

Szacowanie wytrzymałości prototypów wytwarzanych przyrostowo metodą FDM

Streszczenie

W pracy przedstawiono nową metodę szacowania wytrzymałości, która umożliwia wykorzystanie potencjału technologii FDM w skali przemysłowej, poprzez kontrolowany dobór geometrii wypełnienia wewnętrznego dla prototypów wytwarzanych przyrostowo. Nowość metody polega na możliwości szybkiego i relatywnie dokładnego doboru geometrii wewnętrznej bez konieczności modyfikacji i adaptacji modeli CAD. Metoda bazuje na modelu matematycznym struktury wytwarzanej przyrostowo i geometrii przestrzennej przeznaczonej do wytworzenia. Skuteczność metody wykazano dla dwóch typów prototypów na podstawie badań trzech reprezentatywnych geometrii wypełnienia wewnętrznego: lita-włóknista, kratowa, żeberkowa.

Obecnie konstrukcjom maszyn stawiane są coraz wyższe wymagania. We współczesnych maszynach, oprócz dużej wytrzymałości przy minimalnej masie własnej, znaczenie ma także łatwość i szybkość wytwarzania oraz montażu nowych podzespołów, a także możliwość szybkiej adaptacji do postawionego zadania. Nie bez znaczenia jest również jego wygląd. To wszystko wiąże się z koniecznością szybkiego wytwarzania prototypów funkcjonalnych części i mechanizmów, ponieważ bardzo istotne jest, aby zaprojektowaną maszynę można było jak najszybciej przetestować, wdrożyć do produkcji i sprzedawać. Dlatego tak ważna jest tematyka świadomego i optymalnego wykorzystania technologii addytywnych.

Analiza stanu wiedzy w obszarze rozpatrywanego zagadnienia pokazała, że aktualnie stosowane metody szacowania wytrzymałości prototypów nie należą do metod szybkiego prototypowania i są nieoptymalne z perspektywy wykorzystania ich w praktyce przemysłowej. Dzieje się tak ze względu na relatywnie duże koszty lub czas osiągnięcia zadowalających wyników.

Na podstawie analizy stanu wiedzy oraz badań własnych wyciągnięto wniosek, że należy opracować metodę estymacji wytrzymałości dla prototypów wytwarzanych przyrostowo, aby proces estymacji odbywał się bez konieczności prowadzenia badań niszczących. W metodzie należy uwzględnić dostępne technologie umożliwiające wykonywanie szybkich symulacji komputerowych, szybkich pomiarów oraz prowadzenia precyzyjnych eksperymentów badawczych skorelowanych z modelami komputerowymi.

Dlatego w badaniach opisanych w monografii skupiono się na stworzeniu modeli matematycznych geometrii wytwarzanych przyrostowo, w celu prowadzenia komputerowych analiz wytrzymałościowych. Opracowana metoda i konsekwentne jej doskonalenie pozwoli w dalszej perspektywie na optymalizację technologii wytwarzania przyrostowego, szczególnie zorientowaną na wytwarzanie prototypów

części lub zespołów maszyn z programowaną geometrią wewnętrzną, tj. idealnie dopasowaną do warunków brzegowych.

W celu uzyskania modeli matematycznych wybranych struktur geometrii wypełnienia wewnętrznego i potwierdzenie skuteczności metody, wykonano badania złożone z trzech etapów:

- laboratoryjne, na próbkach normatywnych w celu pozyskania modelu matematycznego struktury,
- laboratoryjne (ugięcie statyczne), na wytworzonych addytywnie prototypach części w celu weryfikacji dokładności metody,
- komputerowe na modelach CAD przy wykorzystaniu modeli matematycznych badanych struktur.

Słowa kluczowe: addytywne wytwarzanie, szacowanie wytrzymałości, modele matematyczne, polimery, szybkie prototypowanie, skanowanie 3D, druk 3D

Strength estimation for prototypes additively manufactured in FDM technology

Abstract

This paper proposes a new method of strength estimation enabling the use of potential of FDM technology on an industry scale through the controlled selection of internal geometry for additively manufactured prototypes. Novelty of this method consists in the possibility to quickly and relatively precisely select internal geometry without the necessity to modify and adapt CAD models. The said method is based on a mathematical model of an additively manufactured structure, as well as spatial geometry designed to be manufactured. The effectiveness of this method has been proved for two types of prototypes on the basis of testing of three representative internal geometries: homogenous-fibrous, lattice, ribbed.

Currently, constructions of machines face higher and higher requirements. What matters in nowadays machines, apart from high resistance and minimal basic weight, is simplicity and speed of manufacturing and installation of new components, as well as the possibility of fast adaptation to the posed task. Machine's appearance is also important. All this is connected with the necessity of rapid manufacturing of functional components and mechanisms prototypes, since it is vital that the designed machine can be tested, implemented into production and started to be sold, as soon as possible. This is the reason why the topic of conscious and optimal use of the additive technologies is so important.

An analysis of the state of knowledge in the field of the examined issue showed that the currently used methods of prototypes resistance estimation do not fit into the backdrop of the rapid prototyping methods and they are not optimal from the perspective of their use in industry. This is because of relatively high costs or time required to obtain satisfying results.

Based on the analysis of the state of the issue and the author's testing, the following conclusion has been made – a method of resistance estimation for additively manufactured prototypes should be developed, so that the estimation process is carried out without the necessity to perform any destructive experiments. In this method, available technologies enabling rapid computer simulations, fast measurements and precise experimental testing correlated with computer models, should be taken into account.

This is the reason why the tests described in this monograph focus on creating mathematical models of additively manufactured geometries in order to perform computer strength analyses. The developed method and its consistent optimization will allow, in the long run, optimization of additive manufacturing technology particularly orientated at manufacturing prototypes of components or assemblies of

machinery with programmed internal geometry, that is geometry perfectly adapted to the boundary conditions.

In order to obtain mathematical models of the selected internal geometries and confirm the effectiveness of this method, three-stage testing has been carried out:

- laboratory testing, on normative samples, with the aim to obtain a mathematical model of the structure,
- laboratory testing (static deflection), on additively manufactured prototypes of components, with the aim to verify the accuracy of the method,
- computer testing on CAD models with the use of mathematical models of the structures tested.

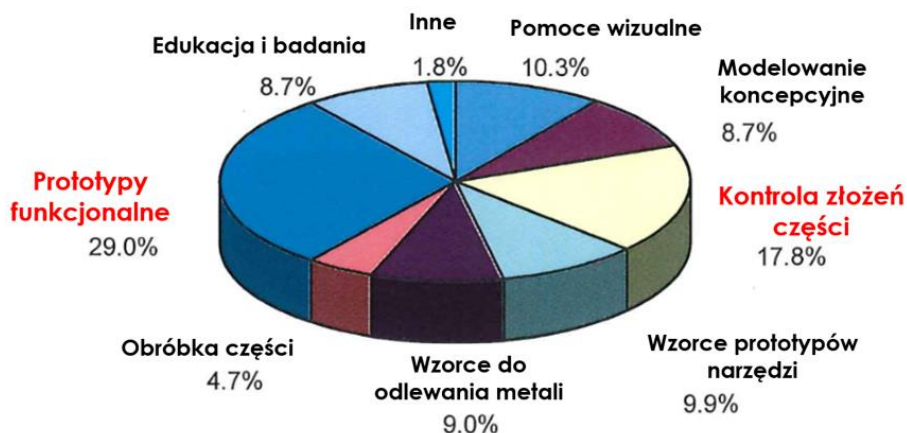
Keywords: additive manufacturing, strength estimation, mathematical models, polymers, rapid prototyping, 3D scanning, 3D printing

Stosowane oznaczenia

E_{ii}	– moduł Younga w kierunku osi i ,
ε_{ii}	– odkształcenie normalne wzdłuż osi i ,
ν_{ij}	– współczynnik Poissona w kierunku osi j , na płaszczyźnie o kierunku normalnej i ,
G_{ij}	– moduł Kirchhoffa w kierunku osi j , na płaszczyźnie o kierunku normalnej i ,
γ_{ij}	– odkształcenie postaciowe,
σ_{ii}	– naprężenia normalne,
τ_{ij}	– naprężenia styczne.

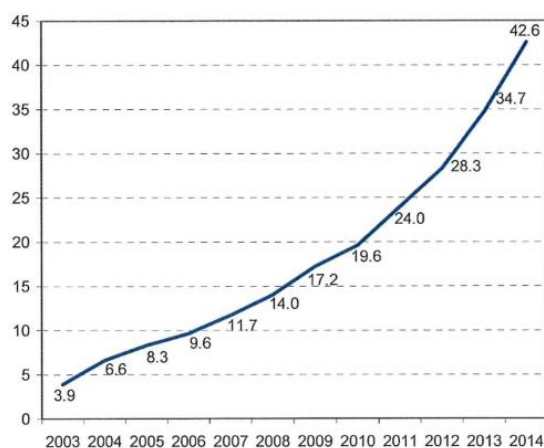
1. Wprowadzenie

Najnowsze źródła literaturowe [51, 88, 144] pokazują, że dynamiczny rozwój technologii wytwarzania przyrostowego TWP (ang. *Additive Manufacturing* – AM), powszechnie zwanych drukiem 3D (ang. *3D Printing*), sprawia iż stają się one coraz poważniejszą alternatywą dla konwencjonalnych technologii wytwarzania. Technologie przyrostowe (addytywne) są w coraz większym stopniu stosowane do coraz bardziej wymagających zadań, np.: produkcja narzędzi (9,9% w 2015 roku), dopasowanie i montaż – kontrola złożów części (17,8% w 2015 roku) oraz produkcja prototypów funkcjonalnych (29% w 2015 roku).



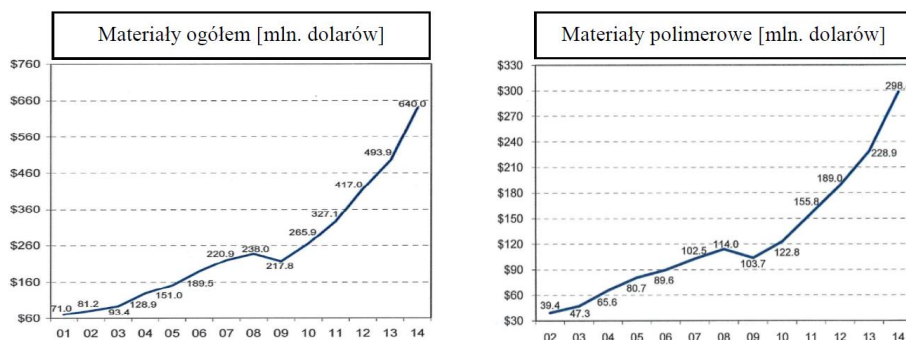
Rys. 1.1. Procentowe wykorzystanie technologii addytywnego wytwarzania w produkcji [144]

Od 2003 roku stale rośnie również procentowy udział liczby części do prototypów i maszyn, które zostały wyprodukowane z wykorzystaniem technologii wytwarzania przyrostowego. W 2015 roku spośród wszystkich modeli wyprodukowanych z użyciem technologii wytwarzania przyrostowego 42,6% było używanych jako części do prototypów i maszyn (rys. 1.2).



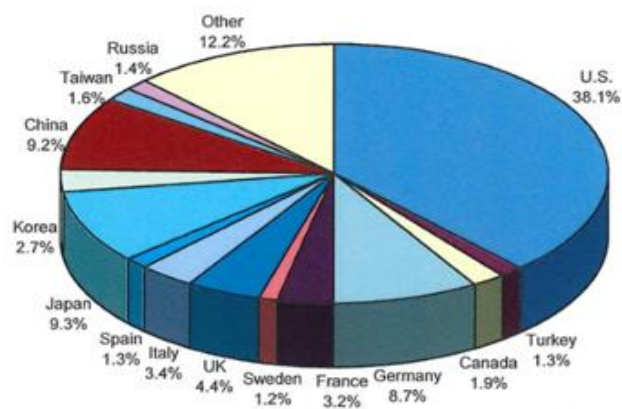
Rys. 1.2. Wzrost liczby części prototypów i maszyn wyprodukowanych z wykorzystaniem TWP [144]

Wzrost procentowego udziału technologii wytwarzania przyrostowego w produkcji ma swoje bezpośrednie przełożenie na sprzedaż materiałów. W 2014 r. łączna wartość sprzedanych materiałów wykorzystywanych w produkcji przyrostowej wynosiła 640 000 000 \$, w tym 298 000 000 \$ to wartość sprzedanych materiałów polimerowych (rys. 1.3).

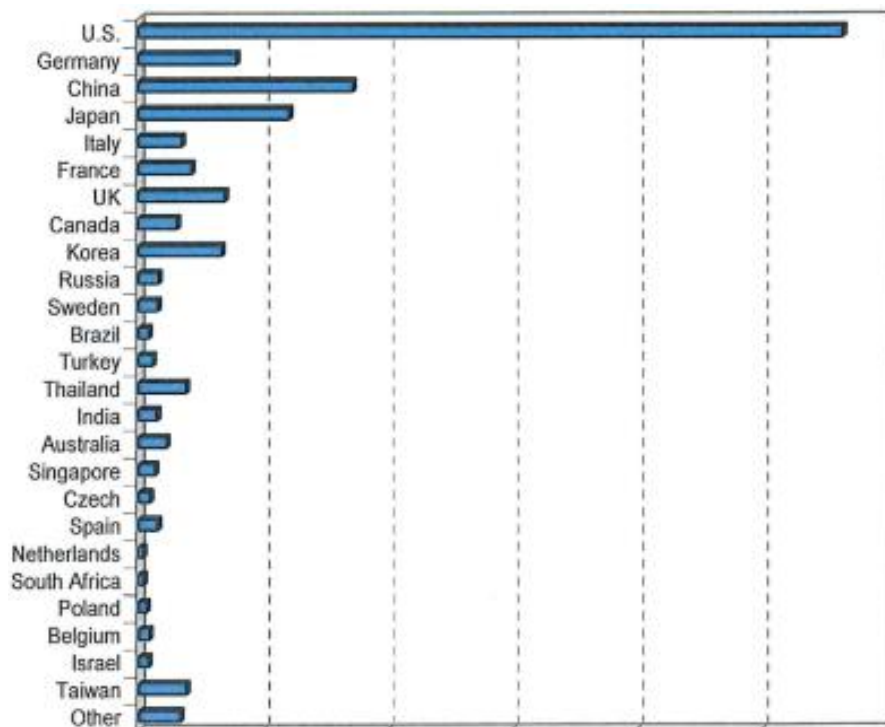


Rys. 1.3. Wartości materiałów technologii addytywnych sprzedanych w latach 2001–2014 [144]

Aktualnie 49 światowych firm oferuje maszyny produkcyjne pracujące w technologiach przyrostowych, które są przeznaczone dla przemysłu. Jak pokazują dane sprzedażowe jednego z potentatów technologii addytywnych i właściciela technologii – firmy FDM Stratasys Ltd., w 2014 roku sprzedano 6665 maszyn do różnych krajów świata, w tym do Polski. Polska jest jednak na 18 miejscu (2014 rok) w rankingu liczby zakupionych maszyn przemysłowych do addytywnego wytwarzania (rys. 1.4, rys. 1.5).



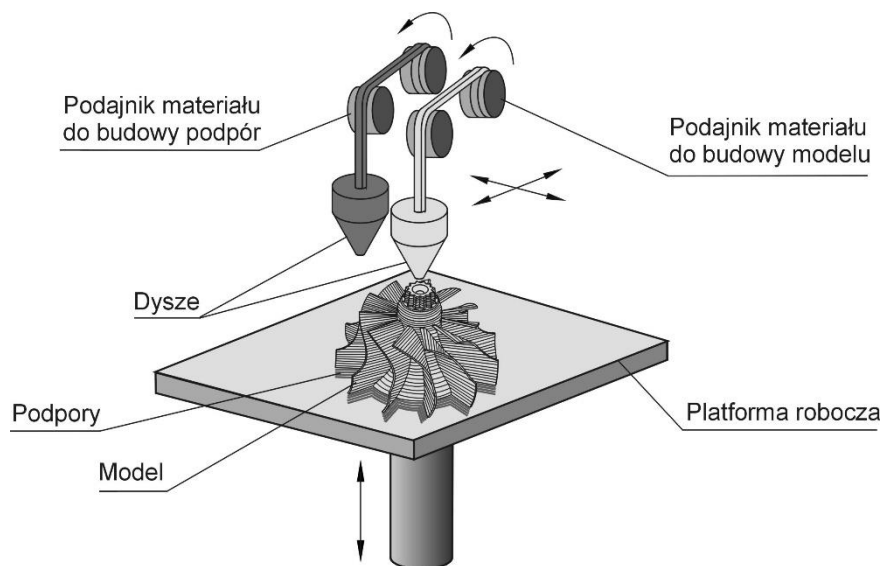
Rys. 1.4. Procentowy udział maszyn TWP zakupionych w danym kraju [144]



Rys. 1.5. Względna liczba maszyn TWP w danym kraju [144]

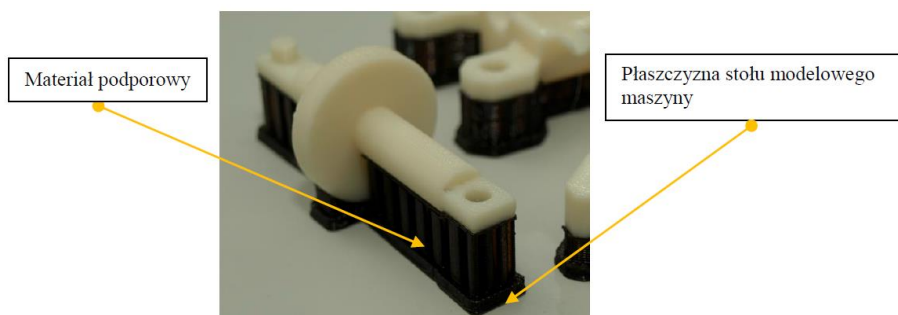
Technologia FDM (ang. *Fused Deposition Modeling*) jest jedną z szesnastu reprezentatywnych technologii wytwarzania przyrostowego [11, 19, 43, 47, 66, 82, 87,

96, 98–103, 120, 126]. Technologia FDM należy do powszechnie stosowanych technologii [51, 58, 144] z grupy szybkiego prototypowania RP (ang. *Rapid Prototyping*) w produkcji prototypów. Aktualnie FDM stanowi ponad 50% rynku technologii wytwarzania przyrostowego [144]. FDM polega na warstwowym nakładaniu przez dwudyszową głowicę uplastycznionego materiału modelowego i materiału podporowego (rys. 1.6). Materiałem modelowym i podporowym jest polimer termoutwardzalny.



Rys. 1.6. Schemat koncepcyjny reprezentatywnej maszyny pracującej w technologii FDM

Dwudyszowa głowica sterowana numerycznie nanosi materiał na ruchomy stół opuszczany o grubości kolejnych warstw. Materiał jest наносzony naprzemiennie – materiał modelowy i materiał podporowy w każdym cyklu. Tak powstaje część z materiału modelowego wspieranego materiałem podporowym. Materiał podporowy nakładany jest tam, gdzie część nie przylega bezpośrednio do stołu modelowego (rys. 1.7).

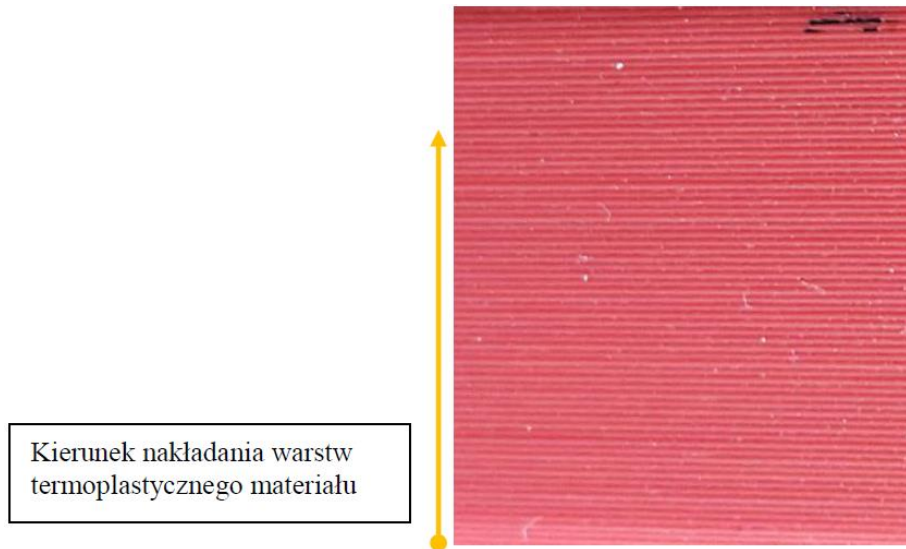


Rys. 1.7. Przykładowa część wytworzona z wykorzystaniem technologii FDM

Powstałe w trakcie procesu wytwarzania podpory, usuwa się po jego zakończeniu przez oderwanie lub przez całkowite ich wypłukiwanie za pomocą specjalnej myjki cyrkulacyjnej. Części wytwarzane z wykorzystaniem technologii FDM, w porównaniu z pozostałymi technologiami przyrostowymi wykorzystującymi materiały niemetalowe (polimery, żywice fotoutwardzalne, воск), charakteryzują się relatywnie dużą wytrzymałością mechaniczną, odpornością na wysokie temperatury (obecnie do 216 °C), niezmiennością kształtów w czasie, odpornością na działanie wody oraz dużymi możliwościami obróbki, jak: obróbka skrawaniem, szlifowanie, wiercenie, galwanizacja, lakierowanie, metalizowanie [128].

Bardzo ważną cechą FDM, wynikającą ze specyfiki procesu – budowanie modeli warstwa po warstwie (rys. 1.8) – jest dowolne programowanie geometrii wewnętrznej budowanych części. To oznacza, że użytkownik może w sposób dowolny generować kształt geometrii wypełnienia wewnętrznego prototypów wytwarzanych przyrostowo tą metodą, bez konieczności stosowania struktur wspierających (rys. 1.9). Dodatkowo, technologia FDM umożliwia ingerencję mechaniczną w geometrię wewnętrzną w trakcie procesu jej wytwarzania. Przez zatrzymanie procesu wytwarzania na wybranej warstwie budowanego modelu, możliwe jest wtapianie w geometrię wewnętrzną elementów wzmacniających: metalowej siatki, cienkich prętów lub nakrętek i tulei, które np. zawierają gwint. Proces wytwarzania po włożeniu wzmocnienia można wznowić w dowolnej chwili.

Budowanie przyrostowe prototypów oznacza przede wszystkim, że geometria wewnętrzna części prototypu maszyny może być idealnie dobrana i zoptymalizowana (zaprogramowana) pod kątem występującego pola obciążeń zewnętrznych, warunków pracy lub innych czynników, np. minimalizowanie masy całkowitej części, przy zachowaniu jej pierwotnego kształtu zewnętrznego.



Rys. 1.8. Wycinek ścianki modelu wytwarzanego w technologii FDM



Rys. 1.9. Przekrój przez prototyp po obróbce wykończeniowej (lakierowanie) z kratową geometrią wewnętrzną

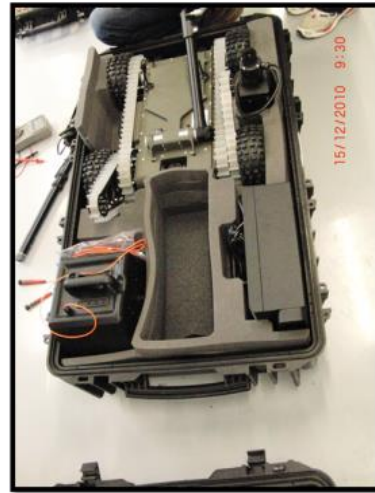
Dzięki programowanej geometrii wewnętrznej można tak optymalizować prototypy, aby przy zadanej wytrzymałości spełniały swoje założone funkcje. Idąc dalej, masa bierna maszyn, którą stanowią: masa osłon, korpusów, obudów a nawet części czynnych (pracujących w maszynach), może zostać zmniejszona do wymaganego minimum, przy zachowaniu założonej wytrzymałości.

Projektowanie i wdrażanie takich podzespołów ma bezpośrednie przełożenie na poprawienie osiągnięć maszyn i na lepsze dopasowanie wytrzymałości części do czynników zewnętrznych, np. budowanie ultralekkich korpusów maszyn [1, 24, 38, 120] lub części ze strukturą (geometrią) wewnętrzną zoptymalizowaną pod względem warunków brzegowych i masy.

Aktualnie konstrukcjom nowoczesnych maszyn stawiane są coraz wyższe wymagania. Oprócz dużej wytrzymałości przy minimalnej masie własnej, znaczenie ma także łatwość i szybkość wytwarzania oraz montażu, a niekiedy również możliwość szybkiej rekonfiguracji – adaptacji do postawionego zadania. Nie bez znaczenia jest również wygląd maszyn. To wszystko wiąże się z koniecznością szybkiego wytwarzania prototypów części i mechanizmów. Bardzo istotne jest, aby zaprojektowaną maszynę można było jak najszybciej przetestować i wdrożyć do produkcji. Tu z pomocą przychodzi technologia FDM, która umożliwia budowanie funkcjonalnych prototypów z przemysłowych polimerów. Funkcjonalne prototypy wymagają jednak świadomego wytwarzania. Inżynier musi wziąć pod uwagę szereg parametrów mechanicznych wymaganych do ich prawidłowej pracy. Jednym z nich jest wytrzymałość. Aktualnie szacowanie wytrzymałości i dobór geometrii wewnętrznych dla prototypów wytwarzanych przyrostowo może być realizowane z użyciem wymienionych czterech metod:

- badania niszczące prototypów,
- analizy symulacyjne idealnie odwzorowanych geometrii wytwarzanych prototypów,
- badania niszczące próbek normatywnych,
- zgrubne szacowanie wytrzymałości na podstawie ogólnie zebranych wniosków z wyników dostępnych prac badawczych.

Zidentyfikowane metody nie należą jednak do grupy metod szybkiego prototypowania, choć są źródłem cennych wniosków do prac praktycznych. W efekcie oznacza to, że pomimo dynamicznego rozwoju technologii FDM, dzięki którym możliwe jest wytwarzanie części prototypów o niemalże dowolnych kształtach [1, 10, 13, 16, 18, 24, 60, 67, 83, 88, 107, 123, 125]. Elementy te pod względem wyglądu, jakości wykonania oraz dokładności wymiarowej nadawałyby się do użytku jako finalne części maszyn, nie ma jednak możliwości wykonywania nieniszczących analiz mających na celu estymację ich wytrzymałości. Wynika to z faktu, że prototypy choć powstają z materiału izotropowego to ich struktura geometryczna, z racji nakładania materiału w postaci włókna warstwa po warstwie, wykazuje właściwości ortotropowe [5–7, 21, 37, 53, 62, 75, 92, 97, 112]. Obecnie bez badań niszczących nie można w jednoznaczny sposób stwierdzić, jak zmiana geometrii wewnętrznej (lita, kratownica, „plaster miodu” itp.) wpłynie na parametry końcowe prototypu. Jest to spowodowane brakiem odpowiednich modeli numerycznych i metod estymacji wytrzymałości.



Rys. 1.10. Korpus nawijarki z materiału ABS-M30, wytworzony z zastosowaniem technologii FDM (po lewej). Nawijarka w zestawie z robotem mobilnym jako gotowy produkt sprzedażowy (po prawej)

Od 2010 roku technologia FDM jest stosowana w Instytucie PIAP w produkcji modeli, prototypów, a także w produkcji części użytkowych. Wśród wielu przykładów wykorzystania technologii do produkcji gotowych części jest korpus zewnętrznej nawijarki światłowodowej stosowanej jako wyposażenie jednego z robotów mobilnych PIAP. Nawijarka (rys. 1.10, rys. 1.11) została zaprojektowana z myślą o realizacji w technologii FDM. Została wytworzona z materiału ABS-M30. Po zakończeniu procesu wytwarzania poddano ją wygładzaniu oraz lakierowaniu lakierem samochodowym. Ścianki nawijarki zostały wytworzone z zastosowaniem odpowiednio dobrego wypełnienia wewnętrznego, które usztywnia konstrukcję, czyniąc ją jednocześnie lekką.



Rys. 1.11. Funkcjonalny prototyp innego typu korpusu nawijarki z materiału ABS-M30 wytworzony z zastosowaniem technologii FDM



Rys. 1.12. Działający wielowirnikowiec zaprojektowany i wytworzony w Instytucie PIAP, w przeważającej większości z zastosowaniem technologii FDM

Technologia FDM jest nieocenionym narzędziem dającym możliwość szybkiego prototypowania bardzo skomplikowanych części oraz wytwarzania ich w czasie wolnym od pracy człowieka. Dlatego ma ona również zastosowanie w weryfikacji wielu wariantów różnych typów konstrukcji, np. różnych typów korpusów nawijarek projektowanych w Instytucie PIAP lub funkcjonalnych, mobilnych prototypów – wielowirnikowiec (rys. 1.12). W przypadku wytwarzania korpusu nawijarki zastosowano

w ściankach konstrukcję żeberkową, co z jednej strony pozwoliło na maksymalne skrócenie czasu wytwarzania, z drugiej zapewniło pożądaną wytrzymałość korpusu.

Poszczególne części prototypu wielowirnikowca wytwarzano, w zależności od zastosowania, z różnych materiałów dostępnych w technologii FDM oraz z zastosowaniem różnych parametrów wytwarzania. Nogi modelu zostały wytworzone z materiału ABS-M30 w taki sposób, aby włókna materiału były układane wzdłuż linii wyznaczającej kształt zewnętrzny nogi (charakterystyczne, widoczne na zdjęciu zaokrąglenie). Dzięki temu osiągnięto kompromis pomiędzy wytrzymałością, sprężystością i masą nogi. Koszki na akumulatory oraz osłona komputera głównego również zostały wytworzone z materiału ABS-M30 tyle tylko, że zastosowano w ich przypadku wypełnienie żeberkowe, co znacznie zmniejszyło ich masę. Z zastosowaniem technologii FDM powstało również mocowanie silników do ramy aluminiowej. Mocowanie zostało wytworzone z materiału ULTEM9085, ze względu na jego dużą wytrzymałość oraz odporność na rozwarstwienie oraz wysokie temperatury pracy i niepalność.

Technologia FDM miała również swoje zastosowanie w wytwarzaniu cienkościenniej obudowy kontrolera (rys. 1.13) do jednego z robotów Instytutu PIAP. Obudowa kontrolera została wytworzona z czarnego materiału ABS-M30, następnie poddana obróbce przez piaskowanie piaskiem kwarcowym oraz wygładzono warstwę z zastosowaniem dedykowanego rozpuszczalnika bazującego na acetonie.

W efekcie otrzymano w pełni funkcjonalną obudowę, która umożliwiała zamontowanie w jej wnętrzu wymaganych komponentów elektronicznych i stosowanie kontrolera w praktyce.



Rys. 1.13. Kontroler robota. Obudowa została wytworzona z zastosowaniem technologii FDM

Godnym uwagi zastosowaniem technologii FDM są elementy przekładni maltańskiej (rys. 1.14a) oraz kół zębatych (rys. 1.14b) pracujących w urządzeniach produkcji PIAP. Przekładnie oraz koła zębate wytworzono z bardzo wytrzymałego materiału ULTEM9085 jako części lite-włókniste. Dodatkowo, w trakcie przygotowania tych modeli do wytworzenia, zaprogramowano układanie włókien materiałowych w taki sposób, aby wszystkie elementy (zęby kół, ramiona przekładni) były identyczne i zdolne do przenoszenia takich samych sił, co w efekcie przełożyło się na równomierne ich zużywanie.



a)



b)

Rys. 1.14. Elementy wytworzone z zastosowaniem technologii FDM mające zastosowanie w urządzeniach produkcji PIAP: a) elementy przekładni maltańskiej wytworzone z materiału ULTEM9085; b) koła zębate wytworzone z materiału ULTEM9085

2. Badania i modelowanie struktur wytwarzanych przyrostowo

Od kilkunastu lat w Polsce prowadzone są badania naukowe i analizy rynku maszyn, materiałów oraz prowadzony jest regularny przegląd dostawców związanych z technologiami addytywnego wytwarzania [3, 8, 17, 29, 30–33, 51, 71, 89, 95, 106, 113]. Technologie przyrostowe w przeważającej większości stanowią skuteczne narzędzie w prowadzeniu badań naukowych oraz prac rozwojowych [1, 2, 10, 12–15, 18, 20, 22, 23, 26, 36, 37, 39, 43–46, 52, 54, 55, 59, 60, 61, 72, 74, 81, 82, 84, 91, 109, 133]. Autorzy badań opisują technologie wytwarzania przyrostowego, ich parametry oraz cechy w kontekście realizowanych prac badawczych i aplikacji. Jednym z wielu przykładów takich prac jest przegląd technologii przyrostowego wytwarzania [1], potencjalnie nadających się do produkcji części samolotów. W innych pracach [12–17] przedstawiono metody wytwarzania i sposoby oceny dokładności geometrycznej łopatek turbin silników lotniczych, przekładni zębatach oraz odwzorowanej kości odcinka żuchwy z zastosowaniem wspomaganych komputerowo współrzędnościowych systemów pomiarowych oraz metod addytywnego wytwarzania. W publikacjach autorzy prezentują wybrane technologie addytywnego wytwarzania w kontekście ich zastosowania jako współczesne narzędzie do szybkiego i precyzyjnego wytwarzania obiektów badawczych wymaganych w eksperymentach badawczych związanych z mechaniką i budową maszyn oraz bioinżynierią. Wyniki opisują w licznych publikacjach. W pracach [12–17] bardzo silnie skupiają się na dokładności odwzorowania modeli: odchyłki wymiarowe, jakość powierzchni, odwzorowanie kształtu.

Oprócz prac badawczych, w których technologie przyrostowe traktowane są jako narzędzie, w Polsce i na świecie prowadzone są liczne prace badawcze, w których te technologie, a w szczególności reprezentatywna technologia dla materiałów niemetalowych (FDM) [51, 144] są obiektami badawczymi. Autorzy skupiają się przede wszystkim na aspektach związanych z parametrami wytrzymałościowymi i jakościowymi wytworzonych modeli, próbek, struktur oraz optymalizacji pracy maszyn w kontekście uzyskania założonych właściwości modeli [63, 64, 117, 124, 127, 131, 134, 138]. Szczególnym wyjątkiem jest publikacja [115], której autorzy szeroko opisują i proponują rozwiązanie systemowe problemu decyzyjności w aspektach wytwarzania przyrostowego. Opisany system ma stanowić narzędzie wspomagania decyzji, która umożliwi szybką selekcję technologii i urządzeń, na których może zostać zrealizowana produkcja. W założeniach system ma zastąpić eksperta, który aktualnie pełni taką funkcję.

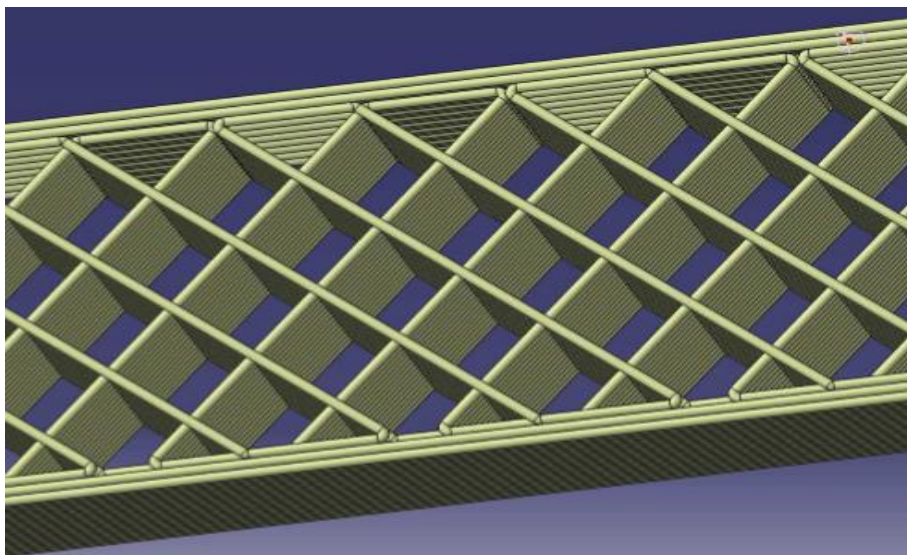
W drugiej grupie prac badawczych autorzy wielu publikacji skupiają się na problematyce wytrzymałości modeli wytwarzanych przyrostowo oraz tworzeniu modeli dla określonych aplikacji. Przykładowo autorzy [3] przedstawiając możliwości technologii FDM rozpoczynają dyskusję na temat przewidywania mechanicznego zachowania

wania części FDM. W tym kontekście przedstawiają geometrie wytwarzane przyrostowo w technologii FDM jako struktury anizotropowe. W innych pracach [4, 146] autorzy skupiają się na cechach technologii FDM w kontekście jej zastosowania do budowy rusztowań tkankowych – scaffoldów, głównie w kontekście ustawień parametrów FDM takich jak np. szczeliny powietrzne między nakładanymi włóknami, szerokość rastra wewnętrznego – odpowiedni dobór geometrii wypełnienia – i weryfikują jak zmiana tych parametrów wpływa na właściwości mechaniczne i porowatość struktury z materiału ABS dla rusztowań tkankowych.

W literaturze występuje szereg prac badawczych, w których autorzy skupiają się na właściwościach mechanicznych modeli, ich badaniu i analizie parametrów technologii FDM oraz wpływie ich zmian na wyprodukowany model [4–8, 34, 36, 37, 39, 42, 49, 57, 62, 65, 68, 78, 82, 86, 93, 97, 116, 118, 121, 122, 128, 129, 135, 137, 139, 145]. Autorzy w tych pracach skupiają się jednak na wybranych przypadkach lub obiektach badawczych przez co wyciągnięcie wniosków ogólnych, dotyczących technologii FDM jest możliwe dopiero po analizie wielu pozycji literaturowych. Przykładowo w artykule [6] autorzy przedstawiają analizę dynamicznych właściwości mechanicznych materiału modeli z określonymi geometriami wypełnienia wewnętrznego wytwarzanych z materiału ABS w technologii FDM. Autorzy w pracy skupiają się na modyfikowaniu szerokości i kąta rastra (rozstawu między pojedynczymi włóknami układanego materiału) oraz na przykładowych strukturach geometrii wypełnienia prototypów. W innej pracy [7] autorzy skupiają się na mechanicznym zachowaniu lekkich części wytwarzanych w technologii FDM z użyciem systemu produkcyjnego FORTUS 400mc i materiału polieteroimidu (PEI) o nazwie handlowej ULTEM 9085. Autorzy wytworzyli i zbadali próbki (wymiary 160 mm × 40 mm × 12 mm) zawierające różnorodne geometrie wypełnienia wewnętrznego. W ramach badań opisanych w [7] przeprowadzono test zginania czteropunktowego (według normy C393 standardu ASTM), analizę właściwości wytrzymałościowych w zależności od typu geometrii wewnętrznej i ułożenia jej włókien, a także właściwości wytrzymałościowe w odniesieniu do masy próbek. Z kolei w [8] autorzy skupiają się na określeniu parametrów wytwarzania modelu w technologii FDM pod kątem jakości wykończenia powierzchni i określonej tolerancji modelu. Autorzy modyfikując parametry technologii – kąt rastra, tor narzędzia (głowicy), grubość warstwy, orientację, a następnie analizując szybkość budowania modeli, zaproponowali optymalne warunki wytwarzania modelu do celów użycia w technologii formowania z kauczuku silikonowego (SRM). Na podstawie wyników badań [8] autorzy przedstawili zalecane parametry poprawy jakości produkowanych części metodą FDM pod względem dokładności wymiarowej i chropowatości powierzchni, które mogą być stosowane w SRM. W innej pracy [27] przedstawiono badania próbek wytworzonych z polipropylenu (PP), jako potencjalnego kandydata do stosowania w technologii FDM. W ramach badań autorzy prześledzili cały łańcuch produkcji materiału, począwszy od produkcji granulatu PP aż po wykonanie i zbadanie próbek testowych. W publikacji wykazano, że technologia FDM umożliwia wytwarzanie elementów o odpowiednich właściwościach mechanicznych, którymi można sterować w zależności od zmiany parametrów procesu FDM. Przedstawiono także istotne wnioski końcowe – wytwarzane próbki były najszybsze w kierunku układania włókien, grubość warstwy ma bardzo znikomy wpływ na wytrzymałość modeli, kształt geometrii wewnętrznej (ułożenie włókien)

ma bardzo duży wpływ na wytrzymałość próbek; wytrzymałość mechaniczna próbek wytwarzanych w technologii FDM była o 20–30% mniejsza w stosunku do wytrzymałości takich samych próbek wytworzonych wtryskowo. W pracy [121] zaprezentowano wyniki analizy ugięcia odpowiednio przygotowanych belek o wymiarach 120 mm × 7,62 mm × 7,62 mm, wykonanych metodą FDM z wypełnieniem litym-włóknistym układanym pod różnymi kątami. Analizowano wpływ kierunku ułożenia włókien wypełnienia wnętrza belek oraz orientacji warstw na ich sztywność. Autorzy udowadniają, że największą sztywność modeli wykonywanych w technologii FDM uzyskuje się gdy przyłożone do nich obciążenie działa wzdłuż kierunku ułożenia warstw, a nie prostopadle do warstw.

Istnieje również wiele opracowań mających na celu bezpośrednie modyfikacje technologii FDM lub jej wybranych parametrów przede wszystkim w kontekście wyeliminowania jej bieżących wad lub ograniczeń, a nawet jej optymalizację [29, 35, 40, 46, 48, 69, 70, 73, 75–77, 79, 80, 85, 86, 90–92, 94, 105, 110, 112, 114, 130, 132, 136, 148]. Do ciekawszych przykładów należą prace [28, 119] w których zaprezentowano propozycję metody ulepszenia technologii FDM prezentując nową maszynę – wylączarkę umożliwiającą nakładanie ścieżek w przestrzeni 3D, a nie jak to ma miejsce w przypadku technologii FDM w płaszczyźnie. Modyfikacja technologii FDM, którą nazwano Curved Layer Fused Deposition Modeling (CLFDM) została szczegółowo opisana. Wyniki prac mają silne przełożenie na potencjalne zwiększenie użyteczności technologii FDM.



Rys. 2.1. Dokładne odwzorowanie geometrii w systemie CAD dla technologii FDM, wykonane na potrzeby obliczeń numerycznych [37]

Analizując prace badawcze można zaobserwować dążenie naukowców do precyzyjnej estymacji wytrzymałości modeli wytwarzanych przyrostowo w technologii

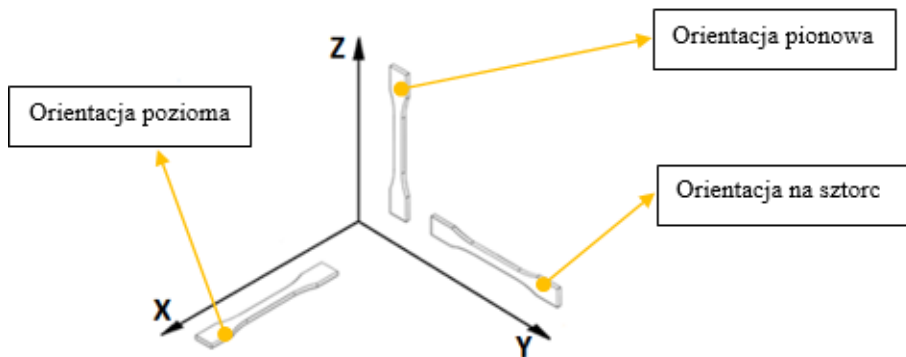
FDM. Ciekawe podejście zaprezentowano w kilku pracach badawczych [37, 85, 111]. Autorzy zajęli się tematem dokładnego modelowania geometrii i struktur przeznaczonych do wytworzenia w technologii FDM (rys. 2.1).

W pracach przedstawiono wyniki badań geometrii, które na etapie modelowania CAD zaprojektowano dokładnie w taki sposób, w jaki są one tworzone w rzeczywistości. Takie podejście do modelowania, w celu oszacowania wytrzymałości z wykorzystaniem systemów MES, jest jednak czasochłonne oraz wymaga znacznych mocy obliczeniowych na etapie modelowania i analiz symulacyjnych. To podejście, choć bardzo słuszne, bo odwzorowuje geometrię rzeczywistą, nie wpisuje się w konwencję szybkiego prototypowania. Mimo że efekty prac [37, 85, 111] dają zadowalające wyniki obliczeń, to jednak koszt ich uzyskania sprawia, że proponowana metoda może być nieefektywna w powszechnym wykorzystaniu.

Analiza dokonanego przeglądu literatury krajowej i zagranicznej wyraźnie pokazuje, że od co najmniej kilkunastu lat technologie wytwarzania przyrostowego bardzo dynamicznie są stosowane w różnych gałęziach nauki, a ich znaczenie i użyteczność w przemyśle stale wzrasta. Obserwuje się szereg pozycji traktujących temat wytwarzania przyrostowego w sposób przeglądowy w odniesieniu do teraźniejszości oraz prognoz na przyszłość – przegląd i wizje sposobu pracy maszyn oraz ich możliwości, przegląd zastosowań technologii w kontekście możliwości i ograniczeń w rozwiązywaniu różnorodnych problemów badawczych, czy wreszcie przegląd i systematykę technologii (np. ze względu na ich zastosowanie). Wyraźnie dostrzegalna staje się ogromna liczba oraz szerokie spektrum prowadzonych prac badawczych w obszarach związanych z technologiami addytywnego wytwarzania – badania wytrzymałościowe próbek, modeli i prototypów wytworzonych przyrostowo, opracowywanie oraz badanie nowych materiałów, opracowywanie nowych algorytmów sterowania maszyn, opracowywanie nowych metod wytwarzania części lub narzędzi. Taki zakres prac można zaobserwować w szczególności w tematyce związanej bezpośrednio z technologią FDM. Prace te jednak skupiają się na bardzo określonych, wąsko zakrojonych tematach, obiektach badawczych lub określonym zastosowaniu technologii w rozwiązywaniu specjalistycznych problemów. Wyraźnie rysuje się trend pokazujący wyniki badań nad rozwiązaniami bardzo precyzyjnie i wąsko przedstawianych zagadnień badawczych, czasami wręcz na pograniczu niszowych zastosowań lub wiedzy. Mimo licznych publikacji w zakresie optymalizacji i modyfikacji samej technologii trudno znaleźć w literaturze pozycje, w których autorzy próbują zająć się tematyką związaną z technologią FDM w sposób kompleksowy. Jedyne w kilku pozycjach literaturowych autorzy opisują próby zdefiniowania metod modelowania CAD struktur wytwarzanych w technologii FDM pod kątem szacowania ich wytrzymałości albo metodę związaną z procesami decyzyjnymi (np. dotyczące odpowiedniego doboru parametrów technologii). Oprócz kilku pozycji [28, 37, 115] w pozostałych przypadkach zdecydowanie brak jest badań, których wyniki mogłyby wyznaczać trendy dalszego rozwoju samej technologii FDM.

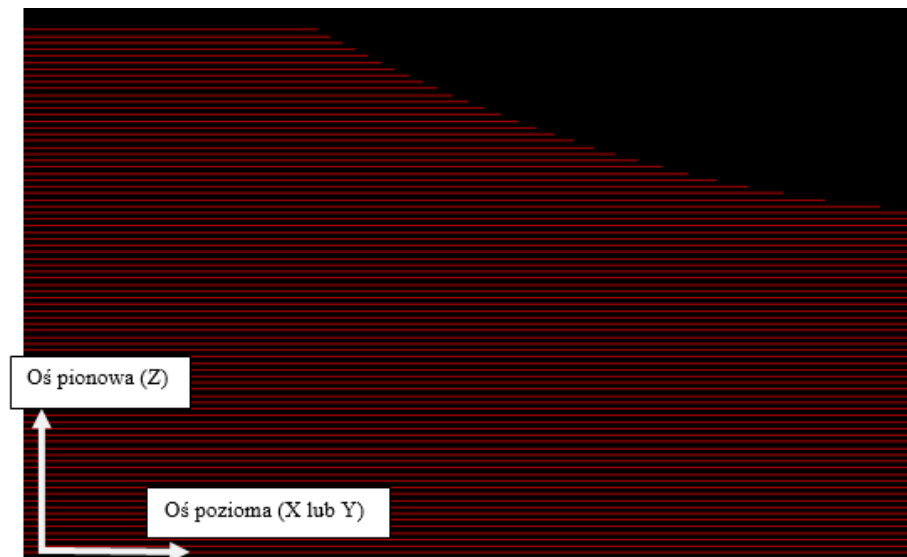
W ramach własnych prac badawczych, w zakresie estymacji wytrzymałości prototypów wytwarzanych przyrostowo, koncentrowano się na technologiach, których materiałami budulcowymi są polimery termoplastyczne i żywice fotoutwardzalne. Badania prowadzono w kontekście wytwarzania lekkich i wytrzymałych części prototypów maszyn [9, 41, 149]. Dokonano usystematyzowania wiedzy w tym zakresie

proponując nowy podział technologii wytwarzania przyrostowego na trzy grupy [19]. W dalszych pracach badawczych skupiano się przede wszystkim na wytrzymałości wytwarzanych modeli. W publikacji [25] opisano wyniki analizy zgrubnej oraz badań laboratoryjnych wykonanych na normatywnych próbkach wytworzonych. Próbkę wytworzono z materiałów reprezentatywnych wykorzystywanych w trzech głównych technologiach bazujących na materiałach polimerowych i żywicach – FDM, PolyJET oraz SLS (ang. *Selective Laser Sintering* – spiekanie proszków polimerowych). W ramach analizy zgrubnej określono: barwę, poziom przezroczystości, jakość powierzchni, połysk, śliskość w dotyku, twardość (próba rysowania paznokciem), odkształcalność, gęstość (opis gęstości: gęstość > 1 – materiał tonie w wodzie, gęstość < 1 – materiał unosi się w wodzie), zachowanie w płomieniu, zapach zgaszonego tworzywa, temperaturę krytyczną, przy której materiał ulegał topieniu oraz dodatkowo przeprowadzono testy podatności próbek na obróbkę: skrawaniem, lakierownie, metalizowanie. W ramach badania laboratoryjnych próbek normatywnych otrzymano wyniki związane bezpośrednio z wytrzymałością próbek: wytrzymałość na rozciąganie, moduł Younga, twardość, odporność na udary. Wyniki badań zgrubnych i normatywnych opisano w publikacji [25]. W badaniach technologii FDM skupiano się przede wszystkim na analizie zależności wytrzymałości próbek materiałowych od ich orientacji w komorze roboczej maszyny, co wynikało z definicji budowania modeli w technologii FDM, opisanej we wstępie. Zbadano różnice w wytrzymałości próbek wytwarzanych w orientacji poziomej i na sztorc (rys. 2.2) i udowodniono ortotropowy charakter geometrii wytwarzanych przyrostowo w technologii FDM [21].



Rys. 2.2. Orientacja próbek w komorze maszyny roboczej

W orientacji pionowej warstwy modelu przylegają do siebie, a w orientacji poziomej warstwa jest budowana w sposób ciągły. Z tego powodu próbka wytwarzana w technologii FDM z definicji ma gorsze parametry wytrzymałościowe wzdłuż osi Z (pionowej) niż wzdłuż osi X i Y (osie poziome). Dzieje się tak ze względu na brak ciągłości wytwarzania wzdłuż osi pionowej (rys. 2.3).



Rys. 2.3. Fragment próbki w orientacji na sztorc, podzielony na warstwy, co obrazują poziome linie

Dlatego w badaniach opisanych w [21] skupiono się przede wszystkim na wykazaniu różnic w wytrzymałości próbek drukowanych w poziomie i na sztorc. W tych orientacjach zachowana jest ciągłość nakładanego materiału (rys. 2.3). W celu wyznaczenia podstawowych zależności wytrzymałości próbki od jej orientacji w komorze roboczej maszyny, w ramach badań wytworzono zestaw próbek z materiałów należących do grupy reprezentatywnych dla technologii FDM: ABS-M30, PC (poliwęglan) oraz ULTEM 9085.

W badaniach [21] pokazano, że struktury geometryczne wytwarzane przyrostowo metodą FDM wykazują właściwości ortotropowe – ich parametry wytrzymałościowe różnią się w zależności od orientacji w komorze, co przedstawiono w tab. 1. oraz tab. 2.

Z analizy stanu zagadnienia wynika, że mimo prowadzenia wielu badań w obszarze wyznaczenia wytrzymałości prototypów wytwarzanych przyrostowo należy mimo wszystko podjąć się prac badawczych nad opracowaniem metody estymacji wytrzymałości takiej, która będzie realizowana bez konieczności prowadzenia badań niszczących, co obecnie znacznie podraża koszty. W metodzie tej powinny być uwzględnione dostępne technologie umożliwiające wykonywanie szybkich symulacji komputerowych, szybkich pomiarów oraz prowadzenie precyzyjnych eksperymentów badawczych skorelowanych z modelami komputerowymi. W badaniach należy skupić się na stworzeniu modeli matematycznych geometrii wytwarzanych przyrostowo w celu prowadzenia analiz wytrzymałościowych lub metody szybkiej budowy tych geometrii w systemach CAD. To w dalszej perspektywie pozwoli na optymalizację technologii wytwarzania przyrostowego pod kątem wytwarzania prototypów części lub zespołów maszyn z programowaną geometrią wewnętrzną, ściśle dopasowaną do warunków brzegowych.

Tab. 1. Wyniki badań próbek poddawanych jednoosiowemu rozciąganiu

Material	Wysokość pojedynczej warstwy	Nr próbki	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa] Ułożenie próbki w komorze maszyny: NA SZTORC	Moduł Younga E [MPa] Ułożenie próbki w komorze maszyny: NA SZTORC	Wytrzymałość na rozciąganie [MPa] Ułożenie próbki w komorze maszyny: POZIOME	Moduł Younga E [MPa] Ułożenie próbki w komorze maszyny: POZIOME
ABS-M30	0,127 mm (0,005")	1	26	1671	24	1578
		2	27	1824	24	1604
		3	26	1701	25	1658
		4	26	1738	25	1633
ABS-M30	0,178 mm (0,007")	1	23	1576	22	1527
		2	23	1577	22	1596
		3	23	1636	22	1490
		4	23	1628	22	1538
ABS-M30	0,254 mm (0,01")	1	25	1675	25	1835
		2	26	1823	25	1737
		3	25	1799	25	1805
		4	25	1724	24	1755
ABS-M30	0,330 mm (0,013")	1	22	1636	24	1633
		2	22	1659	24	1751
		3	22	1667	24	1677
		4	22	1631	24	1689
PC	0,254 mm (0,01")	1	48	1594	42	1576
		2	47	1539	42	1457
		3	47	1664	42	1481
		4	47	1672	41	1551
ULTEM 9085	0,254 mm (0,01")	1	57	1744	50	1605
		2	57	1843	49	1648
		3	57	1557	49	1643
		4	57	1706	49	1568

Tab. 2. Wyniki badań próbek poddawanych ścisnaniu

Materiał	Wysokość pojedynczej warstwy	Nr próbki	Wytrzymałość na ścisnienie [MPa] Ułożenie próbki w komorze maszyny: NA SZTORC	Wytrzymałość na ścisnienie [MPa] Ułożenie próbki w komorze maszyny: POZIOME
ABS-M30	0,127 mm (0,005")	1	45	53
		2	46	54
		3	45	55
		4	46	55
ABS-M30	0,178 mm (0,007")	1	45	45
		2	44	46
		3	45	45
		4	45	45
ABS-M30	0,254 mm (0,01")	1	55	58
		2	54	57
		3	54	56
		4	55	58
ABS-M30	0,330 mm (0,013")	1	46	55
		2	45	56
		3	45	55
		4	45	55
PC	0,254 mm (0,01")	1	62	71
		2	61	71
		3	62	70
		4	62	71
ULTEM 9085	0,254 mm (0,01")	1	85	91
		2	84	91
		3	85	91
		4	85	90

3. Model matematyczny

3.1. Struktura wytwarzana przyrostowo metodą FDM

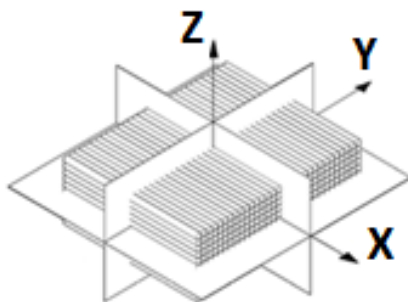
Materiałem reprezentatywnym stosowanym w technologii FDM, masowo aktualnie wykorzystywanym w przemyśle jest polimer ABS-M30. Jego właściwości przedstawiono w [153], a podstawowe parametry w tab. 3. Jest to materiał izotropowy, który jest używany w technologii FDM do produkcji modeli i prototypów funkcjonalnych.

Tab. 3. Podstawowe parametry polimeru ABS-M30 produkcji Stratasys Ltd.

Nazwa parametru	Wartość parametru
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	36
Wytrzymałość na zginanie [MPa]	61
Moduł Younga [MPa]	2413
Współczynnik Poissona	0,34
Moduł Kirchhoffa [MPa]	900
Gęstość [g/cm ³]	1,04

Budowanie prototypów z wykorzystaniem technologii FDM polega na nakładaniu kolejnych warstw polimeru termoutwardzalnego (np. ABS-M30) w postaci cienkiego włókna materiału izotropowego. Jednak powstały w ten sposób prototyp z wypełnieniem – geometrią wewnętrzną jako całość, wykazuje właściwości mechaniczne jak materiał ortotropowy. Wynika to z możliwości i specyfiki technologii FDM:

- dowolne sterowanie ułożeniem włókna materiałowego w płaszczyźnie poziomej (XY),
- budowanie modeli warstwa po warstwie (wzdłuż osi Z).



Rys. 3.1. Szkic struktury geometrycznej wytwarzanej przyrostowo w technologii FDM

To udowodniono m.in. w badaniach własnych [21] oraz badaniach prowadzonych w innych ośrodkach [2, 6, 36, 42, 53, 147]. Do opisu właściwości takich geometrii należy stosować model materiału ortotropowego [41]. A zatem w geometriach tego typu można wyróżnić trzy kierunki wzajemnie prostopadłe, zwane głównymi osiami materiałowymi (rys. 3.1). Kierunek X i Y są kierunkami układania włókna, kierunek Z jest kierunkiem przyrostu geometrii wzdłuż osi pionowej.

Struktura geometryczna utworzona w technologii FDM wykazuje właściwości ortotropowe. Zgodnie z uogólnionym prawem Hooke'a, równania konstytutywne, które określają właściwości mechaniczne struktury geometrycznej wytwarzanej przyrostowo w technologii FDM, można zapisać w postaci następującego równania macierzowego (3.1):

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{21}}{E_{22}} & -\frac{\nu_{31}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & -\frac{\nu_{32}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_{11}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

gdzie 1, 2, 3 oznaczają kolejno osie X, Y, Z, σ_{ij} oraz τ_{ij} to składowe wektora naprężeń, ε_{ij} oraz γ_{ij} to składowe wektora odkształceń, a macierz sztywności jest symetryczną macierzą zawierającą 12 wielkości:

- trzy moduły Younga: E_{11} , E_{22} , E_{33} ,
- trzy moduły Kirchhoffa: G_{23} , G_{31} , G_{12} ,
- oraz sześć modułów Poissona: ν_{21} , ν_{31} , ν_{12} , ν_{32} , ν_{13} , ν_{23} – w przypadku technologii FDM: $\nu_{12} = \nu_{21}$, $\nu_{13} = \nu_{31}$, $\nu_{23} = \nu_{32}$.

3.2. Metodyka szacowania wytrzymałości

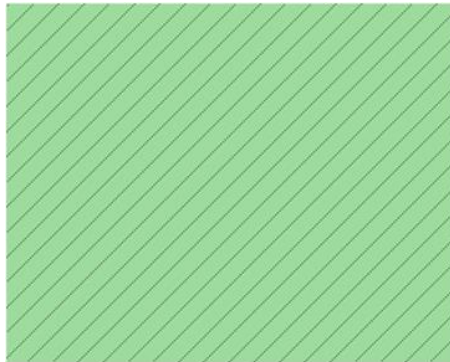
Aby określić wytrzymałość prototypu o zadanej geometrii wewnętrznej wykonanego metodą FDM zgodnie z proponowaną metodyką, niezbędne jest wykonanie modelu numerycznego i przeprowadzenie analizy wytrzymałości z zastosowaniem MES, przy wykorzystaniu modelu ortotropowego. W ramach przeglądu literatury zidentyfikowano prace badawcze [37, 85, 111], w których autorzy podejmują trud odwzorowania geometrycznego w programach do modelowania CAD struktur wypełnienia wewnętrznego prototypów. To w celu prowadzenia badań w komputerowych środowiskach symulacyjnych. Takie podejście, choć słuszne, bo umożliwia stosowanie modelu materiału izotropowego, jest podejściem czasochłonnym, ponieważ wymaga dokładnego odwzorowania geometrii rzeczywistej. Ponadto zastosowane podejście do

modelowania będzie wymagało dużych mocy obliczeniowych dla systemów komputerowych. Znajduje to przełożenie na bezpośredni czas i koszt uzyskania wyników.

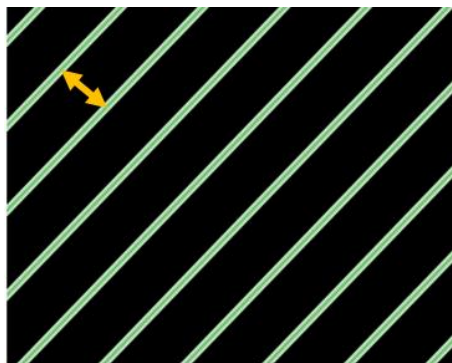
Dlatego w celu wykonania szybkich symulacji komputerowych należy zastosować tok rozumowania opisany w podrozdziale 3.1. Należy pamiętać o założeniu, że prototypy wytwarzane przyrostowo są reprezentowane w systemach do obliczeń komputerowych jako normalne (lite) modele CAD. Jeżeli te modele matematycznie będą opisywane jako struktury ortotropowe, wówczas należy się spodziewać, że szacowanie wytrzymałości i dobór geometrii wypełnienia prototypów wytwarzanych przyrostowo będzie procesem szybkim a przy tym nie będzie wymagał badań niszczących. Powinno to znacznie usprawnić proces projektowania tego typu prototypów, ponieważ będzie możliwe szacowanie ich wytrzymałości przed wytworzeniem, bez konieczności stosowania badań niszczących.

Dodatkowo części projektowane w systemie CAD, przy prezentowanym założeniu, nie będą wymagały żadnych modyfikacji geometrycznych takich jak, np.: odwzorowania geometrycznego wypełnienia wewnętrznego czy nakładanego włókna.

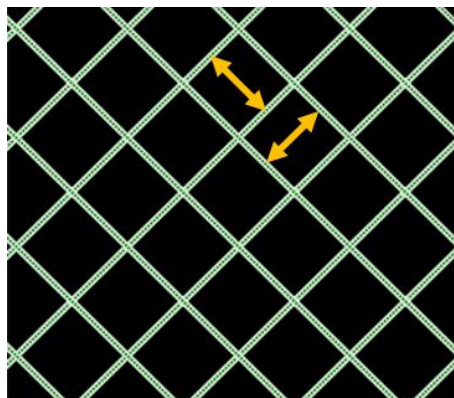
Metodyka ta bazuje na modelach CAD, które nie wymagają odwzorowania rzeczywistych geometrii wynikających z nakładania materiału w postaci włókna (warstwa po warstwie), ale są litymi bryłami utworzonymi w toku normalnego modelowania CAD. Takie podejście będzie miało bezpośrednie przełożenie na usprawnienie procesu doboru geometrii wypełnienia prototypów wytwarzanych przyrostowo i zostanie zweryfikowane na podstawie modeli z reprezentatywnego polimeru ABS-M30, co zostanie udowodnione na podstawie wykonanych badań laboratoryjnych i symulacji komputerowych parametrów macierzy sztywności dla trzech reprezentatywnych struktur geometrycznych wypełnienia prototypów (rys. 3.2–3.4): litej-włóknistej, żebrowej i kratowej. Wymiar charakterystyczny na rysunkach (rys. 3.3 i 3.4), oznaczony strzałkami wynosi 2 mm. Średnica włókna, z której wytwarzano geometrię wynosiła 0,1 mm.



Rys. 3.2. Przekrój w płaszczyźnie XY: geometria lita-włóknista



Rys. 3.3. Przekrój w płaszczyźnie XY: geometria żeberkowa



Rys. 3.4. Przekrój w płaszczyźnie XY: geometria kratowa

Wyznaczenie parametrów modelu numerycznego reprezentatywnych geometrii wypełnienia prototypów pozwoli na prowadzenie obliczeń, symulacji i analiz w środowisku programowym CAE/MES dla modeli CAD, przeznaczonych do wytwarzania technologią FDM. Założono, że metoda badawcza będzie powiązana z najnowszymi technologiami pomiarowymi [50, 56, 104, 108, 140–143, 150, 151] i obliczeniami komputerowymi [37, 111, 149, 154]. Dzięki temu opracowana metoda będzie wpisywać się w zbiór technologii Szybkiego Prototypowania. Skuteczności metody będzie weryfikowana na podstawie badań próbek normatywnych i badań specjalnie dobranych części prototypów o wybranych, reprezentatywnych geometriach wypełnienia.

Badania będą wykonywane z wykorzystaniem nowoczesnej aparatury [104, 151–154], zgodnej z aktualnymi standardami technologii Rapid Prototyping:

- centrum wytwórcze FORTUS 400mc pracujące w technologii wytwarzania przyrostowego FDM, które posłuży do produkcji obiektów badań – próbek normatywnych i prototypów części. Jest to maszyna reprezentatywna dla technologii FDM [153],

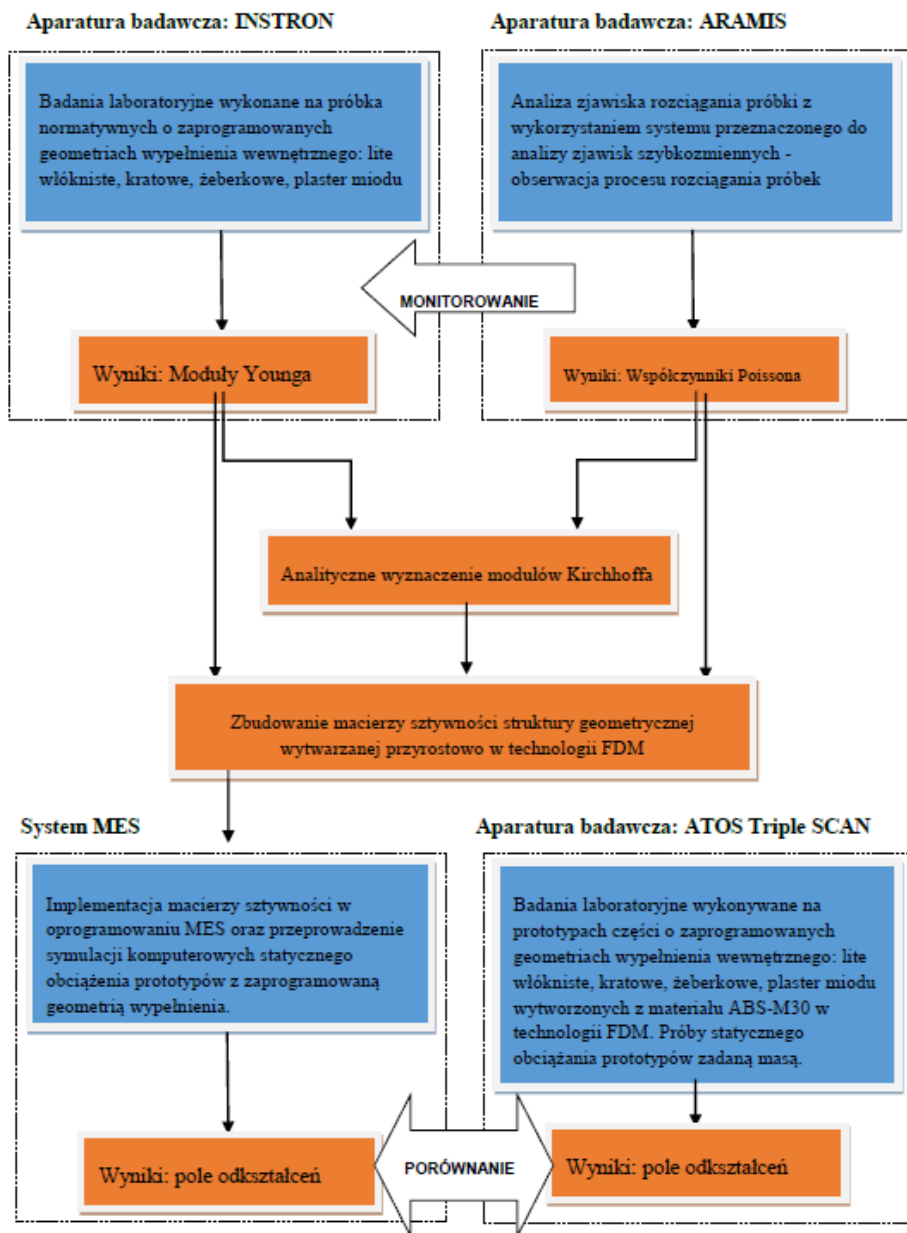
- optyczny, przemysłowy skaner 3D do wyznaczania pola odkształceń w stanie statycznego obciążenia – ATOS Triple SCAN (producent: GOM GmbH) [151],
- optyczny, przemysłowy system do dynamicznej analizy deformacji 3D: ARAMIS (producent: GOM GmbH) [104, 152],
- maszyna wytrzymałościowa do jednoosiowego rozciągania próbek, sprzęgnięta z jednostką monitorująco-obliczeniową: INSTRON (producent: INSTRON),
- system do komputerowych analiz symulacyjnych opartych na Metodzie Elementów Skończonych (MES) – ANSYS (producent: ANSYS Inc.) [154].

Aparatura badawcza została opisana w podrozdziale 4.3 *Aparatura badawcza*. Uwzględniając wyszczególnioną aparaturę opracowano algorytm, zastosowany do realizacji w ramach zaplanowanych badań, który przedstawiono na schemacie (rys. 3.5). Zgodnie z prezentowanym algorytmem badania zostały podzielone na dwie grupy – laboratoryjne oraz komputerowe. Badania laboratoryjne były prowadzone na próbkach normatywnych zawierających odpowiednie geometrie wewnętrzne wypełnienia, które były poddawane jednoosiowemu rozciąganiu na maszynie wytrzymałościowej. Badanie było monitorowane przez system obserwująco-analizujący, dzięki któremu możliwe było eksperymentalne wyznaczenie współczynników Poissona dla badanych próbek. Znając moduły Younga otrzymane w wyniku jednoosiowego rozciągania i wyznaczone z użyciem maszyny wytrzymałościowej oraz współczynniki Poissona, możliwe jest analityczne wyznaczenie modułów Kirchhoffa, dla szczególnego ułożenia próbek względem przyłożonego obciążenia, co zostało szczegółowo opisane w kolejnym rozdziale.

Wyznaczenie wymienionych współczynników i modułów umożliwia zbudowanie macierzy sztywności dla próbek zawierających określone geometrie wewnętrzne wypełnienia, która z kolei może stanowić podstawę do obliczeń numerycznych wytrzymałości.

Równolegle, w celu uzyskania informacji o odkształceniach, dla badanych prototypów przeprowadzono badania wytworzonych przyrostowo części poddawanych obciążeniu statycznemu, co opisano w rozdziale 5 *Komputerowe badania symulacyjne*. Wyniki eksperymentów posłużyły do zbudowania macierzy sztywności. Zostały wykorzystano w obliczeniach numerycznych metodą MES do analizy ugięcia prototypów pod wpływem analogicznej masy, jaką obciążano rzeczywiste prototypy. Obie charakterystyki ugięcia prototypów, tj. pozyskaną w wyniku badań laboratoryjnych oraz obliczeń komputerowych, bazujących na wyznaczonych macierzach sztywności, porównano i wyznaczono różnice.

Zaproponowany algorytm ma służyć do szacowania wytrzymałości prototypów budowanych przyrostowo i zawierających tak zwane zaprogramowane geometrie wewnętrzne. Algorytm został opracowany w celu doboru geometrii wewnętrznych dla prototypów wytwarzanych przyrostowo i stanowi pierwszy krok w procesie optymalizacji parametrów technologii FDM ukierunkowanej na budowanie ultralekkich części z zaprogramowaną geometrią wewnętrzną, dopasowaną do warunków brzegowych.



Rys. 3.5. Algorytm weryfikacji metodyki szacowania wytrzymałości prototypów wytwarzanych przyrostowo

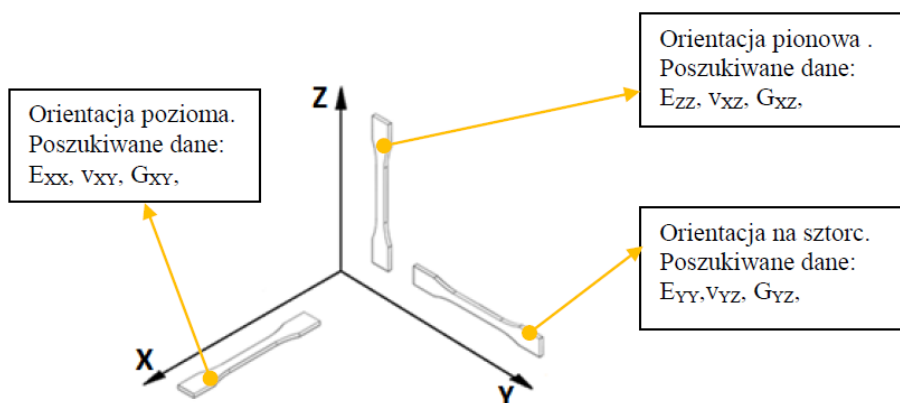
4. Badania laboratoryjne próbek

4.1. Założenia i metodyka badań laboratoryjnych

Prezentowana metodyka ma na celu wyznaczenie stałych macierzy sztywności modelu struktury ortotropowej budowanej warstwowo z izotropowego materiału – polimeru ABS-M30. W odniesieniu do wyznaczanych stałych przyjęto założenie upraszczające polegające na analitycznym wyznaczeniu modułów Kirchhoffa. To założenie zostało szczegółowo skomentowane w podrozdziale 4.1.1.

4.1.1. Przygotowanie i wytworzenie próbek normatywnych i prototypów części

Próbki normatywne wytworzono w trzech charakterystycznych orientacjach związanych z osiami głównymi maszyny, będącymi zarazem głównymi kierunkami modelu ortotropowego geometrii.

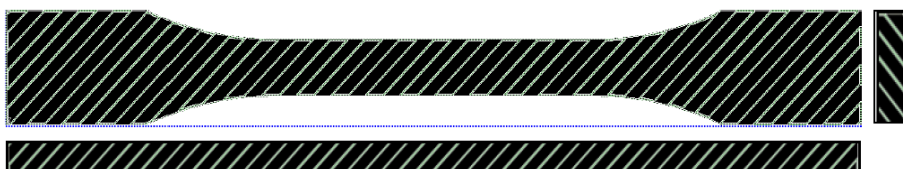


Rys. 4.1. Orientacja próbek normatywnych w komorze roboczej maszyny

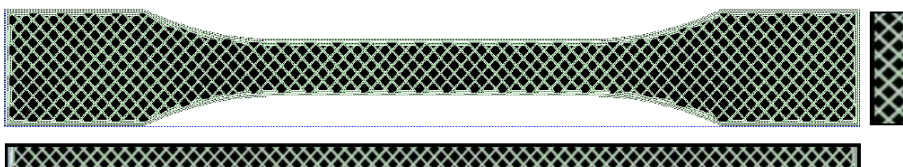
W odniesieniu do rysunku (rys. 4.1) ułożenia próbek normatywnych w komorze roboczej maszyny, oś główna pionowa Z pokrywała się z kierunkiem przyrostu modelu czyli z osią, wzdłuż której porusza się stół modelowy maszyny. Osie główne X i Y są osiami płaszczyzny poziomej i pokrywają się z płaszczyzną środkową pojedynczej warstwy budowanego modelu. Na rysunkach 4.2–4.4 przedstawiono przekroje w płaszczyźnie XY przez próbki zorientowane w trzech charakterystycznych ułożeniach: poziomo, na sztorc i pionowo.



Rys. 4.2. Geometria wypełnienia lita-włóknista

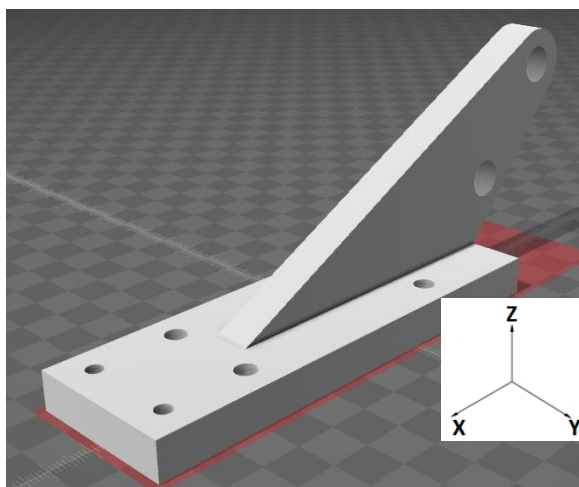


Rys. 4.3. Geometria wypełnienia żeberkowa

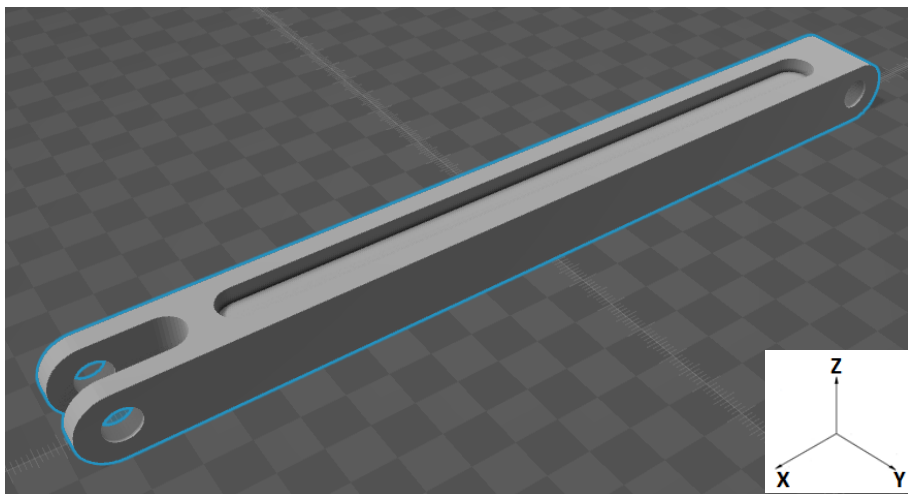


Rys. 4.4. Geometria wypełnienia kratowa

Założono badania trzech sztuk prototypów części na jedną serię pomiarową. Prototypy części wraz z uzasadnieniem doboru opisano w podrozdziale 4.2 *Dobór i wykonanie próbek i prototypów*.



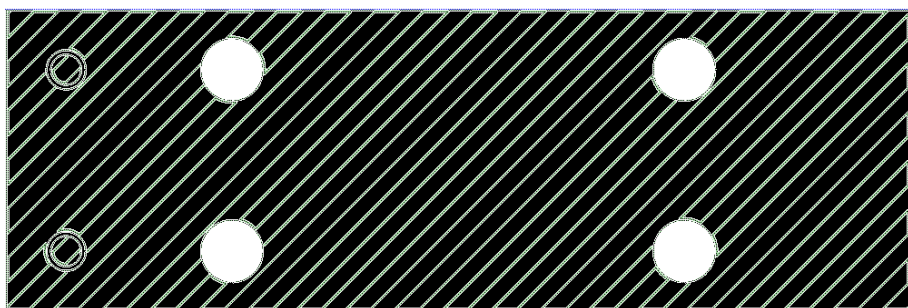
Rys. 4.5. Model CAD szczęki chwytaka



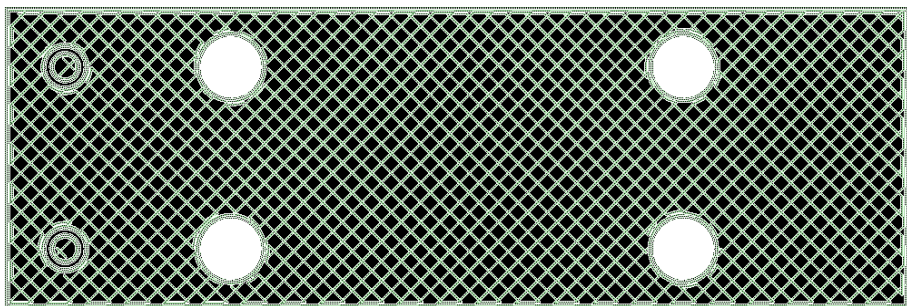
Rys. 4.6. Model CAD ramienia chwytaka



Rys. 4.7. Szczeka chwytaka, przekrój w płaszczyźnie XY: geometria lita-włóknista



Rys. 4.8. Szczeka chwytaka, przekrój w płaszczyźnie XY: geometria żeberkowa



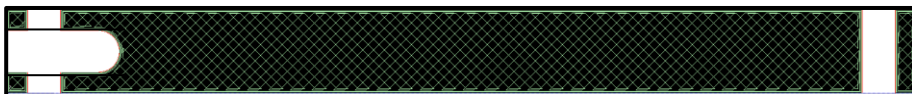
Rys. 4.9. Szczeka chwytaka, przekrój w płaszczyźnie XY: geometria kratowa



Rys. 4.10. Ramię chwytaka, przekrój osi symetrii w płaszczyźnie XY: geometria lita-włóknista



Rys. 4.11. Ramię chwytaka, przekrój osi symetrii w płaszczyźnie XY: geometria żeberkowa



Rys. 4.12. Ramię chwytaka, przekrój osi symetrii w płaszczyźnie XY: geometria kratowa

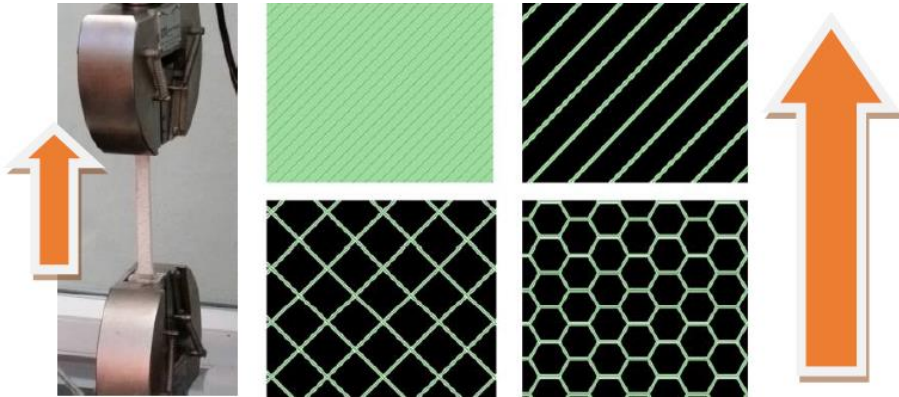
4.1.2. Badania laboratoryjne próbek normatywnych

Wynikiem badań laboratoryjnych próbek normatywnych będą następujące dane:

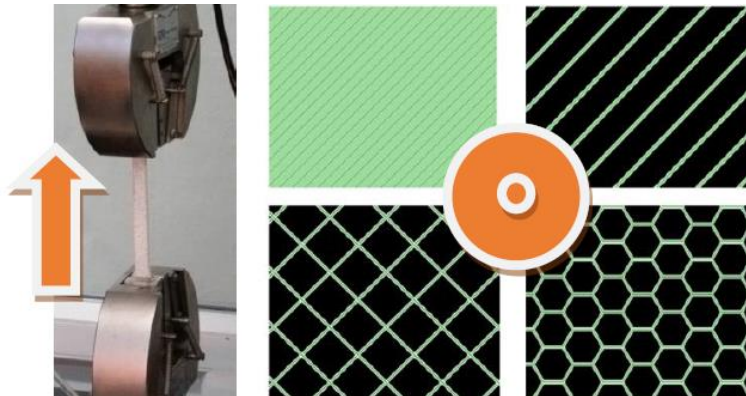
- trzy moduły Younga: E_{xx} , E_{yy} , E_{zz} (wyznaczone na podstawie monitorowania ekstensometru i siły rozciągającej – maszyna wytrzymałościowa INSTRON),
- sześć modułów Poissona: ν_{yx} , ν_{zx} , ν_{xy} , ν_{zy} , ν_{xz} , ν_{yz} (wyznaczone na podstawie dynamicznego monitorowania odkształcenia próbek metodą DIC), gdzie X, Y, Z są oznaczeniami osi głównych modelu geometrii ortotropowej.

Próbki wytworzono w taki sposób, aby kierunek przyłożenia siły rozciągającej w badaniach laboratoryjnych był zgodny z przedstawionym (rys. 4.13 i rys. 4.14).

Dla przypadku próbek wytworzonych w orientacji pionowej siła rozciągająca będzie działać prostopadle do geometrii wewnętrznej (rys. 4.16).



Rys. 4.13. Kierunek działania siły rozciągającej w odniesieniu do próbek wytwarzanych w orientacji poziomej i na sztorc, dla przykładowych geometrii wypełnienia wewnętrznego



Rys. 4.14. Kierunek działania siły rozciągającej w odniesieniu do próbek wytwarzanych w orientacji pionowej, dla przykładowych geometrii wypełnienia wewnętrznego

Testy jednoosiowego rozciągania próbek, w wyniku której będą otrzymane charakterystyki materiałowe geometrii wypełnienia, będzie monitorowana za pomocą systemu szybkich kamer ARAMIS [56, 104, 108, 151], który opisano w rozdziale 4.3. System szybkich kamer umożliwi monitorowanie deformacji próbek i wyznaczenie współczynników Poissona wyrażonych z definicji jako stosunek odkształcenia poprzecznego do odkształcenia podłużnego próbki.

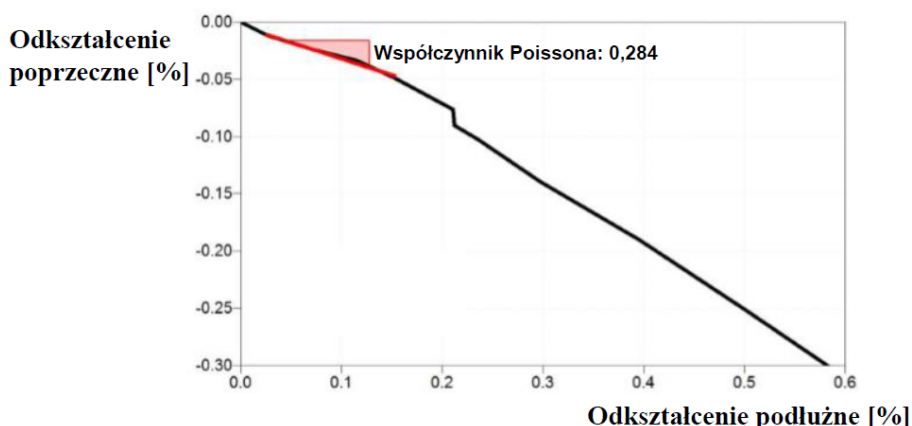
Zgodnie z algorytmami obliczeń systemu ARAMIS opisanymi w dokumentacji systemu, współczynnik Poissona jest definiowany jako ujemny stosunek technicznego odkształcenia poprzecznego ϵ_{techB} do technicznego odkształcenia podłużnego ϵ_{techL} w zakresie odkształcalnym, co można przedstawić wzorami (4.1) i (4.2).

$$\nu = -\frac{\epsilon_{techB}}{\epsilon_{techL}} \quad (4.1)$$

Odształcenia techniczne poprzeczne ε_{techB} i techniczne podłużne ε_{techL} są bezpośrednio obserwowane za pomocą systemu szybkich kamer ARAMIS. Współczynnik jest obliczany na podstawie dopasowania ujemnego nachylenia funkcji najmniejszych kwadratów do liniowego technicznego odkształcenia poprzecznego i technicznego odkształcenia podłużnego, wzdluznym krzywej odkształcenia w elastycznym zakresie (dla przykładu dla tworzyw sztucznych od 0,05% do 0,25%), co zobrazowano na wykresie (rys. 4.15) wykonanym na bazie dokumentacji technicznej systemu ARAMIS.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{techB} &= a\varepsilon_{techL} + b \\ v &= -a\end{aligned}\quad (4.2)$$

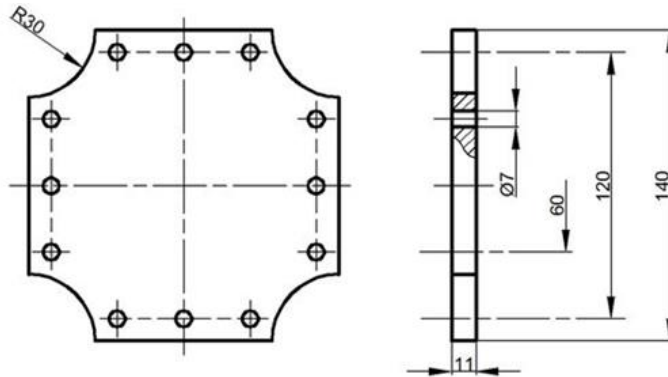
W prezentowany przypadku w równaniu (4.2) współczynnik $b = 0$. Przypadek, w którym współczynnik $b \neq 0$ może wynikać ze złego zamocowania próbki w szczękach maszyny i efektu napęcia wstępnego.



Rys. 4.15. Algorytm wyznaczania współczynników Poissona z wykorzystaniem systemu ARAMIS

4.1.3. Wyznaczanie analityczne modułów Kirchhoffa

Wyznaczanie modułów Kirchhoffa dla geometrii ortotropowych należy przeprowadzić na podstawie analizy stanu czystego ścinania [9]. Najefektywniejszą metodą wyznaczania modułu Kirchhoffa jest metoda Cyfrowej Korelacji Obrazu DIC (ang. *Digital Image Correlation*) [50, 108, 150]. Metoda ta, w dużym uproszczeniu, polega na obserwacji zmian ułożenia czterech charakterystycznych punktów pod wpływem jednoosiowego rozciągania, znajdujących się na powierzchni odpowiednich próbek (rys. 4.16) mocowanych w maszynie wytrzymałościowej w specjalnym i kosztownym uchwycie (rys. 4.17), umożliwiającym ich prawidłowe rozciąganie.



Rys. 4.16. Wymiary i kształt próbki do wyznaczania modułów Kirchhoffa



Rys. 4.17. Przykładowy uchwyt przeznaczony do prób czystego ścinania

Do wytworzenia jednej próbki, za pomocą której zostanie wyznaczony moduł Kirchhoffa, wymagane jest zużycie czternaście razy większej ilości materiału niż na jedną próbkę normatywną do klasycznego, jednoosiowego rozciągania. To po przemnożeniu przez 5 – tj. optymalną liczbę próbek na jedno badanie oraz przez 3 – tj. liczbę wynikającą z orientacji próbek w komorze roboczej podczas wytwarzania, i dodatkowo przez 4 – tj. liczbę badanych wewnętrznych struktur geometrycznych wypełnienia prototypów, daje bardzo dużą wartość kosztów oraz znacznie wydłuża czas realizacji badań, co zmniejszałoby efektywność przyjętej metody.

Ponadto z definicji technologii FDM wynika, że nie można bezpośrednio w dowolny sposób kształtować ułożenia włókien geometrii wypełnienia wewnętrznego modeli prototypów w przestrzeni trójwymiarowej. Ułożenie włókien może być dowolnie kształtowane jedynie w płaszczyźnie poziomej wyznaczonej przez kierunki główne X i Y, natomiast w płaszczyźnie pionowej wyznaczonej przez kierunki X i Z oraz Y i Z prototypy budowane są w sposób nieciągły – warstwa po warstwie.

Biorąc pod uwagę powyższe dwa powody, zdecydowano się na uproszczenie metodyki badań, a tym samym skrócenie czasu badań oraz wyeliminowanie dużych kosztów badań. Założono, że moduły Kirchhoffa zostaną wyznaczone analitycznie dla kierunków głównych geometrii prototypów wytwarzanych w technologii FDM: X, Y oraz Z na podstawie uogólnionego wzoru (4.3).

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4.3)$$

gdzie: G – moduł Kirchhoffa, E – moduł Younga, ν – moduł Poissona, wyznaczono wzory na poszukiwane moduły Kirchhoffa:

$$G_{XY} \text{ analityczne} = \frac{E_{XX} \text{ eksperymentalne}}{2(1 + \nu_{XY} \text{ eksperymentalne})}$$

$$G_{YZ} \text{ analityczne} = \frac{E_{YY} \text{ eksperymentalne}}{2(1 + \nu_{YZ} \text{ eksperymentalne})}$$

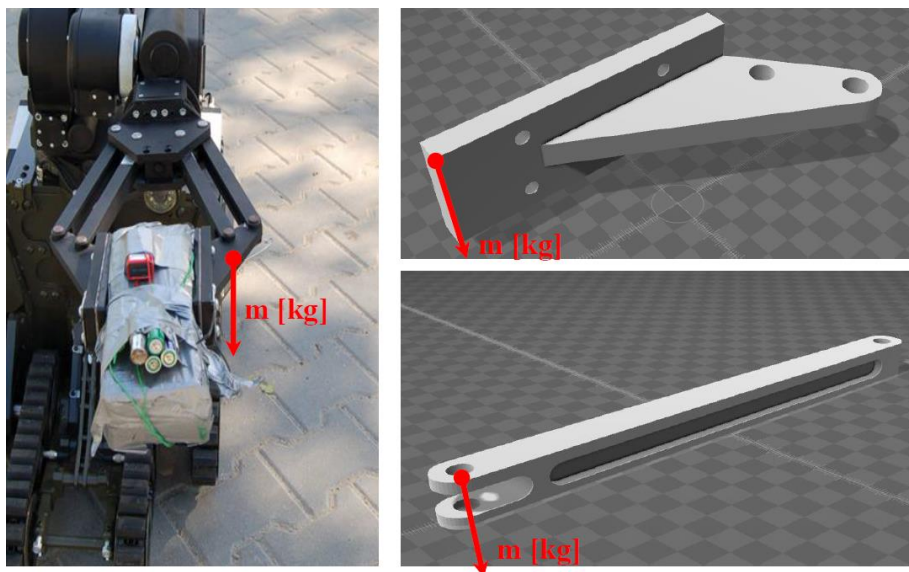
$$G_{ZX} \text{ analityczne} = \frac{E_{ZZ} \text{ eksperymentalne}}{2(1 + \nu_{ZX} \text{ eksperymentalne})}$$

Przyjęte założenie będzie wymagało jednak wytworzenia próbek normatywnych oraz prototypów części w taki sposób, aby oś przyłożonej siły rozciągającej w badaniach laboratoryjnych (dla próbek normatywnych) oraz kierunku obciążenia prototypów podczas badań laboratoryjnych były zgodne, tj. oddziaływały na wewnętrzne geometrie wypełnienia obu tych obiektów w taki sam sposób. Wynika to z faktu, że opracowana macierz sztywności będzie dawała prawidłowe wyniki dla obciążeń przykładanych wzdłuż osi głównych X, Y oraz Z prototypu. To w odniesieniu do możliwości i ograniczeń technologii FDM jest uproszczeniem jak najbardziej zasadnym.

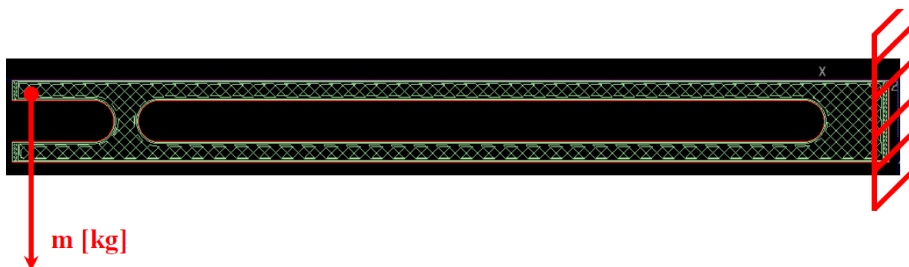
W przypadku, gdyby nie przyjęto wymienionego założenia upraszczającego, sugeruje się wykorzystanie metodyki opisanej w rozdziale 7.

4.1.4. Metodyka wyznaczenia pola ugięcia prototypów

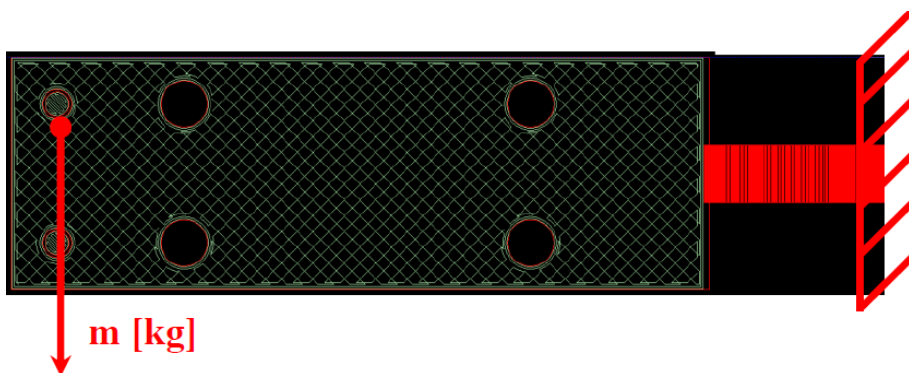
Pomiary ugięcia wykonywane przy wykorzystaniu skanera optycznego ATOS [50, 61, 139–143, 150]. Pomiary będą buforowane, a wyniki będą uśrednione za pomocą odpowiedniego algorytmu zaszytego w oprogramowaniu skanera. Uśrednione pola odkształceń prototypów zbadanych będą porównywane z polem odkształceń wyliczonym na podstawie analizy MES. Na podstawie porównania obu wielkości zostaną wyciągnięte odpowiednie wnioski. Części będą obciążane zgodnie z kierunkiem osi głównym i zgodnie z definicją w jaki sposób pracują wybrane struktury geometrii wewnętrznych, a także zgodnie z rzeczywistą pracą tych prototypów na obiektach rzeczywistych, co przedstawiono na rysunkach 4.18–4.20.



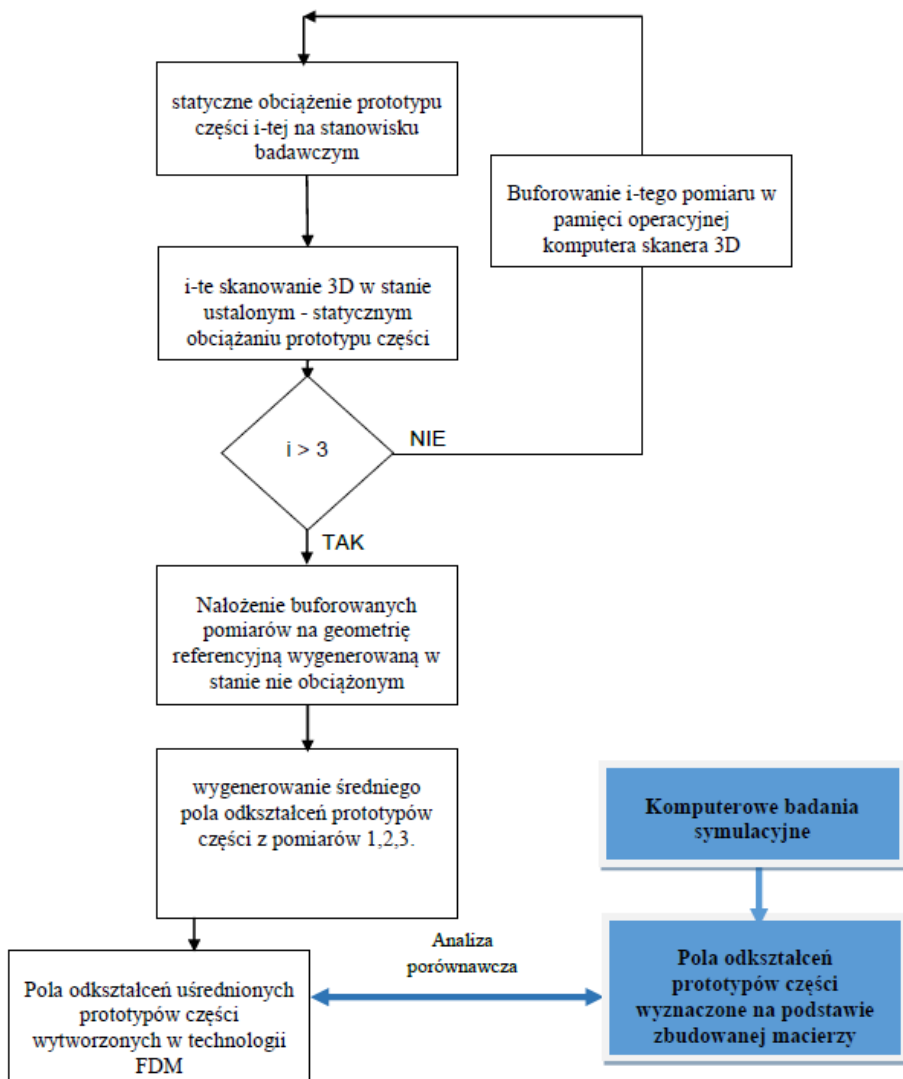
Rys. 4.18. Sposób obciążania części prototypów w rzeczywistości



Rys. 4.19. Sposób obciążania ramienia podczas eksperymentów laboratoryjnych



Rys. 4.20. Sposób obciążania szczęki podczas eksperymentów laboratoryjnych



Rys. 4.21. Schemat badań laboratoryjnych prototypów części

Aby uzyskać uśrednione pola odkształceń prototypów części, próba statycznego obciążania będzie rejestrowana przez skaner optyczny 3D. Wówczas możliwe będzie buforowanie pomiarów realizowanych na kolejnych prototypach i wygenerowanie uśrednionego wyniku pól odkształceń dla badanego obiektu [150]. Dopiero ten wynik będzie porównywany z wynikiem badań symulacyjnych – analogicznego eksperymentu obciążenia prototypów – wykonanego w środowisku MES. Porównanie dwóch pól odkształceń, po badaniach laboratoryjnych i symulacyjnych, dostarczy informacji o dokładności szacowania wytrzymałości przy wykorzystaniu wyznaczonych macierzy sztywności. Buforowanie pomiarów n -próbek i obliczanie średnich wartości pola

odchylen jest fabryczną funkcją systemu ATOS [150] stosowanego w badaniach. Badania prototypów części obciążonych z wykorzystaniem system skanera optycznego ATOS, będą prowadzone zgodnie z przygotowanym schematem (rys. 4.21).

4.2. Dobór oraz wykonanie próbek i prototypów

Próbki do badań laboratoryjnych wytworzono na maszynie FORTUS 400mc [152], która jest maszyną reprezentatywną dla technologii FDM. Bazując na parametrach technicznych przedstawionych w dokumentacjach maszyn Stratasys Ltd. wynika, że maszyna FORTUS 400mc (rys. 4.22) jest centrum wytwórczym, które łączy w sobie właściwości zarówno tanich maszyn (tak zwanych drukarek 3D) oraz przemysłowych, dużych centrów wytwórczych pracujących w tej technologii.

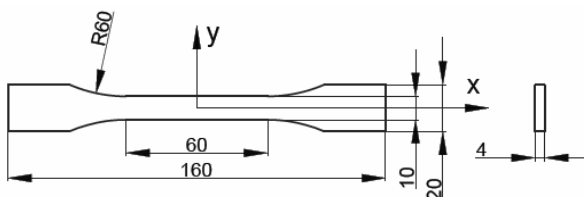
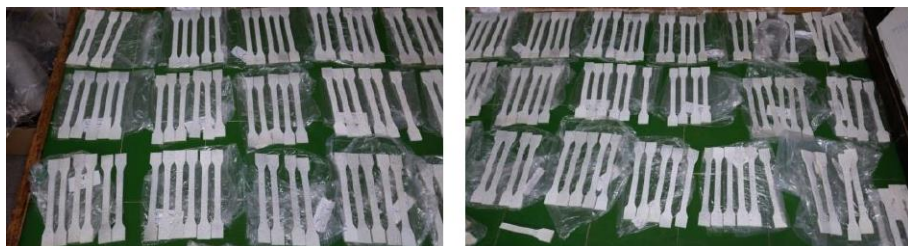


Rys. 4.22. Maszyna FORTUS 400mc w Laboratorium Szybkiego Prototypowania i Obliczeń Numerycznych Instytutu PIAP

Badania prowadzono na dwóch typach obiektów badawczych: próbki normatywne oraz prototypy części chwytaka robota mobilnego. Próbki normatywne i prototypy części wytwarzano w stałych warunkach temperaturowych panujących w komorze roboczej maszyny wynoszących 90 °C. Wszystkie obiekty badawcze były wytwarzane z przetłoczonego włókna materiału ABS-M30 o średnicy 0,11 mm. Jest to również wysokość pojedynczej warstwy nakładanego materiału.

Tab. 4. Podstawowe dane techniczne centrum wytwórczego FORTUS 400mc

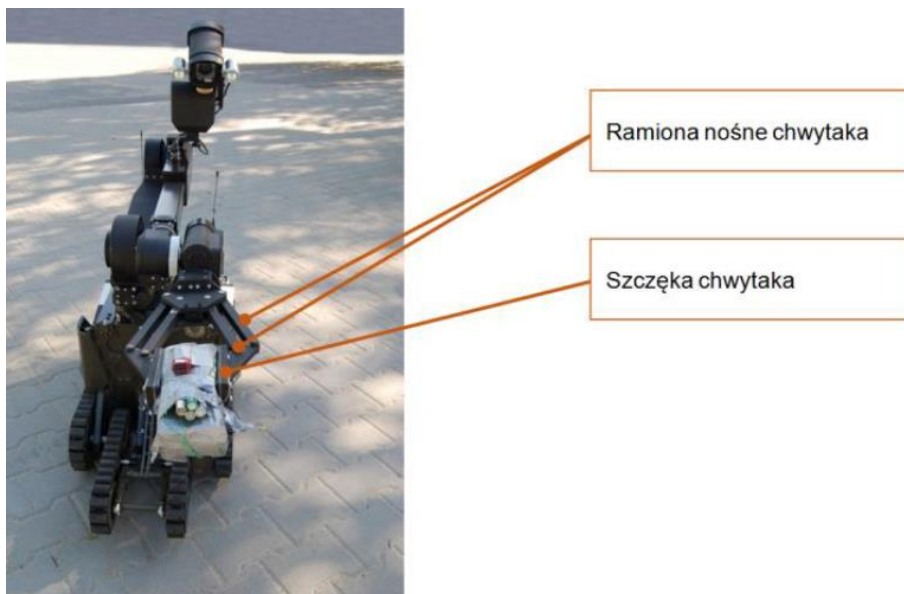
Nazwa	Wartość
Wymiary komory roboczej	405 mm × 355 mm × 405 mm (XYZ)
Dokładność wytwarzania modeli	Modele wytwarzane są z dokładnością bezwzględną w płaszczyźnie XY $\pm 0,128$ mm; natomiast dokładność wzdłuż osi przyrostu wynosi $\pm 0,038$ mm na każdy milimetr przyrostu
Temperatura przetłaczania tworzywa ABS-M30	320 °C
Temperatura w komorze podczas przetłaczania tworzywa ABS-M30	90 °C

**Rys. 4.23.** Wymiary próbek normatywnych**Rys. 4.24.** Pierwsze grupy próbek normatywnych wytworzone do badań

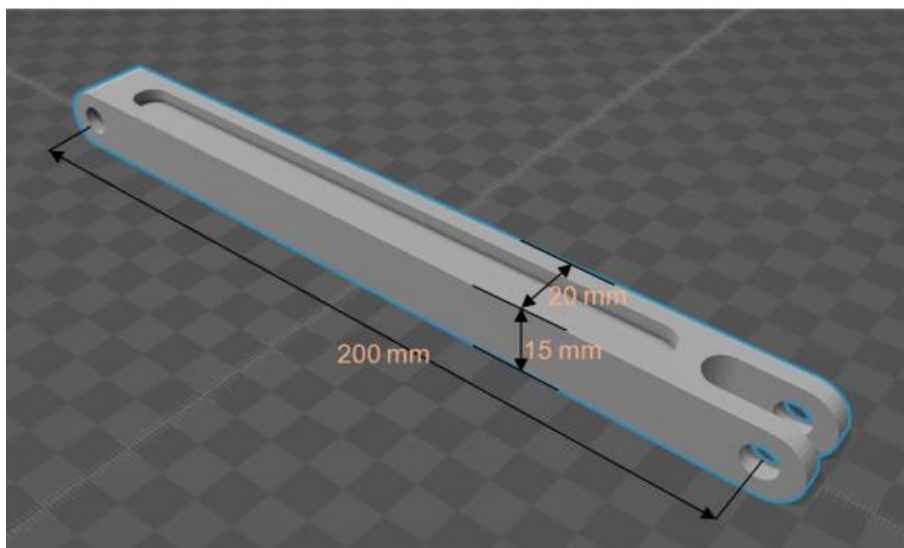
Kolejnymi obiektami badań są prototypy części chwytaka robota pirotechnicznego EXPERT (rys. 4.25), opracowane i wyprodukowane w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP. Do badań wybrano ramię nośne chwytaka (rys. 4.25) oraz szczękę chwytaka (rys. 4.27).

Wybór prototypów części badawczych – ramienia i szczęki chwytaka – był podyktowany przez potencjalne zastosowanie technologii FDM do produkcji właśnie tego typu części. Ramię i chwytak znajdują się na końcu łańcucha kinematycznego manipulatora robota. Powinny być lekkie, żeby swoją zbędną masą nie obciążać dodatkowo silników manipulatora, co ma bezpośrednie przełożenie na jego udźwig całkowity. Części tego typu powinny się również charakteryzować relatywnie dużą wytrzymałością, ponieważ robot może chwytać i podnosić obiekty do 15 kg. Trzecią cechą obiektów tego typu jest niestandardowy ich kształt. Ramię i chwytak muszą być dostosowane do przenoszenia różnych obiektów, stąd czasami ich specyficzne wymiary i kształty eliminują możliwość produkcji seryjnej, a nawet zdarza się, że ze

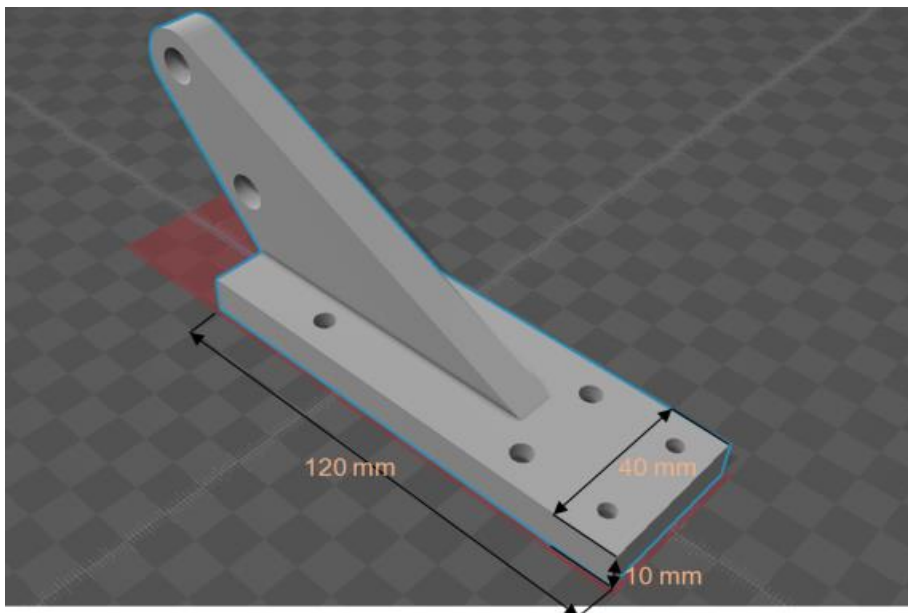
względu na swoją specyficzną geometrię są niemożliwe do wytworzenia technologiami standardowymi (np. obróbką skrawaniem). Do wytworzenia części o takich cechach idealnie nadaje się technologia FDM, która daje możliwość wytwarzania części:



Rys. 4.25. Robot EXPERT z improwizowanym ładunkiem wybuchowym



Rys. 4.26. Charakterystyczne wymiary prototypu ramienia chwytaka



Rys. 4.27. Charakterystyczne wymiary prototypu szczęki chwytaka



Rys. 4.28. Pierwsza grupa prototypów wytworzona do badań

- lekkich – materiałem budulcowym może być chociażby polimer ABS-M30, którego gęstość wynosi 40% gęstości aluminium lub 14% gęstości stali,
- o zaprogramowanej wytrzymałości w zadanych kierunkach przez odpowiedni dobór geometrii wypełnienia wewnętrznego,
- o dowolnym kształcie – z definicji technologii FDM budowanie warstwowe prototypów daje możliwość tworzenia dowolnych kształtów.

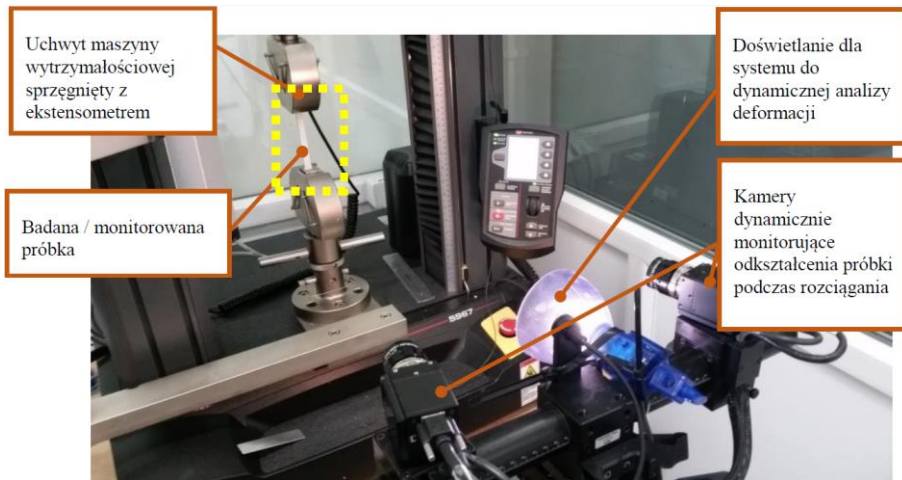
4.3. Aparatura badawcza

4.3.1. Badanie próbek normatywnych

Stanowisko badawcze do badań próbek normatywnych, na podstawie których wyznaczono moduły Younga oraz współczynniki Poissona i analitycznie moduły Kirchhoffa, składa się z czterech głównych komponentów:

- optycznego, przemysłowego systemu do dynamicznej analizy deformacji 3D: ARAMIS (producent: GOM GmbH) [151],
- maszyny wytrzymałościowej do jednoosiowego rozciągania próbek, sprzęgniętej z ekstensometrem i jednostką monitorująco-obliczeniową – INSTRON (producent: INSTRON),
- elementów doświetlenia obszaru badawczego,
- jednostek monitorująco-obliczeniowych z odpowiednim oprogramowaniem.

Stanowisko badawcze jest zamknięte w specjalnym pomieszczeniu, które umożliwia utrzymanie stałych warunków klimatycznych podczas trwania eksperymentów. Na rysunku 4.28 przedstawiono stanowisko badawcze z zaznaczonym obszarem pomiarowym.



Rys. 4.28. Stanowisko badawcze do badań próbek normatywnych

Maszyna INSTRON zwana zrywarką lub maszyną wytrzymałościową jest wyposażona w ekstensometr – do pomiaru wydłużeń, dzięki któremu możliwy jest pomiar zmian wymiarów liniowych próbki (odkształceń liniowych) w wyniku rozciągania. Pomiar był realizowany ponieważ z próbką normatywną bezpośrednio stykają się dwa elementy ekstensometru, które przesuwają się względem siebie w trakcie próby jednoosiowego rozciągania (odkształcenia liniowego). Ruch tych elementów jest przetwarzany na elektryczny sygnał pomiarowy, który trafia do karty pomiarowej jednostki monitorująco-obliczeniowej. Jednostka dokonuje obliczeń charakterystyk ma-

teriałowych geometrii wypełnienia oraz innych parametrów związanych z wytrzymałością próbki: moduł Younga, naprężenie przy zerwaniu próbki, odkształcenie próbki przy rozciąganiu [%], przemieszczenie próbki przy rozciąganiu (wydłużenie) [mm].

Drugim komponentem stanowiska badawczego jest system ARAMIS służący do prowadzenia pomiarów bezdotykowych i niezależnych od właściwości materiału [56, 104, 108, 151]. System służy do analizy statycznej oraz dynamicznej próbek i w czasie rzeczywistym może rejestrować następujące wielkości pomiarowe:

- współrzędne punktów w przestrzeni $[x, y, z]$,
- przemieszczenia punktów w przestrzeni trójwymiarowej,
- wartości oraz szybkości odkształceń powierzchniowych.

Przed rozpoczęciem pomiarów, na podstawie automatycznych obliczeń justowania, ustalany jest dokładny model matematyczny kalibracji, zawierający względne pozycje kamer czujnika pomiarowego wraz z parametrami zniekształcenia generowanego przez obiektywy. Sposób działania sytemu opiera się na przetwarzaniu zdjęć o wysokiej rozdzielczości (1624×1236) zarejestrowanych dwiema kamerami cyfrowymi z częstotliwością do 29 Hz, w trakcie jednoosiowego rozciągania próbki normatywnej. Pomiar odkształcenia jest realizowany z dokładnością do 0,005%. Przetwarzanie zdjęć odbywa się na zasadzie metody korelacji obrazu DIC (ang. *Digital Image Correlation*) [56, 104, 108, 151]. Metoda DIC działa na zasadzie połączenia modelu matematycznego pozycji kamer z korelacją cyfrowego obrazu i obliczeniami triangulacyjnymi. To pozwala na precyzyjne obliczenie współrzędnych wybranych punktów naniesionych na powierzchni próbki i na podstawie monitorowania tych punktów określenia odkształcenia poprzecznego i podłużnego rozciąganej powierzchni. Przy obliczeniu odkształceń próbki system uwzględnia jej geometrię oraz teorię plastyczności, co przedstawiono w rozdziale 4.1.2.

W szczególności metoda DIC, zgodnie z informacjami zawartymi w dokumentacji systemu ARAMIS producenta, „dla dużej liczby małych podzbiorów każdego zdjęcia oblicza rozkłady odcieni szarości”, co umożliwia bardzo dokładne określanie położenia punktów pomiarowych naniesionych na badane próbki normatywne. Punkty są rozpoznawane i monitorowane na wszystkich zdjęciach wykonanych podczas próby jednoosiowego rozciągania. Wyniki pomiarów uzyskane metodą DIC, czyli prędkości deformacji w przestrzeni trójwymiarowej oraz wartości odkształceń, są zapisywane automatycznie. To wynika z faktu, że akwizycja zdjęć pomiarowych odbywa się w funkcji czasu. Z zapisanych danych, w sposób automatyczny uzyskiwane są informacje m.in. o wartościach współczynników Poissona, co również opisano w podrozdziale 4.1.2.

Dzięki metodzie DIC stanowisko badawcze umożliwia uzyskanie wyników pomiarowych jako:

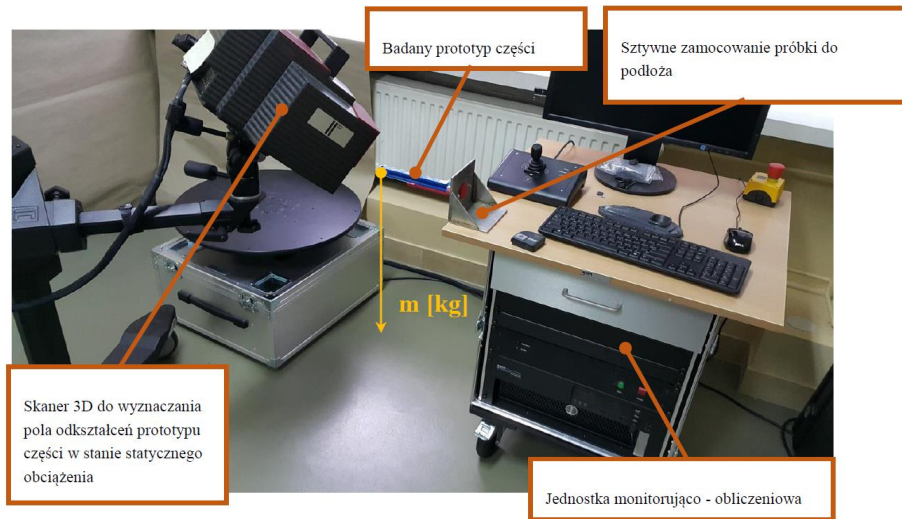
- obliczonych wartości poszukiwanych współczynników,
- współrzędnych $[x, y, z]$ z całego obszaru rozciąganej próbki, co daje możliwości wyznaczenia pól przemieszczeń i pól odkształceń,
- płaskiego tensora odkształceń,
- wizualizacji obiektu z konturami,
- zdjęć (poklatkowych) z eksperymentu.

4.3.2. Badanie prototypów części

Stanowisko badawcze do badań ugięcia prototypów części chwytaka złożone jest z trzech głównych komponentów:

- optyczny, przemysłowy skaner 3D do wyznaczania pola odkształceń w stanie statycznego obciążenia: ATOS Triple SCAN (producent: GOM GmbH) [150],
- sztywne mocowanie prototypu części,
- jednostka monitorująco-obliczeniowa z odpowiednim oprogramowaniem.

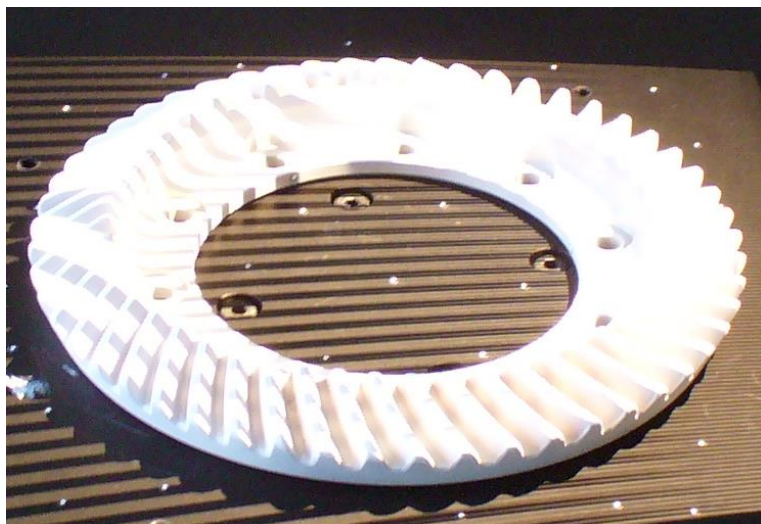
Stanowisko badawcze jest zamknięte w specjalnym pomieszczeniu umożliwiającym utrzymanie stałych warunków środowiskowych. Na rysunku 4.29 oznaczono sposób statycznego obciążania próbki podczas badań.



Rys. 4.29. Stanowisko badawcze do badań ugięcia prototypów części

System ATOS, podobnie jak opisywany w podrozdziale 4.3.1 system monitorujący ARAMIS, służy do prowadzenia pomiarów bezdotykowych i niezależnych od właściwości materiału próbek w stanie statycznym [50, 61, 139–143, 150]. System ten w prowadzonych badaniach wykorzystano do pomiaru pola odkształceń prototypów części względem położenia wzorcowego. Odkształcenie było skutkiem przyłożonego do prototypu części obciążenia. Pomiar realizowano zgodnie z algorytmem opisanym w podrozdziale 4.1.4.

Pomiar (odzworowanie – skanowanie 3D) geometrii prototypów odbywa się na podstawie automatycznej analizy efektu zniekształcenia linii światła oświetlającego powierzchnię skanowanego obiektu podczas procesu skanowania. Prążki światła o różnych grubościach są generowane przez projektor zintegrowany w obudowie skanera (rys. 4.30).

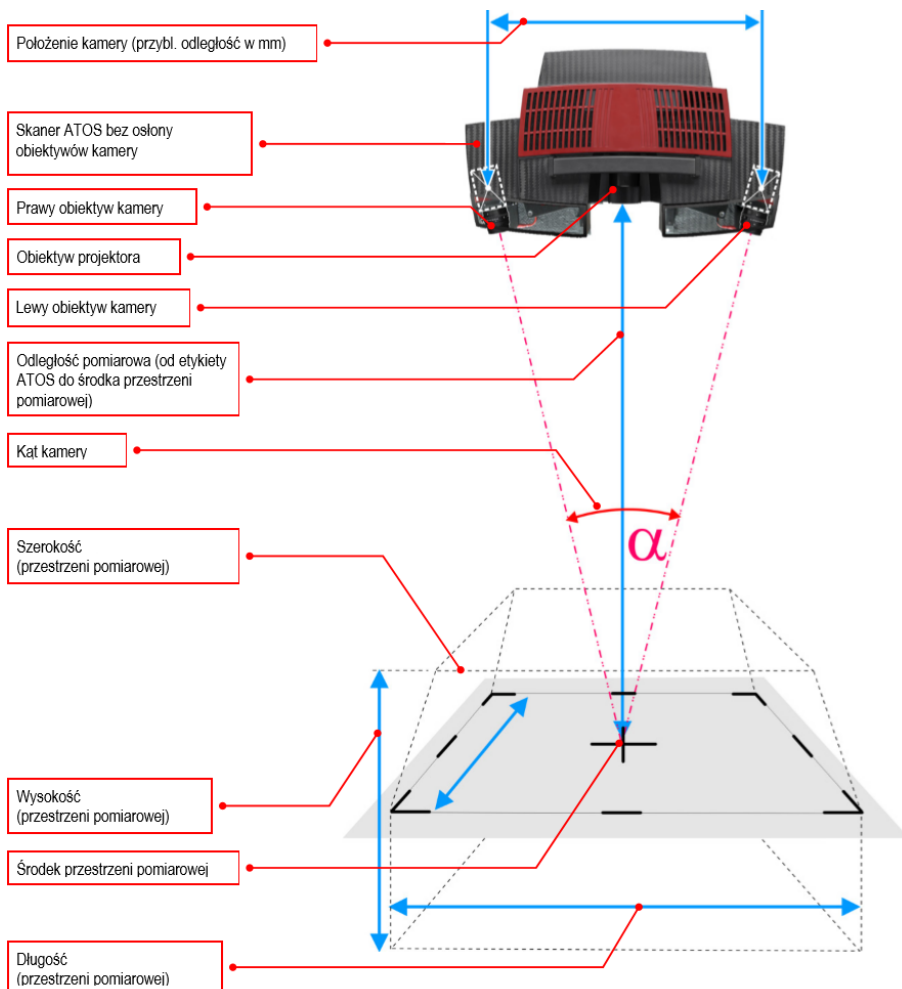


Rys. 4.30. Przykład powierzchni naświetlanej podczas skanowania 3D



Rys. 4.31. Przykładowy model z naklejonymi markerami ułatwiającymi łączenie geometrii

Prototypy badanych, obciążonych statycznie części były naświetlane światłem o określonych parametrach, a linie proste ulegały zniekształceniu w zależności od ugięcia. Obraz oświetlonego przedmiotu odczytywany był przez dwie kamery i przesyłany do jednostki monitorująco-obliczeniowej. Uproszczony schemat przedstawiono na rysunku 4.32. Aby jednostka monitorująco-skanująca mogła złożyć kilka obrazów skanowanych, wymagane jest oklejenie skanowanego obiektu punktami referencyjnymi, które są niezbędne do łączenia geometrii pozyskanej w kilku procesach skanowania lub do określania odchyłek geometrii skanowanej (obciążonej) względem geometrii wzorcowej (nieobciążonej).



Rys. 4.32. Schemat stanowiska do skanowania przy wykorzystaniu systemu ATOS [150]

Skanowane prototypy części znajdowały się w punkcie centralnym środka obszaru pomiarowego, w odległości pomiarowej wynoszącej 860 mm (rys. 4.32). Zastosowany system ATOS charakteryzuje się parametrami, które mają bezpośredni wpływ na prowadzone badania:

- stereoskopowy układ kamer współpracujący z projektorem, które umożliwiają rejestrację trzech widoków skanowanego przedmiotu w ramach jednego pomiaru; rozdzielczość każdej z kamer wynosi 5 milionów pikseli,
- kąt triangulacyjny (kąt kamery) mieści się w przedziale 25–35°,
- czas wykonania jednego pomiaru (naświetlenia) przy wykorzystaniu trzech widoków nie przekracza 2 s,
- obszar pomiarowy o wymiarach 320 mm (dł.) × 240 mm (szer.). Dopuszczalna rozbieżność wielkości obszaru pomiarowego wynosi $\pm 5\%$, a minimalna dokładność 0,015 mm,
- projektor pracuje w technologii LED, z zastosowaniem źródła światła o fali w zakresie od 450 nm do 500 nm.

4.4. Wyniki badań próbek normatywnych

Badania próbek normatywnych (próby jednoosiowego rozciągania) przeprowadzono w stabilnych warunkach temperaturowych, w temperaturze 23 °C i wilgotności 55%. Tempo obciążenia wstępnego próbki wynosiło 2 mm/min i wzrastało do 3 mm/min podczas próby. Na jedną serię pomiarową przypadało 5 próbek normatywnych. Pierwsza próbka z serii służyła do ustawiania parametrów maszyny wytrzymałościowej. Na podstawie rozciągania pozostałych generowano wyniki pomiarów. Zbadano próbki normatywne zbudowane z trzech różnych geometrii wypełnienia: litej-włóknistej, kratowej oraz żeberkowej. Wyniki zaprezentowano w postaci charakterystyk i tabel zawierających parametry uzyskane podczas badań i na ich podstawie wyliczonych modułów Kirchhoffa, również zawartych w tabelach zbiorczych.

W tab. 5 pokazano dane liczbowe próbki wytworzonej metodą wtrysku z materiału ABS-M30. Jest to próbka odniesienia. W zestawieniach porównawczych zaprezentowanych w podrozdziale 4.5 przedstawiono tabelaryczne porównanie wartości otrzymanych wyników badań laboratoryjnych z wartościami dla próbki odniesienia wytworzonej metodą wtrysku.

Analizę wyników i wnioski z badań przedstawiono w rozdziale 6 i 7.

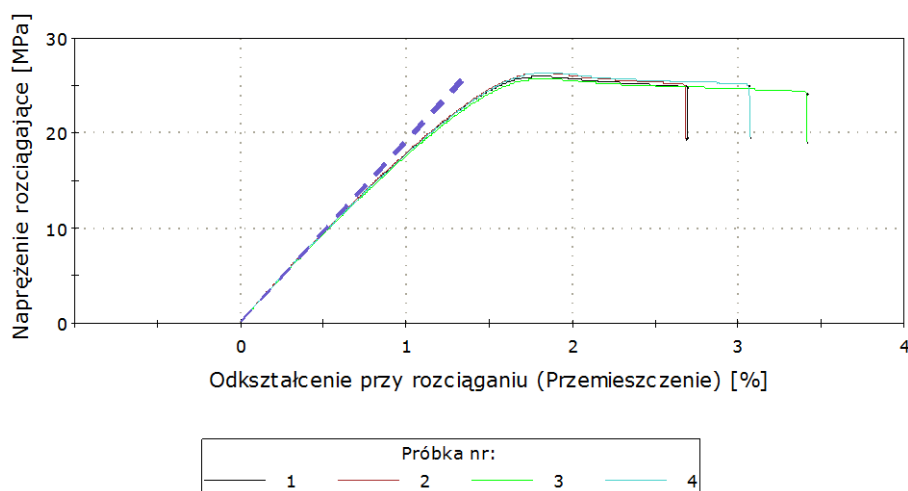
Tab. 5. Dane próbki odniesienia wytworzonej metodą wtrysku z materiału ABS-M30

Nazwa parametru	Wartość parametru
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	36
Wartość siły zrywającej próbkę [kN]	1,44
Moduł Younga [MPa]	2413
Współczynnik Poissona	0,34
Moduł Kirchhoffa [MPa]	900
Gęstość [g/cm³]	1,04

4.4.1. Wyniki badań próbek normatywnych z litą-włóknistą geometrią wewnętrzną

W wyniku próby jednoosiowego rozciągania próbek normatywnych zbudowanych z litej-włóknistej geometrii wewnętrznej wytworzonych w orientacji poziomej w komorze roboczej maszyny, otrzymano charakterystyki wartości naprężeń niszczących od wartości odkształcenia (rys. 4.33). Średnia wartość naprężenia rozciągającego przy zerwaniu próbki wyliczona na podstawie czterech prób rozciągania wyniosła 24,77 MPa. Obliczona wartość odchylenia standardowego wyniosła 0,37 MPa.

Wartość średnia siły zrywającej wyliczona dla czterech prób zerwania wyniosła 0,99 kN, a wartość odchylenia standardowego wyniosła 0,01 kN. Wyniki prób rozciągania przedstawiono w tab. 6.



Rys. 4.33. Wyniki jednoosiowego rozciągania próbek z litą-włóknistą geometrią wypełnienia wewnętrznego wytwarzanych w orientacji poziomej

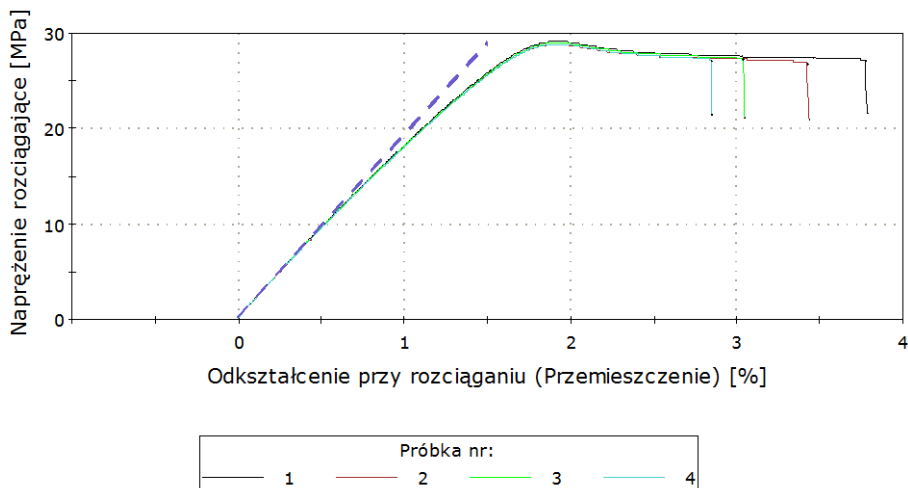
Tab. 6. Wartości parametrów przy zerwaniu próbki

Nr próbki	Siła [kN] przy zerwaniu próbki	Naprężenie rozciągające [MPa] przy zerwaniu próbki
Próbka nr 1	0,99	24,83
Próbka nr 2	1,00	24,96
Próbka nr 3	0,97	24,23
Próbka nr 4	1,00	25,07
Średnia	0,99	24,77
Odchylenie standardowe	0,01	0,37

W wyniku próby jednoosiowego rozciągania próbek normatywnych zbudowanych z litej-włóknistej geometrii wewnętrznej wytworzonych w orientacji na sztorc w komorze roboczej maszyny, otrzymano charakterystyki wartości naprężeń niszczących od wartości odkształcenia, które przedstawiono na rys. 4.34. Średnia wartość

naprężenia rozciągającego przy zerwaniu próbki, wyliczona na podstawie czterech prób rozciągania, wyniosła 27,12 MPa. Wartość ta jest o 9,4% większa od średniej wartości naprężeń zrywających dla próbek wytwarzanych w orientacji poziomej. Obliczona wartość odchylenia standardowego wyniosła 0,18 MPa.

Wartość średnia siły zrywającej wyliczona dla czterech prób zerwania wyniosła 1,08 kN i jest o 9% większa od wartości siły zrywającej dla próbki wytwarzanej w orientacji poziomej, a wartość odchylenia standardowego wyniosła 0,01 kN. Wyniki prób rozciągania przedstawiono w tab. 7.



Rys. 4.34. Wyniki jednoosiowego rozciągania próbek z litą-włóknistą geometrią wypełnienia wewnętrznego wytwarzanych w orientacji na sztorc

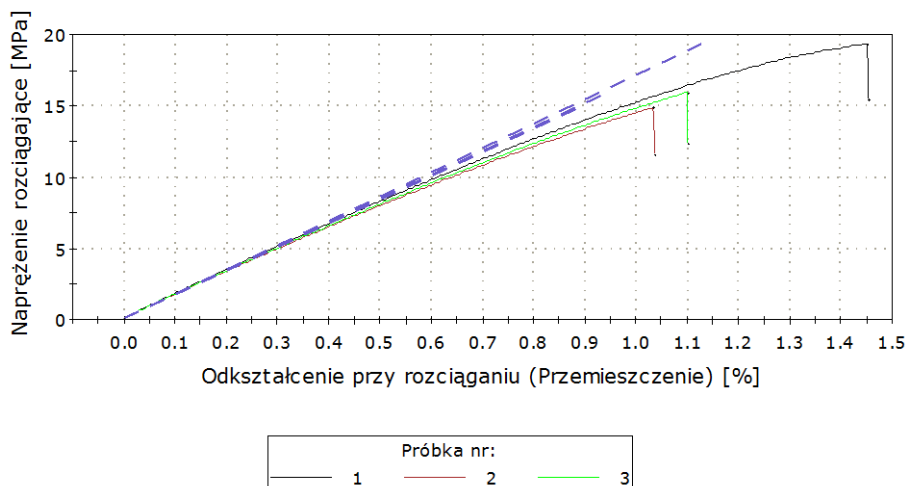
Tab. 7. Wartości parametrów przy zerwaniu próbki

Nr próbki	Siła [kN] przy zerwaniu próbki	Naprężenie rozciągające [MPa] przy zerwaniu próbki
Próbka nr 1	1,08	27,11
Próbka nr 2	1,08	26,89
Próbka nr 3	1,09	27,32
Próbka nr 4	1,09	27,18
Średnia	1,08	27,12
Odchylenie standardowe	0,01	0,18

W wyniku próby jednoosiowego rozciągania próbek normatywnych zbudowanych z litej-włóknistej geometrii wewnętrznej wytworzonych w orientacji pionowej w komorze roboczej maszyny, otrzymano charakterystyki wartości naprężeń niszczących od wartości odkształcenia, które przedstawiono na rys. 4.35. Średnia wartość naprężenia rozciągającego przy zerwaniu próbki wyliczona na podstawie trzech prób rozciągania wyniosła 16,69 MPa. Wartość ta jest o 38,4% niższa od średniej wartości

naprężeń zrywających dla próbek wytwarzanych w orientacji na sztorc i o 32,6% niższa od średniej wartości naprężeń zrywających dla próbek wytworzonych w orientacji poziomej. Obliczona wartość odchylenia standardowego wyniosła 2,33 MPa.

Wartość średnia siły zrywającej wyliczona dla trzech prób zerwania wyniosła 0,67 kN i jest o 37,9% mniejsza od wartości siły zrywającej dla próbki wytwarzanej w orientacji na sztorc oraz o 32,3% niższa od wartości naprężeń zrywających dla próbek wytworzonych w orientacji poziomej. Odchylenie standardowe dla wartości siły zrywającej wyniosło 0,09 kN. Wyniki prób rozciągania przedstawiono w tab. 8.



Rys. 4.35. Wyniki jednoosiowego rozciągania próbek z litą-włóknistą geometrią wypełnienia wewnętrznego wytwarzanych w orientacji pionowej

Tab. 8. Wartości parametrów przy zerwaniu próbki

Nr próbki	Siła [kN] przy zerwaniu próbki	Naprężenie rozciągające [MPa] przy zerwaniu próbki
Próbka nr 1	0,77	19,31
Próbka nr 2	0,59	14,87
Próbka nr 3	0,64	15,89
Średnia	0,67	16,69
Odchylenie standardowe	0,09	2,33

W tab. 9 przedstawiono zestawienie danych wyliczonych na podstawie prób jednoosiowego rozciągania dla próbek z litą-włóknistą geometrią wypełnienia wewnętrznego. Tabela zawiera komplet danych niezbędnych do zbudowania macierzy sztywności dla tej geometrii wewnętrznej.

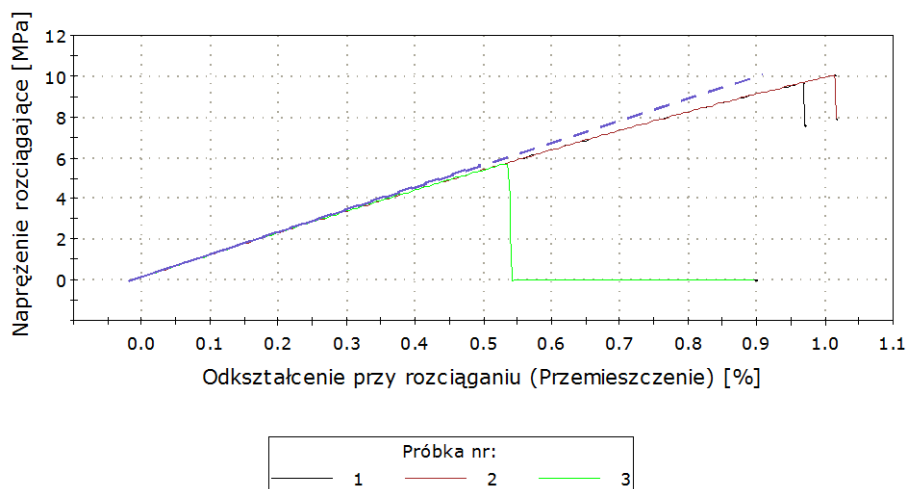
Wyniki badań pokazują że największą wytrzymałością na rozciąganie cechowała się próbka wytworzona w orientacji na sztorc, następnie w orientacji poziomej – 92% wartości siły zrywającej względem orientacji na sztorc i pionowej – 62% wartości siły zrywającej względem orientacji na sztorc.

Tab. 9. Zestawienie parametrów próbek z litą-włóknistą geometrią wypełnienia wewnętrznego

Parametr	Próbka_1	Próbka_2	Próbka_3	Próbka_4	Wartość średnia	Odchylenie standardowe
Moduł E_{11} [Gpa]	1,91	1,92	1,89	1,91	1,91	0,01
Moduł E_{22} [Gpa]	1,94	1,92	1,92	1,92	1,92	0,01
Moduł E_{33} [Gpa]	1,70	1,65	1,67	1,65	1,67	0,02
Moduł Poissona ν_{12}	0,353	0,318	0,327	0,307	0,326	0,019
Moduł Poissona ν_{23}	0,401	0,398	0,392	0,413	0,401	0,008
Moduł Poissona ν_{13}	0,332	0,270	0,316	0,33	0,306	0,023
Moduł Kirchhoffa G_{12} [Gpa]	0,706	0,728	0,712	0,731	0,719	0,007
Moduł Kirchhoffa G_{23} [Gpa]	0,692	0,687	0,690	0,679	0,687	0,003
Moduł Kirchhoffa G_{13} [Gpa]	0,638	0,650	0,634	0,625	0,637	0,006

4.4.2. Wyniki badań próbek normatywnych z żeberkową geometrią wewnętrzną

W wyniku próby jednoosiowego rozciągania próbek normatywnych zbudowanych z żeberkowej geometrii wewnętrznej wytworzonych w orientacji poziomej w komorze roboczej maszyny, otrzymano charakterystyki wartości naprężeń niszczących od wartości odkształcenia (rys. 4.36). Średnia wartość naprężenia rozciągającego przy zerwaniu próbki wyliczona na podstawie trzech prób rozciągania wyniosła 8,58 MPa. Obliczona wartość odchylenia standardowego wyniosła 1,58 MPa.

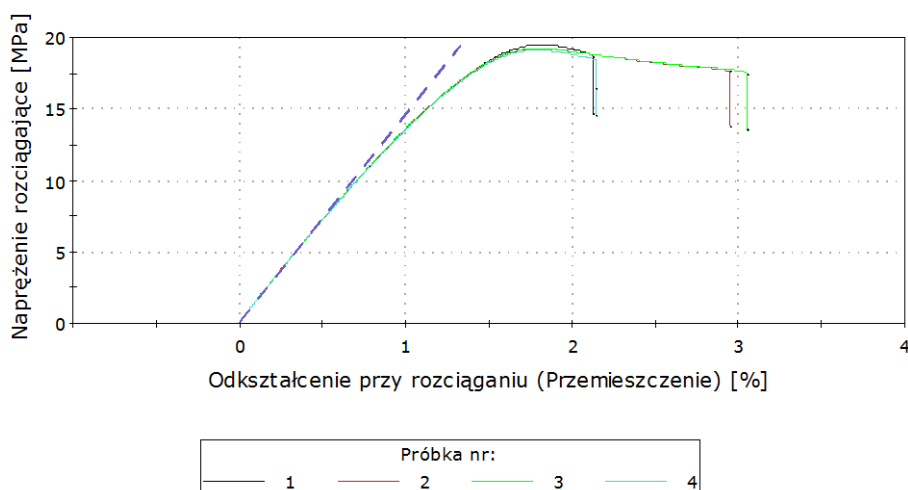
**Rys. 4.36.** Wyniki jednoosiowego rozciągania próbek z żeberkową geometrią wypełnienia wewnętrznego wytwarzanych w orientacji poziomej

Prototypy badanych, obciążonych statycznie części były naświetlane światłem o określonych parametrach, a linie proste ulegały zniekształceniu w zależności od ugięcia. Obraz oświetlonego przedmiotu odczytywany był przez dwie kamery i przesyłany do jednostki monitorująco-obliczeniowej. Uproszczony schemat przedstawiono na rysunku 4.32. Aby jednostka monitorująco-skanująca mogła złożyć kilka obrazów skanowanych, wymagane jest oklejenie skanowanego obiektu punktami referencyjnymi, które są niezbędne do łączenia geometrii pozyskanej w kilku procesach skanowania lub do określania odchyłek geometrii skanowanej (obciążonej) względem geometrii wzorcowej (nieobciążonej).

Tab. 10. Wartości parametrów przy zerwaniu próbek

Nr próbki	Siła [kN] przy zerwaniu próbki	Naprężenie rozciągające [MPa] przy zerwaniu próbki
Próbka nr 1	0,39	9,68
Próbka nr 2	0,40	10,07
Próbka nr 3	0,25	6,01
Średnia	0,34	8,58
Odchylenie standardowe	0,06	1,58

W wyniku próby jednoosiowego rozciągania próbek normatywnych zbudowanych z żeberkowej geometrii wewnętrznej wytworzonych w orientacji na sztorc w komorze roboczej maszyny, otrzymano charakterystyki wartości naprężeń niszczących od wartości odkształcenia, które przedstawiono na rys. 4.37. Średnia wartość naprężenia rozciągającego przy zerwaniu próbki wyliczona na podstawie czterech prób rozciągania wyniosła 17,55 MPa. Wartość ta stanowi 204% średniej wartości naprężeń zrywających dla próbek wytwarzanych w orientacji poziomej. Obliczona wartość odchylenia standardowego wyniosła 0,53 MPa.



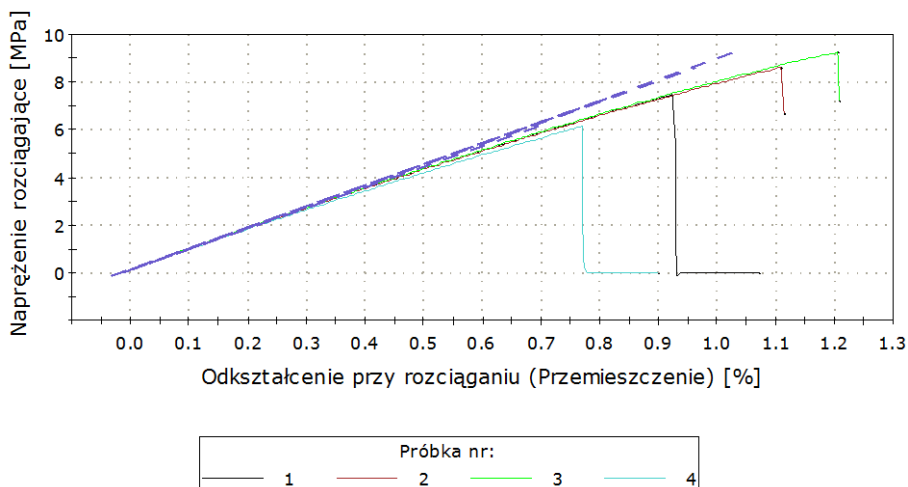
Rys. 4.37. Wyniki jednoosiowego rozciągania próbek z żeberkową geometrią wypełnienia wewnętrznego wytwarzanych w orientacji na sztorc

Wartość średnia siły zrywającej wyliczona dla czterech prób zerwania wyniosła 0,70 kN i stanowi 205% wartości siły zrywającej dla próbki wytwarzanej w orientacji poziomej, a wartość odchylenia standardowego wyniosła 0,02 kN. Wyniki prób rozciągania przedstawiono w tab. 11.

Tab. 11. Wartości parametrów przy zerwaniu próbki

Nr próbki	Siła [kN] przy zerwaniu próbki	Napężenie rozciągające [MPa] przy zerwaniu próbki
Próbka nr 1	0,75	18,69
Próbka nr 2	0,71	17,64
Próbka nr 3	0,70	17,44
Próbka nr 4	0,66	16,44
Średnia	0,70	17,55
Odchylenie standardowe	0,02	0,53

W wyniku próby jednoosiowego rozciągania próbek normatywnych zbudowanych z żeberkowej geometrii wewnętrznej wytworzonych w orientacji pionowej w komorze roboczej maszyny, otrzymano charakterystyki wartości naprężeń niszczących od wartości odkształcenia, które przedstawiono na rys. 4.38. Średnia wartość naprężenia rozciągającego przy zerwaniu próbki wyliczona na podstawie czterech prób rozciągania wyniosła 7,9 MPa. Wartość ta jest o 54% niższa od średniej wartości naprężeń zrywających dla próbek wytwarzanych w orientacji na sztorc i o 8% niższa od średniej wartości naprężeń zrywających dla próbek wytworzonych w orientacji poziomej. Obliczona wartość odchylenia standardowego wyniosła 0,81 MPa.



Rys. 4.38. Wyniki jednoosiowego rozciągania próbek z żeberkową geometrią wypełnienia wewnętrznego wytwarzanych w orientacji pionowej

Wartość średnia siły zrywającej wyliczona dla czterech prób zerwania wyniosła 0,32 kN i jest o 54% mniejsza od wartości siły zrywającej dla próbki wytwarzanej w orientacji na sztorc oraz o 6% niższa od wartości naprężeń zrywających dla próbek wytworzonych w orientacji poziomej. Odchylenie standardowe dla pomiaru wartości siły zrywającej wyniosło 0,04 kN. Wyniki prób przedstawiono w tab. 12.

Tab. 12. Wartości parametrów przy zerwaniu próbki

Nr próbki	Siła [kN] przy zerwaniu próbki	Naprężenie rozciągające [MPa] przy zerwaniu próbki
Próbka nr 1	0,23	7,73
Próbka nr 2	0,35	8,63
Próbka nr 3	0,37	9,24
Próbka nr 4	0,36	6,01
Średnia	0,32	7,9
Odchylenie standardowe	0,04	0,81

W tab. 13 przedstawiono zestawienie danych wyliczonych na podstawie prób jednoosiowego rozciągania dla próbek z żeberkową geometrią wypełnienia wewnętrznego. Tabela zawiera komplet danych niezbędnych do zbudowania macierzy sztywności dla tych geometrii wewnętrznych.

Wyniki badań pokazują że największą wytrzymałością na rozciąganie cechowała się próbka wytworzona w orientacji na sztorc, następnie w orientacji poziomej – 48,5% wartości siły zrywającej względem orientacji na sztorc i pionowej – 45% wartości siły zrywającej względem orientacji na sztorc.

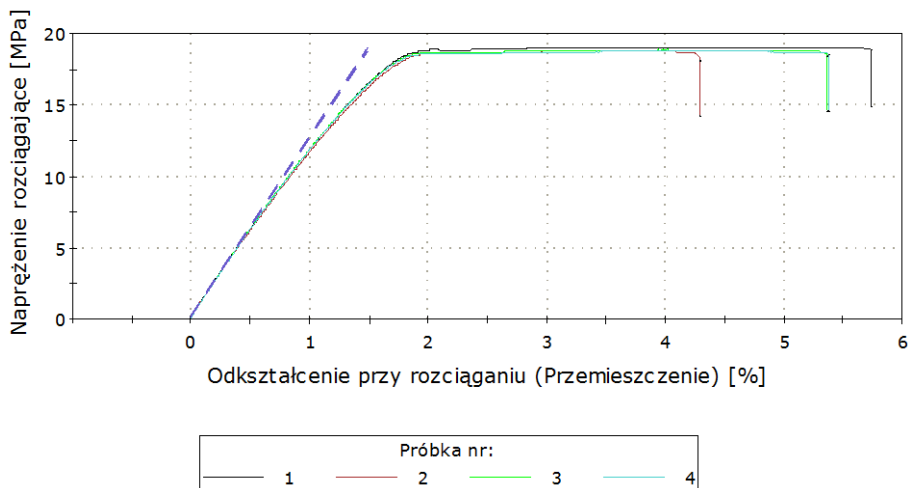
Tab. 13. Zestawienie parametrów próbek z żeberkową geometrią wypełnienia wewnętrznego

Parametr	Próbka_1	Próbka_2	Próbka_3	Próbka_4	Wartość średnia	Odchylenie standardowe
Moduł E_{11} [Gpa]	1,10	1,09	1,12	1,10	1,10	0,01
Moduł E_{22} [Gpa]	1,46	1,46	1,46	1,45	1,46	0,00
Moduł E_{33} [Gpa]	0,88	0,88	0,88	0,86	0,88	0,01
Moduł Poissona ν_{12}	0,360	0,326	0,346	0,352	0,346	0,01
Moduł Poissona ν_{23}	0,336	0,315	0,268	0,311	0,307	0,03
Moduł Poissona ν_{13}	0,281	0,25	0,298	0,289	0,279	0,02
Moduł Kirchhoffa G_{12} [Gpa]	0,404	0,411	0,416	0,407	0,410	0,003
Moduł Kirchhoffa G_{23} [Gpa]	0,546	0,555	0,576	0,553	0,558	0,007
Moduł Kirchhoffa G_{13} [Gpa]	0,343	0,352	0,339	0,334	0,342	0,004

4.4.3. Wyniki badań próbek normatywnych z kratową geometrią wewnętrzną
W wyniku próby jednoosiowego rozciągania próbek normatywnych zbudowanych z kratowej geometrii wewnętrznej wytworzonych w orientacji poziomej w komorze

roboczej maszyny, otrzymano charakterystyki wartości naprężeń niszczących od wartości odkształcenia (rys. 4.39). Średnia wartość naprężenia rozciągającego przy zerwaniu próbki wyliczona na podstawie czterech prób rozciągania wyniosła 18,50 MPa. Obliczona wartość odchylenia standardowego wyniosła 0,29 MPa.

Wartość średnia siły zrywającej wyliczona dla czterech prób zerwania wyniosła 0,74 kN, a wartość odchylenia standardowego wyniosła 0,01 kN. Wyniki prób rozciągania przedstawiono w tab. 14.



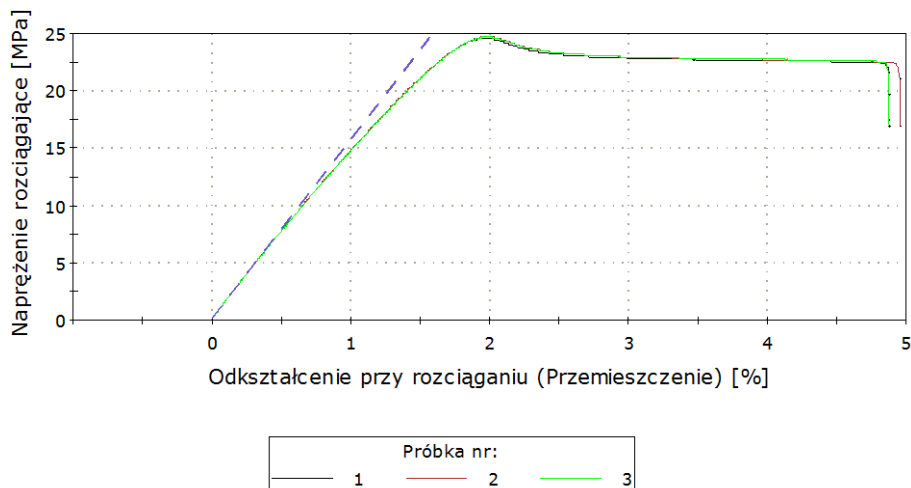
Rys. 4.39. Wyniki jednoosiowego rozciągania próbek z kratową geometrią wypełnienia wewnętrznego wytwarzanych w orientacji poziomej

Tab. 14. Wartości parametrów przy zerwaniu próbek

Nr próbki	Siła [kN] przy zerwaniu próbki	Naprężenie rozciągające [MPa] przy zerwaniu próbki
Próbka nr 1	0,75	18,84
Próbka nr 2	0,73	18,13
Próbka nr 3	0,74	18,51
Próbka nr 4	0,74	18,53
Średnia	0,74	18,50
Odchylenie standardowe	0,01	0,29

W wyniku próby jednoosiowego rozciągania próbek normatywnych zbudowanych z kratowej geometrii wewnętrznej wytworzonych w orientacji na sztorc w komorze roboczej maszyny, otrzymano charakterystyki wartości naprężeń niszczących od wartości odkształcenia, które przedstawiono na rys. 4.40. Średnia wartość naprężenia rozciągającego przy zerwaniu próbki wyliczona na podstawie trzech prób rozciągania wyniosła 21,76 MPa. Wartość ta stanowi 117% średniej wartości naprężeń zrywających dla próbek wytwarzanych w orientacji poziomej. Obliczona wartość odchylenia standardowego wyniosła 0,08 MPa.

Wartość średnia siły zrywającej wyliczona dla trzech prób zerwania wyniosła 0,83 kN i stanowi 112% wartości siły zrywającej dla próbki wytwarzanej w orientacji poziomej. Wartość odchylenia standardowego wyniosła 0,04 kN. Wyniki prób rozciągania przedstawiono w tab. 15.



Rys. 4.40. Wyniki jednoosiowego rozciągania próbek z kratową geometrią wypełnienia wewnętrznego wytwarzanych w orientacji na sztorc

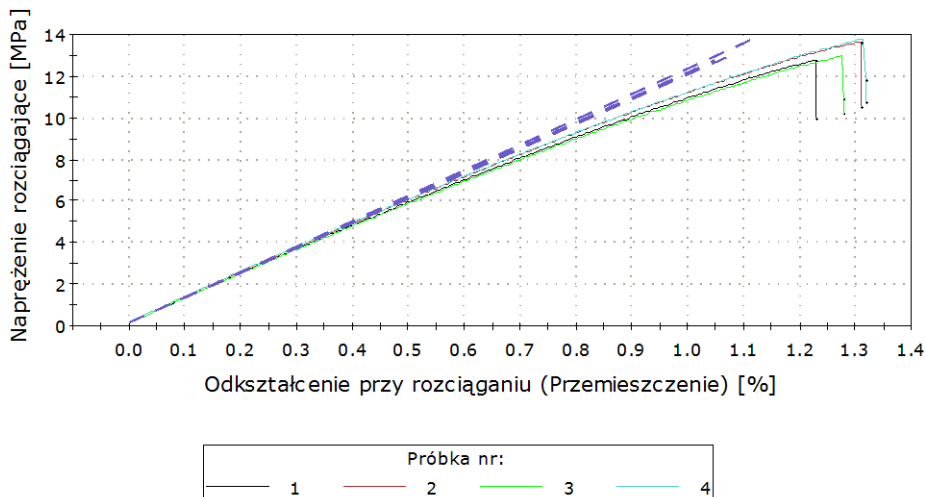
Tab. 15. Wartości parametrów przy zerwaniu próbki

Nr próbki	Siła [kN] przy zerwaniu próbki	Napężenie rozciągające [MPa] przy zerwaniu próbki
Próbka nr 1	0,87	21,65
Próbka nr 2	0,85	21,88
Próbka nr 3	0,79	21,77
Średnia	0,83	21,76
Odchylenie standardowe	0,04	0,08

W wyniku próby jednoosiowego rozciągania próbek normatywnych zbudowanych z kratowej geometrii wewnętrznej wytworzonych w orientacji pionowej w komorze roboczej maszyny, otrzymano charakterystyki wartości naprężeń niszczących od wartości odkształcenia, które przedstawiono na rys. 4.41. Średnia wartość naprężenia rozciągającego przy zerwaniu próbki wyliczona na podstawie czterech prób rozciągania wyniosła 12,88 MPa. Wartość ta jest o 40% niższa od średniej wartości naprężeń zrywających dla próbek wytwarzanych w orientacji na sztorc i o 30% niższa od średniej wartości naprężeń zrywających dla próbek wytworzonych w orientacji poziomej. Obliczona wartość odchylenia standardowego wyniosła 0,32 MPa.

Wartość średnia siły zrywającej wyliczona dla czterech prób zerwania wyniosła 0,49 kN i jest o 40% mniejsza od wartości siły zrywającej dla próbki wytwarzanej w orientacji na sztorc oraz o 33% niższa od wartości naprężeń zrywających dla próbek

wytworzonych w orientacji poziomej. Odchylenie standardowe wartości siły zrywającej wyniosło 0,05 kN. Wyniki prób rozciągania jednoosiowego próbek normatywnych przedstawiono w tab. 16.



Rys. 4.41. Wyniki jednoosiowego rozciągania próbek z kratową geometrią wypełnienia wewnętrznego wytwarzanych w orientacji pionowej

Tab. 16. Wartości parametrów przy zerwaniu próbki

Nr próbki	Siła [kN] przy zerwaniu próbki	Napężenie rozciągające [MPa] przy zerwaniu próbki
Próbka nr 1	0,51	12,75
Próbka nr 2	0,55	13,64
Próbka nr 3	0,44	12,31
Próbka nr 4	0,47	12,83
Średnia	0,49	12,88
Odchylenie standardowe	0,05	0,32

W tab. 17 przedstawiono zestawienie danych wyliczonych na podstawie prób jednoosiowego rozciągania dla próbek z kratową geometrią wypełnienia wewnętrznego. Tabela zawiera komplet danych niezbędnych do zbudowania macierzy sztywności dla tej geometrii wewnętrznej.

Wyniki badań pokazują, że największą wytrzymałością na rozciąganie cechowała się próbka wytworzona w orientacji na sztorc, następnie w orientacji poziomej – 89% wartości siły zrywającej względem orientacji na sztorc, oraz pionowej – 59% wartości siły zrywającej względem orientacji na sztorc.

Tab. 17. Zestawienie parametrów próbek z kratową geometrią wypełnienia wewnętrznego

Parametr	Próbka_1	Próbka_2	Próbka_3	Próbka_4	Wartość średnia	Odchylenie standardowe
Moduł E_{11} [Gpa]	1,26	1,25	1,27	1,26	1,26	0,01
Moduł E_{22} [Gpa]	1,56	1,57	1,56	1,56	1,56	0,00
Moduł E_{33} [Gpa]	1,20	1,22	1,19	1,22	1,21	0,02
Moduł Poissona ν_{12}	0,306	0,420	0,348	0,358	0,358	0,05
Moduł Poissona ν_{23}	0,39	0,411	0,448	0,448	0,416	0,03
Moduł Poissona ν_{13}	0,261	0,318	0,276	0,224	0,285	0,04
Moduł Kirchhoffa G_{12} [Gpa]	0,482	0,440	0,471	0,464	0,464	0,01
Moduł Kirchhoffa G_{23} [Gpa]	0,561	0,556	0,539	0,539	0,549	0,007
Moduł Kirchhoffa G_{13} [Gpa]	0,476	0,463	0,466	0,498	0,476	0,01

4.5. Zestawienie porównawcze

W zestawieniu porównawczym przedstawiono tabelaryczną reprezentację średnich wartości danych uzyskanych w badaniach laboratoryjnych dla trzech analizowanych geometrii wypełnienia. Wszystkie próbki wytworzono z materiału ABS-M30 w technologii FDM. W tabelach (tab. 18, tab. 19, tab. 20) przedstawiono wartości zarejestrowane w momencie rozerwania próbek: wytrzymałość na rozciąganie oraz wartość siły zrywającej. Uzyskane w wyniku eksperymentów laboratoryjnych dane porównano z wartościami dla próbki litej wykonanej z materiału ABS-M30 metodą wtrysku.

Tab. 18. Dane liczbowe dla orientacji poziomej wytwarzania próbek

Parametr	ABS-M30 po wtrysku	Geometria lita-włóknista	Geometria żebrowa	Geometria kratowa
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	36	24,77	8,58	18,50
Siła zrywająca próbkę [kN]	1,44	0,99	0,34	0,74
Moduł Younga [MPa]	2413	1910	1100	1260
Współczynnik Poissona	0,34	0,326	0,346	0,358
Moduł Kirchhoffa [MPa]	900	719	410	464

Tab. 19. Dane liczbowe dla orientacji na sztorc wytwarzania próbek

Parametr	ABS-M30 po wtrysku	Geometria lita-włóknista	Geometria żeberkowa	Geometria kratowa
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	36	27,11	17,55	20,87
Siła zrywająca próbkę [kN]	1,44	1,08	0,70	0,83
Moduł Younga [MPa]	2413	1920	1460	1560
Współczynnik Poissona	0,34	0,401	0,307	0,416
Moduł Kirchhoffa [MPa]	900	687	558	549

Tab. 20. Dane liczbowe dla orientacji pionowej wytwarzania próbek

Parametr	ABS-M30 po wtrysku	Geometria lita-włóknista	Geometria żeberkowa	Geometria kratowa
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	36	16,69	7,9	12,28
Siła zrywająca próbkę [kN]	1,44	0,67	0,32	0,49
Moduł Younga [MPa]	2413	1670	880	1210
Współczynnik Poissona	0,34	0,306	0,279	0,285
Moduł Kirchhoffa [MPa]	900	637	342	476

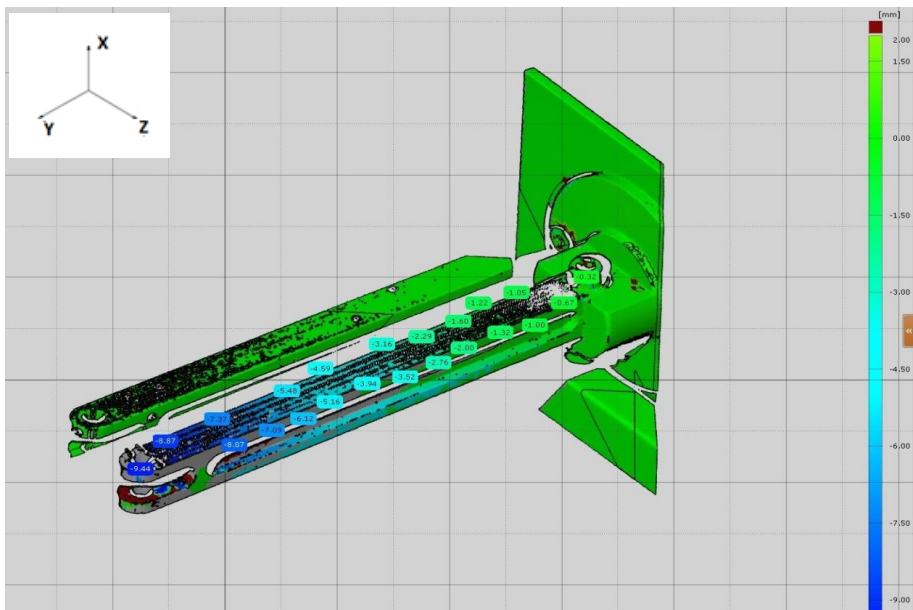
4.6. Wyniki badań prototypów

Badania prototypów części (próby obciążenia statycznego) prowadzono w stabilnych warunkach temperaturowych, w temperaturze 21 °C, przy wilgotności 57%. Zbadano pola odkształceń prototypów chwytaka zbudowanych z trzech geometrii wypełnienia: litej-włóknistej, kratowej i żeberkowej.

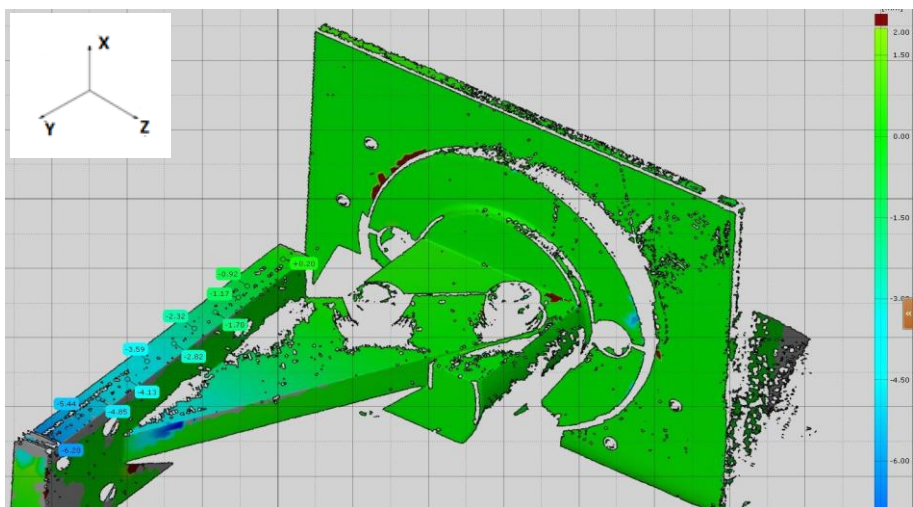
Uzyskane wyniki zaprezentowano na rysunkach (rys. 4.42 – rys. 4.47) pokazujących mapy uśrednionych pól odkształceń prototypów, które otrzymano w wyniku skanowania statycznie obciążonych modeli. Na rysunkach zaznaczono wartości odkształceń w odstępach co 10 mm, wzdłuż osi podłużnej elementu. Analizę wyników i wnioski z badań przedstawiono w rozdziałach 6 i 7. Prototypy obciążano masami adekwatnymi do badanej geometrii wypełnienia wewnętrznego. Dopasowanie masy obciążającej miało na celu zapobieżenie uszkodzeniom trwałym badanych części.

4.6.1. Wyniki badań ugięcia części z litą-włóknistą geometrią wewnętrzną

Na rysunku 4.42 przedstawiono wyniki pomiarów statycznych ugięcia prototypu ramienia chwytaka pod wpływem masy podwieszanej 5 kg. Maksymalna zarejestrowana wartość strzałki ugięcia wyniosła 9,44 mm.



Rys. 4.42. Graficzne przedstawienie uśrednionych wyników badań ugięcia ramienia

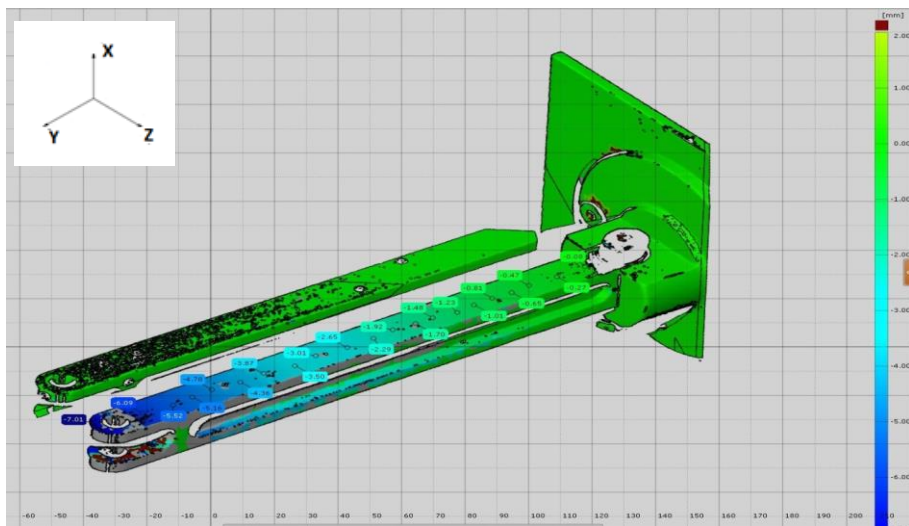


Rys. 4.43. Graficzne przedstawienie uśrednionych wyników badań ugięcia szczęki

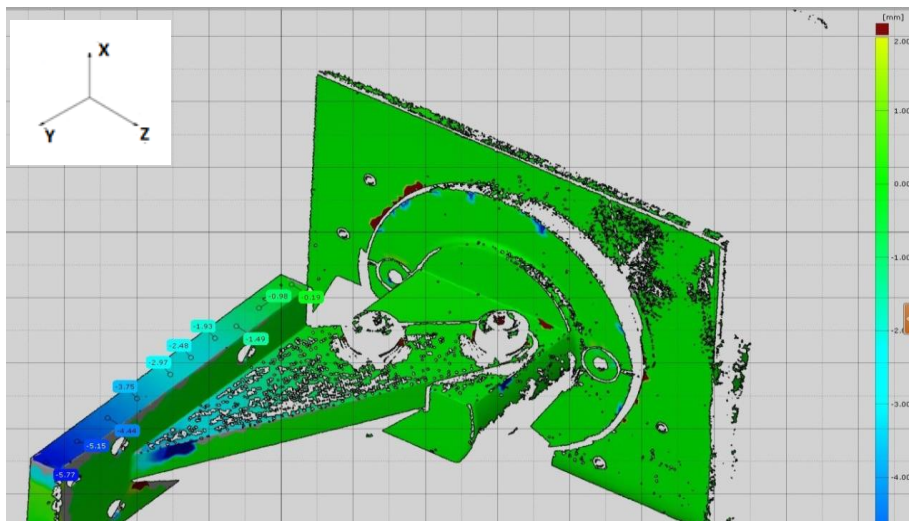
Na rysunku 4.43 przedstawiono wyniki pomiarów statycznych ugięcia prototypu szczęki chwytaka pod wpływem masy podwieszanej 10 kg. Maksymalna zarejestrowana wartość strzałki ugięcia wyniosła 6,20 mm.

4.6.2. Wyniki badań ugięcia części z żeberkową geometrią wewnętrzną

Na rysunku 4.44 przedstawiono wyniki pomiarów statycznych ugięcia prototypu ramienia chwytaka pod wpływem masy podwieszanej 3 kg. Maksymalna zarejestrowana wartość strzałki ugięcia wyniosła 7,01 mm.



Rys. 4.44. Graficzne przedstawienie uśrednionych wyników badań ugięcia ramienia

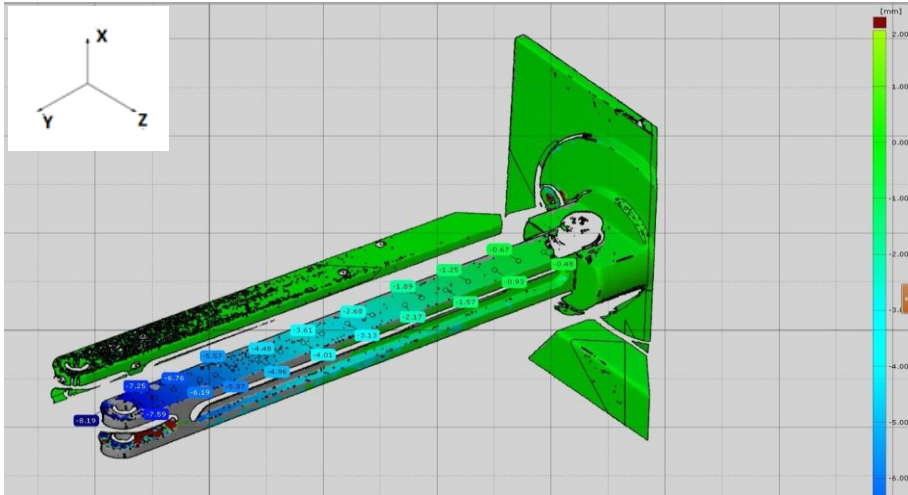


Rys. 4.45. Graficzne przedstawienie uśrednionych wyników badań ugięcia szczęki

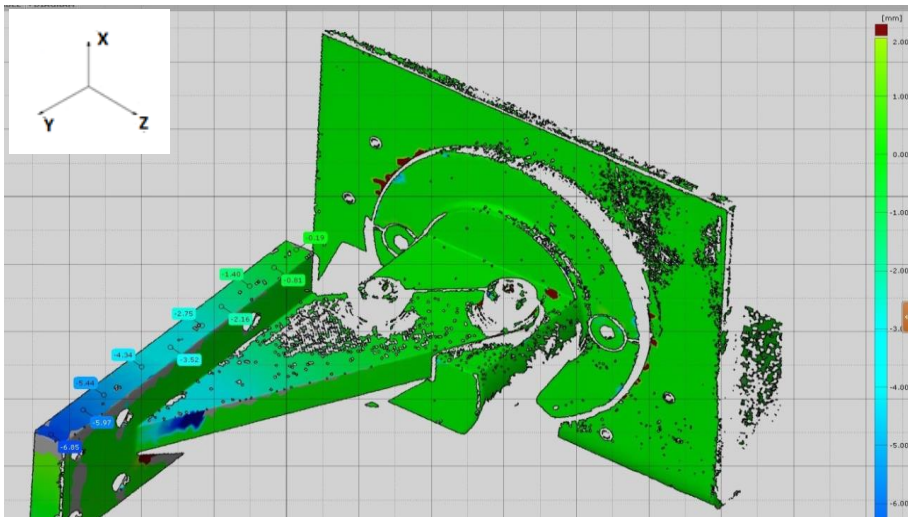
Na rysunku 4.45 przedstawiono wyniki pomiarów statycznych ugięcia prototypu szczęki chwytaka pod wpływem masy podwieszanej 4 kg. Maksymalna zarejestrowana wartość strzałki ugięcia wyniosła 5,77 mm.

4.6.3. Wyniki badań ugięcia części z kratową geometrią wewnętrzną

Na rysunku 4.46 przedstawiono wyniki pomiarów statycznych ugięcia prototypu ramienia chwytaka pod wpływem masy podwieszanej 3 kg. Maksymalna zarejestrowana wartość strzałki ugięcia wyniosła 8,19 mm.



Rys. 4.46. Graficzne przedstawienie uśrednionych wyników badań ugięcia ramienia



Rys. 4.47. Graficzne przedstawienie uśrednionych wyników badań ugięcia szczęki

Na rysunku 4.47 przedstawiono wyniki pomiarów statycznych ugięcia prototypu szczęki chwytaka pod wpływem masy podwieszanej 8 kg. Maksymalna zarejestrowana wartość strzałki ugięcia wyniosła 6,85 mm.

Wyniki badań próbek normatywnych i prototypów części pokazują jednoznacznie, że technologia FDM daje możliwość doboru geometrii wewnętrznych dla prototypów, nie tylko w kontekście wytrzymałości, ale również minimalizowania kosztów – zużycia materiałów oraz czasu pracy maszyny.

Analizując wyniki wyraźnie widać, że próbki i prototypy zawierające geometrię litą-włóknistą wykazują się największą wytrzymałością i sztywnością. Jednak z ekonomicznego punktu widzenia do ich produkcji zostało zużyte najwięcej materiału. Również czas wytwarzania tych obiektów był najdłuższy względem pozostałych. Druga skrajność – zastosowanie geometrii żeberkowej – umożliwia relatywnie tanie i szybkie budowanie obiektów ale przy znacznie mniejszej, względem geometrii litej-włóknistej wytrzymałości i sztywności. Projektując części z przeznaczeniem do wytworzenia przy wykorzystaniu technologii FDM, należy dokładnie określić ich przeznaczenie i warunki pracy. Optymalizacja produkcji będzie bezpośrednio zależna od unikatowej możliwości technologii FDM – możliwości budowania niemalże dowolnych geometrii wewnętrznych. To oznacza, że szacowanie wytrzymałości dla prototypów wytwarzanych przyrostowo powinno uwzględniać możliwość dowolnego budowania zróżnicowanych geometrii wewnętrznych w objętości jednej części. Typ geometrii wewnętrznej wykorzystanej w produkcji części może być zróżnicowany i bezpośrednio dostosowany do warunków brzegowych – obciążenia, zamocowania itp. Dobrym przykładem ilustrującym wyżej wymienione możliwości może być korpus maszyny. W celu optymalnego zaplanowania produkcji takiej części należy zidentyfikować obszary poddawane obciążeniom oraz obszary wolne od potencjalnych obciążeń. Następnie zgodnie z wynikami badań obszary odpowiedzialne za przeniesienie obciążenia, np. uźebrowanie, porty mocujące, strefy narażone na uderzenia należałoby wytworzyć przy wykorzystaniu geometrii litej-włóknistej. Obszary wolne od obciążenia, np. elementy osłonowe, elementy designu, owiewki mogą zawierać żeberkowe struktury wypełnienia, co zminimalizuje ich masę i koszt wytwarzania. Obszary pośrednie – łączące strefy narażone na obciążenia i uderzenia z elementami wolnymi od obciążeń można wówczas wytworzyć stosując pośrednią – kratową geometrię wypełnienia wewnętrznego. Idąc dalej, na podstawie otrzymanych wyników można nie tylko podejmować próby optymalizacji, ale również tworzyć części z programowanymi strefami zniszczenia. Jeżeli konstruktorowi zależy na „przewidywalnym zniszczeniu” zaprojektowanego korpusu, np. w wyniku uderzenia mechanicznego, wówczas litą-włóknistą geometrię wewnętrzną można w wybranych obszarach zastąpić geometrią żeberkową. W ten sposób zostanie stworzony swoisty szew, który w przypadku uderzenia oraz z racji mniejszej wytrzymałości – pierwszy ulegnie zniszczeniu. Czyli można powiedzieć, że odpowiednie zaprojektowanie geometrii wewnętrznej, bazujące na oszacowanej wytrzymałości to nic innego, jak programowanie kontrolowanego zniszczenia części mogącego wystąpić w wyniku przeciążeń.

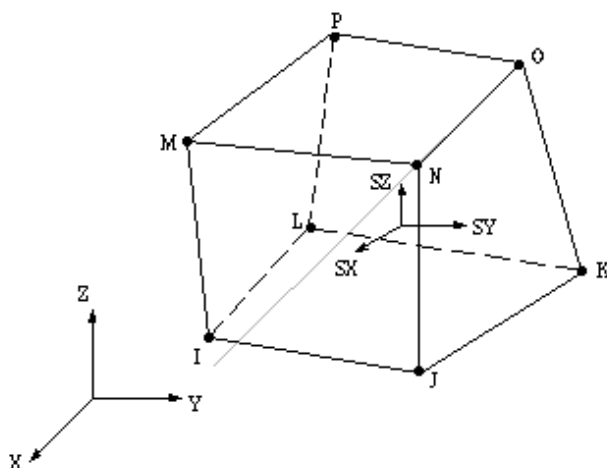
5. Komputerowe badania symulacyjne

5.1. Metodyka badań

Komputerowe badania symulacyjne przeprowadzono w środowisku ANSYS, służącym m.in. do obliczeń pól naprężeń i pól odkształceń Metodą Elementów Skończonych [149, 154]. W ramach badań symulacyjnych wykonano odwzorowanie eksperymentów jednoosiowego rozciągania próbek normatywnych oraz odwzorowanie badania ugięcia prototypów części po zaimplementowaniu do systemu parametrów macierzy sztywności otrzymanych w wyniku eksperymentów laboratoryjnych.

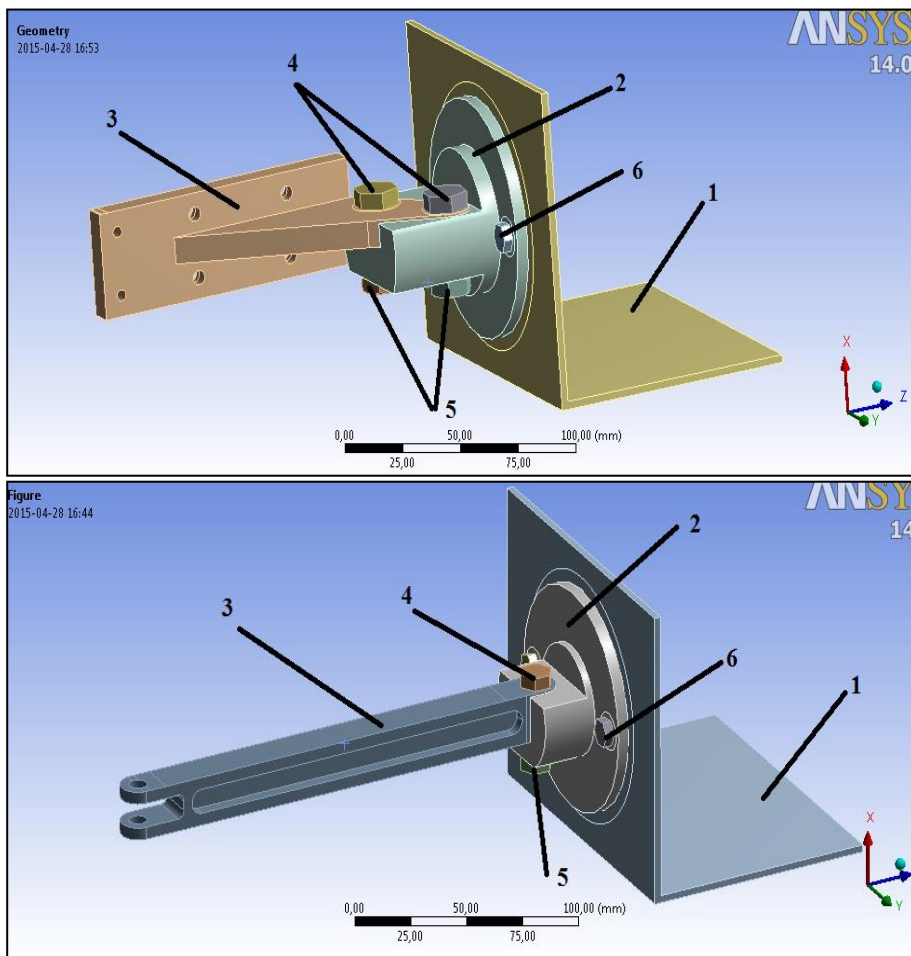
W odwzorowaniu jednoosiowego rozciągania próbek materiałowych zadawano jako warunek brzegowy średnią wartość siły zrywającej jaką odczytano podczas badań eksperymentalnych odpowiadających im próbek. W wyniku symulacji otrzymano naprężenia w próbkach, które występują dla zadanej siły rozciągającej. Dzięki temu możliwe było porównawcze zweryfikowanie modeli symulacyjnych. Wyniki symulacyjnego rozciągania próbek przedstawiono w trzech tabelach, po jednej dla każdej badanej geometrii wewnętrznej oraz w postaci graficznej.

Metodyka badań ugięcia prototypów części (rys. 5.7) zakłada przeprowadzenie analiz obciążenia statycznego. Na potrzeby analizy statycznej wygenerowano siatkę dla modeli symulacyjnych z elementów SOLID185 [154], które są zalecane do modelowania dla struktur bryłowych. Tego typu elementy siatki zdefiniowane są przez właściwości ortotropowe zadanego materiału oraz osiem węzłów, z których każdy ma trzy stopnie swobody (rys. 5.1) – ruchy w trzech kierunkach przestrzeni: X, Y i Z.

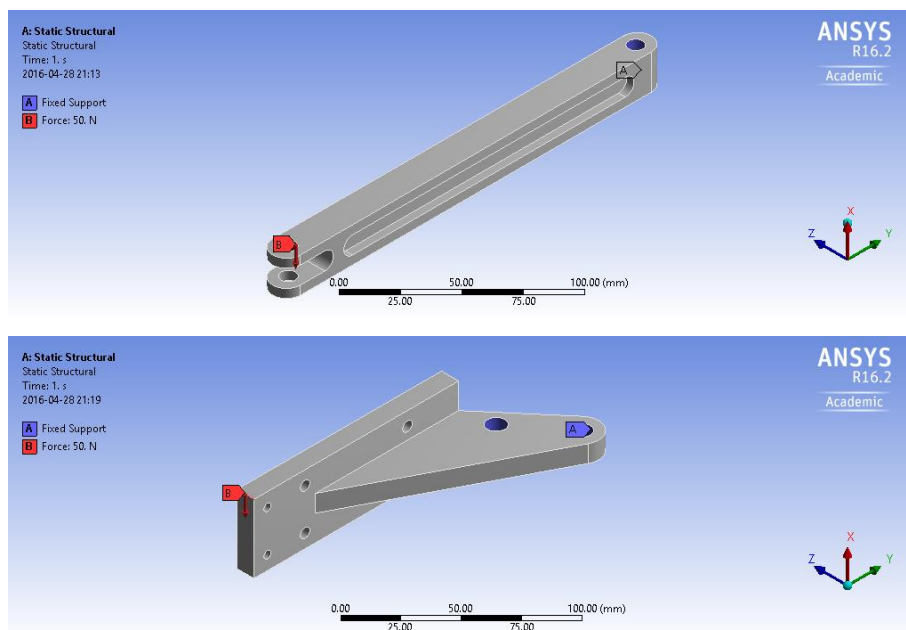


Rys. 5.1. Element typu SOLID185 [154]

Opracowany model CAD stanowiska badawczego (rys. 5.2) składający się ze stabilnego mocowania do podłoża (nr 1, rys. 5.2), elementu mocującego prototyp (nr 2, rys. 5.2), badanego prototypu (nr 3, rys. 5.2) oraz śrub i nakrętek mocujących (nr 4, 5, 6, rys. 5.2) uproszczono, co miało bezpośrednie przełożenie na uproszczenie modelu obliczeniowego w środowisku MES. Uproszczenie skompensowano zadaniem odpowiednich warunków brzegowych w modelach (rys. 5.3, rys. 5.4). Zdefiniowano sposób utwierdzenia modeli do podłoża (ozn. A, rys. 5.3) oraz sposób obciążania modeli zadaną masą (ozn. B, rys. 5.3).

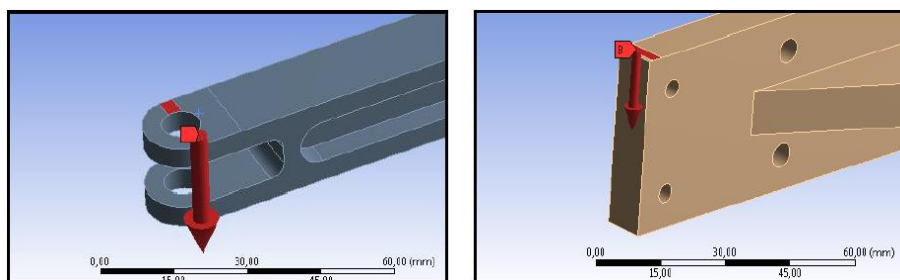


Rys. 5.2. Modele CAD elementów stanowiska badawczego



Rys. 5.3. Uprozczone modele CAD przyjęty do badań z zadanymi warunkami brzegowymi

Obciążenie i sposób zamocowania prototypów części zadano w taki sposób, aby został odwzorowany sposób przyłożenia obciążenia podczas eksperymentów laboratoryjnych (rys. 5.4).



Rys. 5.4. Sposób zdefiniowania obciążenia – przyłożenie siły i rozkład pola jej działania

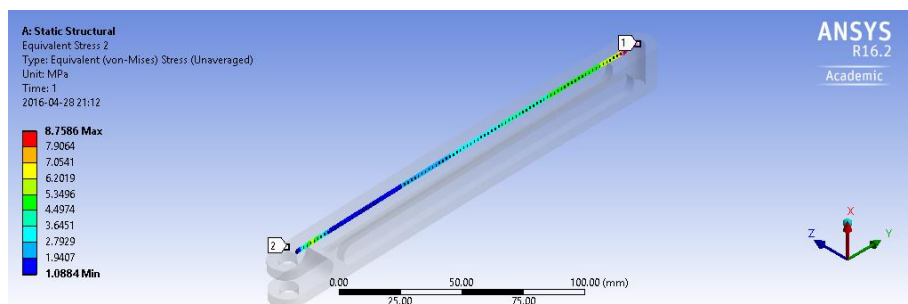
W celu zbadania poprawności otrzymanych wyników badań symulacyjnych, zaplanowano przeprowadzenie analizy porównawczej pól naprężeń dla prototypu uśrednionych po elementach siatki oraz pól naprężeń dla prototypu nieuśrednionych po elementach siatki. Przyjęto założenie, że wygenerowane wyniki mieszczą się w dopuszczalnych granicach wtedy, kiedy błąd między wartościami pól naprężeń uśrednionych i nieuśrednionych po elementach siatki jest mniejszy niż 10%. W przeciw-

nym wypadku założono, że model będzie wymagał zagęszczenia siatki. Solver środowiska ANSYS ustawiono do wyliczeń stanu dużych odkształceń dla analizy statycznej, w zakresie liniowym.

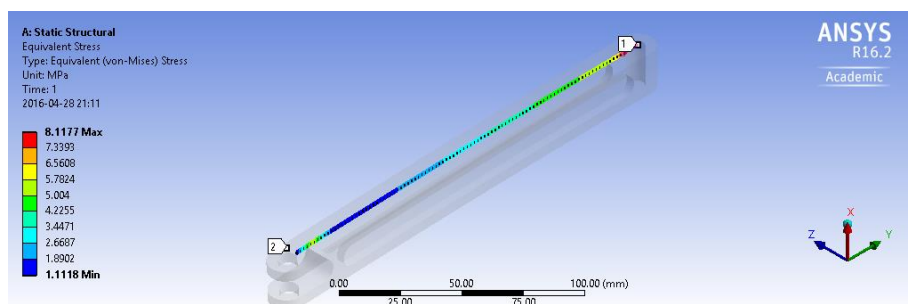
Weryfikację poprawności siatki wykonano dla symulacji obciążenia prototypu CAD ramienia chwytaka, dla którego zaimplementowano dane dla żeberkowej geometrii wypełnienia wewnętrznego. Prototyp obciążono masą 3 kg. Wynik porównań przedstawiono graficznie (rys. 5.5, rys. 5.6) i w formie tabeli (tab. 21).

Tab. 21. Wyniki porównawcze dokładności siatek mesh

Ramię chwytaka z geometrią żeberkową	
Maksymalne naprężenie nieuśrednione po elementach [MPa]	8,7586
Maksymalne naprężenie uśrednione po elementach [MPa]	8,1177
Wartość obliczonego błędu	7%

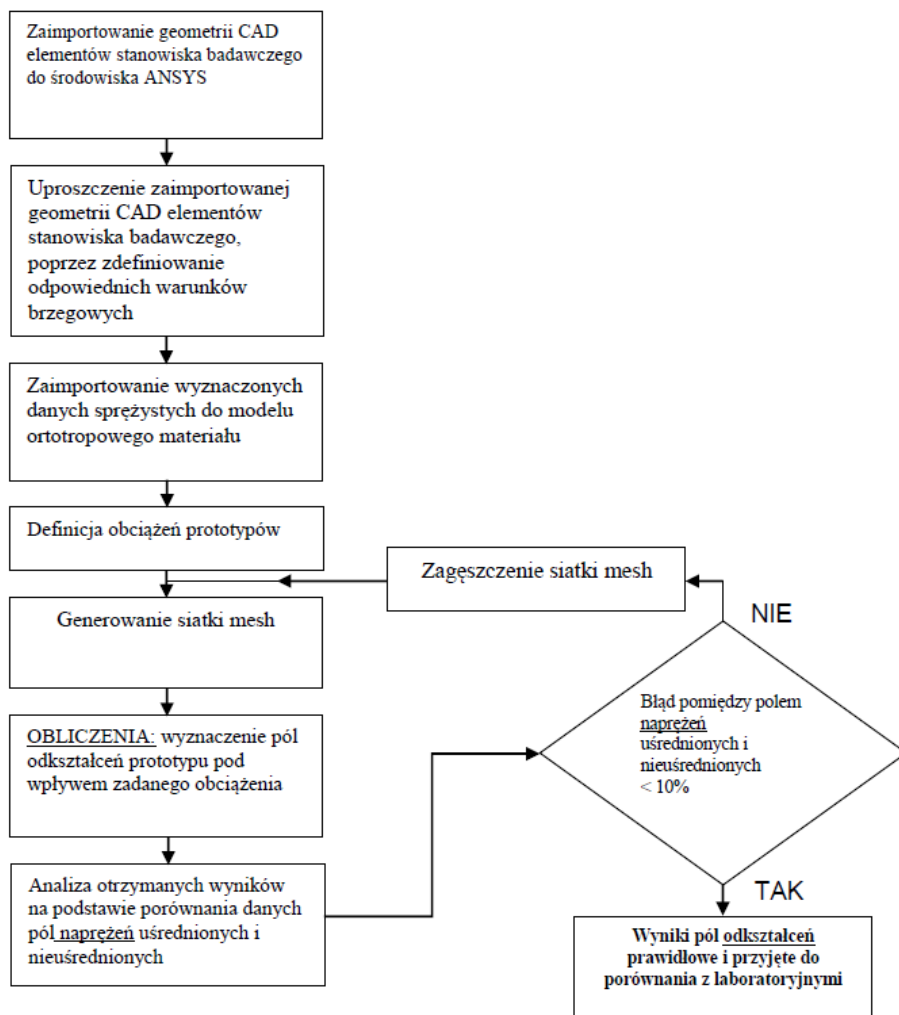


Rys. 5.5. Wartości naprężeń nieuśrednione po elementach



Rys. 5.6. Wartości naprężeń uśrednionych po elementach

Analizę otrzymanych wyników z badań symulacyjnych i wnioski z badań przedstawiono w rozdziale 7. Wszystkie geometrie przygotowane do badań symulacyjnych były litymi bryłami CAD, uzyskanymi w wyniku standardowego modelowania.



Rys. 5.7. Schemat metodyki komputerowych badań symulacyjnych

Przedstawiony algorytm (rys. 5.7) rozpoczyna się od zaimportowania opracowanej w systemie CAD geometrii części, co stanowi jeden z ważniejszych punktów proponowanej metody. Stosując metodę szybkiego prototypowania należy uwzględnić sposób pracy współczesnych inżynierów. Geometria CAD stanowi podstawę do pracy całego zespołu ludzi – inżynierów, technologów, warsztatu produkcyjnego, designerów itp. Nie można zatem spowalniać tego procesu przez dostosowywanie samej geometrii CAD do szczegółowego odwzorowania struktur wewnętrznych tylko i wyłącznie na potrzeby szacowania wytrzymałości. Byłoby to nieoptymalne i nieopłacalne podejście w całym procesie wytwarzania. Dlatego podejmując próbę szacowania wytrzymałości części przeznaczonych do wytworzenia za pomocą technologii

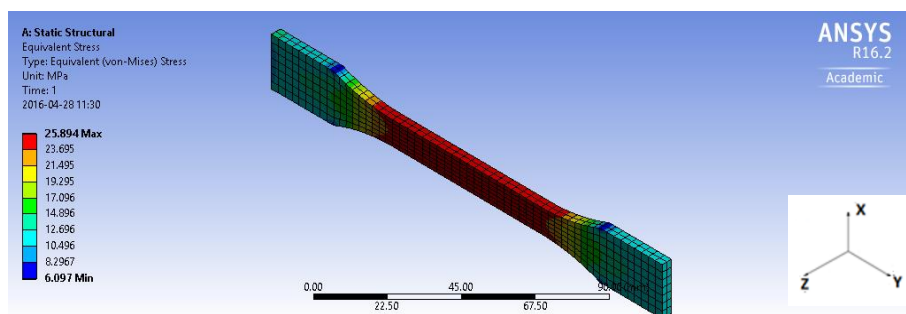
FDM należy skupić się na wykorzystywaniu coraz doskonalszych modeli matematycznych opisujących budowane geometrie wewnętrzne ortotropowe albo skupić się na wytworzeniu narzędzi projektowych znacznie przyspieszających czas powstawania odwzorowanych geometrii wewnętrznych, które pozwoliłyby na wykorzystanie izotropowego modelu materiału do szacowania wytrzymałości. Prezentowany algorytm wpisuje się w pierwsze rozwiązanie. Bez ingerencji w geometrię umożliwia oszacowanie wytrzymałości prototypu bazując na modelu matematycznym ortotropowej geometrii wewnętrznej. W nawiązaniu do przykładów części z optymalizowaną geometrią wewnętrzną lub programowanym zniszczeniem, o których wspomniano w rozdziale poprzednim, należy stwierdzić, że zestawiając obecne możliwości systemu do obliczeń metodą MES, możliwe jest szacowanie wytrzymałości części, której geometria wewnętrzna jest zróżnicowana. Systemy do obliczeń numerycznych bazujące na metodzie MES umożliwiają zróżnicowanie geometrii wewnętrznej, a zatem zastosowanie zróżnicowanych modeli matematycznych w wybranych obszarach objętości analizowanej części.

5.2. Wyniki badań symulacyjnych

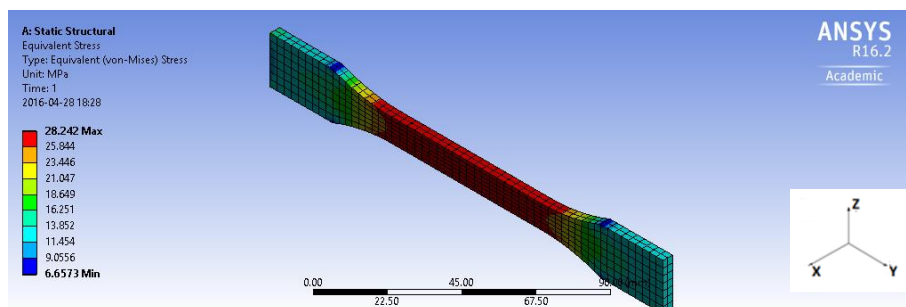
Prezentowane wyniki badań symulacyjnych zostały wyznaczone na podstawie wykorzystania macierzy sztywności dla przyjętych geometrii wewnętrznych wypełnienia. Wyniki odniesiono do analogicznych obliczeń komputerowych przeprowadzonych na modelach izotropowych.

5.2.1. Wyniki badań jednoosiowego rozciągania próbek normatywnych

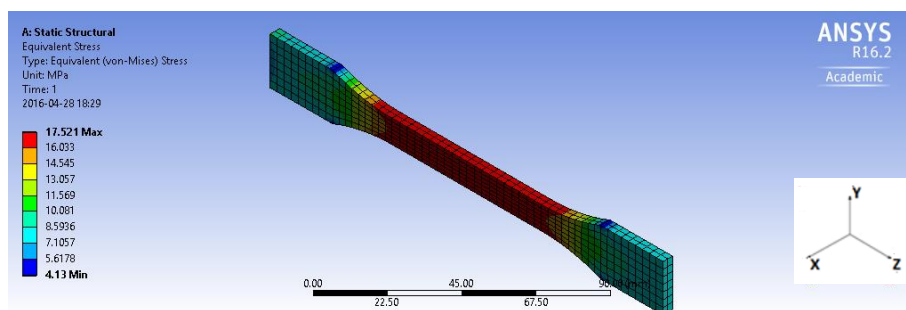
W wyniku rozciągania próbek, których właściwości były opisane za pomocą macierzy sztywności dla geometrii litej-włóknistej otrzymano wyniki wartości naprężenia występujące przy zadanej sile rozciągającej (rys. 5.8, rys. 5.9, rys. 5.10). Wartość siły rozciągającej (tab. 22) jest różna w zależności od orientacji wytwarzania próbki i została wyznaczona podczas eksperymentów laboratoryjnych. Dla geometrii litej-włóknistej maksymalna wartość siły rozrywającej wynosiła 1,08 kN, a odpowiadające jej naprężenie 28,242 MPa. Te wartości wystąpiły dla właściwości opisujących orientację wytwarzania próbek na sztorc.



Rys. 5.8. Wyniki rozciągania próbki z geometrią litą-włóknistą wytwarzanej w orientacji poziomej



Rys. 5.9. Wyniki rozciągania próbki z geometrią litą-włóknistą wytwarzanej w orientacji na sztorc

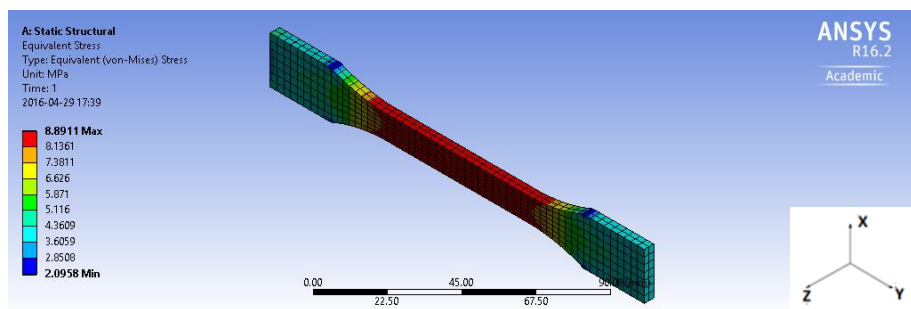


Rys. 5.10. Wyniki rozciągania próbki z geometrią litą-włóknistą wytwarzanej w orientacji pionowej

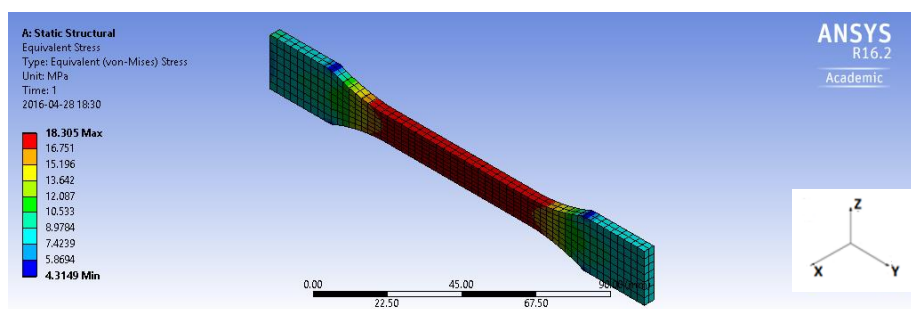
Tab. 22. Próbkę normatywne z geometrią litą-włóknistą

Orientacja	Siła rozciągająca zadana	Napężenie maksymalne odczytane
Pozioma	0,99 kN	25,894 MPa
Na sztorc	1,08 kN	28,242 MPa
Pionowa	0,67 kN	17,521 MPa

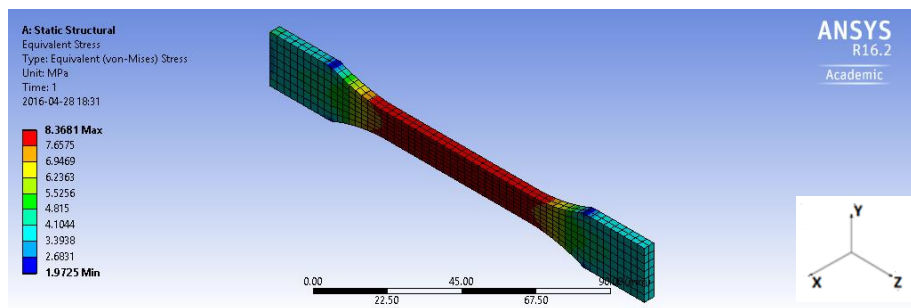
W wyniku rozciągania próbek, których właściwości były opisane za pomocą macierzy sztywności dla geometrii żeberkowej otrzymano wyniki wartości napężenia występujące przy zadanej sile rozciągającej (rys. 5.11, rys. 5.12, rys. 5.13). Wartość siły rozciągającej (tab. 23) jest różna w zależności od orientacji wytwarzania próbki i została wyznaczona podczas eksperymentów laboratoryjnych. Dla geometrii żeberkowej maksymalna wartość siły rozrywającej wynosiła 0,70 kN, a odpowiadające jej napężenie 18,305 MPa. Te wartości wystąpiły dla właściwości opisujących orientację wytwarzania próbek na sztorc.



Rys. 5.11. Wyniki rozciągania próbki z geometrią żeberkową wytwarzanej w orientacji poziomej



Rys. 5.12. Wyniki rozciągania próbki z geometrią żeberkową wytwarzanej w orientacji na sztorc

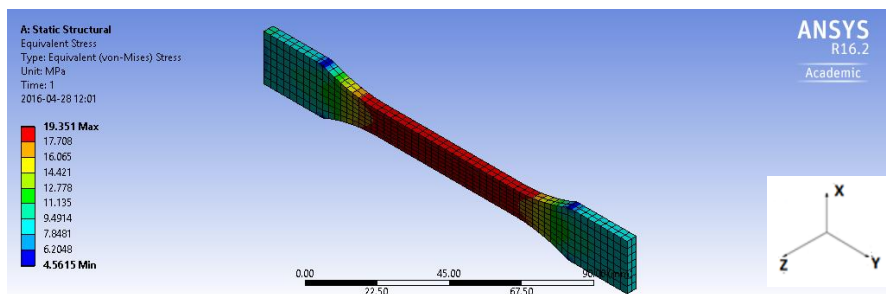


Rys. 5.13. Wyniki rozciągania próbki z geometrią żeberkową wytwarzanej w orientacji pionowej

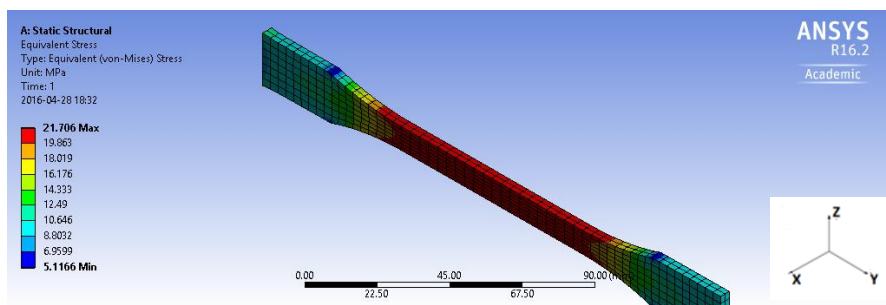
Tab. 23. Próbkę normatywne z geometrią żeberkową

Orientacja	Siła rozciągająca zadana	Naprężenie maksymalne odczytane
Pozioma	0,34 kN	8,8911 MPa
Na sztorc	0,70 kN	18,305 MPa
Pionowa	0,32 kN	8,3681 MPa

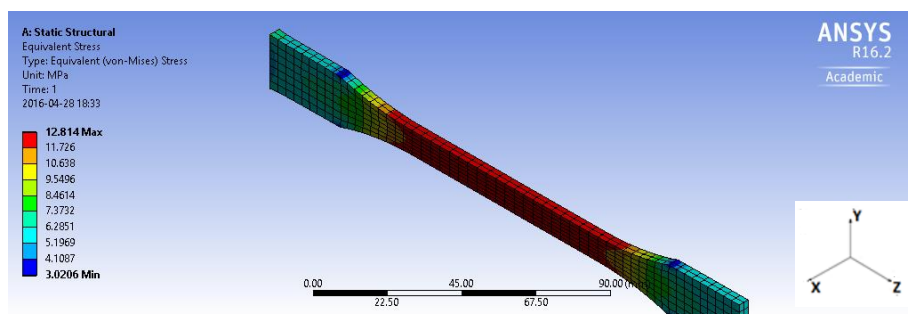
W wyniku rozciągania próbek, których własności były opisane za pomocą macierzy sztywności dla geometrii kratowej otrzymano wyniki wartości naprężenia występujące przy zadanej sile rozciągającej (rys. 5.14, rys. 5.15, rys. 5.16). Wartość siły rozciągającej (tab. 24) jest różna w zależności od orientacji wytwarzania próbki i została wyznaczona podczas eksperymentów laboratoryjnych. Dla geometrii żeberkowej maksymalna wartość siły rozrywającej wynosiła 0,83 kN, a odpowiadające jej naprężenie 21,706 MPa. Te wartości wystąpiły dla właściwości opisujących orientację wytwarzania próbek na sztorc.



Rys. 5.14. Wyniki rozciągania próbki z geometrią kratową wytwarzanej w orientacji poziomej



Rys. 5.15. Wyniki rozciągania próbki z geometrią kratową wytwarzanej w orientacji na sztorc



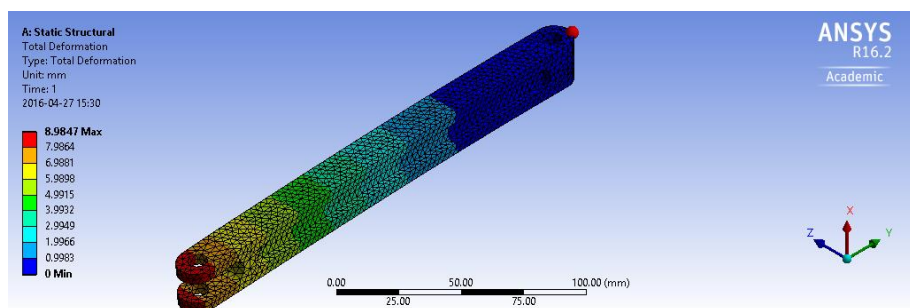
Rys. 5.16. Wyniki rozciągania próbki z geometrią kratową wytwarzanej w orientacji pionowej

Tab. 24. Próbkę normatywne z geometrią kratową

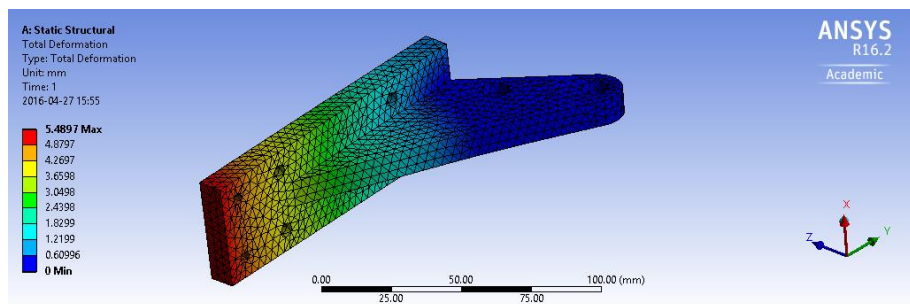
Orientacja	Siła rozciągająca zadana	Napężenie maksymalne odczytane
Pozioma	0,74 kN	19,351 MPa
Na sztorc	0,83 kN	21,706 MPa
Pionowa	0,49 kN	12,814 MPa

5.2.2. Wyniki badań ugięcia części z litą-włóknistą geometrią wewnętrzną

Na rysunku 5.17 przedstawiono komputerowe wyniki pomiarów statycznych ugięcia modelu CAD ramienia chwytaka pod wpływem masy podwieszanej 5 kg. Maksymalna zarejestrowana wartość strzałki ugięcia wyniosła 8,98 mm.

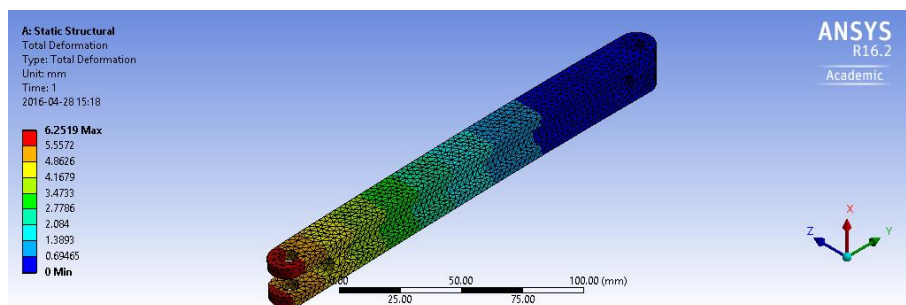
**Rys. 5.17.** Graficzne wyniki ugięcia: pola odkształceń [mm]

Na rysunku 5.18 przedstawiono komputerowe wyniki pomiarów statycznych ugięcia modelu CAD szczęki chwytaka pod wpływem masy podwieszanej 10 kg. Maksymalna zarejestrowana wartość strzałki ugięcia wyniosła 5,48 mm.

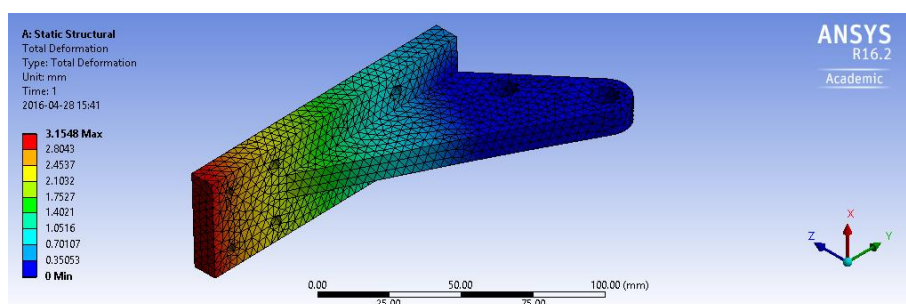
**Rys. 5.18.** Graficzne wyniki ugięcia: pola odkształceń [mm]

5.2.3. Wyniki badań ugięcia części z żeberkową geometrią wewnętrzną

Na rysunku 5.19 przedstawiono komputerowe wyniki pomiarów statycznych ugięcia modelu CAD ramienia chwytaka pod wpływem masy podwieszanej 3 kg. Maksymalna zarejestrowana wartość strzałki ugięcia wyniosła 6,25 mm.



Rys. 5.19. Graficzne wyniki ugięcia: pola odkształceń [mm]

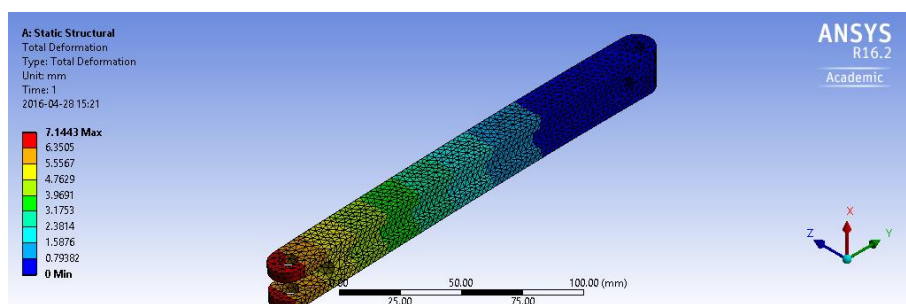


Rys. 5.20. Graficzne wyniki ugięcia: pola odkształceń [mm]

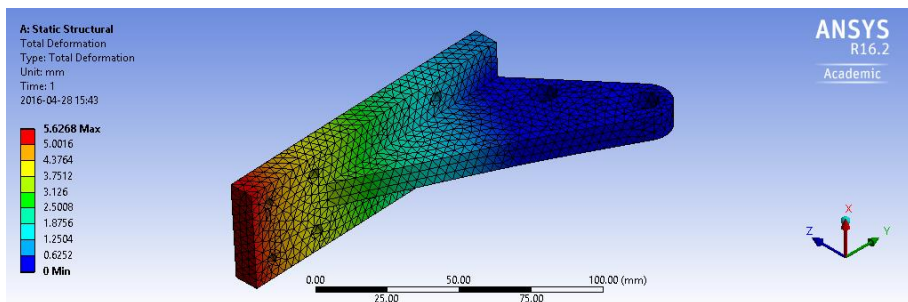
Na rysunku 5.20 przedstawiono komputerowe wyniki pomiarów statycznych ugięcia modelu CAD szczęki chwytaka pod wpływem masy podwieszanej 4 kg. Maksymalna zarejestrowana wartość strzałki ugięcia wyniosła 3,15 mm.

5.2.4. Wyniki badań ugięcia części z kratową geometrią wewnętrzną

Na rysunku 5.21 przedstawiono komputerowe wyniki pomiarów statycznych ugięcia modelu CAD ramienia chwytaka pod wpływem masy podwieszanej 3 kg. Maksymalna zarejestrowana wartość strzałki ugięcia wyniosła 7,14 mm.



Rys. 5.21. Graficzne wyniki ugięcia: pola odkształceń [mm]



Rys. 5.22. Graficzne wyniki ugięcia: pola odkształceń [mm]

Na rysunku 5.22 przedstawiono komputerowe wyniki pomiarów statycznych ugięcia modelu CAD szczęki chwytaka pod wpływem masy podwieszanej 8 kg. Maksymalna zarejestrowana wartość strzałki ugięcia wyniosła 5,62 mm.

6. Porównanie wyników badań laboratoryjnych i symulacyjnych

W celu porównania wyników badań otrzymanych w toku eksperymentów laboratoryjnych i symulacyjnych wykonano zestawienia tabelaryczne i graficzne.

Dla próbek normatywnych porównywano wartości naprężeń występujących dla danych wartości sił zrywających próbkę, które zarejestrowano podczas eksperymentów. Dla prototypów części porównywano wartości zarejestrowanego ugięcia. Analizę wyników i wnioski z badań przedstawiono w rozdziałach 6.5 oraz 7.

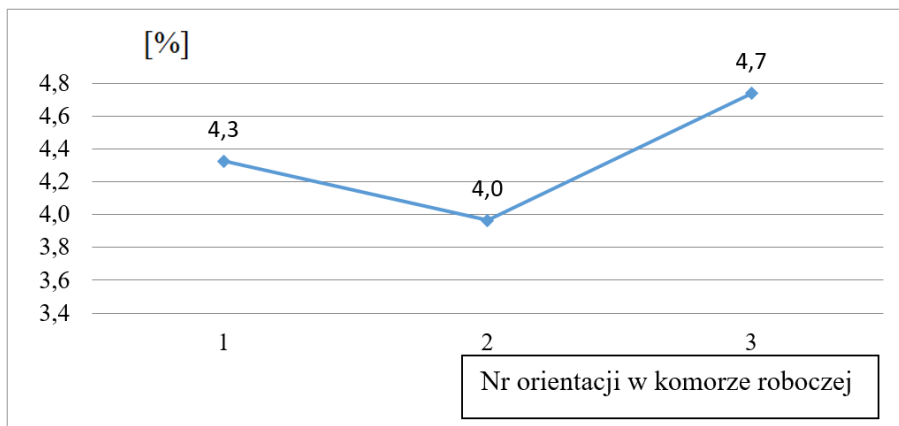
6.1. Wyniki badań dla litej-włóknistej geometrii wypełnienia

6.1.1. Wyniki badań próbek normatywnych

Wartości naprężeń występujących podczas badań laboratoryjnych i symulacyjnych dla odpowiadających im wartościom sił zrywających zestawiono w tab. 30. Dla obu przypadków – badania laboratoryjne i komputerowe – największą wytrzymałością wykazywała się próbka wytworzona w orientacji na sztorc (kolejno 27,12 MPa oraz 28,24 MPa), następnie w orientacji poziomej i pionowej. W ramach analizy wyników określono procentową wartość błędu między wynikami laboratoryjnymi i symulacyjnymi (rys. 6.1). Największym błędem – o wartości 4,7% obarczone są wyniki dla próbek wytworzonych w orientacji pionowej.

Tab. 25. Porównanie parametrów próbek normatywnych z geometrią litą-włóknistą

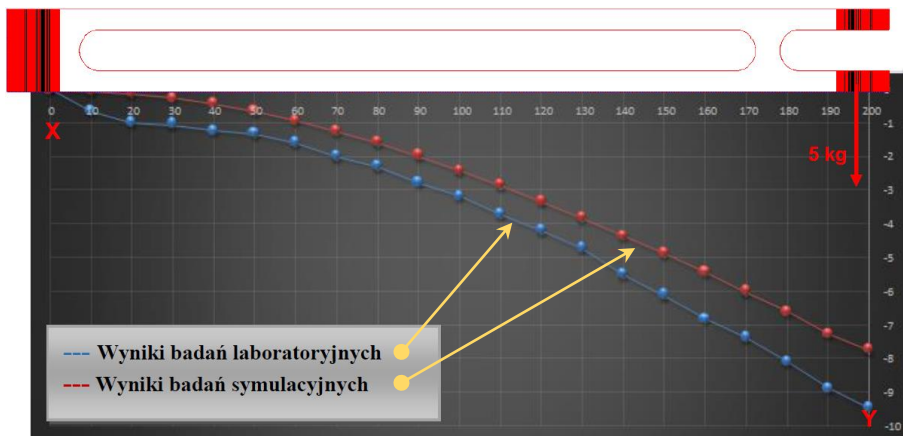
	Siła przy zerwaniu próbki podczas badań laboratoryjnych	Naprężenie rozciągające przy zerwaniu próbki badań laboratoryjne	Naprężenie rozciągające przy zerwaniu próbki badań symulacyjne
1. Orientacja pozioma	0,99 kN	24,77 MPa	25,89 MPa
2. Orientacja na sztorc	1,08 kN	27,12 MPa	28,24 MPa
3. Orientacja pionowa	0,67 kN	16,69 MPa	17,52 MPa



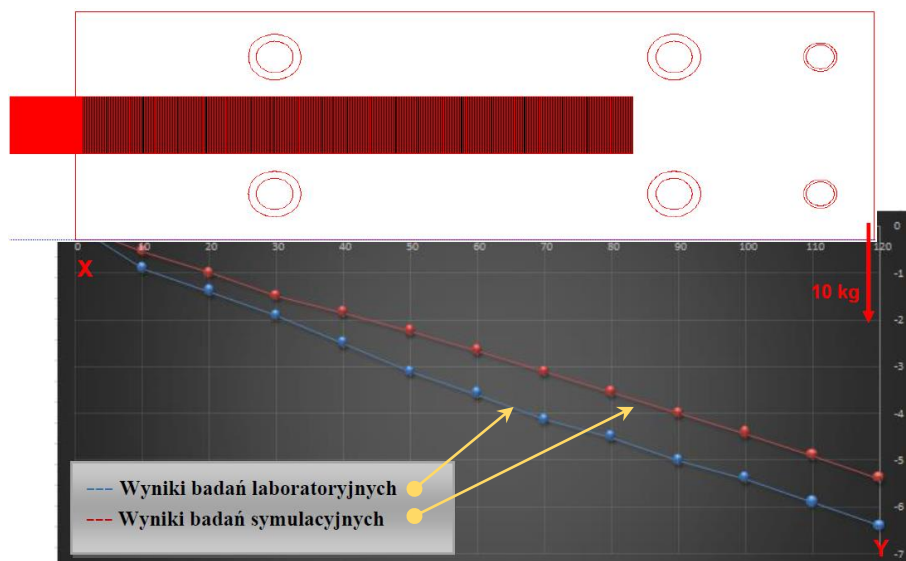
Rys. 6.1. Wartość błędu [%] między wynikami badań laboratoryjnych i symulacyjnych; tab. 30

6.1.2. Wyniki badań prototypów części chwytaka

Na rys. 6.2 oraz rys. 6.3 przedstawiono zestawienie wyników badań komputerowych i symulacyjnych charakterystyk ugięcia pod wpływem masy dla ramienia: 5 kg i dla szczęki chwytaka: 10 kg.



Rys. 6.2. Wartość ugięcia Y w zależności od odległości X



Rys. 6.3. Wartość ugięcia Y w zależności od odległości X

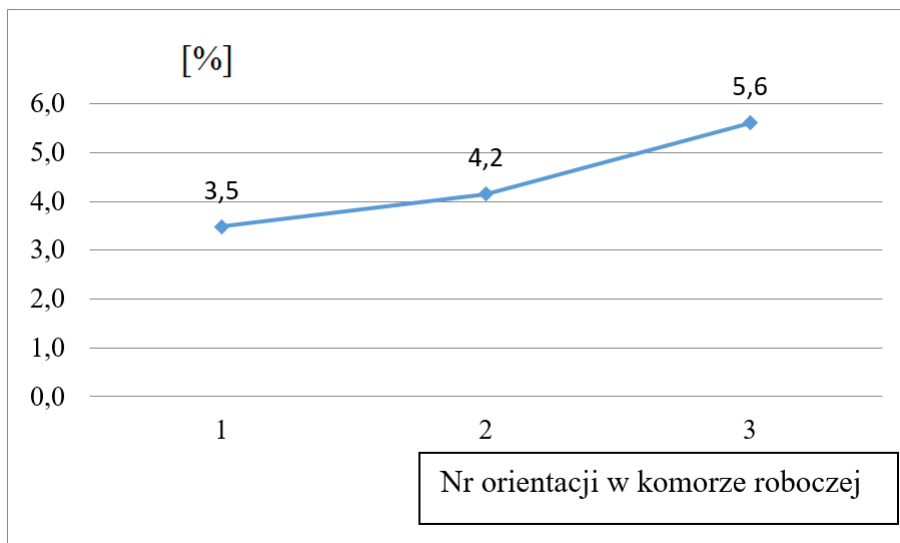
6.2. Wyniki badań dla żeberkowej geometrii wypełnienia

6.2.1. Wyniki badań próbek normatywnych

Wartości naprężeń występujących podczas badań laboratoryjnych i symulacyjnych dla odpowiadających im wartościom sił zrywających zestawiono w tab. 31. Dla obu przypadków – badania laboratoryjne i komputerowe – największą wytrzymałością wykazywała się próbka wytworzona w orientacji na sztorc (kolejno 17,55 MPa oraz 18,31 MPa), następnie w orientacji poziomej i pionowej. W ramach analizy wyników określono procentową wartość błędu między wynikami laboratoryjnymi i symulacyjnymi (rys. 6.4). Największym błędem – 5,6%, obarczone są wyniki dla próbek wytworzonych w orientacji pionowej.

Tab. 26. Porównanie parametrów próbek normatywnych z geometrią żeberkową

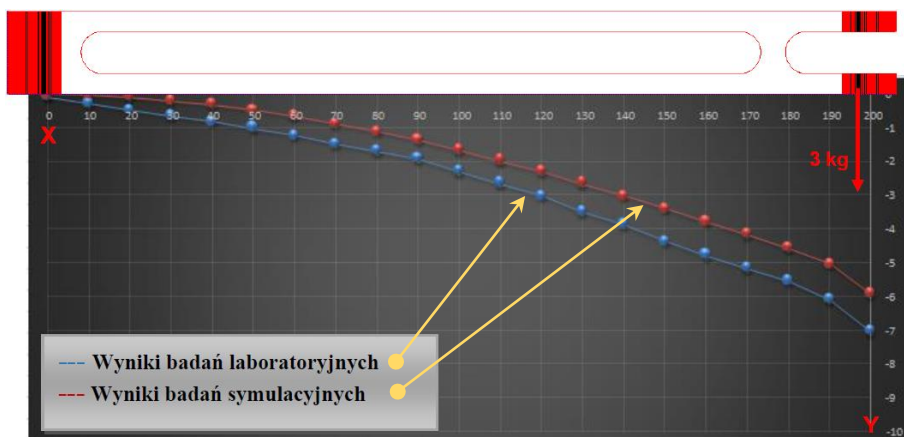
	Siła przy zerwaniu próbki podczas badań laboratoryjnych	Naprężenie rozciągające przy zerwaniu próbki badania laboratoryjne	Naprężenie rozciągające przy zerwaniu próbki badania symulacyjne
1. Orientacja pozioma	0,34 kN	8,58 MPa	8,89 MPa
2. Orientacja na sztorc	0,70 kN	17,55 MPa	18,31 MPa
3. Orientacja pionowa	0,32 kN	7,90 MPa	8,37 MPa



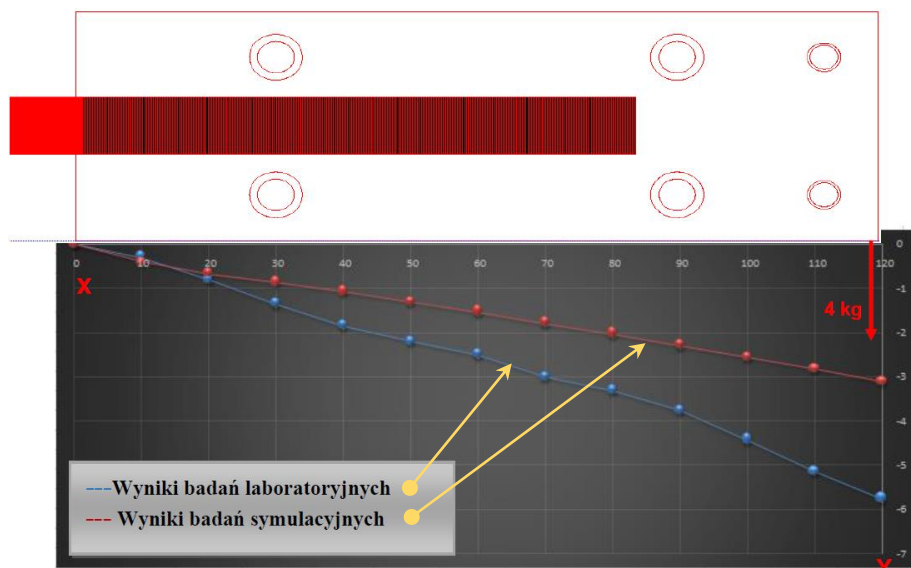
Rys. 6.4. Wartość błędu [%] między wynikami badań laboratoryjnych i symulacyjnych; tab. 31

6.2.2. Wyniki badań prototypów części chwytaka

Na rys. 6.5 i rys. 6.6 przedstawiono zestawienie wyników badań komputerowych oraz symulacyjnych charakterystyk ugięcia pod wpływem masy dla ramienia o masie 3 kg i dla szczęki chwytaka o masie 4 kg.



Rys. 6.5. Wartość ugięcia Y w zależności od odległości X



Rys. 6.6. Wartość ugięcia Y w zależności od odległości X

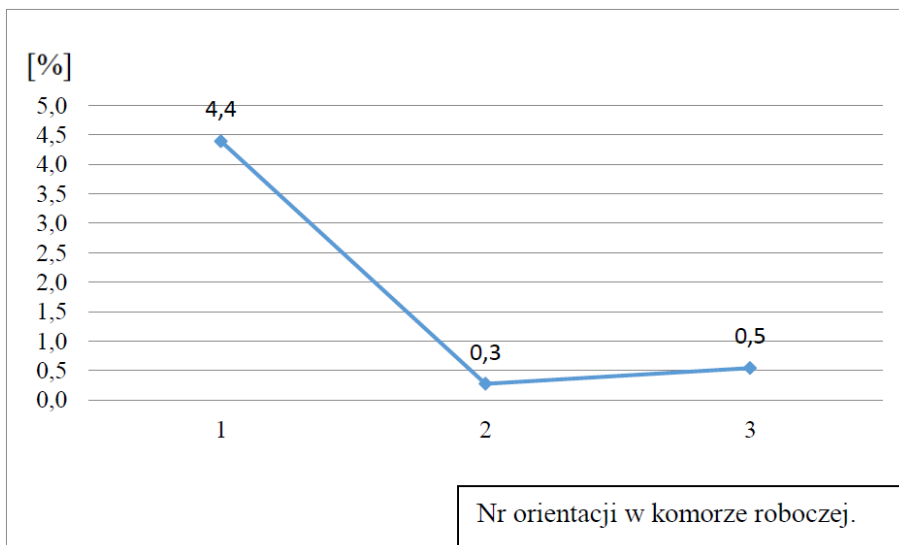
6.3. Wyniki badań dla kratowej geometrii wypełnienia

6.3.1. Wyniki badań próbek normatywnych

Wartości naprężeń występujących podczas badań laboratoryjnych i symulacyjnych dla odpowiadających im wartości sił zrywających zestawiono w tabeli 32. Dla obu przypadków – badania laboratoryjne i komputerowe – największą wytrzymałością wykazywała się próbka wytworzona w orientacji na sztorc (kolejno 21,76 MPa oraz 21,70 MPa), następnie w orientacji poziomej i pionowej. W ramach analizy wyników określono procentową wartość błędu między wynikami laboratoryjnymi i symulacyjnymi (rys. 6.7). Największym błędem – o wartości 4,4%, obarczone są wyniki dla próbek wytworzonych w orientacji poziomej.

Tab. 27. Porównanie parametrów próbek normatywnych z geometrią kratową

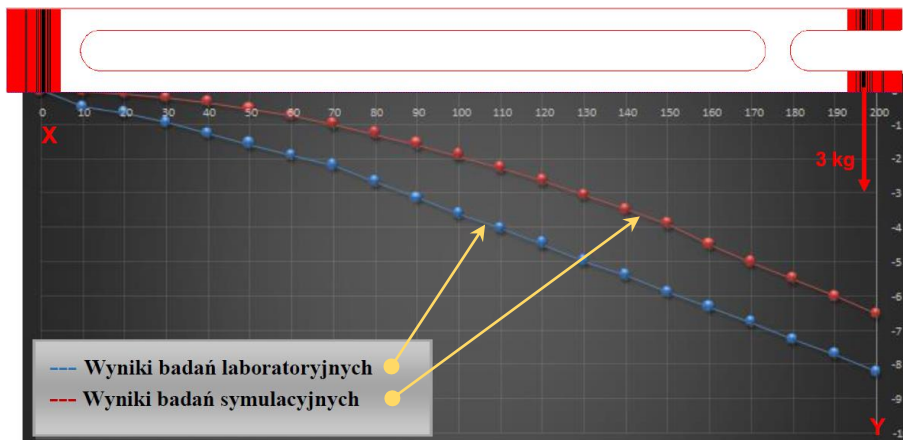
	Siła przy zerwaniu próbki podczas badań laboratoryjnych	Naprężenie rozciągające przy zerwaniu próbki badania laboratoryjne	Naprężenie rozciągające przy zerwaniu próbki badania symulacyjne
1. Orientacja pozioma	0,74 kN	18,50 MPa	19,35 MPa
2. Orientacja na sztorc	0,83 kN	21,76 MPa	21,70 MPa
3. Orientacja pionowa	0,49 kN	12,88 MPa	12,81 MPa



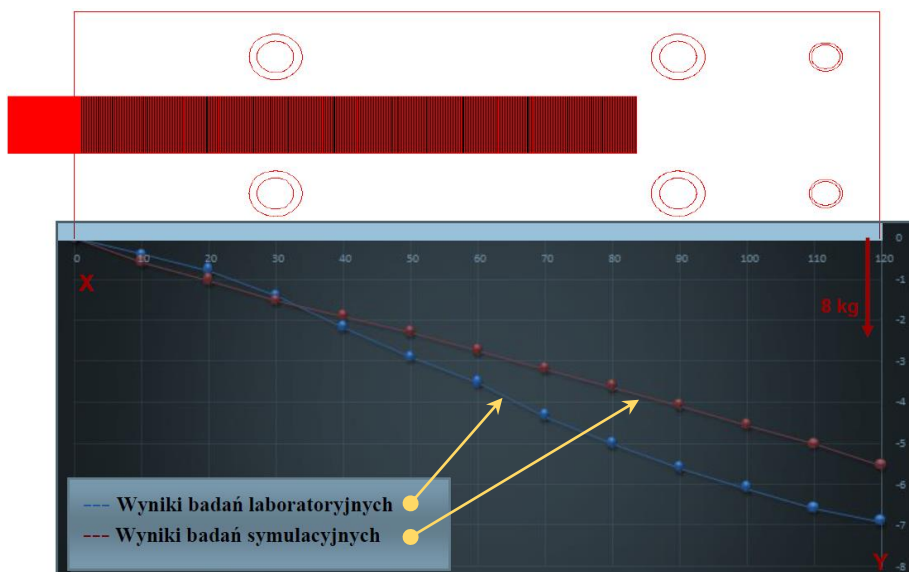
Rys. 6.7. Wartość błędu [%] między wynikami badań laboratoryjnych i symulacyjnych; tab. 32

6.3.2. Wyniki badań prototypów części chwytaka

Na rys. 6.8 i rys. 6.9 przedstawiono zestawienie wyników badań komputerowych oraz symulacyjnych charakterystyk ugięcia pod wpływem masy dla ramienia: 3 kg i dla szczęki chwytaka: 8 kg.



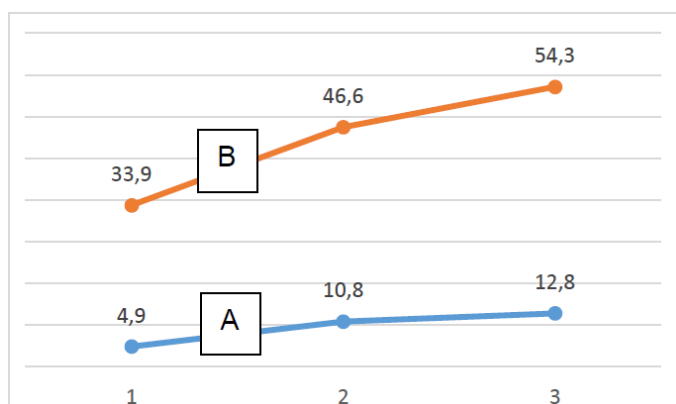
Rys. 6.8. Wartość ugięcia Y w zależności od odległości X



Rys. 6.9. Wartość ugięcia Y w zależności od odległości X

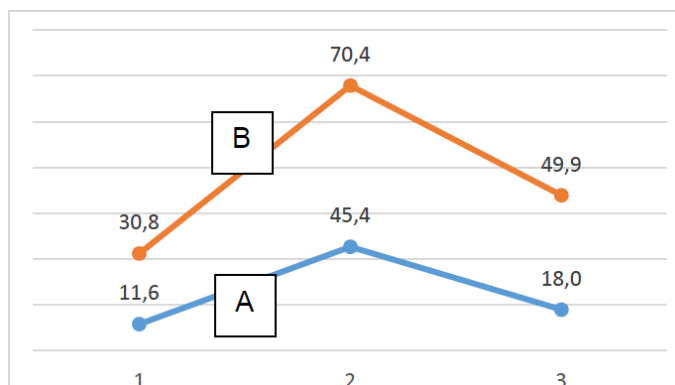
6.4. Zestawienie porównawcze

Zestawienie porównawcze otrzymanych wyników badań przedstawiono w odniesieniu do wyników badań symulacyjnych dla prototypów części przy założeniu ich izotropowej struktury dla materiału ABS-M30. Wyniki symulacji wykonanych dla obciążeń użytych jak w badaniach prototypów przedstawiono w tabelach: tab. 28 oraz tab. 29. Wygenerowane dane były niezbędne aby oszacować błąd obliczeń symulacyjnych w przypadku założenia struktury izotropowej oraz błąd użycia zaproponowanej metodyki w szacowaniu wytrzymałości prototypów – ramienia i szczęki.



Rys. 6.10. Krzywe wartości błędu [%] obliczenia ugięcia ramienia; na podstawie tab. 34

Uzyskane wyniki błędów szacowania w obu podejściach porównano i przedstawiono na wykresach (rys. 6.10, rys. 6.11). Wykresy wygenerowano na podstawie tabel, kolejno: tab. 28 i tab. 29 dla trzech badanych geometrii wypełnienia wewnętrznego. Na wykresach zaznaczono krzywe błędów między wynikami obliczeń komputerowych dla opracowanej Metody Szybkich Symulacji (A), a wynikami laboratoryjnymi oraz krzywe błędów między wynikami obliczeń komputerowych dla struktur izotropowych a wynikami laboratoryjnymi (B). Wnioski przedstawiono w rozdziale 7.



Rys. 6.11. Krzywe wartości błędów [%] obliczenia ugięcia szczęki; na podstawie tab. 35

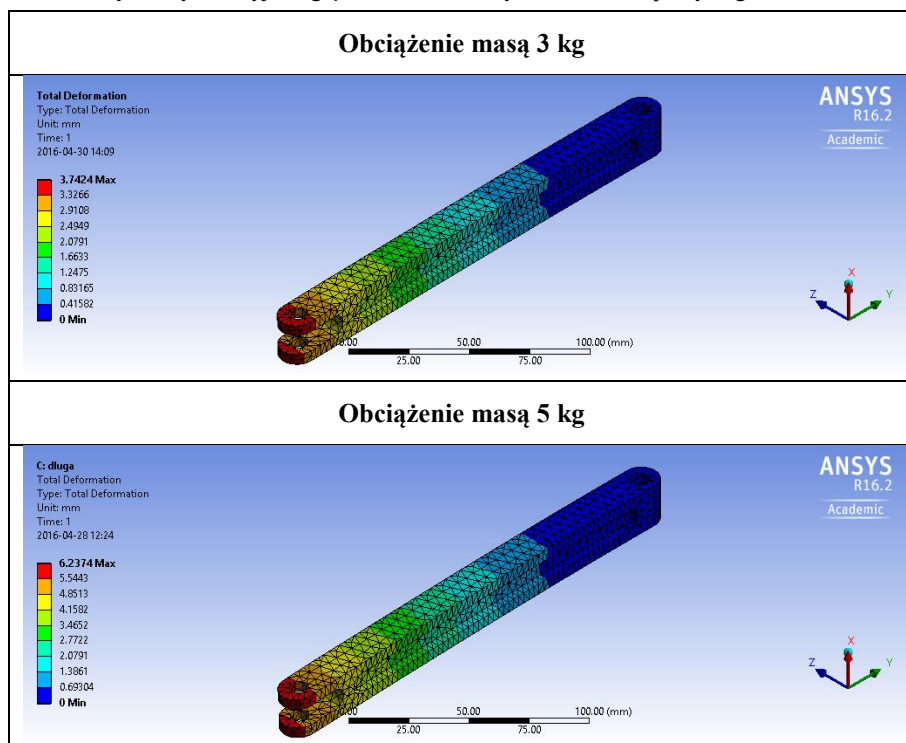
Tab. 28. Maksymalne wartości ugięcia ramienia chwytaka w badaniach laboratoryjnych i symulacyjnych

	Max. wartość ugięcia zarejestrowana w badaniach laboratoryjnych	Max. wartość ugięcia zarejestrowana w badaniach symulacyjnych	Max. wartość ugięcia uzyskana w badaniach symulacyjnych dla struktury izotropowej. Wartości ugięcia odpowiadają przyjętym w badaniach masom obciążającym
1. Geometria lita-włóknista	-9,44 mm	-8,98 mm	-6,24 mm
2. Geometria żeberkowa	-7,01 mm	-6,25 mm	-3,74 mm
3. Geometria kratowa	-8,19 mm	-7,14 mm	-3,74 mm

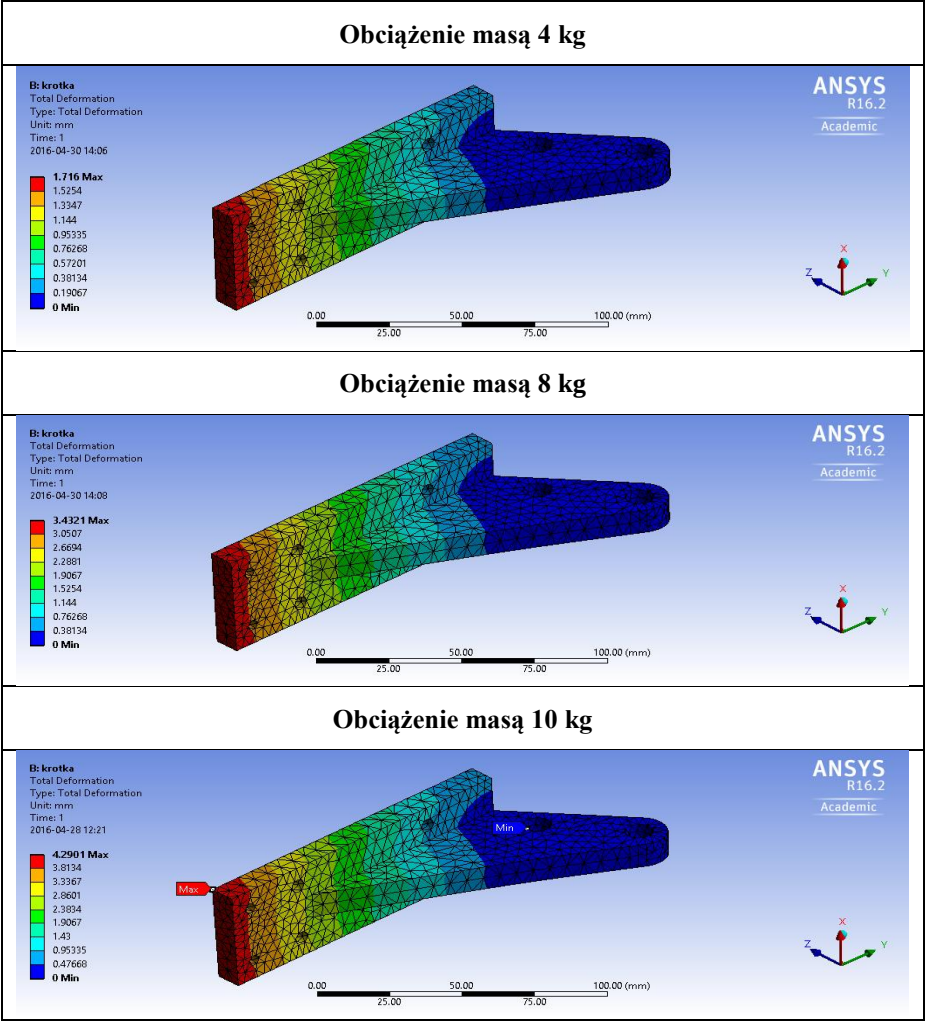
Analizy porównawcze bazowały na wynikach badań symulacyjnych wykonanych dla ramienia i części o izotropowej geometrii i danych materiałowych dla polimeru ABS-M30. Analizowano strzałkę ugięcia w zależności od przyłożonej masy. Wartości przyłożonych mas wynosiły dla ramienia 3 kg oraz 5 kg, a dla szczęki – 4 kg, 8 kg i 10 kg. Wyniki graficzne pokazujące pola przemieszczenia przedstawiono w tabelach (tab. 30, tab. 31).

Tab. 29. Maksymalne wartości ugięcia szczęki chwytaka w badaniach laboratoryjnych i symulacyjnych

	Max. wartość ugięcia zarejestrowana w badaniach laboratoryjnych	Max. wartość ugięcia zarejestrowana w badaniach symulacyjnych	Max. wartość ugięcia uzyskana w badaniach symulacyjnych dla struktury izotropowej. Wartości ugięcia odpowiadają przyjętym w badaniach masom obciążającym
1. Geometria lita-włóknista	-6,20 mm	-5,48 mm	-4,29 mm
2. Geometria żeberkowa	-5,77 mm	-3,15 mm	-1,71 mm
3. Geometria kratowa	-6,85 mm	-5,62 mm	-3,43 mm

Tab. 30. Wyniki symulacyjne ugięcia ramienia chwytaka dla izotropowych geometrii

Tab. 31. Wyniki symulacyjne ugięcia ramienia chwytak dla izotropowych geometrii



7. Podsumowanie i wnioski

Proponowana metodyka polega na symulacyjnych obliczeniach wytrzymałości prototypów wytwarzanych przyrostowo i umożliwia szybkie oszacowanie wytrzymałości w kontekście doboru geometrii wewnętrznych dla prototypów wytwarzanych przyrostowo. Obliczenia symulacyjne wykonywane są przy użyciu wyznaczonych w wyniku badań laboratoryjnych danych macierzy sztywności struktury generowanej przyrostowo. Obliczenia odbywają się na bazie litych modeli CAD, uzyskanych w toku standardowego modelowania geometrii. Przewagą proponowanej metodyki nad metodami obecnie stosowanymi jest osiągnięcie kompromisu między czasem obliczeń, dokładnością obliczeń oraz kosztami obliczeń i brakiem konieczności prowadzenia badań niszczących prototypy. Metoda zakłada wykorzystanie aparatury, dzięki której możliwe jest m.in. otrzymanie pól odkształceń w badaniach statycznych i dynamicznych. Przez to metoda nie jest ograniczona jedynie do odczytywania pojedynczych wartości w wybranych punktach pomiarowych.

Metodyka usprawniła proces decyzyjny dotyczący doboru geometrii wypełnienia prototypów wytwarzanych przyrostowo, w badanym przykładzie z polimeru ABS-M30. Dzięki jej zastosowaniu przeprowadzono obliczenia symulacyjne dla prototypów ramienia i szczęki chwytaka robota mobilnego i wybrano optymalną geometrię wypełnienia wewnętrznego. Spośród badanych geometrii wypełnienia wewnętrznego, wytypowano wypełnienie kratowe – najlepsze rozwiązanie w stosunku do wymagań stawianych badanym częściom. W przypadku wskazanego typu wypełnienia prototypów uzyskano relatywnie dużą wytrzymałość przy znacznym zmniejszeniu ich masy.

W produkcji prototypów ich masa obniżyła się w przypadku ramienia chwytaka o 40%, a w przypadku szczęki chwytaka o 46%, masa poszczególnych komponentów aktualnie przyjmuje wartości odpowiednio: 31 g oraz 49 g. Oznacza to, że masa całkowita chwytaka robota, na którą składają się masy dwóch szczęk oraz czterech ramion wynosi obecnie 222 g i stanowi 70% masy chwytaka, który byłby wykonany z części litych metodą wtrysku.

Na podstawie badań laboratoryjnych wyznaczono stałe do macierzy sztywności dla badanych geometrii wypełnienia oraz charakterystyki wytrzymałościowe. Przeprowadzono badania pola ugięcia prototypów części z wymienionymi geometriami wewnętrznymi. Wyznaczone stałe sprężyste posłużyły do symulacyjnych badań rozciągania jednoosiowego próbek normatywnych oraz symulacyjnych badań ugięcia prototypów zaprojektowanych w normalnym trybie modelowania, jako lite modele CAD. Wyniki badań laboratoryjnych oraz symulacyjnych porównano ze sobą. Dodatkowo przyrównano je do wyników badań litych próbek i prototypów odniesienia, tj. wytworzonych metodą wtrysku z ABS-M30. W ten sposób otrzymano informacje o dokładności obliczeń.

Dla przypadku szacowania wytrzymałości na podstawie badań symulacyjnych wykonywanych dla geometrii CAD litej, wykazującej właściwości izotropowe, wartość błędu mieściła się w przedziale 30,8% – 87,2%. Dla tych samych prototypów wartość błędu oszacowania wytrzymałości z wykorzystaniem proponowanej metody mieścił się w przedziale 4,9% – 45,4%. Wartość błędu jest zależna od typu geometrii wypełnienia prototypów. Badania pokazały, że błąd szacowania wytrzymałości przy wykorzystaniu zaproponowanej metody zmniejszył się średnio o połowę względem dotychczas dostępnego sposobu szacowania wytrzymałości na podstawie geometrii litej – izotropowej. Dodatkowo zastosowanie algorytmów bazujących na aparaturze badawczej umożliwiającej prowadzenie szybkich obliczeń komputerowych oraz pomiarów pól odkształceń znacznie przyspieszyło czas otrzymania wyników końcowych.

Ponadto wyniki prowadzonych badań porównawczych jednoosiowego rozciągania próbek normatywnych pokazały znaczne różnice uzyskanych wyników względem próbki wytworzonej metodą wtrysku. Różnice te zobrazowano na przykładzie porównania naprężeń występujących przy zrywaniu próbki i odpowiadających im siłom zrywającym. Dla próbki odniesienia (izotropowej) wartość siły zrywającej wynosi 1,44 kN. To stanowi 145% wartości siły zrywającej dla takiej samej próbki z geometrią litą-włóknistą, 423% wartości siły zrywającej dla takiej samej próbki z geometrią żeberkową oraz 194% wartości siły zrywającej dla takiej samej próbki z geometrią kratową. To oznacza, że próba obliczeń wytrzymałościowych dla ww. geometrii wypełnienia, zrealizowana na podstawie założenia o izotropowości geometrii, daje bardzo duży błąd dla otrzymanych wyników. Zestawienia porównawcze wartości naprężeń występujących dla danych wartości sił zrywających w badaniach laboratoryjnych pokazały, że odwzorowanie tych badań z zastosowaniem geometrii litych CAD, ale opisanych matematycznie na podstawie wyznaczonych stałych sprężystych, daje stosunkowo niedużą wartość błędu. W zależności od typu wypełnienia geometrii oraz ułożenia próbek w komorze roboczej maszyny mieści się on w przedziale od 0,5% do 7%. W odniesieniu do wyników przeprowadzonych badań zaobserwowano, że wszystkie próbki normatywne wykazywały się największą wytrzymałością wtedy, kiedy były wytwarzane w orientacji na sztorc w komorze roboczej maszyny. Najmniejszą wytrzymałość uzyskiwano w orientacjach pionowych. Procentowo rozkład wartości między orientacją na sztorc i pozostałymi dwiema przedstawiono w tab. 32.

Tab. 32. Procentowe wartości wytrzymałości próbek w odniesieniu do orientacji na sztorc

Typ geometrii wypełnienia	Orientacja w pionie	Orientacja w poziomie
Lita-włóknista	62%	92%
Żeberkowa	45%	49%
Kratowa	59%	89%

Dodatkowo przeprowadzono analizę procentowego udziału wartości wytrzymałości próbek wytworzonych z geometrią żeberkową i kratową w odniesieniu do wytrzymałości próbek z geometrii litą-włóknistą. Analizę przeprowadzono dla orientacji, w której wszystkie próbki wykazywały największą wytrzymałość – orientacja na

sztorc. Analizę rozszerzono o procentowy udział masowy badanych próbek w odniesieniu do próbki litej-włóknistej. Dane przedstawiono w tab. 33.

Tab. 33. Procentowe porównanie wytrzymałości i mas próbek w odniesieniu do orientacji na sztorc

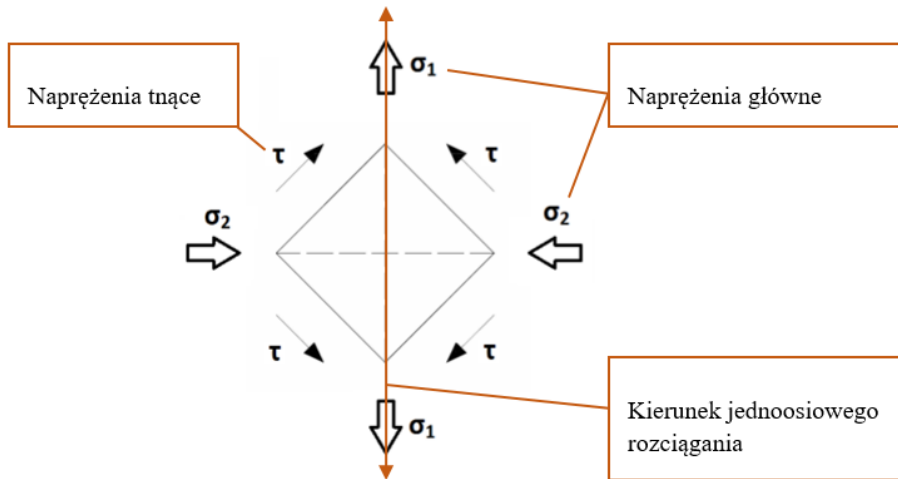
Typ geometrii wypełnienia	Procentowa wartość masy próbki w odniesieniu do próbki z litą-włóknistą geometrią wypełnienia	Procentowa wartość wytrzymałości próbki w ułożeniu na sztorc, do wytrzymałości próbki w takiej samej orientacji z geometrii litej-włóknistej
Żeberkowa	25%	35%
Kratowa	49%	76%

Ponadto podczas zerwania próbki z litą-włóknistą geometrią wypełnienia wewnętrznego wytwarzanej w orientacji poziomej obserwujemy odkształcenie plastyczne, a w przypadku rozciągania próbek z litą-włóknistą geometrią wypełnienia wewnętrznego wytwarzanych w orientacji pionowej mamy do czynienia ze zrywaniem kruchym. Jest to zjawisko związane bezpośrednio ze sposobem budowania modeli przy wykorzystaniu technologii FDM, czyli nakładaniu uplastycznionego polimeru warstwa po warstwie. W przypadku próbek wytwarzanych w orientacji poziomej włókna materiału zachowują swoją ciągłość i są układane w płaszczyźnie, w której działa siła rozciągająca próbkę. Stąd podczas próby jednoosiowego rozciągania obserwuje się odkształcenie plastyczne przy zerwaniu.

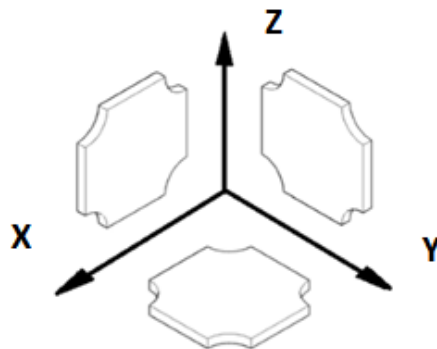
W przypadku próbek wytwarzanych w orientacji pionowej, kierunek działania siły rozciągającej podczas próby jednoosiowego rozciągania jest prostopadły do nakładanych warstw. Stąd podczas rozciągania próbki pękają na połączeniu warstw, dlatego mamy tu do czynienia ze zrywaniem kruchym. Kierunek działania siły zrywającej w odniesieniu do orientacji ułożenia próbek materiałowych przedstawiono na rysunkach 4.13 i 4.14.

W badaniach mających na celu wyznaczenie parametrów macierzy sztywności zastosowano uproszczenie polegające na analitycznym wyznaczeniu modułów Kirchhoffa stosując wzór 4.3. W kolejnych badaniach zdecydowanie należy skupić się na wyznaczeniu eksperymentalnym modułów Kirchhoffa oraz porównaniu wyników tych dwóch eksperymentów. Wyznaczenie eksperymentalne modułów Kirchhoffa może przebiegać według poniższej metodyki, która uwzględnia wykorzystanie współczesnej aparatury dającej możliwość bezkontaktowego pomiaru odkształcenia opisaną wcześniej metodą DIC:

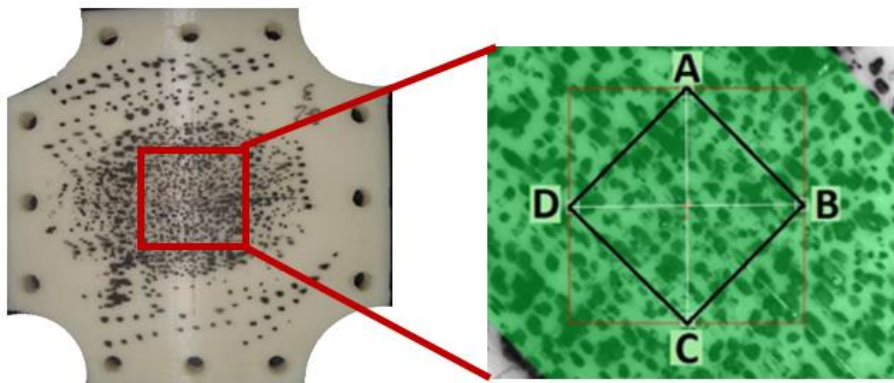
- Stan czystego ścinania dla przypadku zademonstrowanego na rysunku 7.1 występuje w środku badanego obszaru. Dlatego na każdej próbce przed wykonaniem próby jednoosiowego rozciągania należy precyzyjnie zaznaczyć linie symetrii wyznaczające środek próbki (rys. 7.3).
- Do monitorowania odkształcenia postaciowego metodą DIC można wykorzystać system ARAMIS (opisany w podrozdziale 4.3). Na rysunku 7.3 zaznaczono obszar widzialności kamery systemu ARAMIS oraz wirtualne ekstensometry związane z naniesionymi na próbkę markerami. W ten sposób utworzono wirtualny kwadrat pomiarowy oznaczony jako ABCD.



Rys. 7.1. Stan czystego ścinania ($\sigma_1 = -\sigma_2$) dla badanego obszaru próbki

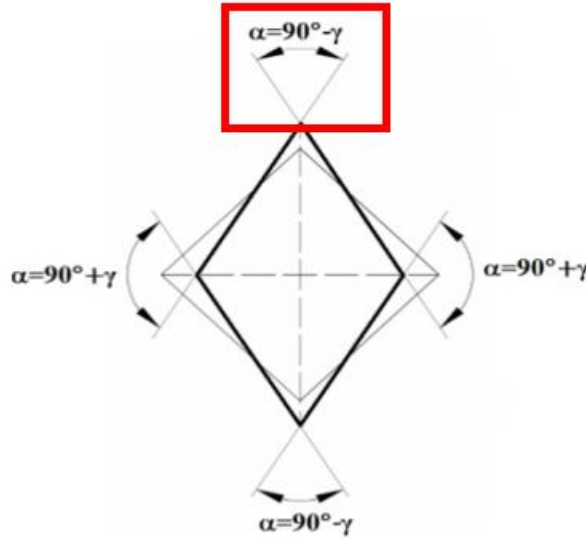


Rys. 7.2. Orientacja próbek w komorze roboczej maszyny



Rys. 7.3. Obszar badany zaznaczony na próbce

- Zakładając, że kształt elementu kwadratowego pod wpływem odkształcenia postaciowego stanie się rombem, będzie możliwe obliczenie kąta odkształcenia postaciowego. Obliczenie będzie zrealizowane przez pomiar odkształcenia przekątnych kwadratu ABCD. Po obliczeniu długości przekątnych powstałego rombu $A'B'C'D'$, który powstanie w wyniku działania naprężeń ścinających, możliwe będzie wyznaczenie kątów wewnętrznych powstałego rombu na podstawie twierdzenia Pitagorasa. Wyznaczone kąty są powiązane z odkształceniem postaciowym (rys. 7.4).



Rys. 7.4. Odkształcenie postaciowe

- jeśli wydłużenie względne przekątnej pierwszej zostanie oznaczone jako ε_1 , a wydłużenie względne drugiej jako ε_2 , to kąt oznaczony prostokątem na rysunku 7.4 jest wyrażony wzorem (4.4).

$$\alpha = 2 \cdot \arctg\left(\frac{1 + \varepsilon_2}{1 + \varepsilon_1}\right) \quad (4.4)$$

- moduły Kirchhoffa należy zatem wyznaczyć według ogólnego wzoru (4.5).

$$G = \frac{\gamma}{\tau} \quad (4.5)$$

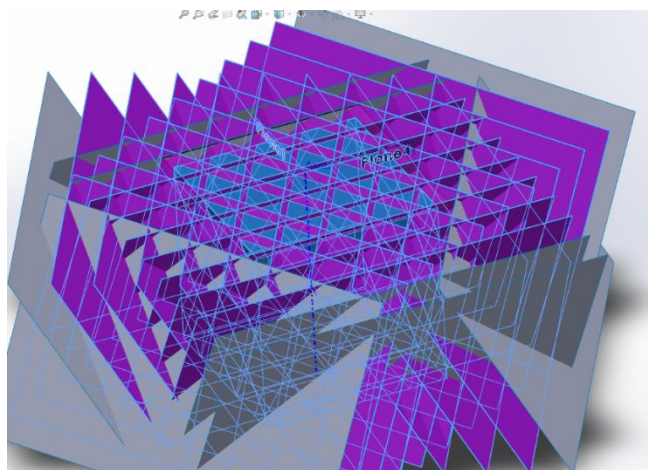
gdzie:

G – moduł Kirchhoffa,

γ – kąt odkształcenia postaciowego: $\gamma = 90^\circ - \alpha$ (4.6)

τ – naprężenia tnące.

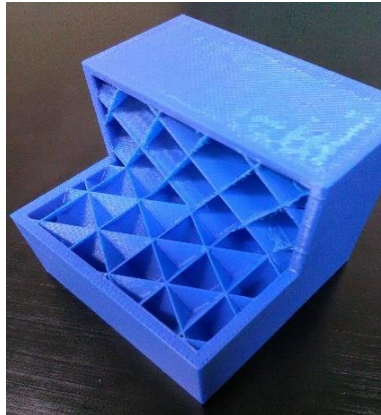
Obecnie maszyny do addytywnego wytwarzania są wyposażane w specjalistyczne oprogramowanie służące do odpowiedniego przygotowania modelu CAD prototypu do procesu addytywnego. Oprogramowanie oprócz podziału geometrii na warstwy, generowania struktur wspierających model oraz sterowania parametrami procesu addytywnego (np. wartości temperatury w komorze roboczej maszyny) daje również możliwość generowania geometrii wewnętrznych (tzw. wypełnienia wewnętrznego). Ta cecha oprogramowania dostarczanego razem z maszynami ma jednak swoje wady i zalety. Z jednej strony operator maszyny ma możliwość szybkiego wygenerowania wybranych geometrii wewnętrznych – kratownica, struktura żeberkowa, plaster miodu itp. Z drugiej strony oprogramowanie ma jednak ograniczone możliwości modelowania geometrii wewnętrznych oraz zmiany jej parametrów. Chodzi tu przede wszystkim o możliwość i ograniczenie programowania wypełnienia jedynie równoległe do płaszczyzny stołu modelowego. Co więcej, generowanie geometrii wewnętrznej przez oprogramowanie przypisane procesom addytywnym nie ma związku z modyfikacjami oryginalnego modelu CAD prototypu, tj. nie działa wstecz. Dlatego można stwierdzić, że w przypadku technologii addytywnych projektowanie CAD jest podzielone na dwa poniekąd niezależne od siebie etapy wykonywane na dwóch różnych programach komputerowych, co jest rozwiązaniem nieoptymalnym.



Rys. 7.5. Model CAD prostopadłościanu osadzony w przestrzeni do tworzenia własnej geometrii wewnętrznej

W Laboratorium Szybkiego Prototypowania i Obliczeń Numerycznych podjęto prace badawcze, które oprócz realizacji eksperymentalnych badań nad wyznaczeniem modułów Kirchhoffa koncentrują się na metodyce modelowania geometrii wewnętrznych dla prototypów wytwarzanych przyrostowo przy wykorzystaniu jedynie oprogramowania CAD. Metodyka ta pozwala na modelowanie dowolnych geometrii wewnętrznych, które mogą zostać bezpośrednio wytworzone metodami przyrostowymi. To co stanowi o jej unikatowości, to możliwość wykorzystania zaprojektowanej geometrii bezpośrednio do obliczeń metodą MES bez konieczności optymalizacji modelu

CAD. Dzięki takiemu podejściu, w którym przy niewielkiej zmianie parametrów geometrii otrzymujemy dwa różne modele CAD – do druku i do obliczeń MES, możliwe będzie wykonanie dwóch niezależnych operacji jednocześnie. Jeden model będzie miał zastosowanie do obliczeń komputerowych i bezpośredniego wytwarzania metodą przyrostową. Aktualnie prace są realizowane na prostych, reprezentatywnych geometriach – prostopadłościan, kula, walec, stożek. W kolejnym etapie będą analizowane bardziej skomplikowane geometrie – wybrane części robotów mobilnych. Na rysunku 7.6 przedstawiono reprezentatywny model z autorską, zaprojektowaną w systemie CAD geometrią wewnętrzną. Model został wytworzony na maszynie Fortus 400mc. Jest to pierwszy model parametryczny uzyskany w badaniach prowadzonych w Instytucie PIAP, którego geometria wewnętrzna została zaprojektowana w systemie CAD i nie jest zorientowana równolegle do płaszczyzny stołu maszyny. Dodatkowo niewielka zmiana wybranych parametrów w modelu CAD umożliwia jego bezpośrednie wykorzystanie w obliczeniach MES w taki sposób, że może być wówczas stosowany model izotropowy materiału.



Rys. 7.6. Prostopadłościan z materiału ABS-M30

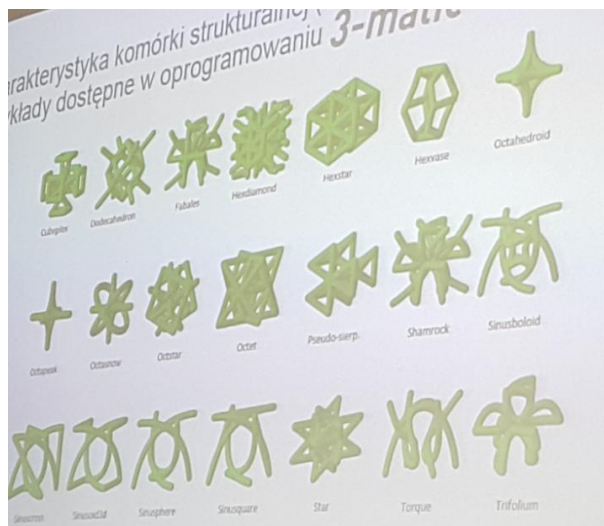
Możliwości modelowania dowolnych geometrii wewnętrznych wypełnienia otwierają nowe potrzeby szacowania wytrzymałości. Opisywana metoda jest propozycją szybkiego, pierwszego szacowania wytrzymałości, jednak należy podjąć wysiłek prowadzenia badań nad zwiększeniem jej dokładności przy minimalizacji czasu i zasobów potrzebnych do osiągnięcia miarodajnych wyników. Tylko takie podejście będzie miało szansę współgrać z dynamicznie rozwijającymi się metodami addytywnymi.

Zasadniczym problemem obecnie jest modelowanie samych struktur wewnętrznych i w konsekwencji analizowanie komputerowe ich wytrzymałości. Ciekawym rozwiązaniem eliminującym problemy modelowania oraz wychodzącym naprzeciw dynamicznemu rozwojowi technologii addytywnych jest oprogramowanie firmy Materialise o nazwie 3-matic STL a dokładniej jeden z modułów tego oprogramowania: Lightweight Structures Module. Moduł umożliwia szybkie modelowanie struktur wewnętrznych i działa na podstawie powielana i łączenia wybranych prymitywów,

zwanych również komórkami elementarnymi (rys. 7.8), gdzie bazę do wypełnienia przestrzeni prymitywami stanowi standardowy model bryłowy CAD. Najbardziej istotne jest to, że zamodelowane struktury mogą zostać bezpośrednio wyeksportowane do modelu STL lub modelu parametrycznego oraz że są zoptymalizowane pod kątem obliczeń wytrzymałościowych przy wykorzystaniu MES. Zoptymalizowane są zarówno objętość cyfrowa modelu CAD jak i jakość powierzchni geometrycznych. Oprócz wykorzystania zaszytych w oprogramowaniu prymitywów, użytkownik może projektować i stosować własne, a oprogramowanie daje dodatkową możliwość analizy zdolności zbudowania powstałych struktur metodami addytywnymi.



Rys. 7.7. Przykładowe modele wytworzone przy wykorzystaniu prymitywów struktur wewnętrznych



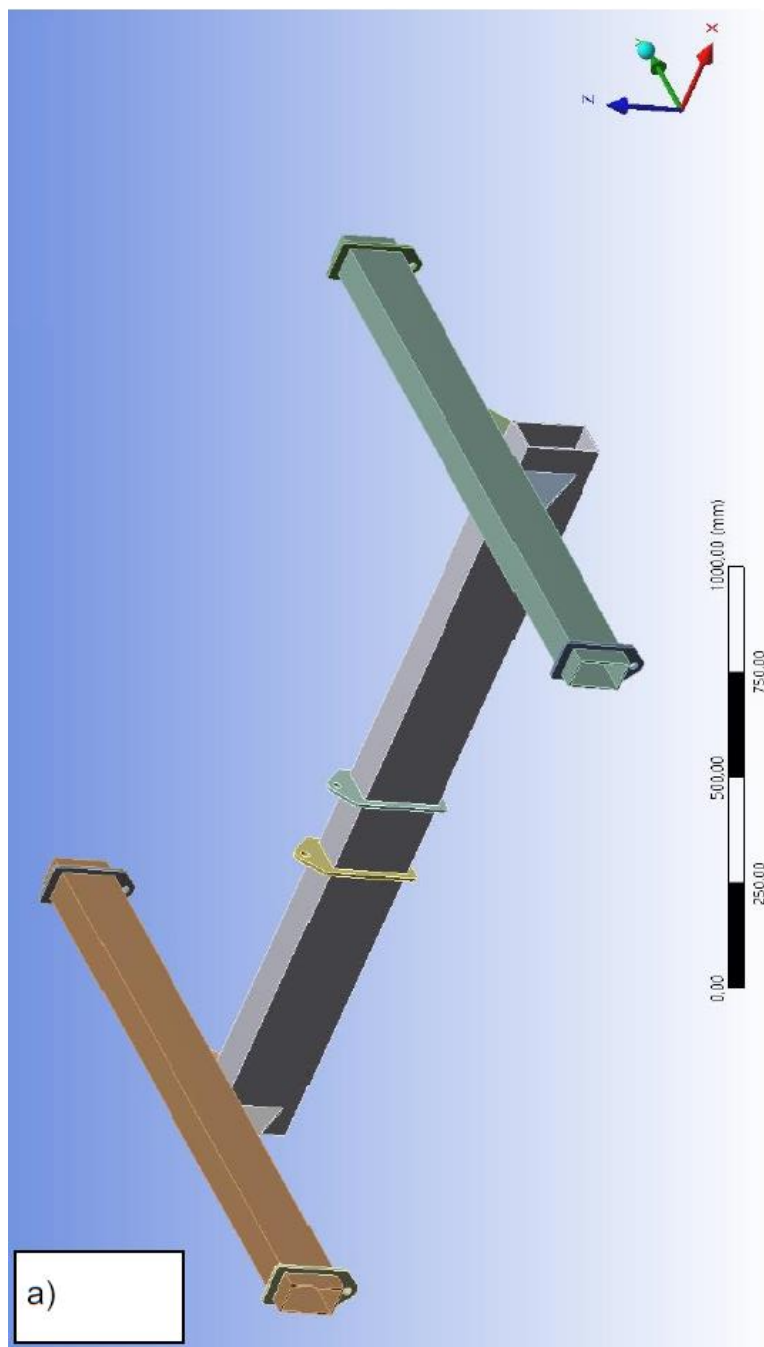
Rys. 7.8. Przykładowe prymitywy zwane również komórkami elementarnymi (ang. *unit cells*) struktur wewnętrznych

Wykorzystując możliwości prezentowanego oprogramowania należy jednak pamiętać o prawidłowych modelach matematycznych materiałów lub struktur wytwarzanych przyrostowo. Stąd tak ważne jest podejmowanie badań nad opisem matematycznym geometrii możliwych do uzyskania metodami przyrostowymi, głównie metodą FDM oraz analiza trendów wytrzymałościowych tych struktur. Taką działalnością od kilku lat zajmuje się Laboratorium Szybkiego Prototypowania i Obliczeń Numerycznych w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP.

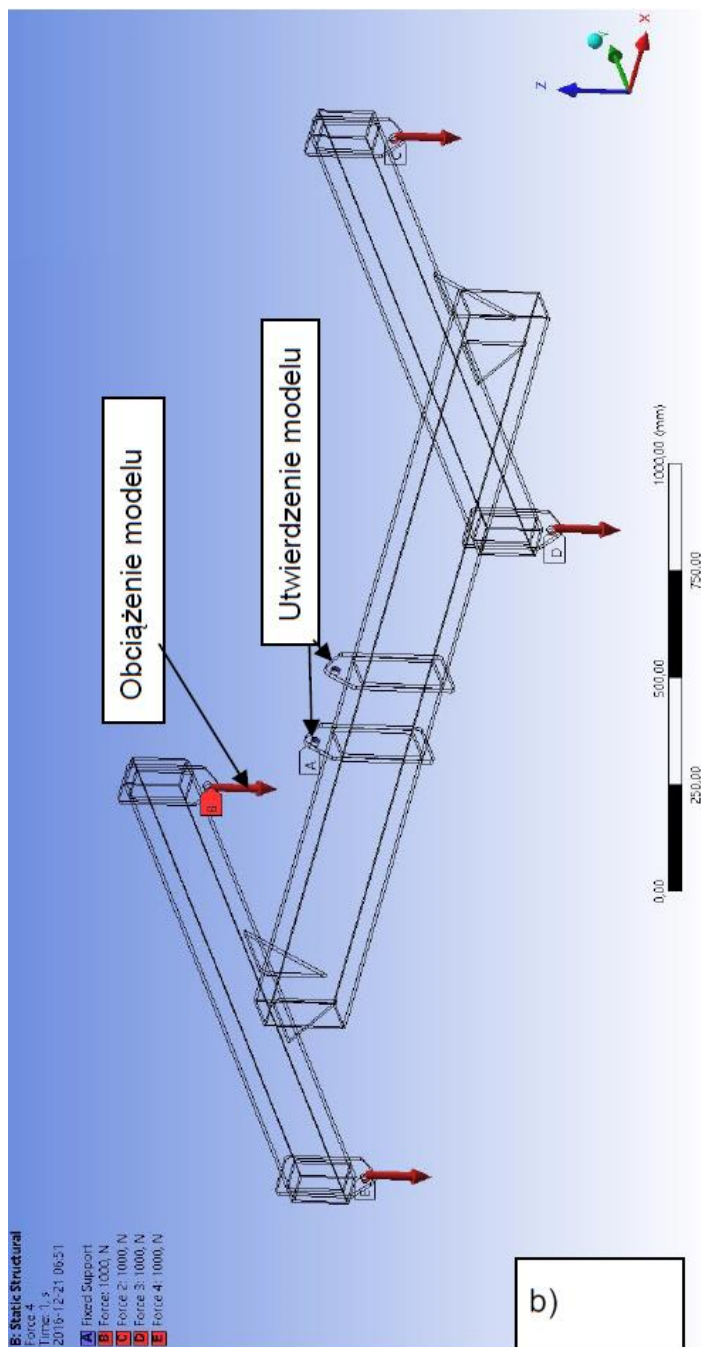
Nie bez znaczenia jest optymalizacja procesu FDM. Dzięki możliwości ingerowania w geometrię wewnętrzną, jakie daje technologia FDM oraz obliczeniom numerycznym, możliwa stała się zindywidualizowana produkcja prototypów i części szytych na miarę aplikacji. Mając możliwość tworzenia dowolnie zaprojektowanych struktur wewnętrznych modeli oraz dysponując odpowiednimi modelami materiałowymi lub modelami struktur wewnętrznych można rozpocząć proces optymalizacji przy użyciu MES. Jedną z ciekawszych funkcji oprogramowania bazującego na Metodzie Elementów Skończonych jest możliwość przeprowadzania analizy topologicznej obciążonych części. Pokrótce, analiza topologiczna polega na automatycznym zidentyfikowaniu takich elementów siatki MES w badanej części, które pod wpływem przyłożonych warunków brzegowych nie zmieniają w istotny sposób swoich wartości – można powiedzieć, że pozostają obojętne na warunki brzegowe. Na tej podstawie identyfikowany jest zbędny materiał badanej części, który oprogramowanie kwalifikuje do usunięcia. Czyli następuje zmniejszenie masy części przy zachowaniu jej założonej wytrzymałości. Z punktu widzenia inżynierii wydawałoby się, że jest to idealna możliwość programu MES. Użytkownik zakłada warunki brzegowe, deklaruje o ile procent chciałby zmodyfikować masę części, klika „LICZ” i idzie na kawę, wyniki generują się same. Jednak w praktyce oprogramowanie MES dawało wyniki, które w wielu przypadkach nie były możliwe do praktycznego wykorzystania, ze względu na nietechnologiczność powstałych części. Stąd optymalizację topologiczną traktowano przeważnie jako ciekawostkę lub co najwyżej dobry punkt wyjścia do dalszych analiz.

Sytuacja jednak bardzo się zmieniła odkąd rozpoczęto wykorzystywanie maszyn addytywnych (przemysłowych drukarek 3D) w produkcji przemysłowej. Analiza topologiczna nabrała sensu, ponieważ jej wyniki daje się implementować w praktyce przez addytywne wytwarzanie gotowych modeli. To otwiera szeroko drzwi do dziedziny, którą można nazwać projektowaniem zorientowanym na druk 3D. Jednym z bardzo licznych przykładów praktycznego wykorzystania wyników analizy topologicznej jest chociażby redukcja masy wspornika lotniczego (rys. 7.9) wytwarzanego przez GE Aircraft. W procesie produkcyjnym GE wykorzystało analizę topologiczną przeprowadzoną w oprogramowaniu MES oraz maszynę addytywną ProX DMP 320 (technologia DMLS) do produkcji części. Stosując ten zabieg masa docelowej części zmniejszyła się o 70%.

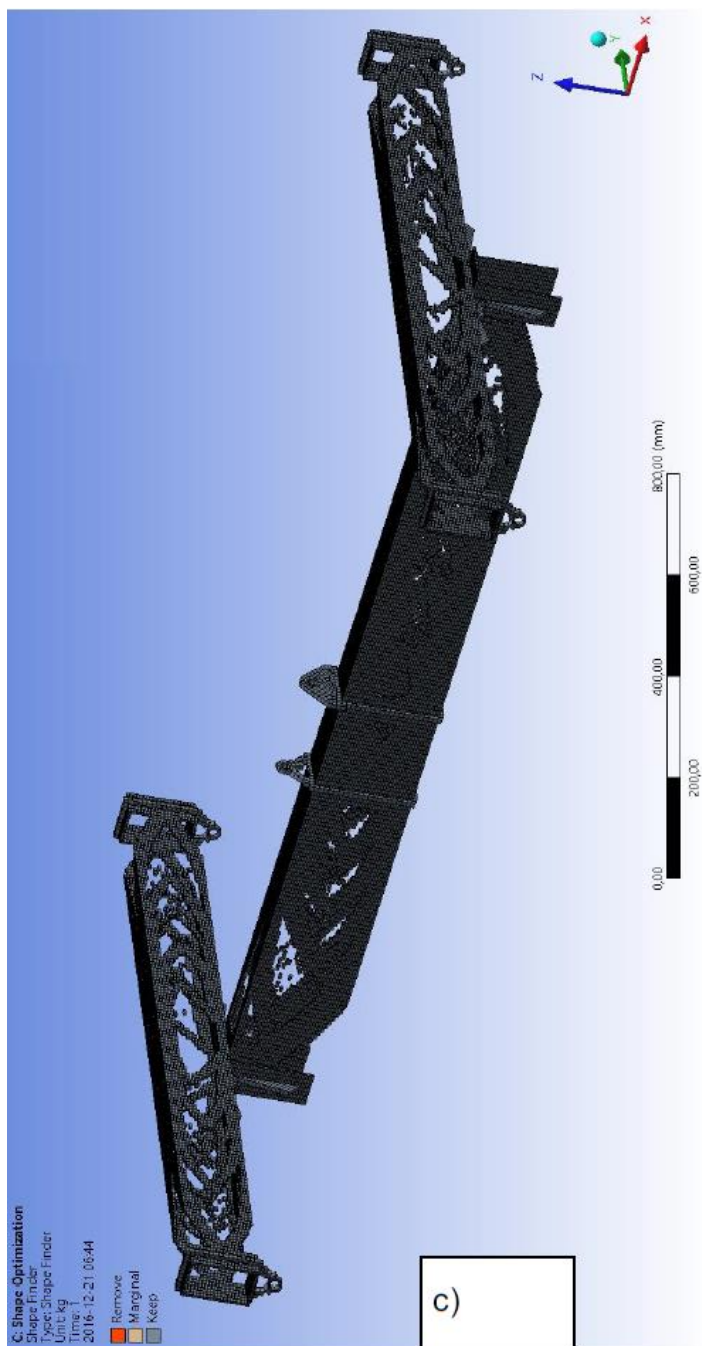
Oprócz technologii FDM, jedną z innych reprezentatywnych i godnych uwagi, z punktu widzenia konieczności opracowania metod szacowania wytrzymałości prototypów, jest technologia PolyJET Matrix. Technologia ta bazuje na żywicach fotoutwardzalnych. To technologia, w której precyzyjne modele budowane są przez natrysk mikrokroplami żywicy akrylowej fotopolimerowej na podstawę stołu modelowego i utwardzane są światłem UV – warstwa po warstwie. Jako materiał podporowy wykorzystywany jest wypłukiwalny żel opracowany na bazie wody i żywicy.



Rys. 7.9. Schemat ogólny optymalizacji topologicznej wykonanej w środowisku MES:
a) geometria wyjściowa



Rys. 7.9. Schemat ogólny optymalizacji topologicznej wykonanej w środowisku MES:
b) warunki brzegowe



Rys. 7.9. Schemat ogólny optymalizacji topologicznej wykonanej w środowisku MES: c) propozycja zarysu geometrii po optymalizacji

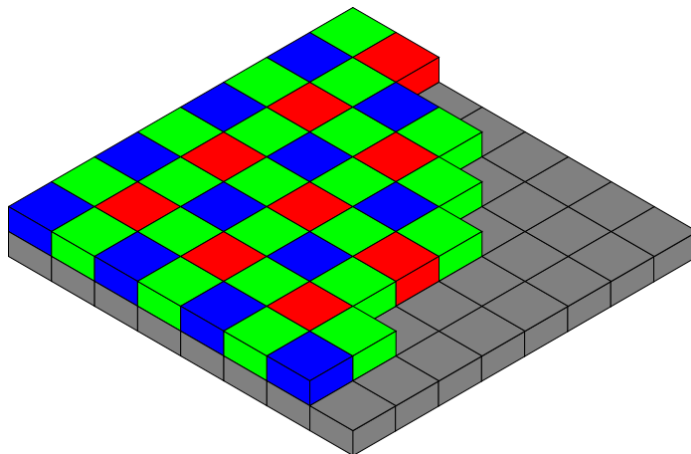
Technologia PolyJET Matrix została wprowadzona na rynek w 2007 roku i po raz pierwszy została zaimplementowana w systemie Connex500. Innowacja technologii polega na możliwości natryskiwania obecnie kilku kompletnie różnych żywic akrylowych w jednym procesie. Daje to duże możliwości tworzenia prototypów o różnych wymaganiach co do właściwości, w jednym procesie. Pozwala także na mieszanie kilku różnych materiałów, w wyniku czego – w jednym procesie – otrzymuje się materiał o parametrach innych niż wsadowe. Ta właściwość pozwala na tworzenie w jednym procesie prototypów złożonych z części lub powierzchni wykazujących właściwości zarówno sztywne jak i gumopodobne, a przy tym o niemalże dowolnych kolorach.



Rys. 7.10. Zdjęcie dostarczone przez korporację Stratasys pokazujące prototyp zabudowany w jednym procesie (bez montażu) w technologii PolyJET Matrix – sztywna felga i gumopodobna opona

Ideę technologii PolyJET Matrix przedstawiono na rys. 7.11. W głównych założeniach tej technologii chodzi o to, że warstwa modelu powstaje w wyniku natrysku mikrokropli żywicy materiałowej w wybrane miejsca predefiniowanej „szachownicy”. Warstwa jest podzielona jak matryca – na miejsca, w które maszyna wkrapla odpowiednią żywicę. W ten sposób warstwa modelu nie jest zbudowana z jednego materiału, ale „zlanych” ze sobą milionów mikrokropli. W połączeniu z dedykowanym oprogramowaniem istnieje możliwość definiowania obszarów gumopodobnych,

sztynnych, przejściowych o odpowiednich sztywnościach. Maszyna natryskuje kropelki żywicy według określonego algorytmu, uzyskując w ten sposób zadane właściwości całego, zbudowanego w jednym procesie prototypu. Użytkownik może dowolnie programować struktury geometrii wewnętrznej opracowywanych prototypów.



Rys. 7.11. Schemat ideowy budowania pojedynczej warstwy w technologii PolyJET MATRIX, dostarczony przez dystrybutora technologii – każdy kolor to inna żywica bazowa. Każdy kwadrat symbolizuje jedną mikrokroplę

Dynamiczny rozwój technologii addytywnych, a w szczególności w kontekście możliwości programowania struktur i geometrii wewnętrznych dla budowanych prototypów, zmusza do opracowywania coraz to nowszych metod szacowania wytrzymałości części tworzonych przyrostowo.

Bez nowych metod i algorytmów wpisujących się w zasady szybkiego prototypowania, nie można mówić o optymalnym wykorzystaniu technologii addytywnych w praktyce przemysłowej. Co więcej, nie można mówić również o wykorzystaniu pełnym możliwości, jakie dostarczają te technologie.

8. Bibliografia

1. Adamski W., *Wykorzystanie technologii Additive Manufacturing w przemyśle lotniczym*. „Mechanik” 2/2013, CD 39. 1–8.
2. Ahn, S.H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., Wright, P.K., *Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS plastic*. “Rapid Prototyping Journal”, Vol. 8, Issue 4, 2002, 248–257, DOI: 10.1108/13552540210441166.
3. Ambroziak M., Plast W., *Stapianie proszków wiązką lasera – SLM*, „Przegląd Mechaniczny”, Vol. LXIV, Nr 4/2005, 5–6.
4. Ang KC, Leong KF, Chua CK, *Investigation of the mechanical properties and porosity relationships in fused deposition modelling-fabricated porous structures*, “Rapid Prototyping Journal”, Vol. 12, Issue 2, 2006, 100–105, DOI: 10.1108/13552540610652447.
5. Anitha R., Arunachalam S., Radhakrishnan P., *Critical parameters influencing the quality of prototypes in Fused deposition modeling*, “Journal of Materials Processing Technology”, Vol. 118, Issues 1–3, 2001, 385–388, DOI: 10.1016/S0924-0136(01)00980-3.
6. Arivazhagan A, Masood SH, *Dynamic mechanical properties of ABS material processed by fused deposition modeling*, “International Journal of Engineering Research and Applications”, Vol. 2, Issue 3, 2012, 2009–2014.
7. Bagsik A., Josupeit S., Schoeppner V., Klemp E, *Mechanical Analysis of Lightweight Constructions Manufactured with Fused Deposition Modeling*, “AIP Conference Proceedings”, Vol. 1593, Issue 1, 2014, DOI: 10.1063/1.4873874.
8. Bakar N. S. A., Alkahari M. R., Boejang H., *Analysis of Fused Deposition Modelling Performance*, “Journal of Zhejiang University-SCIENCE A. Applied Physics and Engineering”, Vol. 11, Issue 12, 2010, 972–977, DOI: 10.1631/jzus.A1001365.
9. Bełzowski A., *Podstawowe wiadomości o próbach wytrzymałości materiałów kompozytowych*, Materiały pomocnicze do Laboratorium Wytrzymałości Materiałów, Wydział Mechaniczny Politechniki Wrocławskiej, 2007, [http://www.wzwm.pwr.wroc.pl/files/pages/inst_12.pdf].
10. Bernaczek J., Sobolewski B., Warchoń S., *Wykonanie stanowiska do badań modelowych śladów styku elementów rolkowej przekładni tocznej*, [w:] I Krajowa Konferencja Naukowa: Szybkie prototypowanie. Modelowanie-Wytwarzanie-Pomiary, Rzeszów-Pstrągowa, 16–18 września 2015, „Mechanik”, R. 88, Nr 12CD2, 13–17, DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.548.
11. Bis J., Kret M., Płatek P., *Techniki druku 3D – przykłady zastosowań*, Forum Stowarzyszenia PROCAX, 2009, [http://www.procax.org.pl/pliki/Wyklad_Bis_Kret_Platek.pdf].

12. Blicharz B., Cader M., Hermanowicz P., *Wytwarzanie mechanizmów metodą FDM*, „Mechanik”, R. 88, Nr 7CD, 2015, 37–44, DOI: 10.17814/mechanik.2015.7.211.
13. Budzik G., *Dokładność geometryczna łopatek turbin silników lotniczych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2013.
14. Budzik G. (red.), *Określenie chwilowego śladu styku przekładni zębatych z zastosowaniem metod szybkiego prototypowania*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2011.
15. Budzik G., Dziubek T., Turek P., Traciak J., *Analiza dokładności odwzorowania geometrii odcinka żuchwy wykonanego technologią FDM*, [w:] I Krajowa Konferencja Naukowa: Szybkie prototypowanie. Modelowanie-Wytwarzanie-Pomiary, Rzeszów-Pstrągowa, 16–18 września 2015, „Mechanik”, R. 88, Nr 12CD2, 22–26, DOI:10.17814/mechanik.2015.12.550.
16. Budzik G., Markowski T., Kozik B., Przeszlowski Ł., Rzucidło A., Markowska O., Zaborniak M., Dziubek T., Bernaczek J., Turek P., Traciak J., Cader M., Tutka M., *The Application of VoxelJet Technology to the Rapid Prototyping Gear Cast*, “Archives of Foundry Engineering”, Vol. 14, Issue 1 spec., 2014, 87–90.
17. Budzik G., Płocica M., *Metodologia odnowy dziedzictwa kulturowego z wykorzystaniem innowacyjnych technologii RE i RP*, Centrum Naukowo-Technologiczne, Rzeszów, 2007.
18. Budzik G., Sobolewski B., Przeszlowski Ł., *Szybkie prototypowanie stożkowych kół zębatych o kołowo łukowej linii zęba*, [w:] I Krajowa Konferencja Naukowa: Szybkie prototypowanie. Modelowanie-Wytwarzanie-Pomiary, Rzeszów-Pstrągowa, 16–18 września 2015, „Mechanik”, R. 88, Nr 12, 2015, 27–29, DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.551.
19. Cader M., Zboiński M., Budzik G., *Technologie wytwarzania przyrostowego w praktyce*, „Mechanik”, R. 86, Nr 8–9, 2013, 762–767.
20. Cader M., Blicharz B., *Analiza zużycia kół zębatych wytwarzanych przyrostowo z termoplastycznego materiału lotniczego*, „Mechanik” 7/2015, 93–100, DOI: 10.17814/mechanik.2015.7.218.
21. Cader M., Jastrzębska A., Pakieła Z., *Analiza wpływu orientacji modelu w komorze roboczej na wytrzymałość w procesie FDM*, [w:] XVII Międzynarodowa Szkoła Komputerowego Wspomagania Projektowania, Wytwarzania i Eksploatacji, Szczyrk 13–17.05.2013, „Mechanik”, R. 86, Nr 7CD, 2013, 85–94.
22. Cader M., Kowalik M., Cieślak P., *Estymacja wytrzymałości części tworzonych z wykorzystaniem technologii FDM*, [w:] XVIII Międzynarodowa Szkoła Komputerowego Wspomagania Projektowania, Wytwarzania i Eksploatacji, 12–16 maja 2014, Szczyrk, „Mechanik”, R. 87, Nr 7CD, 2014, 75–82.
23. Cader M., Sieczak J., Budzik G., *Analiza wytrzymałości elementów chwytaka robota wytworzonych z polimeru ABSM30 metodą addytywną*, [w:] I Krajowa Konferencja Naukowa: Szybkie prototypowanie. Modelowanie-Wytwarzanie-Pomiary, Rzeszów-Pstrągowa, 16–18 września 2015, „Mechanik”, R. 88, Nr 12, 2015, 30–34, DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.552.

24. Cader M., Trojnecki M., Budzik G., *Wytwarzanie wysokowytrzymałych części dla robotów mobilnych, z zastosowaniem technologii FDM*, XVII Międzynarodowa Szkoła Komputerowego Wspomagania Projektowania, Wytwarzania i Eksploatacji, 13–17 maja 2013, Szczyrk, „Mechanik”, R. 86, Nr 7CD, 2013, 95–104.
25. Cader M., Trojnecki M., *Analiza możliwości zastosowania technologii przyrostowych do wytwarzania elementów konstrukcji robotów mobilnych*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 17, Nr 2, 2013, 200–207.
26. Cader M., Trojnecki M., *Projektowanie konstrukcji mechanicznej robota o zmiennej konfiguracji Cameleon z przeznaczeniem do wytworzenia w technologii FDM*, [w:] XVI Międzynarodowa Szkoła Komputerowego Wspomagania Projektowania, Wytwarzania i Eksploatacji, Jurata, 14–18 maja 2012, „Mechanik”, R. 85, Nr 7CD, 2012, 119–126.
27. Cader M., Uszyńska M., *Analiza zależności czasu budowania modeli od zmian parametrów wytwarzania w technologii FDM*, „Mechanik”, Vol. 86, Nr 2CD, 2012.
28. Carneiro O.S., Silva A.F., Gomes R., *Fused deposition modeling with polypropylene*, “Materials & Design”, Vol. 83, 2015, 768–776, DOI: 10.1016/j.matdes.2015.06.053.
29. Chakraborty D., Aneesh Reddy B., Roy Choudhury A., *Extruder path generation for Curved Layer Fused Deposition Modeling*, “Computer-Aided Design”, Vol. 40, Issue 2, 2008, 235–243, DOI: 10.1016/j.cad.2007.10.014.
30. Chlebus E., *Techniki komputerowe CAX w inżynierii produkcji*, WNT, Warszawa 2000.
31. Chlebus E., Boratyński T., Dybała B., Frankiewicz M., Kolinka P., *Innowacyjne technologie Rapid Prototyping-Rapid Tooling w rozwoju produktu*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
32. Chlebus E., Dybała B., Kolinka P., *Technologie Rapid Prototyping w indywidualizacji wytwarzania implantów medycznych*, [w:] Materiały Seminarium „Zintegrowany rozwój produktu i procesów produkcyjnych”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002.
33. Czerwiński K., Czerwiński M., *Drukowanie w 3D*, Wydawnictwo InfoAudit, Warszawa 2013.
34. Chou K., Zhang Y., *A Parametric Study of Part Distortions in Fused Deposition Modeling Using Three Dimensional Element Analysis*, [in:] Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 222, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2008, 959–967, DOI: 10.1243/09544054JEM990.
35. Christ Susanne, Martin Schnabel, Elke Vorndran, Jürgen Groll, Uwe Gbureck, *Fiber reinforcement during 3D printing*, “Materials Letters”, Vol. 139, 2015, 165–168, DOI: 10.1016/j.matlet.2014.10.065.
36. Croccolo D., Massimiliano De Agostinis, Giorgio Olmi, *Experimental characterization and analytical modelling of the mechanical behaviour of fused deposition processed parts made of ABS-M30*, “Computational Materials Science”, Vol. 79, 2013, 506–518, DOI: 10.1016/j.commatsci.2013.06.041.
37. Cygnar M., Woś P., Budzik G., *Analiza numeryczna i fizyczna modelu wykonanego przyrostową metodą FDM*, [w:] I Krajowa Konferencja Naukowa:

- Szybkie prototypowanie. Modelowanie-Wytwarzanie-Pomiary, Rzeszów-Pstrągowa, 16–18 września 2015, „Mechanik”, R. 88, Nr 12CD2, 35–39, DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.553.
38. Czyż H., Budzik G., Bienkiewicz R., *Wybrane aspekty szybkiego prototypowania modeli do zastosowań w inżynierii medycznej*, [w:] I Krajowa Konferencja Naukowa: Szybkie prototypowanie. Modelowanie-Wytwarzanie-Pomiary, Rzeszów-Pstrągowa, 16–18 września 2015, „Mechanik”, R. 88, Nr 12CD2, 40–45, DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.554.
39. Daekeon A., Kweon J.-H., Kwon S., Song J., Lee S., *Representation of Surface Roughness in Fused Deposition Modelling*, “Journal of Materials Processing Technology”, Vol. 209, Issues 15–16, 2009, 5593–5600, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.05.016.
40. Dania T., Kamdi P., Nalamwar G., Borsed V., *Multi Objective Optimization of Built Orientation for Rapid Prototyping of Connecting Rod*, “International Journal of Scientific Research and Management”, Vol. 1, Issue 1, 2013, 13–18.
41. Dobrzański L., *Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe – podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*, WNT, Warszawa 2006.
42. Domingo-Espin Miquel, Puigoriol-Forcada Josep M., Garcia-Granada Andres-Amador, Jordi Llumà, Borros Salvador, Reyes Guillermo, *Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts*, “Materials & Design”, Vol. 83, 2015, 670–677, DOI: 10.1016/j.matdes.2015.06.074.
43. Dudek P., Nieciąg H., Zagórski K., *Inżynieria odwrotna i szybkie prototypowanie w wytwarzaniu indywidualnych ortez*, [w:] I Krajowa Konferencja Naukowa: Szybkie prototypowanie. Modelowanie-Wytwarzanie-Pomiary, Rzeszów-Pstrągowa, 16–18 września 2015, „Mechanik”, R. 88, Nr 12CD2, 46–48, DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.555.
44. Dziubek T., Filip M., *Analiza i porównanie dokładności wybranych przyrostowych metod wytwarzania*, [w:] I Krajowa Konferencja Naukowa: Szybkie prototypowanie. Modelowanie-Wytwarzanie-Pomiary, Rzeszów-Pstrągowa, 16–18 września 2015, „Mechanik”, R. 88, Nr 12CD2, 54–61, DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.557.
45. Dziubek T., Pelc M., *Zastosowanie systemów CAD/CAE/RP w procesie modelowania i wytwarzania funkcjonalnego modelu turbosprężarki*, [w:] I Krajowa Konferencja Naukowa: Szybkie prototypowanie. Modelowanie-Wytwarzanie-Pomiary, Rzeszów-Pstrągowa, 16–18 września 2015, „Mechanik”, R. 88, Nr 12CD2, 62–69, DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.558.
46. Equbal A., Kumar Sood Anoop, *Investigations on metallization in FDM build ABS part using electroless deposition method*, “Journal of Manufacturing Processes”, Vol. 19, 2015, 22–31, DOI: 10.1016/j.jmapro.2015.03.002.
47. France A., *Świat druku 3D. Przewodnik*, Wydawnictwo Helion, Gliwice 2014.
48. Galantucci L.M., Lavecchia F., Percoco G., *Study of compression properties of topologically optimized FDM made structured parts*, “CIRP Annals – Manufacturing Technology”, Vol. 57, Issue 1, 2008, 243–246, DOI: 10.1016/j.cirp.2008.03.009.

49. Galeta T., Raos P., Somolanyi M., *Impact of structure and building orientation on strength of 3D printed models*. "KGK. Kautschuk, Gummi, Kunststoffe", Vol. 65, No. 10, 2012, 36–42.
50. Galanulis K., Reich C., Thesing J., Winter D., *Optical Digitizing by ATOS for Press Parts and Tools*, Publikacja wewnętrzna GOM, Braunschweig 2005.
51. Gao Wei, Zhang Yunbo, Ramanujan Devarajan, Ramani Karthik, Chen Yong, B. Williams Christopher, C.L. Wang Charlie, Shin Yung C., Zhang Song, D. Zavattieri Pablo, *The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering*, "Computer-Aided Design", Vol. 69, 2015, 65–89, DOI: 10.1016/j.cad.2015.04.001.
52. Giergiel J., Budzik G., Kurc K., Szybicki D., *Mechatroniczne prototypowanie podzespołów robota*, [w:] I Krajowa Konferencja Naukowa: Szybkie prototypowanie. Modelowanie-Wytwarzanie-Pomiary, Rzeszów-Pstrągowa, 16–18 września 2015, „Mechanik”, R. 88, Nr 12CD2, 74–79, DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.560.
53. Gościański M., Dudziak B., *Badania wytrzymałości na ściskanie próbek z tworzywa ABS drukowanych w technologii FDM*, „Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna”, Nr 5, 2015, 24–27.
54. Gościański M., Ciechacki R., Dudziak B., *Technologiczne uwarunkowania procesu klejenia elementów z termopolimeru ABS w aspekcie wykonywania modeli metodą FDM*, „Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering”, Vol. 57, Nr 1, 2012, 47–50.
55. Goyanes Alvaro, Buanz Asma B.M., Basit Abdul W., Gaisford Simon, *Fused-filament 3D printing (3DP) for fabrication of tablets*, "International Journal of Pharmaceutics", Vol. 476, Issues 1–2, 2014, 88–92, DOI: 10.1016/j.ijpharm.2014.09.044.
56. Golewski Grzegorz L., *Zastosowanie systemu Aramis w badaniach odporności na pękanie kompozytów betonowych modyfikowanych dodatkiem popiołów lotnych*, „Kompozyty”, R. 11, Nr 1, 2011, 3–8.
57. Górski F., Wichniarek R., Andrzejewski J., *Influence of process parameters on dimensional accuracy of parts manufactured using Fused Deposition Modelling technology*, "Advances in Science and Technology Research Journal" Vol. 7, Issue 19, 2013, 27–35, DOI: 10.5604/20804075.1062340.
58. Grimm T., *3D Printer Benchmark: North America Edition*. T.A. Grimm & Associates, Inc., polskie tłumaczenie: Kret M. *Drukarki 3D – porównanie*, „Mechanika”, R. 83, Nr 11, 2010, 864–866.
59. Grzelka M., Śremski K., Jakubowicz M., Wieczorkowski M., Marciniak-Podsadna L., Gapiński B., Budzik G., *Rekonstrukcja szkieletu człowieka przy użyciu metod inżynierii odwrotnej oraz technik Rapid Prototyping*, [w:] I Krajowa Konferencja Naukowa: Szybkie prototypowanie. Modelowanie-Wytwarzanie-Pomiary, Rzeszów-Pstrągowa, 16–18 września 2015, „Mechanik”, R. 88, Nr 12CD2, 84–90, DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.562.
60. Grzelka M., Jakubowicz M., Gaca M., *Odtworzenie geometrii kręgosłupa z wykorzystaniem tomografii komputerowej i optycznego skanera współrzędnościowego*, [w:] I Krajowa Konferencja Naukowa: Szybkie prototypowanie. Modelowanie-Wytwarzanie-Pomiary, Rzeszów-Pstrągowa, 16–18 września

- 2015, „Mechanik”, R. 88, Nr 12CD2, 91–96,
DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.563
61. Grzelka M, Jakubowicz M., Marciniak-Podsadna L., Śremski K., *Analiza dokładności odwzorowania geometrii 3D elementów szkieletu człowieka na podstawie pomiarów wykonanych na tomografii medycznej i współrzędnościowym skanerze optycznym*, [w:] I Krajowa Konferencja Naukowa: Szybkie prototypowanie. Modelowanie-Wytwarzanie-Pomiary, Rzeszów-Pstrągowa, 16–18 września 2015, „Mechanik”, R. 88, Nr 12CD2, 97–102,
DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.564.
62. Guan Hua Wei, Monica Mahesh Savalani, Ian Gibson, Olaf Diegel, *Influence of Fill Gap on Flexural Strength of Parts Fabricated by Curved Layer Fused Deposition Modeling*, “Procedia Technology”, Vol. 20, 2015, 243–248,
DOI: 10.1016/j.protcy.2015.07.039.
63. Gurralla Pavan Kumar, Srinivasa Prakash Regalla, *DOE Based Parametric Study of Volumetric Change of FDM Parts*, “Procedia Materials Science”, Vol. 6, 2014, 354–360, DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.045.
64. Herrmann Karl-Heinz, Clemens Gärtner, Daniel Güllmar, Martin Krämer, Jürgen R. Reichenbach, *3D printing of MRI compatible components: Why every MRI research group should have a low-budget 3D printer*, “Medical Engineering & Physics”, Vol. 36, No. 10, 2014, 1373–1380,
DOI: 10.1016/j.medengphy.2014.06.008.
65. Hwang Seyeon, Edgar I. Reyes, Kyoung-sik Moon, Raymond C. Rumpf, Nam Soo Kim, *Thermo-mechanical Characterization of Metal/Polymer Composite Filaments and Printing Parameter Study for Fused Deposition Modeling in the 3D Printing Process*, “Journal of Electronic Materials”, Vol. 44, Issue 3, 2015, 771–777, DOI: 10.1007/s11664-014-3425-6.
66. Jaia Pranjali, A. M. Kuthe, *Feasibility Study of manufacturing using rapid prototyping: FDM Approach*, “Procedia Engineering”, Vol. 63, 2013, 4–11,
DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.275.
67. Janik K., Pisula J., *Zastosowanie CAD i RP we wzornictwie przemysłowym na przykładzie lampy pokojowej*, [w:] I Krajowa Konferencja Naukowa: Szybkie prototypowanie. Modelowanie-Wytwarzanie-Pomiary, Rzeszów-Pstrągowa, 16–18 września 2015, „Mechanik”, R. 88, Nr 12CD2, 103–106,
DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.565.
68. John M., Tyczka M., Kokot G., Skarka W., *Wpływ kąta ułożenia warstw włókien elementu wykonanego metodą FDM na wytrzymałość na zginanie*, [w:] I Krajowa Konferencja Naukowa: Szybkie prototypowanie. Modelowanie-Wytwarzanie-Pomiary, Rzeszów-Pstrągowa, 16–18 września 2015, „Mechanik”, R. 88, Nr 12CD2, 107–110, DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.566.
69. Jyoti Kalita Samar, Susmita Bose, Howard L. Hosick, Amit Bandyopadhyay, *Development of controlled porosity polymer-ceramic composite scaffolds via fused deposition modeling*, “Materials Science and Engineering: C”, Vol. 23, Issue 5, 2003, 611–620, DOI: 10.1016/S0928-4931(03)00052-3.
70. Kaveh Mahdi, Ardeshir Hemasian, Etefagh Mohsen Badrossamay, *Optimization of the Printing Parameters Affecting Dimensional Accuracy and Internal Cavity for HIPS Material Used in Fused Deposition Modeling Processes*,

- “Journal of Materials Processing Technology”, Vol. 226, 2015, 280–286, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.07.012.
71. Karpiński T., *Inżynieria produkcji*, WNT, Warszawa 2007.
72. Kosik B., Sobolak M., Jagielowicz P., *Eksperymentalne wyznaczanie śladu styku w przekładni zębatej dwudrożnej z tworzyw polimerowych z wykorzystaniem technik RP*, [w:] I Krajowa Konferencja Naukowa: Szybkie prototypowanie. Modelowanie-Wytwarzanie-Pomiary, Rzeszów-Pstrągowa, 16–18 września 2015, „Mechanik”, R. 88, Nr 12CD2, 114–116, DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.568.
73. Khan, Z.A., Lee, B.H., Abdullah, J., *Optimization of Rapid Prototyping Parameters for Production of Flexible ABS Object*, “Journal of Materials Processing Technology”, Vol. 169, Issue 1, 2005, 54–61, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.259.
74. Kumar S., Kruth J.-P., *Composites by rapid prototyping technology*, “Materials & Design”, Vol. 31, Issue 2, 2010, 850–856, DOI: 10.1016/j.matdes.2009.07.045.
75. Kumar S. Dinesh, V. Nirmal Kannan, G. Sankaranarayanan, *Parameter Optimization of ABS-M30i Parts Produced by Fused Deposition Modeling for Minimum Surface Roughness*, “International Journal of Current Engineering and Technology”, Special Issue-3, 2014, 93–97.
76. Kumar G.P., Regalla S.P., *Optimization of support material and build time in fused deposition modeling (FDM)*, “Applied Mechanics and Materials”, Vol. 110–116, 2012, 2245–2251, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.110-116.2245.
77. Kumar S., Pande S., *A generative process planning system for parts produced by rapid prototyping*, “International Journal of Production Research”, Vol. 46, Issue 22, 2008, 6431–6460, DOI: 10.1080/00207540600988097.
78. Lee C.S., Kim S.G., Kim H.J., Ahn S.H., *Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts*, “Journal of Materials Processing Technology”, Vol. 187–188, 2007, 627–630, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.11.095.
79. Lee B.H., Abdullah J., Khan Z.A., *Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object*, “Journal of Materials Processing Technology”, Vol. 169, Issue 1, 2005, 54–61, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.259.
80. Li L., Sun Q., Bellehumeur C., Gu P., *Composite Modeling and Analysis for Fabrication of FDM Prototypes with Locally Controlled Properties*, “Journal of Manufacturing Processes”, Vol. 4, Issue 2, 2002, 129–141, DOI: 10.1016/S1526-6125(02)70139-4.
81. Li H., Taylor G., Bheemreddy V., Iyibilgin O., Leu M., Chandrashekhar K., *Modeling and characterization of fused deposition modeling tooling for vacuum assisted resin transfer molding process*, “Additive Manufacturing”, Vol. 7, 2015, 64–72, DOI: 10.1016/j.addma.2015.02.003.
82. Marcincinova L. N., Marcincin J. N., *Testing of Materials for Rapid Prototyping Fused Deposition Modeling Technology*. “World Academy of Science, Engineering and Technology”, Issue 70, 2012, 411–414.

83. Markowska O., Budzik G., *Innowacyjne metody wytwarzania implantów kostnych za pomocą inżynierii odwrotnej (RE) oraz technik szybkiego prototypowania (RP)*, „Mechanik”, R. 85, Nr 2CD, 2012.
84. Markowska O., Budzik G., Grzelka M., Dziubek T., Cader M., Turek P., *The analysis of the accuracy of wax casting models for medical application*, “Archives of Foundry Engineering”, Vol. 14, Special Issue 1, 2014, 77–82.
85. Martínez J., Diéguez J.L., Ares E., Pereira A., Hernández P., Pérezb J.A., *Comparative between FEM models for FDM parts and their approach to a real mechanical behaviour*, “Procedia Engineering”, Vol. 63, 2013, 878–884, DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.230.
86. Masood S., Mau K., Hong J., Song W., *Tensile properties of processed FDM polycarbonate material*, “Materials Science Forum”, Vols. 654–656, 2010, 2556–2559, DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.654-656.2556.
87. Mielcica M., *Techniki szybkiego prototypowania – rapid prototyping*, „Przegląd Mechaniczny”, Nr 2, 2010, 39–45.
88. Mohamed Omar A., Syed H. Masood, Jahar L. Bhowmik, *Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects*, “Advances in Manufacturing”, Vol. 3, Issue 1, 2015, 42–53, 10.1007/s40436-014-0097-7.
89. Moilenen J., Vaden T., *Manufacturing in motion: first survey on the 3D printing community*, “Statistical Studies of Peer Production”, 15.03.2016: <http://firstmonday.org/ojs/index.php/fm/article/view/4271/3738>.
90. Nancharaiiah T., *Optimization of process parameters in FDM process using design of experiments*. “International Journal on Emerging Technologies”, Vol. 2, No. 1, 2011, 100–102.
91. Nawrocki J., Rokicki P., Szeliga D., Nowotnik A., Drajewicz M., Budzik G., Sieniawski J., *Zastosowanie szybkiego prototypowania w procesie wytwarzania łopatek silników turbinowych*, [w:] I Krajowa Konferencja Naukowa: Szybkie prototypowanie. Modelowanie-Wytwarzanie-Pomiary, Rzeszów-Pstrągowa, 16–18 września 2015, „Mechanik”, R. 88, Nr 12CD2, 143–146, DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.575.
92. Nidagundi Vijay B., R. Keshavamurthy, C.P.S. Prakash, *Studies on Parametric Optimization for Fused Deposition Modelling Process*, “Materials Today: Proceedings”, Vol. 2, Issue 4–5, 2015, 1691–1699, DOI: 10.1016/j.matpr.2015.07.097.
93. Nikzad M., Masood S.H., Sbarski I., *Thermo-mechanical properties of a highly filled polymeric composites for Fused Deposition Modeling*, “Materials & Design”, Vol. 32, Issue 6, 2011, 3448–3456, DOI: 10.1016/j.matdes.2011.01.056.
94. Ning Fuda, Cong Weilong, Qiu Jingjing, Wei Junhua, Wang Shiren, *Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling*, “Composites Part B: Engineering”, Vol. 80, 2015, 369–378, DOI: 10.1016/j.compositesb.2015.06.013.
95. Nelaturi Saigopal, Shapiro Vadim, *Representation and analysis of additively manufactured parts*, “Computer-Aided Design”, Vol. 67–68, 2015, 13–23, DOI: 10.1016/j.cad.2015.03.007.

96. Noorani R., *Rapid prototyping: principles and applications*, John Wiley & Sons, Hoboken, USA, 2006
97. Novakowa-Marcincinova L., Novak-Marcincin J., *Testing of Materials for Rapid Prototyping Fused Deposition Modeling Technology*, World Academy of Science, Engineering and Technology, "International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering", Vol. 6, No. 10, 2012, 2082–2085.
98. Oczó K., *Rapid Prototyping – aktualne dokonania w zakresie rozwoju konstrukcji i przetwarzanych tworzyw sztucznych*, „Mechanik”, R. 79, Nr 4, 2006, 247–261.
99. Oczó K., *Rozwój kształtowania przyrostowego wyrobów*, „Mechanik”, R. 80, Nr 2, 2007, 65–73.
100. Oczó K., *Nowe urządzenia do kształtowania przyrostowego wyrobów i przykłady ich zastosowań*, „Mechanik”, R. 80, Nr 4, 2007, 217–225.
101. Oczó K., *Rosnące znaczenie Rapid Manufacturing w przyrostowym kształtowaniu wyrobów*, „Mechanik”, R. 81, Nr 4, 2008, 241–257.
102. Oczó K., *Stan obecny i perspektywy rozwoju rapid-technologii*, „Mechanik”, R. 82, Nr 2, 2009, 81–88.
103. Oczó K., *Rozwój urządzeń i materiałów do kształtowania przyrostowego wyrobów*, „Mechanik”, R. 83, Nr 2, 2010, 81–89.
104. Oliwa R., *Zastosowanie systemu ARAMIS do trójwymiarowego pomiaru lokalnych odkształceń kompozytów* [w:] I Krajowa Konferencja Naukowa: Szybkie prototypowanie. Modelowanie-Wytwarzanie-Pomiary, Rzeszów-Pstrągowa, 16–18 września 2015, „Mechanik”, R. 88, Nr 12CD2, 147–151, DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.576.
105. Villalpando L., Eiliat H., Urbanic R. J., *An optimization approach for components built by fused deposition modeling with parametric internal structures*, "Procedia CIRP", Vol. 17, 2014, 800–805, DOI: 10.1016/j.procir.2014.02.050.
106. Pham D.T., R.S. Gault, *A comparison of rapid prototyping Technologies*, "International Journal of Machine Tools and Manufacture", Vol. 38, Issues 10–11, 1998, 1257–1287, DOI: 10.1016/S0890-6955(97)00137-5.
107. Płatek P., Zahor M., *Zastosowanie metody FDM techniki szybkiego prototypowania w procesie projektowania modułowego systemu broni strzeleckiej kalibru 5,56 mm (MSBS-5,56)*, „Problemy Techniki Uzbrojenia”, R. 38, Z. 110, 2009, 95–102.
108. Pickerd V., *Optimisation and Validation of the ARAMIS Digital Image Correlation System for use in Large-scale High Strain-rate Events*, Maritime Division DSTO Defence Science and Technology Organisation, 2013.
109. Raju B.S, Chandrashekar U., Drakshayani D.N., Chockalingam K., *Determining the influence of layer thickness for rapid prototyping with stereolithography (SLA) process*, "International Journal of Engineering Science and Technology", Vol. 2, No. 7, 2010, 3199–3205.
110. Raut Sandeep, VijayKumar S. Jatti, Nitin K. Khedkar, T.P.Singh, *Investigation of the effect of built orientation on mechanical properties and total cost of FDM parts*, "Procedia Materials Science", Vol. 6, 2014, 1625–1630, DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.146.

111. Raut Ravari Karamooz M.R., Kadkhodaei M., Badrossamay M., Rezaei R., *Numerical investigation on mechanical properties of cellular lattice structures fabricated by fused deposition modeling*, "International Journal of Mechanical Sciences", Vol. 88, 2014, 154–161, DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2014.08.009.
112. Rayegani F, Onwubolu G.C., *Fused deposition modelling (FDM) process parameter prediction and optimization using group method for data handling (GMDH) and differential evolution (DE)*, "International Journal on Advanced Manufacturing Technology", Vol. 73, Issue 1, 2014, 509–519, DOI: 10.1007/s00170-014-5835-2.
113. Rendong Wu, Qingping Lu, Xiong Zhuo, Wang Xiaohong, *Rapid Prototyping and Manufacturing Technology: Principle, Representative Technics, Applications, and Development Trends*, "Tsinghua Science & Technology", Vol. 14, S1, 2014, 1–12, DOI: 10.1016/S1007-0214(09)70059-8.
114. Rezaie R., Badrossamay M., Ghaie A., Moosavi H., *Topology optimization for fused deposition modeling process*, "Procedia CIRP", Vol. 6, 2013, 521–526, DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.098.
115. Rzucidło A., Budzik G., Przeszlowski Ł., *Wspomaganie procesu decyzyjnego w szybkim prototypowaniu*, [w:] I Krajowa Konferencja Naukowa: Szybkie prototypowanie. Modelowanie-Wytwarzanie-Pomiary, Rzeszów-Pstrągowa, 16–18 września 2015, „Mechanik”, R. 88, Nr 12CD2, 165–168.
116. Sahu RK, Mahapatra S, Sood AK, *A study on dimensional accuracy of fused deposition modeling (FDM) processed parts using fuzzy logic*, "Journal for Manufacturing Science and Production", Vol. 13, Issue 3, 2013, 183–197, DOI: 10.1515/jmsp-2013-0010.
117. Satyanarayana B., Kode Jaya Prakash, *Component Replication Using 3D Printing Technology*, "Procedia Materials Science", Vol. 10, 2015, 263–269, DOI: 10.1016/j.mspro.2015.06.049.
118. Saqib S., Urbanic R.J., *An Experimental Study to Determine Geometric and Dimensional Accuracy Impact Factors for Fused Deposition Modelled Parts*. 4th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production 2011, 293–298, DOI: 10.1007/978-3-642-23860-4_48.
119. Sarat Singamneni, Asimava Roychoudhury, Olaf Diegel, Bin Huang, *Modeling and evaluation of curved layer fused deposition*, "Journal of Materials Processing Technology", Vol. 212, Issue 1, 2012, 27–35, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.08.001.
120. Sęp J., Budzik G., *Możliwości aplikacyjne technologii Rapid Manufacturing w przemyśle lotniczym*, [w:] I Krajowa Konferencja Naukowa: Szybkie prototypowanie. Modelowanie-Wytwarzanie-Pomiary, Rzeszów-Pstrągowa, 16–18 września 2015, „Mechanik”, R. 88, Nr 12CD2, 169–172, DOI: 10.17814/mechanik.2015.12.581.
121. Siemiński P., Rajch A., *Wpływ orientacji warstw i wypełnienia wnętrza na sztywność części wykonywanych techniką FDM z tworzywa ABS oraz wpływ wymiarów geometrii STL na występowanie szczelin we wnętrzu modelu*, Artykuł autorski z XII Forum Inżynierskiego ProCAx 2013, cz. II, 1–13.

122. Siemiński P., Tomczuk M., *Badanie wytrzymałości na rozciąganie próbek wykonywanych wybranymi metodami szybkiego prototypowania*, Artykuł autor-ski, XI Forum Inżynierskie ProCAx 2012, 1–20.
123. Siemiński P., Wojs M., *Wykonanie dyszy Venturiego metodami szybkiego prototypowania zastosowane do badań w odpieniaczach akwaryistycznych*, „Mechanik”, Nr 2, 2011, 148–148.
124. Siemiński P., Tomczuk M., *Badanie wytrzymałości na rozciąganie próbek wykonywanych wybranymi metodami szybkiego prototypowania*, „Mechanik”, R. 86, Nr 2CD, 2013, CD 41, 1–20.
125. Siemiński P. Denisiuk P., *Wykonanie krótkiej serii obudów z zastosowaniem drukowanego modelu wzorcowego oraz form silikonowych*, „Mechanik”, R. 83, Nr 1, 2010, 66–66.
126. Skalski K., Haraburda M., *Generatywne techniki wytwarzania w rozwoju innowacji*, Konferencja E-narzędzia i technologie generatywne – szybka ścieżka do innowacji, CEBBIS, Warszawa, 2011
127. Sood Anoop Kumar Asif Equbal, Vijay Toppo, R.K. Ohdar, S.S. Mahapatra, *An investigation on sliding wear of FDM built parts*, “CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology”, Vol. 5, Issue 1, 2012, 48–54, DOI: 10.1016/j.cirpj.2011.08.003.
128. Sood Anoop K., Equbal A., *Metallization on FDM processed parts using electroless procedure*, “Procedia Materials Science”, Vol. 6, 2014, 1197–1206, DOI: 10.1016/j.mspro.2014.07.193.
129. Sood Anoop K., Raj K. Ohdar, Siba S. Mahapatra, *Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement*, “Journal of Advanced Research”, Vol. 3, Issue 1, 2012, 81–90, DOI: 10.1016/j.jare.2011.05.001.
130. Sood Anoop K., R.K. Ohdar, S.S. Mahapatra, *Improving dimensional accuracy of Fused Deposition Modelling processed part using grey Taguchi method*, “Materials & Design”, Vol. 30, Issue 10, 2009, 4243–4252, DOI: 10.1016/j.matdes.2009.04.030.
131. Sood Anoop K., R.K. Ohdar, S.S. Mahapatra, *Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts*, “Materials & Design”, Vol. 31, Issue 1, 2010, 287–295, DOI: 10.1016/j.matdes.2009.06.016.
132. Sood Anoop K., Chaturvedi, V., Datta, S., Mahapatra, S.S., *Optimization of Process Parameter in Fused Deposition Modeling using Weighted Principal Component Analysis*, “Journals of Advanced Manufacturing Systems”, Vol. 10, Issue 2, 2011, 241–250, DOI: 10.1142/S0219686711002181.
133. Singh R., Singh S., *Development of Nylon Based FDM Filament for Rapid Tooling Application*, “Journal of the Institution of Engineering (India): Series C”, Vol. 95, Issue 2, 2014, 103–108, DOI: 10.1007/s40032-014-0108-2.
134. Srivastava Manu, Sachin Maheshwari, T.K. Kundra, *Virtual Modelling and Simulation of Functionally Graded Material Component using FDM Technique*, “Materials Today: Proceedings”, Vol. 2, Issues 4–5, 2015, 3471–3480, DOI: 10.1016/j.matpr.2015.07.323.

135. Shemelya Angel R., Torrado Corey M., Joel D. English, Yirong Lin, Ryan B. Wicker, David A. Roberson, *Characterizing the effect of additives to ABS on the mechanical property anisotropy of specimens fabricated by material extrusion 3D printing*, "Additive Manufacturing", Vol. 6, 2015, 16–29, DOI: 10.1016/j.addma.2015.02.001.
136. Torres Jonathan, Jose Cotel, Justin Karl, Ali P. Gordon, *Mechanical Property Optimization of FDM PLA in Shear with Multiple Objectives*, "The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society", Vol. 67, Issue 5, 2015, 1183–1193, DOI: 10.1007/s11837-015-1367-y.
137. Tymrak B.M., Kreiger M., Pearce J.M., Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions, "Materials & Design", Vol. 58, 2014, 242–246, DOI: 10.1016/j.matdes.2014.02.038.
138. Villalpando L., *Characterization of parametric internal structures for components built by fused deposition modeling*, Electronic Theses and Dissertations, University of Windsor, 2013.
139. Volpato N., Foggia, J.A. Schwarz D.C., *The influence of support base on FDM accuracy in Z*, "Rapid Prototyping Journal", Vol. 20, Issue 3, 2014, DOI: 10.1108/RPJ-12-2012-0116.
140. Wieczorowski M., Radke M., *Inżynieria odwrotna i kontrola jakości w pomiarach form i elementów z tworzyw sztucznych*, OBERON 1/2007, 6–7.
141. Wieczorowski M., *Weryfikacja pierwszej sztuki na przykładzie obudowy telefonu komórkowego*, OBERON 4/2008, 44–45.
142. Wieczorowski M., *Wykorzystanie skanera optycznego w produkcji narzędzi*, OBERON 1/2006, 8–9.
143. Wieczorowski M., *Industrial application of optical scanner*, Zeszyty Naukowe Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku Białej, 22/2006, 381–390.
144. Wohlers Report, *3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry*, Annual Worldwide Progress Report, Wohlers Associates, USA, 2015.
145. Yokozeki Tomohiro., Aoki Yuichiro, Ogasawara Toshio., *Experimental characterization of strength and damage resistance properties of thin-ply carbon fiber/toughened epoxy laminates*, "Composite Structures", Vol. 82, Issue 3, 2008, 382–389, DOI: 10.1016/j.compstruct.2007.01.015.
146. Zein Iwan, Dietmar W. Hutmacher, Kim Cheng Tan, Swee Hin Teoh, *Fused deposition modeling of novel scaffold architectures for tissue engineering applications*, "Biomaterials", Vol. 23 Issue 4, 2002, 1169–1185, DOI: 10.1016/S0142-9612(01)00232-0.
147. Zhang JW, Peng AH, *Process-parameter optimization for fused deposition modeling based on Taguchi method*. "Advanced Materials Research", Vol. 538, 2012, 444–447, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.538-541.444.
148. Zhang Y, Chou K, *A parametric study of part distortions in fused deposition modelling using three-dimensional finite element analysis*, Proc. IMechE Vol. 222 Part B: J. Engineering Manufacture, 959–968, DOI: 10.1243/09544054JEM990.

149. Żochowski M., Jaworski A., Krzesiński G., Zagrajek T., *Wytrzymałość konstrukcji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2004.

Źródła internetowe

150. System ATOS, opisy możliwości i parametrów technicznych (14.03.2016):
<http://www.gom.com/pl/systemy-pomiarowe/charakterystyka-systemow/atos-triple-scan.html>
151. System ARAMIS, opisy możliwości i parametrów technicznych (14.03.2016):
<http://www.gom.com/pl/systemy-pomiarowe/korelacja-obrazu.html>
152. Centrum wytwórcze FORTUS 400mc, opis techniczny (14.03.2016):
<http://fortus.com.ar/spec/FORTUS400mc-0209.pdf>
153. Dane materiałowe ABS-M30 (14.03.2016):
<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=a6ab0369e78348cfbf5da02b969b82b6&ckck=1>
154. Dokumentacja systemu ANSYS (14.03.2016):<http://www.ansys.com/>