

ZASTOSOWANIE METODY DRUKOWANIA 3 D DO WYKONANIA MODELI UŻYTKOWYCH NA PRZYKŁADZIE CZEREPY HEŁMU

Streszczenie: W artykule przedstawiono możliwości aplikacyjne drukarki 3D ZPrinter 650 do wykonania modeli czerepów hełmów. Jako jej główne zastosowanie widzi się poza bezpośrednim wykonywaniem modeli wykorzystanie drukarki do wykonywania narzędzi do przetwórstwa chemoutwardzalnych tworzyw sztucznych, co pozwalałoby na wykonywanie detali o bardzo zbliżonych cechach i właściwościach do wyrobu docelowego.

AN APPLICATION OF 3D PRINTING METHOD FOR CREATION OF USABLE MODELS SUCH AS HELMET SHELLS

Abstract: Application abilities of 3D printer type - ZD Printer 650 for creation of models of helmet shells, are presented in this paper. Apart from basic applications of the printer ie. direct creation of the models, the printer can also be suitable for creation of tools designed to processing of chemically curable plastics. This ability would make possible to create products possessing features and properties which are very close to the features and properties characteristic for final details.

1. Wstęp

Wykonanie użytkowego modelu hełmu kulo- i odłamkooodpornego było jednym z zadań do realizacji w ramach projektu rozwojowego POIG.01.03.01-10-005/08 pt.: „Nowoczesne balistyczne ochrony osobiste oraz zabezpieczenia środków transportu i obiektów stałych na bazie kompozytów włóknistych”. Docelowo hełm o właściwościach kulo- i odłmkoodpornych będzie posiadał czerep wykonany z hybrydowego kompozytu włóknistego aramidowo – polietylenowego prasowanego na gorąco w stalowych formach.

Do wykonania modelowych czerepów hełmów wykorzystano metodę szybkiego prototypowania (rapid prototyping) realizowaną przy użyciu drukarki 3D ZPrinter 650. Drukarkę tę wykorzystano w dwóch wariantach. W pierwszym było to jej typowe zastosowanie do bezpośredniego odwzorowania czerepu hełmu z zapisu cyfrowego. O ile model wiernie odwzorowywał kształt czerepu z zachowaniem zakładanej grubości ścianki, o tyle masa czerepu była wyższa od zakładanej a właściwości mechaniczne materiału w bardzo ograniczony sposób pozwalały na przeprowadzenie badań użytkowych. Materiał czerepu wykazywał dużą kruchość. Modele hełmu w tym wykonaniu przedstawiono na fotografii na rys. 1.



Rys. 1. Modele hełmu z czerepem wykonanym metodą drukowania.

W drugim wariantcie tę metodę wykorzystano do wykonania narzędzi, które pozwoliły na wykonanie modeli użytkowych czerepów hełmu z laminatu poliestrowego wzmocnianego włóknem szklanym.

2. Przegląd przyrostowych metod szybkiego prototypowania

Jedną z metod szybkiego prototypowania (RP, Rapid Prototyping) opierających się na technice kształtowania przyrostowego jest druk trójwymiarowy (3DP - Three Dimensional Printing). Można ją określić wśród innych znanych metod RP, jako metodę najszybszą i najtańszą do wytwarzania trójwymiarowych modeli. Polega ona na warstwowym spajaniu proszku poprzez punktowy natrysk spoiwa, nanoszonego na dany przekrój elementu przez ruchomą głowicę (tak samo jak w zwykłych drukarkach atramentowych). Następnie wytworzona bryłę po wysuszeniu i oczyszczeniu z luźnego proszku należy dodatkowo utwardzić w celu uzyskania odpowiednich własności mechanicznych. Wydrukowane elementy mogą być utwardzane różnymi substancjami. Firma Z Corporation[®] proponuje najtańszy, najszybszy i najbezpieczniejszy w zastosowaniu utwardzacz będący wodnym roztworem soli Epsom Salt ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$). Jednakże przedmioty po takim sposobie utwardzania wykazują najmniejszą wytrzymałość mechaniczną i są dość kruche. Lepsze parametry wytrzymałościowe elementów drukowanych można otrzymać stosując utwardzacze cyjanoakrylowe, np. Z-Bond[™]101 lub Z-Bond 90, które wnikają w utwardzane przedmioty na głębokość ok. 3mm. Są one droższe i należy zachować większą ostrożność (ze względu na ich toksyczność) podczas wykonywania czynności w procesie utwardzania. Najbardziej wytrzymałe modele uzyskuje się stosując do utwardzenia specjalną żywicę Z-Max[™], która wnika w element, nawet do 10mm, wiążąc mocno całą strukturę wydruku. Utwardzony model z uwagi na porowatą konstrukcję bardzo dobrze się klei, szlifuje, można powlekać go dodatkowymi warstwami takimi jak szpachla natryskowa, metalizacja, lakierowanie. Metodą 3DP możliwe jest uzyskiwanie wydruków zarówno monochromatycznych jak i kolorowych. Metoda ta daje możliwość nanoszenia napisów i faktur na powierzchniach detali.

Do głównych zalet metody 3DP można zaliczyć szybkość wytworzenia prototypu oraz relatywnie niskie koszty (ok. 0,6 zł za cm^3). Co więcej, możliwe jest tworzenie skomplikowanych modeli (różnego rodzaju podcięcia, żebra, elementy nie technologiczne w obróbce skrawaniem). Z uwagi na grubość ziarna proszku (0,1 mm) i wytrzymałość bryły przed utwardzeniem ważne jest aby minimalna grubość ścianek była nie mniejsza niż 0,5 mm. Można to uznać za wadę metody. Mimo licznych zalet opisywana metoda posiada również kilka innych wad. Prototypy wykonane w tej technice, ze względu na małą odporność mechaniczną, nadają się bardziej do celów wizualizacyjnych, pokazowych niż użytkowych. Ograniczone są również wymiary tworzonych modeli z uwagi na nieduże rozmiary komory roboczej maszyny drukującej. W przypadku tworzenia obiektów o większych gabarytach należy dany model podzielić na kilka elementów, które są drukowane pojedynczo, a następnie, po utwardzeniu klejami na bazie cyjanoakrylu, skleić je ze sobą tworząc cały model. Pomimo tego

można jednak wytwarzać metodą 3DP elementy użytkowe dowodem czego było jej niekonwencjonalne zastosowanie w pracach nad wykonaniem czerepu hełmu. Do tworzenia wydruków 3D wykorzystano tu nowoczesną drukarkę 3D ZPrinter 650 (firmy Z Corporation®).

Inne znane techniki kształtowania przyrostowego to [1]:

1. Stereolitografia (SL, SLA - Stereolithography)
2. Selekttywne spiekanie laserowe (SLS – Selective Laser Sintering)
3. Osadzanie stopionego materiału (FDM - Fused Deposition Modeling) [2]
4. Kształtowanie laserowe (LENS - Laser Engineered Net Shaping)
5. Druk poprzez nakraplanie (IJP - Ink Jet Printing)
6. Laminatowe wytwarzanie elementów (LOM - Laminated Object Manufacturing)

Pierwsza z wymienionych jest metodą bardzo dokładną i polega ona na utwardzaniu kolejnych przekrojów elementu kreślonych przy pomocy wiązki ultrafioletowego światła laserowego na powierzchni płynnego polimeru. W metodzie tej muszą być zastosowane wcześniej zaprojektowane podpory, które są wytwarzane wraz z elementem i usuwane po zakończeniu procesu utwardzania.

Druga wymieniona metoda polega na punktowym spiekaniu proszku, nanoszonego warstwowo w specjalnej komorze, w obszarze danego przekroju. Zarówno w tej jak i w metodzie 3DP nie potrzeba projektować i stosować specjalnych podpór, ponieważ ich rolę spełnia proszek.

W kolejnej metodzie głowica robocza, poruszająca się w trzech wymiarach, rozprawdza punktowo, na poszczególnych warstwach w obrębie przekroju detalu, włókno z materiału termoplastycznego podgrzanego do stanu półpłynnego. Metoda wymaga projektowania i stosowania specjalnych podpór usuwanych po procesie utwardzania.

Metoda kształtowania laserowego polega na punktowym nakładaniu stopionego w ognisku lasera, o dużej mocy, proszku metalu na dany przekrój detalu.

W piątej wymienionej metodzie płynny materiał elementu nanoszony jest warstwowo w postaci kropeł, które są utwardzane poprzez gwałtowne schłodzenie. Jednocześnie w ten sam sposób nakładany jest materiał podpierający wykonywany detal.

Ostatnia wymieniona metoda polega na kolejnym nakładaniu i stapianiu arkuszy materiału, a następnie wycinaniu laserem lub nożem przekroju na danej warstwie.

Każda z opisywanych powyżej metod ma zalety i wady. Wybór i zastosowanie metody będzie zależał od potrzeb potencjalnego użytkownika i możliwości jej najefektywniejszego wykorzystania. Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia w Zielonce posiada urządzenie, które pracuje w oparciu o metodę druku trójwymiarowego. Jest to drukarka ZPrinter 650 (firmy Z Corporation®) i jest najnowocześniejszą maszyną pracującą w tej technologii w kraju.

Najważniejsze dane techniczne opisywanego modelu drukarki przedstawione są w Tabeli 1.

Tabela 1.

Właściwości	Dane
maksymalne wymiary wydruku	254x381x203 mm
szybkość druku	2-4 warstwy/min w trybie kolorowym
grubość warstwy	0,08-0,102 mm
rozdzielczość	600x540 dpi
liczba głowic	5(CMYKClear)
wymiary urządzenia	188x74x145 cm
ciężar	340 kG

W drukarce ZPrinter 650 (firmy Z Corporation®) do wydruków używany jest kompozytowy proszek. Może on mieć średnicę ziarna od 0,08 mm do 0,102. W trakcie drukowania warstwy elementu spajane są lepiszczem dając strukturę porowatą. Do uzyskania pełnej wytrzymałości detalu wymagane jest jego utwardzenie. Utwardzanie można przeprowadzić następującymi sposobami:

- poprzez nakrapianie infiltranta (utwardzacza) na powierzchnię wydrukowanego detalu,
- poprzez zanurzenie detalu w utwardzacz,
- poprzez spryskanie rozpylonym utwardzaczem,
- poprzez naniesienie utwardzacza pędzlem i rozprowadzenie go po powierzchni przedmiotu.

Proces utwardzanie przebiega w ten sposób, że infiltrant wnika w powierzchnię przedmiotu wypełniając pory i usuwając jednocześnie z nich powietrze. Dzięki reakcji chemicznej następuje zestalenie utwardzacza, który dokładnie wypełnia porowatą strukturę połączonego lepiszczem proszku. Powoduje to znaczne polepszenie własności mechanicznych wytworzonego przedmiotu. Firma Z Corporation® podaje następujące uzyskane własności mechaniczne dla proszku zp 150 badane według norm ASTM D-636, D-790:

- wytrzymałość na rozciąganie: 14,2 MPa - utwardzacz Z-Bond 101 i 26,4 MPa – utwardzacz Z-Max,
- wydłużenie względne: 0,23% - utwardzacz Z-Bond 101 i 0,21% – utwardzacz Z-Max,
- moduł sprężystości wzdłużnej: 9,45 MPa - utwardzacz Z-Bond 101 i 12,56 MPa – utwardzacz Z-Max,
- wytrzymałość na zginanie: 31,1 MPa - utwardzacz Z-Bond 101 i 44,1 MPa – utwardzacz Z-Max, 13,1 MPa – wodny roztwór soli.

Wypełnieniem porów w wydrukowanym elemencie ma duże znaczenie po pierwsze znacznie poprawia wytrzymałość detalu, a po drugie można go po wysuszeniu obrabiać mechanicznie np. szlifować. Dzięki temu uzyskuje się bardzo gładkie powierzchnie na wydrukowanym przedmiocie, co może być bardzo ważne z punktu widzenia zastosowań drukowanych detali.

3. Możliwości niekonwencjonalnego wykorzystania drukarki ZPrinter 650

Spośród wymienionych metod przyrostowych modelowania 3D, metoda realizowana na drukarce ZPrinter 650 daje największe możliwości prototypowania wyrobów wykonanych z tworzyw sztucznych. Wydruki mają tę zaletę, że są to łatwe w obróbce powierzchniowej sztywne elementy, które po odpowiednim przygotowaniu mogą stanowić pozytywowe modele do wykonywania narzędzi do przetwórstwa tworzyw sztucznych oraz w ograniczonym zakresie narzędzi do obróbki plastycznej metali. Model detalu pochodzącego z wydruku może, w związku z wieloma ograniczeniami, być przeznaczony do oceny wizualnej. Natomiast narzędzia wykonane na bazie odpowiednio zaprojektowanych i wydrukowanych modeli dają praktycznie nieograniczone możliwości wykonywania modeli użytkowych, posiadających właściwości wyrobu docelowego. Należy jednocześnie zaznaczyć, że dokładność wymiarowa detali zależy wyłącznie od dokładności wykonania wydruku. Z uwagi na łatwą obrabialność powierzchni wydrukowanego elementu, uzyskanie jej odpowiedniej gładkości nie przedstawia problemu. Te cechy drukowanych modeli narzędzi pozwalają na stosowanie większości technik przetwarzania tworzyw sztucznych do wykonania modeli użytkowych. Na bazie drukowanych modeli narzędzi lub na podstawie drukowanych modeli można wykonywać narzędzia do następujących technik przetwórczych:

- formy do laminatów chemoutwardzalnych,
- formy do odlewów polimerów,

- elementy formujące w technikach formowania ciśnieniowego tworzyw termoplastycznych,
- formy wtryskowe prototypów z termoplastów z zastosowaniem metalizacji natryskowej,
- formy do kształtowania tworzyw komórkowych – spienianych i inne.

Połączenie możliwości wykonywania drukowanych modeli narzędzi z bardzo szeroką gamą kompozycji utwardzalnych oraz półfabrykatów z tworzyw termoplastycznych daje praktycznie nieograniczone możliwości wytwarzania modeli i prototypów detali o właściwościach zakładanych przez konstruktora. Tymi materiałami są:

- grupa elastomerów poliuretanowych – precyzyjne odlewy imitujące wtryskowe wypraski z termoplastów, kształtki elastyczne, grubościenne odlewy blokowe itp.,
- elastomery silikonowe – odlewy o cechach kauczuku,
- kompozyty utwardzalne wzmacniane włóknem szklanym i węglowym – laminaty konstrukcyjne,
- tworzywa termoplastyczne –kopolimer akrylonitryl-butadien–styren (ABS), poliwęglan (PC), polichlorek winylu PCV, polietylen (PE), polipropylen (PP) i inne – kształtki przetwarzane technikami ciśnieniowymi (formowanie próżniowe, rozdmuch), i inne.

Wykorzystanie techniki drukowania 3D na drukarce ZPrinter 650 w technologii wykonywania narzędzi do modeli użytkowych i prototypów z tworzyw sztucznych wielokrotnie zwiększa zakres wykorzystania drukarki w stosunku do bezpośredniego drukowania modeli.

W zakresie realizacji zadań w Projekcie drukarkę wykorzystano w dwóch wariantach:

- wykonanie modeli bezpośrednio z wydruku 3D,
- wykonanie modeli poprzez wydrukowanie pozytywowych modeli narzędzi do odwzorowania negatywowej formy do laminatowych kształtek poliestrowo – szklanych.

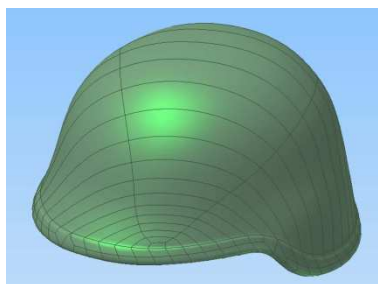
3. Geometria czerepu hełmu

Ustalenie geometrii czerepu hełmu przebiegało na drodze analizy występujących w użytkowaniu hełmów w jednostkach MSWiA oraz w Wojsku Polskim. Kształt czerepu odwzorowano w zapisie cyfrowym za pomocą operacji skanowania 3D.

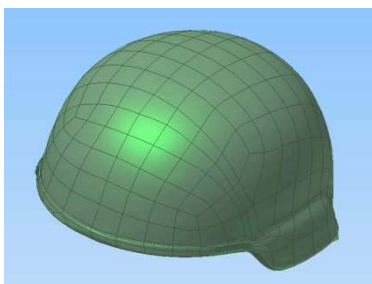
Skanowanie 3D pozwala na szybkie i dokładne przeniesienie do komputera trójwymiarowej geometrii obiektów fizycznych. Wynikiem skanowania 3D jest kompletny, cyfrowy model, który może być później edytowany i przetwarzany przez programy CAD/CAM, programy do prototypowania, wizualizacji czy animacji. Skanowanie 3D pozwala na szybkie zebranie danych nawet skomplikowanych elementów co powoduje skrócenie cyklu produkcyjnego i zwiększenie wydajności wytwarzania.

Dzięki skanowaniu uzyskano informacje o powierzchniach 3D w wysokiej rozdzielczości oraz wysoką dokładność pomiarów. Dane ze skanowania zapisywane zostały jako chmura punktów.

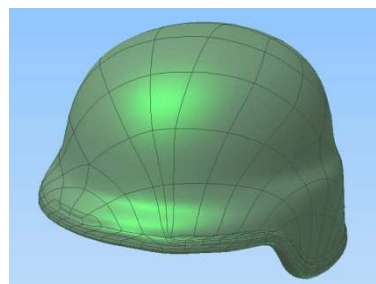
Skanowaniu poddano trzy czerepy hełmów:



Czerep hełmu BK-3 SHOTECK



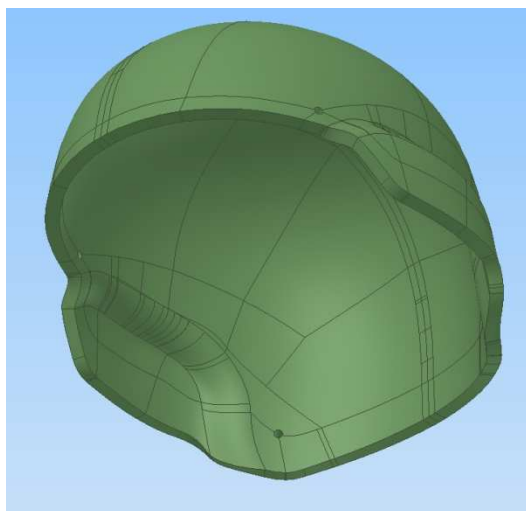
Czerep hełmu TC 3002



Czerep hełmu bojowego wz. 2005

Rys. 2. Skany czerepów hełmów podanych analizie kształtu.

Do obróbki w programie Catia i Inventor, czyli w programach zawierających narzędzia do projektowania bryłowego oraz hybrydowego (modelowanie bryłowe oraz powierzchniowe), przyjęto czerep hełmu TC 3002. Przetworzono chmurę punktów na powierzchnie konstrukcyjne i poddano bryłę modyfikacjom sugerowanym przez potencjalnych użytkowników. Głównym celem pracy było zwiększenie powierzchni ochronnej czerepu w strefie bocznych przetłoczeń na wysokości uszu. Poniżej, na rysunku 2 przedstawiono czerep tego hełmu po obróbce w programach CAD/CAM. W tej postaci posłużył do wykonania modeli metodą drukowania 3D.



Rys.3. Trójwymiarowy model czerepu hełmu kompozytowego przygotowany do drukowania 3D

4. Technologia modelowego czerepu hełmu wykonanego z laminatu poliestrowo – szklanego przy wykorzystaniu drukarki 3D ZPrinter 650

Wykonanie użytkowego modelu czerepu hełmu przebiegało w kilku etapach. Zgodnie z założeniami czerep hełmu modelowego powinien charakteryzować się masą odpowiadającą masie czerepu hełmu docelowego wykonanego z kompozytu balistycznego. Wytrzymałość czerepu hełmu modelowego powinna była zapewniać możliwość przeprowadzenia badań użytkowych. Spełnienie tych założeń zapewniało zastosowanie laminatu poliestrowo – szklanego. W celu utrzymania zakładanej masy czerepu – ok. 1100 g, jego konstrukcja przewidywała jego wykonanie w postaci dwóch kształtek = zewnętrznej i wewnętrznej połączonych warstwą pianki poliuretanowej. Takie rozwiązanie pozwalało jednocześnie na wykonanie czerepu o zakładanej grubości ścianki – 8 mm oraz utrzymanie czerepu o wysokiej gładkości wewnątrz i na zewnątrz.

ETAP I

Na tym etapie wykonano metodą drukowania 3D modele pozytywowe kształtu zewnętrznego i wewnętrznego czerepu. Konstrukcja modeli umożliwiała wykonanie narzędzia – formy kształtu zewnętrznego oraz wykonanie wypraski kształtu wewnętrznego bezpośrednio na modelu. Modele stanowiły bryły zapewniające wykonanie kształtek laminatowych z odpowiednim naddatkiem technologicznym na obrzeżu czerepu. Na rys. 3 przedstawiono modele drukowane kształtu zewnętrznego i wewnętrznego czerepu.



Rys. 4. Model kształtu zewnętrznego (a) i wewnętrznego (b) modelowego czerepu hełmu.

Zewnętrzną powierzchnię modeli poddano obróbce w celu uzyskania wysokiej gładkości powierzchni, co jest niezbędnym warunkiem do oddzielenia warstwy laminatu od powierzchni modelu. Dodatkowo powierzchnie formujące powlekano wieloma warstwami środka rozdzielczego, który po wielokrotnym polerowaniu zapewniał skuteczne oddzielenie kształtek od powierzchni formującej. Ponieważ model ten był wykonany w postaci skorupy o grubości ścianki ok. 10 mm, w celu zwiększenia jego wytrzymałości wewnętrzną powierzchnię modelu wzmocniono grubościennym laminatem poliestrowo – szklanym.

Etap II

Model kształtu wewnętrznego wykorzystano bezpośrednio do wykonania kształtki cienkościennego laminatu, która odwzorowywała wewnętrzną powierzchnię czerepu. Laminat składał się z dwóch zasadniczych warstw – warstwy żelkotu spełniającego rolę ochronną i estetyczną oraz zasadniczego laminatu poliestrowego wzmocnianego włóknem szklanym w postaci maty. Średnia grubość kształtki wynosiła 3,0 mm. Na zdjęciu na rys. 4. przedstawiono tę kształtkę.



Rys. 5. Laminowana wypraska odwzorowująca wewnętrzny kształt czerepu hełmu modelowego.

ETAP III

Do wykonania kształtki zewnętrznej czerepu niezbędna była negatywowa forma. Do tego celu posłużył model z rys. 3(a). Formę stanowił grubościenny laminat poliestrowo – szklany, w którym wykorzystano poliestrową żywicę narzędziową o zmniejszonym efekcie cieplnym podczas utwardzania oraz niskim skurczu przetwórczym. Powierzchnią formującą była war-

stwa poliestrowego żelkotu narzędziowego o zwiększonej twardości. Formę wykonano w postaci dzielonej w płaszczyźnie symetrii czerepu. Formę przedstawiono na fotografii, na rys. 5.



Rys. 6. Forma z laminatu poliestrowo szklanego do wykonania zewnętrznej kształtki czerepu.

ETAP IV

Powierzchnia formująca została powleczone, tak jak w przypadku przygotowania modeli kilkoma warstwami środka rozdzielczego. Na rys. 6 przedstawiono kształtkę zewnętrzną czerepu. Zewnętrzną powierzchnię kształtki, tak jak w przypadku kształtki wewnętrznej, stanowiła warstwa żelkotu. Grubość ścianki laminatu wynosiła średnio 3,0 mm.



Rys. 7. Kształtka zewnętrzna czerepu hełmu.

ETAP V

Obie kształtki połączone poprzez warstwę pianki poliuretanowej, po obcięciu nadmiaru obrzeża tworzyły modelowy czerep o wytrzymałości i masie pozwalających na wykonanie hełmu przeznaczonego do badań użytkowych. Czerep po montażu kształtek przedstawiono na zdjęciach, na rys. 7.



Rys. 8. Modelowy czerep hełmu z opaską krawędziową do badań użytkowych wykonany za pomocą narzędzi przygotowanych na bazie wydruków 3D.

Technologia modeli użytkowych przedstawiona powyżej może być przeniesiona do wykonania innych modelowych detali konstrukcyjnych, od których wymaga się cech wyrobu docelowego.

5. Wnioski

1. Drukarka ZPrinter 650 dzięki wydrukowi 3D z utwardzonego proszku jest szczególnie predestynowana do wykonywania narzędzi pozwalających na formowanie modelowych użytkowych kształtek technicznych z tworzyw sztucznych.

2. Rozszerzenie zastosowania drukarki ZPrinter 650 o wykonywanie modeli narzędzi do przetwórstwa tworzyw sztucznych w zdecydowany sposób rozszerza możliwości jej wykorzystania w bieżącej praktyce inżynierskiej związanej z opracowywaniem modeli i prototypów nowych konstrukcji.
3. Umiejętne wykorzystanie kompozycji utwardzalnych tworzyw sztucznych przetwarzanych za pomocą narzędzi wykonanych na bazie wydruków 3D pozwala na uzyskanie kształtek o właściwościach wyrobu docelowego – od elastycznych, o cechach kauczuku, do bardzo sztywnych i wytrzymałych mechanicznie, o cechach wyprasek z termoplastów przetwarzanych technologią wtrysku.
4. Metoda formowania za pomocą narzędzi wykonanych na bazie wydruków 3D jest stosunkowo szybka, tania i dokładna. Dokładność wykonania detali jest praktycznie ograniczona jedynie dokładnością wydruku.
5. Narzędzia do przetwórstwa tworzyw sztucznych na bazie wydruków 3D mogą mieć, w zależności od przetwarzanych materiałów, postać elastycznych form odlewanych – np. silikonowych, skorupowych form z laminatów chemoutwardzalnych, sztywnych odlewów blokowych i wiele innych.
6. W przypadku skomplikowanych detali istnieje możliwość segmentowego wykonywania wydruków narzędzi i przy ich wykorzystaniu segmentów wyrobu, które klejone lub łączone mechanicznie będą tworzyć zakładaną konstrukcję.

Literatura

- [1] Chrostowski J.: *Jak królik z kapelusza* – Wiedza i życie, marzec 2009r.
- [2] 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 WITU Zeszyt 110, nr 2/2009, str. 95-102.