

Emil SASIMOWSKI

Katedra Procesów Polimerowych, Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny  
20-816 Lublin, ul. Nadbystrzycka 36  
tel.: (81) 538-42-25, e-mail: e.sasimowski@pollub.pl

## Przyrostowe metody wytwarzania elementów z tworzyw polimerowych

*W artykule przedstawiono przegląd najczęściej stosowanych metod wytwarzania przyrostowego, w których wykorzystywane są tworzywa polimerowe. Scharakteryzowano przebieg procesu wytwarzania elementów z tworzyw takimi metodami jak: SLA, FDM, JS, 3DP, SLS oraz LOM. Omówiono podstawy kształtowania wytwarzanych elementów w poszczególnych metodach, oraz rodzaje i postać stosowanych jako materiał budulcowy tworzyw polimerowych. Wskazano zalety jak również ograniczenia prezentowanych metod wytwarzania oraz przewidywane kierunki ich dalszego rozwoju.*

*Słowa kluczowe: wytwarzanie przyrostowe, drukowanie 3D*

### THE ADDITIVE MANUFACTURING METHODS OF POLYMERS PARTS

*This paper presents an overview of the most commonly used methods of additive manufacturing methods, which are used in polymer materials. Characterized the process of polymer fabrication methods such as SLA, FDM, JS, 3DP, SLS and LOM. Discusses the basis for shaping the elements produced in different methods, and the type and form of the building material used as polymers materials. Pointed out the advantages and limitations presented methods of manufacturing and the expected directions of their further development.*

*Keywords: incremental methods of production, 3D printing*

Tworzywa polimerowe w skali przemysłowej są najczęściej przetwarzane metodą wylączania lub wtryskiwania [1-3]. W metodach tych stosowane są narzędzia przetwórcze, głowice wytaczarskie, formy wtryskowe, przeznaczone do wytwarzania wytworów o określonym kształcie i wymiarach. W przypadku wprowadzenia nawet niewielkiej zmiany w wytwarzanym elemencie konieczna jest modyfikacja stosowanego narzędzia przetwórczego, a najczęściej wykonanie nowego, co wiąże się z wysokimi kosztami. Tego ograniczenia nie mają przyrostowe metody wytwarzania elementów z tworzyw polimerowych, w których wytwarzany element powstaje przez ciągły przyrost materiału do uzyskania wymaganego kształtu. W metodach tych nie tylko nie stosuje się narzędzi przeznaczonych do wytwarzania określonego wytworu ale również nie ma konieczności konstruowania specjalnego oprzyrządowania oraz określania geometrii półwyrobu. Innymi zaletami są również: wytwarzanie elementu w jednym ustawieniu i w jednej operacji, ograniczenie planowania procesu i operacji do minimum, jako zadania oprogramowania sterującego urządzeń wytwórczych (drukarek 3D), bezpośrednia integracja z komputerowo wspomaganym konstruowaniem CAD [4]. Główną wadą jest nieporównywalnie mniejsza w porównaniu do wylączania czy wtryskiwania wydajność wytwarzania możliwa do zaakceptowania wyłącznie przy produkcji jednostkowej lub małoseryjnej. W związku z tym metody te są obecnie najczęściej stosowane do wytwarzania modeli fizycznych i prototypów (Rapid Prototyping), jak również wytwarzania małoseryjnego gotowych wytworów (Rapid Manufacturing) oraz szybkiego wykonywania narzędzi (Rapid Tooling) [5, 6].

W procesach wytwarzania przyrostowego można wyróżnić następujące po sobie etapy:

- opracowanie trójwymiarowego modelu 3D-CAD wytwarzanego elementu,
- przetwarzanie danych do zbioru odpowiedniego dla urządzeń wytwarzających (najczęściej STL),
- ustalanie warunków wytwarzania obejmujące w zależności od stosowanej metody m.in. podział modelu na warstwy, usytuowanie modelu w przestrzeni roboczej, w niektórych przypadkach umiejscowienie dodatkowych podpór wytwarzanego elementu,
- właściwe wytwarzanie elementu fizycznego,
- obróbka wykańczająca wytworzonego elementu.

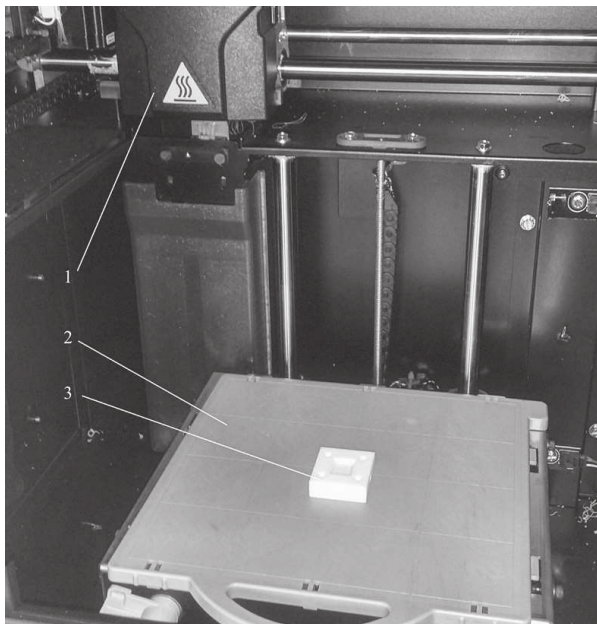
Metody wytwarzania przyrostowego określane są najczęściej za pomocą skrótów pochodzących od ich angielskich nazw. Poniżej wymieniono najbardziej popularne metody, wraz z ich polskim nazewnictwem, które nie jest ugruntowane:

- SLA – Stereolithography, Stereolitografia,
- FDM – Fused Deposition Modelling, Kształtowanie plastycznym tworzywem,
- JS – Jetting System, Drukowanie fotopolimerem,
- 3DP – Three Dimensional Printing, Drukowanie 3D przez łączenie proszku lepiszczem,
- SLS – Selective Laser Sintering, Selekttywne spiekanie laserowe proszków tworzyw i metali,
- LOM – Laminated Object Manufacturing, Wytwarzanie wytworów przez laminowanie.

Do wytwarzania przyrostowego stosuje się obecnie dość szerokie spectrum materiałów. Są to głównie tworzywa polimerowe których przetwarzaniu poświęcona jest niniejsza praca, ale również proszki metali (aluminium, tytanu, srebra, złota, stali nierdzewnej i narzędziowej, stopów niklowo aluminiowych, stopów kobaltu chromu i molibdenu) oraz proszki ceramiki [5, 7, 8].

Tworzywa polimerowe są stosowane w metodach przyrostowych jako materiały budulcowe w postaci proszków, ciekłej żywicy polimerowej, litego tworzywa, folii polimerowej lub stanowią warstwę spoiwa termoutwardzalnego którym pokryty jest papier.

Metoda FDM opatentowana przez S. Scotta Crumpa [9] polega na warstwowym łączeniu wytłaczanego przez dyszę plastycznego tworzywa polimerowego (rys.1). Materiał z którego wytwarzany jest element ma postać żyłki z tworzywa termoplastycznego ABS, PC, PLA lub PVA.



Rys. 1. Wygląd ogrzewanej komory urządzenia Stratasys uPrint SE Plus do wytwarzania przyrostowego metodą FDM: 1 – głowica z dyszami do nakładania materiału budulcowego i podporowego, 2 – platforma robocza, 3 – wytworzony element

Żyłka jest przepychana przez nagrzaną dyszę, w której ulega uplastycznieniu. Dysza, z której wytłaczane jest uplastycznione tworzywo jest przemieszczana nad platformą roboczą, na której powstaje wytwarzany element. Po ukształtowaniu z tworzywa całej warstwy odpowiadającej przekroju wytwarzanego elementu, platforma robocza obniża się o jej grubość i rozpoczyna się nakładanie warstwy kolejnej. Proces ten najczęściej odbywa się w komorze o podwyższonej temperaturze (ok. 75 °C), w celu lepszego łączenia się warstw wytłaczanego materiału które nakładane są kolejno jedna na drugiej aż do ukształtowania całego wytwarzanego elementu. W metodzie FDM jest możliwe ustalanie stopnia wypełnienia materiałem obszaru odpowiadającego przekroju wytwarzanego elementu. Może to być całkowite wypełnienie przekroju litym materiałem lub wypełnienie o strukturze żeberowej lub kratownicowej. W niektórych przypadkach możliwe jest także ustalanie przebiegu ścieżek nakładania materiału jak również własnych struktur wypełnienia, dostosowanych do cech geometrycznych

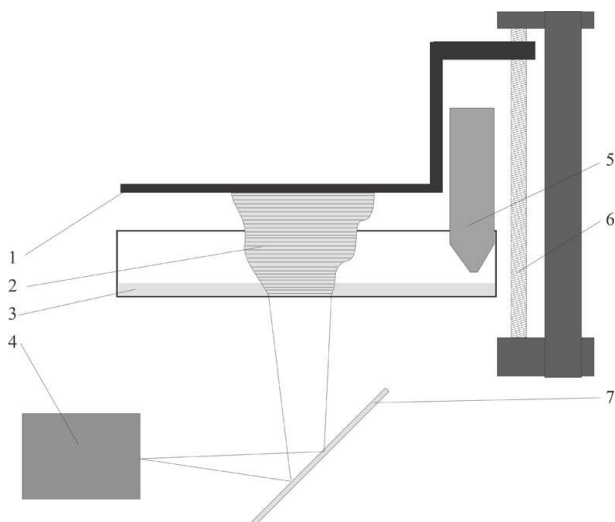


Rys. 2. Wygląd elementów wytworzonych metodą FDM: 1 – wytworzony element, 2 – warstwa podporowa i podpory, 3 – platforma robocza

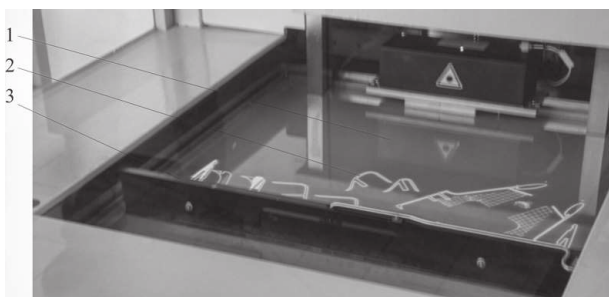
wytwarzanego elementu oraz przewidywanego rodzaju obciążenia w czasie użytkowania. W metodzie tej wymagane jest wykonywanie podpór dla pierwszej warstwy wytwarzanego elementu, jego fragmentów odchylonych od płaszczyzny roboczej oraz kształtowanych od pewnej wysokości (rys. 2). Podpory są wykonywane jednocześnie z elementem przez wytłaczanie materiału podporowego z drugiej dyszy. Stosowane materiały podporowe najczęściej są rozpuszczalne w wodzie, lub wymagają mechanicznego usuwania.

Za rozwinięcie metody FDM można uznać zaprezentowaną w 2014 r. przez firmę Arburg metodę (AKF), w której tworzywo termoplastyczne uplastycznione w układzie ślimakowym jest za pomocą nieruchomej piezokrystalicznej dyszy, postaci kropli warstwowo nakładane na ruchomą platformę roboczą. Stosowane są platformy robocze o trzech a nawet pięciu osiach ruchu, dzięki czemu w większości przypadków nie jest potrzebne wytwarzanie podpór. Istotną zaletą tej metody jest stosowanie standardowych tworzyw termoplastycznych w postaci granulatu [10].

Metoda SLA – Stereolithography, została opatentowana przez Charlsa W. Hull'a [11]. Polega na miejscowym utwardzaniu promieniowaniem UV nanoszonej warstwowo ciekłej żywicy w której zachodzi fotoinicjowana polimeryzacja. Dzięki układowi ruchomych zwierciadeł promień lasera UV jest przemieszczany po powierzchni żywicy w obszarze odpowiadającym przekroju wytwarzanego elementu i utwardza ją miejscowo. Po utwardzeniu warstwy platforma robocza na której powstaje element obniża się o grubość warstwy – zanurza w zbiorniku z żywicą, zgarniacz wyrównuje powierzchnię żywicy i rozpoczyna się utwardzanie warstwy kolejnej (rys. 3). W rozwiązaniu tym czas wytwarzania elementu jest uzależniony zarówno od ilości warstw z których on się składa, ale również od pola powierzchni poszczególnych warstw. Pole powierzchni poszczególnych warstw elementu nie ma natomiast wpływu na szybkość wytwarzania w nowej odmianie metody SLA określanej skrótem FTI (Film Transfer Imaging) [12, 13]. Zastosowano w niej jednocześnie naświetlanie UV za pomocą projektora DLP



Rys. 3. Schemat wytwarzania przyrostowego metodą SLA z zastosowaniem projektora DPL: 1 – platforma robocza, 2 – wytwarzany element, 3 – zbiornik z żywicą, 4 – projektor DPL, 5 – zasobnik z żywicą, 6 – mechanizm napędowy platformy roboczej, 7 – lustro



Rys. 4. Wygląd zbiornika z żywicą w czasie jej utwardzania przez wyświetlanie: 1 – zbiornik wypełniony żywicą, 2 – wyświetlany obraz warstwy wytwarzanego elementu, 3 – zgarniacz wyrównujący powierzchnię żywicy [15]

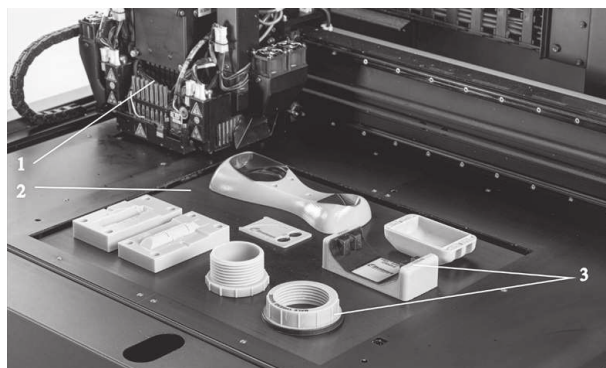
całego obszaru poszczególnych warstw elementu, poprzez wyświetlanie ich obrazów na powierzchni żywicy (rys. 4). W odmianie tej zastosowano układ odwrócony w stosunku do poprzedniego. Naświetlanie odbywa się poprzez przezroczyste dno zbiornika do którego stopniowo wylewana jest żywicą. Po utwardzeniu warstwy, następuje podniesienie platformy roboczej na której powstaje element, wylewana jest nowa warstwa żywicy do zbiornika a następnie wyrównywana przez zgarniacz. Następnie platforma robocza zanurzana jest ponownie w zbiorniku tak, aby odległość pomiędzy jego dnem a powstającym elementem odpowiadała grubości kolejnej warstwy której proces naświetlania się rozpoczyna. W metodzie SLA oraz FTI również wymagane jest wykonywanie podpór dla pierwszej warstwy wytwarzanego elementu, jego fragmentów odchylonych od płaszczyzny roboczej oraz kształtowanych od pewnej wysokości. Podpory są wykonywane razem z wytwarzanym elementem z tego samego materiału, dlatego wymagają późniejszego me-



Rys. 5. Wygląd wnętrza komory do naświetlania UV: 1 – żarówka UV, 2 – odbijające światło powierzchnie boczne komory, 3 – platforma robocza z wytworzonymi elementami

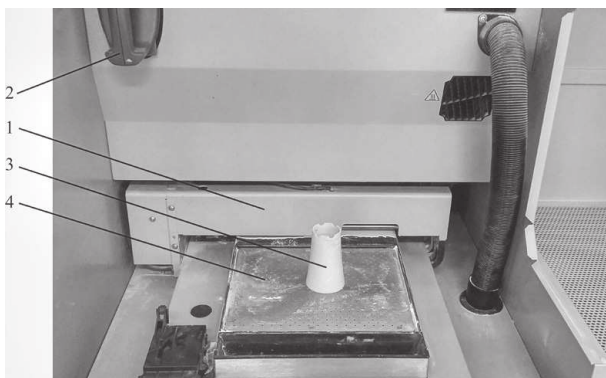
chanicznego usunięcia [4]. Po procesie naświetlania z wytwarzanego elementu usuwane są resztki żywicy przez mycie w izopropanolu lub acetonie. W celu zakończenia polimeryzacji w całej objętości wytwarzanego elementu poddaje się go dodatkowemu naświetlaniu UV w specjalnych komorach (rys. 5) a następnie usuwane mechanicznie są podpory.

Kolejną metodą wykorzystującą utwardzanie żywicy polimerowej światłem UV jest metoda JS – Jetting System (inna nazwa PJ – PolyJet) [4, 13]. W metodzie tej ciekła żywicą w postaci kropli nakładana jest warstwowo za pomocą głowicy z dyszami piezokrystalicznymi na platformę roboczą i całościowo utwardzana przez lampę UV zintegrowaną z głowicą, dzięki czemu nie jest potrzebne dodatkowe naświetlanie UV elementu po zakończeniu wytwarzania. Po ukształtowaniu całej warstwy platforma robocza obniża się o jej grubość i nakładana jest kolejna warstwa elementu (rys. 6). W celu zachowania stałej gru-



Rys. 6. Wygląd urządzenia do wytwarzania przyrostowego metodą JS – Jetting System: 1 – głowica z dyszami piezokrystalicznymi, 2 – platforma robocza, 3 – wytworzone elementy dwutworzywowe [14]

bości każda warstwa po naniesieniu jest dodatkowo wyrównywana przez rolkę. W metodzie tej również wymagane są dodatkowe podpory które kształtowane są równocześnie z wytwarzanym elementem. Powstają one przez nanoszenie materiału podporowego z dodatkowych dysz znajdujących się w głowicy. Materiał podporowy stanowi rozpuszczalna w wodzie żywica, która po zakończeniu wytwarzania całego elementu jest usuwana z wytworzonego elementu. Odbywa się to na specjalnym stanowisku, gdzie w szczelnej komorze za pomocą dyszy z której natryskiwana jest woda pod wysokim ciśnieniem, ręcznie usuwa się materiał podporowy. Rozwinięciem tej metody jest stosowanie głowic do równoczesnego nanoszenia dwóch a nawet trzech żywic różniących się właściwościami z których kształtowany jest element. Stosowane są żywice o właściwościach zbliżonych, jak podaje producent [14], do takich tworzyw termoplastycznych jak polipropylen, ABS, PMMA – przezroczyste oraz elastyczne jak guma. Pozwala to na wytwarzanie elementów wielotworzywowych, o zróżnicowanych właściwościach mechanicznych jak i kolorystycznych.

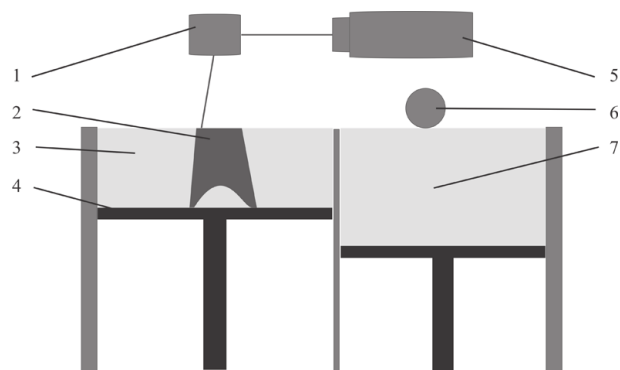


Rys. 7. Wygląd stanowiska do wytwarzania przyrostowego metodą 3DP: 1 – głowica nanosząca spoiwo, 2 – zasobnik ze spoiwem, 3 – wytworzony element, 4 – platforma robocza

Metodą wytwarzania przyrostowego, w której wykorzystywane są materiały polimerowe, jest 3DP – Three Dimensional Printing. W metodzie tej podobnie jak w JS również wykorzystywana jest głowica, ale do nakładania w postaci kropli spoiwa łączącego zasadniczy sproszkowany materiał. Stosowane są proszki na bazie gipsu w osnowie z polimerów winylowych a także proszki metali i ceramiczne. Element jest wytwarzany na platformie roboczej stanowiącej dno zbiornika, do którego warstwowo nakładany jest sproszkowany materiał (rys. 7). Po naniesieniu warstwa proszku jest ona wyrównywana przy użyciu walca a następnie na nią nakładane jest przez głowicę spoiwo w obszarze odpowiadającym przekrojowi wytwarzanego elementu. Następnie platforma robocza obniża się i do zbiornika nakładana jest kolejna warstwa proszku i proces powtarza się. W metodzie tej nie są stosowane dodatkowe podpory, ponieważ podparcie wytwarzanego elementu stanowi niezwiązany proszek

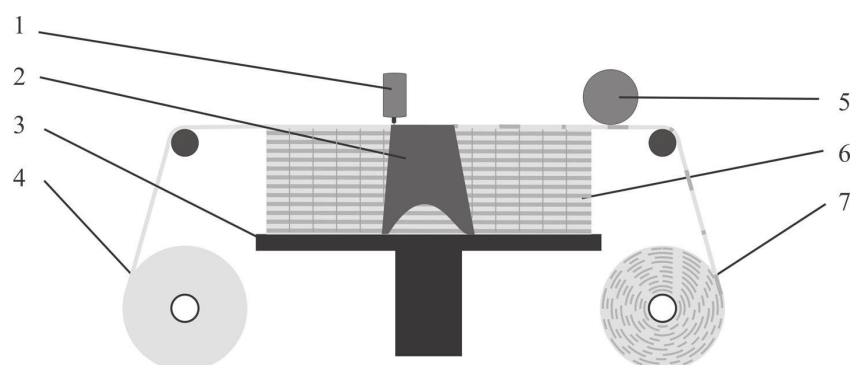
wypełniający przestrzeń roboczą – zbiornik. Dzięki dodaniu do bezbarwnego spoiwa atramentów w kolorach podstawowych możliwe jest otrzymywanie elementów wielobarwnych nawet w 24-bitowej palecie kolorów. Stosowane są wówczas standardowe pojemniki z atramentami od biurowych drukarek atramentowych. Po wytworzeniu elementu, niezwiązany z nim proszek jest usuwany za pomocą sprężonego powietrza w komorze która najczęściej jest zintegrowana z drukarką. Otrzymywane elementy mają strukturę porowatą i niestety słabe właściwości wytrzymałościowe, są bardzo kruche. Aby poprawić ich wytrzymałość stosuje się infiltrację takimi substancjami jak: wosk, cyjanoakryl, żywice epoksydowe, żywice akrylowe lub poliestrowe.

Tworzywa polimerowe w postaci proszków są stosowane także w metodzie SLS – Selective Laser Sintering opracowanej na Uniwersytecie Texas przez Carla R. Deckarda i opatentowanej w 1989 r. [16, 17]. W metodzie tej stykające się ze sobą ziarna proszku wiążą się wzajemnie przez nadtopienie ich powierzchni w wyniku podgrzania za pomocą wiązki lasera CO<sub>2</sub>. Tak jak w metodzie 3DP element jest wytwarzany na platformie roboczej stanowiącej dno zbiornika do którego warstwowo nakładane jest z zasobnika sproszkowane tworzywo i wyrównywane za pomocą walca (rys. 8). Poszczególne warstwy proszku są spiekane począwszy od obrysu przekroju a następnie wypełnienia wnętrza przekroju wytwarzanego elementu. Spiekanie kolejnej warstwy powoduje nadtopienie warstwy poprzedniej i ich wzajemne połączenie.

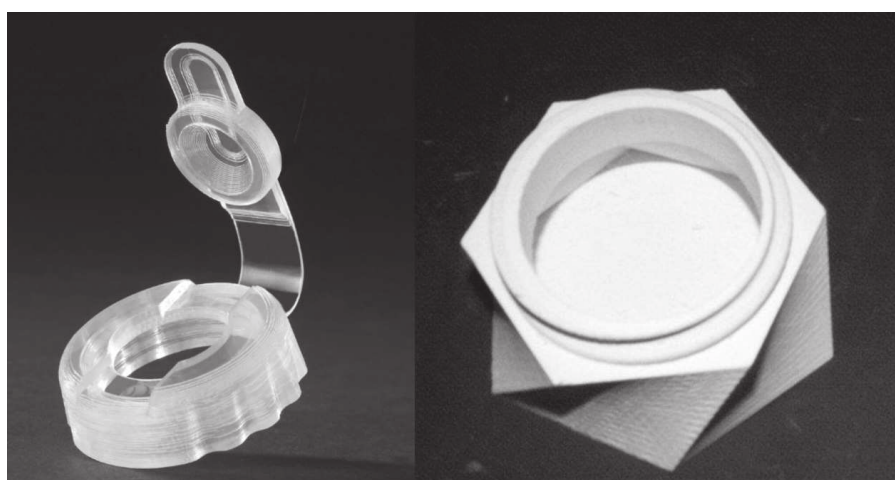


Rys. 8. Schemat stanowiska do wytwarzania przyrostowego metodą SLS: 1 – układ optyczny, 2 – wytwarzany element, 3 – obszar roboczy wypełniony sproszkowanym materiałem, 4 – platforma robocza, 5 – laser, 6 – walec wyrównujący, 7 – podajnik sproszkowanego materiału

Podparcie wytwarzanego elementu stanowi proszek wypełniający przestrzeń roboczą dlatego nie są wytwarzane dodatkowe podpory. W metodzie tej stosowane są proszki tworzyw konstrukcyjnych takich jak: PA12, PA11, PEEK, PS oraz kompozyty na osnowie polimerowej: PA12 – CF (z włóknem węglowym), PA12 – AL (z aluminium) [18, 19]. Wytworzone elementy mają strukturę porowatą dlatego aby dodatkowo poprawić ich właściwości wytrzymałościowe stosuje się infiltrację różnymi substancja-



Rys. 9. Schemat stanowiska do wytwarzania przyrostowego metodą LOM: 1 – nóż wycinający obrys warstwy, 2 – wytwarzany element, 3 – platforma robocza, 4 – podajnik folii budulcowej, 5 – ogrzewany walec, 6 – rozkrawany naddatek materiałowy, 7 – walec nawijający folię odpadową



Rys. 10. Elementy wytworzone metodą LOM z a) folii PVC, b) papieru [20, 24]

mi. W przypadku wytworów z proszków metali infiltruje się je miedzią lub brązem.

Metodą, w której wykorzystuje się tworzywa w postaci folii, jest LOM – Laminated Object Manufacturing. Została ona opatentowana przez Feygina M., Shkolnika A., Diamonda M. i Dvorskiyego E. w 1996 r. [21, 22]. W metodzie tej element jest wytwarzany z folii PVC lub rzadziej papieru pokrywanych termoutwardzalną żywicą będącą spoiwem [20, 23]. Element powstaje na platformie roboczej przez wycinanie i laminowanie – nawarstwianie kolejnych arkuszy folii lub papieru ze sobą w wyniku pokrywania spoiwem a następnie docisku i nagrzewania przez ogrzewany walec (rys. 9). Do wycinania po obrysie poszczególnych warstw elementu początkowo stosowano laser CO<sub>2</sub>, który w obecnie oferowanych urządzeniach został zastąpiony przez nóż stosowany w ploterach tnących [24]. Zastosowanie folii z PVC umożliwia otrzymywanie elementów przezroczystych oraz elastycznych (rys. 10), natomiast elementy wytworzone z zastosowaniem papieru charakteryzują się wytrzymałością zbliżoną do drewna. Obecnie w niektórych urządzeniach stosuje się nanoszenie substancji antyadhezyjnej na obszar folii, który ma pozostać niepokryty klejem i nielaminowany [24]. Nowością jest stosowanie kolorowych tuszy przy

wytwarzaniu z papieru co umożliwia otrzymywanie elementów wielobarwnych [23]. W metodzie LOM konieczne jest dodatkowe rozkrawanie naddatku materiałowego na mniejsze części, zarówno wewnątrz jak i na zewnątrz wytwarzanego elementu w celu ich późniejszego usunięcia.

Ze względu na koszty wytwarzania metody wykorzystujące jako materiał budulcowy tworzywa polimerowe są najczęściej stosowane do wytwarzania modeli fizycznych i prototypów oraz gotowych do użytkowania wytworów [25]. Obserwowane w ostatnich latach upowszechnienie metod wytwarzania przyrostowego – drukowania 3D jest wynikiem zarówno znacznego udoskonalenia tych metod, poprawy właściwości wytrzymałościowych oraz dokładność odwzorowania modelu cyfrowego 3D, jak również w dużej mierze następstwem znacznego obniżenia cen urządzeń wytwórczych – drukarek. Najczęściej stosowane są drukarki wykorzystujące metodę wytwarzania FDM, SLA lub JS. Zarówno znani producenci urządzeń przemysłowych, jak również nowo powstałe firmy niezależne, oferują obecnie drukarki oparte na tych metodach, przeznaczone do zastosowań biurowych a nawet indywidualnych [14, 19, 26, 27]. W następstwie uwolnienia podstawowych patentów

chroniących metodę FDM wiele firm niezależnych oferuje tego typu drukarki nawet postaci zestawów do samodzielnego montażu [28÷ 31] oraz dynamicznie rozwijane są nowe konstrukcje drukarek w ramach projektów Open Source [32]. Stosowanie pozostałych metod, w szczególności wykorzystujących proszki metali i ceramiki ze względu na wysokie koszty materiałów i urządzeń nadal jest ograniczone głównie do zastosowań przemysłowych. W najbliższych latach należy spodziewać się dalszego rozwijania metod wytwarzania przyrostowego m.in. w zakresie zastosowania nowych materiałów np. zmieniających swoje właściwości pod wpływem stymulantów [33, 34].

#### Literatura:

- [1] Stasiek J.: *Wytłaczanie tworzyw polimerowych*. Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-przyrodniczego, Bydgoszcz 2007.
- [2] Sikora R.: *Przetwórstwo tworzyw wielkocząsteczkowych*. Wydawnictwo Edukacyjne, Warszawa 1993.
- [3] White J.L., Potente H.: *Screw Extrusion*. Carl Hanser Verlag, Munich 2003.
- [4] Budzik G.: *Odwzorowanie powierzchni krzywoliniowej łopatek części gorącej silników lotniczych w procesie szybkiego prototypowania*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2009 r.
- [5] Oczos K.E.: *Rosnące znaczenie Rapid Manufacturing w przyrostowym kształtowaniu wyrobów*. *Mechanik* 2008, nr 4, 241-257
- [6] Budzik G.: *Szybkie prototypowanie modeli odlewniczych dla odlewania precyzyjnego*. *Stal – Metale & Nowe Technologie* 2011, nr 9-10, 122-123
- [7] Cader M., Trojnecki M.: *Analiza możliwości zastosowania technologii przyrostowych do wytwarzania elementów konstrukcji robotów mobilnych*. *Pomiary Automatyka Robotyka* 2013, nr 2, 200-207
- [8] Oczos K.E.: *Rozwój urządzeń i materiałów do kształtowania przyrostowego wyrobów*. *Mechanik* 2010, 2, 81-88
- [9] Crump S.S.: patent *Apparatus and method for creating three-dimensional objects*. USA 5121329 (1992 r.)
- [10] Neff M., Kessler O.: *Layered functional parts on an industrial scale*. *Kunststoffe International* 2014, nr 8, 40-43
- [11] Hull Ch.W.: patent *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*, USA 4575330 (1986 r.)
- [12] <http://3dprinterdlp.com> (2.04.2015 r.)
- [13] <http://www.przyrostowo.pl> (2.04.2015 r.)
- [14] <http://www.stratasys.com> (2.04.2015 r.)
- [15] <http://www.dallara.it> (4.04.2015 r.)
- [16] Deckard C.R.: patent *Method and apparatus for producing parts by selective sintering*. USA 4863538 (1989 r.)
- [17] [http://www.me.utexas.edu/news/2012/0712\\_sls\\_history.php](http://www.me.utexas.edu/news/2012/0712_sls_history.php) (2.04.2015 r.)
- [18] <http://www.eos.info> (2.04.2015 r.)
- [19] <http://www.3dsystems.com> (4.04.2015 r.)
- [20] <http://www.solido3d.com> (2.04.2015 r.)
- [21] Feygin M., Shkolnik A. Diamond M. i Dvorskiy E.: patent *Laminated object manufacturing system*. Patent Światowy WO 9739903 (1996 r.)
- [22] Feygin M., Shkolnik A. Diamond M. i Dvorskiy E.: patent *Laminated object manufacturing system*. USA 5730817 (1998 r.)
- [23] <http://mcortechtechnologies.com> (2.04.2015 r.)
- [24] <http://www.cubictechnologies.com> (2.04.2015 r.)
- [25] <http://surveys.peerproduction.net/2013/09/3d-printing-survey-2013/3/> (2.04.2015 r.)
- [26] <http://www.tiertime.com> (4.04.2015 r.)
- [27] <http://ultimaker.com> (2.04.2015 r.)
- [28] <http://omni3d.com> (4.04.2015 r.)
- [29] <http://www.vertex3dprinter.eu> (5.04.2015 r.)
- [30] <http://www.robo3d.com> (5.04.2015 r.)
- [31] <http://www.be3d.cz> (4.04.2015 r.)
- [32] <http://www.reprap.org> (4.04.2015 r.)
- [33] He, X., Aizenberg, M., Kuksenok i inni: *Creating Homeostasis in Synthetic Materials via Self-regulating Chemo-mechano-chemical Systems with Built-in Feedback Loops*. *Nature* 2012, s. 214-218
- [34] Raviv D., Zhao W., McKnelly C. i inni: *Active Printed Materials for Complex Self-Evolving Deformations*. *Scientific Reports* 2014, 4, 7422