

Additive technologies in the context of industrial applications of 3D printing

Technologie przyrostowe w kontekście zastosowań przemysłowych druku 3D



DOI: 10.15199/62.2025.2.8

A review, with 67 refs., of the types of additive technologies, their application areas, and the current value of 3D printing in consumer market. Particular attention was paid to the use of additive technologies in manufacturing plants, and to the environmental risks and recycling possibilities of materials used in 3D printing. The safety of materials used in 3D printing was also discussed. Potential risks to printer users associated with the use of different types of materials that can cause emissions of volatile organic compounds (VOCs) and particulate matter were highlighted.

Keywords: 3D printers, stereolithography, emissions, additive manufacturing, toxicity of materials, volatile organic compounds

Omówiono rodzaje technologii przyrostowych, potocznie zwanych drukiem 3D, których zastosowanie przemysłowe charakteryzuje się dynamicznym wzrostem. Szczególną uwagę poświęcono obecnemu wykorzystaniu technologii addytywnych w zakładach produkcyjnych, aktualnej wartości druku 3D na rynkach konsumenckich (ok. 18 mld USD w 2023 r. na rynku globalnym), a także podkreślono możliwości recyklingu materiałów wykorzystywanych w druku 3D. Zwrócono uwagę na potencjalne zagrożenia dla użytkowników druku związane ze stosowaniem różnego rodzaju materiałów.

Słowa kluczowe: drukarki 3D, stereolitografia, emisje, produkcja addytywna, toksyczność materiałów, lotne związki organiczne

Alternatywą dla obróbki tzw. ubytkowej lub subtraktywnej dotyczącej procesów, takich jak skrawanie, erodowanie, toczenie i frezowanie są technologie wytwarzania przyrostowego, tzw. technologie addytywne (*additive manufacturing technologies*), które polegają na nadbudowywaniu poszczególnych warstw powstającego elementu. Technologie przyrostowe, jako spójna część Przemysłu 4.0, charakteryzują się dynamicznym rozwojem i coraz powszechniejszym wykorzystaniem w wielu zastosowaniach przemysłowych. Obejmują one przemysł budowlany¹⁾, lotniczy²⁾, elektroniczny³⁾, motoryzacyjny⁴⁾, odzieżowy⁵⁾, jubilerski⁶⁾, spożywczy⁷⁾, ale także zastosowania medyczne, takie jak stomatologia⁸⁾ i chirurgia szczękowo-twarzowa⁹⁾.

Zdecydowaną przewagą alternatywnych metod wytwarzania jest otrzymywanie skomplikowanych geometrii elementów z wykorzystaniem mniejszej ilości użytych surowców, krótszego czasu i niższych kosztów produkcji. Z drugiej strony, często przynoszące zyski rozwiązania obowiązujące w przemyśle przyczyniają się do pewnego hamowania, jeśli chodzi o wdrażanie technologii przyrostowych. W efekcie mówi się tu nie tylko o barierze technologicznej, ale często też barierze mentalnej. Ograniczeniem w zakresie wykorzystywania technologii przyrostowych w przemyśle może być też fakt, że w pewnych zastosowaniach elementy uzyskane w druku 3D mogą zużywać się szybciej niż te same wykonane metodami konwencjonalnymi.



Dr inż. Luiza CHOJNACKA-PUCHTA (ORCID: 0000-0002-3598-3719) ukończyła studia magisterskie na Międzywydziałowym Studium Biotechnologii Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. W 2012 r. uzyskała stopień naukowy doktora nauk rolniczych. Jest adiunktem w Zakładzie Zagrożeń Chemicznych i Pyłowych Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego w Warszawie. Specjalność – toksykologia, biologia molekularna, czynniki szkodliwe dla zdrowia w środowisku pracy.



Dr inż. Dorota SAWICKA (ORCID: 0000-0001-7096-5965) w roku 2009 ukończyła studia na Wydziale Rolniczym Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy (obecnie Politechnika Bydgoska). Stopień doktora nauk rolniczych w dyscyplinie zootechnika uzyskała w 2013 r. na Wydziale Hodowli i Biologii Zwierząt tej samej uczelni. Pracuje w Zakładzie Zagrożeń Chemicznych, Pyłowych i Biologicznych w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym w Warszawie. Specjalność – zagadnienia związane z toksycznością substancji chemicznych, biologia komórki, mikroskopia fluorescencyjna i holotomograficzna.

*** Adres do korespondencji:**

Zakład Zagrożeń Chemicznych, Pyłowych i Biologicznych, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa, tel.: (22) 623-46-59, fax: (22) 623-36-93, e-mail: lucho@ciop.pl

Rodzaje technologii przyrostowych

Proces wytwarzania docelowego elementu w technologii addytywnej zależy od rodzaju metody, która zostanie wdrożona. Obserwowany jest ciągły wzrost dostępnych metod drukowania przestrzennego, jednak wśród najpopularniejszych wykorzystujących warstwowy proces wytwarzania wyróżniana jest metoda FDM (*fused deposition modeling*), zamiennie nazywana przez innych producentów drukarek FFF (*fused filament fabrication*) lub LPD (*layer plastic deposition*); SLA (*stereolithography*), dla której metodą alternatywną jest DLP (*direct light processing*) lub DPP (*daylight polymer printing*) oraz metody wytwarzania wykorzystujące laser, takie jak SLS (*selective laser sintering*), DMLS (*direct metal laser sintering*) i SLM (*selective laser melting*).

Początki znanego dzisiaj druku 3D sięgają co najmniej 1984 r., kiedy Charles (Chuck) Hull wynalazł stereolitografię (SLA), metodę precyzyjnego drukowania wykorzystującą światło ultrafioletowe do tworzenia obiektów 3D. Hull pracował dla firmy, która wykorzystywała światło ultrafioletowe do nakładania na meble cienkich warstw forniru z tworzywa sztucznego. Zmodyfikował metodę i wykorzystał tę technikę do drukowania elementów stałych, a w 1986 r. założył firmę 3D Systems Corporation. W 1988 r. został sprzedany pierwszy na rynku system szybkiego prototypowania stereolitograficznego SLA-1¹⁰). Cały proces opiera się na fotochemicznym sieciowaniu i utwardzaniu materiału za pomocą laserów UV. Materiałem stosowanym do druku są żywice fotopolimerowe lub fotoutwardzalne materiały płynne. Pod wpływem wiązki lasera zachodzi proces polimeryzacji materiału warstwami, aż do otrzymania pożądanego kształtu wytwarzanego elementu. Proces ten pozwala na uzyskanie elementów precyzyjnych i o wygładzonej powierzchni poprzez nakładanie kolejnych warstw. Dość istotną wadą metody jest to, że żywice wykorzystywane w stereolitografii są wysoce toksyczne, a wydrukowany element poddawany jest oczyszczaniu w tzw. post-processingu. Alternatywą dla SLA są technologie utwardzania żywicy wykorzystujące różne sposoby emisji światła, takie jak DLP (wykorzystanie światła emitowanego za pomocą projektora, proces stworzony przez firmę Envision TEC)

lub DPP (światło emitowane jest z ekranu LCD, proces opracowany przez firmę Photocentric 3D). Dostępne są również technologie z wykorzystaniem natryskiwania żywicy, a następnie poddawaniu jej procesowi utwardzania pod wpływem światła UV (PolyJet lub MJP). Wydruki SLA charakteryzuje wysoka rozdzielczość, a wykorzystywane są w szczególności do tworzenia złożonych prototypów geometrii wewnętrznej lub np. modeli dentystycznych. Większość dostępnych w handlu drukarek 3D wykorzystuje techniki FDM lub SLA, które umożliwiają wytwarzanie struktur o wielkości centymetra, ale nie odtwarzają cech submikrometrowych. Osiągalna rozdzielczość cech SLA jest lepsza niż w technologii FDM, ale w dużym stopniu zależy od rodzaju źródła światła. Drukarki SLA bazujące na skanowanej plamce laserowej rutynowo odtwarzają rozdzielczość cech w zakresie 100 μm , podczas gdy w przypadku cyfrowej projekcji światła rejestrowana jest rozdzielczość cech sięgająca 18 \times 20 μm^2 (zamknięte mikrokanaliki)¹¹). Nowe techniki pozwalają na niezwykle precyzyjne drukowanie, a nowe materiały są odporne na działanie agresywnych chemikaliów, co otwiera drogę do ich zastosowania w testach diagnostycznych i szeroko stosowanych badaniach chemicznych.

Technologia FDM jest najpopularniejszą technologią druku 3D, tzw. technologią osadzania topionego materiału, wynalezioną przez Scotta Crumpa w 1988 r.¹²). Opiera się ona na modelowaniu ciekłym tworzywem termoplastycznym, czyli na topieniu tzw. filamentu i nanoszeniu na stole roboczym wg pociętego modelu kolejnych warstw cienkiego włókna¹³). W procesie wytwórczym materiałem mogą być nie tylko popularne termoplastyczne tworzywa, takie jak polilaktyd (PLA) lub kopolimer akrylonitrylo-butadieno-styrenowy (ABS), ale też mniej konwencjonalne surowce, takie jak ceramika¹⁴), nanoglinka lub glina^{15, 16}). Charakterystyczny dla tej metody jest dodatkowy proces obróbki wytworzonego elementu poprzez oszlifowanie i polakierowanie, z uwagi na widoczne na powierzchni wydruku warstwy. Sama nazwa FDM zastrzeżona jest przez amerykańską firmę Stratasys. W opisach drukarek 3D stosowana jest też przez producentów zamiennie nazwa FFF. Trzeba zauważyć, że mimo niewielkich kosztów i krótkiego czasu drukowania w technologii FDM, wytwarzane elementy charakteryzuje dość mała wytrzymałość modeli na granicach warstw, powstałe warstwy są widoczne, a powierzchnia elementu jest nierówna. Problemem jest także usuwanie struktur podporowych, w szczególności z miejsc trudno dostępnych, takich jak szczeliny i otwory. FDM to jednak cały czas idealne narzędzie, by wykorzystywać je do szybkiego prototypowania¹⁷), do małoseryjnych produkcji¹⁸), a także w tzw. medycynie personalizowanej¹⁹). Z uwagi na brak wymogu drogiego sprzętu i form technologia FDM odgrywa kluczową rolę w rozwoju nowoczesnych, dostosowanych do pacjentów rozwiązań medycznych. Zastosowanie nowych rodzajów filamentów, takich jak filamenty wzmacniane włóknem węglowym lub



Dr Elżbieta DOBRZYŃSKA (ORCID: 0000-0003-1595-9663) w roku 2003 ukończyła studia na Wydziale Chemii Uniwersytetu Warszawskiego. W tym samym roku rozpoczęła pracę w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym, gdzie obecnie jest adiunktem w Pracowni Zagrożeń Chemicznych Zakładu Zagrożeń Chemicznych, Pyłowych i Biologicznych. W 2014 r. uzyskała stopień doktora nauk technicznych. Jej działalność naukowa związana jest m.in. z analizą związków chemicznych z wykorzystaniem technik chromatograficznych, oceną narażenia i ryzyka zawodowego związanego ze stosowaniem i występowaniem substancji chemicznych w środowisku pracy. Specjalność – inżynieria środowiska.

kevlarowym, pozwala na znaczną poprawę właściwości mechanicznych wydruków²⁰.

Dostępność FDM sprawia, że na całym świecie tworzone są przestrzenie, tzw. *makerspace*, obejmujące najnowsze rozwiązania technologiczne, które pozostają ogólnodostępne dla wszystkich zainteresowanych. Jedną z pierwszych była przestrzeń twórcza Uniwersytetu Kyungil w Gyeongsan w Korei Południowej, nazwana 3D Printing Center. Umożliwia ona zarówno korzystanie ze sprzętu produkcyjnego w projektach przedsiębiorczych, jak i niekomercyjnych, ale też stanowi wsparcie w firmach typu *start-up*. Podobną przestrzeń dziś można znaleźć również w Polsce, m.in. na Uniwersytecie Warszawskim (tzw. *Makerspace@UW*). Dla użytkowników dostępnych jest 8 stanowisk do druku 3D, 6 stanowisk do druku z PLA oraz 2 stanowiska do druku z PET. Są to idealne narzędzia do rozwijania pomysłów studentów i poniekąd uaktywnienia lokalnej społeczności.

W technologii SLS (inaczej spiekaniu laserowym) laser wykorzystywany jest do spiekania poszczególnych warstw sproszkowanego materiału. Najczęściej używanym tworzywem w SLS są poliamidy (TPU – termoplastyczny poliuretan, TPE – termoplastyczny elastomer) lub proszki metalowe używane w DMLS lub SLM. Technologia selektywnego spiekania proszków jest idealna do tworzenia elementów o skomplikowanej geometrii, jakościowych prototypów i elementów ruchomych, gdyż nie są wymagane tu struktury podporowe²¹. Dostępne wyniki badań wskazują na możliwość wykorzystania SLS w dziedzinie farmacji, poszerzając w ten sposób arsenał technologii druku 3D, które są dostępne do produkcji nowoczesnych leków²². Urządzenia tego typu wymagają zainstalowania laserów o dużej mocy i systemów pozwalających na przepływ ochronnego gazu. Obecnie SLS, DMLS i SLM to technologie kosztowne, drukowanie trwa długo, a drukarki 3D tego typu wykorzystywane są w modelowaniu medycznym, do tworzenia części funkcjonalnych, w prototypowaniu części ruchomych w przemyśle kosmicznym i motoryzacyjnym. Trzeba pamiętać, że powstające elementy charakteryzują się szorstką strukturą, co wymaga dodatkowej obróbki w celu poprawy estetyki i funkcjonalności, a wewnątrz zachowane są puste przestrzenie, co jest charakterystyczną cechą druku 3D opartego na SLS²³. Technologia SLS ma wiele zalet, w tym brak konieczności stosowania struktur podporowych, co umożliwia drukowanie elementów o skomplikowanej strukturze geometrycznej. Umożliwia również uzyskanie wysokiej dokładności w obszarze powtarzalności, wymiarowości, a szeroka dostępność i różnorodność materiałów, w tym możliwość stosowania mieszanych proszków, takich jak kompozyty, zwiększa zakres jej zastosowań²⁴. Jednakże drukowanie w technologii SLS wiąże się z pewnymi wyzwaniem. Należą do nich m.in. wysokie koszty zarówno urządzeń, jak i materiałów eksploatacyjnych, a także czasochłonność, gdyż procesy spiekania i chłodzenia są długotrwałe. Dodatkowo sam proces wymaga, jak wcze-

śniej wspomniano, zastosowania laserów o dużej mocy oraz atmosfery ochronnej, np. gazów obojętnych, takich jak azot lub argon, co dodatkowo zwiększa złożoność technologii²⁵.

Obecnie prowadzone są badania nad ulepszeniem tej technologii w celu obniżenia kosztów produkcji i poprawy jakości wydruków. Jednym z obiecujących kierunków rozwoju jest zastosowanie nowych materiałów, takich jak polimery biodegradowalne, co otwiera drogę do szerszego zastosowania SLS w medycynie, w tym do drukowania personalizowanych implantów i nośników leków. Przykładowo technologia SLS została z powodzeniem zastosowana do drukowania urządzeń medycznych, takich jak ortozy i protezy²⁶. W farmacji natomiast druk 3D pozwala na tworzenie tabletek o złożonej strukturze i kontrolowanym uwalnianiu substancji czynnych²⁷. Takie podejście nie tylko zwiększa skuteczność leczenia, ale również umożliwia dostosowanie terapii do indywidualnych potrzeb pacjentów. Obszerniejszą charakterystykę każdej z tych technologii przedstawiono w publikacji Dobrzyńskiej i współpr.²².

Druk 3D w zastosowaniach przemysłowych

Drukowanie przestrzenne pozwala producentom na wprowadzenie zmian w sposobie projektowania, produkcji, magazynowania i dostaw. Drukując w 3D, mogą oni wytwarzać produkty o pożądanych właściwościach fizycznych i chemicznych, dostosowanych do wybranych zastosowań i aktualnych potrzeb rynku. Działania te przekładają się z kolei na korzyści ekonomiczne przedsiębiorstw. Wykorzystanie coraz bardziej zaawansowanych materiałów do druku pozwala na tworzenie personalizowanych rozwiązań, a w konsekwencji bardziej zaawansowanych i trwałych produktów. Zastosowanie technologii druku w przemyśle jest coraz bardziej powszechne. Możliwości, jakie stwarza drukowanie przestrzenne w porównaniu z tradycyjnymi metodami produkcji powodują, że producenci coraz częściej, częściowo lub całkowicie, przechodzą na ten rodzaj wytwarzania swoich produktów. Wykorzystywanie celem prototypowania i drukowania, np. części zamiennych, powszechnie stosuje się dziś w przemyśle motoryzacyjnym, lotnictwie i elektronice²⁸. Technologie druku 3D uważane są dziś za doskonałe nowoczesne rozwiązanie nawet w produkcji materiałów wybuchowych i napędowych. Umożliwiają one precyzyjną kontrolę wydajności i dokładne formowanie struktury, rewolucjonizując tradycyjne koncepcje produkcyjne i usprawniając ciągłą, zautomatyzowaną produkcję tego typu materiałów²⁹.

Nie dziwi również rosnące zastosowanie w medycynie³⁰, stomatologii i przemyśle farmaceutycznym³¹. Technologia druku 3D znacznie rozwinęła się w stomatologii³², w szczególności w odniesieniu do implantów dentystycznych, oferując wszechstronne rozwiązanie produkcyjne z wykorzystaniem szerokiej gamy materiałów, takich jak polimery, ceramika, metale i kompozyty. Korzyści, jakie niesie ze sobą aplikacja technologii druku 3D to szybkość produkcji,

precyzja i niezawodność, przy jednoczesnym zmniejszeniu lub eliminacji odpadów i potrzeby pracy fizycznej związanej z tradycyjnymi metodami produkcji³³). Przyszłość nauk biomedycznych i opieki skoncentrowanej na pacjencie może zostać całkowicie zmieniona przez druk 3D dzięki dalszym postępom w badaniach i rozwoju tzw. spersonalizowanej farmacji w przypadku dozowania leków³⁴). Według Hu i współpr.³⁵) każda technologia druku 3D dzięki swoim unikalnym cechom i zastosowaniu oferuje możliwości innowacji w dziedzinie preparatów farmaceutycznych. Jednak to innowacje wprowadzane w technologii DLP i SLA znacznie ułatwiają rozwój, m.in. systemów dostarczania leków dostosowanych do indywidualnych potrzeb pacjentów³⁶), chociażby umożliwiając tworzenie złożonych obiektów o nanorozmiarach.

Technologie 3D znajdują zastosowanie również w inteligentnym rolnictwie i przetwórstwie żywności. Dotyczy to nie tylko sprzętów rolniczych i autonomicznych instrumentów, takich jak drony i roboty, umożliwiających zbieranie danych w czasie rzeczywistym na temat zdrowia roślin, poziomów składników odżywczych i stanu gleby, ale też zapewnienia spersonalizowanych rozwiązań żywieniowych, szczególnie w dziedzinie żywienia medycznego³⁷). Druk 3D przyczynia się tym samym do zrównoważonej produkcji żywności, może pomóc zmniejszyć zużycie wody, zapotrzebowanie na siłę roboczą i zużycie energii. Przeszkodą jednak w szerszym zastosowaniu są wysokie koszty, złożona wiedza techniczna i projektowa oraz ograniczenia w szybkości i skali produkcji. Konieczne jest również uwzględnienie kwestii bezpieczeństwa oraz regulacji prawnych.

Produkcja addytywna (AM) w branży budowlanej znacznie skraca czas budowy oraz pozwala skutecznie naprawiać i odnawiać komponenty. Branża ta wciąż jeszcze stoi przed wyzwaniem związanym m.in. z projektami budowlanymi na dużą skalę, zarówno pod kątem zastosowania różnego rodzaju materiałów i drukarek przeznaczonych do tego celu, jak i ich rolę w budowie bezpośrednio na miejscu³⁸).

Producenci nadal mają trudności z szerszym włączeniem technologii wytwarzania addytywnego do swoich procesów produkcyjnych. Mimo tak różnorodnych możliwości, większość użytkowników druku 3D w przedsiębiorstwach nadal wykorzystuje tę technologię jedynie do prototypowania, ewentualnie do produkcji elementów, których nie są w stanie wyprodukować, stosując inne techniki wytwarzania³⁹). Jako główne problemy w tym zakresie wskazywane są takie czynniki, jak oprogramowanie, zapewnienie jakości, siła robocza, finanse, koordynacja procesu technologicznego i organizacja pracy.

Dynamiczny wzrost rynku konsumenckiego w obszarze technologii addytywnych

Raport firmy VoxelMatters^{40, 41}) wskazuje, że rynek konsumencki obejmujący druk 3D przeżywa obecnie niezwykle intensywny rozwój. W 2023 r. w sprzedaży dostępnych

było ponad 36 mln wydrukowanych części produktów konsumenckich. W porównaniu z 2022 r. odnotowano wzrost o ok. 7 mln części (wzrost o 23%). Przepuszczalnie był to efekt powszechniejszego zastosowania technologii addytywnych przez producentów, jak i dostawców usług druku 3D. Firma VoxelMatters przeanalizowała obszerne dane pochodzące od ponad 1500 firm, które zajmują się drukiem 3D oraz dane od 300 końcowych użytkowników. Ostatecznie pod uwagę wzięto wyniki w najważniejszych segmentach funkcjonujących w obszarze druku 3D dotyczące produkcji przedmiotów z przeznaczeniem na rynek konsumencki. Obejmują one m.in. sektor elektroniczny, sportowy i obuwniczy, produkcję zabawek, elementy designerskie, w tym sektor odzieżowy, meblarski, oświetleniowy i optyczny. Analizowane w raporcie technologie addytywne stosowane w tych branżach wykorzystują do druku zarówno polimery, jak i metale. W 2023 r. z materiałów polimerowych wyprodukowano 16,8 mln części, co oznacza wzrost o 18,3% względem 2022 r., w którym wydrukowano ok. 14,2 mln części. Produkcja części z metali pozostaje na nieco niższym poziomie, jednak i tak zanotowano 21-proc. wzrost. Aplikacje kosmiczne przyniosły aż 68,4% przychodów w segmencie cywilnym (szacunkowo 211 mln USD). Zbliżoną wartość z udziałem druku 3D z metali na poziomie 65,9% odnotowano w lotnictwie wojskowym. W 2023 r. rynek druku przestrzennego w sektorze lotniczym osiągnął wartość 1,6 mld USD, a jego ekspansywny rozwój jest napędzany przez coraz powszechniejsze zastosowanie tych technologii w lotnictwie cywilnym i wojskowym, sektorze kosmicznym oraz bezzałogowych statkach powietrznych.

Wielkość globalnego rynku produkcji addytywnej została oszacowana na 17,99 mld USD w 2023 r., a prognozy wskazują, że do 2033 r. osiągnie ok. 110,13 mld USD⁴²).

Bezpieczeństwo materiałów użytkowanych podczas pracy drukarek 3D

Na emisję ultradrobnych cząstek (UFP) i zanieczyszczeń gazowych z druku 3D zwracana jest w ostatnich latach coraz większa uwaga ze względu na potencjalne zagrożenia dla zdrowia użytkowników tego procesu. Badania emisji cząstek stałych, zanieczyszczeń gazowych i ich toksycznego wpływu podczas stosowania różnorodnych materiałów w druku 3D pozwalają określić te najbardziej niebezpieczne skutki i docelowo wybrać bezpieczniejsze tworzywa. Badania te, wielokrotnie opisywane w literaturze^{43, 44}), dotyczą głównie technologii FDM, choć inne technologie również były badane. Jak wykazano, wpływ na emisję substancji chemicznych i cząstek stałych w technologii FDM ma nie tylko skład chemiczny zastosowanego filamentu i wykorzystywana w procesie drukarka 3D, ale również zadane parametry prowadzenia procesu, np. temperatura. Dodatki do filamentu w technologii FDM zmieniają poziom i skład emitowanych substancji chemicznych i cząstek stałych. Nie należy przy tym pomijać substancji

chemicznych wykorzystywanych w procesie pre- i postprocessingu, celem np. wygładzenia powierzchni wydrukowanych przedmiotów. Dlatego z uwagi na ochronę operatorów drukarek i zapewnienie bezpiecznych warunków pracy tak ważne wydaje się umożliwienie doboru mniej emisyjnych materiałów do druku 3D przedsiębiorstwom, w których wykorzystuje się technologię wytwarzania addytywnego⁴⁵.

Powszechność zastosowania drukarek 3D sprawia, że badania dotyczące bezpieczeństwa ich użytkowników podczas procesu drukowania stają się ważnym aspektem wyboru zarówno modelu drukarki, jak i wykorzystywanych do druku materiałów. Przykładowo zespół Zhang⁴⁶ opublikował wyniki badania lotnych związków organicznych (LZO) i emisji cząstek podczas procesu druku 3D w technologii FDM. Przeanalizowano narażenie na badane związki chemiczne w odległości ok. 1 m od pracującej na stanowisku drukarki 3D. Wysokie wskaźniki emisji cząstek określono dla filamentu ABS i poliamidu (nylon). Obniżone wskaźniki emisji cząstek otrzymano dla filamentu z dodatkiem metali i PLA. Wśród 5 najczęściej występujących LZO w 7 z 9 badanych materiałów znalazł się formaldehyd, klasyfikowany jako substancja o działaniu rakotwórczym. Specyficzne dla danego filamentu dodatki okazały się czynnikami powodującymi wysoki poziom emisji niektórych LZO. Drukarki 3D podczas pracy z wykorzystaniem różnych materiałów do druku mogą emitować wiele związków chemicznych, takich jak metale (Cr, As, Pb, Cd i Co⁴⁷) oraz LZO (styren, toluen, formaldehyd, aldehyd octowy, etylobenzen, chlorek metylenu, metakrylan metylu i laktyd), które wg Międzynarodowej Agencji Badań nad Rakiem (IARC) są substancjami rakotwórczymi klasy 1 lub 2 i/lub stanowią zagrożenie dla układu oddechowego⁴⁶. Finnegan i współpracownicy⁴⁸ wykazali zależność emisji LZO (styren, etylobenzen) od koloru i marki używanego filamentu. Zwrócili również uwagę na zwiększanie świadomości na temat zdrowia i bezpieczeństwa podczas stosowania drukarek 3D w środowisku domowym. Do i współpracownicy⁴⁹ podkreślają, że należy zachować ostrożność podczas korzystania z szeroko rozpowszechnionych zabawek, długopisów 3D, w których stosowany jest m.in. filament ABS, ze względu na potencjalne zagrożenia dla zdrowia. Zwracają uwagę na długotrwałe użytkowanie i bliskość strefy oddychania. Autorzy wskazują również na potrzebę uwzględnienia emisji cząstek stałych i lotnych związków organicznych podczas oceny bezpieczeństwa piór 3D.

Ultradrobne cząstki stałe, które są emitowane podczas druku, mogą powodować toksyczność zarówno miejscową, jak i ogólną całego organizmu. UFP, wnikać do dróg oddechowych, przechodzą przez barierę pęcherzykowo-włośniczkową, skąd łatwo rozprowadzane są po całym organizmie⁵⁰. Emisje cząstek podczas druku w technologii FDM mogą osiągać wysokie wartości, jak dowiedziono w wielu pracach badawczych^{51,52}. Średnie stężenia liczbowe cząstek w badaniach prowadzonych przez Dobrzyńską i współpracownicy⁵³ podczas druku 3D w 3 zakładach pracy, gdzie

stosowano różne typy drukarek i filamenty osiągały wartość nawet 60 466 cząstek/cm³, w zależności od liczby drukarek w pomieszczeniu, rodzaju wentylacji i zastosowanych filamentów. Khaki i współpracownicy⁵⁴ zaobserwowali nawet 150-krotne różnice wskaźników emisji cząstek w zależności od marki używanego filamentu, oceniając, że wysokie poziomy emisji cząstek są generowane przez proces podgrzewania filamentu. Jednocześnie przyznali, że wykorzystanie kontrolowanych przez użytkownika ustawień drukowania może zmniejszać emisję cząstek z procesu drukowania 3D. W innych badaniach Felici i współpracownicy⁵⁵ wykazali że to drukarka SLA charakteryzowała się wyższą emisją nanocząstek, ze średnim stężeniem 4091 cząstek/cm³ w porównaniu z 2203 cząstkami/cm³ w przypadku drukarki FDM.

Szkodliwe dla użytkownika związki chemiczne i cząstki stałe mogą być uwalniane w procesie druku pod wpływem wysokich temperatur, ale istotne jest również bezpieczeństwo materiałów stosowanych w urządzeniach, np. medycznych i biologicznych. Powszechnie stosowany w technologii FDM filament PLA jest uważany za materiał biokompatybilny (brak efektów toksycznych), podczas gdy w SLA i innych technologiach wykorzystujących UV stosowane są żywice i fotoinicjatory, które w badaniach *in vitro* wykazują toksyczność^{56,57}. Jednak wytwarzanie produktów farmaceutycznych (np. tabletki doustne), które wykorzystują monomery (np. akrylowe, metakrylanu metylu) budzi obawy dotyczące bezpieczeństwa, ze względu na obecność w wytworzonym produkcie tzw. niezwiązanych monomerów. Monomery mogą w warunkach fizjologicznych ulegać degradacji i hydrolizie, powodować stany zapalne, reakcje alergiczne, a także wykazują działanie toksyczne na komórki. Można je usuwać za pomocą alkoholu izopropylowego, co nie jest wskazane w przypadku powstałych w technologii 3D tabletek, gdyż wiąże się z ryzykiem wypłukania substancji leczniczej i zmiany sposobu uwalniania leku, a nawet zmiany dawki terapeutycznej⁵⁸. Dlatego tak istotne jest sprawdzenie stabilności preparatu terapeutycznego zanim zostanie on połączony z monomerami w celu wydruku tabletek w technologii druku 3D. W pracy zespołu Kreßa⁵⁹ oceniano, czy powlekanie parylenem (obojętnym polimerem), rozpowszechnionym w zastosowaniach medycznych, może chronić komórki przed działaniem toksycznym polimeru. Wszystkie fotopolimery wykorzystane w badaniu znacząco wpłynęły na ograniczenie żywotności ludzkich komórek macierzystych (MSCs), podczas gdy tzw. biokompatybilne żywice miały niewielki wpływ na cytotoxyczność. Dowiedziono, że zastosowanie parylenu w warstwie powlekającej całkowicie chroniło komórki MSCs przed działaniem toksycznym.

Zespół He⁶⁰ przedstawił dane dotyczące emisji cząstek z filamentów na bazie akrylonitrylu-butadienu-styrenu (ABS) i poli(kwasu mlekowego) (PLA) bezpośrednio do ludzkich komórek nabłonka małych dróg oddechowych (hodowla w *air-liquid interface culture system*) podczas

pracy drukarki 3D. Oceniano skutki narażenia komórek na emisję cząstek pod kątem ich żywotności, indukcji stanu zapalnego oraz zmian metabolicznych. Filamenty ABS emitowały większe całkowite stężenie cząstek, a filamenty PLA emitowały mniejsze cząstki w większym stężeniu. Emisje cząstek ABS i PLA charakteryzowały różne składy pierwiastkowe, a tym samym obserwowano różnice w zmianach żywotności narażonych komórek. Indukowały w komórkach stres oksydacyjny i prowadziły do zmiany poziomów markerów zapalenia. Poziomy prozapalnych cytokin, w tym IL-1 β , były znacznie wyższe z powodu narażenia na emisje cząstek ABS. Oba rodzaje stosowanych w badaniu filamentów podwyższały poziomy interleukin IL-6 i IL-8. Emisje cząstek ABS były przyczyną zaburzeń w metabolizmie aminokwasów, zmieniały szlaki regulowane redoks, podczas gdy narażenie na emisje cząstek PLA spowodowało zaburzenia oksydacji kwasów tłuszczowych. Otrzymane wyniki wskazują na toksyczność oddechową emitowanych cząstek podczas pracy drukarek 3D z zastosowaniem filamentu ABS lub PLA.

W pracy Barnett i współpr.⁶¹⁾ pokazano wyniki 3-godzinnej sesji drukowania 3D i poboru próbek cząstek stałych, które były emitowane z ABS i PLA podczas pracy drukarki w klasie szkolnej. Ludzkie komórki nabłonka małych dróg oddechowych zostały użyte do określenia żywotności komórkowej, genotoksyczności, wywołania reakcji zapalnych i zmian metabolicznych po ekspozycji na emitowane cząstki, za pomocą testów odpowiednio MTS, ELISA i wysokosprawnej chromatografii cieczowej połączonej ze spektrometrią mas (HPLC-MS). Ekspozycja na cząstki ABS i PLA zmniejszyła żywotność komórek i powodowała wzrost poziomu białka MDM2 (*murine double minute 2*), inhibitora prowadzącego do degradacji białka p53, który jest swoistym wskaźnikiem niestabilności genomicznej, a emisja cząstek z PLA zwiększyła poziom białka gamma-H2AX, które jest markerem pęknięć dwuniciowego DNA. Emisje cząstek z ABS i PLA również zwiększyły uwalnianie cytokin prozapalnych, a także uruchamiały szlaki metaboliczne związane ze stresem oksydacyjnym i stanem zapalnym. Uzyskane wyniki sugerują, że stosowanie filamentu ABS i PLA w drukarkach 3D w środowisku szkolnym może potencjalnie przyczyniać się do niekorzystnych odpowiedzi ze strony układu oddechowego, szczególnie w przypadku wrażliwych populacji. Jednak poprzez wdrożenie odpowiednich środków zaradczych, takich jak poprawa wentylacji, monitorowanie jakości powietrza oraz edukacja na temat bezpiecznego użytkowania technologii druku 3D, można znacząco zmniejszyć ryzyko negatywnego wpływu na układ oddechowy i zapewnić bezpieczne środowisko edukacyjne.

Biorąc pod uwagę doniesienia o przewlekłej obturacyjnej chorobie płuc (POChP), astmie i innych objawach oddechowych, które zostały powiązane z narażeniem zawodowym na emisje powstałe podczas pracy drukarek 3D⁶²⁾, istnieje pilna potrzeba kontynuowania badań toksykologicznych

w obszarze technologii przyrostowej, tak aby dostępność i popularność drukarek 3D nie przewyższyła obecnej wiedzy na temat ich bezpieczeństwa.

Alternatywne materiały do druku 3D

Innowacje wprowadzane w procesach druku 3D dotyczą nie tylko drukarek, ale i zastosowanych materiałów. Celem wprowadzania nowych rozwiązań jest poprawa ich właściwości, korzyści ekonomiczne, środowiskowe, jak również zmniejszenie lub wyeliminowanie szkodliwości materiału i/lub wydrukowanych z nich przedmiotów. Naukowcy z bostońskiego Massachusetts Institute of Technology (MIT) wykorzystali produkcję przyrostową do wytworzenia cegieł z recyklingowego szkła⁶³⁾. Budownictwo jest jednym z najdynamiczniej rozwijających się sektorów druku 3D, przy czym większość firm skoncentrowana jest na różnorodnych formach zautomatyzowanego lania betonu (warstwa po warstwie). Branża budowlana jest odpowiedzialna za 37% wszystkich odpadów w Europie (wg danych Eurostatu). Zastosowanie szkła z recyklingu do produkcji w technologii 3D cegieł konstrukcyjnych ma istotne zalety środowiskowe. Szkło jest materiałem, który może być poddawany recyklingowi nieustannie. Wytworzone cegły z recyklingowego szkła, które opracował zespół MIT, mają warstwową strukturę i specjalny system połączeń oparty na dwóch okrągłych bolcach. Konstrukcja taka umożliwia bezproblemowe łączenie elementów oraz możliwość otrzymania zakrzywionych ścian. Projekt w kształcie cyfry 8 pozwala na piętrowanie cegieł, dzięki czemu struktury są stabilne, a sama konstrukcja nie wymaga użycia zapraw. Drukarki 3D do szkła opracowane przez Evenline są kompatybilne z piecem, który topi rozdrobnione butelki szklane, przekształcając je w materiał gotowy do druku. Stosując przemysłową prasę hydrauliczną, testowano wytrzymałość konstrukcji w porównaniu z betonem. Co ciekawe, wytworzone cegły szklane osiągnęły wyniki zbliżone do tych generowanych przez tradycyjne bloczki z betonu. Wykorzystanie drukowanych w 3D cegieł ze szkła z recyklingu to nie tylko korzyści ekologiczne, ale też zupełnie nowe możliwości architektoniczne. Takie rozwiązania mogą sprawić, że budownictwo będzie bardziej przyjazne dla środowiska naturalnego.

Proces druku 3D to także powstawanie sporej ilości odpadów, np. w postaci pozostałości filamentów. Prowadzono badania nad wykorzystywaniem pozostałości z procesu druku 3D, m.in. zużytych resztek filamentów lub powstałych podczas drukowania struktur podporowych, lub nieudanych elementów wydruków 3D, lub raftu w formie granulatu. Zespół Liu⁶⁴⁾ przedstawił pracę zawierającą porównanie części wydrukowanych na drukarkach 3D z granulatu z częściami wydrukowanymi z gotowych filamentów. Badanym materiałem było PLA, a wykonane testy zawierały ocenę wytrzymałości oraz sprawdzenia ogólnej jakości wydrukowanych elementów 3D. Dzięki

porównywalnym właściwościom mechanicznym drukowanych próbek dowiedziono, że druk 3D z granulatu pozwala uniknąć konieczności wytwarzania filamentu i daje możliwość recyklingu odpadów termoplastycznych. Podobnie Wei i Bähr⁶⁵) w 2024 r. ocenili przydatność materiałów pochodzących z recyklingu w druku 3D. Wykorzystano PLA z recyklingu do filamentu i drukowano elementy, wykorzystując technologię drukowania metodą topionego włókna (FFF). W celach porównawczych wybrano jako punkt odniesienia filament PLA. Wyprodukowano następujące filamenty: za pomocą granulatu PLA, mieszanki granulatu i PLA, które otrzymano z recyklingu, a także w pełni przetworzonego PLA. Uzyskane wyniki wykazały, że filament wytłaczany z granulatu pierwotnego charakteryzował się podobną jakością i wykazywał właściwości mechaniczne, takie jak filament pierwotny. Recyklingowany PLA wymagał zastosowania wyższej temperatury w procesie wytłaczania i większej prędkości do wytłaczania filamentu w stosunku do pozostałych rodzajów PLA. Filamenty, które wykonano z poddanego recyklingowi PLA charakteryzował niewielki spadek wytrzymałości na rozciąganie i zginanie drukowanych elementów (była ona o ponad 15% niższa) w porównaniu z pierwotnym PLA.

Przedstawione wyniki prac badawczych dostarczają cennych spostrzeżeń w obszarze praktyk przyjaznych dla środowiska oraz w ich dalszym rozwoju w dziedzinie produkcji addytywnej.

Podsumowanie

Technologie przyrostowe stopniowo zmieniają oblicze przemysłu i produkcji. Dzięki wprowadzonym w ostatnich latach innowacjom i udoskonaleniom w branży druku 3D możliwa jest komercjalizacja tej technologii na szeroką skalę, głównie poprzez zastosowania przemysłowe. Zwiększenie szybkości druku, obniżenie kosztów eksploatacji, a także wprowadzanie nowych materiałów do druku (np. nowych filamentów w technologii FDM) sprawia, że stosunkowo łatwe i konkurencyjne staje się wdrażanie tych technologii w zakładach pracy. Jednak mimo licznych zalet, druk 3D nie jest pozbawiony wad. Niektóre materiały lub zastosowane techniki mogą cechować się mniejszą trwałością wytworzonych części. Do tego dochodzą kwestie bezpieczeństwa, takie jak emisje cząstek i szkodliwych substancji, które mogą mieć wpływ na zdrowie, zwłaszcza w środowisku szkolnym i biurowym. Aby zminimalizować maksymalnie ryzyko zdrowotne związane z produkcją addytywną, istotne jest stosowanie odpowiednich środków ochrony osobistej w postaci rękawic, okularów, maseczek i odzieży ochronnej, aby chronić drogi oddechowe, oczy i skórę przed ultradrobnyimi cząstkami powstającymi w procesie wydruku lub podczas postprocessingu (szlifowanie elementów). Kluczowe jest stosowanie odpowiedniej wentylacji w pomieszczeniach, by zminimalizować ryzyko narażenia na szkodliwe cząstki i LZO uwalniane do powie-

trza środowiska pracy. Całkowita zawartość LZO uwalnianych przez drukarki 3D może przekraczać normy jakości powietrza w pomieszczeniach⁶⁶), szczególnie w przypadku środowisk, takich jak domy, szkoły i małe biura, które są niewystarczająco wentylowane. Stosowanie przez użytkownika zgodnie z zaleceniami producenta osłon i obudów drukarek pozwala zdecydowanie ograniczyć obszar rozprzestrzeniania się emitowanych cząstek. Mimo to trwają prace nad ulepszeniem materiałów i procesów, tak by druk 3D stał się jeszcze bardziej wydajny, ekologiczny i bezpieczny. Wybór materiałów do druku, jak i samych drukarek o dowiedzionej zmniejszonej emisji szkodliwych cząstek w procesie drukowania to kolejny element zmniejszający potencjalne narażenie na szkodliwe substancje chemiczne. W 2023 r. Narodowy Instytut Bezpieczeństwa i Higieny Pracy (NIOSH) opublikował przewodnik bezpiecznego prowadzenia procesu druku 3D dla jego użytkowników w przestrzeni produkcyjnej, szkołach, bibliotekach i małych firmach. Zaleca w nich m.in. opracowanie kompleksowego planu zarządzania ryzykiem związanym z drukowaniem 3D, aby zminimalizować narażenie potencjalnych użytkowników drukarek⁶⁷). Świadomość zagrożeń i ryzyka dla zdrowia pozwala uniknąć potencjalnych negatywnych skutków zdrowotnych i zapewnia nie tylko bezpieczne środowisko pracy, ale też bezpieczeństwo użytkownika niekomercyjnego. Jest to ważne, szczególnie teraz kiedy spodziewany jest dalszy zintensyfikowany rozwój tej technologii, zarówno w przemyśle, jak i w życiu codziennym.

Opracowano w ramach VI etapu programu wieloletniego pn. „Rządowy Program Poprawy Bezpieczeństwa i Warunków Pracy”, finansowanego w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rodziny i Polityki Społecznej. Zadanie nr 3.ZS.05, pt. „Ocena zagrożeń chemicznych i pyłowych oraz działania toksycznego materiałów stosowanych w technologiach przyrostowych”. Koordynator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

Otrzymano: 15-12-2024

Zrecenzowano: 19-12-2024

Zaakceptowano: 08-01-2025

Opublikowano: 20-02-2025

LITERATURA

- [1] S. Inayath Basha, A. Ur Rehman, M.A. Aziz, J.H. Kim, *Chem. Rec.* 2023, **23**, nr 4, e202200293, doi: 10.1002/tcr.202200293.
- [2] E. Gkartzou, K. Zafeiris, C. Tsirogianis, A. Pedreira, A. Rodríguez, P. Romero-Rodríguez, G.P. Gakis, T. Kosanovic-Milickovic, A. Kyritsis, C.A. Charitidis, *Polymers (Basel)* 2024, **16**, nr 19, 2760.
- [3] M. Kumi, T. Wang, O. Ejeromedoghene, J. Wang, P. Li, W. Huang, *Small Methods* 2024, **8**, nr 9, e2301341.
- [4] T.O. Akande, O.O. Alabi, A. Rizwan, S.A. Ajagbe, A.O. Olaleye, M.O. Adigun, *PLoS One* 2024, **19**, nr 12, e0308004.
- [5] E.A. Franco Urquiza, *Polymers (Basel)* 2024, **16**, nr 5, 700.
- [6] New Light-Touch Supports for Castable Wax Resin in PreForm 3.4.6, <https://formlabs.com/eu/blog/easier-post-processing-jewelry-3d-prints/>, dostęp 23.07.2020 r.
- [7] D. Shen, M. Zhang, A.S. Mujumdar, C. Li, J. Lin, *Food Res. Int.* 2025, **199**, 115421.

- [8] F. Rezaie, M. Farshbaf, M. Dahri, M. Masjedi, R. Maleki, F. Amini, J. Wirth, K. Moharamzadeh, F.E. Weber, L. Tayebi, *J. Compos. Sci.* 2023, **7**, nr 2, 80.
- [9] A. Dadhich, K. Nilesh, S. Shah, H. Saluja, *Natl. J. Maxillofac. Surg.* 2022, **13**, (Suppl 1), S203.
- [10] The Free Beginner's Guide, <http://3dprintingindustry.com/3d-printing-basics-free-beginners-guide/history/>, dostęp 21.04.2016 r.
- [11] G.I. Salentijn, P.E. Oomen, M. Grajewski, E. Verpoorte, *Anal. Chem.* 2017, **89**, nr 13, 7053.
- [12] *Pat. US 5121329A* (1992).
- [13] S. Deshkar, M. Rathi, S. Zambad, K. Gandhi, *Curr. Drug. Deliv.* 2021, **18**, nr 4, 387.
- [14] J. Han, C. Liu, R.L. Bradford-Vialva, D.A. Klosterman, L. Cao, *Materials (Basel)* 2023, **16**, nr 13, 4636.
- [15] X. Luo, H. Cheng, X. Wu, *Polymers (Basel)* 2023, **15**, nr 14, 2980.
- [16] C. Marquez, J.J. Mata, A. Renteria, D. Gonzalez, S.G. Gomez, A. Lopez, A.N. Baca, A. Nuñez, M.S. Hassan, V. Burke, D. Perlasca, Y. Wang, Y. Xiong, J.N. Kruichak, D. Espalin, Y. Lin, *Sensors (Basel)* 2023, **23**, nr 6, 3352.
- [17] L.C. Duarte, I. Pereira, L.I.L. Maciel, B.G. Vaz, W.K.T. Coltro, *Anal. Chim. Acta.* 2022, **15**, nr 1190, 339252.
- [18] J. Krause, L. Müller, D. Sarwinska, A. Seidlitz, M. Sznitowska, W. Weitschies, *3D Pharmaceuticals (Basel)* 2021, **14**, nr 2, 143.
- [19] J. Ahmad, A. Garg, G. Mustafa, A.A. Mohammed, M.Z. Ahmad, *Pharmaceutics* 2023, **15**, nr 5, 1448.
- [20] R.F. Faidallah, M.M. Hanon, Z. Szakál, I. Oldal, *Int. Rev. Appl. Sci. Eng.* 2024, dostęp on-line.
- [21] J.H. Park, S.J. Tucker, J.K. Yoon, Y. Kim, S.J. Hollister, *J. Biomed. Mater. Res. A* 2024, **112**, nr 7, 1015.
- [22] E. Dobrzyńska, D. Kondej, J. Kowalska, M. Szewczyńska, *Indoor Air* 2021, **31**, 1733.
- [23] C. Morano, L. Pagnotta, *Polymers* 2023, **15**, 4446.
- [24] A. Balasankar, K. Anbazhakan, V. Arul, V.N. Mutharaian, G. Sriram, K. Aruchamy, T.H. Oh, S. Ramasundaram, *Biomimetics* 2023, **8**, nr 4, 330.
- [25] H.M. Yehia, A. Hamada, T.A. Sebaey, W. Abd-Elaziem, *J. Manuf. Mater. Process.* 2024, **8**, nr 5, 197.
- [26] I. Gibson, D.W. Rosen, B. Stucker, *Additive manufacturing technologies. 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*, Springer, 2021.
- [27] F. Fina, A. Goyanes, S. Gaisford, A.W. Basit, *Int. J. Pharm.* 2017, **529**, nr 1–2, 285.
- [28] S.F. Iftekar, A. Aabid, A. Amir, M. Baig, *Polymers (Basel)* 2023, **15**, nr 11, 2519.
- [29] B. Tan, J. Dou, Y. Wen, B. Duan, H. Mo, Z. Wei, J. Zhang, Y. Pan, X. Ding, N. Liu, *Addit. Manuf. Front.* 2024, **3**, nr 3, 200151.
- [30] A.Y. Safhi, *Pharmaceuticals (Basel)* 2022, **15**, nr 6, 678.
- [31] M. Cui, H. Pan, Y. Su, D. Fang, S. Qiao, P. Ding, W. Pan, *Acta Pharm. Sin B.* 2021, **11**, nr 8, 2488.
- [32] F. Zhang, B.C. Spies, E. Willems, M. Inokoshi, C. Wesemann, S.M. Cokic, B. Hache, R.J. Kohal, B. Altmann, J. Vleugels, B. Van Meerbeek, K. Rabel, *Acta Biomater.* 2022, **150**, 427.
- [33] A.Y. Alqutaibi, M.A. Alghauli, M.H.A. Aljohani, M.S. Zafar, *Bioprinting* 2024, **42**, e00356.
- [34] J. Macedo, N.F. da Costa, V. Vanhoorne, C. Vervaet, J.F. Pinto, *J. Pharm. Sci.* 2022, **111**, nr 10, 2814.
- [35] Y. Hu, Z. Luo, Y. Bao, *Biomacromolecules* 2024, doi: 10.1021/acs.biomac.4c01004.
- [36] X. Xu, A. Awad, P. Robles-Martinez, S. Gaisford, A. Goyanes, A.W. Basit, *J. Control. Release.* 2021, **329**, 743.
- [37] M. Padhiary, J.A. Barbhuiya, D. Roy, P. Roy, *Smart Agric. Technol.* 2024, **9**, 100553.
- [38] D. Gřešica, D. Juračka, P. Lehner, M. Krejsa, *Procedia Struc. Integ.* 2024, **63**, 7.
- [39] T.S. Tamir, G. Xiong, Z. Shen, J. Leng, Q. Fang, Y. Yang, J. Jiang, E. Lodhi, F.-Y. Wang, *Heliyon* 2023, **9**, nr 9, e19689.
- [40] Artykuł prasowy 2024, <https://centrumdruku3d.pl/voxelmatters-raportuje-ze-w-zeszlym-roku-na-swiecie-wydrukowano-37-milionow-czesci-i-produktow-koncowych-na-drukarkach-3d/>, dostęp 26.11.2024 r.
- [41] <https://www.voxelmatters.report/product/composites-am-2024/>, dostęp 28.11.2024 r.
- [42] <https://www.precedenceresearch.com/additive-manufacturing-market>, dostęp 28.11.2024 r.
- [43] A.B. Stefaniak, S. Du Preez, J.L. Du Plessis, *J. Toxicol. Environ. Health B Crit. Rev.* 2021, nr 17, 1.
- [44] A. Kangas, K. Kukko, T. Kanerva, A. Säämänen, J.S. Akmal, J. Partanen, A.K. Viitanen, *Ann. Work Expo. Health.* 2023, **67**, nr 5, 596.
- [45] E. Dobrzyńska, L. Chojnacka-Puchta, D. Sawicka, P. Sobiech, T. Janowski, A. Okołowicz, M. Szewczyńska, *Med. Pr. Work Health Saf.* 2024, **75**, nr 2, 159.
- [46] Q. Zhang, M.S. Black, *Environ. Int.* 2023, **182**, 108316.
- [47] G. Tedla, A.M. Jarabek, P. Byrley, W. Boyes, K. Rogers, *Sci. Total Environ.* 2022, **814**, 152622.
- [48] M. Finnegan, C.L. Thach, S. Khaki, E. Markey, D.J. O'Connor, A.F. Smeaton, A. Morrin, *Sensors* 2023, **23**, 9660.
- [49] G. Do, P.J. Tsai, C. Yoon, *Sci. Total Environ.* 2024, **931**, 173003.
- [50] H.S. Kwon, M.H. Ryu, C. Carlsten, *Exp. Mol. Med.* 2020, **52**, 318.
- [51] P. Byrley, B.J. George, W.K. Boyes, K. Rogers, *Sci. Total Environ.* 2019, **10**, nr 655, 395.
- [52] H. Garcia-Gonzalez, M.T. Lopez-Pola, *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 2024, **31**, nr 21, 31188.
- [53] E. Dobrzyńska, D. Kondej, G. Szczepański, A. Okołowicz, *Przem. Chem.* 2023, **102**, nr 1, 975.
- [54] S. Khaki, E. Duffy, A.F. Smeaton, A. Morrin, *Sensors (Basel)* 2021, **21**, nr 9, 3247.
- [55] G. Felici, J.I. Lachowicz, S. Milia, E. Cannizzaro, L. Cirrincione, T. Congiu, M. Jaremko, M. Campagna, L.I. Lecca, *Front. Public Health* 2023, **11**, 1144475.
- [56] C. Lin, Y. Lin, Y. Lai, S. Lee, *J. Prosthet. Dent.* 2020, **123**, 349.
- [57] T. Puškar, B. Trifković, D. Koprivica, V. Kojić, A. Jevremović, S. Mirković, D. Eggbeer, *Vojnosanit. Pregl.* 2019, **76**, 502.
- [58] P. Lakkala, S.R. Munnangi, S. Bandari, M. Repka, *Int. J. Pharm. X* 2023, **5**, 100159.
- [59] S. Krefß, R. Schaller-Ammann, J. Feiel, J. Priedl, C. Kasper, D. Egger, *Materials (Basel)* 2020, **13**, nr 13, 3011.
- [60] X. He, L.M. Barnett, J. Jeon, Q. Zhang, S. Alqahtani, M. Black, J. Shannahan, C. Wright, *Toxics* 2024, **12**, nr 1, 67.
- [61] L. Barnett, Q. Zhang, S. Sharma, S. Alqahtani, J. Shannahan, M. Black, C. Wright, *Front. Public Health* 2024, **12**, 1408842.
- [62] Y. Mohammadian, N. Nasirzadeh, *Toxicol. Ind. Health* 2021, **37**, 573.
- [63] <https://news.mit.edu/2024/engineers-3d-print-sturdy-glass-bricks-building-structures-0920>, dostęp 29.11.2024 r.
- [64] H. Liu, K. Gong, A. Portela, Z. Cao, R. Dunbar, Y. Chen, *Addit. Manuf.* 2023, **75**, 103744.
- [65] X. Wei, R. Bähr, *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.* 2024, **54**, 75.
- [66] A.Y. Davis, Q. Zhang, J.P.S. Wong, R.J. Weber, M.S. Black, *Build Environ.* 2019, **160**, 106209.
- [67] L. Hodson, K.L. Dunn, K.H. Dunn, E. Glassford, D. Hammond, G. Roth, O.H. Cincinnati, Approaches to safe 3D printing: a guide for maker-space users, schools, libraries, and small businesses, DHHS (NIOSH) Publication 2024-103.



przemysł chemiczny 1
Styczeń 2025
100 str. 12,90 zł

KONFERENCJA
przemysł chemiczny
2025

Laureaci Konkursu o tytuł
"Inżynier Przemysłu Chemicznego" 2024

Stowarzyszenie Inżynierów i Techników
Przemysłu Chemicznego

Polub nas
na Facebooku