

Tomasz Dziubek, Grzegorz Budzik, Bartłomiej Sobolewski, Mateusz Petranik

## Zastosowanie zintegrowanych systemów CAD/CMM/MP do oceny wielkości rzeczywistych odkształceń na przykładzie prototypu szczęki chwytaka

W artykule przedstawiono badania dotyczące określenia wielkości odkształceń prototypu szczęki chwytaka, wykonanej z zastosowaniem addytywnej metody wytwarzania, PolyJet. W tym celu zamodelowano z systemie CAD geometrię testową, którą poddano analizom MES, mającym numerycznie określić wielkości odkształceń przedmiotu podczas jego pracy. W celu weryfikacji poprawności otrzymanych wyników numerycznych, wykonano stanowisko badawcze, umożliwiające symulację rzeczywistych warunków pracy szczęki. Po zamocowaniu prototypu na stanowisku badawczym, został on obciążony analogicznie jak w analizach MES. Obciążony statycznie i odpowiednio przygotowany prototyp, poddano procesowi pomiarowemu, wykonanemu z zastosowaniem optycznego skanera 3D Atos II Triple Scan. Przeprowadzono również pomiar geometrii szczęki bez obciążenia. Na podstawie otrzymanych danych pomiarowych wykonano analizy deformacji prototypu pod obciążeniem, jak również określono dokładność wykonania jego geometrii w odniesieniu do nominalnego modelu 3D-CAD.

Przeprowadzone badania umożliwiają precyzyjne określenie modyfikacji geometrii modeli fizycznych w celu zapewnienia jak największej wytrzymałości części, przy jednoczesnej minimalizacji masy. Równocześnie wykonane analizy pozwalają na weryfikację danych materiałowych przyjętych symulacji MES oraz możliwość ich korekty, w porównaniu do warunków rzeczywistych.

**Słowa kluczowe:** skaner optyczny, PolyJet, CAD, analiza odkształceń.

### Wstęp

Wprowadzanie nowoczesnych i innowacyjnych rozwiązań w wielu dziedzinach, takich jak elektrotechnika, informatyka czy w zakresie układów pomiarowych i sterujących, spowodował rozwój nowego, interdyscyplinarnego kierunku, jakim jest robotyka przemysłowa. Skupia ona problemy mechaniki, projektowania, elektroniki, programowania, czy inżynierii materiałowej w odniesieniu do maszyn manipulacyjnych. Zastosowanie robotów przemysłowych ogranicza lub całkowicie zastępuje udział człowieka w procesie produkcji. Pozwala to na podniesienie jakości i wycofanie pracy ludzkiej z warunków niebezpiecznych (na przykład wysoka temperatura, hałas, szkodliwe opary) zagrażających życiu i zdrowiu. Roboty bez problemu radzą sobie z podnoszeniem ciężkich przedmiotów, wykonywaniem cyklicznie ruchów z dużą dokładnością i powtarzalnością, np. w procesie spawania czy polerowania. Ze względu na ich uniwersalność, manipulatory znajdują zastosowanie w różnych branżach, tj. przemysł samochodowy, chemiczny, elektryczny, spożywczy.

Co roku przygotowywane są raporty związane z rozwojem robotyki przemysłowej. Na świecie prowadzone przez International Federation of Robotics (Międzynarodowa Federacja Robotyki, w skrócie IFR) [11]. Według tych danych, największe zapotrzebowanie odnotowuje się w przemyśle automotive, gdzie tylko w 2015 roku spośród ok. 253 tys. sprzedanych robotów aż 97,5 tys. jednostek trafiło do tej branży.

Wykorzystanie manipulatorów w różnych gałęziach przemysłu wpłynęło nie tylko na komfort życia ludzi, wyręczając człowieka

w żmudnych i złożonych czynnościach, ale także na polepszenie jakości, a nieustanny rozwój technologii stale poszerza ich możliwości.

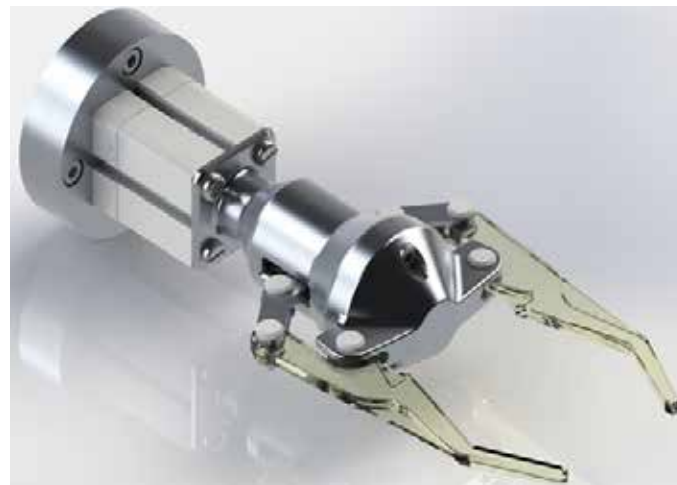
Celem pracy jest zaprojektowanie zespołu chwytaka współpracującego z robotem przemysłowym oraz przeprowadzenie analiz końcówki chwytnej wykonanej przyrostową metodą PolyJet wraz z weryfikacją wyników na obiekcie rzeczywistym.

### 1. Chwytki jako narzędzia robotów przemysłowych – model badawczy

Nieodzownym elementem każdego robota przemysłowego są narzędzia technologiczne. Dzięki temu połączeniu prace wykonywane są dokładniej i efektywniej. Jednym z zadań, jakie powierza się manipulatorom, są zadania transportowe. Do ich realizacji stosowane są chwytki. Celem tych narzędzi jest pobranie/uchwycenie przedmiotu, następnie utrzymanie obiektu w trakcie trwania czynności transportowych z odpowiednią siłą, zapobiegającą zmianę pozycji względem chwytaka na skutek sił bezwładności czy ciężkości, oraz uwolnienia przedmiotu w zadanym punkcie. Czynniki, które decydują o prawidłowym chwyceniu obiektu to m.in. jego masa, kształt, właściwości powierzchni miejsc chwytu, moment bezwładności czy położenie środka ciężkości. Właściwości te również wpływają na konstrukcję chwytaków, tj. dobranie odpowiedniego napędu, struktury układu wykonawczego, ilości końcówek chwytających [7]. Natomiast zróżnicowanie przedmiotów manipulacji pod względem wyżej wymienionych parametrów, wymusza projektowanie i konstruowanie specjalnych chwytaków. Szacuje się, że tylko w 30 – 40% przypadków możliwe jest wykorzystanie gotowych rozwiązań producentów [10].

W trakcie realizacji badań, do procesu modelowania chwytaka zastosowano środowisko oprogramowania systemu Solidworks.

Na podstawie przyjętych założeń konstrukcyjnych oraz wykonanych obliczeń, przeprowadzono proces modelowania chwytaka, którego efektem było uwzględnienie kilku wariantów geometrii końcówki chwytnej (rys. 1).



**Rys. 1.** Model chwytaka opracowany w programie Solidworks z przykładowymi końcówkami chwytowymi

Zespół składa się z ośmiu głównych elementów: siłownika pneumatycznego, głowicy widełkowej, łącznika, ramienia, końcówki chwytnej, obudowy dolnej, górnej oraz przedniej. Dodatkowo w skład wchodzi dwie płytki mocujące umożliwiające montaż do kiści manipulatora.

Szczęki wykonane zostały przyrostową metodą druku 3D – PolyJet – która zapewnia wysoką jakość i dokładność wytwarzania [6, 8, 9]. Użyty materiał to RGD720 (przezroczysty) oferowany przez firmę Stratasys. Zastosowanie takiego rozwiązania pozwala na dostosowanie chwytaka do obiektów o różnych, złożonych kształtach. Szczeka ma 130 [mm] długości oraz 5 [mm] grubości i umożliwia uchwycenie przedmiotu o średnicy  $\phi 95$  [mm] wynikającej z założeń projektowych. Końcówki chwytne opierają się na obudowie przedniej, montowane również za pomocą połączenia sworzniowego.

## 2. Wytrzymałość statyczna szczęki – maksymalne przemieszczenia

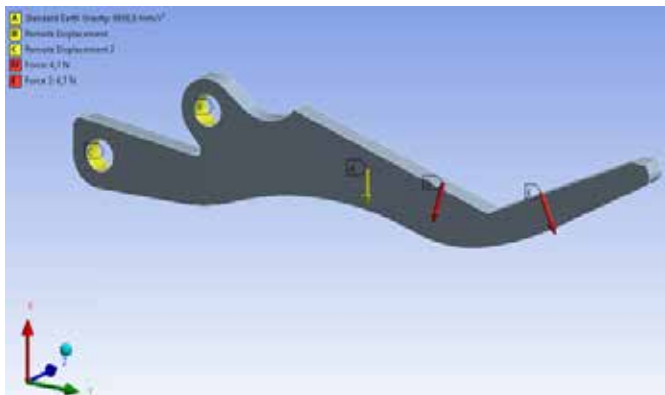
Nieodzownym etapem w procesie projektowania jest analiza wytrzymałościowa konstruowanych wyrobów. Analizę taką bez konieczności budowania prototypów przeprowadza się w programach wspomagających projektowanie, opartych na metodzie elementów skończonych (MES, ang. FEM). Dzięki temu istnieje możliwość wstępnej weryfikacji wytrzymałości nawet złożonych konstrukcji, określenia stanów i koncentracji naprężeń, co pozwala na wybór najlepszego rozwiązania spośród kilku wariantów wyrobu.

Na potrzeby niniejszych prac badawczych przeprowadzono analizy wytrzymałościowe dla 6, różnych wersji projektowanej szczęki, z której wybrana została geometria charakteryzująca się najlepszymi parametrami wytrzymałościowymi. Symulację wytrzymałości szczęki przeprowadzono w programie ANSYS Workbench.

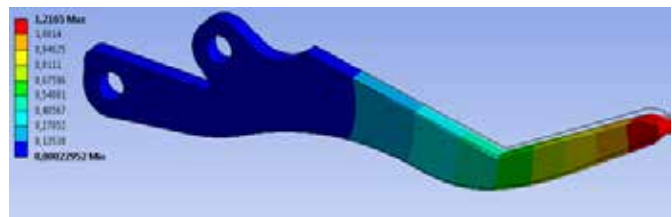
W celu rozpoczęcia symulacji, określono obciążenia działające na element i tzw. warunki brzegowe. W tym przypadku zamodelowano podporę stałą ze swobodną rotacją względem osi Z (zaznaczone literą „C” na rysunku 2), drugą podporę z możliwością ruchu po osi x (ozn. „D”), siłę pola grawitacyjnego zgodną z kierunkiem osi X (ozn. „E”) oraz maksymalną siłę normalną – 6.7 [N] – działającą w dwóch punktach przylegania przedmiotu transportowanego do końcówki chwytnej (ozn. „A”, „B”).

Po zdefiniowaniu powyższych cech możliwa była do przeprowadzenia symulacje, których wyniki przedstawiono na rysunkach 3–8.

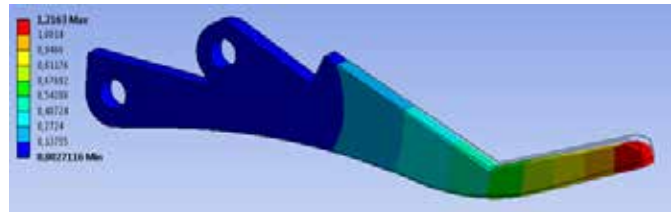
Na podstawie otrzymanych wyników można odczytać, że dla zadanej siły obciążającej końcówkę chwytaka, maksymalne przemieszczenie wynosi 1.21 [mm] na swobodnym końcu szczęki (rys. 3). Dla porównania widoczny zarys krawędzi obrazuje stan bez obciążeń.



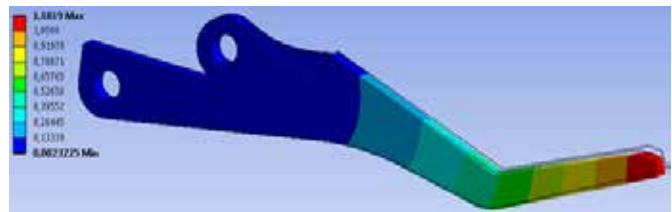
Rys. 2. Założone warunki brzegowe i obciążenia



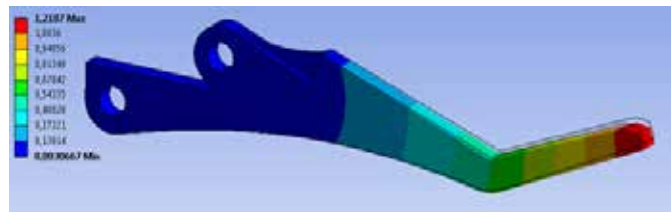
Rys. 3. Wynik obliczeń dla wariantu I – maksymalne przemieszczenia (mm)



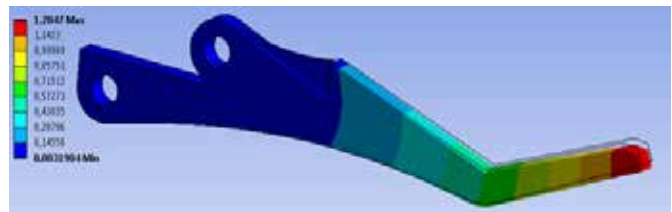
Rys. 4. Wyniki obliczeń dla wariantu II – maksymalne przemieszczenia (mm)



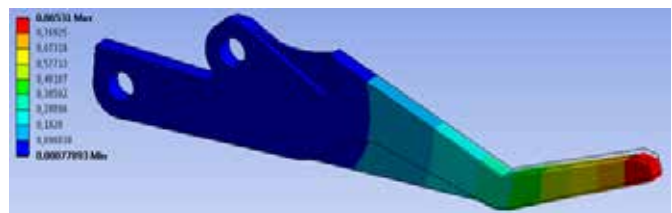
Rys. 5. Wyniki obliczeń dla wariantu III - maksymalne przemieszczenia (mm)



Rys. 6. Wyniki obliczeń dla wariantu IV - maksymalne przemieszczenia (mm)



Rys. 7. Wyniki obliczeń dla wariantu V – maksymalne przemieszczenia (mm)



Rys. 8. Wyniki obliczeń dla wariantu VI - maksymalne przemieszczenia (mm)



Przedstawiony tok postępowania przeprowadzono dla kolejnych 5 wariantów.

Rozpatrując maksymalne przemieszczenia największe otrzymano dla rozwiązania nr 5 (rys. 7), gdzie osiągają wartość ok. 1.28 [mm]. W przypadku pozostałych odmian wyniki wahają się w granicach wartości 1.18 – 1.21 [mm]. Najmniejsze uzyskane przemieszczenia zanotowano w przypadku 6, gdzie wolny koniec szczęki przemieszcza się o ok. 0.86 [mm] pod działaniem sił 6.7 [N] (rys. 8).

Przeprowadzenie symulacji umożliwiło weryfikację projektowanych części ze względu na wytrzymałość pod maksymalnym obciążeniem działającym na końcówkę chwytą. Dzięki tej praktyce, możliwe było wyeliminowanie błędów na etapie procesu konstrukcyjnego. Informacje z charakterystyk służą jedynie wskazaniu orientacyjnych wartości i obszarów naprężeń, bowiem dane cech materiałowych, zmienne czynniki zewnętrzne, stosowanie uproszczeń wpływa na otrzymywane rezultaty.

### 3. Analiza przemieszczeń – badania prototypowe

W celu weryfikacji wyników pola przemieszczeń otrzymanych w badaniach symulacyjnych MES, został wykonany eksperyment laboratoryjny. Analizie przemieszczeń podlegała wydrukowana część chwytaka, która bezpośrednio pracuje z elementem manipulowanym. Poddanie szczęki takiej analizie pozwoliło ocenić szacowaną wytrzymałość oraz zdolność do wykonywania operacji transportowania.

Spośród dostępnych metod skupiono się na technologii PolyJet, opatentowanej przez firmę Stratasys [12]. Polega ona na

nanoszeniu cienkich warstw (rzędu 16 – 32 mikrometrów) ciekłej żywicy przez głowice, z której każda z nich utwardzana jest przy pomocy światła UV.

Materiałem użytym w procesie drukowania był RGD720 (transparentny), którego właściwości przedstawiono w tabeli 1.

Stanowisko, na którym prowadzone były analizy, składa się z optycznego skanera 3D Atos II Triple Scan (rys. 9) oraz konstrukcji podtrzymującej badany element, na której zamontowano wydrukowaną końcówkę chwytą wraz z obciążeniami (rys. 10).

Tab. 1. Właściwości materiału RGD720 [12]

	ASTM	UNITS	METRIC
Tensile Strength	D-638-03	MPa	50-65
Elongation at Break	D-638-05	%	15-25
Modulus of Elasticity	D-638-04	MPa	2000-3000
Flexural Strength	D-790-03	MPa	80-110
Flexural Modulus	D-790-04	MPa	2700-3300
HDT, °C @ 0.45MPa	D-648-06	°C	45-50
HDT, °C @ 1.82MPa	D-648-07	°C	45-50
Izod Notched Impact	D-256-06	J/m	20-30
Water Absorption	D-570-98 24hr	%	1.5-2.2
Tg	DMA, E-	°C	48-50
Shore Hardness (D)	Scale D	Scale D	83-86
Rockwell Hardness	Scale M	Scale M	73-76
Polymerized Density	ASTM D792	g/cm <sup>3</sup>	1.18-1.19
Ash Content	USP281	%	0.01-0.02



Rys. 9. Optyczny skaner 3D Atos II Triple Scan



Rys. 10. Stanowisko do badań przemieszczeń

W badaniach wykorzystano metodę bezdotykowego pomiaru przemieszczeń przy użyciu skanera optycznego [2, 3]. Na tej podstawie zbudowana została geometria modelu, zapisana przy pomocy chmury punktów.

Do analizy przemieszczeń wykonano 2 pomiary: bez obciążenia oraz z obciążeniem. Szczękę chwytaka zamocowano na konstrukcji podtrzymującej w pozycji, w której działają największe siły, wyznaczone z charakterystyki siłowej. Badany element poddano statycznemu obciążeniu o masie 1.36 [kg] (680 [g] na każdą stronę końcówki), które odpowiadały ciężarowi 13.34 [N] (6.7 [N] na każdą stronę) wynikającemu z charakterystyki siłowej oraz odpowiadającym wartościom założonym w analizach MES.

### 3.1. Wyniki badań

W celu opracowania miarodajnej analizy porównano otrzymane wyniki z badań laboratoryjnych oraz uzyskane metodą symulacji komputerowej. Dla porównania przedstawiono analizę szczęki chwytaka nieobciążonej oraz z działającym obciążeniem. Analizy przeprowadzono w programie GOM Inspect.

#### Analiza geometrii bez obciążenia

W pierwszej analizie porównana została wydrukowana szczęka z modelem CAD, która zweryfikuje dokładność wykonania elementu metodą PolyJet (rysunki 11 i 12). Z otrzymanych wyników można wnioskować, iż największe odchylenia geometrii wydrukowanego modelu występują na wolnym końcu szczęki w płaszczyźnie Y-Z oraz w obrębie otworu mocującego. Największa wartość wynosi 0.52 [mm].

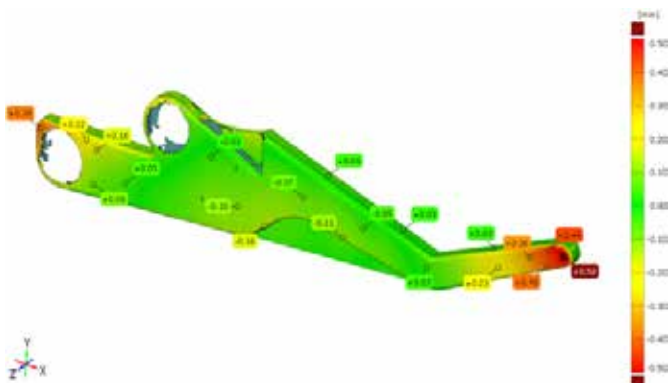
Wynikać to może z niedokładności montażu na platformie podtrzymującej oraz błędów formatu STL, samej drukarki czy skurczu

materiału. Odchylenia rzędu 0.01 - 0.1 [mm] w środkowej części chmury punktów oraz w płaszczyźnie X-Y (rys. 12) dowodzą, iż metoda PolyJet jest relatywnie precyzyjna i dokładna. Widoczne urwania modelu w miejscach otworów są rezultatem braku informacji o występującej tam geometrii (trudność w zarejestrowaniu przez kamerę tych punktów ze względu na przysłaniające elementy stanowiska).

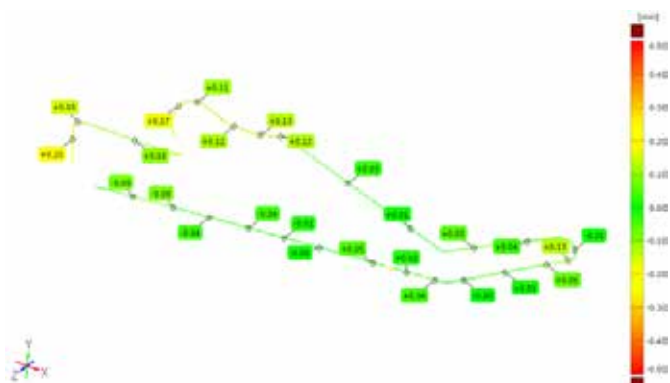
#### Analiza geometrii z obciążeniem

W drugim przypadku przeanalizowano obciążoną, wydrukowaną szczękę w odniesieniu do modelu CAD. Pozwoliło to ocenić zgodność z symulacją komputerową (tj. szacowane przemieszczenia) oraz zdolność do wykonywania operacji transportowania (rys. 13 i 14). Analizując otrzymane wyniki po przyłożeniu obciążenia do modelu rzeczywistego uzyskano przemieszczenia względem modelu CAD (rys. 13). Największa zanotowana wartość wynosi ok. 1.26 [mm] na końcu ramienia. Rozkład przemieszczeń zaprezentowano również w przekroju (rys. 14).

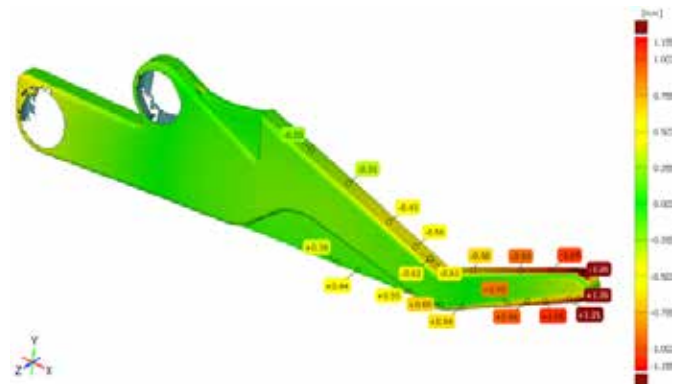
Dla porównania na rysunku 15 zobrazowano wyniki symulacji komputerowej. Wyniki wskazują na różnice pomiędzy wynikami



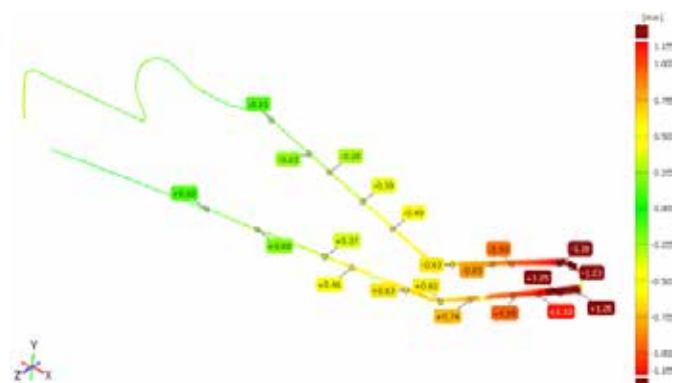
Rys. 11. Porównanie rzeczywistego modelu z modelem CAD szczęki



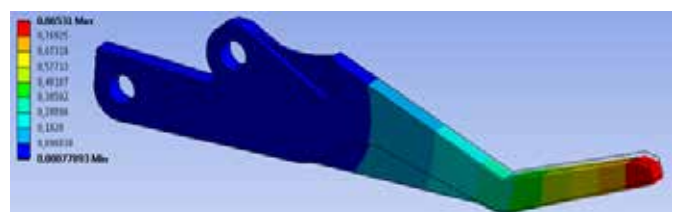
Rys. 12. Porównanie rzeczywistego modelu z modelem CAD szczęki - przekrój w płaszczyźnie X-Y



Rys. 13. Porównanie rzeczywistego modelu pod obciążeniem z modelem CAD szczęki - wartości



Rys. 14. Porównanie rzeczywistego modelu pod obciążeniem z modelem CAD szczęki - przekrój w płaszczyźnie X-Y



Rys. 15. Otrzymane przemieszczenia w symulacji komputerowej [mm]

badan laboratoryjnych oraz symulacji MES. W symulacji komputerowej wiele czynników (takich jak drgania, wilgotność powietrza) jest pomijanych. Dodatkowo błędy wynikające z przybliżeń (np. izotropowość materiału), niekompletnych lub niesprawdzonych w rzeczywistym środowisku danych materiałowych, aproksymacji danych wejściowych, czy błędów zaokrąglenia wpływają na uzyskane wyniki symulacji. Zatem otrzymane wyniki służą jedynie jako przybliżenie zachowania się modelu, a porównanie eksperymentu z symulacją uzupełniło o informację o dokładności obliczeń w symulacji komputerowej.

## Podsumowanie

Przeprowadzone badania dotyczące określenia wielkości odkształceń prototypu szczęki chwytaka wykonanej z zastosowaniem addytywnej metody wytwarzania PolyJet miały na celu ocenę oraz weryfikację zgodności pola przemieszczeń z otrzymanymi wynikami na drodze symulacji komputerowej. Z przeprowadzonego testu wynika, iż dokładność modelu wybranej metody druku jest wysoka. Zastosowanie danej techniki druku, rodzaju materiału oraz parametrów samego urządzenia determinuje dokładność wytwarzania modeli fizycznych prowadzonej z zastosowaniem technik Rapid Prototyping (RP).

Wykonane badania stanowiskowe przeprowadzone w warunkach zbliżonych do warunków rzeczywistych wykazały, że szczęka nie uległa zniszczeniu, zatem można stwierdzić, że zaprojektowana końcówka spełni swoją funkcję w zespole chwytaka. Badania laboratoryjne dowiodły jednak, że w rzeczywistości wartości przemieszczeń są większe, niż wykazują to symulacje.

Wynikać to może z faktu stosowanych przybliżeń oraz aproksymacji niektórych danych w programie komputerowym. Mimo to, pozwala określić zachowanie się modelu oraz oszacować wartości wybranych parametrów.

Daje to podstawy do wykonania korekty danych materiałowych dotyczących analizowanego materiału użytego w procesie wytwarzania szczęki.

## Bibliografia

1. Budzik G., *Dokładność geometryczna łopatek turbin silników lotniczych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2013.
2. Budzik G., Dziubek T., Markowska O., Tutak M., *Automatyzacja i robotyzacja pomiarów współrzędnościowych*, *Stal Metale & Nowe Technologie* ISSN 1895-6408, 5-6/2011, s. 34-36
3. Budzik G., Dziubek T., *Methodology of measurement aeronautical bevel gears utilizing an optical 3D scanner using white and blue light*, *DIAGNOSTYKA* ISSN 1641-6414, e-ISSN 2449-5220, Vol. 16, No.1 (2015) s. 51-56
4. Budzik G., Pisula J., Dziubek T., Sobolewski B., Zaborniak M., *Zastosowanie systemów CAD/RP/CMM w procesie projektowania kół zębatych walcowych o zębach prostych*, „Mechanik” 2011, nr 12, PL ISSN 0025-6552, s. 988.
5. Cader M., *Dobór geometrii prototypów wytwarzanych przyrostowo z polimeru ABS-M30*, Rozprawa doktorska, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2016.
6. Dziubek T., Filip M., *Analiza i porównanie dokładności wybranych metod przyrostowych*, „Mechanik” 2015, nr 15, s. 54-61
7. Paszta P., *Modelowanie i analiza chwytaka robota przemysłowego*, „Mechanik” 2015, nr 7, s. 645-654.
8. Przybylski P., *Wykorzystanie technologii druku 3D w projektowaniu chwytaków robotów przemysłowych*, „Mechanik” 2016, nr 7, s. 804-805.
9. Siemiński P., Budzik G., *Techniki przyrostowe. Druk 3D, drukarki 3D*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2015, s. 85-100.
10. Szenajch W., *Pneumatyczne i hydrauliczne manipulatory przemysłowe*, WNT, Warszawa 1992.
11. *International Federation of Robotics: podsumowanie roku 2016*: [https://ifr.org/img/uploads/Executive\\_Summary\\_WR\\_Industrial\\_Robots\\_20161.pdf](https://ifr.org/img/uploads/Executive_Summary_WR_Industrial_Robots_20161.pdf)
12. Materiały informacyjne firmy Stratasys, [www.stratasys.com](http://www.stratasys.com)
13. Pluciennik P., Maciejczyk A., *Wykorzystanie systemów CAD w procesie konstruowania maszyn i urządzeń*, „Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe” 2016, nr 6.
14. Chomka G., Chudy J., *Zastosowanie systemów CAD na przykładzie konstrukcji składanego żurawia z napędem hydraulicznym*, „Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe” 2013, nr 10.
15. Gotowała K., Patyk R., *Zastosowanie nowoczesnych metod modelowania i symulacji w projektowaniu maszyn i urządzeń*, „Autobusy – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe” 2016, nr 8.

## Autorzy:

**Tomasz Dziubek** – Politechnika Rzeszowska

**Grzegorz Budzik** – Politechnika Rzeszowska

**Bartłomiej Sobolewski** – Politechnika Rzeszowska

**Mateusz Petranik** – Politechnika Rzeszowska