

Zastosowania przemysłowe druku 3D zwanego wytwarzaniem przyrostowym. Wstęp

Helena Dodziuk

Zalety stosowania 3DP/AM, czasami nazywanych wytwarzaniem wspomaganym komputerowo (ang. *Computer Aided Manufacturing*, CAM), zostały omówione w rozdz. 2. Przed omawianiem przemysłowych zastosowań druku 3D warto jednak jeszcze raz podkreślić, że wytwarzanie tą metodą zmienia sposób myślenia o produkcji, co omówili Christian Weller ze współpracownikami¹. Bariery związane z wprowadzeniem 3DP do przemysłu omówiono m.in. na portalu Fabbaloo². Zwrócono tam uwagę, że wprowadzenie 3DP/AM do produkcji przemysłowej musi być całościowym procesem, który uwzględni integrację z już istniejącą siecią zaopatrzenia i wprowadzi nowe sposoby prowadzenia biznesu.

Przemysłowych zastosowań 3DP w różnych dziedzinach jest wiele. Dziś to już nie tylko tanie i szybkie wytwarzanie prototypów i narzędzi, co wciąż jest ważnym zastosowaniem w wielu dziedzinach. W przemyśle lotniczym to coraz częściej produkcja z wykorzystaniem druku 3D w metalu³. Wiodący koncern w dziedzinie 3DP/AM, Stratasys, wprowadził drukarki 3D do zastosowań przemysłowych obejmujących nie tylko prototypowanie, ale i produkcję⁴. Technologię tę wprowadza się już intensywnie do produkcji masowej.

W 2018 roku, na konferencji Additive Manufacturing and 3D Printing w Nottingham, podczas wykładu na temat wyzwań i pułapek związanych z wprowadzeniem druku 3D do przemysłu Ian Halliday z firmy 3T RPD Ltd. stwierdził, że wprowadzenie AM do produkcji na dużą skalę zajęło wiodącym firmom przemysłu lotniczego GE Aviation i Airbus ponad dziesięć lat⁵. Z kolei Gerd Manz z firmy Adidas stwierdził na TCT Show w 2017 roku, że wprowadzenie do masowej produkcji druku 3D (we współpracy z firmą Carbon) zajęło im dziesięć lat, zanim zaczęło przynosić zyski⁶. Należy podkreślić, że w 2018 roku Adidas miał wydrukować w 3D elementy 100 tys. par butów sportowych. Pierwszy rzut tych butów w styczniu 2018 roku w wybranych sklepach w Nowym Jorku został natychmiast rozprzedany i niektóre z nich wypłynęły po wielokrotnie wyższej cenie⁷ na aukcji sneakersów na stronie stockx.com.

W 2017 roku Hewlett-Packard zawarł porozumienie z firmą Deloitte dotyczące współpracy nad zastosowaniem opracowanego przez HP systemu druku 3D do drukowania na skalę przemysłową⁸. Ma to pomóc firmom, które korzystają z tego systemu, takim jak Arkema, BASF, Johnson & Johnson czy Henkel, przyspieszyć design i wytwarzanie produktów, stworzyć bardziej elastyczne sieci wytwarzania i dostaw, zwiększyć efektywność w czasie cyklu produkcyjnego, tym samym zwiększając innowacyjność, skracając czas wprowadzenia produktu na rynek, zmniejszając koszty i straty oraz skuteczniej konkurując w dzisiejszej dynamicznej globalnej gospodarce.

Ważną rolę w rozwoju 3DP/AM ma odegrać powiązanie nauki o cząsteczkach (ang. *molecular science*) z oprzyrządowaniem i oprogramowaniem. W raporcie firmy sculpteo na temat stanu druku 3D w 2017 roku zostały wymienione cztery zalety tej metody wytwarzania z punktu widzenia firm⁹:

1. Przyspieszenie etapu badania i rozwoju projektu dzięki szybszemu i tańszemu opracowywaniu prototypów, co dotychczas stanowi główne zastosowanie 3DP (34%) wraz ze sprawdzeniem koncepcji (23%) (i wytwarzaniem narzędzi)¹⁰. Niektóre firmy bardzo szybko zmieniają swój asortyment (na wykładzie na TCT Show Birmingham 2017 Gerd Manz z Adidasu stwierdził, że 80% ich dochodu w 2016 roku pochodziło z produktów nie starszych niż jeden rok)¹¹. Tak szybka zmiana modeli nie byłaby możliwa bez wykorzystania 3DP w fazie projektowania i prototypowania. Od początku zastosowań prototypowanie stanowiło bardzo ważne zastosowanie 3DP. Na blogu „sześć prototypów, które każdy startup powinien wykonać” J.D. Albert w interesujący sposób przedstawił ogólne cele prototypowania¹². Następnie 3DP zastosowano w szybkim oprzyrządowaniu, ponieważ możliwość szybkiego wykonania chwytaka, przekładni lub manipulatora jest bardzo istotna.
2. Stworzenie nowych możliwości dla działu projektowania. Korzystając z 3DP, można tworzyć skomplikowane kształty m.in. z „dziurami” w środku (co pozwala na oszczędność materiałów, energii oraz zmniejszone wydzielanie spalin w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym i kosmicznym) lub części zawierających ruchome fragmenty, których w ogóle nie można byłoby lub byłoby za drogo wytwarzać w inny sposób.
3. Obniżka kosztów, szczególnie przy druku w metalu (mimo jego energochłonności). Szczególnie interesujące w tym aspekcie wydaje się wprowadzenie drukarek biurkowych pozwalających na drukowanie z metalu¹³.
4. Zmiana procesu produkcji (ang. *reinventing production*). Dotychczas 3DP było stosowane do prototypowania i – ostatnio coraz szerzej – do produkcji narzędzi. (Koncern samochodowy General Motors zaoszczędził 3 mln dolarów, kiedy wprowadził wydrukowane w 3D narzędzia¹⁴). Obecnie to się gwałtownie zmienia i metoda ta jest coraz częściej uważana za alternatywę lub uzupełnienie tradycyjnych metod wytwarzania; mówi się już o szybkim wytwarzaniu (ang. *rapid manufacturing*)¹⁵.

Do zalet 3DP/AM należy dodać oszczędności związane z wyeliminowaniem narzędzi używanych przy produkcji tradycyjnej. Również drukowanie jako jednej części elementu,

który wcześniej był montowany z kilku oddzielnie wytwarzanych fragmentów, nie tylko oszczędza koszty montażu, lecz również pozwala uniknąć użycia śrub i innych ciężkich elementów łączących. Nie zauważył tego Matthias Holweg z Said Business School Uniwersytetu w Oxfordzie, gdy omawiał ograniczenia 3DP w artykule opublikowanym w „Harvard Business Review”¹⁶.

Jak powiedział James Moultrie z Uniwersytetu Cambridge na TCT Show 2017 w Birmingham¹⁷, zastąpienie metalowej części wytwarzanej metodą tradycyjną częścią plastikową drukowaną w 3D może nawet 50-krotnie zmniejszyć koszty. Jest również interesujące, że wydrukowane z użyciem proszków metalicznych części mogą być bardziej wytrzymałe niż części ze stali nierdzewnej¹⁸.

Warto podkreślić, że ostatnio (2018) uważa się, że w niektórych przypadkach bardziej efektywne w produkcji są maszyny hybrydowe łączące zalety AM i tradycyjnych maszyn wykorzystujących komputerowe sterowanie urządzeń numerycznych (ang. *Computerized Numerical Control, CNC*)¹⁹. Ponadto obniżka kosztów produkcji może stanowić niewielką część zysków związaną z wprowadzeniem AM.

Metoda ta pozwala na tworzenie zupełnie nowych produktów oraz innowacyjnych modeli biznesowych, bez których cały proces mógłby stać się niekonkurencyjny. Między innymi na tym polega i polegać będzie niszczący charakter 3DP.

W dokumencie Additive Manufacturing UK. National Strategy 2018–2025²⁰ podano wartości GVA (ang. *Gross Value Added*) oraz liczbę miejsc pracy w dziedzinie 3DP/AM w Wielkiej Brytanii w 2005, w 2015 i szacowane na 2025 rok. Wynosiły one odpowiednio 35, 235 i 3500 mln funtów oraz <1000, <5000 i 6000 miejsc pracy. W raporcie tym zbadano czynniki ograniczające rozwój 3DP i powołano grupy robocze do analizy i przeciwdziałania tym czynnikom.

Pierwsza z nich ma się zajmować kosztami, inwestycjami i finansowaniem, zwiększając wiedzę na temat 3DP i redukując ryzyko związane z inwestowaniem w tej dziedzinie, zwłaszcza dla małych i średnich przedsiębiorstw, a także zrozumienie pełnych kosztów (łącznie z postprocessingiem i testowaniem oraz kosztami materiałów). Druga grupa, która ma się zajmować designem dla AM, ma wypracować zalecenia i programy edukacyjne dla DfAM, pozwalające na lepsze zrozumienie designu, a zwłaszcza jego znanych ograniczeń, m.in. braku odpowiednio wykształconych projektantów, a także problemów bezpieczeństwa związanych zarówno z designem danych, jak i całych procesów. Trzecia grupa ma na celu zajmowanie się własnością intelektualną (*intellectual property, IP*), ponieważ znane obecnie zabezpieczenia IP oraz systemy prawne nie są odpowiednie dla sieci cyfrowych oraz sposobów pracy w AM. Globalne wycieki IP oraz obawy dotyczące bezpieczeństwa cyfrowego spowalniają szybkie przyjęcie tej technologii.

Następna, czwarta grupa zajmująca się materiałami i procesami ma doprowadzić do zrozumienia właściwości w różnych procesach/maszynach i zastosowaniach uwzględniające wielkość, przepustowość, kontrolę jakości, koszty, dostępność (ograniczenia IP, niezależni dostawcy), wykorzystanie materiałów

mieszanych, możliwość recyklingu, biokompatybilność. Piąta grupa ma się zajmować umiejętnościami i wykształceniem w dziedzinie 3DP/AM. Brak odpowiednich umiejętności w dziedzinie projektowania, produkcji, materiałów czy też testowania uniemożliwia wprowadzanie tej dziedziny wytwarzania, podnoszenie kwalifikacji obecnych pracowników w porównaniu z kształceniem przyszłych generacji, edukację konsumentów oraz podnoszenie wiedzy na temat 3DP/AM w szkołach. Tematem prac szóstej grupy jest standaryzacja i certyfikowanie, co wiąże się z postrzeganym lub faktycznym brakiem norm we wszystkich i/lub specyficznych sektorach związanych z tą dziedziną, co szczególnie dotyczy zdrowia, lotnictwa i sportów motorowych, a także procesów, materiałów, oprogramowania, produktów oraz aplikacji. Ostatnia, siódma grupa ma się zajmować testami i walidacją, co wymaga bibliotek danych, standardów testów (ogólnych i specyficznych dla danego sektora) dla materiałów i procesów oraz produktów końcowych, a także testów dla większych objętości, badań nieniszczących oraz kontroli jakości.

Należy podkreślić, że przed firmami, które stosują 3DP/AM, stoi wiele problemów technologicznych. Do niedawna jednym z najważniejszych była mała szybkość drukowania oraz kosztowny i czasochłonny postprocessing, obejmujący m.in. konieczność wygładzania wydrukowanej w 3D powierzchni, na której odznaczają się wydrukowane warstwy. Czasami ważna jest również anizotropowość wydruków. Obecnie opracowano już wiele technologii pozwalających na szybki druk w 3D²¹ oraz metody umożliwiające uniknięcie postprocessingu²². Jedną z metod obniżenia kosztów postprocessingu, polegającą na drukowaniu podpór z rozpuszczalnego w wodzie materiału, zaproponowała polska firma 3DGence²³.

Ciekawą koncepcję opisano na portalu Fabbaloo²⁴. Miałyby ona polegać na stopniowym ulepszaniu produktu, który po uzyskaniu uwag pierwszych (i kolejnych) klientów miałby być udoskonalony. Będziemy mieć do czynienia z trochę różnymi produktami; czy będzie to wersja z danej chwili, czy jedna z wielu wersji tej wersji? Nie wiadomo, co to będzie znaczyć. Czy ludzie będą kupowali kolejne wersje, czy też zrezygnują, uważając, że i tak nie dogonią zmian. Nad tymi problemami powinni się zastanowić specjaliści od marketingu.

Jak już wspomniano, obecnie wprowadza się AM do produkcji na dużą skalę. Według raportu firmy Wohlers Associates za 2017 rok stale rośnie liczba firm produkujących i sprzedających przemysłowe systemy wytwarzania przyrostowego AM²⁵. W 2016 roku było ich 97, podczas gdy w dwóch poprzednich latach zanotowano ich odpowiednio 62 i 47. Wprowadzenie technologii AM jest dużym wyzwaniem dla firm. Unia Europejska wprowadziła program WATIFY²⁶, który ma wspomóc firmy przy wprowadzaniu technologicznych innowacji, nie tylko w dziedzinie druku 3D.

Wielkim ułatwieniem w rozwoju druku 3D był fakt wczesnego opracowania przez Chucka Hulla standardu plików STL do druku 3D²⁷ (istnieją różne interpretacje tego skrótu; ma on pochodzić od ang. *Standard Triangle Language, Standard Tessellation Language* lub po prostu od *STereoLithography*), chociaż obecnie istnieje wiele formatów plików do 3DP/AM²⁸.

Obecnie prowadzone są intensywne prace mające na celu standaryzację w dziedzinie 3DP²⁹.

Na blogu Solidworks omówiono sposoby obniżki kosztów projektów przemysłowej produkcji w druku 3D, takie jak optymalizacja designu, odrzucenie tradycji na rzecz chociażby „organicznych” kształtów, takich jak plaster miodu, rozważenie następných kroków w cyklu projektowania, unikanie droższych operacji (np. uproszczenie postprocessingu przy zastosowaniu metody druku SLS) czy też „nieprzesadzanie” z dokładnością drukowanych wyrobów³⁰. Prowadzą do niej optymalizacja designu, odrzucenie tradycyjnego myślenia, np. przez wprowadzenie „dziur” w projektowanych do druku częściach, i inne możliwości, które daje 3DP. Co więcej, mówi się już o autonomicznych fabrykach wykorzystujących druk 3D³¹.

W raporcie Additive Manufacturing UK wydanym we wrześniu 2016 roku³² stwierdzono, że jednym z głównych czynników hamujących rozwój 3DP jest brak wystarczającej liczby specjalistów: designerów, materiałoznawców, programistów, operatorów maszyn i personelu wykańczającego wyroby (ang. *postprocessing*), natomiast szczególną uwagę na konferencji Materialise World Summit 2017 zwrócono na konieczność współpracy firm mających doświadczenie w różnych dziedzinach. Przykładem tego jest m.in. wspólny program firm Premium AEROTEC, Daimler i EOS³³, mający na celu rozwój metody przemysłowego druku 3DP/AM. Z kolei na dwunastej konferencji International Conference on Additive Manufacturing & 3D Printing w Nottingham w 2017 roku³⁴ obok braku wystarczającej liczby specjalistów wymieniano problemy z finansowaniem AM, włączaniem AM do procesów produkcyjnych (ang. *factory workflows*), zarówno w sensie cyfrowym, jak i fizycznym, oraz wspomniano, jak często to włączanie prowadzi do metod hybrydowych, łączących wytwarzanie subtraktywne i addytywne. Innym czynnikiem wymienianym jako bariera w rozwoju jest zdobycie certyfikacji ISO przez firmy³⁵. Jak już wspomniano, w Wielkiej Brytanii stworzono wiele zespołów do pracy nad czynnikami ograniczającymi rozwój 3DP.

Ważnymi rozwijanymi obecnie dziedzinami są, obok wprowadzania nowych procesów i materiałów, badania i standaryzacja materiałów używanych do druku 3D, wyrobów i stosowanych procesów, jak również warunków bezpieczeństwa. To ostatnie dotyczy szczególnie przemysłów lotniczego i kosmicznego oraz zastosowań medycznych. America Makes³⁶ i Narodowy Amerykański Instytut Standardów (*American National Standards Institute*, ANSI)³⁷ opublikowały w czerwcu 2018 roku najnowszą wersję planów (ang. *road map*) standaryzacji AM³⁸.

Istnieją również ograniczenia psychologiczne (patrz również badanie firmy EY omówione poniżej). Przeprowadzone przez firmę Gartner w 2017 roku badanie 388 dyrektorów generalnych (ang. *chief executive officer*, CEO) i innych przedstawicieli zarządów firm wykazało, że nie doceniają oni możliwości druku 3D i innych innowacyjnych technologii³⁹. Analityk Gartnera Mark Raskino twierdzi, że wielu zarządzających firmami utknęło w starych kategoriach wytwarzania przemysłowego, które są już mniej użyteczne w świecie „efemerycznych produktów i usług, w których sieci społeczne, innowacje w modelu biznesowym, myślenie projektowe, wartości marki i doświadczenia klientów

są w centrum tworzenia wartości”⁴⁰. Słyszeli oni o nowatorskich technologiach, ale nie wiedzą, na czym one polegają i jak mogą przyczynić się do rozwoju ich firmy.

Jesteśmy obecnie w początkowym etapie gwałtownego rozwoju przemysłowych zastosowań tej technologii. Na razie formowanie wtryskowe plastikowych części jest, mimo znacznego kosztu samych form, tańsze w produkcji masowej niż AM. W przyszłości to się może zmienić dzięki pracom badawczym i wdrożeniowym prowadzonym w wielkich korporacjach. Wspomniano już o wieloletnich pracach w GE Aviation, Airbusie, Adidasie i o inicjatywie Stratasy⁴¹. Ta ostatnia firma opracowuje wielokomórkową platformę do ciągłej produkcji 3DP (ang. *multi-cell additive manufacturing platform for continuous production*)⁴². Intensywne prace prowadzi również dział badawczo-rozwojowy Siemens Mobility w zakresie przemysłowego zastosowania 3DP, co w wielu przypadkach skraca czas produkcji z tygodni do dni⁴³.

Taki rozwój przyniesie znaczne zmiany nie tylko w produkcji przemysłowej. Wspomnieliśmy powyżej o zastąpieniu robotników przez drukarki, ale zmian tych będzie dużo więcej i są one obecnie trudne do przewidzenia. Kilka lat temu w szacownym piśmie „The Economist” ukazał się artykuł *Wydrukuj mi Stradivariusa*⁴⁴ ze zdjęciem wydrukowanych skrzypiec na okładce (wykonania kompozycji na takich instrumentach można posłuchać na YouTube zarówno w wersji klasycznej⁴⁵, jak i bardziej niestandardowej⁴⁶). W artykule tym porównano przyszły wpływ na gospodarkę i życie codzienne drukowania przestrzennego z wpływem takich wynalazków, jak druk, maszyna parowa i tranzystor. Będzie on ogromny, ale jego szczegółów nie można w pełni przewidzieć. Wiadomo, że 3DP z pewnością zakłóci wiele dziedzin, zaś firmy, przedsiębiorcy i systemy prawne muszą się do tych zmian przystosować.

Jak już wspomniano, jednymi z najbardziej aktywnych w dziedzinie zastosowań 3DP w przemyśle firm są General Electric⁴⁷ i Siemens⁴⁸. Ta pierwsza to międzynarodowa korporacja notowana na giełdzie w Nowym Jorku, która zajęła w 2017 roku trzynaste miejsce na liście Fortune 500. GE ma już 126 lat i powstała z połączenia dwóch firm, z których jedną założył sam Thomas Edison. Obecnie, po restrukturyzacji w 2016 roku, GE składa się z kilku niezależnych gałęzi, z których GE Aviation i GE Additive⁴⁹ na pewno zajmują się drukiem 3D. W dziedzinie AM GE jest chyba najbardziej znana z opracowania drukowanej w 3D dyszy do silników odrzutowców, ale obok licznych projektów w przemyśle lotniczym⁵⁰ i kosmicznym prowadzi szeroko zakrojone prace z zakresu zastosowań 3DP w medycynie i innych dziedzinach. Ma ona lub buduje wiele fabryk/ośrodków (ang. *facilities*) w Ameryce Północnej, Europie (cztery we Włoszech, dwie w Niemczech, i po jednej w Szwajcarii, Wielkiej Brytanii, Republice Czeskiej i Szwecji), Ameryce Łacińskiej i Azji. Swoją technologiczną pozycję w AM GE umacnia m.in. przez wykupywanie mniejszych wyspecjalizowanych w 3DP firm, takich jak szwedzka Arcam AB i niemiecka SLM Solutions Group, specjalizujące się w druku 3D w metalu, czy też opracowującej oprogramowanie firmy GeonX⁵¹. GE ma zamiar (2017) sprzedać dwie spółki córki GE Industrial Solutions i GE Water, a następnie zamknąć

lub ograniczyć działalność wielu swoich fabryk⁵². Te wszystkie zmiany są świadectwem, że koncern zmienia strategię: w centrum jego zainteresowania będzie już nie tylko oprzyrządowanie dla przemysłu ciężkiego (projekt dużej drukarki 3D Atlas do metalu o wymiarach wzdłuż osi X, Y do jednego metra⁵³), ale i oprogramowanie.

Globalny, 170-letni koncern Siemens na początku jedynie wykorzystywał metodę 3DP do szybkiego prototypowania. Następnie był on jedną z niewielu firm, która przeszła do opracowania całościowej metody produkcji, wykorzystującą technologię 3DP w dziedzinie aparatów słuchowych. Obecnie jest to chyba jedyna dziedzina wytwarzania prawie całkowicie przejęta przez druk 3D (w 98%, reszta aparatów musi być wykonywana tradycyjnie). Następnie Siemens rozszerzył swoje pole zainteresowań o zaawansowane oprogramowanie przez zakup specjalizujących się w tym firm (UGS Corporation, Unigraphics, Structural Dynamics Research Corporation i innych), tworząc dział Siemens PLM Software. Dzisiaj koncern ten jest aktywnym sprzedawcą oprogramowania i obsługuje klientów z wielu działów przemysłu.

Dalszy rozwój aktywności Siemens w dziedzinie druku 3D obejmuje zarówno różnorodne projekty, jak i współpracę z innymi podmiotami, a także zakupy całych firm (ang. *acquisitions*). Po nabyciu brytyjskiej firmy Materials Solutions dział Siemens Power & Gas stał się ostatnio aktywnym dostawcą usług w zakresie druku 3D w metalu dla przemysłów lotniczego i motoryzacyjnego. Siemens jest również zaangażowany we współpracę z wieloma firmami, m.in. HP, Trumpf, Stratasys, EOS, materialise, w celu rozwoju i sprzedaży swoich produktów. Przykładowo współpraca ze Stratasys ma łączyć 3DP z inteligentną automatyzacją, prowadząc do zaawansowanej robotyki. Jednym z najgłośniejszych przykładów rozwoju technologii wytwarzania w 3D przez Siemens jest produkcja metalowych łopatek turbin. Tradycyjnie łopatki turbin są odlewane albo kute, dlatego wymagają skomplikowanych form w procesie produkcji. Siemens pokonał trudności drukowania tych części w technologii 3D, m.in. wprowadzając złożone innowacyjne kanały chłodzące o skomplikowanej geometrii i opracowując nowy materiał (polikrystaliczny proszek zawierający stop niklu)⁵⁴. Podejście Siemens skracza czas od projektu tych łopatek do produkcji z dwóch lat do dwóch miesięcy.

Z kolei ostatnie osiągnięcie firmy Star Rapid⁵⁵ to wydrukowana w 3D część, dzięki której traktor mógł odholować część ważącą ponad tonę⁵⁶. Część ta została wydrukowana z włókna węglowego. W przemyśle maszynowym, budownictwie i wielu innych dziedzinach mogą znaleźć zastosowanie wiązki przewodów (ang. *wire harness*). Solidworks Electrical zaproponował sposób projektowania takich wiązek⁵⁷.

Julian Leitloff przedyskutował możliwy wpływ druku 3DP na przemysł jubilerski⁵⁸. Cechą charakterystyczną tej dziedziny jest wysoka względna wartość designu w porównaniu z często znaczną ceną materiału, co prowadzi do dużo wyższych cen wytwarzania niż ceny jednostkowe przy produkcji masowej. Niektóre zalety 3DP, takie jak szybki rozwój projektu i możliwość wytwarzania na życzenie, są bardzo pożądane dla przemysłu jubilerskiego.

Inny aspekt zastosowania 3DP to całkowita zmiana sytuacji artystów projektantów. Tradycyjna produkcja biżuterii była drogą i frustrującą niezależnych projektantów. Już na starcie musieli oni dysponować dużym kapitałem, aby dotrzeć do kroku wielkim producentom. Również potem, aby być konkurencyjni, musieli oni walczyć o duże zamówienia, co wiązało się z wyłożeniem znacznych środków na materiały w nadziei, że odbiją to sobie pół roku później na targach. Wymagało to dobrej organizacji, jeszcze większych nerwów oraz łutu szczęścia. 3DP drastycznie zmienia ekonomię rynku projektowania biżuterii.

Niezależni projektanci nie potrzebują już dużych pieniędzy, żeby zaistnieć na rynku. Gdy mają pomysł, tworzą plik CAD i drukują go. Pojawiają się usługodawcy, którzy dostarczają pełny zakres związanych z tym przemysłem usług, takich jak produkcja i zapewnienie jakości, pakowanie, branding, sprzedaż, a nawet obsługa klienta. W tej sytuacji projektant może wybrać najbardziej mu odpowiadający model aktywności: może on kontrolować cały proces lub skoncentrować się na projektowaniu. Będzie on mógł w pełni wykorzystywać zalety druku 3D, takie jak możliwość wykonywania skomplikowanych kształtów lub/i ruchomych części (mówi się nawet o „niemożliwym designie i kanałach wewnętrznych”⁵⁹) oraz zwiększenia czasu ich życia⁶⁰.

Na stosunki produkcji w przemyśle jubilerskim wpłyną również z pewnością związane z 3DP powiązania lokalnych i międzynarodowych rynków. Dzięki przesyłaniu pliku CAD można korzystać ze wzorów na całym świecie. Designerzy z Hawajów mogą wysłać je przez internet, aby wydrukować je lokalnie lub *vice versa*. Produkcja może odbywać się blisko obszarów rzeczywistego zapotrzebowania. Co więcej, może być ona dostosowana do wielkości zamówień, likwidując problem przechowywania i nadprodukcji, co w zasadniczy sposób zmieni globalną logistykę.

Druk 3D zmienia również sytuację wielkich firm. By obniżyć koszty produkcji metodami tradycyjnymi, muszą one zamawiać swoje produkty z wielomiesięcznym wyprzedzeniem, co czyni je nieelastycznymi i nie pozwala na dostosowanie się do zmieniających się trendów. Wytwarzanie na zamówienie metodą druku 3D może więc być przydatne i dla nich, ponieważ produkcja na zamówienie tą metodą zajmuje już nie więcej niż tydzień, wliczając w to dostarczenie produktu do klienta. W dalszej przyszłości na przemysł jubilerski, i nie tylko, mogą wpłynąć komputerowe metody rozwijania projektów, np. algorytmy samouczące się, wzrost szybkości i precyzji wykonania (taki jak w drukarkach Envision⁶¹) oraz uwzględnienie oceny projektów, co pozwoli stworzyć wiele różnych wersji produktu i wybrać z nich najbardziej popularne.

Obecnie znajdujemy się w bardzo interesującym momencie, kiedy 3DP/AM, dotychczas stosowany głównie do robienia prototypów i narzędzi, wchodzi do produkcji masowej⁶². Obok dwóch największych firm zajmujących się różnymi aspektami druku 3D (Stratasys oraz 3D Systems) wiele specjalistycznych firm, np. GE, Ford, Mattel czy też Airbus, intensywnie wprowadzają drukarki 3D do produkcji na szeroką skalę. Warto również wymienić ostatni projekt Adidas, który we współpracy

z firmą Carbon⁶³ planował masową produkcję butów Futurecraft 4D z wydrukowaną w 3D wkładką. W 2017 roku Adidas planował sprzedać 5 tys. par takich butów, a przewidywania na 2018 rok to już 100 tys⁶⁴. Warto również wspomnieć, że do produkcji drukarek i rozwijania ich zastosowań włączają się obecnie również inne wielkie koncerny, takie jak Google, Microsoft i Canon. Proces wprowadzania AM w różnych dziedzinach przemysłu będzie silnie przyspieszał, mimo chwilowych zawirowań, takich jak załamanie trendu wzrostowego wielu firm 3DP/AM w 2015 roku⁶⁵. Przykładem uruchamiania produkcji metodą 3DP na masową skalę jest francuski startup Prismadd Tess⁶⁶, a także koncern GE, który zainwestował w tę dziedzinę 1,4 mld dolarów⁶⁷, zaś firma Airbus w 2016 roku otworzyła swoją fabrykę w Berlinie⁶⁸. Zwraca również uwagę „miliardowy interes” chińskiej firmy Winsun z Arabią Saudyjską na leasing stu wielkich drukarek budowlanych, którego celem jest zbudowanie co najmniej 30 mln m² powierzchni⁶⁹.

Jeszcze niedawno problemem w przemysłowych zastosowaniach druku 3D była jego dokładność i powtarzalność. O osiągalnych dziś dokładności i niezawodności świadczy fakt, że w styczniu 2017 roku Siemens doniósł, iż po wielomiesięcznych testach zainstalował wydrukowaną w 3D część w elektrowni jądrowej⁷⁰, gdzie wymagania bezpieczeństwa są bardzo wysokie. Z problemem dokładności i powtarzalności niezbędnej przy wytwarzaniu przemysłowym wiążą się teraz bardzo aktualne zagadnienia metrologii, czyli badania materiałów do drukowania oraz parametrów wydruków, a także ich certyfikacji. Oczywiście wymagania związane z bezpieczeństwem wyposażenia wnętrza samolotu są dużo niższe niż odpowiednie wymagania dotyczące jego silnika i obudowy, w których wytwarzaniu na razie rzadko stosuje się 3DP⁷¹. Wydaje się, że wyjątkiem są dysze silników samolotów odrzutowych drukowane przez GE Aviation⁷². Amerykańska Federalna Agencja Lotnicza (ang. *Federal Aviation Administration*, FAA) już w 2015 roku zaaprobowała wydrukowaną w 3D część silnika odrzutowego (obudowę sensora temperatury do pomiarów wewnątrz kompresora)⁷³.

Wprowadzanie 3DP/AM do produkcji przemysłowej jest stymulowane m.in. przez znaczny spadek cen drukarek do metalu. Do niedawna drukarka do metalu mogła kosztować ponad 100 tys. euro, niedawno (2017) opracowano biurkową drukarkę do metalu z dodatkowym wyposażeniem za 120 tys. dolarów⁷⁴, a ostatnio firma iro3d zaczęła dostarczać klientom biurkową drukarkę 3D do metalu za 5 tys. dolarów⁷⁵.

Gdy dyskutuje się o przemysłowych zastosowaniach druku 3D, mówi się często o rynkach pionowych⁷⁶, które nakierowane są na bardzo konkretne potrzeby pewnej grupy, w odróżnieniu od rynków poziomych, nastawionych na zaspokajanie potrzeb bardzo szerokich grup klientów o szerokim zakresie potrzeb. Klasyycznym tego przykładem jest rynek dentystryczny.

Warto również wspomnieć o dyskutowanym od jakiegoś czasu modelu rozproszonej produkcji 3DP w małych lokalnych przedsiębiorstwach, co w porównaniu z wytwarzaniem w pojedynczej dużej firmie⁷⁷ pozwala na zbliżenie produkcji do klientów i szybszą dostawę produktów. Jednym z wielu współczesnych przykładów takiego modelu produkcji jest

mikrofabryka firmy motoryzacyjnej Local Motors w Berlinie⁷⁸ oraz wspomniany powyżej startup Prismadd, który zaczął produkować drukowane w 3D tytanowe części samolotów dla Airbusa na skalę przemysłową⁷⁹. Jeszcze bardziej radykalne podejście to prosumeryzm, czyli domowe wytwarzanie produktów na sprzedaż⁸⁰ lub odpłacalne domowe drukowanie w 3D na własny użytek⁸¹, trochę przypominające produkcję pierwszych komputerów w garażach domków jednorodzinnych. Inne bardzo przyszłościowe trendy to automatyzacja druku 3D⁸² i/lub włączanie drukarek 3D do linii produkcyjnych⁸³. To ostatnie podejście związane jest również z produkcją hybrydową, łączącą drukowanie w 3D z wytwarzaniem tradycyjnym.

Od kilkunastu lat mamy do czynienia z burzliwym rozwojem zastosowań przemysłowych 3DP/AM:

1. Jak podaje guru 3DP, T. Wohlers, skumulowany roczny wskaźnik wzrostu (CAGR) przemysłu związany z drukiem 3D, obejmujący produkty i usługi, wyniósł w 2016 roku 21,7%⁸⁴. Taki procent wzrostu był trochę mniejszy od wartości 25,9% osiągniętej w poprzednim roku, ale ten sam wskaźnik podczas ostatnich 27 lat wyniósł średnio imponujące 26,2%. Sprzedaż drukarek biurkowych na plastik i inne materiały, ale nie metale, gwałtownie wzrosła w 2015 roku o 69,7%, do prawie 280 tys. egzemplarzy. Oczywiście sprzedaż drukarek do metalu, dużo droższych niż drukarki biurkowe, liczona na sztuki, była nieporównywalnie niższa, ale to głównie one odpowiadają za drukowaną w 3D produkcję przemysłową i przynoszą ogromne zyski.

Wspaniałe perspektywy rozwoju 3DP w latach 2016–2022, w rozbiciu na obszary: Amerykę Północną, Europę i obszar LAMEA (Amerykę Łacińską, Bliski Wschód i Azję), przedstawiła w raportach firma Research & Markets⁸⁵. Ta sama firma przedstawiła prognozy w rozbiciu na typy drukarek, rodzaj materiałów do drukowania i ich typów (proszki, ciecze, filamenty), procesy i technologie używane do drukowania, oprogramowanie i inne dziedziny (związane z zastosowaniami), a także czynnik geograficzny⁸⁶.

2. Wiele startupów wykorzystuje druk 3D, który dzięki szybkiemu prototypowaniu pozwala na szybkie sprawdzenie pomysłu na biznes, zwłaszcza że mogą one starać się o finansowanie na platformach zbierających fundusze (ang. *crowdsourcing* lub *crowdfunding*). Wśród takich platform najbardziej znany jest Kickstarter i jemu podobne⁸⁷, np. Indigogo. Przegląd polskich platform zbierania funduszy można znaleźć na stronie wethecrowd.pl/przewodnik-polskich-platformach-crowdfundingowych⁸⁸. Na platformie Indigogo zebrano fundusze na wydrukowany w 3D laptop, który uczy użytkownika, jak majsterkować, np. zrobić sobie taki komputer⁸⁹.

Strona Kickstartera, podsumowująca poszukiwania funduszy na różne drukarki 3D, zawiera bardzo wiele projektów. Nieliczne nie zdobyły żadnych funduszy, niektóre nie osiągnęły zamierzonego celu, ale wielu udało się zebrać potrzebne środki na uruchomienie produkcji. Jednym z rekordzistów jest firma Tiko prosząca o 100 tys. dolarów na tanią drukarkę 3D, której udało się zebrać od ponad 16 tys. darczyńców prawie 3 mln dolarów⁹⁰. Warto również

wspomnieć o polskiej firmie Zortrax, która również na Kickstarterze zdobyła fundusze na uruchomienie swojej rewelacyjnej drukarki M200⁹¹.

3. 3DP jest na tyle ważną dziedziną gospodarki, że niektóre kraje stworzyły specjalne programy wspomagające jej rozwój. Wymienię tu takie działania w kilku najważniejszych krajach: USA, Wielkiej Brytanii oraz Chinach, Korei i Japonii, a także system wprowadzony w Dubaju.

a. W USA istnieje Narodowa Sieć ds. Innowacji Ameryka Wytwarza (ang. *National Network for Manufacturing Innovations America Makes*) oraz specjalny system podatkowy, pozwalający na odliczenia wydatków związanych z badaniami m.in. w dziedzinie rozwoju i zastosowań druku 3D⁹². America Makes bywa nazywana narodowym przyspieszaczem (ang. *national accelerator*) druku 3D i wytwarzania przyrostowego⁹³.

Uruchomiono również specjalny system ulg podatkowych dla startupów⁹⁴ i firm zajmujących się biodrukiem, tzn. drukiem komórkami (ang. *bioprinting*)⁹⁵. Obok finansowania ogromnej liczby programów badawczych i implementacyjnych, m.in. przez agencję NASA⁹⁶ i Departament Obrony⁹⁷ oraz Narodowe Instytuty Zdrowia (ang. *National Institutes of Health*), które zorganizowały specjalną platformę internetową wymiany informacji dotyczących zastosowań 3DP w medycynie oraz plików do wydrukowania⁹⁸, zorganizowano też Narodowy Innowacyjny Instytut Wytwarzania Przyrostowego (ang. *National Additive Manufacturing Innovation Institute, NAMII*)⁹⁹.

b. W Wielkiej Brytanii powołano Grupę Sterującą (ang. *Steering Group, SG*) do spraw AM, która jest bardzo aktywna i składa się z przedstawicieli przemysłu, naukowców, rządu i organizacji zawodowych. Sformułowano tam strategię rozwoju 3DP¹⁰⁰, zawierającą kompleksową wizję rozwoju wraz z planem jej realizacji. SG zajmuje się badaniami w dziedzinach kosztów inwestycji, designu, własności intelektualnej, zabezpieczenia i bezpieczeństwa, materiałów i procesów, umiejętności/edukacji, standardów i atestacji, testowania i walidacji, a także czynnikami hamującymi rozwój 3DP/AM i publikuje doroczne raporty (p. powyżej).

W opracowanej przez SG strategii wymieniono czynniki ograniczające rozwój druku 3D. Dotyczą one zarówno używanych materiałów, jak i designu, standardów jakości, np. wyposażenia wnętrza samolotu¹⁰¹, a także braku wykwalifikowanego personelu oraz ograniczonego dostępu do finansowania. Raporty grupy SG są corocznie aktualizowane. Ważnym ogólnym tematem badań tej grupy jest niszczący wpływ AM na projektowanie, wytwarzanie i modele biznesowe w Wielkiej Brytanii oraz wartości dodane, które może ono przynieść gospodarce.

Długofalowy cel (w następnej dekadzie) to wykorzystanie możliwości stwarzanych przez AM na podstawie bieżącej, silnej pozycji kraju na rynku globalnym i wzmacnianie tej pozycji w przyszłości, jednocześnie chroniąc istniejące miejsca pracy i generując nowe, a także zwalczając rozdrobnienie tej dziedziny przemysłu i brak

wykwalifikowanej kadry. W Narodowej Strategii Zjednoczonego Królestwa na lata 2018–2025¹⁰² przedstawiono wizję rozwoju 3DP/AM, polegającą m.in. na współpracy przemysłu, naukowców, rządu i instytucji finansowych, dzięki którym Wielka Brytania pozostanie liderem w tej dziedzinie. Powstaje tam wiele inicjatyw, dzięki którym ludzie wiedzą więcej o 3DP/AM, a młodzież jest stymulowana do wybrania studiów STEM, m.in. przez młodych praktykantów firmy produkującej drukarki do metalu pokazane na wystawie MACH¹⁰³.

c. Burzliwy rozwój przemysłu związanego z drukiem 3D obserwujemy na Dalekim Wschodzie. Przewiduje się, że Chiny w najbliższych latach staną się największą potęgą w 3DP na świecie¹⁰⁴. W Chinach działa program „Made in China 2025”, obejmujący również druk 3D¹⁰⁵. Program ten prowadzi 5 wiodących uniwersytetów i 13 znanych firm w dziedzinie 3DP/AM. Zajmują się one drukarkami, materiałami do drukowania, komponentami i opracowaniem oprogramowania, a także standardami i certyfikacją oraz testowaniem i walidacją. Badane materiały obejmują metale, ceramikę, plastiki, materiały amorficzne, supramolekularne, kompozytowe i funkcjonalne, a także nano- i mikrowytwarzanie inteligentne (ang. *smart*) materiały oraz druk 4D.

Szybki innowacyjny rozwój jest silnie stymulowany przez państwo. Koszty tego programu są znacznie większe niż to, co przeznaczają się na rozwój 3DP/AM w państwach Zachodu¹⁰⁶. Na rozmach w finansowaniu 3DP/AM wskazuje również fakt, że do końca 2017 roku wszystkie z prawie 400 tys. szkół podstawowych w Chinach mają dysponować drukarkami 3D¹⁰⁷. Wiele firm aktywnych w 3DP/AM, np. HP i UPS, nawiązuje partnerską współpracę z firmami chińskimi. Gwałtowny rozwój AM w metalu w Chinach był możliwy m.in. dzięki niskim kosztom produkcji proszków metalicznych w tym kraju¹⁰⁸. Jednym z najsilniejszych graczy na rynku 3DP jest Korea Południowa, która wprowadziła projekt rozwijania nowych technologii (*Multi-Scale Additive Manufacturing Lab*), oczywiście obejmujący również 3DP¹⁰⁹. W ramach tego projektu zaplanowano wydatki rzędu 37 mln dolarów na 3DP w 2017 roku i ulgi podatkowe związane z aktywnością w tej dziedzinie¹¹⁰, chociaż opublikowany w 2016 roku przez Hyundai Research Institute raport wymienia wiele ograniczeń w innowacyjności gospodarki koreańskiej również w dziedzinie 3DP/AM¹¹¹.

W Japonii, która wydaje się mniej zaawansowana w dziedzinie druku 3D, New Energy and Industrial Technology Development Organization finansuje m.in. programy zastosowania 3DP w medycynie regeneracyjnej¹¹². Rozwijane tam są różne dziedziny związane z drukiem 3D – od imitacji tradycyjnych naczyń z laki¹¹³ do nowoczesnych rozwiązań wykorzystujących rozwiązania w chmurze do usprawnienia procesów biznesowych w druku 3D¹¹⁴.

d. Dubaj do niedawna był niewielkim, bardzo bogatym emiratem (wcale nie tylko dzięki ropie naftowej; miał bardzo

zróznicowaną, lecz nie innowacyjną gospodarkę). Trudno jest zdobyć dane na temat innowacyjności jego gospodarki, bo Globalny Indeks Innowacyjności (ang. *Annual Global Innovation Index*)¹¹⁵ podaje jedynie dane zbiorcze dla Zjednoczonych Emiratów Arabskich, które są bardzo zróznicowane. Ale informacje na temat popierania innowacyjności, w tym 3DP, docierające z Dubaju są fascynujące. Wykorzystując druk 3D w Dubajskiej Oazie Krzemowej (*Dubai Silicon Oasis*¹¹⁶), w 2014 roku zajmowano się projektem ekologicznym polegającym na opracowaniu sensora inteligentnego miasta (ang. *Smart City Sensor*) do monitorowania recyklingu¹¹⁷, i w tym samym roku otworzono pierwszą fabrykę drukującą w 3D¹¹⁸. We wrześniu 2016 roku zainicjowano w ZEA program popierania innowacyjnych technologii 3D Printing Strategy¹¹⁹, skoncentrowany na budownictwie, towarach konsumpcyjnych i zastosowaniach medycznych¹²⁰.

W jego ramach działa agencja Dubai Future Accelerators¹²¹, reklamująca się jako najbardziej efektywna agencja rządowa tego typu na Ziemi. W swojej siedzibie, pierwszym na świecie wydrukowanym w 3D w 2016 roku w ciągu 17 dni budynku biurowym¹²², popiera ona, obok innych nowoczesnych technologii, 3DP. Przy budowie tego budynku korzystano z megadrukarki o wymiarach $6 \times 12 \times 36 \text{ m}^3$, zaś w następnym roku zaplanowano budowę tą samą metodą wysokościewca. Warto również wspomnieć o zastosowaniach w medycynie, które były przedstawione na konferencji „Arab Health”¹²³. W ramach rozwoju tej dziedziny mają być opracowane bioniczne protezy kończyn, które w 2025 roku mają kosztować ok. 100 dolarów za sztukę¹²⁴. Warto wspomnieć o zastosowaniu 3DP do produkcji różnych elementów w dubajskim metrze¹²⁵. Kraj ten ma znaczne ilości pieniędzy, które nie od dziś bardzo efektywnie inwestuje w rozwój.

Specjalne programy związane z drukiem 3D mają również Niemcy (ang. *Fraunhofer Additive Manufacturing Alliance*), Francja (ang. *Industry of the Future*) i Kanada (ang. *Multi-Scale Additive Manufacturing Lab*).

4. Burzliwemu rozwojowi 3DP towarzyszą zmiany tej technologii. Obecnie największe firmy działające w tej dziedzinie to amerykańsko-izraelski Stratasys i amerykański 3D Systems, ale ostatnio na rynek tej technologii weszło kilka gigantów, znanych dotychczas z aktywności w innych dziedzinach, takich jak Hewlett-Packard, Canon, Microsoft czy BASF, a GE, Siemens i inne wielkie korporacje stosują 3DP/AM, a także opracowują przemysłowe zastosowania druku 3D w różnych dziedzinach. Konkurencyjność wymusza zmiany: niektóre firmy zwalniają impet, wycofują się z rynku lub upadają, inne zmieniają model biznesowy (np. polski Jelwek, który na pewien czas przestał się z produkcji drukarek na usługi drukowania w 3D; inf. prywatna).
5. Interesującą właściwością 3DP jest jego niszczący charakter, który charakteryzuje każdą nową technologię¹²⁶. W pewnych sytuacjach warto wykorzystać technologie hybrydowe, łączące 3DP z innymi, bardziej klasycznymi metodami wytwarzania¹²⁷.
6. Wydaje się, że ważnym kierunkiem w przyszłości będzie powiązanie 3DP i jego zastosowań z rozwojem nanotechnologii¹²⁸. Rewolucyjna drukarka DragonFly 2020 firmy Nano Dimension¹²⁹, opracowana w celu drukowania układów scalonych, to tylko jeden z kroków w tym kierunku¹³⁰. Warto również wspomnieć o drukowaniu w 3D mikrobatarii litowo-jonowej¹³¹ o rozmiarach $1\text{--}10 \text{ mm}^3$ lub mniejszych¹³², o zastosowaniu druku w 3D i nanotechnologii do wykrywania toksycznych cieczy¹³³ czy też o drukowaniu optyki w nanoskali¹³⁴.
7. Sensacją, nie tylko w Polsce, była informacja, że nie doszło do transakcji polskiej firmy Zortrax z koncernem Dell, którą przedstawiano jako kamień węgielny wspaniałej, światowej kariery Zortraxu¹³⁵.

W burzliwym rozwoju 3DP napotyka na bariery wymienione m.in. w angielskiej Narodowej Strategii Rozwoju Druku w 3D¹³⁶. Sophie Jones z firmy Added Scientific¹³⁷ tak formułuje niektóre tendencje rozwoju w 2017 roku i przewidywania na następne lata:

1. Dostosowanie procesów do metod produkcyjnych, ponieważ mimo długiego rozwoju architektura drukarek właściwie się nie zmieniła. Są one dzisiaj szybsze i bardziej niezawodne, ale niekoniecznie dostosowane do procesów produkcyjnych (np. do produkcji taśmowej¹³⁸). W przyszłości pojawią się nowe procesy konkurencyjne w stosunku do modeli biznesowych procesów dzisiejszych.
2. Pojawią się systemy drukujące różnymi materiałami w tym samym czasie. Dotyczyć to będzie nie tylko drukowania podobnymi do siebie polimerami – co umożliwiają stosowane dziś drukarki wykorzystujące technologię natryskiwania materiałowego (ang. *material jetting*) – lecz również jednoczesnego wykorzystania różnorodnych materiałów, np. metali, plastików, półprzewodników i materiałów biologicznych. Powstaną wtedy nowe możliwości w sektorach elektroniki użytkowej, urządzeń biomedycznych i innych, prowadzące do tworzenia urządzeń naszalnych (ang. *wearable*) oraz Internetu Rzeczy.
3. Tworzenie nowych narzędzi projektowania. Dość często tradycyjne oprogramowanie CAD nie wystarcza do celów specyficznych dla 3DP¹³⁹. Powstaną nowe narzędzia projektowania oparte o woksele (ang. *voxel*)¹⁴⁰, zawierające wyniki skanowania i symulacji. Będą one zawierały systemy zarządzania produkcją pomagające inżynierom i projektantom optymalizować projekty do drukowania w 3D. Wydaje się, że w tę stronę rozwija się inteligentny ekosystem wytwarzania (ang. *Smart Manufacturing Ecosystem*), który obejmuje nie tylko 3DP¹⁴¹. Obok tworzenia nowych narzędzi do programowania warto również wspomnieć o tworzeniu całych platform do wytwarzania, takich jak Divergent Manufacturing Platform¹⁴².
4. Ramy prawne. W tym aspekcie mówi się głównie o zagrożeniach prawa do własności intelektualnej w 3D. Wydaje się, że konieczne jest stworzenie regulacji prawnych, które będą dotyczyć dużo szerszych problemów prawnych niż tylko IP. W szczególności istnieje konieczność sformułowania

regulacji prawnych dotyczących zastosowań 3DP w farmacji i opiece zdrowotnej.

Z kolei na trzeciej konferencji firmy prawnej Benesch, poświęconej drukowi 3D, wymieniono jako ograniczenia jego rozwoju: brak edukacji na temat tej technologii, koszt materiałów i skomplikowanie oprogramowania w porównaniu z wiedzą ogólną¹⁴³, na co wskazują również opracowania brytyjskie¹⁴⁴. Wydaje się, że te ograniczenia w mniejszym stopniu dotyczą zastosowań przemysłowych druku 3D, ale są istotne dla drukowania domowego, które ciągle nie może nabrać prawdziwego rozpędu. Propagowanie przemysłowych zastosowań 3DP podejmuje m.in. Stratasy w współpracy z Manufacturing Technology Center z Coventry (Wielka Brytania)¹⁴⁵. Wielonarodowa firma Hensoldt z główną siedzibą w Bawarii w Niemczech, działająca w dziedzinach obronności, przemysłu lotniczego i kosmicznego oraz elektroniki, prowadzi interesujący projekt mobilnego laboratorium produkcyjnego, który ma wspomóc firmy przy wprowadzaniu technologii AM¹⁴⁶.

W 2016 roku ponad połowa wytwarzania metodą 3DP wykorzystywała plastiki i żywice. Warto jednak zauważyć rosnący udział drukowania metalem. Według firmy 3Diligent w latach 2015–2016 miał on wzrosnąć z 14% do 27%, głównie dzięki użyciu nierdzewnej stali, tytanu i aluminium¹⁴⁷. Do tego rynku chce dołączyć tandem rosyjskiego giganta produkującego aluminium Rusal i indyjskiego koncernu Runaya Metsource Partner¹⁴⁸. Bardzo ważne z punktu widzenia zastosowań przemysłowych 3DP jest wprowadzenie drukarki Blackbelt¹⁴⁹, wyposażonej w przenośnik taśmowy, co pozwala na drukowanie bardzo długich obiektów oraz produkcję seryjną. Podobnie do seryjnej produkcji przeznaczony jest opracowany w ramach unijnej inicjatywy¹⁵⁰ system drukowania w 3D zoptymalizowany dla bardzo szybkiego wytwarzania małych części metalowych¹⁵¹.

Ważnym problemem, który wymaga rozwiązania w każdej firmie zajmującej się drukiem 3D, jest wybór modelu biznesowego¹⁵². Przykładowo, jedną z wielu decyzji, które należy podjąć, jest wybór między drukowaniem w jednym miejscu (np. tworząc farmy drukarek¹⁵³) a drukowaniem rozproszonym.

Zmiany w sposobie prowadzenia biznesu w dziedzinie 3DP, zwłaszcza dla startupów, omówiono na blogu portalu 3D Print Pulse¹⁵⁴, wskazując, że zmienia on sposób wytwarzania produktów. Zanim 3DP weszło do masowego użycia, projektowanie, prototypowanie i wytwarzanie były czasochłonne i kosztowne, nie pozwalając wielu młodym firmom zaistnieć. Wprowadzenie druku 3D zmieniło to w zasadniczy sposób, znacznie obniżając potrzebny czas i wydatki. Trzy czynniki odgrywają tutaj ważną rolę:

1. Jeśli chodzi o design, to najważniejsza jest możliwość drukowania w 3D rzeczy, których nie można było wytworzyć przedtem innymi metodami. Designerzy są teraz nieporównanie mniej ograniczeni warunkami wytwarzania i mogą się skoncentrować na jak najbardziej efektywnym designie ściśle powiązanych z funkcjonalnością.
2. Zmiana sceny startupowej. Przedsiębiorcy mający ciekawy pomysł na produkt mogą go szybko i tanio zaprojektować. Możliwość szybkiego wykonania i sprawdzenia

pomysłu dzięki drukowi 3D zmienia warunki startu w biznesie. Zauważają to już wielu inwestorzy.

3. Innowacje. Druk 3D rozszerza granice innowacyjnego designu, ale szeroko zakrojone innowacje zmieniają również samą technologię. Zmieniają się stosowane do druku materiały (już nie tylko plastik, lecz coraz częściej metal, ceramika itd.), procesy drukowania i drukarki. Na razie nie spełniły się nadzieje pokładane w rynku druku domowego, ale burzliwie rozwija się rynek przemysłowy.

Powyższe czynniki spowodują dalszy burzliwy rozwój druku 3D, jednocześnie likwidując znaczną część istniejącego przemysłu i zmieniając całkowicie krajobraz przemysłowy.

Największy udział w zastosowaniach 3DP, wyłączając zastosowania medyczne, mają przemysły motoryzacyjny, lotniczy i kosmiczny. O jego wykorzystaniu w celach militarnych niewiele wiadomo. Bardzo ważne są również zastosowania w przemyśle gazowym, naftowym i energetycznym (m.in. do produkcji wirników, statorów, dyszy turbin, elementów i modeli narzędzi do wiercenia, części przepływomierzy, zaworów i kolektorów pomp), ale nie należy ignorować możliwości 3DP (m.in. w budownictwie, elektronice oraz przemysłach spożywczych i jubilerskim).

Nie wiem, do którego rozdziału włączyć mikrofluidykę i laboratorium na chipie (ang. *lab-on-chip*), ale warto o nich wspomnieć, gdyż 3DP jest w nich coraz częściej stosowany¹⁵⁵. Ostatnio (marzec 2018) opracowano wydrukowane w 3D urządzenia mikrofluidyczne do analizy komórek, które jest znacznie tańsze (600 dolarów) od dotychczasowych, i – co ważne – jego projekt jest otwarty¹⁵⁶. Bardzo obiecujące są większe reaktory chemiczne zbudowane przez zespół Cronina¹⁵⁷.

Przewidywany rozwój 3DP w najbliższych latach omówił Stephen Chadwick z Dassault Systèmes¹⁵⁸. Innowacje w tej dziedzinie mają spowodować większe zasięgi samolotów i raket, ich mniejszą wagę oraz zredukowaną emisję zanieczyszczeń powietrza dzięki modelowaniu matematycznemu części przed ich produkcją. Modelowanie, w tym przypadku zwane wirtualnym testowaniem, nie tylko opisze np. zachowanie części w warunkach stresu, lecz również uwzględni czwartą współrzędną – czas, pokazując zużycie tej części w miarę upływu czasu. Uwagi Chadwicka dotyczyły przemysłu lotniczego i kosmicznego, ale omówiona w nich integracja oprogramowania powiązana z przemianami modeli biznesowych dotyczy również innych gałęzi przemysłu. Oprogramowanie to powinno powiązać modelowanie i testowanie produktów przed ich wytwarzaniem z procesem produkcyjnym oraz analizą działania wydrukowanych w 3D części w czasie uwzględniającą ich zużycie (zwane wirtualnym testowaniem)¹⁵⁹. Warto dodać, że firma Markets & Markets ocenia, że cały rynek 3DP/AM ma osiągnąć wartość 32,78 mld dolarów w 2023 roku, zaś w latach 2017–2023 jego przewidywany skumulowany roczny czynnik wzrostu CAGR ma osiągnąć 25,76%¹⁶⁰. Warto zaznaczyć, że różni analitycy podają nieco różniące się wartości, ale wszyscy oni zgadzają się co do przewidywanych trendów. Na blogu sculpteo pojawiła się porada, jak zidentyfikować możliwości zyskowego wprowadzenia (ang. *business opportunities*) druku

3D do twojej firmy¹⁶¹. W 2017 roku pokazano, że w USA drukowanie w 3D opłaca się nie tylko w przemyśle, lecz również w domu¹⁶². Początkującej studentce na kierunku technicznym, która nie miała pojęcia o druku 3D, podarowano drukarkę i polecono jej zapisywać, jak jej używa. Po roku okazało się, że zakup drukarki okazał się dla niej korzystny.

Przypisy

- 1 C. WELLER, R. KLEER, F.T. PILLER, *Economic Implications of 3D Printing: Market Structure Models in Light of Additive Manufacturing Revisited*, „J. Production Economics” 2015, 43–56, s. 164;
- 2 C. WELLER, R. KLEER, F.T. PILLER, marzec 2015, https://www.researchgate.net/publication/273525202_Economic_Implications_of_3D_printing_Market_structure_Models_in_light_of_additive_manufacturing_Revisited.
- 3 S.A. GOEHRKE, 30.08.2018, https://www.fabbaloo.com/blog/2018/8/30/digifabster-interview?utm_source=feedblitz&utm_medium=FeedBlitzRss&utm_campaign=fabbaloo/default.
- 4 L. GAGET, 24.07.2018, <https://www.sculpteo.com/blog/2018/07/24/study-3d-printing-inaeronautics-a-real-game-changer/>.
- 5 S. DAVIES, 23.04.2018, <https://www.tctmagazine.com/tct-events/3d-printing-at-rapid-tct/stratasys-launches-new-prototyping-and-production-3d-printer/>.
- 6 <https://www.am-conference.com/>.
- 7 <http://www.tctshow.com/>.
- 8 A. CHENG, 22.05.2018, <https://www.forbes.com/sites/andriacheng/2018/05/22/with-adidas-3d-printing-may-finally-see-its-mass-retail-potential/#725b281e4a60>.
- 9 *HP and Deloitte Announce Alliance to Accelerate Digital Transformation of US \$12 Trillion Global Manufacturing Industry*, 24.08.2017, <https://press.ext.hp.com/us/en/press-releases/2017/hp-and-deloitte-announce-alliance-to-accelerate--digital-transfo.html>.
- 10 https://www.sculpteo.com/en/get/report/state_of_3D_printing_2017/.
- 11 M. COTTELEER, 7.04.2014, <https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/3d-opportunity/additive-manufacturing-3d-opportunity-in-tooling.html>.
- 12 R. LAKSHMIPATHY, 16.08.2017, <http://blogs.solidworks.com/solidworksblog/2017/08/can-identify-best-design.html>.
- 13 J.D. ALBERT, 9.12.2015, <http://www.bresslergroup.com/blog/the-six-prototypes-everystartup-needs-to-make/>.
- 14 *Virtual Foundry: Desktop 3D Metal Printing Today*, 11.07.2018, <https://3dprintingindustry.com/news/virtual-foundry-desktop-3d-metal-printing-today-136052/>.
- 15 B. JACKSON, 21.06.2018, <https://3dprintingindustry.com/news/general-motors-saves-300000-by-switching-to-3d-printed-tooling-134991/>.
- 16 H.G. LEMU, S. KURTOVIC, *3D Printing for Rapid Manufacturing: Study of Dimensional and Geometrical Accuracy, w: Advances in Production Management Systems. Value Networks: Innovation, Technologies, and Management*, J. FRICK, N.T. LAUGEN (RED.), „IFIP Advances in Information and Communication Technology” 2012, Vol 384. Springer, Berlin, Heidelberg, https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-33980-6_51, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-33980-6_51.
- 17 M. HOLWEG, 23.06.2015, <https://hbr.org/2015/06/the-limits-of-3d-printing>.
- 18 <http://www.tctshow.com>.
- 19 A. LEANDRI, 17.09.2015, <https://3dprintingindustry.com/news/a-look-into-powder-materials-for-metal-3d-printing-57788/>.
- 20 <http://www.hybridmanutech.com/>.
- 21 *Additive Manufacturing UK. National Strategy 2018–2025*, <http://am-uk.org/project/additive-manufacturing-uk-national-strategy-2018-25/>.
- 22 A. LOCKER, 23.04.2017, <https://all3dp.com/1/worlds-fastest-3d-printer-speed-3d-printing/>.
- 23 Na przykład S. Touw, 3.10.2016, <https://3dprinting.com/lighting/smooth-3d-printing-no-post-processing-required-with-printoptical-technology/>; J. Anderton, 5.06.2017, <http://www.engineering.com/AdvancedManufacturing/ArticleID/15041/VIDEO-How-to-Eliminate-Post-Processing-in-Additive-Manufacturing.aspx>; S. Charlesworth, 16.05.2016, <http://www.tested.com/tech/3d-printing/570369-bits-atoms-how-carbons-clip-3d-printing-technology-works/>.
- 24 <http://ajmaker.pl/produkt/3dgence-double-drukarka-3d/>.
- 25 K. STEVENSON, 21.06.2018, http://www.fabbaloo.com/blog/2018/6/21/3d-printing-may-change-mass-manufacturing-expectations?utm_source=feedblitz&utm_medium=FeedBlitzRss&utm_campaign=fabbaloo/default.
- 26 <https://wohlersassociates.com/2017report.htm>.
- 27 <https://ec.europa.eu/growth/tools-databases/dem/watify/about-watify>.
- 28 https://en.wikipedia.org/wiki/Chuck_Hull.
- 29 Fabian, 9.11.2015, <https://i.materialise.com/blog/3d-printing-file-formats/>.
- 30 S. SAUNDERS, 1.03.2017, <https://3dprint.com/166552/amsc-publishes-final-roadmap/>; <http://www.stratasys.com/aerospace/aircraft-interiors>.
- 31 E. UTLEY, 15.05.2017, <http://blogs.solidworks.com/solidworksblog/2017/05/6-ways-reduce-development-costs-industrial-3d-printing.html>.
- 32 U. IFTIKHAR, 3.10.2018, <https://3dprintingindustry.com/news/ai-build-enables-autonomous-3d-printing-factories-141008/>.
- 33 *Additive Manufacturing UK. National Strategy 2018–2025*, <http://am-uk.org/project/additive-manufacturing-uk-national-strategy-2018-25/>.
- 34 Premium AEROTEC, Daimler, EOS, 19.04.2017, <https://www.premium-aerotec.com/en/media/press-releases/premium-aerotec-eos-and-daimler-prepare-the-next-generation-of-industrial-3d-printing/>.
- 35 <https://www.am-conference.com/>.
- 36 <https://www.iso.org/certification.html>.
- 37 <https://www.americamakes.us/>.
- 38 <https://www.ansi.org/>.
- 39 L. GRFFITHS, 28.06.2018, <https://www.tctmagazine.com/3d-printing-news/america-makes-ansi-version-2-standardization-additive-manufacturing/>.

- 39 M. HUMBLERS, 24.04.2017, <http://www.computerworld.com/article/3192085/internet-of-things/ceos-rate-productivity-very-low-from-emerging-tech.html>.
- 40 Ibidem.
- 41 M. PETCH, 24.08.2016, <https://3dprintingindustry.com/news/stratasys-announce-infinitebuild-robotic-composite-share-price-jumps-94711/>.
- 42 M. NEILSON, <http://www.stratasys.com/demonstrators>.
- 43 M. PETCH, 24.04.2017, <https://3dprintingindustry.com/news/siemens-using-3d-printingcut-production-time-weeks-days-111335/>.
- 44 *Print Me a Stradivarius*, 10.02.2011, <https://www.economist.com/node/18114327>.
- 45 <https://www.youtube.com/watch?v=trwy2Z-e2GA>.
- 46 <https://www.youtube.com/watch?v=gF0pOUBS3sg>.
- 47 <http://www.ge.com/reports/tag/3d-printing/>.
- 48 <https://www.siemens.com/press/en/feature/2014/corporate/2014-03-3d-druck.php>.
- 49 <https://www.ge.com/additive/>.
- 50 T. KELLNER, 13.11.2017, <http://www.ge.com/reports/epiphany-disruption-ge-additivechief-explains-3d-printing-will-upend-manufacturing/>.
- 51 *GE Additive Acquires Simulation Software Developer GeonX*, 16.11.2017, <https://www.tctmagazine.com/tct-events/formnext-powered-by-tct/ge-additive-geonx-software/>.
- 52 J. KEOUGH, 15.12.2016, <https://www.inddist.com/news/2016/12/ge-sell-two-industrial-units-expand-additive-mfg-investment>.
- 53 T. KELLNER, 14.11.2017, <https://www.ge.com/reports/an-engineers-dream-ge-unveils-a-huge-3d-printer-for-metals/>.
- 54 <https://www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/industry-and-automation/additive-manufacturing-3d-printed-gas-turbine-blades.html>.
- 55 <https://www.thomasnet.com/profile/30847744/star-rapid.html>.
- 56 D. MANTEY, 20.07.2018, https://news.thomasnet.com/featured/tractor-uses-3d-printed-part-to-haul-2-600-pounds?channel=newsletter&campaign_type=PNA&campaign_name=0718&utm_campaign=0718&utm_medium=newsletter&utm_source=PNA&tinid=221779953.
- 57 Javelin Technologies, 16.07.2018, <http://blogs.solidworks.com/solidworksblog/2018/07/harness-the-power-of-solidworks-electrical-3d.html>.
- 58 J. LEITLOFF, 6.03.2015, <https://3dprintingindustry.com/news/how-3d-printing-is-changing-the-game-of-designer-jewelry-43857/>.
- 59 L. GAGET, 18.04.2018, <https://www.sculpteo.com/blog/2018/04/18/3d-printing-lattices-find-the-best-lattice-generation-tools/>.
- 60 I.J. PETRICK, T.W. SIMPSON, *3D Printing Disrupts Manufacturing: How Economies of One Create New Rules of Competition*, „Research-Technology Management” 2013, Vol. 56(6), s. 12–16.
- 61 *Florida Jeweller Switches to EnvisionTEC’s cDLM for Increased Speed and Accuracy*, 12.04.2018, <https://envionttec.com/case-studies/manufacturing/florida-jeweller-switches-to-enviontecs-cdlm-for-increased-speed-and-accuracy/>.
- 62 *3D Printers Expand Beyond Prototyping Transform Manufacturing*, 20.02.2015, <https://spark.autodesk.com/blog/3d-printers-expand-beyond-prototyping-transform-manufacturing>.
- 63 <https://www.youtube.com/watch?v=zXE-icw28n8>.
- 64 J. VINCENT, 7.04.2017, <https://www.theverge.com/2017/4/7/15216724/adidas-3d-printed-sneaker-futurecraft>.
- 65 TCTMagazine, *Canalys on the State of the 3D Printing Industry at CES*, 13.05.2016, <http://www.tctmagazine.com/3d-printing-at-ces/canalys-state-of-3d-printing-industry-ces/>.
- 66 *French 3D Printing Startup Prismadd Begins Industrial Production*, 30.01.2017, <https://www.3ders.org/articles/20170130-french-3d-printing-startup-prismadd-begins-industrial-production.html>.
- 67 T. WOHLERS, 28.01.2017, <https://wohlersassociates.com/blog/2017/01/forecasting-the-future/>.
- 68 Kira, 7.04.2016, <http://www.3ders.org/articles/20160407-airbus-group-to-establish-3d-printing-aerospace-factory-germany.html>.
- 69 C. CLARKE, 21.03.2017, <https://3dprintingindustry.com/news/winsun-lease-concrete-3d-printers-saudi-arabia-billion-dollar-constuction-deal-108715/>.
- 70 S. SAUNDERS, 9.03.2017, <https://3dprint.com/167384/siemens-nuclear-power-plant-part/>.
- 71 P. JONAS, <http://www.stratasys.com/aerospace/aircraft-interiors>.
- 72 T. KELLNER, 15.07.2014, <https://www.ge.com/reports/post/91763815095/worlds-first-plant-to-print-jet-engine-nozzles-in/>.
- 73 T. KELLNER, 14.04.2014, <http://www.ge.com/reports/post/116402870270/the-faa-cleared-the-first-3d-printed-part-to-fly/>.
- 74 C. SEMBERA, 23.05.2018, <https://all3dp.com/all3dp-visits-desktop-metal/>.
- 75 B. JACKSON, 1.11.2018, <https://3dprintingindustry.com/news/iro3d-starts-shipment-of-5000-metal-3d-printer-142483/>.
- 76 https://en.wikipedia.org/wiki/Vertical_market.
- 77 J. PEELS, 16.05.2017, <https://3dprint.com/174375/decentralize-production-3d-print/>.
- 78 S. SAUNDERS, 23.12.2016, <https://3dprint.com/159726/local-motors-berlin-microfactory/>.
- 79 Tess, 30.01.2017, <https://www.3ders.org/articles/201701-30-french-3d-printing-startup-prismadd-begins-industrial-production.html>.
- 80 E.E. PETERSEN, J. PEARCE, „Technologies” 2017, No. 5(1), 7, <http://www.mdpi.com/2227-7080/5/1/7/html>, doi: 10.3390/technologies5010007.
- 81 S. SAUNDERS, 16.02.2017, <https://3dprint.com/165246/mtu-at-home-3d-printing-study/>.
- 82 C. SCOTT, 15.03.2017, <https://3dprint.com/167938/project-skywalker-vooodoo/>.
- 83 S. SAUNDERS, 12.04.2017, <https://3dprint.com/170887/coobx-liftcell-production-lines/>.
- 84 M. MOLITCH-HOU, 27.04.2017, <http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/14795/Review-Wohlers-Report-2017-Offers-Broad-Insights-into-3D-Printing-Industry.aspx>.
- 85 B.B. O’NEAL, 11.07.2016, <https://3dprint.com/141762/research-and-markets-2022/>.
- 86 3d Printing Market by Printer Type Material Type, lipiec 2017, <http://www.researchandmarkets.com/>

- reports/3673542/3d-printing-market-by-printer-type-material-type.
- 87 <https://www.floship.com/kickstarter-alternatives-you-should-know-about/>.
- 88 A. BĘCZKOWSKI, 3.04.2017, <http://wethecrowd.pl/przewodnik-po-polskich-platformach-crowdfundingowych/>.
- 89 M. MOLITCH-HOU, 10.11.2014, <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printed-diy-laptop-teaches-diy-36130/>.
- 90 <https://www.kickstarter.com/projects/tiko3d/tiko-the-unibody-3d-printer>.
- 91 <https://www.kickstarter.com/projects/zortrax/zortrax-m200-professional-desktop-3d-printer>.
- 92 G. SAVELL, A. BONAFE, C. GOULDING, <http://www.rdtaxsavers.com/articles/US-3D-Printing-Initiative>.
- 93 S. SAUNDERS, 29.06.2018, <https://3dprint.com/218069/am-standards-roadmap-version-2/>.
- 94 C. GOULDING, 17.04.2017, <https://3dprint.com/171471/tax-incentives-3d-printer-startups/>.
- 95 C. GOULDING, 28.05.2017, <https://3dprint.com/176102/rd-tax-credit-for-3d-bioprinting/>.
- 96 <https://www.nasa.gov/topics/technology/manufacturing-materials-3d/index.html>.
- 97 Y. YOUNG, 26.01.2017, <https://3dprint.com/162896/pentagon-supports-3d-printing/>.
- 98 <https://3dprint.nih.gov/>.
- 99 <https://www.americamakes.us/>.
- 100 <http://www.amnationalstrategy.uk/>.
- 101 <http://www.stratasys.com/aerospace/aircraft-interiors>.
- 102 M. PETCH, 9.10.2017, <https://3dprintingindustry.com/news/uk-additive-manufacturing-national-strategy-2018-25-published-3d-printer-122461/>.
- 103 Renishaw, Renishaw Apprentices Inspire a New Generation of Engineers at MACH 2018, 4.07.2018, <http://www.renishaw.com/en/renishaw-apprentices-inspire-a-new-generation-of-engineers-at-mach-2018-43639>.
- 104 N. HALL, 21.05.2016, <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-explodes-china-79707/>.
- 105 https://en.wikipedia.org/wiki/Made_in_China_2025.
- 106 R. PARK, 2.08.2018, <https://www.fabbaloo.com/blog/2018/8/2/additive-international-2018-niiamc-an-additive-manufacturing-city>.
- 107 B. KRASSENSTEIN, 8.04.2015, <https://3dprint.com/56699/china-3d-printers-schools/>.
- 108 Simmtime, 28.12.2017, http://www.simmtime.com/news_en.htm?dId=651.
- 109 C. SCOTT, 27.12.2016, <https://3dprint.com/159934/south-korea-economics-tech/>.
- 110 Tess, 1.06.2017, <http://www.3ders.org/articles/20170601-south-korean-researchers-to-develop-3d-bioprinting-ear-reconstruction-process.html>.
- 111 C. SCOTT, 17.08.2016, <https://3dprint.com/146134/south-korea-industry-4-0/>.
- 112 J. YOUNG, 21.11.2016, <https://3dprint.com/155980/japanese-3d-printing-industry/>.
- 113 H. FUKASAWA, <https://www.rinkak.com/us/urushi?hl=en>.
- 114 <https://www.3dprinting-mms.com/en/>.
- 115 <https://www.globalinnovationindex.org/gii-2016-report>.
- 116 <https://www.dsoa.ae/en/>.
- 117 <https://3dprint.com/21170/uae-green-prototype-3d-print/>.
- 118 S. TAYLOR, 19.06.2014, <https://3dprintingindustry.com/news/dubaisfirst-direct-digital-factory-future-28510/>.
- 119 B.B. O'NEAL, 26.02.2017, <https://3dprint.com/tag/united-arab-emirates-3d-printing-strategy/>.
- 120 S. SAUNDERS, 3.01.2017, <https://3dprint.com/160522/dubai-future-accelerators-2/>.
- 121 <https://dubaifutureaccelerators.com/en>.
- 122 H.R. MENDOZA, 14.06.2016, <https://3dprint.com/138336/syska-hennessy-dubai-office/>.
- 123 *3D Printing for Medical Purposes Highlighted at Dubais 'Arab Health'*, 2.03.2017, <http://www.euronews.com/2017/02/03/3d-printing-for-medical-purposes-highlighted-at-dubai-s-arab-health>.
- 124 S. SAUNDERS, 31.05.2017, <https://3dprint.com/176392/3d-printed-prosthetic-leg-dubai/>.
- 125 *Next Station: 3D Printed Sprae Parts for Dubai Metro*, 3.09.2017, <https://www.khaleejtimes.com/news/transport/next-station-3d-printed-spare-parts-for-dubai-metro>.
- 126 U. KYLAU, K. GOERLICH, R. MITCHELL, 28.07.2015, <http://www.digitalistmag.com/executive-research/how-3d-printing-will-disrupt-manufacturing>.
- 127 S.A. GOEHRKE, 18.01.2017, <https://3dprint.com/162125/hybrid-technologies-are-the-future/>.
- 128 M. LEE, H.-Y. KIM, „Langmuir” 2014, 30(5), s. 1210–1214, <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/la404704z>.
- 129 <http://www.nano-di.com/3d-printer>.
- 130 <http://www.machinedesign.com/3d-printing/who-s-who-3d-printing-electronics>.
- 131 K. SUN, T.S. WEI, B.Y. AHN, J.Y. SEO, S.J. DILLON, J.A. LEWIS, „Adv Mater.” 2013, No. 25(33), s. 4539-45443, doi: 10.1002/adma.201301036.
- 132 C.Y. LIU, X.X. CHENG, C.S. LAO, *The Application of 3D Printing in Lithium-ion Batteries*, International Conference on Mechanical Engineering and Control Automation (ICMECA 2017) 2017, s. 244–250.
- 133 <https://phys.org/news/2017-01-d-nanotechnology-mighty-alliance-toxic.html>.
- 134 <https://3dprint.com/163289/nanoscribe-3d-print-micro-optics/>.
- 135 M. MOLITCH-HOU, 2.08.2016, <https://3dprint.com/144633/zortrax-deal-never-happened/>.
- 136 <http://www.amnationalstrategy.uk/>.
- 137 http://www.disruptivemagazine.com/opinion/growing-additive-manufacturing-and-3d-printing-30?dm_i=3792,DYHV,3IR-97S,1EW19,1.
- 138 <http://blackbelt-3d.com/>.
- 139 A.S. THOMAS, 26.01.18, <https://www.shapeways.com/blog/archives/27653-cad-vs-modeling-which-3d-software-to-choose.html>.
- 140 <https://en.wikipedia.org/wiki/Voxel>.
- 141 <https://www.solidworks.com/media/smart-manufacturing-ecosystem>.
- 142 C. SCOTT, 20.03.2017, <https://3dprint.com/168401/divergent-3d-slm-solutions/>.

- 143 C. SCOTT, 14.04.2017, <https://3dprint.com/171290/benesch-third-3d-printing/>.
- 144 <http://www.amnationalstrategy.uk/>.
- 145 *Stratasys Aim To Be a Catalyst for Technological Change at the MTC*, 27.03.2017, <http://www.the-mtc.org/news-items/stratasys-aim-to-be-a-catalyst-for-technological-change-at-the-mtc>.
- 146 M. PETCH, 15.12.2017, <https://3dprintingindustry.com/news/hensoldt-suite-mobile-self-sufficient-3d-printing-cell-126212/>.
- 147 B.B. O'NEAL, 3.03.2017, <https://3dprint.com/166743/3diligent-3d-printing-report/>.
- 148 C. Scott, 14.04.2017, <https://3dprint.com/170982/rusal-runaya-joint-venture/>.
- 149 <http://blackbelt-3d.com/>.
- 150 <http://www.hyproline.eu/>.
- 151 S.J. Grunewald, 8.07.2016, <https://3dprint.com/141576/printvalley-mass-production/>.
- 152 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162515002425>.
- 153 T. KOSLOW, 8.04.2016, <https://3dprintingindustry.com/news/inside-3d-printing-nyc-turning-up-the-volume-printing-with-vooodoo-manufacturing-76004/>.
- 154 *Additive Manufacturing Is Bending the Rules*, 16.03.2017, <http://www.3dprintpulse.com/edition/monthly-additive-manufacturing-metal-2017-03?open-article-id=6333774&article-title=additive-manufacturing-is-bending-the-rules&blog-domain=3d-innovations.com&blog-title=3d-innovations>.
- 155 P.J. KITSON, M.H. ROSNES, V. SANS, V. DRAGONE, L. CRONIN, *Configurable 3D-Printed Millifluidic and Microfluidic „lab on a chip” Reactionware devices*, „Lab Chip” 2012, No. 12, s. 3267–3271; N. BHATTACHARJEE, A. URRIOS, S. KANG, A. FOLCH, The upcoming 3D-printing revolution in microfluidics, „Lab Chip” 2016; S. WAHEED, J.M. CABOT, N.P. MACDONALD, T. LEWIS, R.M. GUIJT, B. PAULL, C. BREADMORE, 3D Printed Microfluidic Devices: Enablers and Barriers, „Lab Chip” 2016, No. 16, s. 1993–2013.
- 156 R. HARIA, 1.03.2018, <https://3dprintingindustry.com/news/nygcs-3d-printed-microfluidic-kit-makes-cell-analysis-200-times-cheaper-129809/>.
- 157 <https://cen.acs.org/articles/96/i4/3-D-printed-reactors-construct.html>.
- 158 www.dassault.fr/.
- 159 *3D Printing Next 5 Years Stephen Chadwick Dassault Systèmes*, 19.04.2018, <https://3dprintingindustry.com/news/3d-printing-next-5-years-stephen-chadwick-dassault-systemes-111142>.
- 160 <http://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/3d-printing.asp>.
- 161 A. RICHARDOT, 27.06.2018, <https://www.sculpteo.com/blog/2018/06/27/our-10-best-tips-to-identify-3d-printing-opportunities-for-your-business/>.
- 162 S. SAUNDERS, 16.02.2017, <https://3dprint.com/165246/mtu-at-home-3d-printing-study/>.

Fragment pochodzi z książki:

Druk 3D/AM. Zastosowanie oraz skutki społeczne i gospodarcze,
H. Dodziuk, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2019