

Możliwości stosowania fotopolimerowych form wtryskowych do produkcji małoseryjnej w strukturze Przemysł 4.0

Grzegorz Budzik^{1), *)}, Damian Żelechowski^{2), *)}

DOI: dx.doi.org/10.14314/polimery.2019.6.2

Streszczenie: Duża konkurencja wśród firm zajmujących się produkcją maszyn, urządzeń lub ich podzespołów sprawia, że niezwykle ważne stają się czynniki, takie jak: czas pojawienia się produktu na rynku, jego cena i jakość. Techniki szybkiego prototypowania, nieodzownie związane z ideą Przemysłu 4.0, nabierają więc ogromnego znaczenia. W pracy przedstawiono korzyści wynikające z zastosowania technologii PolyJet, oferowanej przez światowego lidera rynku druku 3D, firmę Stratasys, do wytwarzania detali metodą formowania wtryskowego do produkcji małoseryjnej.

Słowa kluczowe: drukowane formy wtryskowe, formowanie wtryskowe, technologia PolyJet, Przemysł 4.0.

Possibilities of using photopolymer injection molds in small series production in Industry 4.0 structure

Abstract: High competition among companies involved in the production of machines, devices or their components leads to the fact that such factors as the time of appearance of the product on the market, its price and quality are extremely important in the commercial market. Rapid prototyping techniques, being integrally associated with the idea of Industry 4.0, are of great importance in such a case. The work focuses on presenting the benefits coming from the use of PolyJet technology, offered by a world leader in the 3D printing market, Stratasys, for manufacturing of polymer parts using small scale injection molding.

Keywords: printed injection molds, injection molding, PolyJet technology, Industry 4.0.

Najczęściej stosowaną obecnie metodą przetwórstwa tworzyw polimerowych jest formowanie wtryskowe. Wykorzystanie w masowej produkcji bardzo dokładnych, często złożonych, trójwymiarowych (3D) części finalnych, przy czasach cyklu od kilku sekund do kilku minut, niesie ze sobą wiele korzyści. Proces wtryskiwania przebiega z udziałem wtryskarki, formy wtryskowej i tworzywa polimerowego. Typowy proces obejmuje stopienie tworzywa, wtrysnięcie go do formy, następnie schłodzenie i usunięcie z formy tak wytworzonego elementu. Ze względu na dużą liczbę wtryskiwanych detali materiałami najczęściej stosowanymi na formy wtryskowe są różne rodzaje stali lub stopy aluminium, charakteryzujące się długą żywotnością. W procesie kształtowania form wtryskowych zazwyczaj wykorzystuje się

obróbkę ubytkową. Obecnie wykonanie takiej formy u wyspecjalizowanego wykonawcy może trwać nawet miesiąc i jest bardzo kosztowne. Z tego względu stosowanie takiego rozwiązania w wypadku wprowadzania nowych produktów na rynek (prototypowanie) lub produkcji małoseryjnej jest nieuzasadnione. Czwarta rewolucja przemysłowa (Przemysł 4.0) przynosi wiele rozwiązań technologicznych pozwalających na skrócenie czasu oraz kosztów produkcji [1].

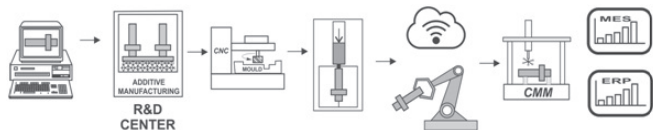
Przemysł 4.0 to zbiorcze pojęcie oznaczające integrację inteligentnych maszyn i systemów oraz wprowadzanie modyfikacji w procesach produkcyjnych, mających na celu zwiększenie wydajności wytwarzania oraz umożliwienie elastycznych zmian asortymentu [2–8]. Tradycyjne podejście do produkcji elementów z tworzyw polimerowych w ujęciu struktury Przemysł 4.0 przedstawia rys. 1. W tym wypadku wytwarzanie form wtryskowych z zastosowaniem systemów obróbczych sterowanych numerycznie jest kosztowne i zajmuje dużo czasu. Wynika to głównie z konieczności wykorzystywania bardzo zaawansowanych obrabiarek oraz narzędzi, niezbędnych do wykonania form o skomplikowa-

¹⁾ Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza, Katedra Konstrukcji Maszyn, al. Powstańców Warszawy 8, 35-959 Rzeszów.

²⁾ PROSOLUTIONS Majewscy Sp. Jawna, ul. Andrzeja Sołtana 7, 05-400 Otwock (Park Naukowo-Technologiczny „Świerk”).

*) Autor do korespondencji; e-mail: gbudzik@prz.edu.pl, damian.zelechowski@prosolutions.pl

nych kształtach. Ponadto zmiany, często wprowadzane na każdym etapie procesu, np. przeprojektowanie formy wtryskowej i ponowne jej wykonanie, pociągają za sobą dodatkowe koszty i wydłużają czas potrzebny na wprowadzenie nowego produktu na rynek.

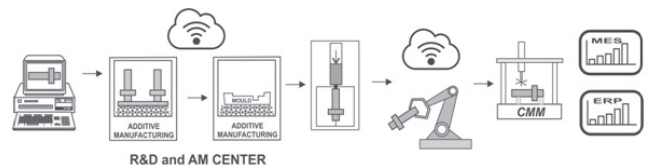


Rys. 1. Uproszczony schemat procesu wytwarzania w strukturze Przemysł 4.0

Fig. 1. Simplified scheme of the manufacturing process in the Industry 4.0 structure

Do rozwiązań skracających czas wprowadzania nowych produktów na rynek niewątpliwie zalicza się techniki szybkiego prototypowania (ang. *rapid prototyping* – RP), obejmujące metody wytwarzania przyrostowego – druk 3D [9]. Właściwości detali otrzymanych w technologii druku 3D, w której materiałem wyjściowym są tworzywa polimerowe, niestety nie zawsze są takie same, jak właściwości detali uzyskanych metodą wtryskiwania. W takim wypadku przeprowadzanie testów funkcjonalnych prototypów nie ma odniesienia do rzeczywistości.

Dynamiczny rozwój technik szybkiego prototypowania, narzucany w wyniku wdrażania założeń czwartej rewolucji przemysłowej, w ostatnich latach doprowadził do pojawienia się licznych technologicznych rozwiązań o wysokim poziomie zaawansowania [10]. Dzięki temu dzisiaj można mówić nie tylko o przyrostowym wytwarzaniu prototypów (RP), ale też o szybkim wytwarzaniu narzędzi (ang. *rapid tooling* – RT). Pojęcie RT obejmuje wytwarzanie za pomocą technik szybkiego prototypowania oprzyrządowania lub gotowego narzędzia używanego w dalszym procesie produkcyjnym. Elementy otrzymywane technikami RT z metali jako materiału wyjściowego charakteryzują się mniejszą dokładnością geometryczną oraz wymagają dodatkowych zabiegów wykańczających, co sprawia, że sumaryczne koszty wytwarzania są większe niż w wypadku technik subtraktywnych. Innym rodzajem technologii przyrostowej umożliwiającej wytwarzanie form wtryskowych charakteryzujących się złożoną geometrią oraz wysoką jakością powierzchni jest



Rys. 2. Uproszczony schemat procesu wytwarzania w strukturze Przemysł 4.0 z zastosowaniem polimerowych form wtryskowych wytworzonych w procesie przyrostowym

Fig. 2. Simplified scheme of the manufacturing process in the Industry 4.0 structure using polymer injection molds created by additive process

technologia PolyJet firmy Stratasys. Materiał wyjściowy stanowi tu fotopolimer na bazie żywicy akrylowej, który jest utwardzany za pomocą promieniowania ultrafioletowego. Schemat zastosowania technologii przyrostowej w strukturze Przemysł 4.0 do wytwarzania form wtryskowych dla krótkich serii wyprasek przedstawia rys. 2. Takie podejście pozwala na znaczne usprawnienie procesu wprowadzania zmian w koncepcji rozwoju produktu (szybkie i tańsze drukowanie form wtryskowych o zmiennej geometrii) oraz na wyeliminowanie konieczności stosowania skomplikowanego i drogiego dodatkowego oprzyrządowania obrabiarek numerycznych.

Jak widać jest możliwe pominięcie kosztownych procesów wykorzystujących obrabiarki sterowane numerycznie (CNC). Do wytwarzania form wtryskowych zastosowano tu technologię PolyJet. Urządzenia typu PolyJet bazują na materiałach z szerokiej gamy tworzyw fotoutwardzalnych, w tym materiałów sztywnych, materiałów nieprzezroczystych i wysoko elastycznych w różnej kolorystyce. Grubość pojedynczej nakładanej w trakcie procesu warstwy wynosi 16 lub 30 mikrometrów, dzięki temu wytwarzane w tej technologii modele charakteryzują się wysokim stopniem uszczegółowienia [11]. Formy wtryskowe wykonane w technologii PolyJet są alternatywnym rozwiązaniem dla wytwarzania detali z materiału docelowego, tak aby charakteryzowały się one właściwościami odpowiadającymi finalnie wytwarzanym produktom. Rozwiązanie to wypełnia lukę między formami uzyskanymi metodą obróbki ubytkowej i formami tańszymi, z gumy silikonowej, które mogą jedynie symulować formowane wtryskowo części i kosztować od 50 do 70 % mniej niż formy aluminiowe [12]. Formy wykonane w technologii PolyJet wykazują zalety form silikonowych, umożliwiających szybką produkcję złożonych części i dokonywanie częstych zmian z zastosowaniem termoplastów wykorzystywanych w produkcji masowej.

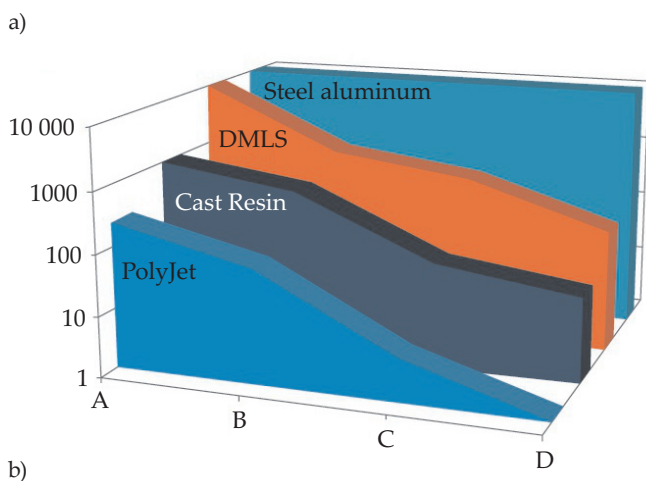
Podstawowym założeniem koncepcji Przemysł 4.0 jest także zorganizowanie produkcji, aby była bardziej skoncentrowana na indywidualnym kliencie. W niniejszej pracy przedstawiono możliwości zastosowania form wtryskowych wykonanych w technologii PolyJet do produkcji małoseryjnej.

MATERIAŁY WTRYSKIWANE

W wypadku używania form wytworzonych w technologii PolyJet, trwałość narzędzia i jakość uzyskanych detali zależą m.in. od materiału termoplastycznego użytego w procesie formowania wtryskowego. Większa temperatura topnienia wtryskiwanego materiału odpowiada jego większej lepkości i abrazyjności, a w konsekwencji mniejszej żywotności wykorzystywanego narzędzia. Niedostateczne wypełnienia form oraz linie niedolewów, jako wady wtryskiwanych elementów, powstają w wyniku użycia zbyt lepkich materiałów wyjściowych. Jednym ze sposobów przeciwdziałania powstawaniu takich wad jest zastosowanie podczas wtryskiwania materiału wy-

sokiego ciśnienia. Ponieważ jednak formy PolyJet nie wytrzymują ekstremalnego ciśnienia, zaleca się wykorzystywanie polimerów wykazujących dobre płynięcie. W razie konieczności zwiększenia ciśnienia wtrysku, powiększenie otworu układu dolotowego pomoże zredukować ciśnienie wtrysku i może być dobrym rozwiązaniem problemu. Zabieg taki można również zrealizować już po wydrukowaniu formy. W wyborze materiału do formowania wtryskowego ważną rolę odgrywa geometria części. Jeśli kształt geometryczny nie utrudnia przepływu tworzywa, można stosować materiały o większej lepkości i wyższej temperaturze topnienia.

Wtryskiwane tworzywa termoplastyczne dzieli się na cztery klasy różniące je pod względem łatwości przetwarzania (rys. 3). Dla każdej klasy podano przybliżoną żywotność narzędzia, której miarą jest liczba wtrysków. Należy dodać, że liczba możliwych do uzyskania wyprasek, bez zniszczenia formy, również zależy od geometrii części. Na przykład wysokie, cienkie elementy formy przyczyniają się do skrócenia jej żywotności.



A	Polietylen PE Polipropylen PP Polistyren PS Akrylonitryl-butadien-styren ABS Termoplastyczny elastomer poliestrowy TPE
B	Polipropylen napełniony włóknem szklanym PP + G Polioksymetylen POM Poliwęglan PC + ABS
C	Poliwęglan PC POM napełniony włóknem szklanym POM + G Poliamid PA
D	Poliwęglan napełniony włóknem szklanym PC + G Poliamid napełniony włóknem szklanym PA + G Poli(tlenek fenylenu) PPO Poli(siarceczek fenylenu) PPS

Rys. 3. a) Żywotność form wytworzonych różnymi metodami w odniesieniu do klasy wtryskiwanych materiałów, b) podział wtryskiwanych tworzyw termoplastycznych [12]

Fig. 3. a) Lifetime of the molds produced by various methods with reference to the class of injected materials, b) division of injection molded thermoplastic materials [12]

Termoplasty wymagające zastosowania temperatury w cylindrze ok. 300 °C z powodzeniem formowano za pomocą form wytworzonych w technologii PolyJet. Jednak najdłuższą żywotność wykazują formy wówczas, gdy przetwarza się materiały charakteryzujące się stosunkowo niską temperaturą topnienia i dobrą płynnością, zaliczane do klasy A: polipropylen (PP) i polietylen (PE). Materiały klasy B, takie jak polioksymetylen (POM) i polipropylen napełniony włóknem szklanym (PP + G), będą wpływały na skrócenie żywotności narzędzia ze względu na wyższą temperaturę topnienia, większą lepkość lub abrazyjność. Niektóre tworzywa termoplastyczne będą więc powodowały szybsze zużywanie się wydrukowanych form. Należy wspomnieć, że jest możliwe także wtryskiwanie materiałów przezroczystych. Materiały te wymagają zazwyczaj użycia wysoce wypolerowanych gniazd formujących i precyzyjnej kontroli temperatury, z tego względu uzyskane w taki sposób elementy wykazują mniejszą transparentność niż wytworzone za pomocą tradycyjnych narzędzi. W takim wypadku transparentność przezroczystych detali mogą poprawić dodatkowe zabiegi wykańczające po procesie wtryskiwania.

PROJEKTOWANIE FORMY

Procedury stosowane podczas projektowania tradycyjnych form wtryskowych mogą też być wykorzystane do projektowania form wytwarzanych w technologii PolyJet, konieczne jednak są niewielkie zmiany uwzględniające mechaniczną, termiczną i wymiarową charakterystykę formy z tworzywa polimerowego. Modyfikacje takie obejmują m.in. zwiększenie kąta nachylenia ścian (rekomendowane przez producenta: 5°), ułatwiające usuwanie wtrysniętych elementów i ograniczające ryzyko zniszczenia formy. Wdrożenie tego typu procesu do struktury Przemysł 4.0 daje możliwość szybkiej wymiany danych i informacji podczas procesu projektowania, a także realizację wybranych operacji w tzw. czasie rzeczywistym [13, 14], umożliwiając też w szybki sposób wprowadzenie zmian konstrukcyjnych. Wynikające z symulacji i analizy zjawisk modyfikacje konstrukcyjne, np. niewielkie zaokrąglenie krawędzi cienkich elementów formy, pozwalają uniknąć koncentracji naprężeń w tych miejscach, powodujących miejscowe uszkodzenia formy. Dodatkowo należy unikać otworów o średnicach mniejszych niż 0,8 mm. Ze względu na właściwości termiczne formy PolyJet, kanały konformalne zaprojektowane wewnątrz formy nie wpływają w istotnym stopniu na czas cyklu formowania lub na jakość części. Zastosowanie w tych rozwiązaniach systemów chłodzenia może jednak zwiększyć trwałość narzędzia nawet o 20 %. Znaczną poprawę trwałości formy można osiągnąć w warunkach niewielkiej głębokości gniazda formującego oraz małej wysokości rdzenia, ponieważ chłodzenie formy na większym jej obszarze jest łatwiejsze. Do drukowanych form zaleca się stosowanie wkładek, które m.in. umożliwia-

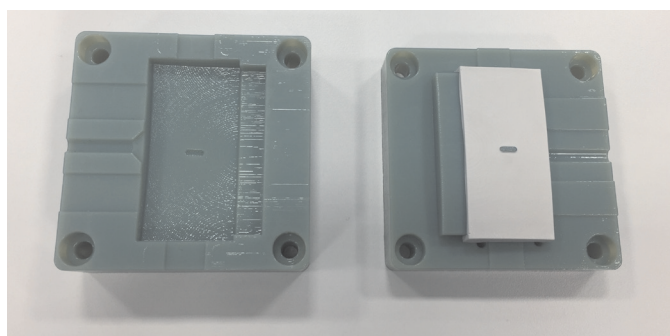
ją kreatywne projektowanie pozwalające na uzyskanie detali o bardziej skomplikowanych kształtach, niwelują problem usuwania powietrza podczas wtrysku (w wypadku dużego gniazda można zastosować kanały wentylacyjne), poprawiają żywotność formy – drobne szczegóły ulegające zniszczeniu w pierwszej kolejności można wymienić na nowe, wydrukowane w nakładzie kilku sztuk.

MATERIAŁY NA FORMY

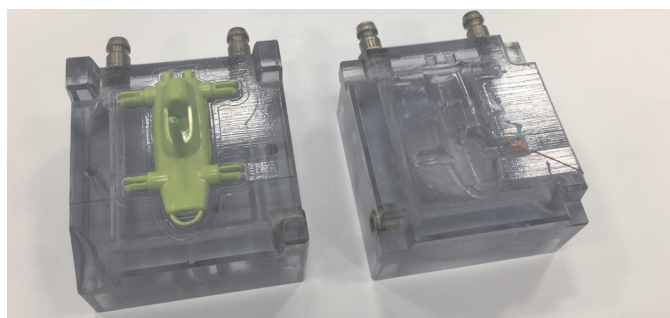
W zależności od dostępności producent urządzenia proponuje dwa różne materiały o właściwościach pozwalających na uzyskanie drukowanych form wtryskowych o pożądanym cechach. Rigur (RGD450) to materiał polipropylenowopodobny, trwały, stabilny wymiarowo, dający gładkie wykończenie powierzchni wydruków. Kolejny to materiał rekomendowany przez producenta na drukowane formy wtryskowe – Digital ABS (RGD5160) – zielony materiał cyfrowy wykorzystywany w technologii PolyJet, otrzymany przez zmieszanie RGD515 z RGD535 w trakcie procesu wytwarzania. Dzięki połączeniu dużej wytrzymałości i odporności na wysoką temperaturę materiał jest przeznaczony do symulacji standardowych tworzyw polimerowych, takich jak ABS (akrylonitryl-butadien-styren).

WYKOŃCZENIE POWIERZCHNI

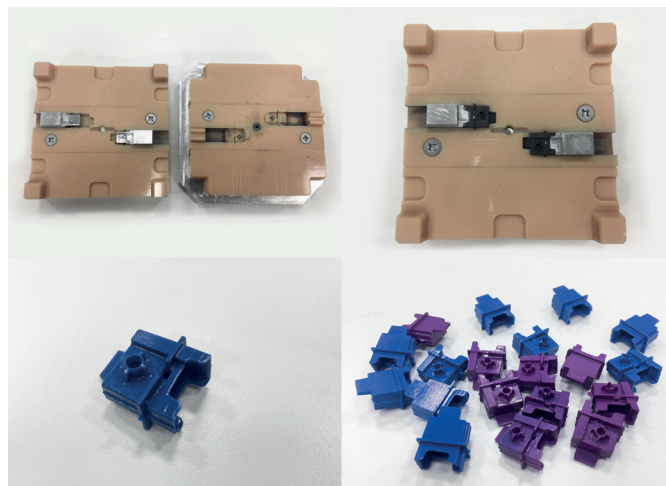
Gładkość powierzchni gniazda formującego formy wykonanej w technologii PolyJet wpływa na kosmetyczny wygląd wtrysniętego elementu. Jeden z trybów budowa-



Rys. 4. Widok wydrukowanej formy i formy z wypraską
Fig. 4. View of the printed mold with the injected part



Rys. 5. Widok wydrukowanej formy i formy z wypraską
Fig. 5. View of the printed mold with the injected part



Rys. 6. Widok wydrukowanej formy i formy z wypraskami
Fig. 6. View of the printed mold with the injected parts

nia, stosowany w tej technologii, pozwala na uzyskanie gładkiej powierzchni wytworu. W wypadku konieczności stosowania struktur podporowych uzyskiwana warstwa wierzchnia wymaga jednak dodatkowych zabiegów wykańczających, takich jak np. piaskowanie powierzchni. Zabieg taki można również przeprowadzić na gładkiej powierzchni wytwarzanej w trybie Glossy, w celu usunięcia typowego dla technologii przyrostowych efektu warstwowości. Przyczyni się to także do łatwiejszego usuwania wyprasek z formy.

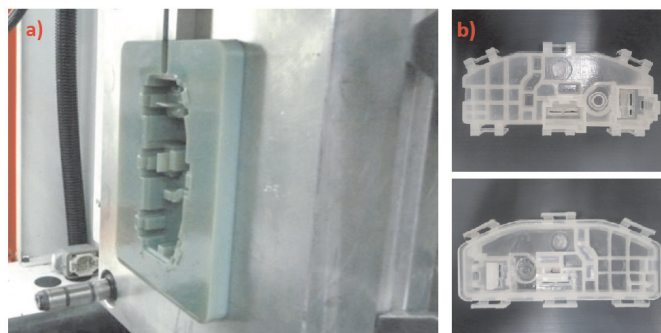
Zgodnie ze wspomnianymi zasadami otrzymywania form wtryskowych w technologii PolyJet firma PROSOLUTIONS – oficjalny partner Stratasys GmbH w Polsce – wytwarza je usługowo. Rysunki 4, 5 i 6 przedstawiają przykłady takich form wraz ze zrealizowanymi za ich pomocą wypraskami.

STUDIUM PRZYPADKU

Firma Robert Seuffer GmbH & Co. z siedzibą w Niemczech produkuje czujniki, elektronikę i sterowniki do użytku w gotowych produktach, licznych elementach montażowych. Włodarze tej firmy zdecydowali o wytwarzaniu form wtryskowych w technologii PolyJet. Obecnie wyprodukowanie jednej formy wtryskowej PolyJet 3D kosztuje mniej niż 1400 \$ i umożliwia:

- szybkie i ekonomiczne wytwarzanie nowych form, z możliwością modyfikacji na każdym etapie wdrażania projektu geometrii każdej z nich;
- zredukowanie bądź wyeliminowanie ręcznej zmiany geometrii formy finalnej;
- tworzenie z gotowych materiałów produkcyjnych prototypów o złożonej geometrii, cienkich ścianach i z drobnymi detalami;
- zbieranie rzeczywistych danych o wydajności produkcji znacznie szybsze niż kiedykolwiek wcześniej.

Rysunek 7 przedstawia przykładową formę wytworzoną przez firmę Seuffer w technologii PolyJet oraz uzyskane przy jej użyciu wypraski, a w tabeli 1 porówna-



Rys. 7. a) Przykładowa forma wtryskowa wydrukowana w technologii PolyJet, b) wypraski uzyskane przy jej użyciu
 Fig. 7. a) Exemplary view of injection mold, b) injected parts obtained by using a mold printed in PolyJet technology

T a b e l a 1. Porównanie metod produkcji form wtryskowych w firmie Seuffer

T a b l e 1. Comparison of injection mold production methods at Seuffer company

Metoda	Czas produkcji	Koszt
Forma metalowa	56 dni	52 725 \$
Forma PolyJet	2 dni	1318 \$
Oszczędności	54 dni (96 %)	51 407 \$ (98 %)

no koszty i czasy wykonania formy metalowej i formy PolyJet.

PODSUMOWANIE

Koncepcje i gotowe rozwiązania związane z Przemysłem 4.0 docierają do coraz szerszych kręgów polskich przedsiębiorców i ludzi biznesu. Wdrażanie zasad czwartej rewolucji przemysłowej, oferującej istotne korzyści dla branży automatyzacji produkcji, coraz bardziej widoczne we współczesnej technice, ciągle jednak wymaga pokonania szeregu trudności. Przedstawiono alternatywną metodę wytwarzania narzędzi (form wtryskowych) opartą na technice szybkiego prototypowania PolyJet. Omówiono korzyści płynące z zastosowania ich w obszarze produkcji małoseryjnej. Zaprezentowano również przykładowe formy wytwarzane przez jednego z klientów firmy Stratasys. Technologie przyrostowe coraz częściej zajmują istotne miejsce w strukturze produkcyjnej Przemysł 4.0 w branży przetwórczej. Obecnie stosowane są do wytwarzania nie tylko prototypów, ale też gotowych produktów. Technologie przyrostowe RT (ang. *rapid tooling*) mogą służyć do otrzymywania narzędzi w produkcji seryjnej (narzędzia wytwarzane metodami spiekania proszków metali i obrabiane za pomocą

systemów CNC), mogą też być wykorzystywane do wytwarzania narzędzi do produkcji małoseryjnej.

LITERATURA

- [1] Strange R., Zucchella A.: *Multinational Business Review* **2017**, 25 (3), 174.
<http://dx.doi.org/10.1108/MBR-05-2017-0028>
- [2] Lasi H., Fettke P., Kemper H.-G. i in.: *Business & Information Systems Engineering* **2014**, 6 (4), 239.
<http://hdl.handle.net/10.1007/s12599-014-0334-4>
- [3] Kolberg D., Zuhlke D.: *IFAC-PapersOnLine* **2015**, 48, 1870.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.359>
- [4] Paszkiewicz A., Bolanowski M.: "Towards a Synergistic Combination of Research and Practice in Software Engineering" (Eds. Kościuszenko P., Madycki I.), Springer International Publishing, 2017, str. 193–206.
- [5] Bolanowski M., Paszkiewicz A.: "Software Engineering Research for the Practice", Polish Information Processing Society, 2017, str. 151–160.
- [6] Kroll J., da Silva Estácio B.J., Audy J.L.N.: "An Initial Framework for Researching Follow-the-Sun Software Development", 9th International Conference on Global Software Engineering (ICGSE), IEEE 2014.
<http://dx.doi.org/10.1109/ICGSE.2014.21>
- [7] Fu Y., Liu Y., Liu D.: "An environment-based RBAC model for internal network", 1st International Conference on Computer Communication and the Internet (ICCCI), IEEE 2016.
<http://dx.doi.org/10.1109/CCI.2016.7778884>
- [8] Ladyman J., Lambert J., Wiesner K.: *European Journal for Philosophy of Science* **2013**, 3 (1), 33.
<http://dx.doi.org/10.1007/s13194-012-0056-8>
- [9] Choi H., Samavedam S.: *Computers in Industry* **2002**, 47, 39.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0166-3615\(01\)00140-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0166-3615(01)00140-3)
- [10] Weyer S., Schmitt M., Ohmer M., Gorecky D.: *IFAC-PapersOnLine* **2015**, 48, 579.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.143>
- [11] Dziubek T.: *Polimery* **2018**, 63, 49.
<http://dx.doi.org/10.14314/polimery.2018.1.8>
- [12] Stratasys. PolyJet for Injection Molding. Stratasys Ltd. 2016.
- [13] Stock T., Seliger G.: *Procedia CIRP* **2016**, 40, 536.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129>
- [14] Aboulkhair N.T., Everitt N.M., Ashcroft I., Tuck C.: *Additive Manufacturing* **2014**, 1–4, 77.

Otrzymano 18 X 2018 r.