

Analiza możliwości zastosowania technologii przyrostowych do wytwarzania elementów konstrukcji robotów mobilnych

Maciej Cader, Maciej Trojnacki

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów PIAP

Streszczenie: W artykule przedstawiono wyniki badań materiałów niemetalowych przeznaczonych do zastosowania w technologii przyrostowego wytwarzania elementów konstrukcji robotów. Artykuł dotyczy również zastosowania jednej z takich technologii, tj. technologii FDM do w produkcji części robotów, na przykładzie prototypu robota o zmiennej konfiguracji. W artykule opisano metodologię przygotowania wybranych części robota do wytworzenia z zastosowaniem technologii FDM.

Słowa kluczowe: technologie przyrostowego wytwarzania, wytwarzanie elementów robotów, materiały termoplastyczne, wytłaczanie, roboty mobilne

W dzisiejszych czasach konstrukcjom robotów stawiane są coraz wyższe wymagania. We współczesnych robotach oprócz dużej wytrzymałości przy minimalnej masie konstrukcji znaczenie ma także łatwość i szybkość wytwarzania oraz montażu nowych podzespołów a także możliwości rekonfiguracji – adaptacji do postawionego zadania. Nie bez znaczenia jest też wygląd robota. To wszystko wiąże się z koniecznością szybkiego tworzenia prototypów robotów w celu weryfikacji ich działania przed wytworzeniem wersji ostatecznej. Do realizacji powyższych zadań stosuje się obecnie nowoczesne oprogramowanie służące do opracowania modelu CAD (np. program Autodesk Inventor, ProEngineer), analizy kinematyki i dynamiki (np. program MD Adams), projektowania układów sterowania (np. pakiet MATLAB/Simulink) oraz analiz wytrzymałościowych i optymalizacji konstrukcji z zastosowaniem metody elementów skończonych (np. program Ansys).

Współcześnie istotne jest, aby zaprojektowany robot można było jak najszybciej przetestować i wdrożyć do produkcji. Proces taki w praktyce trwa zazwyczaj kilka lat. Można go jednak przyspieszyć stosując innowacyjne technologie wytwarzania, w których elementy produkowane są bezpośrednio na podstawie modelu CAD, bez dodatkowej dokumentacji wykonawczej. Można to osiągnąć dzięki zastosowaniu obrabiarek sterowanych numerycznie, cięcia wodą/laserem itp. Dużo bardziej obiecujące jednak wydaje się użycie wiedzy i technologii szybkiego prototypowania w zakresie wytwarzania metodami przyrostowymi [5–7] zwłaszcza tam, gdzie trzeba np. szybko wybudować działający prototyp robota w celach weryfikacyjnych, edukacyjnych, mających na celu sprawdzenie procedur sterujących itp.

Badania technologii przyrostowego wytwarzania wykonane w oparciu o wyniki stażu realizowanego w ramach projektu "TEKLA PLUS edycja IV" współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego wykazało, że do technologii nadających się potencjalnie do produkcji części użytkowych, a nie tylko modeli pokazowych można zaliczyć następujące: FDM (ang. Fused Deposition Modeling), SLS (ang. Selective Laser Sintering), DMLS (ang. Direct Metal Laser Sintering) i PolyJET. Wytypowane technologie można podzielić na dwie grupy:

- technologie, które polegają na nakładaniu na ruchomy stół roboczy specjalnie przygotowanego materiału – technologie FDM i PolyJet,
- technologie, które za pomocą medium spajają materiał rozprowadzany specjalnym zgarniaczem na stole modelowym – technologie SLS i DMLS.

Zasada działania każdej z technologii przyrostowego wytwarzania polega na budowaniu modeli z materiału poddawanego obróbce, która jest zależna od danej technologii. Może to być rozpuszczanie i nakładanie – technologie FDM i PolyJET [5, 6] lub przetwarzanie wiązką laserową specjalnie przygotowanego proszku – technologia SLS i DMLS [7]. W technologii FDM i PolyJET materiał podawany jest specjalnymi dyszami na obniżający się stół roboczy. W ten sposób kontur modelu jest tworzony na płaszczyźnie XY (płaszczyźnie stołu), a przyrost wysokości modelu (nakładanie kolejnych warstw) odbywa się dzięki temu, że stół przemieszcza się o kolejne kroki w dół. Wartość przemieszczenia jest równa wysokości pojedynczej warstwy, na której podzielony jest model CAD, przeznaczonej do wytworzenia części. Trochę inaczej sprawa wygląda w przypadku technologii SLS i DMLS. Tu zamiast głowicy podającej materiał na stół modelowy zainstalowany jest laser spiekający proszek, który jest rozprowadzany przez specjalny zgarniacz na powierzchni stołu modelowego. Proszek jest rozprowadzany do wysokości pojedynczej warstwy i następuje spiekanie wzdłuż ścieżki stanowiącej kontur modelu w przekroju wyznaczonym przez warstwę. Stół przemieszcza się o kolejne warstwy w dół. Po każdym przemieszczeniu następuje rozprowadzenie proszku do grubości kolejnej warstwy. We wszystkich technologiach przyrostowego wytwarzania wysokość warstwy jest stała w jednym procesie dla całego modelu. Wartości wysokości pojedynczych warstw można wybierać z dostępnych, ustawionych przez producenta.

1. Badania materiałów

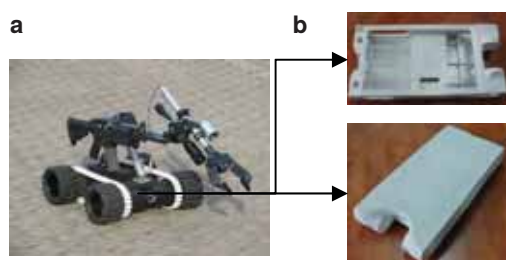
W celu przeprowadzenia zgrubnej analizy przydatności materiałów stosowanych w wybranych technologiach przyrostowego wytwarzania do produkcji elementów konstrukcji robotów, wykonano studium właściwości materiałowych materiałów stosowanych w czterech wytypowanych technologiach, spośród których wybrano następujące materiały:

- Durus White (technologia PolyJET),
- FC 930 (technologia PolyJET),
- FC 720 (technologia PolyJET),
- Verogrey (technologia PolyJET),
- ULTEM*9085 (technologia FDM),
- PC (technologia FDM),
- PC-ABS (technologia FDM),
- ABS-M30 (technologia FDM),
- PPSF (technologia FDM),
- PA2200 (technologia SLS).

Do analizy nie wzięto próbek powstałych z zastosowaniem technologii DMLS, ponieważ ze szczegółowego studium właściwości technologii DMLS [7] wynika, że proces DMLS można tak ustawić aby całkowity uzyskany przepływ materiału wynosił 99,9 %, co można uznać jako część litą (wytworzoną jak z zastosowaniem obróbki skrawaniem) powstałą na bazie spieku proszku z materiałów, którymi obecnie mogą być:

- aluminium AlSi10Mg
- mieszanka kobalt-chrom-molibden,
- stal narzędziowa,
- stal nierdzewna,
- tytan,
- mieszanka niklowo-aluminiowa,
- srebro,
- złoto.

W badaniach skupiono się zatem na materiałach niemetalowych stosowanych w technologiach: FDM, PolyJet oraz SLS.



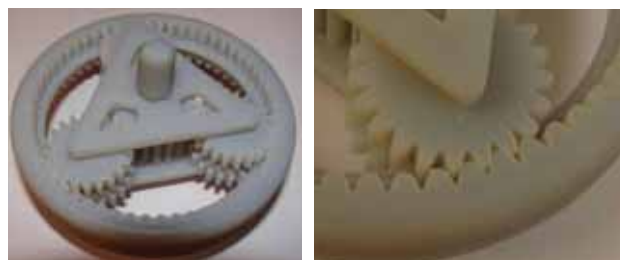
Rys. 1. a – Robot PIAP SCOUT, b – moduły prototypu nowego korpusu wykonane z materiału PC, z zastosowaniem technologii FDM

Fig. 1. a – PIAP SCOUT robot, b - prototype modules of new robot's body made from PC material using FDM technology

Do pierwszej analizy wytworzono modele związane z konstrukcjami PIAP z zastosowaniem trzech technologii: FDM, SLS i PolyJET. Na bazie wytworzonych modeli, których wybrane przykłady przedstawiono na rys. 1 i 2, przeprowadzono analizę zgrubną. Analizowano:

- barwę,
- przezroczystość,
- jakość powierzchni,

- połysk,
- śliskość w dotyku,
- twardość – próba rysowania paznokciem,
- gęstość (opis gęstości: gęstość > 1 – materiał tonie w wodzie, gęstość < 1 – materiał unosi się w wodzie; tab 1),
- odkształcalność,
- zachowanie w płomieniu,
- zapach zgaszonego tworzywa,
- temperaturę krytyczną, przy której materiał topił się.

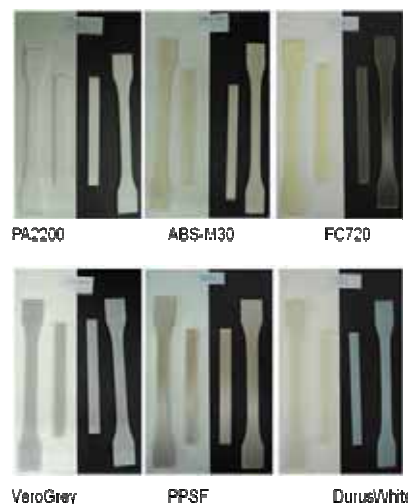


Rys. 2. Przekładnia planetarna wykonana z materiału VeroGray, z zastosowaniem technologii PolyJet

Fig. 2. Planetary gear made from VeroGray material using PolyJet technology

Następnie wykonano badania wytrzymałościowe na podstawie normatywnych próbek (rys. 3), w wyniku których otrzymano liczne parametry badanych materiałów:

- wytrzymałość na rozciąganie,
- moduł Young'a – efekt zginania dwupodporowego,
- twardość metodą wciskania kulki,
- odporność na udary (badanie udarności za pomocą młota Charpy'ego).



Rys. 3. Przykład wybranych normatywnych próbek przed badaniami wytrzymałościowymi rozciągania i zginania

Fig. 3. Examples of selected normative samples before stretching and bending strength tests

Wyniki testów analizy zgrubnej oraz badań normatywnych specjalnie przygotowanych próbek zestawiono w tab. 1 i przedstawiono na rys. 5–8. Z badań wynika, że spośród badanych technologii najlepszymi parametrami wytrzymałościowymi oraz odpornością na wysokie temperatury charakteryzują się materiały wykorzystywane

w technologii FDM. Na drugim miejscu znajduje się technologia SLS. Jeżeli chodzi o jakość powierzchni zewnętrznych oraz dopasowanie elementów współpracujących ze sobą, zdecydowanie na pierwszym miejscu jest technologia PolyJet, jednakże ze względu na niskie temperatury krytyczne stosowanych w niej materiałów należy rozważać jej przydatność w produkcji elementów do robotów mobilnych. PolyJet jest natomiast jedyną technologią wśród badanych pozwalającą na budowanie modeli przezroczystych. Pod kątem jakości powierzchni modele wytworzone z zastosowaniem technologii FDM są na trzecim miejscu. Zaobserwowano, że modele powstałe z zastosowaniem technologii FDM można poddawać obróbce znacząco poprawiającej jakość powierzchni. Modele można poddawać piaskowaniu/śrutowaniu, a nawet galwanizowaniu. W wyniku dodatkowej obróbki, wytworzonych technologią FDM modeli, uzyskano jakość ich powierzchni porównywalną z jakością modeli wytworzonych na wtryskarkach.

Tab. 1. Zestawienie wyników analizy zgrubnej materiałów stosowanych w technologiach FDM, PolyJet i SLS

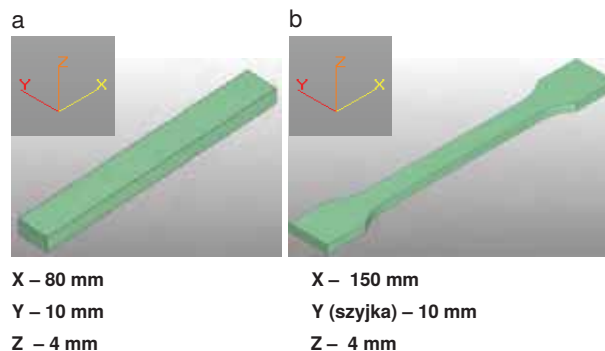
Tab. 1. Summary results of the rough analysis of materials used in FDM, PolyJet and SLS technologies

Zestawienie podstawowych właściwości fizycznych badanych materiałów (analiza ogólna)					
Technologia	PA 2200	ABS-M30	FC 720	Verogrey	PPSF
Barwa	Biały	Perłowa	Świecista	Jasnoczarna	Świecista
Przezroczystość	Strzał	Strzał	Strzał	Strzał	Strzał
Powierzchnia - podłoże	Świecista	Odkładki rami	Odkładki	Odkładki	Odkładki
Powierzchnia - poprzeczna	Świecista	Odkładki rami	Odkładki	Odkładki rami	Lekkie rami
Polak	Materiał	Lekkie rami	Lekkie rami	Strzał	Strzał
Strzał w dół	Strzał	Strzał	Strzał	Strzał	Strzał
Temperatura krytyczna	Nieznana	Nieznana	Nieznana	Nieznana	Nieznana
Odkładki rami	Świecista, sztywność	Świecista, sztywność	Świecista, sztywność	Świecista, sztywność	Świecista, sztywność
Gęstość	>1	>1	>1	>1	>1
Temperatura krytyczna	160°C	160°C	160°C	160°C	160°C
Zachowanie w płomieniu	Biały płomień, kopcący	Biały płomień, kopcący	Biały płomień, kopcący	Biały z niebieską podłogą, kopcący	Biały płomień, kopcący
Zachowanie po wyjęciu z płomienia	Pal się nadal	Pal się nadal	Pal się nadal	Pal się nadal	Głęboko roztopiony
Zapach spalinowego tworzywa	Parafinowy	Parafinowy	Odkładki rami	Odkładki rami	Parafinowy

Technologia	PA 2200	ABS-M30	FC 720	Verogrey	PPSF
Barwa	Jasnoczarna	Jasnoczarna	Biała	Czarna	Jasnoczarna
Przezroczystość	Strzał	Strzał	Strzał	Strzał	Strzał
Powierzchnia - podłoże	Świecista	Świecista	Odkładki rami	Odkładki rami	Lekkie
Powierzchnia - poprzeczna	Świecista	Lekkie rami	Odkładki rami	Odkładki rami	Lekkie
Polak	Lekkie rami	Strzał	Strzał	Strzał	Lekkie rami
Strzał w dół	Strzał	Strzał	Strzał	Strzał	Strzał
Temperatura krytyczna	Nieznana	Nieznana	Nieznana	Nieznana	Nieznana
Odkładki rami	Odkładki rami	Świecista, sztywność	Świecista, sztywność	Świecista, sztywność	Świecista, sztywność
Gęstość	>1	>1	>1	>1	>1
Temperatura krytyczna	160°C	160°C	160°C	160°C	160°C
Zachowanie w płomieniu	Biały płomień, kopcący	Biały płomień, kopcący	Biały płomień, kopcący	Biały płomień, kopcący	Biały płomień, kopcący
Zachowanie po wyjęciu z płomienia	Pal się nadal	Pal się nadal	Pal się nadal	Pal się nadal	Pal się nadal
Zapach spalinowego tworzywa	Parafinowy	Parafinowy	Parafinowy	Parafinowy	Parafinowy

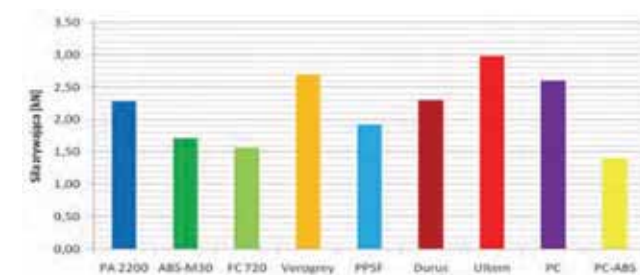
Testy wytrzymałościowe wykonano z wykorzystaniem normatywnych próbek. Na potrzeby testów na rozciąganie oraz zginanie przygotowano dwa różne typy próbek (rys. 4). Próbki wykonane z żywicy FC 930 (technologia PolyJet) nie zostały uwzględnione w testach na rozciąganie i zginanie ze względu na swoją bardzo dużą elastyczność. Próbkę z FC 930 poddawana rozciąganiu nie zrywała się, natomiast próba wykonania zginania z definicji za-

kończyłaby się niepowodzeniem. Wszystkie próby były wykonywane pięciokrotnie.



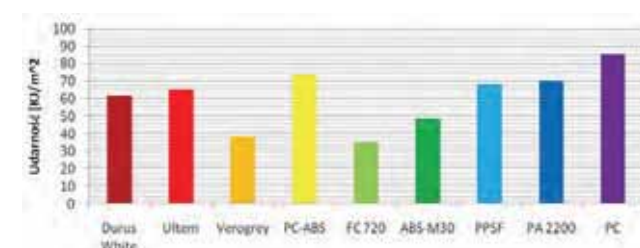
Rys. 4. Normatywne próbki przygotowane na potrzeby testów: a – udarności, b – rozciągania, zginania i twardości

Fig. 4. Normative samples prepared for testing: a – impact, b – stretching, bending and hardness



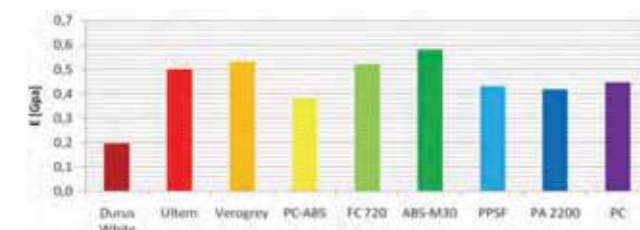
Rys. 5. Zestawienie wyników próby na rozciąganie

Fig. 5. Summary of stretching test results



Rys. 6. Zestawienie wyników testu odporności na uder

Fig. 6. Summary of test results for impact resistance



Rys. 7. Zestawienie wyników testu na wyznaczenie modułu Young'a na podstawie zginania dwupodporowego

Fig. 7. Summary of test results of determination the Young's modulus from two-supporting bending

Na podstawie przeprowadzonych badań wykonano zestawienie wyników zawierających trzy pierwsze materiały, które ze względu na parametry wypadły najlepiej w danym teście:

a) na rozciąganie:

1. ULTEM (technologia FDM),
2. Verogrey (technologia PolyJet/PolyJet Matrix),
3. PC (technologia FDM).

b) odporności na uder:

1. PC (technologia FDM),
2. PC – ABS (technologia FDM),
3. PA 2200 (technologia SLS).

c) na moduł Younga na podstawie zginania dwupodporowego (materiały w kolejności od najwyższego modułu Young'a):

1. ABS – M30 (technologia FDM),
2. Verogrey (technologia PolyJet/PolyJet Matrix),
3. FC 720 (technologia PolyJet/PolyJet Matrix).

d) wyznaczania twardości metodą wciskania kulki:

1. FC730 (technologia PolyJet/PolyJet Matrix),
2. Verogrey (technologia PolyJet/PolyJet Matrix),
3. ABS-M30 (technologia FDM).

Nr próby	Materiał	Twardość [N/mm ²]	Czas [s]	Wartość uśredniona [N/mm ²]
1	ULTEM 9085	96,5	30	96,4
2	ULTEM 9085	96,5	30	
3	ULTEM 9085	96,3	30	
1	PC	66	30	66,2
2	PC	67,3	30	
3	PC	64,3	30	
1	ABS-M30	111,3	30	101,1
2	ABS-M30	99,3	30	
3	ABS-M30	92,5	30	
1	PPSP	67,3	30	68,2
2	PPSP	66	30	
3	PPSP	71,3	30	
1	PC-ABS	60,6	30	53,2
2	PC-ABS	51,1	30	
3	PC-ABS	48	30	
1	Verogrey	123,3	30	139,3
2	Verogrey	156	30	
3	Verogrey	144,6	30	
1	Dura White	76,6	30	67,3
2	Dura White	59,3	30	
3	Dura White	75	30	
1	FC720	147,3	30	147,1
2	FC720	148,6	30	
3	FC720	145,3	30	
1	PA2200	83,3	30	89,5
2	PA2200	87,3	30	
3	PA2200	88	30	

Rys. 8. Wyniki wyznaczania twardości metodą wciskania kulki

Fig. 8. Summary of the results of determination the hardness using method of pressing ball

Z przeprowadzonych testów wynika, że technologie SLS oraz FDM pod względem wytrzymałości stosowanych w nich materiałów nadają się do produkcji elementów do robotów mobilnych. Technologia PolyJet, pomimo bardzo dobrej jakości powierzchni zewnętrznych w „surowych” modelach, nie nadaje się do produkcji użytkowych elementów konstrukcji robotów ze względu na bardzo niskie temperatury krytyczne stosowanych w niej materiałów, co przekłada się na znaczące deformacje elementów pod wpływem np. oddziaływania promieni słonecznych.

Dodatkowe studium właściwości technologii przyrostowego wytwarzania wykazało, że pod kątem małoseryjnej produkcji części zdecydowany prym przed technologią SLS, wiedzie technologia FDM. Wynika to z następujących zalet technologii FDM, zarejestrowanych po szczegółowej analizie obu technologii:

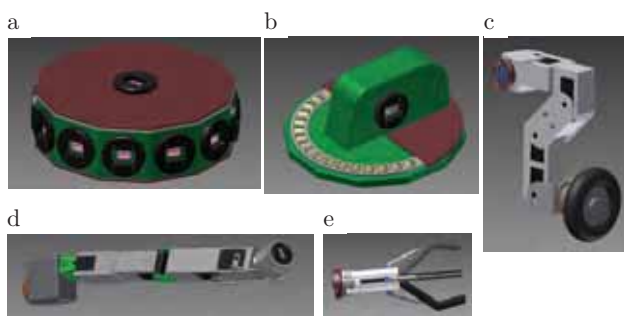
- w technologii FDM, w przeciwieństwie do SLS można produkować powtarzalne modele, pomimo że modele są wytwarzane w różnych miejscach komory roboczej w maszynie,
- w technologii FDM, w przeciwieństwie do SLS nie ma wymogu przeprowadzania procesu długotrwałego stygnięcia modeli,

- w technologii FDM, w przeciwieństwie do SLS struktury podporowe mogą być usuwane również przez wypłukanie,
- w technologii FDM, w przeciwieństwie do SLS jakość przetopu modelu nie zależy od usytuowania w komorze roboczej,
- technologia FDM w przeciwieństwie do SLS jest technologią bardziej przyjazną w obsłudze i nie wymaga dodatkowej odzieży ochronnej, np. masek pyłowych.

2. Planowanie procesu wytworzenia części z wykorzystaniem technologii FDM do użytecznego prototypu robota Cameleon

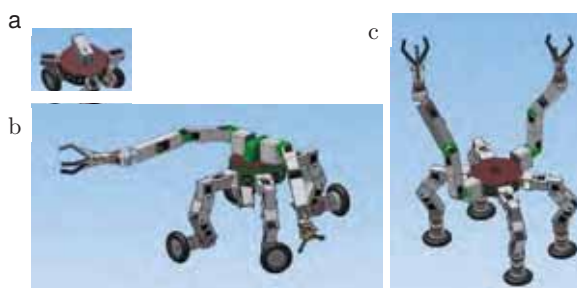
Otrzymane wyniki badań materiałowych oraz analiz właściwości technologii zastosowano w praktyce do opracowania konstrukcji mechanicznej robota o zmiennej konfiguracji Cameleon, który ma składać się z części wytworzonych z zastosowaniem technologii FDM.

Koncepcję robota opisano szczegółowo w pracy [1]. Robot składa się z modułów, do których należy korpus, czyli tzw. moduł „rodzica” oraz podłączane do niego tzw. moduły „dzieci”, którymi są elementy wykonawcze takie jak m.in. wieża, manipulator, pedipulator, moduł hybrydowy koło-stopą i chwytak oraz różnego typu czujniki. Modele CAD wybranych modułów robota zilustrowano na rys. 9.



Rys. 9. Modele CAD wybranych modułów robota: a – korpus, b – wieża, c – pedipulator z modułem hybrydowym koło-stopą, d – manipulator, e – chwytak

Fig. 9. CAD models of selected modules of the robot: a – body, b – tower, c – pedipulator with a hybrid module wheel-foot, d – manipulator, e – gripper



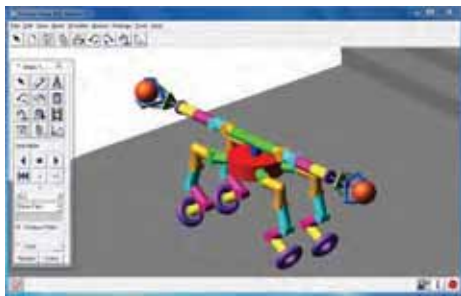
Rys. 10. Przykładowe konfiguracje robota Cameleon: a – robot trzykołowy z modułem wizyjnym, b – robot z czterema nogami zakończonymi kołami, wieżą i dwoma manipulatorami, c – robot czteroński z dwoma manipulatorami

Fig. 10. Examples of Cameleon robot configurations: a – three-wheeled robot with vision module, b – robot with four legs ended with wheels, tower and two manipulators, c – four-legged robot with two manipulators

W wyniku połączenia wybranych modułów można uzyskać różne konfiguracje robota. Przykładowe konfiguracje pokazano na rys. 10. Nie wyczerpują one oczywiście możliwości robota, które mogą zależeć od pomysłowości i potrzeb użytkownika.

W celu dokonania analizy możliwości wytworzenia części robota z zastosowaniem metod przyrostowych wykonano badania symulacyjne, które składały się z dwóch etapów.

W pierwszym etapie określono maksymalne obciążenia poszczególnych członów robota na podstawie symulacji ruchu robota zrealizowanych w programie MD Adams. Do badań przyjęto konfigurację robota pokazaną na rys. 10b. Opracowany model symulacyjny robota w programie MD Adams widoczny jest na rys. 11.

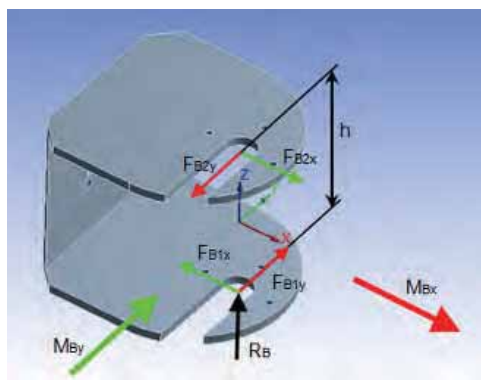


Rys. 11. Model symulacyjny robota Cameleon w programie MD Adams

Fig. 11. Simulation model of Cameleon robot in MD Adams software

W symulacjach zrezygnowano z wiernego odwzorowania kształtu elementów konstrukcji robota, skupiając się na zachowaniu jego struktury kinematycznej oraz wymiarów i parametrów masowych poszczególnych członów.

Uzyskane wyniki, zamieszczone w pracy [2], stanowiły warunki brzegowe do drugiego etapu badań mających na celu oszacowanie możliwości zastosowania technologii FDM, z punktu widzenia wytrzymałości materiału, do wytworzenia części robota Cameleon.



$$\vec{F}_{B1} = -\vec{F}_{B2} = [-225,01 \quad 5,1314 \quad 0] \text{ (N)}$$

$$\vec{R}_B / 2 = [-1,0582 \quad 0,43561 \quad 37,301] \text{ (N)}$$

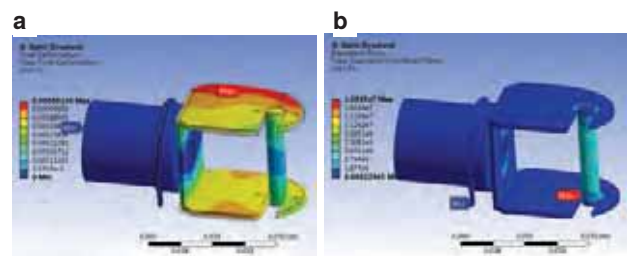
Rys. 12. Warunki brzegowe do analiz wytrzymałościowych MES dla przykładowego elementu konstrukcji robota

Fig. 12. The boundary conditions for MES strength analysis on an example of element of robot construction

Drugi etap badań polegał na realizacji analiz wytrzymałościowych MES części robota z zastosowaniem programu Ansys. W badaniach tych przyjęto charakterystyki materiałowe dla wybranych materiałów stosowanych w metodach przyrostowego kształtowania wyrobów uzyskane w toku badań. Części robota podzielono na dwie kategorie. Do pierwszej kategorii zaliczono te części, które z założenia są obciążone w niewielkim stopniu i w związku z tym będą mogły być wytworzone z materiału ABS-M30, który można zastosować np. na większość elementów korpusu. Do drugiej kategorii zaliczono części, które z założenia są mocno obciążone. Są to w szczególności części należące do manipulatorów i pedipulatorów. Szczególną uwagę poświęcono tym częściom, które znajdują się w miejscach połączeń modułów z korpusem. Części te są przede wszystkim obciążone dużymi momentami. Przykład takiej części wraz z przyjętymi do badań warunkami brzegowymi zilustrowano na rys. 12. Część ta z jednej strony jest podłączona do korpusu, a z drugiej strony łączy się z inną częścią należącą do pedipulatora. Z badań symulacyjnych w programie MD Adams wyznaczono działające na tę część składowe sił i momentów sił reakcji $\vec{R}_B$ i $\vec{M}_B$, przy czym działający moment sił zastąpiono odpowiednimi parami sił $\vec{F}_{B1}$ i $\vec{F}_{B2}$.

Przeprowadzone analizy MES pozwoliły na podjęcie ostatecznej decyzji co do możliwości wytworzenia części robota z materiałów stosowanych w technologii FDM. Wybrane wyniki analizy dla przykładowej części robota pokazano na rys. 13. Na potrzeby symulacji wprowadzono charakterystyki materiałowe otrzymane w wyniku badań dla próbek z materiału ULTEM 9085.

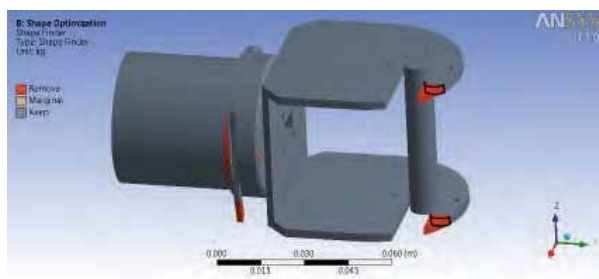
Na rys. 13a pokazane są uzyskane w wyniku symulacji deformacje, a na rys. 13b widoczny jest rozkład naprężeń dla tej części. Maksymalna deformacja wynosi ok. 0,5 mm, a maksymalna wartość naprężeń ok. 17 MPa. W związku z tym współczynnik bezpieczeństwa dla tej części dla analizowanego ruchu robota i zadanego materiału ULTEM 9085 wynosi 3,7.



Rys. 13. Wyniki analizy wytrzymałościowej przykładowej części robota

Fig. 13. The results of strength analysis for the example element of the robot

Na podstawie przeprowadzonych analiz wytrzymałościowych okazało się, że najbardziej obciążone elementy konstrukcji nie zostaną zniszczone podczas normalnej pracy robota jeżeli jako materiał na wszystkie części zostanie użyty ULTEM9085.



Rys. 14. Analiza topologiczna kształtu przykładowej części robota

Fig. 14. Topological analysis of the shape of the example element of the robot

Wykonano też wstępną analizę topologiczną kształtu konstrukcji i wyznaczono miejsca, w których można odjąć materiał. Wynik takiej analizy dla przykładowej części robota zilustrowano na rys. 14, zaznaczając miejsca, w których można odjąć materiał.

Do produkcji części robota Cameleon wykorzystywane zostało zaawansowane centrum wytwórcze FORTUS 400mc wyposażone w ww. materiały. FORTUS 400mc daje możliwość wytwarzania części z różną rozdzielczością. Rozdzielczość części reguluje się poprzez dobór tak zwanej końcówki drukującej (tab. 2) – przetłaczającej podgrzany materiał.

Tab. 2. Zależności między materiałami, końcówkami drukującymi i wysokościami pojedynczych warstw

Tab. 2. The relationships between materials, printing tips and heights of single layers

Materiał	Typy końcówek kompatybilne z danym materiałem modelowym	Typy końcówek kompatybilne z danym materiałem podporowym
ABS-M30	T10, T12, T16, T20	T12
PC (Poliwęglan)	T12, T16, T20	T12
ULTEM9085	T16,	T12
Typ końcówki	Wysokość pojedynczej warstwy	
T10	0.127 mm	
T12	0.178 mm	
T16	0.254 mm	
T20	0.330 mm	

Typ końcówki drukującej przekłada się bezpośrednio na grubość warstwy nakładanego materiału (przyrost | w osi Z) oraz jej dokładność wymiarową w osiach X i Y oraz ściśle zależy od zastosowanego materiału. Ze względu na właściwości fizyczne nie każdy materiał dostępny w technologii FDM może współpracować z dowolną końcówką (tab. 2).

FORTUS 400mc umożliwia również wytwarzanie części z zastosowaniem różnego typu wypełnienia (rys. 15).

Operator maszyny ma do wyboru trzy standardowe typy wypełnień części: lite, żeberkowe oraz kratowe. Oprogramowanie służące do przygotowywania procesu wytwarzania daje również możliwość programowania własnego typu wypełnienia części, w zależności od preferencji użytkownika (rys. 16). Dodatkowo operator może sterować parametrami danego wypełnienia np. gęstością układania wiązek w wypełnieniu kratowym, rozstawem żeber czy rastrem kratownicy. Można również sterować parametrami związanymi z wytwarzaniem powierzchni zewnętrznych, np. grubością warstwy stanowiącej powierzchnię zewnętrzną. Dzięki tym opcjom możliwe jest sterowanie dokładnością, wytrzymałością i masą części w zależności od jej przeznaczenia oraz czasem produkcji tej części.

Niektóre z wymienionych części, np. korpus główny, zostaną poddane dodatkowym obróbkom ulepszcającym – piaskowaniu oraz kąpieli w chmurze rozpuszczalnika na bazie acetonu w celu wygładzenia powierzchni zewnętrznych.



Rys. 15. Standardowe typy wypełnień części materiałem modelowym stosowane przez centrum wytwórcze FORTUS 400mc: a – lite, b – żeberkowe, c – kratowe

Fig. 15. Standard types of fillings of elements with material used by FORTUS 400mc manufacturing centre: a – solid, b – ribbed, c – trussed



Rys. 16. Przykładowe, niestandardowe typy wypełnień części programowane w zależności od pola działania sił zewnętrznych i od wymagań co do całkowitej masy

Fig. 16. Examples of non-standard types of fillings of elements programmed depending on the area of acting of external forces and according to requirements on total mass

Przed przystąpieniem do programowania procesu wytwarzania części do robota Cameleon, przystąpiono do pogrupowania ich na cztery typy: lekkie niewymagające dużej dokładności (np. korpus robota), lekkie dokładne (np. złącza modułów), nośne niewymagające dużej dokładności (np. golenie pośrednie, do których nie są podłączone napędy), nośne dokładne (części manipulatorów, pedipulatorów i modułów kołowych, do których przymocowane są napędy lub wały). Stosowany podział pozwoli na pierwszą optymalizację procesu wytwarzania pod kątem zmniejszenia całkowitego zużycia materiałów i czasu pracy maszyny (czasu wytwarzania części). W zależności od grupy, do której zakwalifikowano daną część, przyjęto ustawienia procesu wytwarzania jak w tab. 3.

Tab. 3. Dobór parametrów wytwarzania w zależności od typu części stosowanych w robocie

Tab. 3. Selection of the manufacturing parameters depending on types of elements used on the robot

Typ części stosowanej w robocie	Stosowana końcówka drukująca: materiał podporowy/materiał modelowy	Typ wypełnienia części
Lekkie, niewymagające dużej dokładności	T16	Żeberkowe
Lekkie dokładne	T10	Żeberkowe
Nośne niewymagające dużej dokładności	T16	Kratowe
Nośne dokładne	T10	Lite

Robot zostanie wyprodukowany w dużej mierze z materiału ABS – M30, natomiast części mocno obciążone zostaną wyprodukowane z materiału ULTEM9085. ABS – M30 jest to wzmocniona (o ok. 70 %) wersja standardowego materiału ABS. Wszystkie mechaniczne części robota, z wyjątkiem połączeń śrubowych zostaną wytworzone w technologii przyrostowego wytwarzania FDM.

3. Podsumowanie

Dynamiczny rozwój technologii przyrostowych pozwalających na wytwarzanie części maszyn z materiałów niemetalowych i metalowych sprawił, że technologie te stanowią coraz poważniejszą alternatywę dla tradycyjnych metod wytwarzania. Badania podstawowe technologii przyrostowych materiałów niemetalowych prowadzone w ramach prac statutowych w PIAP wykazały, że najlepszą technologią niemetalową nadającą się obecnie do produkcji części, nie tylko do prototypów, jest technologia FDM (ang. Fused Deposition Modeling). Wytworzone części mogą być użytkowane zaraz po zakończonym procesie. Nie wymagają dodatkowego wyżarzania, relaksacji, infiltracji lub innych zabiegów mających na celu „kompensację” właściwości procesu wytwarzania. W przypadku części zawierających nawisy, elementy kratownicy, otwory lub inne elementy wymagające podparcia ścianki, maszyna w jednym procesie generuje usuwalne struktury podporowe. Powstałe podpory, po procesie wytwarzania, bez większych problemów usuwa się najczęściej przez całkowite wypłukiwanie z zastosowaniem specjalnej myjki cyrkulacyjnej lub poprzez odrywanie – w zależności od zastosowanych materiałów. Części wytwarzane z wykorzystaniem technologii FDM charakteryzują się dużą wytrzymałością mechaniczną, odpornością na wysokie temperatury (obecnie rzędu 130 °C), niezmiennością kształtów w czasie, odpornością na działanie wody oraz dużymi możliwościami obróbki – obróbka skrawaniem, galwanizacja, piaskowanie, lakierowanie itp. Dodatkowo specyfika technologii FDM pozwala na ingerencję w wytwarzaną część w trakcie procesu jej wytwarzania. Możliwe jest zamocowanie na wybranej warstwie cienkiej metalowej siatki lub wtapianie metalowych części w warstwy celem dodatkowego umocnienia

konstrukcji. Możliwe jest również wtapianie nakrętek, tulei lub innych elementów mocujących, które np. zawierają gwint, w celu przygotowania odpowiedniego połączenia.

Prace badawcze potwierdziły, że wybrane materiały najlepiej spełniają wymagania stawiane przez konstrukcje docelowe, czyli w przypadku instytutu PIAP – roboty mobilne.

Rozwój technologii FDM umożliwia wykonywanie dokładnych części, które pod względem wyglądu, jakości wykonania oraz dokładności wymiarowej nadawałyby się od razu do użytku jako części końcowe. Mimo to nie jest jeszcze możliwe wykonywanie nieniszczących analiz mających na celu estymację ich wytrzymałości w założonych warunkach pracy. Tak więc nie można dzisiaj wykonywać jednoznacznej optymalizacji procesu wytwarzania części z zastosowaniem technologii FDM lub innych technologii przyrostowego wytwarzania, bo nie można w jednoznaczny sposób stwierdzić, jak zmiana gabarytu części, rodzaju wypełnienia wewnętrznego (lite, kratownica, „plaster miodu” itp.), zastosowania danego typu końcówki drukującej lub jakiegokolwiek zmiany innego parametru wytwarzania wpłyną na wytrzymałość części. Estymacja wytrzymałości części wskazanych przez program MD Adams, jako najbardziej obciążone w konstrukcji, wykonana w środowisku Ansys jest jedynie próbą oszacowania naprężeń i odkształceń.

Na dzień dzisiejszy nie można przeprowadzić dokładnych nieniszczących badań lub symulacji, które mogłyby dostarczyć jednoznacznych wyników wytrzymałościowych, ze względu na brak odpowiedniej bazy właściwości materiałowych i odpowiednich modeli numerycznych materiałów. To sprawia, że na dzień dzisiejszy również planowanie, czy idąc dalej, optymalizacja procesu wytwarzania części z wykorzystaniem technologii FDM opiera się w dużej mierze na intuicji obsługującego maszyny.

Dlatego aktualnie w PIAP prowadzone są badania (w ramach pracy doktorskiej mgr. inż. Macieja Cadera) mające na celu przeprowadzenie badań materiałowych oraz opracowanie modelu estymacji wytrzymałości części, w oparciu o analizy symulacyjne MES, wytwarzanych w wybranych technologiach przyrostowego wytwarzania. Spodziewanym efektem pracy będzie możliwość optymalizacji kształtu części lub parametrów procesu wytwarzania, pod kątem uzyskania założonej wytrzymałości.

Bibliografia

1. Trojnecki M., Cader M., *Projekt konstrukcji robota mobilnego o zmiennej konfiguracji*, Prace naukowe Politechniki Warszawskiej, Seria: Elektronika, Zeszyt 182, Tom 2, Warszawa 2012, 549–557.
2. Błaszczykiewicz K., *Analiza możliwości zastosowania technologii przyrostowego kształtowania wyrobów do wykonania prototypu robota mobilnego Cameleon*, praca dyplomowa magisterska zrealizowana przy współpracy z Przemysłowym Instytutem Automatyki i Pomiarów PIAP (promotor: dr inż. M. Trojnecki, konsultant z ramienia PIAP: mgr inż. Maciej Cader), Politechnika Warszawska, Warszawa 2012.
3. Olszewski J., *Analysis of material properties in respect of material interior styles used in Fused Deposition*

Modeling, "Pomiary Automatyka Robotyka". 9/2011, 80–85.

4. Bijak-Żochowski M., Jaworski A., Krzesiński G., Zagrajek T., *Wytrzymałość konstrukcji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
5. <http://www.stratasys.com/>
6. <http://objet.com/knowledge-center>
7. <http://www.eos.info/en/home.html>

Analysis of the applicability of additive technology to fabrication of mobile robots construction

Abstract: The article presents the research results of the mechanical properties of non-metallic materials used in additive manufacturing for the production of structural components of mobile robots. Article also concerns one of the technology, i.e., FDM for the production of reconfigurable robots construction elements. This paper also describes the methodology for the preparation of selected parts of the robot to manufacture them using FDM technology.

Keywords: additive manufacturing, production of robots elements, thermoplastic materials, extrusion.

mgr inż. Maciej Cader

Absolwent Wydziału Mechanicznego Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Obecnie pracownik Przemysłowego Instytutu Automatyki i Pomiarów PIAP. Zajmuje się konstruowaniem, zaawansowanymi symulacjami komputerowymi i technologiami przyrostowymi. Współautor kilkunastu publikacji o tematyce związanej z robotyką mobilną.

e-mail: mcader@piap.pl



dr inż. Maciej Trojnacki

Ukończył studia na Wydziale Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej, gdzie obronił również pracę doktorską. Obecnie pracuje na stanowisku adiunkta w Przemysłowym Instytucie Automatyki i Pomiarów PIAP oraz na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej. Zajmuje się projektowaniem konstrukcji mechanicznych, modelowaniem i symulacją układów mechanicznych oraz sterowaniem ruchem robotów mobilnych. Jest autorem i współautorem kilkadziesiątu publikacji o tematyce związanej z mechaniką, teorią maszyn i mechanizmów oraz robotyką, o zasięgu krajowym i międzynarodowym.

e-mail: mtrojnacki@piap.pl

