadkach wytrzymałość na rozciąganie jest porównywalna do tej w ich trybach zrównoważonych, ale już wydłużenie przy zerwaniu jest niższe, zwłaszcza w kierunku Z. Ta wymiana jest mniej wyraźna w HP PA 11 niż w HP PA 12, ponieważ ogólne właściwości mechaniczne są wyższe we wszystkich profilach druku HP PA 11. Ponadto, profil druku szybkiego (Fast) zwykle daje dokładność liniową porównywalną ze zrównoważonym trybem HP PA 11, ale daje zmniejszone wypaczenie.

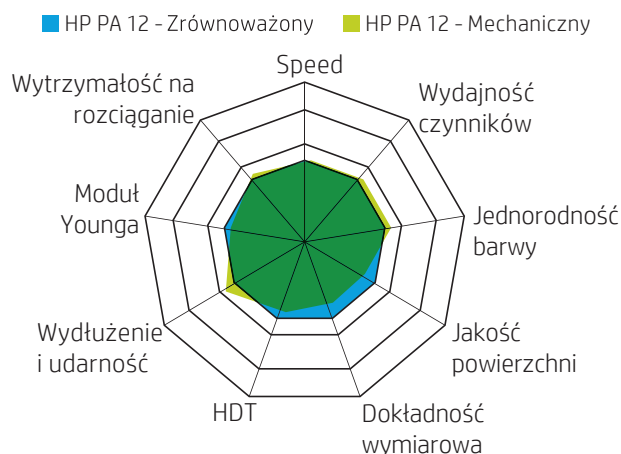
- Profil druku kosmetycznego jest dostępny tylko w HP PA 12 i ma na celu zmniejszenie częstości występowania geometrycznych artefaktów takich jak zagłębienia na górnej powierzchni części. Wymaga on dwóch przejść na warstwę.

Aby podkreślić różnice między bieżącymi profilami druku i materiałami, dokonuje się aproksymacji ich ogólnej charakterystyki, jak na Ryc. 3:

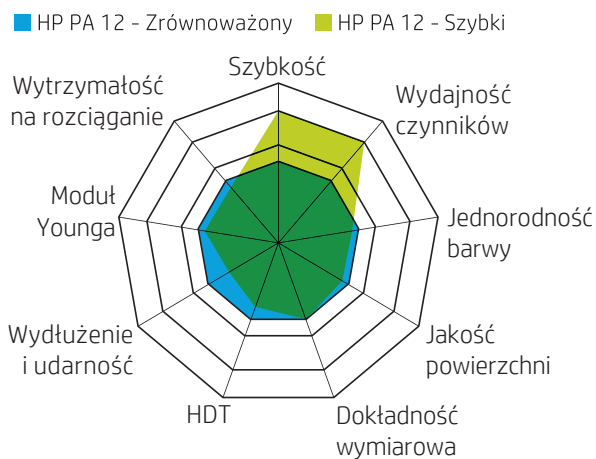
### HP PA 12 Tryb zrównoważony (Balanced)



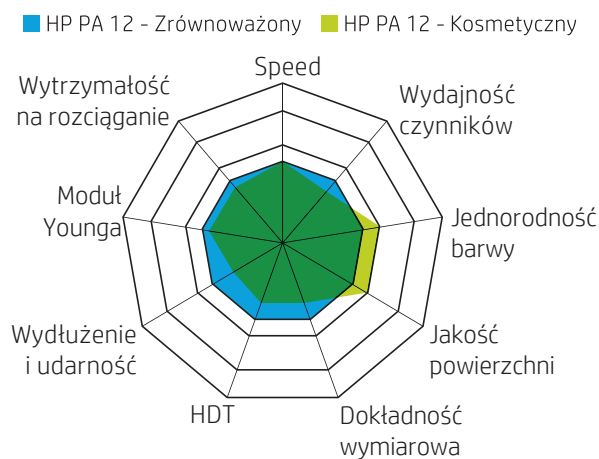
### HP PA 12 Tryb mechaniczny (Mechanical)



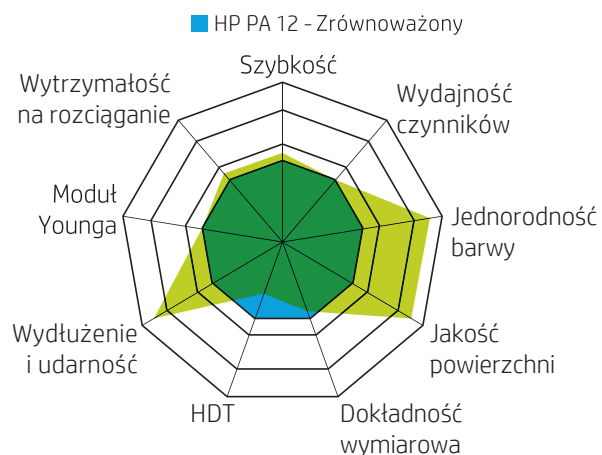
### HP PA 12 Tryb szybki (Fast)



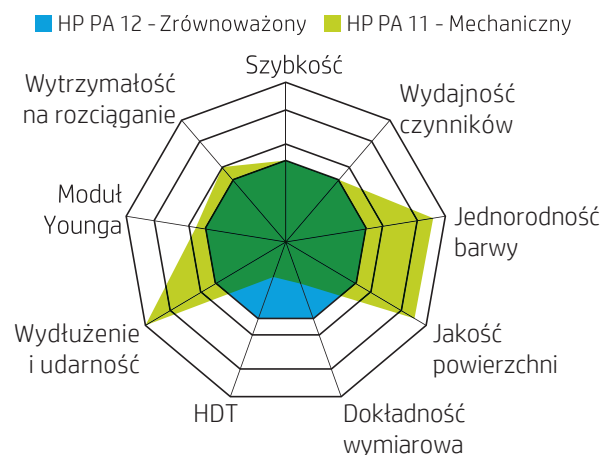
### HP PA 12 Cosmetic print mode



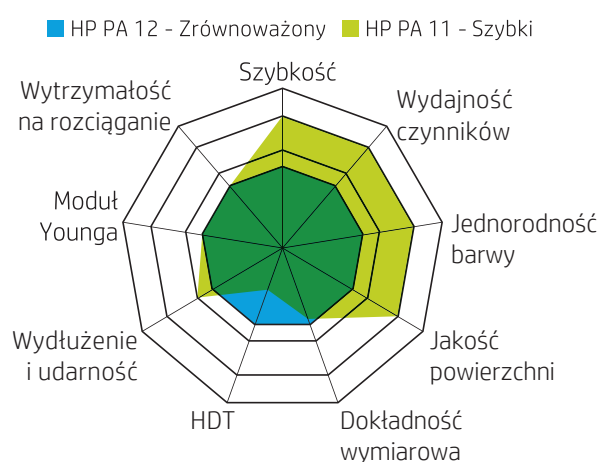
## HP PA 11 Tryb zrównoważony (Balanced)



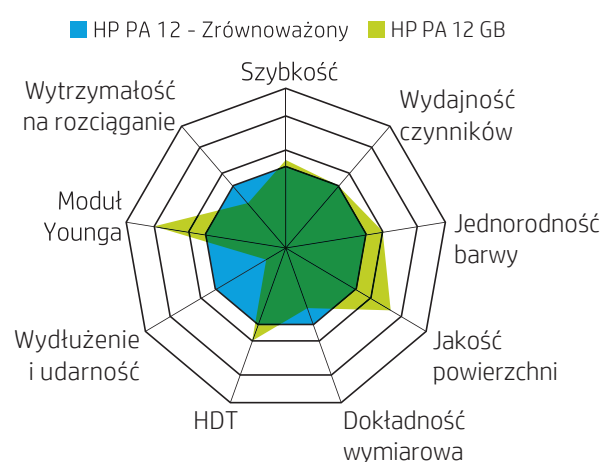
## HP PA 11 Tryb mechaniczny (Mechanical)



## HP PA 11 Tryb szybki (Fast)



## HP PA 12 Tryb GB



Rycina 3. Porównanie ogólnej charakterystyki dostępnych profili druku dla HP 3D HR PA 11, HP 3D HR PA 12 i HP 3D HR PA 12 GB. Szybkość oznacza całkowity czas drukowania pełnego pojemnika. Wydajność czynników oznacza ilość płynów wykorzystywaną z każdym pojemnikiem, przy czym wyższe wartości oznaczają niższe zużycie. Jednorodność barwy i jakość powierzchni odnoszą się do reprezentatywnych części ocenianych pod kątem znanych artefaktów (np. schodkowania, nacieków cieplnych itd.). Dokładność wymiarowa odnosi się do odchyłek drukowanych części w odniesieniu do plików cyfrowych, łącząc dokładność wymiarową i efekty kurczenia. Temperatura ugięcia (Heat Deflection Temperature, HDT) przy 1,82 MPa. Wydłużenie przy zerwaniu i udarność, moduł Younga i wytrzymałość na rozciąganie są mierzone według międzynarodowych norm.

# Drukowanie części precyzyjnych

## Dopasowanie procesu HP MJF do projektu



### Wstęp

W procesie drukowania mającym na celu maksymalizację dokładności należy rozpatrzyć kilka zaleceń.

### Optymalizacja dokładności wymiarowej

Aby zmaksymalizować dokładność, system musi pracować na poziomie wokseli, dostarczając odpowiednią ilość energii tak, by właściwie spoić zaplanowane fragmenty, warstwa po warstwie. W tym celu zaleca się pamiętać o poniższych kwestiach:

#### Profile druku i materiały do drukowania

- Zasadniczo, profile zrównoważone są zalecane do optymalizacji dokładności wymiarowej. Tryby szybkie (HP 3D HR PA 11 [„HP PA 11”] i HP 3D HR PA 12 [„HP PA 12”]) można uznać za mniej kosztowne alternatywy, pamiętając jednak o tym, że niższy koszt oznacza gorsze właściwości mechaniczne.
- W przypadku HP PA 11 lepiej jest używać profilu zrównoważonego, który wymiarowo jest podobny do HP PA 12 na płaszczyźnie XY, ale daje lepszą wymianę właściwości w odniesieniu do osi Z.
- Jeśli ewentualne wypaczenie jest głównym problemem, to zaleca się przejść z druku zrównoważonego (HP PA 11) do szybkiego (HP PA 11).
- Przy cienkich i długich częściach, w których płaskość jest krytycznym czynnikiem, należy rozważyć stosowanie HP PA 12 lub HP 3D HR PA 12 Glass Beads („HP PA 12 GB”), ponieważ HP PA 11 daje większe potencjalne wypaczenie. Jeśli wybrano HP PA 11, to zaleca się korzystać z druku szybkiego.

#### Rozmieszczenie platformy konstrukcyjnej i proces druku

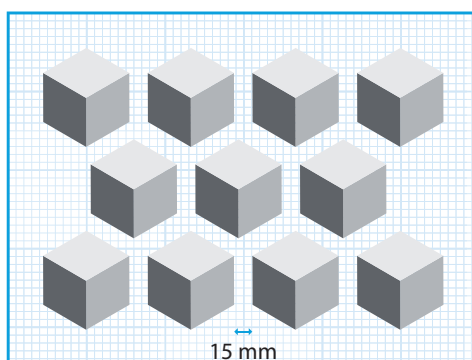
- Należy ukierunkować każdą część rozmieszczając jej krytyczne elementy na poziomej płaszczyźnie XY, ponieważ w ten sposób rozdzielczość będzie najwyższa.
- Małe elementy (kołki, otwory i cienkie ściany) należy umieszczać do góry nogami na płaszczyźnie XY, aby poprawić ich wygląd, wrażenia dotykowe i wytrzymałość. Dotyczy to również wypukłego tekstu, który należy drukować na płaszczyźnie XY, aby uzyskać maksymalną rozdzielczość.
- Tekst tłoczony wklęsły daje jednak lepszą wyrazistość, gdy jest drukowany wierzchem do góry.





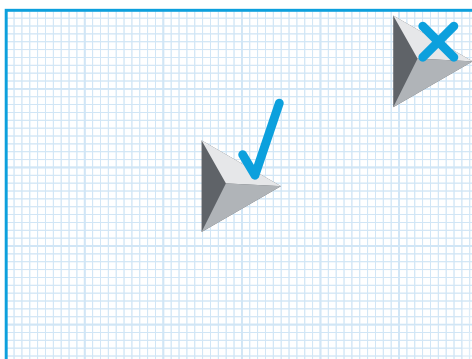
Rycina 1. Zalecane ukierunkowanie tekstu tłoczonego wypukłego (wierzchem do dołu) i wklęsłego (wierzchem do góry) na częściach HP Multi Jet Fusion

- Zalecana minimalna odległość między częściami to 5 mm, a idealna odległość między częściami i marginesami objętości konstrukcyjnej jest w zakresie 10–20 mm.
- Zaleca się pozostawiać odpowiednio dużo miejsca między gęstymi częściami lub częściami o ściankach o grubości większej niż 15 mm. Ta odległość powinna wynosić powyżej 10 mm.



Rycina 2. Zalecana odległość między gęstymi częściami

- Zaleca się umieszczać części o wysokich wymaganiach w zakresie wymiarów w pozycji wyśrodkowanej, zwłaszcza na osi Z, oraz możliwie jak najniżej na platformie drukowania.
- Zaleca się rozmieszczać części możliwie jak najbardziej równomiernie na płaszczyźnie XY, aby ułatwić pochłanianie energii na całej formie drukarskiej.



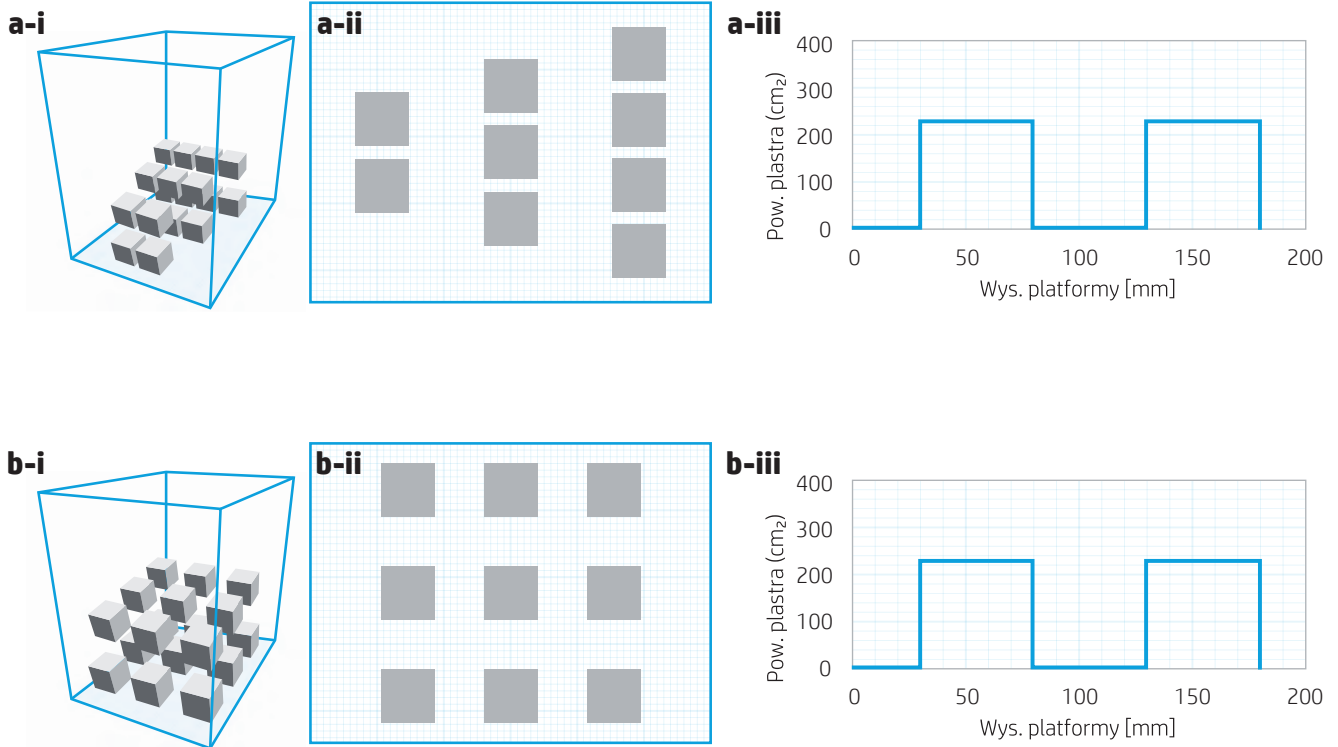
Rycina 3. Zalecane rozmieszczenie części

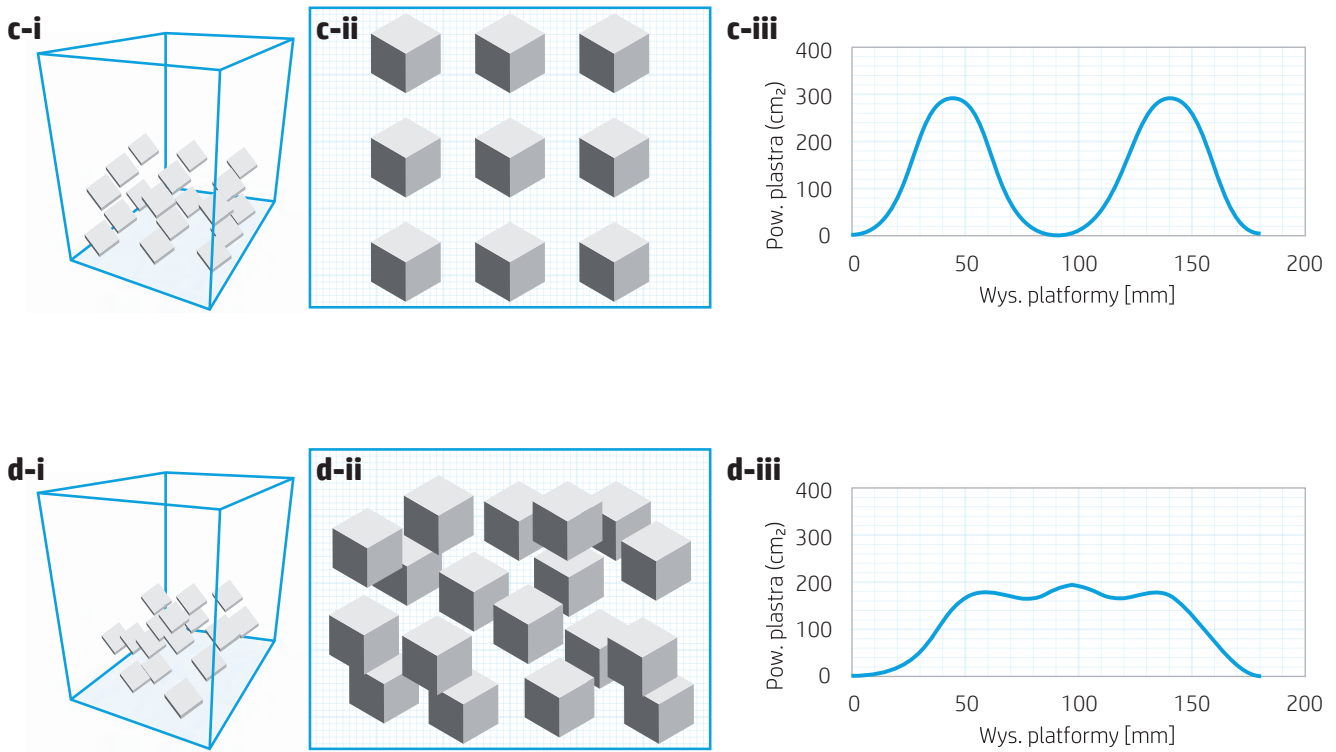
- Zaleca się nie tylko umieszczać części na płaszczyźnie XY, ale też w pojemniku, aby nie dopuścić do drastycznych zmian powierzchni drukowanej w każdej warstwie w kierunku Z.



Informacje o rozkładzie drukowanej powierzchni są podane w niektórych programach typu Materialise Magics.

- Dobrym kompromisem między wydajnością i jakością części jest gęstość pakowania w zakresie 8-12%. Jednak tę wartość można modyfikować w zależności od wymogów danego zastosowania.





Rycina 4. Powierzchnia drukowania w danej warstwie (prawa kolumna) stanowi wskaźnik jednorodności w kierunku Z, który pozwala uniknąć dużych różnic w pochłanianiu energii przez części. a) Przykład niezalecanej konfiguracji zlecenia wykazującej niejednorodność w trzech wymiarach. b) Zlecenie, które jest jednorodne w płaszczyźnie XY, ale wykazuje wyraźny i problematyczny odstęp w osi Z. c) Odstęp w osi Z jest łagodniejszy po obróceniu sześcianów, aby nie dopuścić do wystąpienia dużych powierzchni w ostatnich drukowanych warstwach. d) Za pomocą automatycznego pakowania rozkład powierzchni drukowanych jest jeszcze bardziej równomierny, co minimalizuje niekorzystne efekty cieplne. To jest zalecana konfiguracja.

## Potencjalne wypaczenie

- Gdy potencjalne wypaczenie może stanowić pewien problem - zwłaszcza w przypadku dużych, cienkich i płaskich części - zaleca się umieszczać części równolegle do płaszczyzny XY.
- Długie części należy umieszczać wzdłuż osi Y, aby jeszcze bardziej zmniejszyć gradient cieplny, ponieważ jest to kierunek ruchu wózka podczas drukowania.
- Drukując części podatne na wypaczenie zaleca się umieszczać je możliwie jak najbardziej wyśrodkowane i możliwie jak najniżej na platformie. Umożliwia to ich wolniejsze schładzanie, co zmniejsza prawdopodobieństwo wypaczenia.
- Zaleca się drukować krótsze zlecenia, aby minimalizować wysokość w osi Z - liczba warstw - co pozwala na szybsze etapy drukowania i chłodzenia.
- Zaleca się unikać szybkiego schładzania części podatnych na wypaczenie.

Należy pamiętać, że cienki poliamidowe części nie są zbyt sztywne, co oznacza, że części najbardziej wypaczone można bez wielkich nakładów ukształtować ponownie, po ich zamontowaniu w wyznaczonym miejscu.

Dodatkowa obróbka cieplna umożliwia dopasowanie materiału do innego kształtu już po jego wydrukowaniu, dzięki czemu można sprecyzować kształt części gotowych.





## Części gęste

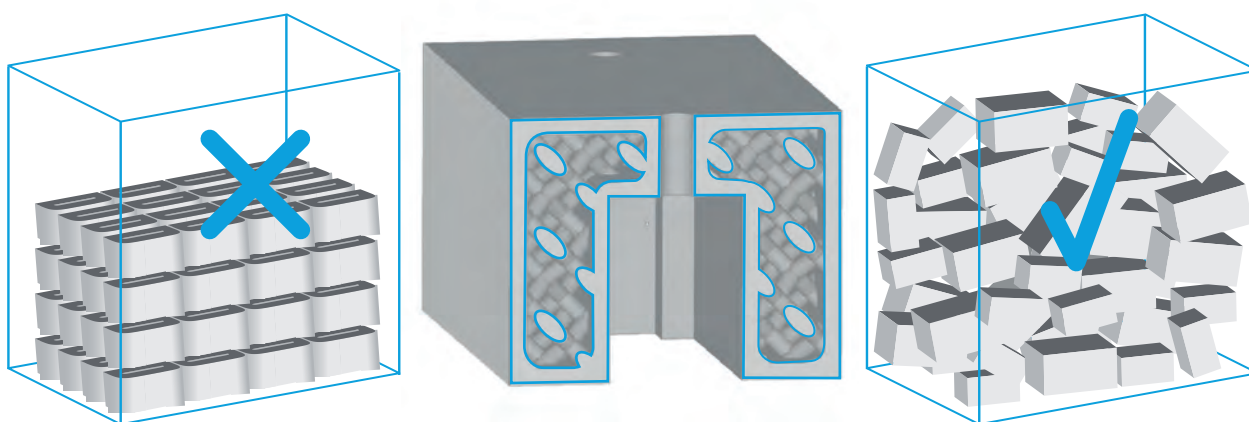
Gęste części to te o dużej masie i małej objętości, dzięki czemu mają one mniej ubytków i ściany o grubości maksymalnie 15-20 mm.

- Korzystne ukierunkowanie jest bardzo ważne dla części, które nie mają jednolicie rozłożonej masy. Zaleca się drukować je pod kątem i nie wzdłuż krawędzi macierzy wzorów, aby ułatwić rozpraszanie ciepła podczas drukowania.
- Należy się upewnić, że części są od siebie odsunięte (> 10-15 mm) i że gęstość pakowania nie wykracza poza zalecany przedział.



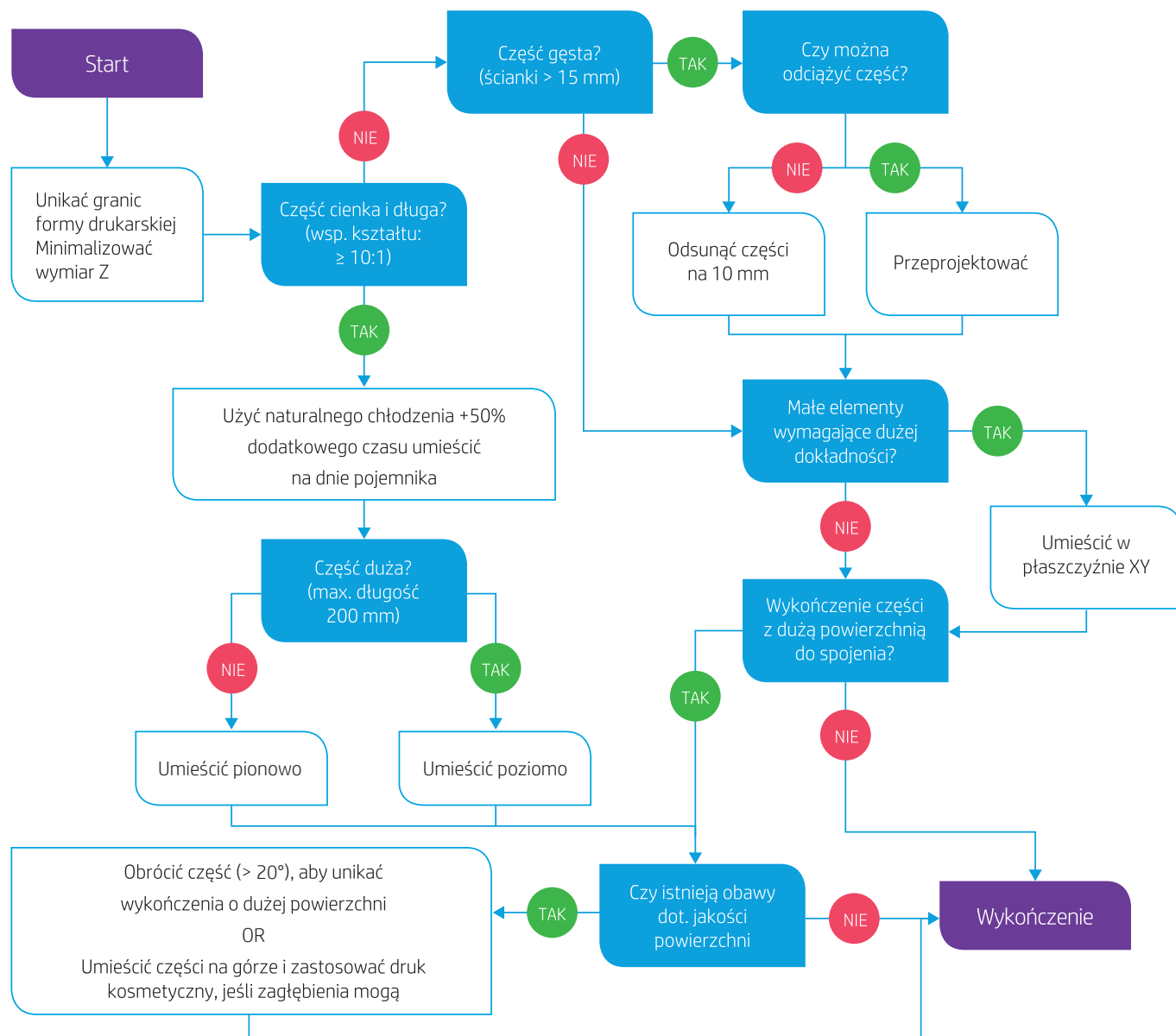
Aby zmniejszyć gęstość pakowania, należy zmniejszyć masę obiektów poprzez ich wydrążenie lub wykonanie wewnętrznej kratownicy.

- Zlecenia druku o wysokiej gęstości pakowania dla gęstych części mogą skutkować pogorszeniem się jakości druku i finalnie wpływać na możliwość ponownego wykorzystania proszku, a zatem i koszt.



Rycina 5. Po lewej: Projekt tego zlecenia jest niezalecany ze względu na zbyt dużą gęstość pakowania, gęste części, konfigurację macierzy i płaskie ukierunkowanie. W środku Fragment części gęstej, która została odciążona przez zastosowanie wewnętrznej kratownicy Po prawej: Zalecana konfiguracja zlecenia druku z odciążonymi częściami i zwiększonym odsunięciem części, przechylnym ukierunkowaniem i większą liczbą stopni swobody podczas automatycznego pakowania

Te zalecenia podsumowano w poniższym schemacie, który można wykorzystać jako wskazówki do maksymalizacji dokładności wymiarowej części drukowanych w technologii HP MJF:



Rycina 6. Schemat blokowy dokładności wymiarowej

## Przykłady dokładności wymiarowej

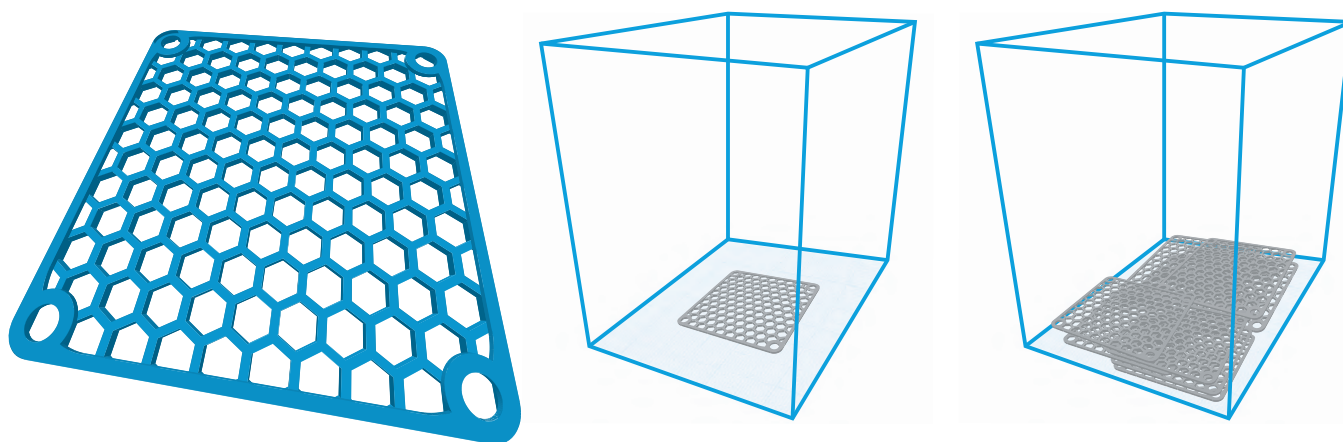
### Płyta komorowa („plaster miodu”)

Poniższy przykład obejmuje drukowanie płyty komorowej w celu maksymalizacji dokładności wymiarowej. Ta część jest bardzo podobna do dużej, płaskiej płaszczyzny, a zatem obiekt jest umiarkowanie podatny na wypaczenie. Jednak w wyniku zastosowania lekkiej konstrukcji komorowej takie odkształcenie nie jest tak poważne jak w przypadku pełnej płyty.

Maksymalizacja dokładności i krągłości otworów pozycjonujących jest możliwa dzięki takiemu ukierunkowaniu części, by te elementy zawierały się w płaszczyźnie XY. Takie ukierunkowanie minimalizuje wysokość części, co jest zgodne z zaleceniami pozwalającymi zmniejszyć wypaczenie i wyginanie.

Aby zachować płaskość części, należy ją wyśrodkować na platformie, umieścić w dolnej ćwiartce i zastosować wolne chłodzenie (Slow Cooling) (50% dłuższe niż standardowe)

Należy pamiętać, że umieszczając część płasko można wywołać efekt kapilarności na jej górnej powierzchni, zatem należy ją lekko przechylić, jeśli uniknięcie takiego efektu jest ważniejsze od uzyskania maksymalnej dokładności wykonania otworów. Taka wymiana właściwości jest mniej wyraźna w częściach z HP PA 12 GB i HP PA 11 w profilach druku szybkiego i zrównoważonego, co daje podobną dokładność przy zmniejszonej kapilarności i wygładzonej górnej powierzchni.



Rycina 7. Płyta komorowa (po lewej) ukierunkowana tak, by maksymalizować dokładność wymiarową i minimalizować wypaczenie. Krytyczne elementy takie jak otwory pozycjonujące zawiera się w płaszczyźnie XY (w środku). Po prawej: Pojemnik z 10 płytami o takim samym ukierunkowaniu

Jak widać na powyższej ilustracji, w zbiorczym scenariuszu, gdzie potrzeba kilku płyt tego rodzaju, zalecenia są następujące:

- Drukować pojemniki o małej wysokości (stosując różne jednostki konstrukcyjne).
- Wyśrodkować części możliwie jak najbardziej.
- Upewnić się, że na każdym poziomie drukowana jest zbliżona liczba części. W przykładzie są albo dwie części albo nie ma żadnej.
- Wymieszać części tak, by nie były ustawione w szeregu wzdłuż tych samych współrzędnych XY. To pozwala na rozproszczenie obciążenia na większej liczbie głowic drukujących, co przedłuża ich okres eksploatacji.
- Stosować wydłużone chłodzenie naturalne.

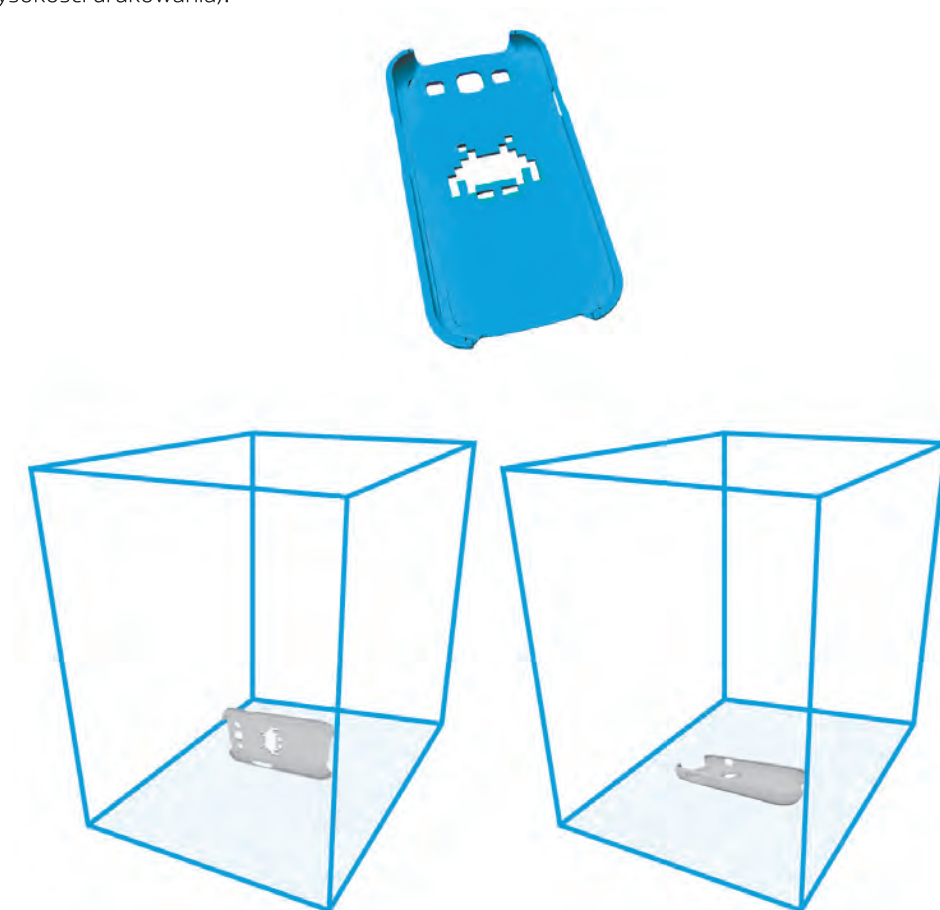
### Etui na telefon

Poniższy przykład obejmuje etui na telefon, które nie wymaga dużej dokładności, ale niewłaściwe ukierunkowanie będzie skutkowało wypaczeniem i wyginaniem. Jest to część płaska i cienka, którą można uznać za małą, a zatem warto ukierunkować ją prostopadle do płaszczyzny XY, kładąc ją na boku równoległe do osi Y.

Przy tym ukierunkowaniu każda warstwa jest drukowana bardzo szybko, a jej wysokość jest ciągle na tyle niewielka, by zachować jednorodność cieplną. Aby zminimalizować wypaczenie, części należy umieszczać możliwie jak najbliżej środka, zlecenia powinny być niskie (o małej wysokości druku), a także należy unikać szybkiego chłodzenia.

Jednak te zalecenia dotyczą głównie HP PA 12, HP PA 12 GB i druku szybkiego z użyciem HP PA 11, ponieważ w tych konfiguracjach efekt wyginania nie oddziałuje zbyt mocno, jeśli części są drukowane z dala od ścian.

Druk mechaniczny i zrównoważony z użyciem HP PA 11 może wykazywać tendencje do wyginania, zatem warto wtedy rozważyć alternatywne ukierunkowanie. W takich przypadkach części należy umieszczać płasko na płaszczyźnie XY, podobnie jak większe obiekty. Nadal obowiązują pozostałe wytyczne, jak korzystanie z wydłużonego chłodzenia naturalnego i stosowanie zleceń niskich (o małej wysokości drukowania).



*Rycina 8. Po lewej: Drukowane etui na telefon. W środku Sugerowane ukierunkowanie pozwalające minimalizować wypaczenie, gdy występuje niskie prawdopodobieństwo wyginania. Po prawej: Alternatywne ukierunkowanie minimalizujące efekt wyginania, ale nadal umożliwiające zmniejszenie wypaczenia*

# Drukowanie części estetycznych

## Dostrajanie technologii HP MJF do projektu



### Wstęp

Aby zapewnić jak najlepszy wygląd i odczucia dotykowe części z drukarki 3D, należy rozważyć ukierunkowanie i rozmieszczenie części na platformie konstrukcyjnej, a także odpowiedni profil druku i stosowany materiał. Zaleca się również unikać sytuacji, gdzie takie elementy są wystawione w trakcie drukowania na zbyt duże lub niejednorodnie oddziałujące ciepło.

### Optymalizacja wyglądu i wrażeń dotykowych

#### Profile druku i materiały do drukowania

- Jeśli jest to możliwe z planowanym materiałem, należy użyć druku kosmetycznego, by maksymalnie ulepszyć wygląd i wrażenia dotykowe.
- Można też rozważyć użycie HP 3D HR PA 11 ("HP PA 11") w druku szybkim lub zrównoważonym, aby uzyskać mniej defektów jakości. HP 3D HR PA 12 Glass Beads ("HP PA 12 GB") również obniża prawdopodobieństwo wystąpienia niedoskonałości, ale przy użyciu HP 3D HR PA 12 (HP PA 12) różnica jest mniej wyraźna niż przy HP PA 11.
- Skupiając się na wyglądzie części nie należy korzystać z druku mechanicznego lub niedostrojonych profili zrównoważonych.



Rycina 1. Wygląd i wrażenia dotykowe dwóch identycznych części drukowanych w profilu zrównoważonym z HP PA 12 (po lewej) i mechanicznym z HP PA 11 (po prawej)

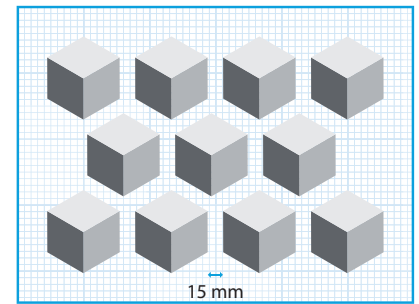
#### Rozmieszczenie platformy konstrukcyjnej i proces druku

- Małe elementy (kotki, otwory i cienkie ściany) należy umieszczać do góry nogami na płaszczyźnie XY, aby poprawić ich wygląd, wrażenia dotykowe i wytrzymałość. Dotyczy to również wypukłego tekstu, który należy drukować na płaszczyźnie XY, aby uzyskać maksymalną rozdzielczość.
- Tekst tłoczony wkłęsły daje jednak lepszą wyrazistość, gdy jest drukowany wierzchem do góry.
- Zaleca się unikać skierowanych wierzchem do góry kątów o wartości poniżej 20° między dużymi, płaskimi powierzchniami i płaszczyzną XY.
- Powierzchnie skierowane w dół są zwykle wyłączone ze schodkowania, o ile są ukierunkowane przy użyciu kątów w zakresie 5-10°.

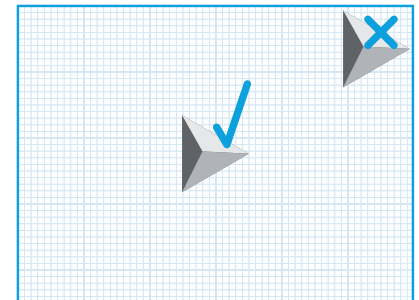


Rycina 2. Strategie ukierunkowania dla części z zakrzywionymi powierzchniami pozwalające zminimalizować nadmierną dyskretyzację warstw w wyglądzie

- Zalecana minimalna odległość między częściami to 5 mm, a idealna odległość między częściami i marginesami objętości konstrukcyjnej to 10–20 mm.
- Zaleca się pozostawiać odpowiednio dużo miejsca między gęstymi częściami lub częściami o ściankach o grubości większej niż 15 mm. Zwykle ta odległość powinna wynosić powyżej 10 mm.
- Nie należy umieszczać części gęstych w pobliżu ścian komory konstrukcyjnej, ponieważ te artefakty zwykle wpływają głównie na ostatnią drukowaną warstwę. Dlatego zaleca się obrócić część tak, aby górne warstwy miały zmniejszony przekrój, co pozwala możliwie w jak największym stopniu unikać płaskich obszarów.
- Zaleca się rozmieszczać części możliwie jak najbardziej równomiernie na płaszczyźnie XY, aby ułatwić pochłanianie
- Umieszczać części w pojemniku, aby nie dopuścić do drastycznych zmian w obszarach drukowanych w każdej warstwie w kierunku Z.



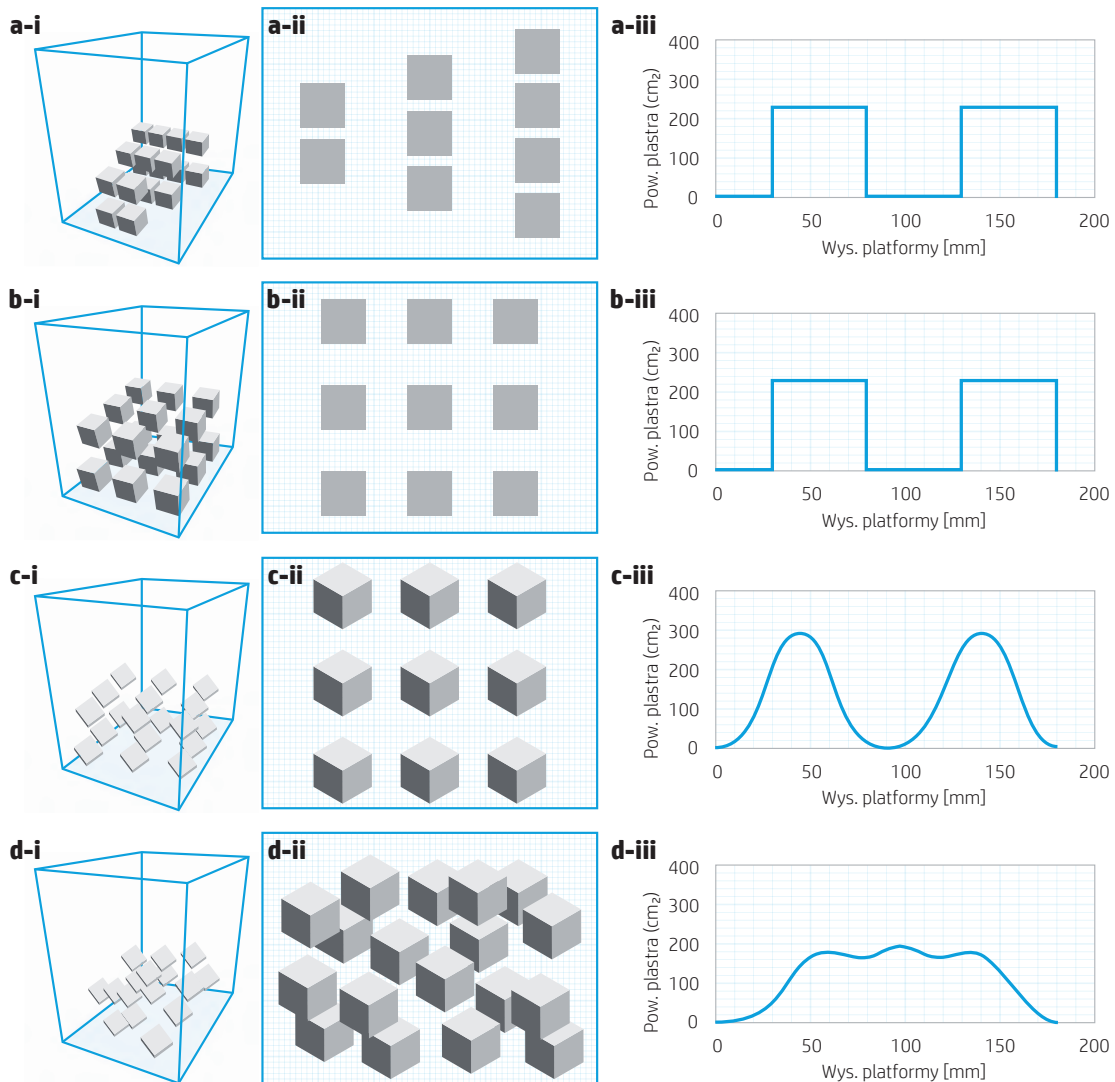
Rycina 3. Zalecana odległość między gęstymi częściami



Rycina 4. Zalecane rozmieszczenie części



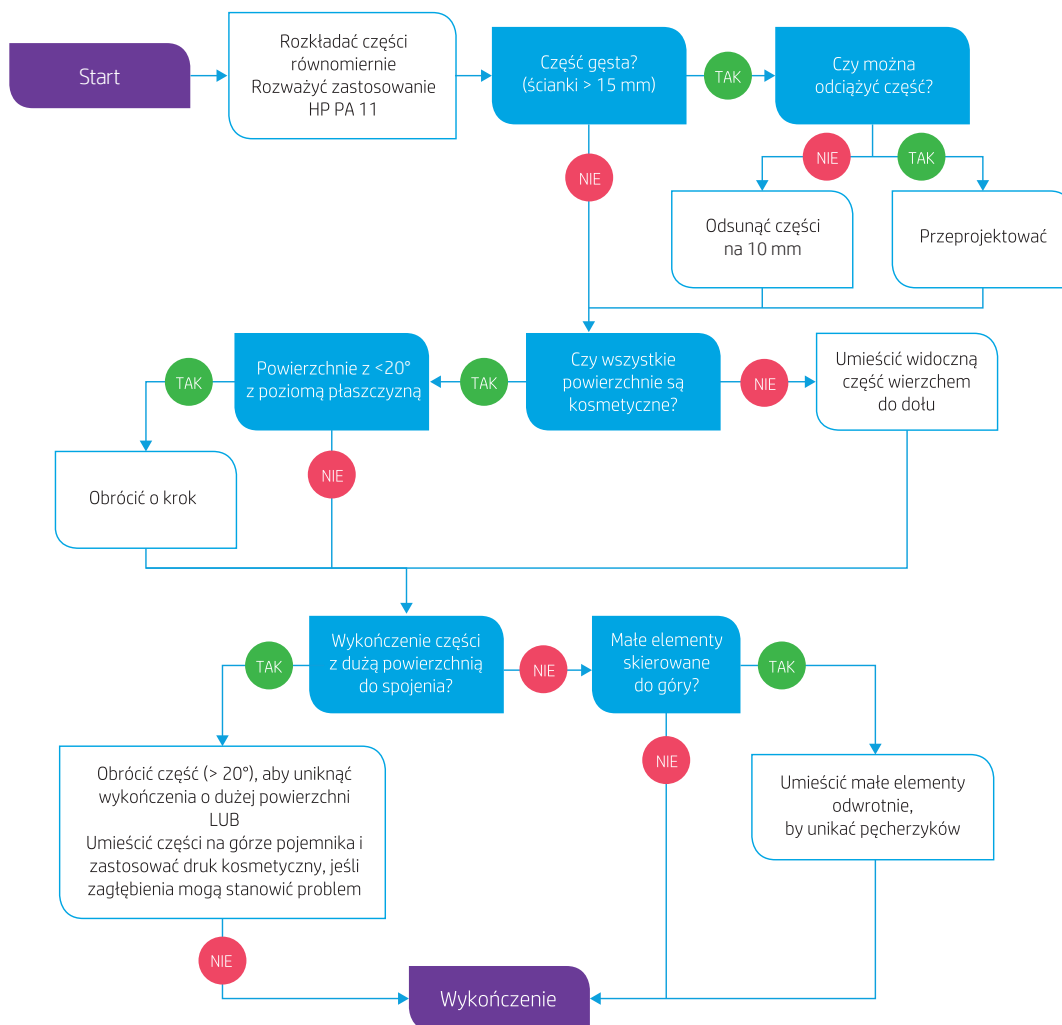
Informacje dotyczące rozkładu drukowanej powierzchni są przedstawiane w niektórych profesjonalnych programach, np. Materialise Magics.



Rycina 5. Powierzchnia drukowania w danej warstwie (prawa kolumna) stanowi wskaźnik jednorodności w kierunku Z, który pozwala uniknąć dużych różnic w pochłanianiu energii przez części. a) Przykład niezalecanej konfiguracji zlecenia wykazującej niejednorodność w trzech wymiarach. b) Zlecenie, które jest jednorodne w płaszczyźnie XY, ale wykazuje wyraźny i problematyczny odstęp w osi Z. c) Odstęp w osi Z jest łagodniejszy po obróceniu sześciątów, aby nie dopuścić do wystąpienia dużych powierzchni w ostatnich drukowanych warstwach. d) Za pomocą automatycznego pakowania rozkładu powierzchni drukowanych jest jeszcze bardziej równomierny, co minimalizuje niekorzystne efekty cieplne. To jest zalecana konfiguracja

- Części podatne na powstawanie zagłębień czy pęcherzyków należy umieszczać dalej od innych części (ok. >10 mm), zwłaszcza względem obiektów bezpośrednio nad nimi (w kierunku Z). Umieszczanie ich w górnej ćwiartce pojemnika może pomóc zredukować ten efekt.
- Dobrym kompromisem między wydajnością i jakością części jest gęstość pakowania w zakresie 8-12%. Jednak wartość tę można modyfikować w zależności od wymogów danego zastosowania.

Informacje podane w niniejszym rozdziale podsumowano w schemacie (Ryc. 6), który można wykorzystać jako wskazówki ułatwiające poprawę wyglądu i wrażeń dotykowych części.



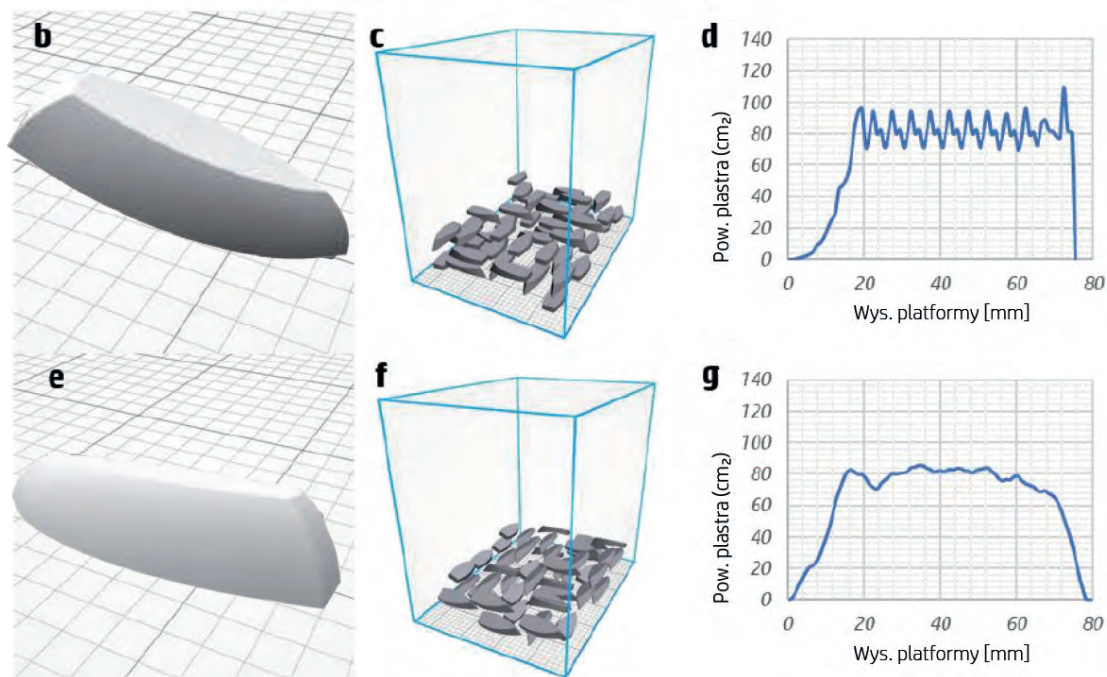
Rycina 6. Schemat blokowy doboru parametrów procesu dla geometrii i funkcjonalności części mających na celu poprawę wyglądu i wrażeń dotykowych

## Przykład estetyczny

Aby zilustrować zalecenia dla części kosmetycznych, przedstawiono przykład zawierający zabawkową łódkę:

a





Rycina 7. Przykład ukierunkowania części pozwalającego poprawić wygląd i wrażenia dotykowe zabawkowej łódki (a). b-d) Wstępny etap ukierunkowania, w którym część ma dużą powierzchnię równoległą do płaszczyzny XY, co zwiększa występowanie artefaktów. Umieszczono pięćdziesiąt części, pozwalając na obrót wokół osi Z. Rozkład powierzchni na warstwę waha się i kończy gwałtownie. e-g) Łódka obrócona o 25° wokół własnej osi, aby uniemożliwić wystąpienie artefaktów i nadmiernego schodkowania warstw. Zbiórny rozkład powierzchni 50 łódek jest łagodniejszy niż w poprzednim scenariuszu.

Ponieważ najbardziej widoczna powierzchnia obiektu znajduje się wewnątrz łódki, jasne jest, że część należy umieścić wierzchem w dół, aby zapewnić lepsze wykończenie w tej sekcji.

Pierwszym pomysłem byłoby pozostawienie jej płasko, ale rozkład powierzchni drukowanej w tym ukierunkowaniu (zwłaszcza przy zbiorczym drukowaniu 50 części) kończy się gwałtownie za punktem szczytowym, czego można uniknąć w celu minimalizacji artefaktów powierzchniowych takich jak kapilarność, wygładzona górna powierzchnia i zagłębienia.

W związku z tym łódkę należy zawsze ustawiać pod kątem większym niż 20°, aby zminimalizować widoczność poszczególnych warstw. Taki obrót można przeprowadzić wokół innej osi lub ich kombinacji. Wzdłużną oś obrotu wybrano, aby zminimalizować wymagany druk wymiaru Z i wygładzić drukowaną powierzchnię wielu warstw.

W kontekście położenia części w komorze konstrukcyjnej najlepiej jest poszukać środka platformy, ale nie ma znaczącej różnicy w efekcie końcowym przy kierunkowaniu części wzdłuż osi drukowania (X) lub osi powlekania (Y). Dlatego w zbiorczych scenariuszach, gdzie drukuje się 50 łódek w ramach jednego zlecenia, dopuszcza się obroty wokół osi Z, co zwiększa gęstość pakowania (w zależności od geometrii części), ale co ważniejsze, pomaga rozdzielić wymaganą liczbę kropeł na całą platformę konstrukcyjną. Równomierny rozkład obciążenia drukującego jest istotnym czynnikiem zapobiegającym zbytniemu naprężeniu ograniczonego zestawu matryc, podczas gdy inne pozostawałyby beczynne przez dłuższy czas.

Dla tej części można użyć wskazówek ukierunkowania obowiązujących dla HP PA 12, HP PA 12 GB i HP PA 11. Jednak ponieważ HP PA 11 i HP PA 12 GB zwykle dają zmniejszoną kapilarność, to płaskie ukierunkowanie można zastosować w sytuacjach, gdy dokładność pewnych elementów na płaszczyźnie XY (np. otworu w żaglu) jest czynnikiem krytycznym lub też wysokość danego zlecenia jest ograniczona.

Zaleca się stosowanie naturalnego chłodzenia dla wszystkich materiałów, ponieważ szybsze schładzanie prowadzi do powstania odchyłek na płaskich obszarach względem kształtu nominalnego.



# Drukowanie części o właściwościach mechanicznych

## Dostrajanie technologii HP MJF do projektu



### Wstęp

Wybór właściwego profilu drukowania i chłodzenia, materiału do drukowania lub umieszczenie części z określonym ukierunkowaniem na platformie konstrukcyjnej to sposoby pozwalające maksymalizować właściwości mechaniczne części drukowanej.

### Maksymalizacja właściwości mechanicznych

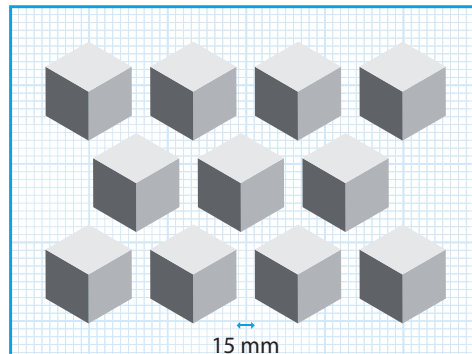
Należy rozważyć kilka założeń, aby przeanalizować drukowanie części o możliwie najlepszych właściwościach mechanicznych:

#### Profile druku i materiały do drukowania

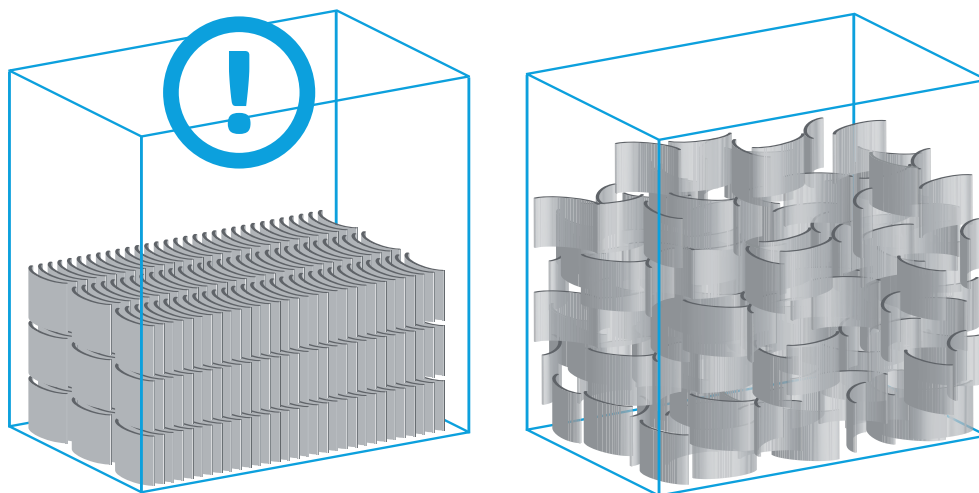
- Najlepsze właściwości mechaniczne dają profile mechaniczne i zrównoważone, zarówno z użyciem HP 3D HR PA 11 („HP PA 11”) jak i HP 3D HR PA 12 („HP PA 12”), przy czym ten pierwszy daje lepsze wyniki.
- HP PA 11 daje większe wydłużenie i udarność<sup>1</sup> niż HP PA 12, natomiast HP 3D HR PA 12 Glass Beads („HP PA 12 GB”) daje wyższy moduł Younga, a niższe wydłużenie i wytrzymałość na rozciąganie.<sup>2</sup>
- Nie zaleca się stosowania profili kosmetycznych (HP PA 12) lub szybkich (HP PA 11 i HP PA 12) do zastosowań o wysokich wymaganiach dla właściwości mechanicznych.

#### Rozmieszczenie platformy konstrukcyjnej i proces druku

- Zalecana minimalna odległość między częściami to 5 mm, a idealna odległość między częściami i marginesami objętości konstrukcyjnej to 10-20 mm.
- Zaleca się pozostawiać odpowiednio dużo miejsca między gęstymi częściami lub częściami o ściankach o grubości większej niż 15 mm. Zwykle ta odległość powinna wynosić powyżej 10 mm.
- W przypadkach, gdy wiele części o tym samym kształcie jest ciasno upakowanych z głównymi powierzchniami ustawionymi równoległe, należy je traktować jak części gęste i zwiększać odległość między nimi.

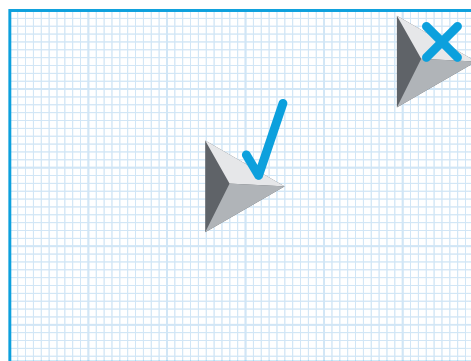


Rycina 1. Zalecana odległość między gęstymi częściami



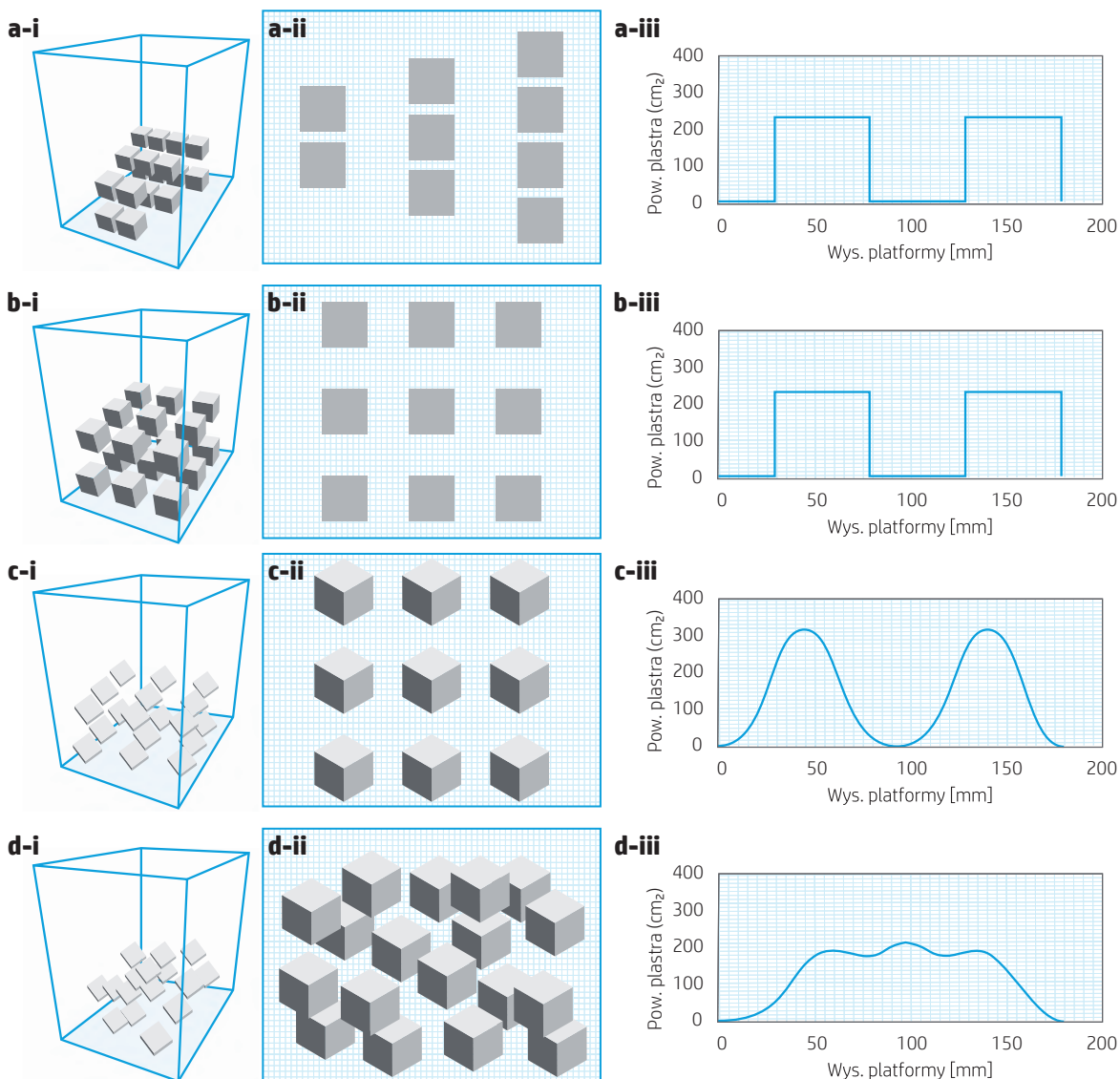
Rycina 2. Po lewej: Wiele części ustawionych w konfiguracji, która może skutkować zbyt dużą ilością ciepła. Po prawej: Alternatywna konfiguracja, która poprawia jednorodność ciepła i ułatwia jego rozpraszanie, co daje lepsze ogólne wyniki

- Zaleca się rozmieszczać części możliwie jak najbardziej równomiernie na płaszczyźnie XY, aby ułatwić pochłanianie



- Podobnie jak na płaszczyźnie XY zaleca się umieszczać części w pojemniku, aby nie dopuścić do drastycznych zmian w obszarach drukowanych w każdej warstwie w kierunku Z.

Rycina 3. Zalecane rozmieszczenie części



Rycina 4. Powierzchnia drukowania w danej warstwie (prawa kolumna) stanowi wskaźnik jednorodności w kierunku Z, aby nie dopuścić do powstania dużych różnic przy pochłanianiu energii przez części.

a) Przykład niezalecanej konfiguracji zlecenia wykazującej niejednorodność w trzech wymiarach.

b) Zlecenie, które jest jednorodne w płaszczyźnie XY, ale wykazuje wyraźny i problematyczny odstęp w osi Z.

c) Odstęp w osi Z jest tagodniejszy po obróceniu sześcianów, aby nie dopuścić do wystąpienia dużych powierzchni w ostatnich drukowanych warstwach.

d) Za pomocą automatycznego pakowania rozkład powierzchni drukowanych jest jeszcze bardziej równomierny, co minimalizuje niekorzystne efekty cieplne. To jest zalecana konfiguracja

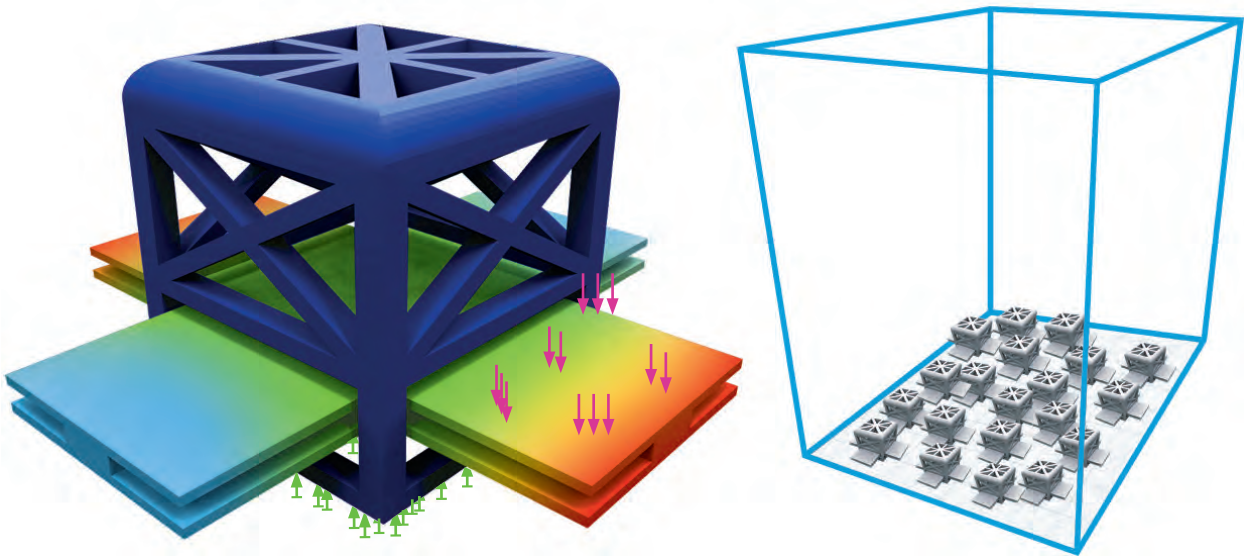


Informacje o rozkładzie drukowanej powierzchni są podane w niektórych programach typu Materialise Magics.

- Podczas optymalizacji właściwości mechanicznych dobrym kompromisem między wydajnością i jakością części jest gęstość pakowania w zakresie 8-12%.
- Zastosowanie niskiej gęstości pakowania poprawia rozpraszanie ciepła między częściami, co daje lepsze wyniki w zakresie jednorodności.
- Zaleca się drukować krótsze zlecenia, aby minimalizować wysokość w osi Z - liczba warstw - co pozwala na szybsze etapy drukowania i chłodzenia, a także umożliwia zwiększenie wydłużenia przy zerwaniu i udarności.
- Szybkie chłodzenie ma podobnie korzystny efekt na wydłużenie przy zerwaniu i udarności, ale nie powinno być używane przy częściach podatnych na paczzenie. Jest to szczególnie krytyczny czynnik w przypadku HP PA 11, który jest bardziej podatny na wypaczenie.

## Przykłady mechaniczne

Poniżej przedstawiono przykład ukierunkowania części, która wymaga zwiększonego wydłużenia i zwiększonej udarności w cieńszych elementach:



Rycina 5. Po lewej: Część mechaniczna wymagająca dużego wydłużenia w cieńszych elementach  
Po prawej: Krótki pojemnik zawierający 20 iteracji tej samej części

Jak wspomniano uprzednio, parametry przetwarzania takie jak profile druku, profile chłodzenia i wysokość zlecenia stanowią kluczowe czynniki umożliwiające maksymalizację właściwości mechanicznych.

Dlatego też, aby uzyskać wysokie wartości wydłużenia i udarności zaleca się stosować profil druku mechanicznego, aby schłodzić części w możliwie najszybszym tempie oraz aby drukować niższe zlecenia (minimalizując wysokość Z) z niższymi gęstościami pakowania.

Wybór profilu mechanicznego z materiałem HP PA 11 i HP PA 12 pociąga za sobą obniżkę dokładności wymiarowej. Nie jest to problemem w aktualnym zastosowaniu. Z kolei szybkie chłodzenie najprawdopodobniej wywołuje wypaczenie w cieńszych elementach, ale ich płaskość jest w tym przypadku nie tak istotna jak ich wydłużenie, na które wpływ ma szybsze chłodzenie.

W odniesieniu do materiałów profil mechaniczny dla HP PA 11 dawałby większe wydłużenie niż z HP PA 12, nawet bez zastosowania szybszego chłodzenia. HP PA 12 GB nie byłby dobrym wyborem materiału dla tego zastosowania, ponieważ zwykle daje sztywniejsze części, które prędzej pękają niż wyginają się.

# Zalecenia dla obróbki maszynowej

## Dostrajanie technologii HP MJF do projektu



### Wstęp

Technologia HP Multi Jet Fusion pozwala projektować i produkować dokładne części z małymi elementami, złożoną geometrią i zespołami funkcjonalnymi. Te zalety można jeszcze wzmocnić stosując dodatkowe post-procesy takie jak obróbka maszynowa, zwłaszcza w zastosowaniach o bardzo małych tolerancjach takich jak małe gwinty, obudowy łożysk lub pasowania konstrukcyjne.

Dodatkowa obróbka może dodać wartości poniższym aspektom:

- Dokładność wymiarowa: Standardowa obróbka daje bardzo małe tolerancje - do  $\pm 0,05$  mm - w danym obszarze lub w odniesieniu do krytycznego elementu, które wymagają dużej funkcjonalności i tolerancji.
- Parametry geometrii: Oprócz dokładności wymiarowej obróbka w post-processingu może również poprawić wymogi geometryczne takie jak płaskość, koncentryczność, prostopadłość lub równoległość, pozwalając osiągnąć bardzo niskie tolerancje do  $\pm 0,08$  mm.
- Małe elementy: Obróbka w post-processingu pozwala zastosować małe elementy takie jak małe gwinty, zapewniając dokładne wyniki.
- Szorstkość powierzchni: Domyślnie średnia szorstkość powierzchni lub średnia szorstkość (Ra) części z drukarki 3D z zastosowaniem technologii HP MJF sięga od 8  $\mu\text{m}$  do 12  $\mu\text{m}$ , w zależności od kierunku, w którym jest skierowana strona wierzchnia. Szorstkość powierzchni można znacząco poprawić za pomocą obróbki, np. frezowania lub toczenia, które dają wartości szorstkości odpowiednio do 0,30  $\mu\text{m}$  i 0,60  $\mu\text{m}$ .
- Powtarzalność: Obróbka w post-processingu może również zmniejszać zmienność w zastosowaniach, które wymagają powtarzalnej specyfikacji.



Należy przy tym pamiętać, że niektórych tworzyw sztucznych nie można obrabiać. Im sztywniejszy plastik, tym łatwiejsza obróbka. Narzędzia skrawające stosowane w obróbce korzystają na sztywności komponentów. Niektóre wzmocnione tworzywa sztuczne wykazują lepszą reakcję od tych mniej sztywnych, które mają tendencje do wyginania i wymagają specjalistycznej wiedzy do ich dokładnej obróbki. Bardziej miękkie i elastyczne tworzywa sztuczne nie nadają się do obróbki.

### Zalecenia dla projektowania

Projektując część do technologii HP MJF należy pamiętać o wymaganiach dla wyrobu gotowego. Niektóre zastosowania mogą wymagać skorygowania projektu, aby móc odpowiednio obrobić wydrukowaną część.

#### Szlifowanie powierzchni

Obróbka ścierna usuwa materiał, aby utworzyć bardzo płaskie powierzchnie o gładkim wykończeniu i bardzo dokładnej tolerancji. Z tego względu obrabiana powierzchnia musi być zaprojektowana z użyciem dodatkowego materiału, który pozwoli uzyskać właściwy wynik. Minimalna zalecana grubość to 0,5 mm, przy czym trzeba pamiętać, że nadmiar materiału będzie skutkowało zwiększeniem kosztów oraz czasu produkcji i post-processingu.



Szlifowanie powierzchni pozwala również poprawić szorstkość powierzchni części.

## Zalecenia dla obróbki maszynowej

Podczas obróbki części do HP MJF należy pamiętać o doborze właściwych parametrów dla każdego post-procesu, aby uzyskać odpowiednie wyniki.

### Frezowanie

Podczas frezowania części do HP MJF stosuje się zalecane parametry obróbki:

Operacja	(Otwory przelotowe) (bezpośr. śr.)	(Otwory przelotowe) (duża. śr.)	Szlifowanie czołowe	Wys. głowicy
Zalecane narzędzie	Wiertło o wymaganej średnicy	Wiertło Ø12	Frez Ø63 z wymiennymi wkładkami	Frez Ø8 z wymiennymi wkładkami
RPM zalecane	4000	10000	6000	6000
Zalecana szybkość skrawania	200 mm/min	2000 mm/min	1000 mm/min	1000 mm/min
Zalecana głębokość skrawania	1 mm	1 mm	0.25 mm	0.25 mm
Inne uwagi	Nie dotyczy	Interpolacja spiralna	Nie dotyczy	Interpolacja spiralna

Tabela 1: Zalecane parametry frezowania



Stosowanie metalowych narzędzi skrawających skutkuje podwyższeniem temperatury, co z kolei pogarsza wykończenie powierzchni i tolerancję wymiarową ze względu na nadtapianie materiału.

### Toczenie

Podczas toczenia części do HP MJF stosuje się zalecane parametry obróbki:

Operacja	Toczenie czołowe	Toczenie czołowe cyl.	Wiercenie	Rozwiercanie
Zalecane narzędzie	Narzędzie skrawające	Narzędzie skrawające	Wiertło o wymaganej średnicy	Rozwiertak o wymaganej średnicy
Zalecane RPM	650	650	500	150
Zalecana szybkość skrawania	50-100 mm/min	50-100 mm/min	200 mm/min	200 mm/min
Zalecana głębokość skrawania	0.5 mm	0.5 mm	Nie dotyczy	Nie dotyczy

Tabela 2: Zalecane parametry toczenia



Podczas toczenia dużych serii części zaleca się stosowanie spersonalizowanych narzędzi wykonanych z węgla lub kobaltu. Ponadto, można również używać spersonalizowanych uchwytów, aby uzyskać dobre wyniki i unikać występowania drgań.

## Chłodziwo i smarowanie

Choć część HP MJF można obrabiać bez pomocy chłodzenia powietrznego lub wodnego, to mocno zaleca się stosować chłodzenie powietrzne.

Można również użyć płynu do skrawania, jeśli część jest mocowana w uchwytach i jeśli część nie będzie malowana lub powierzchnia nie będzie w żaden sposób obrabiana. W przypadku otworów o głębokości większej niż 10 mm, mocno zaleca się stosowanie płynu do skrawania, ponieważ usuwanie wiórów nie jest łatwe.

# Projektowanie części łączonych

## Innowacyjne projekty



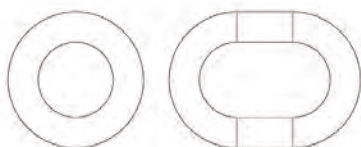
### Wstęp

Niniejszy rozdział ma stanowić narzędzie zorientowane na projektowanie, łącząc odnośniki, instrukcje i inspiracje i powinien być istotnym czynnikiem pozwalającym na rozwój cyfrowych procesów i technologii wytwórczych. Znajdują się tutaj odpowiedzi na konkretne pytania i potrzeby, ale także propozycje nowego podejścia do produkcji cyfrowej.

### Łańcuchy

#### Podstawy

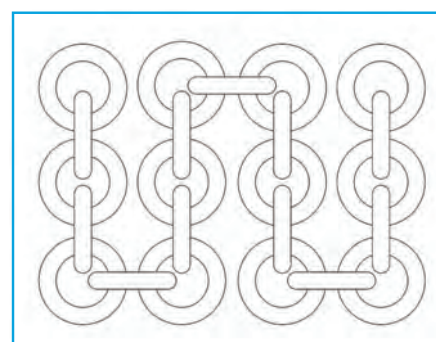
Łańcuchy to zestawy połączonych ogniw. Podczas drukowania proszkowego 3D, takie połączone zestawy elementów można drukować w jednym przejściu, o ile zostały zaprojektowane z wystarczającymi odstępami.



Rycina 1: Przykładowe ogniwa



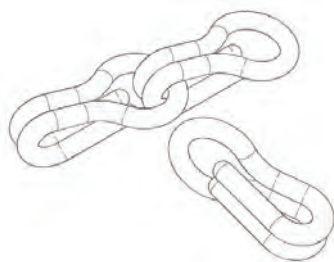
Rycina 2: Zapewnić wystarczające odstępy, by nie dopuścić do przypadkowego zespojenia



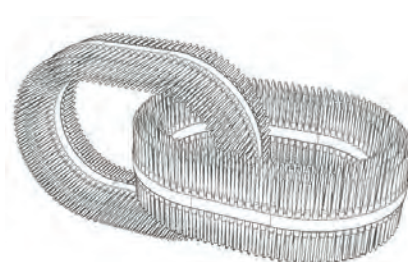
Rycina 3: Można też zaprojektować łańcuchy złożone, by zapewnić bardziej zwarte pakowanie lub w przypadku części dłuższych od formy drukarskiej

#### Modyfikacje

W procesie drukowania 3D ogniwa mogą być nieskończenie złożone. Mogą mieć różne kształty, być zdobione, a nawet mieć dodatkowe części ruchome. Można też wymieszać różne rodzaje ogniw lub zmienić ich skalę.



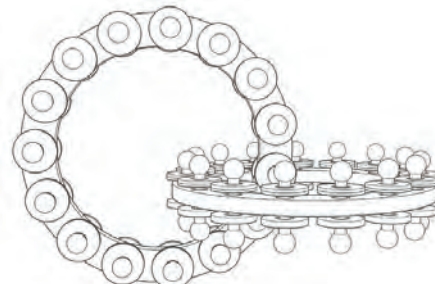
Rycina 4: Ten łańcuch ma otwór, który pozwala przekonfigurować łańcuch po wydrukowaniu według potrzeb.



Rycina 5: Można dodać faktury, takie jak na ilustracji powyżej.



Rycina 6: Te pierścienie mają sprężyny, ale i otwory umożliwiające ich przekonfigurowanie



Rycina 7: Tarcze „przynitowane” na tych ogniwach nadają właściwości akustycznych i dotykowych.

## Pakowanie łańcuchów

### Ukierunkowanie

Aby unikać ogniwi ustawionych pionowo i poziomo, które mogą być różne pod kątem kosmetycznym (i ewentualnie mechanicznym), należy wydrukować łańcuch z każdym ogniwiem pod kątem 45 stopni do formy drukarskiej, umieszczając je na zmianę pod kątem  $-45$  i  $+45$  stopni w stosunku do pionu.



Rycina 8: Ogniwia łańcucha ukierunkowane pod kątem 0 i 90 stopni do formy drukarskiej

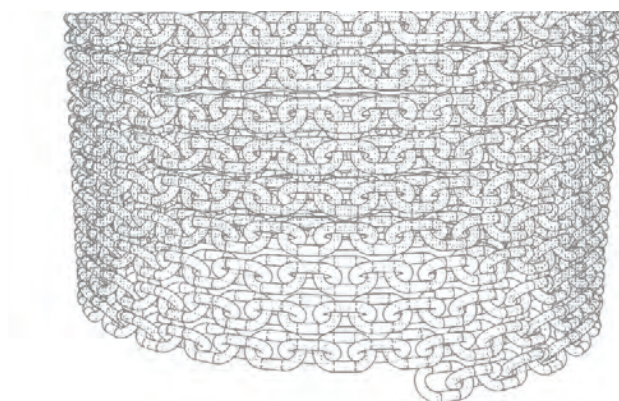


Rycina 9: Ogniwia łańcucha ukierunkowane pod kątem  $-45$  i  $+45$  stopni do formy drukarskiej

### Pakowanie

Niektóre łańcuchy są zbyt długie, by zmieścić je w jednej warstwie formy drukarskiej. Jeden wariant oznacza drukowanie ich warstwami, a następnie użyć jednego lub więcej ogniwi pionowych, by połączyć ostatnie ogniwo warstwy z początkiem nowej znajdującej się powyżej. Jednak aby nie dopuścić do powstania ogniwi (pionowych), które wyglądają inaczej niż inne, należy drukować łańcuchy w zwiniętych walcach, jak widać na ilustracji po lewej.

Rozpocząć z ogniwami ustawionymi pod kątem 45 stopni do formy drukarskiej, a następnie ustawić je pod lekkim kątem do pionu i poziomu. Jest to łatwiejsze poprzez skryptowanie niż układanie łańcucha ręcznie, ale obydwa sposoby są możliwe.



Rycina 10: Dół walca zawiera łańcuch o długości powyżej 40 stóp

### Pomiar długości drukowania

Należy pamiętać, że drukowana długość łańcucha będzie dłuższa niż jego długość w modelu przeznaczonym do drukowania, ponieważ ogniwa nie mogą się stykać podczas drukowania. Końcową długość łańcucha można obliczyć według poniższego równania. Projektanci muszą uwzględnić tego typu rozszerzenie w przypadku bardziej skomplikowanych projektów elementów łączonych, jak kolczuga.



$$\text{Drukowana długość} = (\text{liczbaogniw} \times \text{długośćogniwa}) - (\text{liczbaogniw} - 1) \times (2 \times \text{grubośćogniwa})$$

Jeśli łańcuch jest przymocowany do czegoś za pomocą pierwszego i ostatniego ogniwa, należy odjąć kolejne dwie grubości ogniwa.



# Kolczuga

## Podstawy

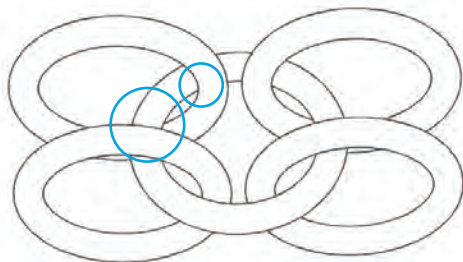
Kolczuga to prosta konstrukcja, którą można wykonać z połączonych ze sobą ogniw łańcucha. W drukowaniu 3D można jednocześnie wydrukować wiele arkuszy. Można je również wydrukować i złożyć, aby były większe od formy drukarskiej.

Prosta kolczuga 4w1 ma cztery pierścienie połączone ze sobą w jeden, ale istnieje wiele różnych wariantów kolczugi.

Więcej tutoriali znajduje się pod adresem <http://www.maillageartisans.org>

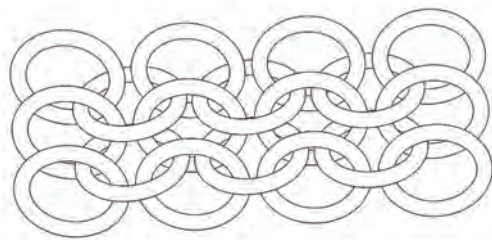
## Instrukcja wykonania

Każdy z pierścieni jest połączony z czterema innymi pierścieniami. Należy zadbać, by były między nimi odpowiednie odstępy, aby żaden z czterech pierścieni nie łączył się z pierścieniem podstawowym lub z innym pierścieniem.



Rycina 11: Zapewnić wystarczające odstępy, by nie dopuścić do przypadkowego zespojenia

Te jednostki można powtarzać w rzędach. W tym przykładzie pierścienie są obracane, aby tworzyć ze sobą kąt 90 stopni, a każdy rząd jest naprzemiennie obracany o 45 stopni zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara lub przeciwnie do niego. Jednak ten kąt można zwiększyć lub zmniejszyć w zależności od projektu.

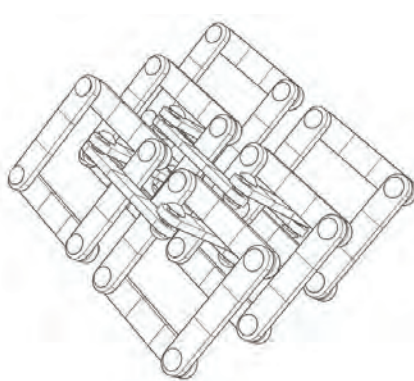


Rycina 12: Przykładowy projekt kolczugi

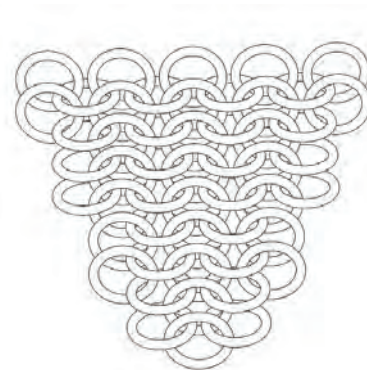
## Modyfikacje



Rycina 13: „Przynitowane” tarcze z przykładowych łańcuchów również są odpowiednie do kolczugi.



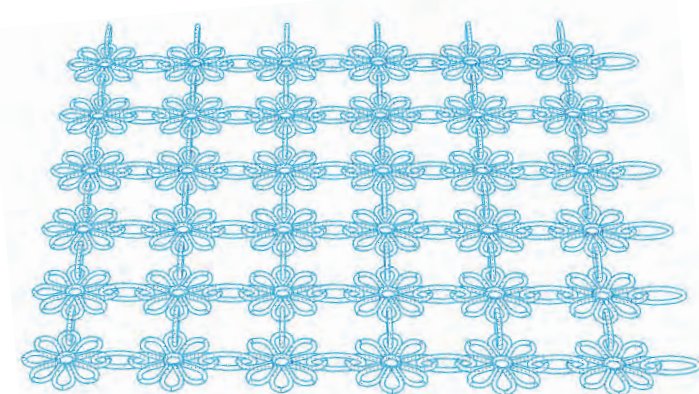
Rycina 14: Te łączone zawiasowo romby dają kolczugę dającą dodatkowe możliwości rozszerzenia jej na poziomie ogniw



Rycina 15: Elementy kolczugi można też przycinać i kształtować w CAD przed drukowaniem

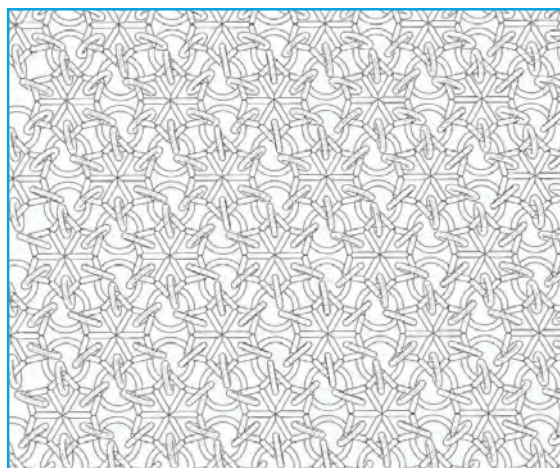
## Więcej niż 4w1

Drukowanie 3D ułatwia tworzenie łączonych ze sobą elementów, które mają nie tylko okręgi lub elipsy. W poniższym przykładzie wzory kwiatów łączą się z elipsami, ale można też tworzyć skomplikowane materiały bez jakichkolwiek ograniczeń.



Ryc. 16 Projekt kolczugi łączącej kwiaty z elipsami

Kolczuga po prawej składa się z gwiazd i okręgów o dwóch rozmiarach. Małe okręgi łączą gwiazdy z dużymi okręgami. Warto zauważyć, że duże okręgi są ułożone pod gwiazdami, aby zwiększyć kompaktowość zlecenia i uniknąć przypadkowego zespojenia. Ten projekt ma sześciokątny wzorec łączenia.

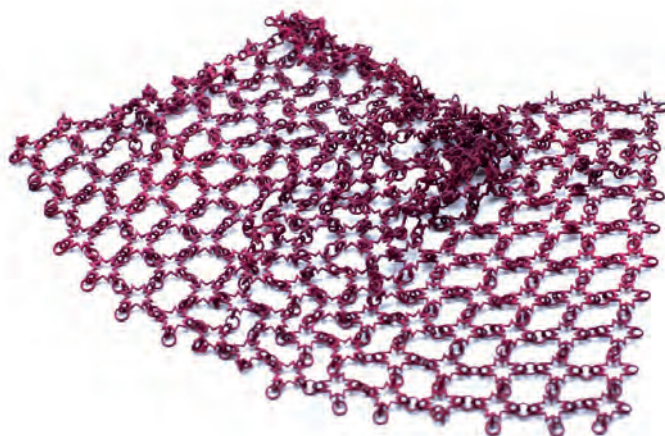


Ryc. 17 Projekt kolczugi łączącej gwiazdy z okręgami o dwóch rozmiarach

## Przykłady wydruku



Ryc. 18 Gwiazdzista kolczuga



Ryc. 19 Gwiazdzisty materiał

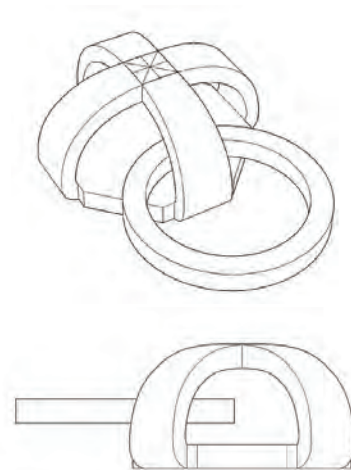
## Materiał czworokątny

### Elementy podstawowe

Ten projekt czerpie inspirację z tworzyw metalowych, jak te obecne w klasycznych torebkach. Ta konstrukcja ma dwa podstawowe elementy:

- Pierścień (którym może być torus, wystający okrąg lub nawet ośmiokąt).
- Płyta z czterema „nóżkami”. W pokazanym przykładzie nóżki zwężają się do środka i wychodzą z płaskiej ośmiokątnej podstawy.

Należy się upewnić, że między elementami po wszystkich stronach jest wystarczający odstęp, by nie doszło do ich zespojenia.

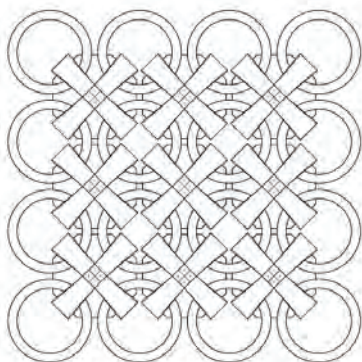


Ryc. 20 Jeśli elementy są zbyt cienkie, uda się je wydrukować, ale mogą się rozpaść podczas piaskowania.

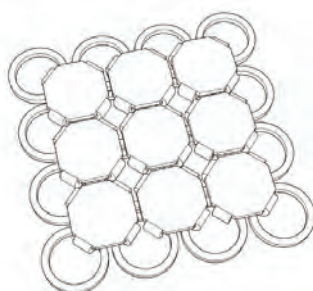
### Skalowanie

Każdy pierścień łączy się z czterema jednostkami podstawy, a każda jednostkowa podstawa ma cztery pierścienie. Taką próbkę można powtórzyć dowolną ilość razy (lub tyle, ile się zmieści w formie drukarskiej). Projekt można też drukować złożony.

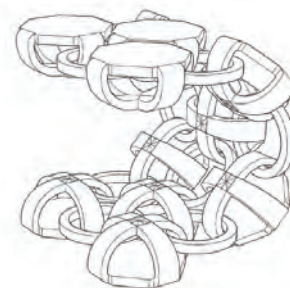
Należy zadbać o odpowiedni odstęp między elementami. Proporcje rozmiaru pierścienia do rozmiaru jednostkowej podstawy odpowiadają również za wizualną jakość siatki i wymagają sprawdzania doświadczalnego.



Ryc. 21 Potężenie między elementami materiału czworokątnego



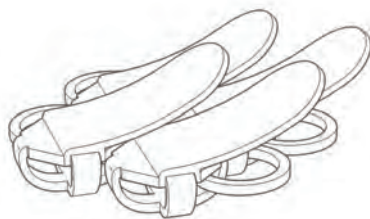
Ryc. 22 Przykładowy materiał czworokątny



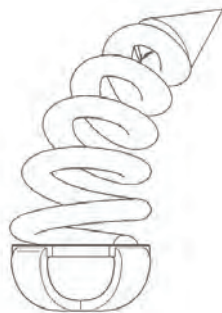
Ryc. 23 Pokazane na ilustracji elementy składane są zgięte pod kątem 45, 90 i 135 stopni.

### Odmiany

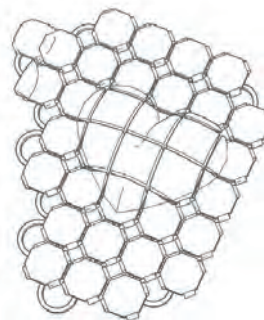
Drukowanie 3D oznacza, że nie ma powodu, by jednostkowa podstawa była płaska. Poniżej przedstawiono przykładowe powierzchnie alternatywne.



Ryc. 24 Układany warstwami falisty wzorek zastępuje odstępy między jednostkami



Ryc. 25 Sprężyny pozwalają uzyskać nowe faktury



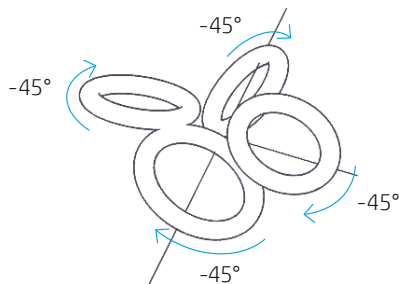
Ryc. 26 Tworzenie pikselowanych obrazów 3D na powierzchni

## Siatka na bazie pojedynczego ogniwa

### Instrukcja wykonania

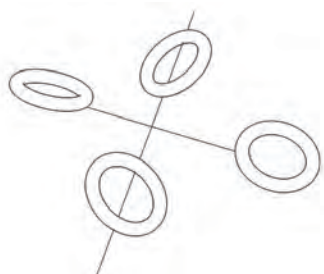
Drukowanie 3D pozwala na łączenie i upraszczanie form.

Na przykład, pojedynczy moduł ustawionych pod kątem do siebie pierścieni daje jeden kształt, który można następnie powtórzyć w celu utworzenia siatki.

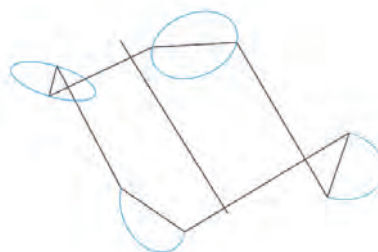


Ryc. 27 Ustawione pod kątem pierścienie dające jeden kształt

Jednak kształt ten można łączyć i redukować, zachowując jedynie kąt zalewniające właściwe połączenie wewnętrzne

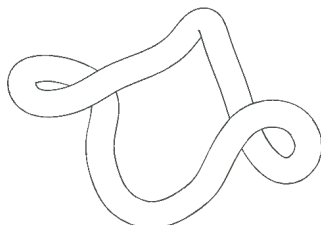


Ryc. 28 Zmniejszone pierścienie ustawione pod kątem



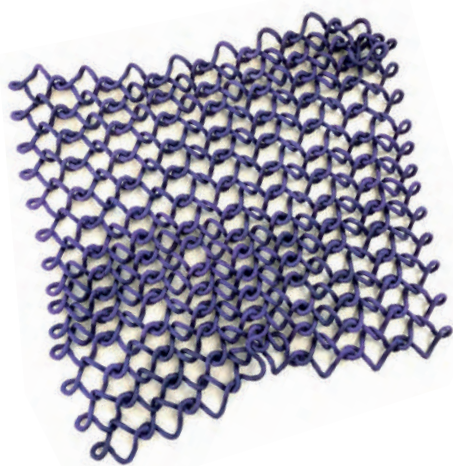
Ryc. 29 Zmniejszone i ustawione pod kątem pierścienie dające jeden kształt

Zoptymalizowany moduł potrzebuje mniej materiału i daje większą ciągłość.

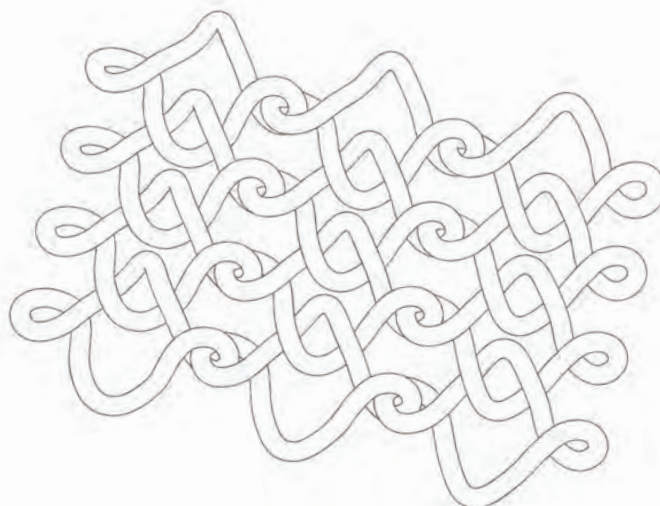


Ryc. 30 Zoptymalizowany moduł ze zmniejszonych pierścieni ustawionych pod kątem

### Przykładowe wyniki



Ryc. 31 Ten projekt umożliwia również ciaśniejsze ściśnięcie w pianie, umożliwiając drukowanie dużych arkuszy



Ryc. 32 Projekt siatki na bazie pojedynczego ogniwa

## Kolczuga ze splotem 6w1

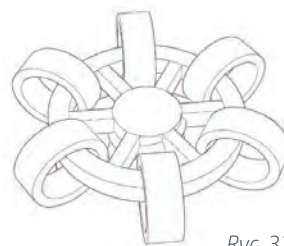
### Podstawy

Splot 6w1 jest nieco sztywniejszy od splotu 4w1 i rozprzestrzenia się promieniście łatwiej niż wyżej opisywane kolczugi i siatki na bazie czworokąta. Generalnie, taki splot wykonuje się z pierścieni o dwóch rozmiarach, przy czym sześć mniejszych pierścieni mocuje się na jednym dużym.

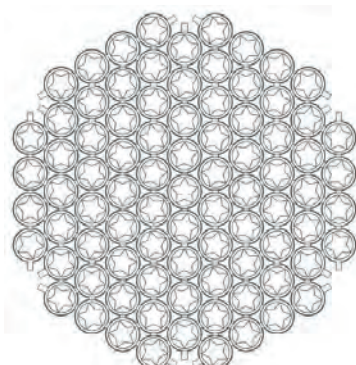
Pierścienie nie muszą być okrągłe. Przykładowe ogniwo ma sześć szprych oddzielających pierścienie. To jest jednak wybór stylistyczny, opcjonalny.

Każdy mniejszy pierścień łączy dwa większe. Zwiększona liczba ogniw powoduje, że struktura nieco opiera się składaniu, choć nadal jest elastyczna i ruchoma.

Można również eksperymentować z tego typu łączonymi projektami, umieszczając mniej lub więcej ogniw (zamiast sześciu), by zmienić sztywność.



Ryc. 33 Projekt rozprzestrzeniania promienistego

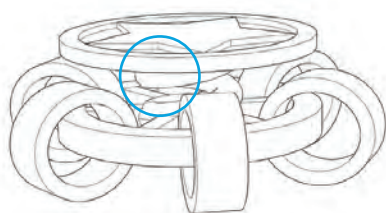


Ryc. 34 Przykładowa kolczuga ze splotem 6w1

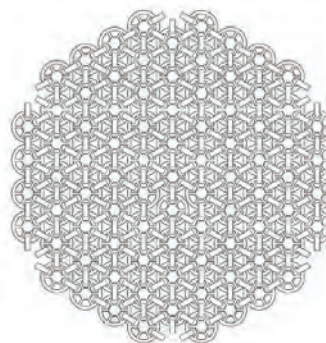
### Modyfikacje i zastosowanie

Płaska płaszczyzna powstała z dużych pierścieni pozwala opracować bardziej zaawansowane struktury.

W tym przykładowym ogniwie szprychy (wsporniki skierowane wzdłuż promieni) podtrzymują panel dekoracyjny na elastycznej sprężynie. Panel dekoracyjny zapewnia splotowi solidniejszy wygląd i sztywność.

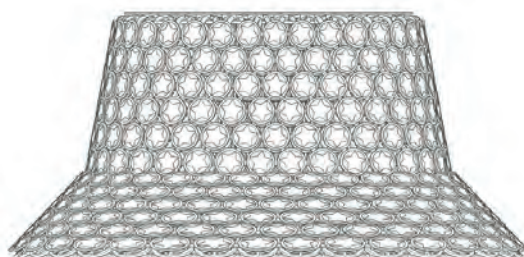


Ryc. 35 Należy sprawdzić, czy dodatkowe struktury mają odpowiedni odstęp od pierścieni



Ryc. 36 Zaawansowana kolczuga ze splotem 6w1

Przykładowe zastosowanie takiej promienistej struktury to kapelusz wędkarski.



Ryc. 37 Projekt kapelusza wędkarskiego

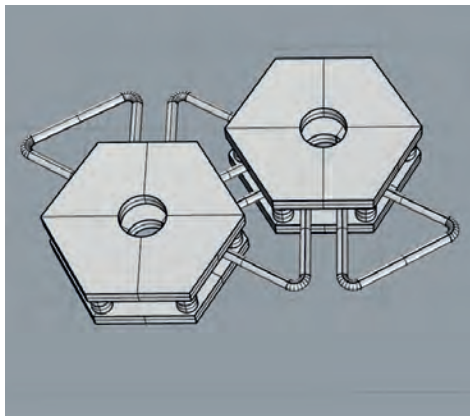
## Materiał sześciokątny

### Inny rodzaj zastony

O ile elementy można łatwo ułożyć obok siebie, to można tworzyć różne siatki tego typu. Ten przykład przedstawia „kanapkę” sześciokątów połączonych słupkami i łączonych ze sobą trójkątami umieszczanymi wokół słupków. W ten sposób powstaje materiał bez lewej strony.

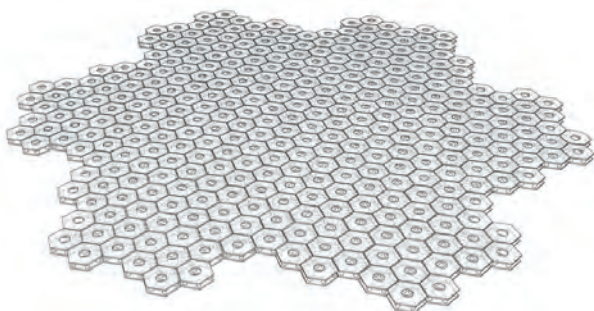
Siatki sześciokątne dają więcej stopni swobody drapowania w porównaniu do materiałów na bazie czworokąta pokazanych powyżej, ale zastosowanie słupków zamiast łuków w materiale czworokątnym zapewnia większą sztywność materiału, jeśli słupki nie są na tyle wysokie, by umożliwić większy ruch.

Można łatwo dopasować elastyczność, ułożenie, konstrukcję, wagę i inne parametry materiału poprzez zmianę grubości sześciokątów, wysokości słupków łączących sześciokąty, wymiaru trójkątnych łączników itd. Przykładowy materiał ma również w środku sześciokątów otwory, aby ułatwić czyszczenie za pomocą piaskowania.

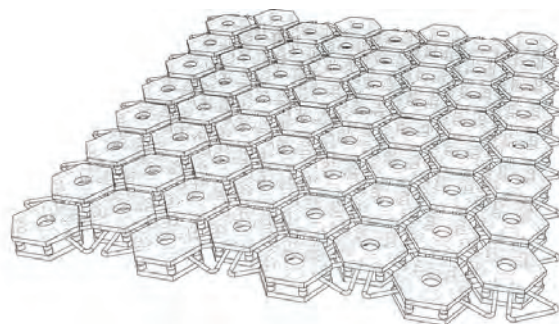


Ryc. 38 Więcej informacji o sześciokątnych modułach podano na kolejnej stronie

### Tworzenie większych arkuszy



Ryc. 39 Materiały na bazie sześciokąta można uznać za macierze, a nie siatki, co daje w efekcie kształt płatka śniegu

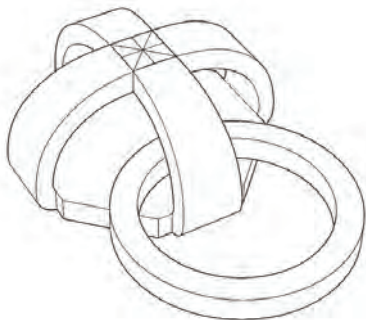


Ryc. 40 Kształt najłatwiejszy do układania w kafelkach, którego efektem jest przesunięcie wzajemne rzędów i kolumn

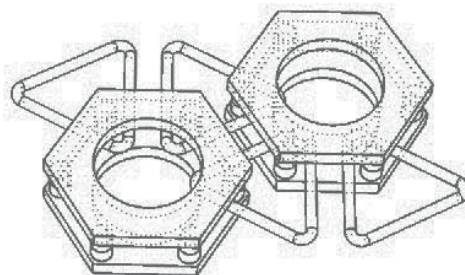
## Układanie kafelkowe modułów

### Założenia ogólne

W przypadku kolczugi i próbek materiałów, a także sześciennych struktur 3D projektuje się „moduł do kafelkowania”, by układać je obok siebie (jak w łańcuchu) w dwóch lub trzech wymiarach. Moduł do kafelkowania ma łączniki na krawędziach w kierunkach, w których ma być układany.

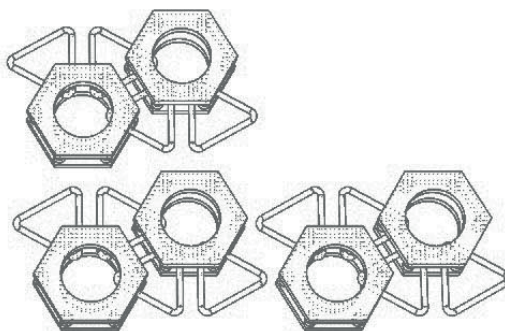


Ryc. 41 Moduł do kafelkowania materiału czworokątnego składa się z kwadratu z nóżkami i łącznika na prawej dolnej krawędzi



Ryc. 42 Materiał sześciokątny wykorzystuje moduł do kafelkowania składający się z podstawowego sześciokąta z kolejnym obróconym na prawy górny bok U góry podstawowego sześciokąta znajdującym się dwa łączniki; kolejne dwa na dole obróconego sześciokąta

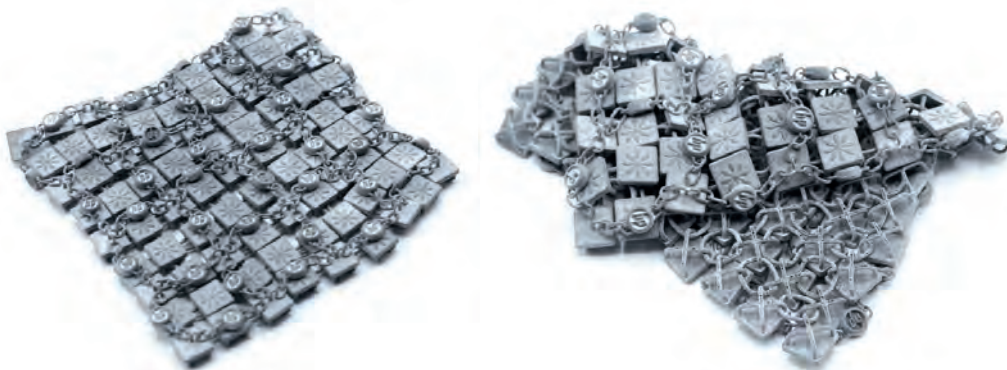
Moduły do kafelkowania można stosować w macierzy funkcji w narzędziach projektowania CAD, a zwłaszcza w skryptowaniu. Należy jedynie określić przestrzeń między modułami, aby dobrze się łączyły, ale by nie dochodziło do przypadkowego zespojenia. Inny parametr to liczba modułów wzdłuż wymiaru, w którym chcemy układać moduły.



Ryc. 43 Ten przykład pokazuje sześciokątne kafelki w kierunkach X i Y odciągnięte od siebie, aby można było zobaczyć, jak się łączą

### Układanie warstwami

Drukowanie 3D pozwala łączyć techniki i tworzyć materiały z kilkoma warstwami. Daje to sporo miejsca na eksperymentowanie.



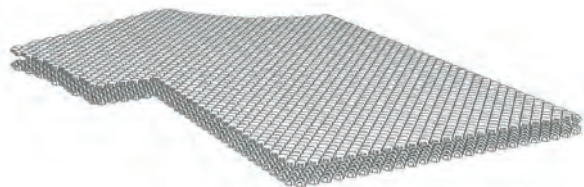
Ryc. 44 Ten przykład wykorzystuje materiał czworokątny z wytłoczonymi wzorcami kwiatów i drugą warstwę łańcuchów i logotypów

## Stosowanie łączących się próbek

### Przycinanie

Arkusze można przycinać w CAD jeszcze przed drukowaniem, aby stworzyć pożądany efekt. To powoduje marnowanie mniejszej ilości surowca niż drukowanie pełnych arkuszy i późniejsze ich edytowanie.

Arkusze można też składać tworząc większe części, jak w poniższym przykładzie z koszulą.



Ryc. 45 Koszula zaprojektowana ze złożonych arkuszy

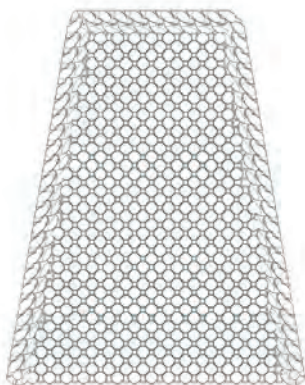


Ryc. 46 Widok projektu koszuli z góry

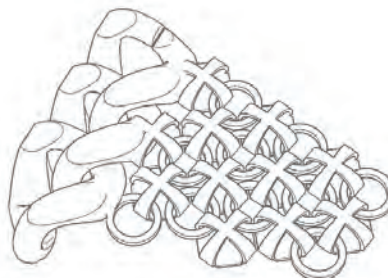
### Zszywanie

W krawędziach można zaprojektować odpowiednie elementy łączące, umieszczając odpowiednie struktury łańcuchowe na brzegach struktury arkusza. Dodanie takiej krawędzi oczyszcza krawędzie.

Pozwala to też stworzyć łatwiejszy, bardziej estetyczny sposób łączenia oddzielnych części. Na przykład, panel spódnicy po lewej można połączyć z czterema innymi, ze wstążką utkaną w środku łańcucha, co daje projekt końcowy.



Ryc. 47 Struktura arkusza połączona ze strukturami łańcuchowymi



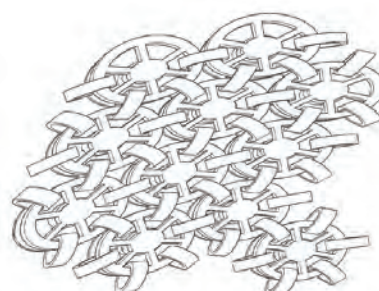
Ryc. 48 Widok szczegółowy krawędzi

### Rozciąganie

Projekty struktur łączonych można też rozciągać i odkształcać, by wypełnić pożądany kształt. Należy jednak szczegółowo sprawdzić, czy odkształcenie nie zmniejszy odstępów między częściami, co utrudniłoby wydruk.



Ryc. 47 Projekt kapelusza wędkarskiego z rozciągniętymi i odkształconymi strukturami łączonymi



Ryc. 48 Widok szczegółowy projektu



## Studium przypadku: Spódnica z drukarki 3D

### Kontekst

Materiały włókiennicze uległy znaczącej modernizacji po wiekach wprowadzania innowacji, zatem elementy z drukarki 3D raczej nie zastąpią naszych codziennych ubrań. Jednak w pewnym kontekście, np. festiwalu muzycznego Coachella na otwartym powietrzu, otwartego na innowacje modowe, taka spódnica z tworzywa sztucznego jest świetnym wyborem.

### Projekt ogólny

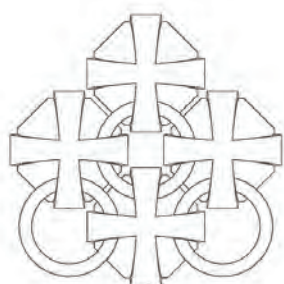
Taka spódnica wykorzystuje wielkoziarnistą wersję siatki na podstawie czworokąta. Większe podstawy jednostkowe o szerokości 1,2 mm - grube pierścienie zajmujące 10 mm - dają wystarczającą wytrzymałość, nawet po zetknięciu z zapyłonym środowiskiem. Siatka jest jednak na tyle drobna, by umożliwić wygodny i naturalny ruch.

### Optymalizacja projektu

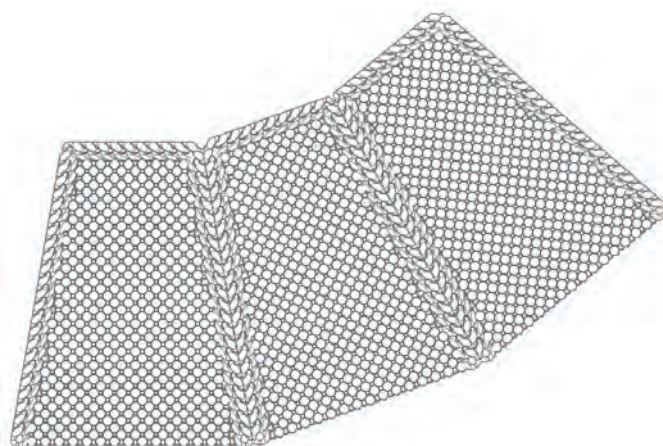
Po nadaniu wydajnej prędkości w płaszczyźnie XY łączenie płaskich paneli to najefektywniejsza metoda wytworzenia takiej spódnicy. Panele są zwężane, aby utworzyć podstawową spódnicę z pięciu paneli o atrakcyjnym wyglądzie. Następnie każdy panel podbija się grubszym, skręconym łańcuchem, by zapewnić gładkie krawędzie i punkty łączenia ułatwiające końcowy montaż.

W środku łańcuchów znajdują się tkane wstążki pozwalające zszyć panele ze sobą. Na koniec jedną wstążkę przeprowadza się wzdłuż górnych krawędzi. Ze względu na ściśliwość łańcuchów taka wstążka pozwala utworzyć regulowany pasek wokół talii.

Po dniach noszenia jej na festiwalu Coachella taką spódnicę zwyczajnie oplotkano węzem z wodą i przekazano do HP Labs, gdzie jest obecnie przechowywana w Immersive Experiences Lab's Living Room Lab.



Ryc. 49 Widok  
szczegółowy projektu



Ryc. 50 Projekt spódnicy z drukarki 3D

# Projektowanie zawiasów

## Innowacyjne projekty



### Wprowadzenie

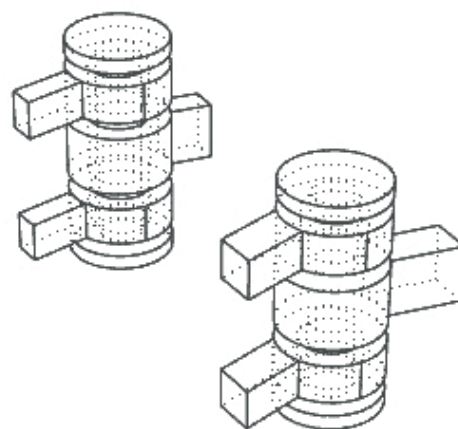
Zawiasy to kolejny typ części łączonej, którą można wyprodukować jako jeden zespół do zmontowania. Należy też zadbać o wystarczająco dużo miejsca wokół łączących się elementów, by nie dopuścić do ich zespojenia. Istnieje kilka różnych typów zawiasów, a ze względu na wymaganą przestrzeń wokół różnych elementów pewne zawiasy będą bardziej chwiejne od innych.

### Skalowanie

Te dwa zawiasy są bardzo podobne; obydwa mają dwa elementy łączące się z obiektem po lewej i środkowy element, który łączy je z obiektem po prawej. Obydwa mają pręt, który przechodzi przez środki elementów zawiasu i wystaje po obydwu stronach.

Jednak zawias po lewej ma środkowy element, który obraca się wokół pręta, podobnie jak elementy łączące się z obiektem po lewej. Zawias po prawej ma pręt i środkowy element, które stanowią jedną część, zatem tylko górna i dolna część zawiasu obracają się wokół pręta.

Drugi zawias jest mniej chwiejny, ponieważ nie ma w nim żadnej przestrzeni między środkowym elementem i prętem. Stanowią one jedną część.



Rycina 1: Przykłady strategii projektowania zawiasów

### Examples



Rycina 2: To skomplikowane jajo ma mały zawias łączący jego dwie połowki.



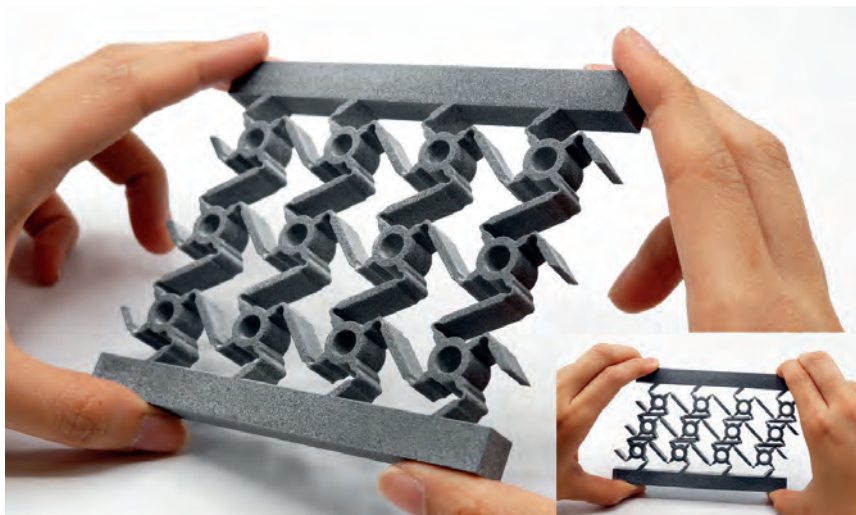
Rycina 3: Kolejny typ zawiasu wykorzystujący stożki pasujące do odpowiadających im otworów. Takie moduły mogą być zatraskiwane i rozłączane.

## Żywe zawiasy

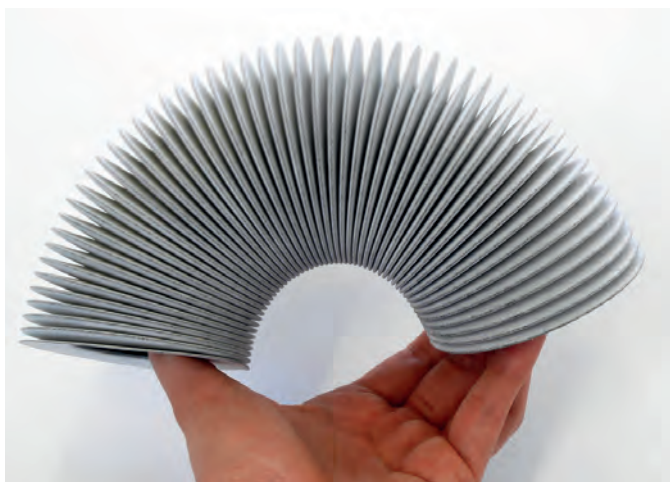
### Podstawy

Możliwe jest wydrukowanie skończenie elastycznej części z użyciem HP 3D HR PA 12, dopasowując odpowiednio grubość jej ścian i strukturę geometryczną. Cienka i składa sekcja pracuje tu jak żywy zawias i pozwala na składanie i rozkładanie części z drukarki 3D w określonym zakresie.

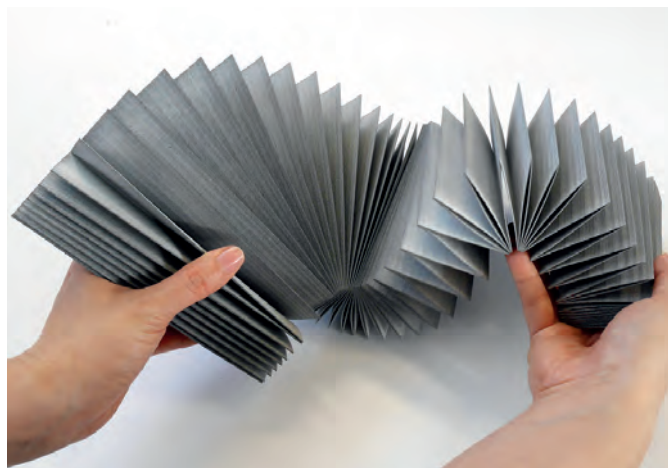
Poprawne projektowanie i drukowanie elastycznych części wymaga zastosowania odpowiedniej grubości ścian; aby zachować krzywizny i kąty złożonego zawiasu podczas zamiany modelu na siatkę; oraz żeby określić kierunek drukowania.



Rycina 4: Macierz żywych zawiasów, które można złożyć ręcznie



Rycina 5: Rurka ze ściankami o falistej strukturze



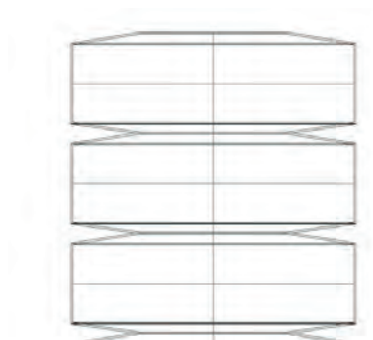
Rycina 6: Struktura harmonijkowa złożona z pewnej liczby połączonych płytek

### Grubość ścian

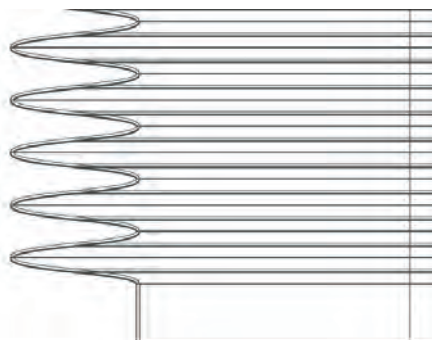
Nawet różnica 0,1 mm w grubości ścian ma duży wpływ na elastyczność części, a jeśli ścianki są za cienkie, taka część zostanie zniszczona podczas czyszczenia i piaskowania. Zaleca się eksperymentować z różnymi wartościami grubości ścian w sposób kontrolowany, aby znaleźć równowagę między sprężystością i wytrzymałością tak, by była odpowiednia dla zastosowania wydrukowanej części.

## Geometria struktur

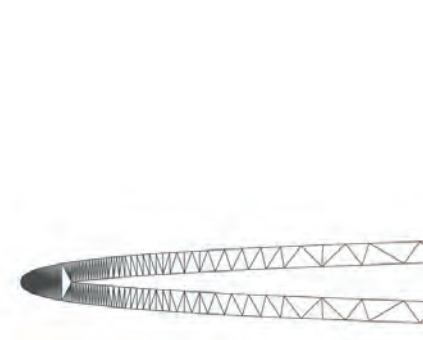
Strukturalna geometria części odpowiada za jej zachowanie mechaniczne w obliczu oddziaływania siły zewnętrznej. Różne projekty procesu składania pozwalają uzyskać różne efekty, np. odkształcenie sprężyste lub płynny ruch. Kształt i szczelność złożenia ma bezpośredni wpływ na ruch części. Wierzchołek złożonego zawiasu należy wykonać lekko zaokrąglony, by nie dopuścić do ryzyka pęknięcia w momencie rozciągania lub ściskania wydrukowanej części.



Rycina 7: Łączniki klinowe (profil V) dają odkształcenie sprężyste podczas składania.



Rycina 8: Kształty faliste zapewniają płynny ruch.

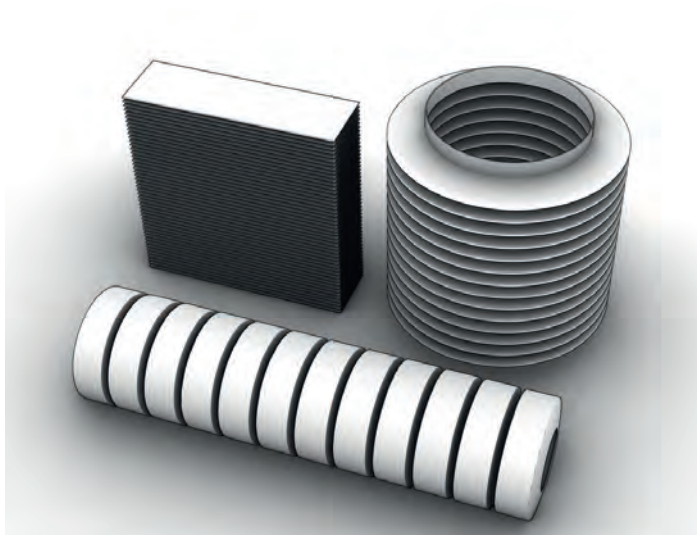


Rycina 9: Bardzo gęsta siatka w strukturze harmonijkowej zachowuje krągłość złożenia.

## Kierunek drukowania

Aby zmaksymalizować trwałość cienkiej struktury, zaleca się drukować część w takim kierunku, by cienkie płaszczyzny były w przybliżeniu równoległe do płaszczyzny XY. Można użyć określonych trybów, np. mechanicznego lub szybkiego chłodzenia, aby ewentualnie zmaksymalizować wydłużenie przy zerwaniu części.

Istnieją pewne wyjątki, w których cienkie części są wykonane lepiej w przypadku drukowania pod kątem, jak w przypadku tamburynu pokazanego w rozdziale „Projektowanie części o właściwościach akustycznych”.



Rycina 10: Zalecany kierunek drukowania dla projektu próbki

# Projektowanie części o właściwościach akustycznych

## Innowacyjne projekty



### Interaktywność akustyczna

Często pomijanym aspektem części drukowanych w 3D jest ich efekt akustyczny - czyli dźwięk, jaki wydają. Można projektować części tak, by uzyskać konkretny dźwięk.



*Rycina 1: Na przykład, cienkie ruchome elementy stykające się ze sobą podczas potrząsania dadzą miękki, dźwięczny odgłos.*



*Rycina 2: Duże, wydrążone części o względnie cienkich ścianach i z otworami będą rezonować. W powyższym przykładzie wycięcie „języczków” w bębnie działa jak dodanie wsporników. Ich ton jest funkcją masy wspornika, a zatem zależy od jego grubości, długości, kształtu i przekroju.*



*Rycina 3: Można też tworzyć w drukarkach 3D membrany perkusyjne, np. do tambury. Wydrukowanie tambury membranę do dołu pod kątem 30 stopni pozwala uniknąć wypaczenia membrany*

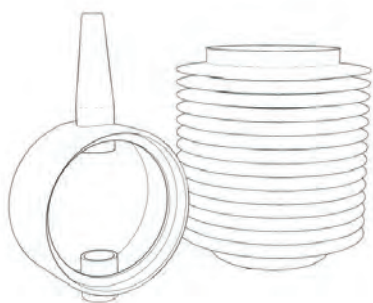
## Studium przypadku: instrumenty pneumatyczne

### Projektowanie fragmentami

Łącząc strukturę miecha z innymi komponentami można uzyskać w drukarce 3D urządzenia pneumatyczne i instrumenty muzyczne. Przedstawione miechy są wytrzymałe i na tyle elastyczne, by przetrwać piaskowanie, a podczas ściskania wytwarzają pewne ciśnienie powietrza.

Prototypy składają się z kilku części, aby można było usunąć nadmiar proszku z komór. Następnie są one montowane w obiekty o określonym działaniu. W częściach projektuje się również kanały powietrzne o właściwym rozmiarze, aby umożliwić wydostanie się nadmiaru proszku.

- Poniższa pompka składa się z dwóch części: miecha i wentyla. Naciśnięcie miecha powoduje wypchnięcie powietrza.



Rycina 4: Projekt pompki



Rycina 5: Pompka z drukarki 3D

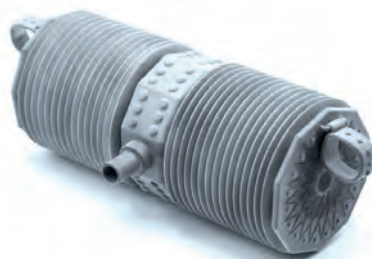


Rycina 6: Miech po naciśnięciu

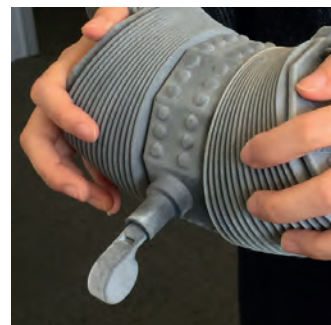
- Ten instrument muzyczny wydaje zabawny dźwięk. Można również przymocować do niego gwizdek drukowany w 3D, by wydawał bardziej nastrojony dźwięk.



Rycina 7: Projekt instrumentu muzycznego

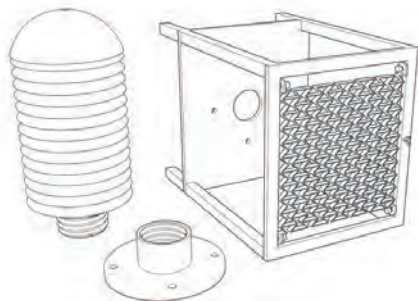


Rycina 8: Instrument muzyczny z drukarki 3D



Rycina 9: Instrument muzyczny z drukarki 3D podczas gry

- To urządzenie pneumatyczne może być kontrolowane z użyciem pompy elektronicznej. Po nadmuchaniu miecha za pomocą pompy rozszerza się on, jednocześnie wypychając do góry elastyczny panel. W celu uszczelnienia przepływu powietrza do śrubowego łączenia miecha i korka mocuje się podkładkę ciśnieniową i O-ring



Rycina 10: Projekt urządzenia pneumatycznego



Rycina 11: Urządzenie pneumatyczne z drukarki 3D